

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」  
事後評価報告書

平成27年11月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

平成27年11月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
理事長 古川 一夫 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会 委員長 小林 直人

NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」  
事後評価報告書

平成27年11月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

## 目 次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
評価概要	4
研究評価委員会委員名簿	7
研究評価委員会コメント	8
第1章 評価	
1. 総合評価	1-1
2. 各論	
2. 1 事業の位置付け・必要性について	
2. 2 研究開発マネジメントについて	
2. 3 研究開発成果について	
2. 4 実用化に向けての見通し及び取り組みについて	
3. 評点結果	1-23
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1

## はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」の事後評価報告書であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第31条に基づき、研究評価委員会において設置された「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第45回研究評価委員会（平成27年11月20日）に諮り、確定されたものである。

平成27年11月  
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

## 審議経過

- 分科会（平成27年8月20日）

- 公開セッション

- 1. 開会、資料の確認
    - 2. 分科会の設置について
    - 3. 分科会の公開について
    - 4. 評価の実施方法
    - 5. プロジェクトの概要説明

- 非公開セッション

- 6. プロジェクトの詳細説明
    - 7. 全体を通しての質疑

- 公開セッション

- 8. まとめ・講評
    - 9. 今後の予定、その他
    - 10. 閉会

- 現地調査会（平成27年4月22日）

- パシフィコ横浜 展示会場内特設セミナー会場（横浜市西区）

- 第45回研究評価委員会（平成27年11月20日）

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」

事後評価分科会委員名簿

(平成27年8月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	とくち ひとし 戸倉 和	東京工業大学 名誉教授
分科会長 代理	まえがわ かつひろ 前川 克廣	茨城大学 大学院工学研究科 特任教授
委員	おきの けいじ 沖野 圭司	オムロンレーザーフロント株式会社 品質環境部 取締役 部長
	かんなり ふみひこ 神成 文彦	慶應義塾大学 理工学部 電子工学科 教授
	みどりかわ かつみ 緑川 克美	国立研究開発法人 理化学研究所 光量子工学研究 領域 領域長
	やまぐち しげる 山口 滋	東海大学 理学部物理学科 教授
	よしだ みのる 吉田 実	近畿大学 大学院総合理工学研究科 エレクトロニクス系工学専攻 教授

敬称略、五十音順

## 評価概要

### 1. 総合評価

我が国が優位性を有する次世代新素材開発に関して、材料の特性に合わせてフレキシブルかつ高度に加工する技術をレーザーで実現するという目標を掲げ、ほぼ10年間のブランクの後に新たなプロジェクトを計画・実行したことは評価できる。

中間評価以降で各種改善がなされ、一部については事業を中止するなど大きな決断がされて事業運営が適切になされた。定めた目標値も達成されており、特に、極短パルス高出力、高品位レーザー開発とそのCFRP切断加工技術開発に関しては、世界レベル水準の成果が出ていると判断される。半導体レーザーおよび光ファイバメーカーが参画して、レーザー装置に必要な光学コンポーネントを国産で対応できるように周辺技術・部品の開発にも注力され、性能達成を実現できたことは、今後の国産レーザー装置の国際競争力を高めるために有効であった。

CWを含めたパルスファイバーレーザーによるCFRPの切断は挑戦的な目標であり、その成果は大変高く評価できるが、多種の材料に対するファイバーレーザーによる加工技術評価を行うなど、開発されたレーザー装置や周辺の光学機器類の用途を考え、あるいは作り出しても良かったのではないかと考える。

材料加工は、各企業が自社でノウハウを蓄積して保有している知的財産であり、また、技術を汎用化するために、加工装置（レーザー装置）はデファクトスタンダード的に特定既製品が共通に使われている。この状況において、本プロジェクトで開発されたレーザー技術をいかに産業界の現場に供給するか、また、材料および加工目的に強く依存する加工ノウハウの取得・蓄積・供与をいかに国家戦略的にマネジメントしていくかに、引き続き取り組んでいくことを期待したい。

なお、海外プロジェクトでは、自動車メーカーも参加して、技術的な生産上の課題を明らかにし、レーザー技術にフィードバックして性能を改善している。このプロジェクトでも、実施体制をもう一步踏み込めばより素晴らしい成果が期待できたのではないだろうか。

### 2. 各論

#### 2. 1 事業の位置付け・必要性について

レーザー加工に関する国のプロジェクトが途切れていた事もあり、1980年から90年代に比べると、我が国のレーザー加工機産業は欧米に対して遅れをとっている。レーザー加工は従来の金属材料の切断や溶接ばかりでなく、電子機器、自動車、航空機、医療など広範囲の産業で使用されるようになった。新しいレーザー開発を再スタートするとともに、次世代材料等のレーザー加工技術開発を立ち上げるにより、これまでの流れを変えようとしたことで高い意義がある。

ドイツを中心に新産業革命（Industry4.0）が唱えられていてレーザー加工への期待も大きいことから、本プロジェクトは時宜を得たものと言える。



本プロジェクトはこのような背景の下に設置されたものであって、長いブランクを埋める一歩と考えられ、製品化も視野に入ってきたことから、この機運が加速されることも期待でき、NEDOの事業としての妥当性が十分に認められる。

## 2. 2 研究開発マネジメントについて

当初の目標は、欧米のキャッチアップ的要素が多かったが、後半は中間評価の意見を取り入れレーザー開発の方向の見直しが行われた結果、目標のレベルも修正され、出口が明瞭になった点を評価したい。当初の目標のみにとらわれず、状況の変化や技術開発の動向に注意し、常にブレークスルーをもたらすような成果を心がけることが重要である。

レーザー装置開発と加工技術開発の双方に目標を掲げたため、既存のレーザー装置を用いた加工技術開発と、既存レーザーを上回る性能のレーザーを開発する事業を並列して実施した計画は正しい判断であった。ただし、素材構成によって加工条件、加工性能が異なるので、普遍的な加工条件の達成は無理である。より多くの素材について、加工条件と素材構造との相関性を明らかにできるような合理的データベース、あるいは加工条件を見出すための合理的な基本特性等の計測方法といった今後の展開に容易な形での成果のまとめが好ましかった。

レーザー装置、部品に関しては半導体レーザー、光ファイバーのメーカーが参画し技術力を高度に高めた一方で、新素材を実際に応用するメーカーが自動車、航空機、船舶等の分野で多数存在するにも関わらず本格的参画がなく、ユーザーの視点からのプロジェクトへの協力がなかった点は残念であった。

最終的目標を見失わずに事業運営が進められており、企業出身のプロジェクトマネージャーによる高い管理の能力が発揮されていた。世界情勢や技術開発動向の変化に対応して、中間評価の段階でテーマの選択と集中を行なったのは英断である。本プロジェクトの進捗状況ならびに市況などをよく把握し、加速予算が効果的に使用されたと感じる。

## 2. 3 研究開発成果について

中間評価で見直しがされ定めた個別要素技術の目標値については、達成されている。ファイバーレーザー、高出力LD、高出力パルスファイバーレーザー技術など目標を達成し、今後の市場の拡大が見込まれる分野で開発の加速ができたことを評価したい。

ただし、研究開発したファイバーレーザーが必ずしもその特徴を生かしたコンパクトでロバスト性を有するものではないことが気になる点で、今後も装置としての改善は必要である。1、2割増の高出力化のみではすぐに追いつかれる。成果の一例にあるように、非線形光学結晶材料の品質改善や、コーティング、増幅、波長変換などの手法に、さらなるアイデアや特徴が欲しいところである。

ファイバーレーザー技術とその周辺技術の開発が国内で促進されたことは喜ばしいが、本事業は新たな加工産業技術を生み出すというより、かなり狭く特殊な加工分野の従来代替技術を形成したように見える。投じた研究開発予算が実用化・事業化でイノベーションを起こして行くように、光加工技術の方向性について議論を深めていただきたい。

国際シンポジウムを開催し、外国の研究動向を調査する有用な機会とし、またレーザー関連の展示会で広くアピールする活動も積極的であった。なお、得られた研究開発成果を、参加機関以外の国内企業や研究機関に発信する方策も必要である。

#### 2. 4 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

ファイバーレーザーに関しては、日本のメーカーにその技術が使われており、このプロジェクトが開発を加速したことを大いに評価する。高出力 LD の開発など世界トップレベルの開発も実現できており今後が楽しみである。CFRP のレーザー加工も、実用化には今後の評価の継続が必要ではあるが、一定の評価ができる。

ただし、ファイバーレーザー波長変換技術が、十分に生かせる加工技術応用が提示されていない。今後どのような分野を切り拓けるか、基本波を発生するナノ秒やサブナノ秒パルスレーザー光源技術開発も含めて検討すべきである。また、ファイバーレーザー加工の最大の利点であるリモート加工、本プロジェクトで開発した複数波長照射方式による CFRP 加工のポテンシャルユーザーである、車体、航空機、船舶等の構造体メーカーとの橋渡しが必要である。

レーザー装置、個々の加工技術のみで産業を活性化するのは無理であり、個々の加工現場でクローズに開発され実施されているノウハウの価値を、開発者にもメリットになる形で産業展開する方策が重要である。最先端の情報を確保しながら、新材料加工への適用のための基礎的データ取得、実際の加工条件の実現、それらのデータベース化と知財化、知財有償利用の仕組み等を総括的に行うことが望まれる。

## 研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所属、役職
委員長	小林 直人	早稲田大学 研究戦略センター 副所長／教授
委員	浅野 浩志	一般財団法人電力中央研究所 社会経済研究所 副研究 参事
	安宅 龍明	国立研究開発法人産業技術総合研究所 イノベーション 推進本部 上席イノベーションコーディネータ
	稲葉 陽二	日本大学 法学部／大学院 法学研究科 教授
	亀山 秀雄	東京農工大学 名誉教授／シニア教授
	佐久間一郎	東京大学大学院 工学系研究科 附属医療福祉工学開発 評価研究センター センター長／教授
	佐藤 了平	大阪大学 産学連携本部 名誉教授／特任教授
	菅野 純夫	東京大学大学院新領域創成科学研究科 メディカル情報 生命専攻 教授
	丸山 正明	技術ジャーナリスト
	宮島 篤	東京大学 分子細胞生物学研究所 教授
	吉川 典彦	名古屋大学 大学院工学研究科 マイクロ・ナノシステム 工学専攻 教授

## 研究評価委員会コメント

第45回研究評価委員会（平成27年11月20日開催）に諮り、以下のコメントを評価報告書へ附記することで確定した。

- 次世代装置産業のプラットフォーム化に取り組むとともに、加工技術そのもののさらなる開拓も進めていただきたい。

## 第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

## 1. 総合評価

我が国が優位性を有する次世代新素材開発に関して、材料の特性に合わせてフレキシブルかつ高度に加工する技術をレーザーで実現するという目標を掲げ、ほぼ10年間のブランクの後に新たなプロジェクトを計画・実行したことは評価できる。

中間評価以降で各種改善がなされ、一部については事業を中止するなど大きな決断がされて事業運営が適切になされた。定めた目標値も達成されており、特に、極短パルス高出力、高品位レーザー開発とそのCFRP切断加工技術開発に関しては、世界レベル水準の成果が出ていると判断される。半導体レーザーおよび光ファイバメーカーが参画して、レーザー装置に必要な光学コンポーネントを国産で対応できるように周辺技術・部品の開発にも注力され、性能達成を実現できたことは、今後の国産レーザー装置の国際競争力を高めるために有効であった。

CWを含めたパルスファイバーレーザーによるCFRPの切断は挑戦的な目標であり、その成果は大変高く評価できるが、多種の材料に対するファイバーレーザーによる加工技術評価を行うなど、開発されたレーザー装置や周辺の光学機器類の用途を考え、あるいは作り出しても良かったのではないかと考える。

材料加工は、各企業が自社でノウハウを蓄積して保有している知的財産であり、また、技術を汎用化するために、加工装置（レーザー装置）はデファクトスタンダード的に特定既製品が共通に使われている。この状況において、本プロジェクトで開発されたレーザー技術をいかに産業界の現場に供給するか、また、材料および加工目的に強く依存する加工ノウハウの取得・蓄積・供与をいかに国家戦略的にマネジメントしていくかに、引き続き取り組んでいくことを期待したい。

なお、海外プロジェクトでは、自動車メーカーも参加して、技術的な生産上の課題を明らかにし、レーザー技術にフィードバックして性能を改善している。このプロジェクトでも、実施体制をもう一步踏み込めばより素晴らしい成果が期待できたのではないだろうか。

### 〈肯定的意見〉

- 長いブランクを経てレーザー関連のプロジェクトを立ち上げたことは評価できる。長期にわたるプロジェクト期間に世の中の状況が大きく変化したにもかかわらず、中間評価による修正を加えながら、一定の成果が得られたことは評価に値する。
- ほぼ10年間のブランクの後に始まった、レーザー開発のプロジェクトであり、レーザー開発そのものに対する肯定的な環境を作り出した事自体に大きな意味がある。本プロジェクト以外の、新たに立ち上がった他のレーザー関連開発案件にも良い影響を与えていると考えている。国内の主要レーザーメーカーの力を結集し、それぞれ独自性のある目標に向かって得意分野を軸に開発を行え、成果を上げることができた。光学機器の頂点の一つである高出力レーザー開発が進められ、長期間途絶えていた分野の開発が再開したことにより、光学分野全般（産業を支える裾野企業）への波及効果が得られている。

- ・ 次世代新素材開発に関しては諸外国に比べて優位性を有する我が国の産業において、材料の特性に合わせてフレキシブルかつ高度に加工する技術は不可欠であり、それをレーザーで実現するという目標を掲げ、外国製レーザー装置に先行されていた国内レーザー技術を新素材加工にふさわしい性能まで高め実用性を実証した本プログラムの成果は、単に CFRP 切断を従来の水ジェット加工よりも高速にできたという実験結果以上に重要なものであると評価する。加えて、本プロジェクトではレーザー装置に必要な光学コンポーネントを国産で対応できるように周辺技術・部品の開発にも注力された点が重要である。半導体レーザーおよび光ファイバメーカーが本格的に参画して性能達成を実現できたことは、今後の国産レーザー装置の国際競争力を高めるために非常に有効な国家予算注入であった。
- ・ 暫くレーザー関係の国プロジェクトが途絶えていた中、新たにプロジェクトを計画実行し、光技術の応用であるレーザー技術を注視したことを評価する。特に、海外に対し遅れていたファイバーレーザー技術に関し、日本メーカーである古河電工が、開発を加速し製品化を実現した点、浜松ホトニクスが LD の高出力化を実現し、一部の技術が産業応用で利用されたことは意義があったと考える。また、大阪大学では、レーザーの高出力化につながる要素技術の開発を行うことが出来た点、産業技術総合研究所では、ファイバーレーザーによる CFRP 加工の基礎データ取りができた点を評価する。
- ・ 総合的に中間評価以降で各種改善がなされ、一部については事業を中止するなど大きな決断をされていて事業運営が適切になされた。また、定めた目標値も達成されており評価できる。
- ・ レーザー開発に関しては、欧米の先端技術へのキャッチアップというほぼ当初の目標を達成したばかりでなく、それを追い越す成果が得られている点は高く評価できる。また、尾形 PL の強力なリーダーシップのもと、CFRP の切断においても使えるレーザー装置を駆使して、その有効性を実証し、今後の発展につながる成果および知見が得られている。
- ・ レーザー開発においては、本プロジェクトでの開発によりその道筋が明確になったのにくらべると、CFRP の加工においては、ある程度の知見は得られているが、未だ発展の余地が多分にある。今回得られた実験データを更に積み上げることにより、より定量的な解析が可能になり加工の道筋が明確になることが期待される。
- ・ 極短パルス高出力、高品位レーザー開発とその CFRP 切断加工技術開発に関しては、世界レベル水準の成果が出ていると判断される。複合材料のレーザー切断技術への適用とその結果についても興味深い。レーザー加工技術は、機械加工やウォータージェットと比較して、出力以外にもビーム径や波長なども制御できるため、複合材料の加工に向いていると考えられる。

#### 〈改善すべき点〉

- ・ パルスファイバーレーザー発振器の研究の中には論文発表などの成果は認められるも

のの実用化への取り組みがやや希薄なものが見受けられた。また、ファイバーレーザー固有の特徴を生かした利用方法の開発や、研究開発した装置の導入を産業界に促進するといった視点が必要であったと思われる。数値目標のみの達成ではなくファイバーレーザー固有の特徴を生かした「新たなレーザー」と「加工技術」をセットにして市場を開拓できるような成果を得るように、プロジェクト方向の改善は必要である。高出力レーザー加工機を製造販売している複数企業からの意見聴取は、複数回行われてはいるが適切な研究方針の策定のフィードバックを行うまでには至らなかったことが、原因であると思われる。

- 本事業で開発した **QCW** ファイバーレーザーやパルスファイバーレーザー装置が他のレーザー装置と比較してどのような優位点があるか、再度十分な検討が必要である。レーザー加工は、レーザー装置の光技術の機能を向上させて切断幅を狭くしただけでは生産に受け入れられる品質を得られるわけではない。加工ノズルの流量・圧力・流速・ガス成分、ビームの強度・散乱、わずかな不安定性に大きく左右される。次世代の被加工材料の典型として選んだ付加価値が高くはない複合材料の添加物の度合いに大きく依存し、適切な加工因子を特定し一般化することは、大変困難である。それ以外の材料、例えば金属の加工では、他のレーザー光源に対してファイバーレーザーではどのような効果があるのか、材料加工時の粘性変化、熱物性値の変化など民間だけではなかなかしえぬ検証方法を用いたプロジェクトから加工現場への情報発信がほしいところである。
- 「**QCW** ファイバーレーザーによる **FRP** の切断」で得られた成果は、大変高く評価できる。しかし、他の「切断」「溶接」「表面処理」といった加工技術分野の成果はあまり見られない。開発したファイバーレーザーの特徴が生かせる点はそれぞれ何であるのかを検討してプロジェクトの目標にフィードバックするようなことが行われるよう改善を願いたい。
- 用途が明確されたレーザー開発は良い面もある。しかしながら市況の変化などにより受ける影響も少なくなく、難しい面もあると考える。レーザー開発のみを目指す場合には文科省系のプロジェクトとなるのだと思うが、新しいレーザーはそれ自体が新しい用途や従来技術では実現できなかった加工技術を生み出す可能性も有るため、市場への展開が予想以下になったとしても、開発されたレーザー装置や周辺の光学機器類は新規な領域に波及し、踏み込んでいるはずであるから、その用途を考え、あるいは作り出しても良かったのではないかと考える。新しい技術の種を生かしたいという意志は、開発者が最も強く抱いているはずなので、その意志が生かせる仕組みが有っても良かったのでは無いただろうか。
- 「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」という事業課題名に対して、研究開発事業の内容は、ファイバーレーザー発振器と周辺光学系の開発が主であり、進めた次世代素材の加工技術成果が「**QCW** ファイバーレーザーによる **FRP** の切断」に限られていたことは否めない。選定された被加工材料が大変複雑であり、かつ、熔融をあまり伴わないアブレーション加工であることから、特殊な加工技術で挑戦的とも



言えるが、材料は FRP のみではなく多種にわたって可能性能全般を評価すべきではなかったのか、プロジェクトの成果を発表した時の公共性といった視点から目標値設定の改善を要するであろう。

- 注文をつけるなら、個々に開発された要素技術、装置を協働させて1つの目標を実現するデモンストレーション的な集大成を行う時間的な余裕がほしかった。また、プロジェクト運営として、中間評価以降の開発内容の軌道修正は適切であったと思われるが、発展的に本プログラムから外れ事業展開フェーズに移行したはずの「粉末成型技術の開発」が、チタン材料からアルミ材料にシフトすることで難易度的な問題に直面し、本プロジェクト内での発展的展開の流れで性能を極めるまで進められなかったのは残念である。
- 表面改質のプロジェクトに関しては、プロジェクト開始時点から意義、アプローチに関して慎重に進めたほうが良かったのではないかと考える。

#### 〈今後に対する提言〉

- プロジェクトではメンバー構成が最も重要と信じている。実際にリーディング企業に参加を促したようにも聞くが、それが実現できなかつたことは残念である。ジェネラルマネージャーがしっかり組織を作り、監督が組織の能力をしっかり引き出せば成果は必ず付いてくる。このプロジェクトで前者の役割は理解できるが、現場を預かる監督の存在が見えにくいように感じた。しっかりした組織ができないならば引き返す程度の意識を持って臨む時代が来ることを期待する。またプロジェクトを通じて組織を越えた人脈形成が芽生えれば、将来の大きな財産になる。
- 欧米を意識することはやむを得ないかも知れないが、先を進む意識を前面に出せるとなおよい。適当な例ではないが、アスリートが金メダルを獲得しようとする姿勢のようなものが見えるとよい。
- プロジェクトの成果が数多く上がっているのにも拘らず、優位性が分かりづらい。世界水準の技術の進化も示しながら、現状と今後の展開について俯瞰する工夫が必要である。
- パルスファイバーレーザーは目標設定がきわめて高いテーマがあり、研究論文は発表できるものの、新たな産業を築きあげるといった点に重点が置かれてこなかったのではないかと考えられる。このような高い目標設定を行う必要性も状況により認められるが、実用化の出口戦略が常に必要であろう。大学の研究者の業績評価は、論文数に重点がおかれ、企業の開発者の事業貢献評価や知的財産権の獲得とは異なることも一因であろう。大型の先端技術開発国家プロジェクトに大学の研究者が参加する場合は、一定期間業績評価方法を変更するよう NEDO から大学側に求めるなどして産業応用への側面からの協力を求めなければ、産業に必要な技術が得られないであろう。
- 海外のプロジェクトには、自動車メーカーもそのプロジェクトに参加し、技術的な生産上の課題を明らかにして、レーザー技術にフィードバックして性能を改善している。プロジェクトの発足時から指摘されていたことと思うが、参画メンバーの多様化は、

今後、必要ではないか。

- レーザー開発を実施する企業の幅を、もう少し小さな企業まで広げる工夫や、光部品を開発している裏方の企業まで巻き込むような形にすれば、裾野の広がりが期待できるのではないかと考える。ただし、中小の企業を含める場合は、その企業の技術力への目利きや経済的基盤などに対する十分な事前の確認が必要になる。
- 利害関係が絡み合う参加企業をまとめて成果を上げることは決して容易ではない。プロジェクトの成否は組織構成に大きく依存する、このプロジェクトでももう一步踏み込めばより素晴らしい成果が期待できたのではないだろうか。材料メーカーの参入は大変よいことであり、さらにその貢献具合が見えるとよい。CFRPの適用例として自動車を示されているが、自動車メーカーがプロジェクト組織になかったことは痛い。
- 素材メーカーや材料研究者等との連携研究を強化することにより、キャッチアップでなく、真にオリジナルなものが出てくることが期待される。特にレーザー加工においては物理過程が複雑であり、材料面からの検討や理論面からのバックアップ等も今後の発展には不可欠である。
- 本プロジェクト開始以来、諸外国のファイバーレーザー開発研究も加速しており、本プロジェクトにおいて開発されたレーザーが世界最高の性能を保ち続けられるものではない。引き続き性能向上等の開発継続が望まれる。一方、CFRPを水ジェットで加工できる性能の実現によって、多くの素材メーカー、構造体製造メーカーが本技術に殺到する展開が劇的に起きているわけでもない。従来より、材料加工は各企業がノウハウを蓄積して保有している知的財産であり、自社開発で進められてきた分野である。また、少しでも技術を汎用化するために、使用する加工装置（レーザー装置）はデファクトスタンダード的に特定既製品が共通に使われている背景がある。この状況において、本プロジェクトで開発されたレーザー技術をいかに産業界の現場に供給するか、また、材料および加工目的に強く依存する加工ノウハウの取得・蓄積・供与をいかに国家戦略的にマネジメントしていくかに取り組まなければ、本プロジェクトで作製したレーザーマシンショップでの試作、レーザー科学研究分野のみへの技術貢献で終わってしまう危惧がある。
- 日本メーカーは、材料に強いという特徴があり、その分野の特性を生かすことが重要と考えるが、材料の加工性の面でも、レーザーなどの加工機メーカーと協業し、生産性の高い材料の開発を実施するような方向性も重要と考える。この5年間に、世界では高出力の極短パルスのレーザーなどの技術の進捗がある。今回、開発した一部の技術は、次のプロジェクトで利用し、継続性をもったプロジェクトの進め方を希望する。
- 研究開発において世界水準をめざすのは当然であるが、水準以上の目標設定が必要であると同時に、事業化あるいは具体的な適用を見据えた研究開発を目指すべきである。このプロジェクトの実施によって、高出力、高品位レーザー開発では世界水準のツールが得られたので、それを使った加工技術の発展、あるいは新規開発が望ましい。日本の得意とする「ロボット技術」との融合、機械システムとしての小型化や低コスト化、省エネルギー化などが継続テーマと考えられる。その具体例として、例えば、遠

隔操作が必要な原子炉や産業廃棄物の解体・廃棄処理への展開を挙げたい。

- ファイバーレーザーの励起光源は、変調も容易なことから加工時の光強度の時間推移を容易に調整できるはずである。複合材料の加工で得た知見は、例えば医療応用にも可能ではないだろうか。
- 熱伝導と光吸収の変化の複雑性は、複合材料と生体の皮膚で類似する点がある。基本波の波長では、タンパクや水の吸収が少なく皮膚への侵襲深さが炭酸ガスレーザーよりけた違いに大きいため、どのような出力のレーザーで治療を行うかファイバーレーザーでは検討の余地が残るが、レーザーの光強度を1パルス内で時間域で大きく変えて加工や治療の効果を見るなどの研究は今後必要であろう。

## 2. 各論

### 2. 1 事業の位置付け・必要性について

レーザー加工に関する国のプロジェクトが途切れていた事もあり、1980年から90年代に比べると、我が国のレーザー加工機産業は欧米に対して遅れをとっている。レーザー加工は従来の金属材料の切断や溶接ばかりでなく、電子機器、自動車、航空機、医療など広範囲の産業で使用されるようになった。新しいレーザー開発を再スタートするとともに、次世代材料等のレーザー加工技術開発を立ち上げることにより、これまでの流れを変えようとしたことで高い意義がある。

ドイツを中心に新産業革命（Industry4.0）が唱えられていてレーザー加工への期待も大きいことから、本プロジェクトは時宜を得たものと言える。

本プロジェクトはこのような背景の下に設置されたものであって、長いブランクを埋める一歩と考えられ、製品化も視野に入ってきたことから、この機運が加速されることも期待でき、NEDOの事業としての妥当性が十分に認められる。

#### 〈肯定的意見〉

- 炭素繊維素材を含めて我が国の新素材開発は高い国際的競争力を有しているが、フレキシブルでかつ高性能加工技術の実現とそれによる産業応用への展開は、卵と鶏の関係にあり、国家プロジェクトによって前者をバックアップして実現することは必要な事業であった。新素材は、多くの産業分野に展開可能であり、その加工技術開発の公共性は高く、NEDOのサポートはタイムリーでかつ妥当であった。プロジェクト開発時からの諸外国の材料開発、レーザー装置開発の状況を見ても、依然としてとくに新材料開発における我が国の優位性は揺るがず、レーザー加工技術を実現し、多様なレーザー加工の可能性を引き出したことは、これからの戦略設定に資する要素技術が出来上がったことを意味し、今後の我が国の産業政策動向を左右する意義あるプロジェクト成果になっている。
- レーザーは産業全般に利用されており、新しいマザーマシンの開発という観点から、NEDOの事業としての妥当性は極めて高い。日本産業の得意とする、化学系（CFRP）、電子系（液晶、半導体レーザー、ファイバー）、加工系（三次元造形）の分野に切り込んでいる。5年間で市場の変化が生じた分野もあるが、次世代につながる最先端の要求に基づき計画が立てられており、事業の目的は十分に検討された高い妥当性を有している。
- 2000年代に入り、我が国の製造業大手がレーザー産業から離れるに加えて、レーザー加工に関する国のプロジェクトがなかった事もあり、我が国のレーザー加工産業は欧米に対して大きな遅れをとっている状況の中で、今回のプロジェクトはその復活のきっかけとなることが期待できる。世界的には、IOTやIndustry4.0が唱えられているなかで、レーザー加工が果たす役割は非常に大きく、今回のプロジェクトは時宜を得たものである。
- 機器開発に関わるテーマではまとまった成果が得られていて、事業化も含め将来の発

展も期待できる。長いブランクを埋める一歩と考えられ、NEDOの事業としての妥当性が十分に認められる。

- 海外の技術レベルにキャッチアップする点では、海外メーカーの技術的な進展もあり、まだ不十分なところもあるが、出力6kWのファイバーレーザーの製品化など良く使われるクラスの開発には成功しており、今回のプロジェクトの意義があったと評価する。また、プロジェクトに参加しなかった企業もファイバーレーザーの開発を自社で行い製品化を実施している。プロジェクトがあったことにより、開発が加速され、日本内にも複数のメーカーが出現したと考えられる。
- NEDOの事業により産官学が連携して先端的な光技術の研究開発を継続させた意義は大きく、ロボット搭載なども可能な技術であるので、今後の実用化と事業化でさらなる発展を期待したい。
- 今回のプロジェクトの目標は、新しいレーザー開発を再スタートし、同時に加工などの応用技術の開発を立ち上げる点にも有り、これまでの流れを変えたという意味で高い意義が有る。このプロジェクトの後に他機関からレーザーに開発の大型案件が立ち上がったことから明らかである。
- 単に加工できる技術を取得するだけではなく、外国製品に席卷されていた加工用レーザー装置を国内代替技術で置き換え、導入・保守における著しい利便性を得ようとした場合、製品を構成するキーとなるコンポーネント自体の開発が不可欠であり、それらを国産で賄うことは不可欠である。今回、高出力半導体レーザー、レーザーファイバ、関連光学部品を開発するにあたり、投入した予算規模も妥当であった。
- 本プロジェクトの予算規模は、ドイツなどと比較すると極めて小さな規模であり、また、しばらく休止していたレーザー開発関連のプロジェクトを、複数の企業を束ねて立ち上げており、国内プラットフォームの立ち上げという面でも十分な成果が得られていると考える。

## 2. 2 研究開発マネジメントについて

当初の目標は、欧米のキャッチアップ的要素が多かったが、後半は中間評価の意見を取り入れレーザー開発の方向の見直しが行われた結果、目標のレベルも修正され、出口が明瞭になった点を評価したい。当初の目標のみにとらわれず、状況の変化や技術開発の動向に注意し、常にブレークスルーをもたらすような成果を心がけることが重要である。

レーザー装置開発と加工技術開発の双方に目標を掲げたため、既存のレーザー装置を用いた加工技術開発と、既存レーザーを上回る性能のレーザーを開発する事業を並列して実施した計画は正しい判断であった。ただし、素材構成によって加工条件、加工性能が異なるので、普遍的な加工条件の達成は無理である。より多くの素材について、加工条件と素材構造との相関性を明らかにできるような合理的データベース、あるいは加工条件を見出すための合理的な基本特性等の計測方法といった今後の展開に容易な形での成果のまとめが好ましかった。

レーザー装置、部品に関しては半導体レーザー、光ファイバーのメーカーが参画し技術力を高度に高めた一方で、新素材を実際に応用するメーカーが自動車、航空機、船舶等の分野で多数存在するにも関わらず本格的参画がなく、ユーザーの視点からのプロジェクトへの協力がなかった点は残念であった。

最終的目標を見失わずに事業運営が進められており、企業出身のプロジェクトマネージャーによる高い管理の能力が発揮されていた。世界情勢や技術開発動向の変化に対応して、中間評価の段階でテーマの選択と集中を行なったのは英断である。本プロジェクトの進捗状況ならびに市況などをよく把握し、加速予算が効果的に使用されたと感じる。

### (1) 研究開発目標の妥当性

#### 〈肯定的意見〉

- ・ 当初の目標は、欧米のキャッチアップ的要素が多かったが、後半は中間評価の意見を取り入れレーザー開発の方向の見直しが行われた結果、欧米の技術を上回るような成果が得られた。
- ・ 中間報告の段階では、産業の応用という目的に対して遠いと感じる点があったが、それ以降のマネジメントにより、目標のレベルも修正され、出口が明瞭になった点を評価したい。
- ・ 日本国内が国際競争力を持つ分野を出口に、日本がまだ競争力を残している半導体レーザー、高調波結晶技術ならびに通信技術で培ったファイバー部品を軸に据えたレーザー開発を行っており、開発目標は妥当である。
- ・ 国際シンポジウム等の諸外国のレーザー開発動向を分析し、適切に達成目標の上乗せ、加速を判断した情勢変化への対応性は本プロジェクトのマネジメントの中で評価すべき事項である。

#### 〈改善すべき点〉

- ・ NEDO の活動として相応しい成果が得られた開発もあるが、加工技術については必ず

しも満足できるものとは言えない。

- 技術の進歩は早く、当初立てた目標も5年間の計画では、陳腐化することがある。今回の目標の設定は、一部当初よりキャッチアップ的な面もあったが、当初の段階でより高い目標でもよかったのではないかと思う。

#### 〈今後に対する提言〉

- テーマ設定でCFRPの加工技術がキーワードとなっている。CFRPは確かに新素材として注目されてはいるが、本プロジェクトの目玉として相応しかつたであろうか。海外調査をして目標を設定しているとは言え、突き抜けるような目標設定が欲しかったように感じる。設定された目標を満たすことはプロジェクトの第一の課題であるが、拡張性や普遍性のある成果も期待したい。
- かつてのプロジェクトと比較して、NEDO側の柔軟性が高まっている様に思えるが、今後も市場環境や他国における開発動向などを参考にして、適切な開発目標を設定できるように目標値そのものを常に監視するような仕組みが必要と思われる。
- 当初の目標のみにとらわれず、状況の変化や技術開発の動向に注意し、常にブレークスルーをもたらすような成果を心がけることが重要。
- プロジェクトの目標を満たした点は多く認められる。しかし、目標設定が世の動向に対応できるものであったろうか。世の動きは急で、とりわけ先端産業では驚くほど速い。加工技術の対象は極めてホットな材料であることから、ツールをレーザーに限って進めることが厳しい場合もある。
- 市場動向、政策など近年の半導体産業の環境変化はプロジェクト実施者の想定を超えるものであったと思われる。そのような背景を考慮したうえでも、表面改質は、テーマとしてすべきものであったか、あるいは中間評価以降も大幅な変更をせずに継続すべきであったか疑問に思う。最近の技術的な進歩、国際情勢の変化は、激しく、プロジェクトとしての先見性の面で反省するところがあるのではないかと感じた。

#### (2) 研究開発計画の妥当性

##### 〈肯定的意見〉

- レーザー装置開発と加工技術開発の双方に目標を掲げたため、カスケードなプロジェクト運営では期間内での実現が難しいことから、既存のレーザー装置を用いた加工技術開発と、既存レーザーを上回る性能のレーザーを開発する事業を並列して実施した計画は正しい判断であった。
- レーザー装置開発においては、ブースター増幅器をファイバーレーザーで実現すべく新型ファイバー技術とコヒーレント結合技術の導入に舵をとった判断も素晴らしいと評価する。

##### 〈今後に対する提言〉

- 加工分野に関しては手法を限った取り組みは苦しさがあるように思う。本プロジェクト

トの目的とは異なるかも知れないが、CFRPを対象物として掲げるならば、多様な手法で、多様な組織が取り組んだ方がよいのではないか。

- CFRP 切断加工は、素材構成によって加工条件、加工性能が異なるので、普遍的な加工条件の達成は無理である。より多くの素材について、加工条件と素材構造との相関性を明らかにできるような合理的データベース、あるいは加工条件を見出すための合理的な基本特性等の計測方法といった今後の展開に容易な形での成果のまとめが好ましかった。
- 切断接合、表面処理は、材料に依存するとともに応用の側面からの加工性能が付随するため、ゴール設定があいまいになりがちである。ある加工速度で、ある材料が切断できた条件が、すべての材料に適用できるわけではない。また加工精度等を高く要求すれば加工速度は低くしなくてはならないであろう。今までにない性能で、とくに水ジェット加工をしのぐ性能で、ある構造の炭素繊維材料を切断できたり、大面積表面改質を実現し、またチタン合金粉末成型に成功した事実は紛れもない目標達成でありプロジェクトマネジメントの成果であるが、新たな材料、新たな熱加工課題が生まれた際、いかに材料特性を分析し、基礎データを取得し、どういった手順でレーザーとの相互作用を調べ、その際、何を基礎データとして計測するのが有効で、その結果をもとにレーザーのどういうパラメータを変化させながら実験を行うのが有効であるかといった方法論をいくつかの例を挙げながら構築することを「加工技術開発」のコアにさせていただきたくかった。また、最後の半年で個々に高度に開発された要素技術、装置を協働させて1つの目標を実現するデモンストレーション的な集大成をいかに行うかをプロジェクト参加者で協議し実施する時間的な余裕がほしかった。とくに、高出力半導体レーザー開発が、いずれのレーザー装置開発にも利用されなかったのは残念である。
- 新たなテーマを途中から組み込むことは難しくても、開発期間の途中から必要性が明らかとなった複数の小型のプロジェクトを並列して立ち上げ、運用することができれば、効率と敏捷性の高いプロジェクトを継続して実施できるのでは無いだろうか。
- 5年間の中でも早期に切り分けられた事業が有る様に、5年間で終了させるには惜しい研究テーマもあった。そのような案件を切り分けて新たに継続できるような仕組みがあれば良いと思う。もちろん、実施者のモラルを維持するために、一旦は終了させて、継続のための審査がなされる必要があると考える。
- チタン合金粉末成型は、単なる立体成型に終わらず、機械的、熱的強度を詳細に評価して加工方法にフィードバックをかけて完成し、さらにチタン以外の材料に適用する可能性を調べるまでを本プログラム内で進めたほうが成果が大きかったのではないか。

### (3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

#### 〈肯定的意見〉

- 要素技術開発の充実がみられ、技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定



していることは十分に評価できる。

- ・ 東日本と西日本の両方に拠点が存在し、参加企業の幅が広がったことは評価できる。産総研と阪大各々で特徴の有る動きをしつつも、最終的目標を見失わずに事業運営が進められており、企業出身のプロジェクトマネージャーによる高い管理の能力が発揮されていた。また、出口ユーザーとの連携も能くなされており、実用的な光源装置が開発されている。

#### 〈改善すべき点〉

- ・ 多くの総合電機メーカーがレーザー開発に取り組んできた過去の我が国の実態は、レーザー技術の土台作りと人材育成面で無駄にはなっていないが、大きな産業として展開する機会に逸してしまった要因でもあった。レーザー装置、部品に関しては半導体レーザー、光ファイバーの部品メーカーが参画し技術力を高度に高めた一方で、新素材を実際に応用するメーカーが自動車、航空機、船舶等の分野で多数存在するにも関わらず本格的参画がなく、ユーザーの視点からのプロジェクトへの協力がなかった点は残念であった。
- ・ レーザー加工技術開発において、切断以外の加工技術、すなわちアニールや接合などの研究成果に関しては、見劣りがする。期間中にテーマの選択と集中は必要だが、オールジャパンで取り組むようなテコ入れが欲しかった。
- ・ CFRPの重みが大きく感じられるプロジェクトである。材料メーカーが参加されたことは評価できるが、公共性を主張するためにはユーザー企業の参入がなかったことが悔やまれる。
- ・ 企業の体質（風土）上致し方の無い面もあるが、日本を支える産業である自動車分野のユーザーが含まれていなかったのが残念である。
- ・ 三菱重工のMRJは、当初の予定よりもCFRPの使用量を減らしている。その理由などを確認できれば、今後課題となるであろう問題点を早期に確認できていた可能性がある。自動車メーカーなどと共に、重工メーカーがユーザーとして入っていないことが残念である。
- ・ 事業に相応しいリーディング企業の参加が事業の成功を意味するものではないが、プロジェクト成功にはユーザー企業の参加も欲しかった。

#### 〈今後に対する提言〉

- ・ 本プロジェクトに限らず、中核的技術の研究開発に関しては、オールジャパンで取り組む意識の醸成と組織マネジメントが必要である。
- ・ 体制作りは最も重要である。大変難しいことではあるが、実りある成果を得るにはユーザー企業の情報は不可欠である。何とか参入しやすくする方策はないのだろうか。業種によっては一企業では費用負担に耐えられない時代になった。このようなプロジェクトでも思い切った組織作りと大胆な目標設定ができてよい時期に来ているのではないだろうか。レーザーをキーワードとした産業分野でも知恵を共有できる場が

できるとよく、NEDOの貢献が楽しみである。

- 今回は、大阪大学、産業技術総合研究所が中心になる活動を実施し、企業間のつながりもあった点があるが、日本は、企業間の共同の研究開発では、マネジメントに弱さがあると思う。このような大型のプロジェクトでの企業間の連携のあり方などを、国の競争力のアップの点で考えるべきではないかと考える。ドイツでは、F研究所がレーザー関係で中心的な位置にいて、プロジェクトの成果が、公的に集積され、人財の開発も同時に実施されて広く産業界に普及する体制ができている。日本は、大企業が個別にプロジェクトを実施し、開発した技術が、その企業のみに残るだけで、技術の継承の面で弱さがある。
- 大阪とつくばに分かれて行ったことのメリットもあるが、デメリットもある。CFRP加工も、加工装置の上流であるレーザー開発拠点に集中させて実施できれば相互の連絡が良くなり、効率が上がったのではないと思われる。単一拠点化も検討すべきだったのではないか。
- 産官学での連携がある程度は機能しているが、それぞれに固有の開発場所で固有の装置の実験を実施しているため、今後開発の相乗効果を上げるような努力が必要である。
- 短い期間に並列して開発を進める開発期間短縮する意義は大きい。しかし、国内で浜松ホトニクスが開発した励起光源を古河電気工業で使用して最終製品を組み上げるようなことはできていない。今後、プロジェクト内で完成した製品を相互に評価し合うように改善をするべきであろう。

#### (4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

##### 〈肯定的意見〉

- 一部、レーザーの開発が目標になり、産業の応用の確認までに到らなかった点で残念なものもあるが、開発投資したレーザー設備が、大学や研究機関に残り、今後もその開発技術が、日本の産業発展に寄与するなら大きな意味がある。プロジェクト終了後の設備利用もプロジェクト当初から計画しておくことは、重要であると思う。
- いくつかのテーマにおいては実用につなげる戦略も明確である。

##### 〈今後に対する提言〉

- レーザー開発と出口を強く結びつけたことは、その効果と共に市場変化への対応の遅さにつながっていた可能性があり、新しいレーザーには新しい応用が存在する可能性を確認しつつ、新しい出口の探索をもう少し熱心に進めても良かったのではないか。
- レーザー装置の心臓部となる増幅媒質はできれば国産が望ましい。増幅用ファイバーが外国製のままでは国産技術の優位性が危うくなる。時間的な制約があったためであろうが、ファイバー開発についても検討すべきであったし、今回のプロジェクトにおいてファイバー型増幅媒質の優位性が確認された以上、本プロジェクト終了後にファイバーに関する新規プロジェクトを立ち上げるための出口を設けられれば良かったのでは無いただろうか。

- ・ 参加機関ばかりでなく、関連する業界の有識者の意見等を聞く機会を設けることが必要である。

## (5) 情勢変化への対応等

### 〈肯定的意見〉

- ・ 世の動向に大きな変化がある中で、中間評価を踏まえてプロジェクトはおおむね順調に推移したと評価できる。これは研究開発のマネジメントが上手く行われた結果とも言える。それぞれの参加企業等の基礎技術を高めることによって立派な成果を収めている部分もあり、これらは今後さらなる発展が期待でき、大いに評価できる。
- ・ 当初の目標は、欧米のキャッチアップ的要素が多かったが、中間評価で委員からの厳しい意見がその流れを変えることに寄与したのではないか。今後も当初の目標のみにとられることなく、社会情勢や技術の変化に柔軟に対応していくことが望まれる。
- ・ 世界情勢や技術開発動向の変化に対応して、中間評価の段階でテーマの選択と集中を行なったのは英断である。
- ・ 5年間という限られた時間の中で、市場の変化などにも対応しつつ開発を進めており、時間軸上の管理も行き届いていた。
- ・ 国際シンポジウム等の諸外国のレーザー開発動向を分析し、適切に達成目標の上乗せ、加速を判断した情勢変化への対応性は本プロジェクトのマネジメントの中で評価すべき事項である。【再掲】
- ・ 本プロジェクトの進捗状況ならびに市況などを能く把握し、加速予算が効果的に使用されたと感じる。この点は、実施者と NEDO の連絡が能く取れていたことと、状況判断が的確になされたことを裏付けている。
- ・ 加速開発のために、開発費を投資したマネジメントも評価する。

### 〈改善すべき点〉

- ・ この5年間で欧米の技術も大きく進展しているのみならず、我が国の産業構造等も変化しているが、それに対する対応は必ずしも十分とはいえない。

### 〈今後に対する提言〉

- ・ 本プロジェクト期間中に社会情勢は大きく変化した。これほど大きな変化は珍しいかも知れないが、社会は生き物である。社会の変化に対しても実用化に耐える成果を実現するためには精度の高い目標設定が必要であり、そのためには相応しい組織構成が必要となる。
- ・ 液晶分野の事業環境の変化等に起因し、当初目的とした出口（ユーザー連携）において、開発成果が十分に市場ならびに国内産業へ反映できない場合には、他の用途を探る事業（開発）を開始して、開発した成果が最大限生かされるようにすることも必要と思われる。

## 2. 3 研究開発成果について

中間評価で見直しがされ定めた個別要素技術の目標値については、達成されている。ファイバーレーザー、高出力LD、高出力パルスファイバーレーザー技術など目標を達成し、今後の市場の拡大が見込まれる分野で開発の加速ができたことを評価したい。

ただし、研究開発したファイバーレーザーが必ずしもその特徴を生かしたコンパクトでロバスト性を有するものではないことが気になる点で、今後も装置としての改善は必要である。1、2割増の高出力化のみではすぐに追いつかれる。成果の一例にあるように、非線形光学結晶材料の品質改善や、コーティング、増幅、波長変換などの手法に、さらなるアイデアや特徴が欲しいところである。

ファイバーレーザー技術とその周辺技術の開発が国内で促進されたことは喜ばしいが、本事業は新たな加工産業技術を生み出すというより、かなり狭く特殊な加工分野の従来代替技術を形成したように見える。投じた研究開発予算が実用化・事業化でイノベーションを起こして行くように、光加工技術の方向性について議論を深めていただきたい。

国際シンポジウムを開催し、外国の研究動向を調査する有用な機会とし、またレーザー関連の展示会で広くアピールする活動も積極的であった。なお、得られた研究開発成果を、参加機関以外の国内企業や研究機関に発信する方策も必要である。

### 〈肯定的意見〉

- ・ 中間評価で見直しがされ定めた目標値については、達成されていて個別要素技術開発の進捗が十分評価できる。
- ・ ファイバーレーザー、高出力LD、高出力パルスファイバーレーザー技術など目標を達成し、今後の市場の拡大が見込まれる分野で開発の加速ができたことを評価したい。
- ・ 5年間という開発期間の中、数値的にはキャッチアップ的な部分も生じたが、これまでに無い新しい手法で高出力レーザーを開発したり、国産LDならびにファイバーレーザーの高出力化が達成できたり、第二高調波発生技術を向上できたりした点は高く評価でき、新しい高みに達することによって周辺への波及効果が期待できる。
- ・ 事業環境の変化などにより、最終的な利益に結びつけられなかった研究テーマもあるが、それらも含めて高い目標値を達成し、事業に直接結びついた開発成果、今後の応用が期待できる技術等も生まれており、良い成果を上げている。
- ・ 今回のプロジェクトで開発したレーザー装置の性能は高く評価でき、投入された予算に見合った成果が出ている。
- ・ 機器開発に関わる部分では目標を達成しながら、今後これまでの成果をさらに高められる可能性もあり、本プロジェクトの成果として誇れる。担当企業等の連携が必ずしも強くはなかったようであるが、連携を進められる芽もあるようで、これが現実になればなおよい。
- ・ バブル崩壊後のレーザー開発とその応用に関する「失われた10年」をキャッチアップし、さらに世界水準を凌駕する性能のレーザー装置を開発したことは、高く評価できる。また、複合材料のレーザー切断技術への適用とその結果についても、世界水準の

結果が得られている。レーザー加工技術は、機械加工やウォータージェットと比較して、出力以外にもビーム径や波長なども制御できるため、複合材料の加工に向いている。

- CFRP 切断加工は、我が国の当該材料開発の優位性の上に構築すること極めて将来的に重要な技術となるが、水ジェット切断を凌ぎ、かつ車体構造体作製ユーザーの要求に見合う加工速度が実現できたことは重要な成果である。大面積表面改質は、必要な高エネルギー、高繰り返しレーザーの必要性に着目し、成功裏にレーザー開発と大面積アニーリングを実現した一方で、予想外に産業界のニーズが低下してしまったのは想定外であった。
- チタン合金粉末成型は、当初目標成果が先行した事実は賞賛されてよい。
- レーザー装置ならびに CFRP 加工技術において当初予定していた得られるべき成果は得られており、それらの達成度が明らかになるような目標設定がなされていた。
- CFRP のレーザーによる加工は、今後の技術になるが、多くのデータを蓄えられた点を評価する。まだ、加工方法として確立した段階ではないですが、今後、高出力の極短パルスレーザーによる加工などのデータ蓄積も進み、コスト・品質面から多様な工法が確立していくと思われる。
- 当初設定された目標、また途中で目標のかさ上げおよび加速修正をおこなった項目は、途中で切断加工に集中するために削除された接合技術の項目を除いては達成された。レーザー技術としては、研究レベルにおいては性能として先行している外国研究もあるが、メーカー製品としては出力スケールでさらなる高出力化も可能なレベルに、QCW ファイバーレーザー、半導体レーザーのいずれも達している。また、パルスファイバーレーザーに関しては学術研究レベルにおいても優秀な成果が得られた。さらに開発されたコヒーレント結合技術はパルスレーザーの出力スケール、および結合された高品質レーザービームによる波長変換にも極めて有効な成果である。
- 国際シンポジウムを開催し、外国の研究動向を調査する有用な機会とし、またレーザー関連の展示会で広くアピールする活動も積極的であった。
- 成果の普及に関しても、公開シンポジウムや展示会などを通じて十分に行われている。また、展示会を見学させて頂いたが、本プロジェクトの集客効果は高く、レーザーユーザーならびに市場からも関心を持たれていることが能くわかる。

#### 〈改善すべき点〉

- 汎用製品としては入手不可能な性能をもつ3つのレーザーとそれらを構成する際のキーとなる部品開発が行われた。ただし、それらの開発の協働性はなく、とくに開発された高出力半導体レーザーを搭載したレーザー装置は実現できていない。

#### 〈今後に対する提言〉

- ファイバーレーザー技術とその周辺技術の開発が国内で促進されたことは喜ばしいが、本事業は新たな加工産業技術を生み出すというより、かなり狭く特殊な加工分野の従

来代替技術を形成したように見える。投じた研究開発予算が実用化・事業化でイノベーションを起こして行くように、光加工技術の方向性について議論を深めていただきたい。

- 競業メーカー、技術などとのベンチマークによるポジショニングがはっきりさせ、プロジェクトによりどのような変化があったかがわかれば、成果がより明確に説明できると思う。
- プロジェクトの成果を俯瞰するために、研究開発テーマごとに日本と世界（競合先）の技術水準に関して、採択時の状況、終了時の状況、さらに5年後・10年後の予想を総括して示すことも必要である。
- できるならばレーザー加工あるいはレーザー技術の流れを大きく変えるような成果が一つでも欲しかった。
- 海外メーカー製のレーザー装置（波長 1064 nm）でも、低繰返し周波数で2~3J（特注で10 J）、1 kHz 対応で500~600 Wのものがあるなか、1、2割増の高出力化のみではすぐに追いつかれる。成果の一例にあるように、非線形光学結晶材料の品質改善や、コーティング、増幅、波長変換などの手法に、さらなるアイデアや特徴が欲しいところである。
- 粉末成形の技術は、途中から事情によりプロジェクトから離れたことを聞いたが、新しい企画でプロジェクトの目的が引き継がれた訳でもなく、中途半端さを感じた。意図した変更があったことは理解するが、途中までも大きな公的な資金を使用しており、製品化と展示会出展の報告だけでは不足を感じた。
- 研究開発したファイバーレーザーが必ずしもその特徴を生かしたコンパクトでロバスト性を有するものではないことが気になる点で今後も装置としての改善は必要である。ファイバーレーザー装置が本来持つべき柔軟性を活かさないがために装置の移動が制限され、ファイバーでの容易な光学系の接続ができず、十分な実験ができていない部分もあるように見受けられ装置が適正なものかも再度見直す点もあろう。
- 特許に関して、今後発生するであろう審査請求、拒絶判定への反駁意見対応などにおける運用方法が明らかにされていないので、それらの説明があれば良かった。
- 将来のユーザーや参加機関以外への情報発信の機会を、もう少し多く作るべきである。
- 当該プロジェクトと研究テーマの近い大学の研究室や研究機関と共催で研究会やシンポジウムを開催することにより、より広く情報の発振・受信が得られる。また、学生に当該分野への興味を抱かせ引き込むことも重要である。
- 国家プロジェクトとしての性格から、得られた研究開発成果は、一定の時限は設けても、「非公開」とせずに、国内企業や研究機関に普及させる方策も必要である。
- 論文や国際会議における発表等に対する対応は、参加機関の性格によりまちまちで、それぞれの判断で行われている。
- 最終的に事業として直接結びつけることが困難となった案件に関しても、それに必要なレーザーの開発には新しい技術が開発ならびに利用されているので、本事業の終了後にそれらを抽出して新しい事業に展開できるような仕組みを構築できれば良かった

のでは無いだろうか。

- 自動車や航空機を視野に入れているように見えるが、どこの部分にどのように適用しようとするか明確にした方が成果を見やすい。情報発信等の成果も記述されているが、数あわせに終わらせない姿勢が望まれる。

## 2. 4 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

ファイバーレーザーに関しては、日本のメーカーにその技術が使われており、このプロジェクトが開発を加速したことを大いに評価する。高出力LDの開発など世界トップレベルの開発も実現できており今後が楽しみである。CFRPのレーザー加工も、実用化には今後の評価の継続が必要ではあるが、一定の評価ができる。

ただし、ファイバーレーザー波長変換技術が、十分に生かせる加工技術応用が提示されていない。今後どのような分野を切り拓けるか、基本波を発生するナノ秒やサブナノ秒パルスレーザー光源技術開発も含めて検討すべきである。また、ファイバーレーザー加工の最大の利点であるリモート加工、本プロジェクトで開発した複数波長照射方式によるCFRP加工のポテンシャルユーザーである、車体、航空機、船舶等の構造体メーカーとの橋渡しが必要である。

レーザー装置、個々の加工技術のみで産業を活性化するのは無理であり、個々の加工現場でクローズに開発され実施されているノウハウの価値を、開発者にもメリットになる形で産業展開する方策が重要である。最先端の情報を確保しながら、新材料加工への適用のための基礎的データ取得、実際の加工条件の実現、それらのデータベース化と知財化、知財有償利用の仕組み等を総括的に行うことが望まれる。

### 〈肯定的意見〉

- ファイバーレーザーに関しては、展示会への出展、新聞発表など一般にも見える形で実用化が推進し、さらに日本国内に同業他社でファイバーレーザーを製品化するメーカーが出現して、日本のメーカーにその技術が使われており、このプロジェクトが開発を加速したことを大いに評価する。CFRPのレーザー加工も、目的を達成しており、実用化には今後の評価の継続が必要ではあるが、一定の評価ができる。その他、高出力LDの開発など世界TOPレベルの開発も実現できており今後が楽しみな分野がある。
- 市販のナノ秒パルスレーザーを用いたCFRPのレーザー切断についても数多く検討されているが、レーザー装置の販売コストや3D加工ヘッド形状などで大きな優位性や特徴が得られない場合には、短波長化や高出力化による厚板加工と高速化が期待できる。
- 半導体レーザーやファイバーレーザーに関しては、本プロジェクトの成果をもとに実用化に向けた具体的取り組みが始まっており、これまで欧米製の装置に依存してきた体質が変わるきっかけとなることが期待できる。
- レーザー装置に関しては、参画メーカーが商品化に前向きであるとのことで達成度が高い。
- CFRP加工、大面積改質に関しては、実際には個々のユーザーの要求にいかに対応できるかであるが、マシンショップ的な対応でプロトタイプ加工を実施するにはすぐに可能な状況である。
- 機器開発では事業化の目処が立っているものもあり、さらなる向上への期待もでき評価できる。関連企業間の連携も期待できそうに感じられるところもあり、評価できる。



- ・ 本事業では、選定された中心的企業が技術力と事業化能力を有するものであり、今回の成果から実施者として適当であることは評価される。
- ・ 各研究テーマの出口とユーザー連携が明確に設定されており、遅滞なく成果が企業の事業として運用される仕組みが整えられていた。

#### 〈改善すべき点〉

- ・ 実用化評価には、それを生産ラインで使用するような企業がプロジェクトの中に入っていることも重要であり、その使用者評価のヒアリングがまだ不十分なところがあった。
- ・ 今回のプロジェクトでは、レーザー加工技術の出口として、大手自動車メーカーや重工関係がプロジェクトに入らなかったことや、参加企業の枠を超えたオープン・イノベーション的手法に欠けていた点が、出口を見据えた成果に乏しかった一因と考えられる。
- ・ ファイバーレーザー加工の最大の利点であるリモート加工、本プロジェクトで開発した複数波長照射方式による CFRP 加工のポテンシャルユーザーである、車体、航空機、船舶等の構造体加工メーカーとの橋渡しが必要である。一方、レーザー装置自体に知財的な決定的な優位性がなければ、加工方法はすぐに模倣されてしまう。
- ・ 技術の目標値は達成しているがファイバーレーザー波長変換技術が、十分に生かせる加工技術応用が提示されていない。重要な技術と位置づけられながら今後どのような分野を切り拓けるか？基本波を発生する、ナノ秒やサブナノ秒パルスレーザー光源技術開発も含めて検討すべきである。

#### 〈今後に対する提言〉

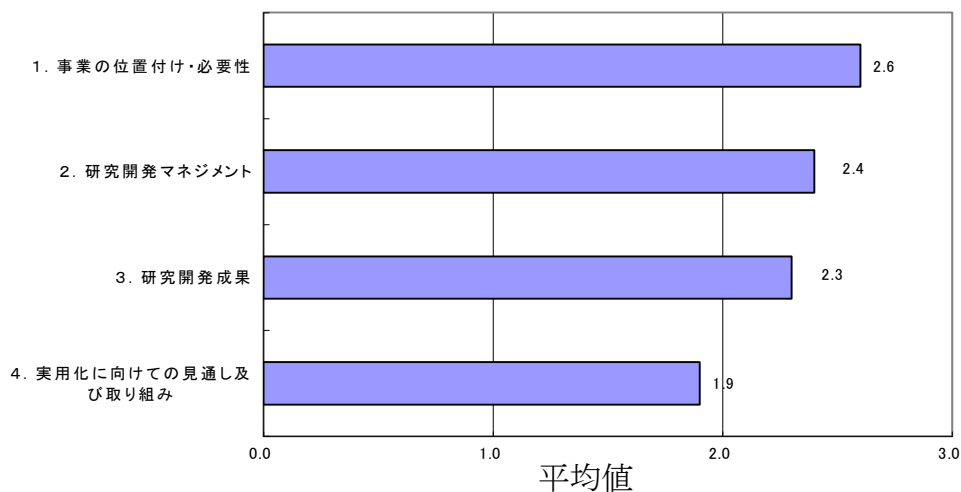
- ・ レーザー装置、個々の加工技術のみで産業を活性化するのは無理であり、個々の加工現場でクローズで開発されて実施されているノウハウの価値を、開発者にもメリットになる形で産業展開するかが重要である。
- ・ 今後の高出力ナノ秒レーザーの展開としては、CFRP、FRP 成形複合材料の3次元加工も考えられる。成形複合材料は、自動車（パーソナルモビリティ）、風力発電機、家庭用ロボットの構造体などの利用が検討されている。
- ・ 開発期間短縮では、海外企業を傘下に収めたり、海外製品を多く導入して成果を上げることは民間企業では当然であると思われる。しかしながら、国家プロジェクトとして研究開発人材の育成も念頭に置く場合には、コンカレントなエンジニアリング指向で我国自前の技術を真に育てる工夫が必要であると思われる。
- ・ ファイバーレーザーの今後の展開に不可欠な要素技術として、ラージモードエリアファイバ、フォトニック結晶ファイバー技術がある。知財面で容易でない点もあるが、高出力ファイバー光学部品の開発を途切れずに行う必要がある。また、3台のレーザー開発を通じて育成された技術者の数が重要である。
- ・ 本格的には参画しなかったユーザーと本プロジェクトの成果を協働させることは是非

開始すべきである。しかし、開発したレーザー装置を公開してマシーンショップ的な活用をすることは容易であるが、結局、企業が加工条件のノウハウのみを持ち帰り、外国製レーザー装置で実現するのでは意味がない。そのためには、新材料加工の条件だしのための基礎的データ取得、実際の加工条件の実現、それらのデータベース化と知財化、知財有償利用の仕組み等を総括的に行う公的機関構築が不可欠である。この機関は工業試験所のような技術者の機関ではなく、当該分野の最先端研究を展開する大学、あるいは独立研究法人との日常的な人的かつ知的流動性が確保できる体制でなくては **Center of Excellence** を維持できない。

- ・ レーザー装置の高性能化は、本プログラムの成果により要素部品が国産化されたことにより自主開発できる企業が複数できたことから、中小企業を含めた広範囲にレーザー加工を広げるための技術マネジメントを行える機関の創出につなげていただきたい。
- ・ **ALPROT** 解散後にも、当初設定していた企業以外のユーザーを探すための仕組みを事後に設けられれば、さらに広い波及効果が期待できたのではなかったかと思う。
- ・ 技術の進歩のためには、継続的な活動が必要である。一部は、製品化され今後民間企業によって開発投資が行われるものはあるが、有望な技術は、きちんと仕分けされ、継続的なプロジェクトにより継続して開発投資されるような体制を希望する。
- ・ 選定された企業の総合規模に対して本事業で新たに得られた成果の実用化・事業化が企業全体に寄与する効果が必ずしも高いとはいえないであろう。とてもファイバーレーザーのみの事業では、炭酸ガスレーザーの事業規模には及ばず、関連会社に事業と人材を移管しても複数社が共同出資するようでないとなれば事業継続は困難であろう。大型の国家プロジェクトであるため、事業の成否の責任は重大ではあるが、プロジェクト自身に成果があったとみなされても、市場規模が企業にとって魅力的ではないものは事業リストラをせざるを得ない。関与した企業本体に一定期間事業継続をしてもらえよう有効な手法を **NEDO** で策定すべきと思われる。
- ・ このようなプロジェクトで実用化まで進めることは容易ではない。プロジェクトの直接の成果ではなくても、プロジェクトを結合材として人材育成や人脈形成ができれば大きな財産となる。人脈が飛躍への切っ掛けとなった例は多く、**NEDO** の今後の活動に期待したい。
- ・ 産総研には、**CFRP** の加工を評価するための多くの測定装置や検査装置が導入されている。それらは、一箇所に集中して設置されていることにより効果を発揮する。本プロジェクト終了後に、それらの測定装置が産総研内で散逸しないような工夫を行って頂きたい。散逸してしまうのであれば、阪大で **CFRP** 加工ならびに評価を実施すべきであった。
- ・ 「アジアへの販路」を示した成果があったが、先端技術を海外に販売することにより **DRAM** 事業において見られたように、ブーメランとなって日本の産業競争力が削がれることの無い様な仕組みが有っても良かったのではないか。まずは国内ユーザーの育成と国内ユーザーへの先端技術の供給が優先されるべきだと考える。
- ・ 産業構造の変化により直接事業展開ができなかったテーマに関してこそ、継続的に技

術の普及と応用分野の探索を継続できるような出口を構造化しておけば良かったのではないか。

### 3. 評点結果



評価項目	平均値	素点 (注)							
1. 事業の位置付け・必要性について	2.6	B	A	B	A	A	B	A	
2. 研究開発マネジメントについて	2.4	B	A	B	A	A	B	B	
3. 研究開発成果について	2.3	B	B	B	A	B	B	A	
4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて	1.9	C	B	B	B	B	C	A	

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算し算出。

#### 〈判定基準〉

- |                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について            |
| ・非常に重要 →A          | ・非常によい →A                |
| ・重要 →B             | ・よい →B                   |
| ・概ね妥当 →C           | ・概ね妥当 →C                 |
| ・妥当性がない、又は失われた →D  | ・妥当とはいえない →D             |
| 2. 研究開発マネジメントについて  | 4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて |
| ・非常によい →A          | ・明確 →A                   |
| ・よい →B             | ・妥当 →B                   |
| ・概ね適切 →C           | ・概ね妥当 →C                 |
| ・適切とはいえない →D       | ・見通しが不明 →D               |

## 第2章 評価対象事業に係る資料

## 1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

# 「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」

## 事業原簿

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・機械システム部
-----	---

# —目次—

概要 .....	i ~ iii
I. 事業の位置付け・必要性について	
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	
1.1 NEDO が関与することの意義 .....	I-1-1
1.2 実施の効果（費用対効果） .....	I-1-2
2. 事業の背景・目的・位置づけ .....	I-2
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標 .....	II-1
1.1 加工用レーザーの性能 .....	II-1-1
1.2 レーザー加工に求められる性能または加工品質 .....	II-1-2
2. 事業計画	
2.1 研究開発の内容 .....	II-2-1
2.2 研究開発計画 .....	II-2-2
2.3 研究開発の実施体制 .....	II-2-3
2.4 研究開発の運営管理 .....	II-2-4
3. 情勢変化への対応 .....	II-3
3.1 加速制度の活用 .....	II-2-1
3.2 開発方針の修正 .....	II-2-2
4. 中間評価結果への対応 .....	II-4
5. 評価に関する事項 .....	II-5
III. 研究開発成果について	
平成 22 年度～平成 24 年度	
1. 事業全体の成果 .....	III-1（中間）
2. 研究開発項目毎の成果	
2.1 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」	
「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」 .....	III-2（中間）
2.2 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」	
「(2) 半導体レーザーのファイバークップル技術の開発」 .....	III-3（中間）
2.3 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	
「1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発」 .....	III-4（中間）



- 2.4 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」
  - 「2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」 ..... Ⅲ-5 (中間)
- 2.5 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」
  - 「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」 ..... Ⅲ-6 (中間)
- 2.6 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」
  - 「4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」 ..... Ⅲ-7 (中間)
- 2.7 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発」
  - 「1) kW 級ブースター増幅器の開発」 ..... Ⅲ-8 (中間)
- 2.8 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発」
  - 「2) アニール用ブースター増幅技術の開発」 ..... Ⅲ-9 (中間)
- 2.9 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(3) 高出力波長変換技術の開発」
  - 「1) 波長変換モジュール化技術の開発」
  - 「アニール用レーザーの波長変換モジュール」 ..... Ⅲ-10 (中間)
- 2.10 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(3) 高出力波長変換技術の開発」
  - 「1) 波長変換モジュール化技術の開発」
  - 「ファイバーレーザーの波長変換モジュール」 ..... Ⅲ-11 (中間)
- 2.11 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(3) 高出力波長変換技術の開発」
  - 「2) 波長変換の高効率化技術の開発」 ..... Ⅲ-12 (中間)
- 2.12 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
  - 「(3) 高出力波長変換技術の開発」
  - 「3) 加工試験のための整備」 ..... Ⅲ-13 (中間)
- 2.13 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」
  - 「(1) 切断接合技術の開発」
  - 「1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発」 ..... Ⅲ-14 (中間)
- 2.14 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」
  - 「(1) 切断接合技術の開発」
  - 「2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発」 ..... Ⅲ-15 (中間)
- 2.15 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」

「(2) 表面処理技術の開発」	
「(1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発」	..... III-16 (中間)
2.16 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「(2) 大型光学部品研磨技術の開発」	..... III-17 (中間)
2.17 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「(3) 高精度ビーム評価技術の開発」	..... III-18 (中間)
2.18 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(3) 粉末成形技術の開発」	..... III-19 (中間)
2.19 研究開発項目④「技術開発推進にかかる調査（先端技術、環境等）・評価・普及促進」	..... III-20 (中間)

平成 25 年度～平成 26 年度

1. 事業全体の成果	..... III-1 (事後)
2. 研究開発項目毎の成果	
2.1 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」	
「(1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発」	
「①パルスレーザーの高品位・高出力化技術の開発」	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	..... III-2-1 (事後)
2.2 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」	
「(1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発」	
「①パルスレーザーの高品位・高出力化技術の開発」	
「(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」	..... III-2-2 (事後)
2.3 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」	
「(1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発」	
「②励起用半導体レーザー技術開発」	..... III-2-3 (事後)
2.4 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」	
「(2) CFRP 加工技術の開発」	
「①CFRP 高速切断技術の開発」	..... III-2-4 (事後)
2.5 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」	
「(2) CFRP 加工技術の開発」	
「②CFRP 加工プロセス・評価技術の開発」	..... III-2-5 (事後)
2.6 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」	
「(3) パルスレーザーCFRP 用加工システムの開発」	..... III-2-6 (事後)
2.7 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」	

- 「1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発」 ..... Ⅲ-2-7 (事後)
- 2.8 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」
  - 「2) 高精度ビーム評価技術の開発」 ..... Ⅲ-2-8 (事後)
- 2.9 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」
  - 「3) 固体レーザー利用大面積表面処理装置の開発」 ..... Ⅲ-2-9 (事後)
- 2.10 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」
  - 「4) アニール用グリーンレーザー評価・調整」 ..... Ⅲ-2-10 (事後)
- 2.11 研究開発項目 3 「粉末成形技術の開発」 ..... Ⅲ-2-11 (事後)
- 2.12 研究開発項目 4 「技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」 ..... Ⅲ-2-12 (事後)

#### IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

平成 22 年度～平成 24 年度

- 1. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて ..... IV-1 (中間)
- 2. 研究開発項目毎の実用化の見通しについて
  - 2.1 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」
    - 「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」 ..... IV-2 (中間)
  - 2.2 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」
    - 「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発」 ..... IV-3 (中間)
  - 2.3 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
    - 「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」
      - 「1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発」 ..... IV-4 (中間)
  - 2.4 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
    - 「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」
      - 「2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」 ..... IV-5 (中間)
  - 2.5 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
    - 「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」
      - 「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」 ..... IV-6 (中間)
  - 2.6 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
    - 「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」
      - 「4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」 ..... IV-7 (中間)
  - 2.7 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
    - 「(2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発」
      - 「1) kW 級ブースター増幅器の開発」 ..... IV-8 (中間)
  - 2.8 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」
    - 「(2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発」

「2) アニール用ブースター増幅技術の開発」	IV-9 (中間)
2.9 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「1) 波長変換モジュール化技術の開発」	
「アニール用レーザーの波長変換モジュール」	IV-10 (中間)
2.10 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「1) 波長変換モジュール化技術の開発」	
「ファイバーレーザーの波長変換モジュール」	IV-11 (中間)
2.11 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「2) 波長変換の高効率化技術の開発」	IV-12 (中間)
2.12 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「3) 加工試験のための整備」	IV-13 (中間)
2.13 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(1) 切断接合技術の開発」	
「1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発」	IV-14 (中間)
2.14 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(1) 切断接合技術の開発」	
「2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発」	IV-15 (中間)
2.15 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発」	IV-16 (中間)
2.16 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「2) 大型光学部品研磨技術の開発」	IV-17 (中間)
2.17 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「3) 高精度ビーム評価技術の開発」	IV-18 (中間)
2.18 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」	
「(3) 粉末成形技術の開発」	IV-19 (中間)

平成 25 年度～平成 26 年度

1. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて	IV-1 (事後)
2. 研究開発項目毎の実用化の見通しについて	

- 2.1 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」
  - 「(1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発」
    - 「①パルスレーザーの高品位・高出力化技術の開発」
      - 「1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」 ..... IV-2-1 (事後)
- 2.2 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」
  - 「(1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発」
    - 「①パルスレーザーの高品位・高出力化技術の開発」
      - 「2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発」 ..... IV-2-2 (事後)
- 2.3 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」
  - 「(1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発」
    - 「②励起用半導体レーザー技術開発」 ..... IV-2-3 (事後)
- 2.4 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」
  - 「(2) CFRP 加工技術の開発」
    - 「①CFRP 高速切断技術の開発」 ..... IV-2-4 (事後)
- 2.5 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」
  - 「(3) CFRP 加工技術の開発」
    - 「②CFRP 加工プロセス・評価技術の開発」 ..... IV-2-5 (事後)
- 2.6 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」
  - 「(3) パルスレーザーCFRP 用加工システムの開発」 ..... IV-2-6 (事後)
- 2.7 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」
  - 「1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発」 ..... IV-2-7 (事後)
- 2.8 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」
  - 「2) 高精度ビーム評価技術の開発」 ..... IV-2-8 (事後)
- 2.9 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」
  - 「3) 固体レーザー利用大面積表面処理装置の開発」 ..... IV-2-9 (事後)

(添付資料)

- ・添付資料 1 「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」基本計画 (平成 24 年 3 月)
- ・添付資料 2 「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」基本計画 (平成 26 年 4 月)
- ・添付資料 3 事前評価関連資料 (事前評価書)
- ・添付資料 4 特許論文リスト

概要

		最終更新日	平成 27 年 7 月 21 日
プログラム (又は 施策) 名	ロボット・新機械イノベーションプログラム		
プロジェクト名	次世代素材等レーザー加工技術開発 プロジェクト	プロジェクト番号	P10006
担当推進部 / 担当者	ロボット・機械システム部 加藤 友章 (平成27年4月～) 技術開発推進部 / ロボット・機械システム部 本田 雄士 (平成25年8月～平成27年3月) 技術開発推進部 齋藤 弘一 (平成24年5月～平成25年7月) 技術開発推進部 佐々木 健一 (平成22年8月～平成24年4月)		
0. 事業の概要	<p>我が国における低炭素社会の実現に向けた次世代製品の軽量化・高強度化、高機能化に対応した加工技術の確立が求められている。次世代レーザー加工技術は、従来加工技術のブレークスルーとして、先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現する技術として期待されている。また、我が国の製造業における国際競争力の維持・強化、技術安全保障などの観点からも次世代レーザーの技術開発を国として取り組む必要性に迫られている。本事業では、「ユーザーニーズに適応した」かつ「国際競争力のある」半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術の研究開発を下記の開発項目により実施する。(中間評価後)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① CFRP切断加工技術の開発</li> <li>② 大面積表面処理技術の開発</li> <li>③ 粉末成形技術の開発</li> </ol>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>2001年度以降、我が国においてレーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では莫大な開発予算による国家支援が継続されており、こうした背景を受けて、レーザー技術の最先端領域であり市場拡大が著しい半導体ファイバーレーザーの分野を欧米に席卷されているのが現状である。低炭素社会に資する次世代製品の実現に先進的な我が国ユーザー企業は、レーザー加工装置を海外から調達して、先進材料の新しい加工技術の開発に着手しているものの、メンテナンスサービスの遅延やコスト高、ブラックボックス化等により、安心して開発が進められないだけでなく、その導入競争においても海外ライバル企業から遅れをとる懸念が生じている。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>本事業では、今後大きな市場の成長が期待されるファイバーレーザーの分野において我が国の競争力を高めることを目的に、ファイバーレーザーを用いた新たな加工領域を開拓することとし、自動車用として拡大が見込まれる炭素繊維複合材料 (CFRP) を対象としたファイバーレーザー加工技術、粉末成型技術を開発する。また、今後の需要の伸びが期待させる高精細ディスクプレイ等の表面処理について、当該市場での我が国の競争力確保のため、既存のレーザー技術を凌駕する新しいレーザー用いた加工技術を開発する。開発項目は下記の通り。</p> <p>研究開発項目 1 「CFRP切断加工技術の開発」                      研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」                      研究開発項目 3 「粉末成形技術の開発」                      研究開発項目 4 「技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」</p>		

事業の計画内容	主な実施事項	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	
	レーザーの高出力化技術の開発	→			↓		
	レーザーの高品位化技術の開発	→			↓		
	多波長複合加工技術の開発	→			↓		
	CFRP切断加工技術の開発				↓	→	
	大面積表面処理技術の開発				↓	→	
	粉末成形技術の開発				→		
開発予算 <small>(会計・勘定別に事業費の実績額を記載)(単位:百万円)</small> 契約種類: <small>○をつける(委託(○)助成( )共同研究(負担率2/3))</small>	会計・勘定	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	総額
	一般会計	598	948	95	0	0	1,641
	特別会計 <small>(電源・需給の別)</small>	0	0	890	876	696	2,462
	加速予算 <small>(成果普及費を含む)</small>	0	450	0	80	72	602
	総予算額	598	1,398	985	956	768	4,705
開発体制	経産省担当原課	製造産業局産業機械課					
	プロジェクトリーダー	技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所 研究総括理事 尾形 仁士					
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載)	○技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所(参加11団体) (浜松ホトニクス(株)、古河電気工業(株)、(株)アルバック、ミヤチテクノス(株)、新日本工機(株)、(株)アспект、三菱化学(株)、(株)片岡製作所、公益財団法人レーザー技術総合研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所(加工システム技術開発センター)、一般財団法人製造科学技術センター) ○大阪大学(レーザーエネルギー学研究センター、接合科学研究所) ○浜松ホトニクス(株) ○(株)アルバック					

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>(1) 研究開発の概要</p> <p>今後大きな市場の成長が期待されるファイバーレーザーの分野において我が国の競争力を高めることを目的に、ファイバーレーザーを用いた新たな加工領域を開拓することとし、自動車用として拡大が見込まれる炭素繊維複合材料 (CFRP) を対象としたファイバーレーザー加工技術、粉末成型技術を開発する。また、今後の需要の伸びが期待させる高精細ディスプレイ等の表面処理について、当該市場での我が国の競争力確保のため、既存のレーザー技術を凌駕する新しいレーザー用いた加工技術を開発する。以下の各研究開発項目の確立を目指す。</p> <p>① CFRP切断加工技術の開発 (高品位・高出力パルスレーザー技術の開発, CFRP加工技術の開発, パルスレーザーCFRP用加工システムの開発)</p> <p>② 大面積表面処理技術の開発 (高度均質幅広ビーム整形技術の開発, 高精度ビーム評価技術の開発, 固体レーザー利用大面積表面処理装置の開発)</p> <p>③ 粉末成形技術の開発 (粉末焼結積層造形システム技術の開発) (平成25年7月末まで)</p> <p>上記の各研究開発項目が連携することによってそれぞれの加工技術を確立する。炭素繊維複合材料の切断接合では自動車の製造ラインに適用可能な加工速度と品質、有機ELディスプレイや太陽電池デバイスの表面処理では大面積化と品質、生体材料の粉末成形ではチタン合金を対象とした医療機器に適用可能な加工速度と品質、をそれぞれ実現する国産の次世代素材向けレーザー加工システムの実用化技術を、平成26年度までに確立することを目標とする。</p> <p>(2) 研究開発目標と成果</p> <table border="1" data-bbox="405 869 1289 1373"> <thead> <tr> <th></th> <th>目標</th> <th>達成状況</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CFRP切断加工技術の開発</td> <td>CFRP等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。</td> <td>各種レーザーを用いてCFRP素材の加工実験と評価を行い、高品位のCFRP加工の見通しがついた。</td> </tr> <tr> <td>表面処理技術の開発</td> <td>高精細フラットパネルディスプレイやフレキシブルディスプレイ製造に適用できるレーザーアニール技術を開発する。</td> <td>アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現し、アニール実験が順調に進んだ。</td> </tr> <tr> <td>粉末成形技術の開発</td> <td>チタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。</td> <td>真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。開発した装置を展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。</td> </tr> <tr> <td>調査・普及促進</td> <td>プロジェクトの成果の普及のため、有識者を含めてレーザーとレーザー応用について議論する。</td> <td>調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。展示会・シンポジウム等を開催し、成果の普及促進に努めた。</td> </tr> </tbody> </table>		目標	達成状況	CFRP切断加工技術の開発	CFRP等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。	各種レーザーを用いてCFRP素材の加工実験と評価を行い、高品位のCFRP加工の見通しがついた。	表面処理技術の開発	高精細フラットパネルディスプレイやフレキシブルディスプレイ製造に適用できるレーザーアニール技術を開発する。	アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現し、アニール実験が順調に進んだ。	粉末成形技術の開発	チタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。	真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。開発した装置を展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。	調査・普及促進	プロジェクトの成果の普及のため、有識者を含めてレーザーとレーザー応用について議論する。	調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。展示会・シンポジウム等を開催し、成果の普及促進に努めた。
	目標	達成状況														
CFRP切断加工技術の開発	CFRP等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。	各種レーザーを用いてCFRP素材の加工実験と評価を行い、高品位のCFRP加工の見通しがついた。														
表面処理技術の開発	高精細フラットパネルディスプレイやフレキシブルディスプレイ製造に適用できるレーザーアニール技術を開発する。	アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現し、アニール実験が順調に進んだ。														
粉末成形技術の開発	チタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。	真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。開発した装置を展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。														
調査・普及促進	プロジェクトの成果の普及のため、有識者を含めてレーザーとレーザー応用について議論する。	調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。展示会・シンポジウム等を開催し、成果の普及促進に努めた。														
	<table border="1"> <tr> <td>投稿論文</td> <td>「査読付き」55件、「その他」19件</td> </tr> <tr> <td>特許</td> <td>「出願済」51件 (うち海外出願 6件)</td> </tr> <tr> <td>その他の外部発表 (プレス発表等)</td> <td>「研究発表・講演」245件、「展示会出展」16件、「新聞雑誌掲載」6件、「表彰など」2件</td> </tr> </table>	投稿論文	「査読付き」55件、「その他」19件	特許	「出願済」51件 (うち海外出願 6件)	その他の外部発表 (プレス発表等)	「研究発表・講演」245件、「展示会出展」16件、「新聞雑誌掲載」6件、「表彰など」2件									
投稿論文	「査読付き」55件、「その他」19件															
特許	「出願済」51件 (うち海外出願 6件)															
その他の外部発表 (プレス発表等)	「研究発表・講演」245件、「展示会出展」16件、「新聞雑誌掲載」6件、「表彰など」2件															
<p>Ⅳ. 実用化、事業化の見通しについて</p>	<p>これまでの開発より、3つの研究開発項目であるCFRP切断接合、表面処理、粉末成形のいずれも最終成果目標を達成し、実用化・事業化にあたって必要な基盤技術を確立した。事業化に向けた検討を進めていく方針である。実用化、事業化の詳細は各実施者の報告による。</p>															
<p>Ⅴ. 基本計画に関する事項</p>	<table border="1"> <tr> <td>作成時期</td> <td>平成22年3月 作成</td> </tr> <tr> <td>変更履歴</td> <td> (1) 平成22年3月制定。  (2) 平成23年3月、研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」の中間目標の変更により改訂。  (3) 平成24年3月、平成24年度の勘定が一般会計から特別会計への変更に伴い、プロジェクト名称改訂。  (4) 平成25年2月、中間評価反映等に伴う、研究内容の見直しによる改訂  (5) 平成26年4月、組織改編に伴う部署名の変更 </td> </tr> </table>	作成時期	平成22年3月 作成	変更履歴	(1) 平成22年3月制定。 (2) 平成23年3月、研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」の中間目標の変更により改訂。 (3) 平成24年3月、平成24年度の勘定が一般会計から特別会計への変更に伴い、プロジェクト名称改訂。 (4) 平成25年2月、中間評価反映等に伴う、研究内容の見直しによる改訂 (5) 平成26年4月、組織改編に伴う部署名の変更											
作成時期	平成22年3月 作成															
変更履歴	(1) 平成22年3月制定。 (2) 平成23年3月、研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」の中間目標の変更により改訂。 (3) 平成24年3月、平成24年度の勘定が一般会計から特別会計への変更に伴い、プロジェクト名称改訂。 (4) 平成25年2月、中間評価反映等に伴う、研究内容の見直しによる改訂 (5) 平成26年4月、組織改編に伴う部署名の変更															



# I 事業の位置づけ・必要性について

## I.1 NEDOの関与の必要性・制度への適合性

### I.1.1 NEDOが関与することの意義

日本のレーザー開発は、経済産業省の大型開発プロジェクトだけでも、1977年～2001年にかけてCO<sub>2</sub>レーザー等の継続的な開発を行ってきた。

国家プロジェクトの取り組みにより、わが国のレーザー加工技術は、かろうじて先行集団の一角に位置し、わが国製造業の技術競争力を下支えしてきた。一方、欧米では産業技術および軍事技術として盛んに研究開発および産業応用が進められた。

わが国では2001年度以降レーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では国家支援が継続されてきており、レーザー技術の最先端領域である市場拡大が著しい半導体・ファイバーレーザーの分野において欧米に席卷されているのが現状である。

近年、産業用レーザー市場は海外で拡大し続けているものの、我が国は、メンテナンスコスト、レーザー加工技術等の開発で大きく遅れをとっている。

そのため、我が国に導入されている有望なレーザー装置は、ほぼ海外製であり完全にブラックボックス化されていることから、導入してもメンテナンス等を海外企業に頼らざるを得ない。

このままでは我が国のレーザー技術の空洞化が懸念され、革新的な部材の製造ができてでも自力で次世代製品を製造できないという事態に陥る可能性があり、我が国の製造業における国際競争力の維持・強化、技術力強化などの観点からも次世代レーザーの技術開発を国として取り組む必要性に迫られている。

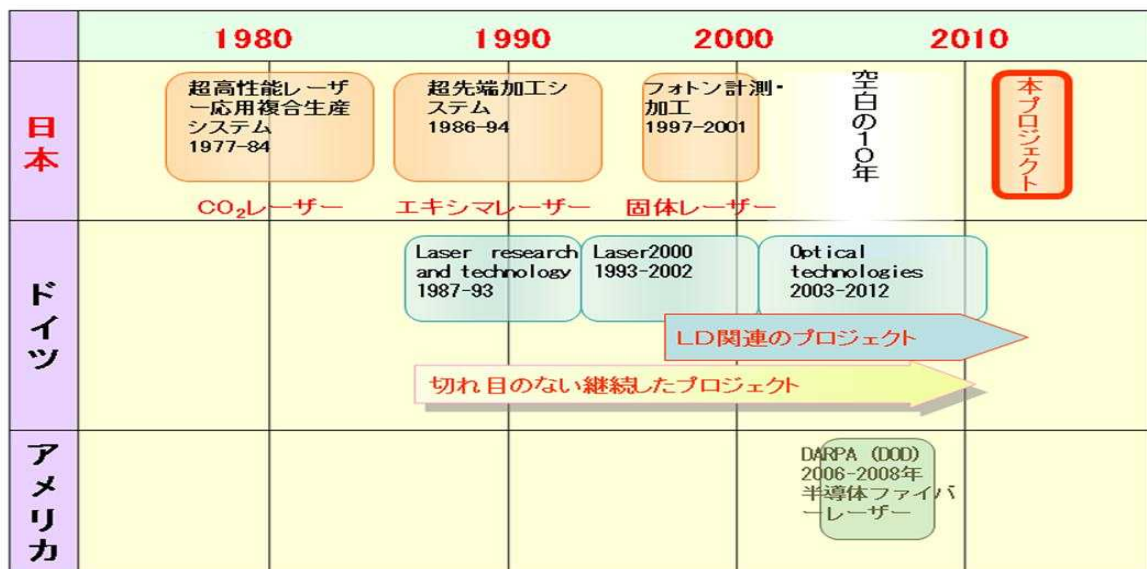
### I.1.2 実施の効果 (費用対効果)

これらの取り組みにより、高出力半導体ファイバーレーザー及びそれを搭載したレーザー加工機の普及が見込まれ、2030年にレーザー加工機の国内市場を獲得したと想定した場合、約2,200億円の市場が期待される。

## I.2 事業の背景・目的・位置づけ

### I.2.1 事業の背景

2001年度以降、我が国においてレーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では大規模な国家支援が継続されており、こうした背景を受けて、レーザー技術の最先端領域であり市場拡大が著しい半導体ファイバーレーザーの分野を欧米に席卷されているのが現状である。低炭素社会に資する次世代製品の実現に先進的な我が国ユーザー企業は、レーザー加工装置を海外から調達して、先進材料の新しい加工技術の開発に着手しているものの、装置のメンテナンスサービスの遅延やブラックボックス化等により、安心して開発が進められないだけでなく、その導入競争においても海外ライバル企業から遅れをとる懸念が生じている。



図I.2.1.1 レーザー関連の国家プロジェクト

### I.2.2 政策的重要性

本プロジェクトは、2009年12月に行われた総合科学技術会議（第87回）「優先度判定（SABC）及び改善・見直し指摘の結果」において、「S」※1評価を受け積極的に実施すべきプロジェクトであると評価を受けて開始している。

#### コメント

今回開発しようとしているレーザーは長波長と短波長を組み合わせ、加工の精度、速度を高めたレーザーであり、難加工である炭素繊維複合材料や太陽電池などの機能性材料を高品位・高品質で加工することができるものであり、非常に重要である。

レーザーの光源に近い企業とその応用に強い企業との連携として集中研究拠点体制で取り組む予定であり、効果の期待できる優れた施策である。

我が国製造業の国際競争力の維持・強化、技術安全保障の観点からも国産の次世代レーザー技術を国として取り組む意味は大きく、海外の動向を踏まえつつ、コストパフォーマンスに留意しつつ明確な商品化イメージを持って、積極的に実施すべきである。

※S：特に重要で、府省連携等、効果的な実施体制が整備されるなど内容的にも極めて優れ、グリーンイノベーションなど、イノベーション創出・社会への展開の観点等から、特に重点的に資源を配分す

ることで、積極的に実施すべきもの。

### I.2.3 NEDOが関与する意義

我が国では、このようなレーザー発振器開発に必要な要素技術が大企業、中小企業、大学、研究機関に分散しており、製品化を見据えたレーザー技術の集約・システム化が進んでいなかったため、国が主導して、コンソーシアムによる技術開発プロジェクトを実施することで、技術の集約やシステム化を進めることが有効である。

また、本事業により企業が培ったレーザーの発振器、加工システム開発に必要な要素技術がレーザー光源技術、レーザー加工用デバイス、レーザー加工システム等として実用化がされることで、各産業における次世代製品の製造がレーザー加工によって促進される期待が高い。

### I.2.4 研究開発の目的

本事業では、我が国におけるレーザー技術を集積することによって高出力・高品位半導体ファイバーレーザー技術の開発を推進し、他国に先駆けて革新的なものづくり基盤技術として、軽くて強いが加工難易度が極めて高い炭素繊維複合材料等の先進材料の加工や、次世代製品の短時間で高品質な低コスト製造を実現する加工技術の確立を目指す。

## II 研究開発マネジメント

### II.1 事業の目標

「ユーザーニーズに適応した」かつ「国際競争力のある」をコンセプトに、高出力・高品位の半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術を開発する。

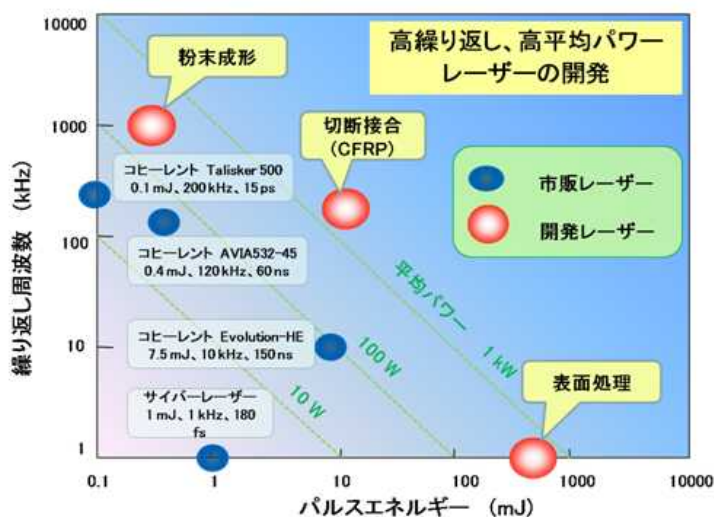
本事業では、我が国におけるレーザー技術を集積することによって高出力・高品位半導体ファイバーレーザー技術の開発を推進し、次世代レーザー加工システムを平成26年度までに開発することを目標とする。

- ① 切断接合技術開発：自動車の製造ラインに適用可能な炭素繊維複合材料 (CFRP) の切断接合技術 (加工速度と品質) を実現
- ② 表面処理技術開発：有機EL・太陽電池デバイスの表面処理技術では大面積化と表面改質を実現
- ③ 粉末成形技術開発：生体材料の粉末成形ではチタン合金を対象とした医療機器に適用可能な加工速度と品質を実現

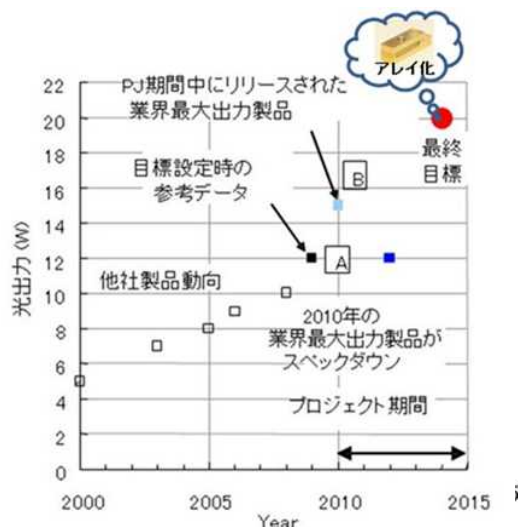
#### II.1.1 加工用レーザーの性能

図II.1.1-1の既存レーザーの性能と本プロジェクトで開発するレーザー装置の性能をプロットしている。開発ターゲットである3つの加工技術に必要なレーザーの性能は、切断接合技術開発では高パワーレーザー装置、表面処理技術開発ではパルスエネルギーが高い、粉末成形では繰り返し周波数が高い性能が必要であり、各々市販レーザーには無い特徴を有したレーザー装置開発を目標とした。

一方、高出力化技術では、先行している海外メーカーの2010年までのシングルエミッタ性能のトレンドを参照 (図II.1.1-2) し、凌駕する高い目標を目指す。さらに、加工用レーザーシステムとしてラインに導入されるアレイLDでは、開発したシングルエミッタを用い、高出力化のみならず、長寿命化の両立を目指す重要となる。



図II.1.1-1 開発レーザー性能



図II.1.1-2 シングルエミッタのトレンド

#### II.1.2 レーザー加工に求められる性能または加工品質

開発を目指す、次世代レーザー加工システム（切断接合技術、表面処理技術、粉末成形技術）における現状などから加工システムに求められる代表的な性能を検討した結果を表II.1.2-1に示す。

表II.1.2-1 開発加工システムに求められる性能 (品質)

項目		既存技術	要求性能	備考	
切断接合技術	レーザー照射	—	高出力と二波長重畳等の多波長複合照射	—	
	加工速度	切削加工0.1m/分、W/J加工1m/分	6m/分:	自動車の部材加工のタクトタイム	
	切断	反応層の厚み	機械加工、W/Jは熱損傷を発生しない	反応層の厚み: 100 μm以下	ユーザー企業からのリクエスト
		引張り強度	—	機械加工による引張り強度をゼロとして10%未満の低減を抑制	ユーザー企業からのリクエスト
	接合	せん断強度	接着剤30MPa	100MPa	当該部材の実用的に求められる接合強度の最高値を設定
表面処理技術	レーザーレーザー照射	エキシマレーザー	グリーンレーザー	—	
	ビーム幅	400mm	500mm以上	40inchTVクラスの基盤加工が可能なサイズ以上	
粉末成形技術	レーザー照射	CW	CWとパルスの複合レーザー照射	—	
	成形精度	±0.2mm	±0.1mm	欧州製焼結積層成形装置の能力の50%向上。	
	成形時間	20時間 (高さ100mmサイズの標準パーツ)	16時間以内	欧州製焼結積層成形装置の能力の20%アップ。	
	引張り強度	—	Ti 840Mpa以上	Ti-6Al-4Vの機械強度に関するASTM-F136とISO6832-3のいずれの規定値も満足する値を設定。	

## II.2 事業計画

### II.2.1 研究開発の内容

上記II.1.1及びII.1.2より、目標とする次世代レーザー加工システムを開発するために要求される代表的な性能を表II.2.1-1にまとめ、次世代製品に向けたレーザー加工の基盤技術の確立を以下のように分類して開発を行う。

- ① レーザー高出力化技術の開発
- ② レーザー高品位化技術の開発
- ③ 多波長複合加工技術の開発

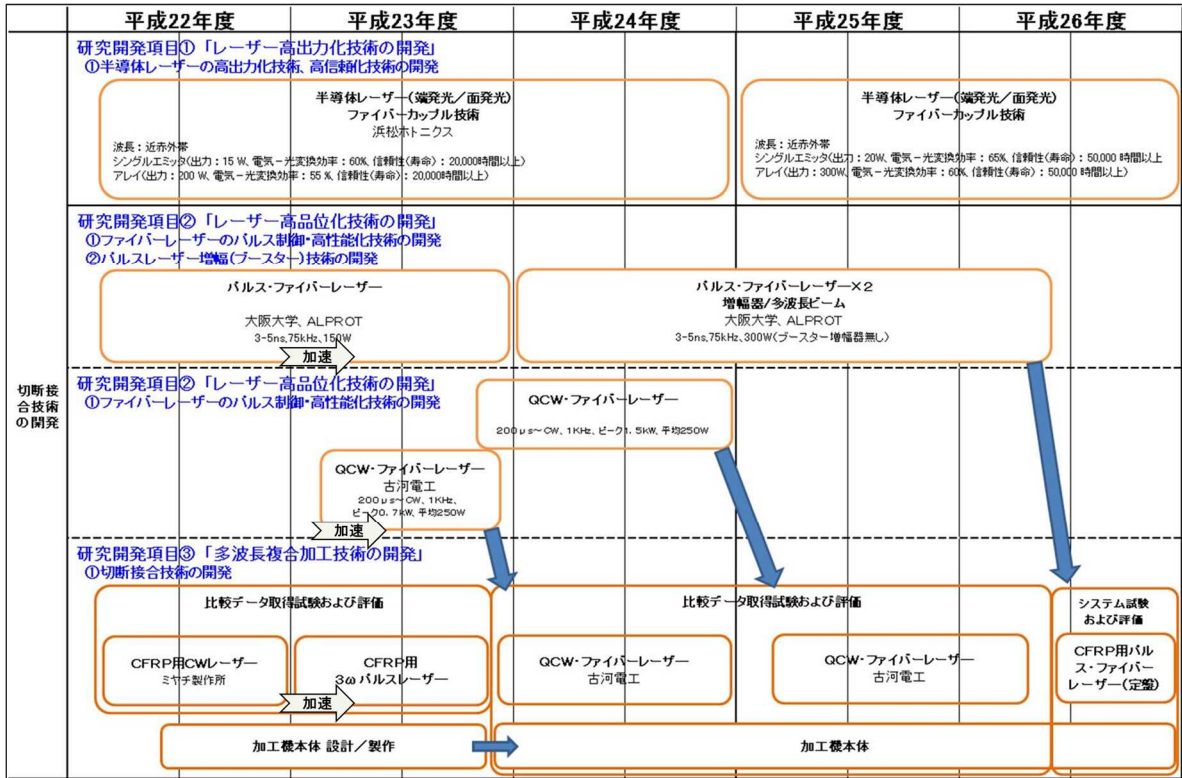
表II.2.1-1 加工技術に対する要求と技術課題

	要求性能		研究開発分類
	項目	仕様	
切断接合技術	光源: シングル エミッタ	波長: 近赤外帯(900nm帯)、出力: 20 W、効率: 65%、寿命: 50,000時間	①レーザー高出力化技術 励起用半導体レーザーの高出力化・高信頼化 ファイバー導入におけるレーザー出力の損失低減
	光源: アレイ	波長: 近赤外帯(900nm帯)、出力: 300 W、効率: 60%、寿命: 50,000時間 自動組立が可能であること	
	レーザー	繰り返し: 75-150kHz、出力パワー: 1.5kW、波長: 1064.1-1064.8nm パルス幅: 3-10ns	②レーザーの高品位化技術 レーザー出力増幅及びビーム品質の保持
	切断性能	切断加工速度 6m/min、反応層厚み 100μm、引張強度 10%未満の 低減、高出力レーザーと二波長重畳等の多波長複合照射	③多波長複合加工技術 加工システム、プロセスの構築
	接合性能	切断加工速度 6m/min、引張せん断強度 100MPa	
表面処理技術	レーザー	Green Laser、波長: 1μm帯、平均出力: 200~700W、 繰り返し周波数: 1~150 kHz、パルス幅: 0.5~200ns	②レーザーの高品位化技術 レーザー出力増幅及びビーム品質の保持
	ビーム 性能	ワイドビーム: 幅500mm以上、	③多波長複合加工技術 ワイドビーム整形光学系技術の確立
粉末成形技術	レーザー	波長1μm帯、平均出力: 200~700W、繰り返し周波数: 1~150 kHz パルス幅100ns	②レーザーの高品位化技術 レーザー出力増幅及びビーム品質の保持
	成形	材料: チタン(酸化防止技術)、成形精度: ±0.1mm、成形時間16時間 以内、CWとパルスの複合レーザー照射	③多波長複合加工技術 真空チャンバー型焼結積層造形技術

### II.2.2 研究開発計画

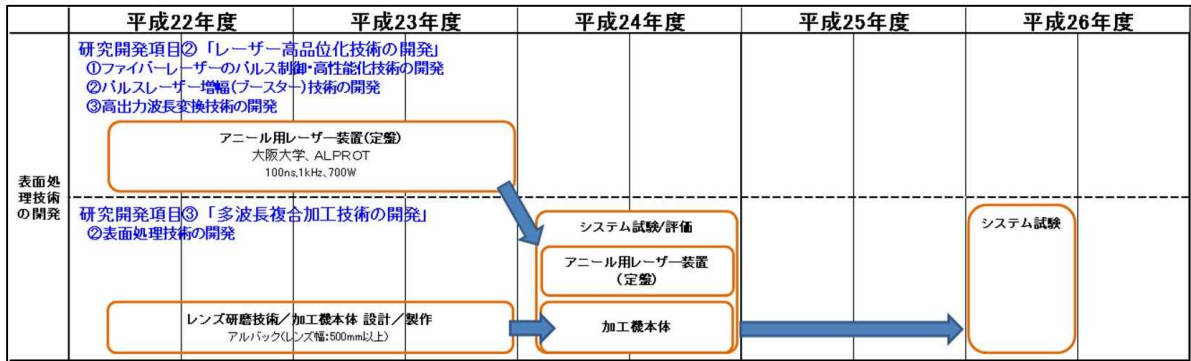
レーザー加工システム単位技術課題に対する開発計画及び、開発予算を以下に示す。

## II.2.2.1 切断接合技術開発計画



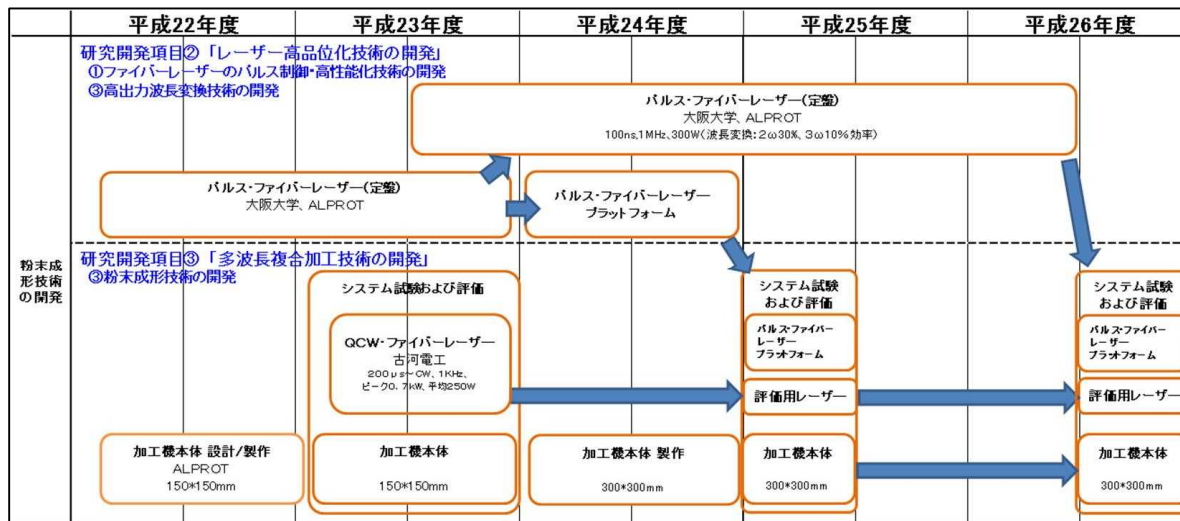
図II.2.2-1 切断接合技術開発計画

## II.2.2.2 表面処理技術開発計画



図II.2.2-2 表面処理技術開発計画

### II.2.2.3 表面処理技術開発計画



図II.2.2-3 粉末成形技術開発計画

### II.2.2.4 開発予算計画

		H22	H23	H24	H25	H26	通算
開発実績 (事業費合計)	一般会計	598	948	95	0	0	1,641
	特別会計	0	0	890	876	696	2,542
	(加速)	0	450	0	80	72	522
	合計	598	1,398	985	956	768	4,705

図II.2.2-4 開発予算

### II.2.3 研究開発の実施体制

我が国では、このようなレーザー発振器開発に必要な要素技術が大企業、中小企業、大学、研究機関に分散しており、製品化を見据えたレーザー技術の集約・システム化が進んでいなかったため、コンソーシアムによる技術開発プロジェクトを実施することで、技術の集約やシステム化を進めることとした。その実施体制を図II-2-3-1に示す。



【産学官連携基盤技術開発】

委託100%

研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発」  
(パルス制御、ブースター、波長変換)

○国立大学法人 大阪大学

研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」  
(切断接合・粉末成形)

○技術研究組合 次世代レーザー加工技術研究所

- 浜松ホトニクス株式会社
- 古河電気工業株式会社
- 株式会社片岡製作所
- ミヤチテクノス株式会社
- 新日本工機株式会社
- 株式会社アスペクト
- 三菱化学株式会社
- 株式会社アルバック
- (独)産業技術総合研究所
- (財)レーザー技術総合研究所
- (財)製造科学技術センター

【要素技術実用化開発】

共同研究(NEDO負担率 2/3)

研究開発項目①「レーザー高出力化技術の開発」

○浜松ホトニクス(株)

研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発」  
(励起半導体レーザーの高速変調とその応用)

○古河電気工業(株)

研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」  
(表面処理)

○(株)アルバック

図II.2.3-1 プロジェクト実施体制

II.2.4 研究開発の運営管理

プロジェクトリーダーとNEDOの研究開発の進捗管理、プロジェクト内の連携を図る組織体、及び実用化に向けてユーザーとの連携を図っている。

II.2.4.1 プロジェクトリーダーとNEDOの研究開発の進捗管理

① レーザー推進連絡会議

実施者が一堂に会プロジェクト全体のスケジュール及び課題の確認。

② 進捗確認シート

4半期に一度、研究進捗の報告、課題と今後のスケジュールを確認。

II.2.4.2 プロジェクトメンバーによる進捗管理

① 光源開発センター

大阪大学 (レーザー研、接合研) に高品位化技術の開発及び評価を集約。

② 加工技術開発センター

産総研に加工システム (多波長複合技術) の構築を集約して開発を推進。

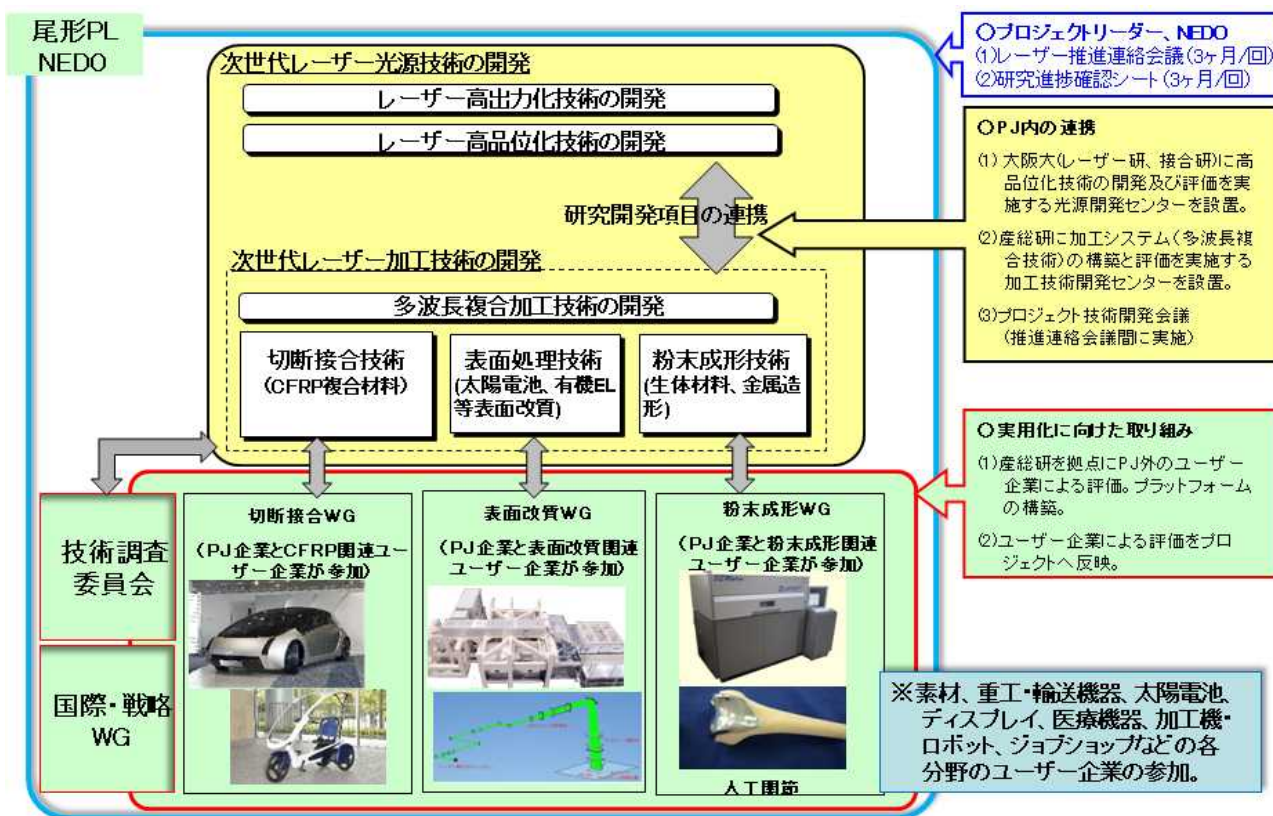
③ プロジェクト技術開発会議

プロジェクトメンバーが光源とシステム関連を交互に開催する連絡会議。

II.2.4.3 実用化に向けたユーザーとの連携

技術的な方向性や最新技術の動向把握、技術情報等の収集。プロジェクト成果活用が見込めるユーザー企業のメンバーからなる外部有識者やエンドユーザー、レーザー加工機メーカーとワーキンググループを構築し、成果の評価・普及促進を図り、実用化への検討を行う。その運営体制を図II.2.4-1に示す。

- ① 技術調査委員会  
 実用化促進のため、レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向、標準化、新素材・加工、表面改質、粉末成形のユーザーからのニーズ等の把握。
- ② 国際・戦略ワーキンググループ  
 現状のレーザー及びレーザー加工技術の動向と、今後どのようなレーザーとレーザー加工技術等の情報収集。
- ③ 切断接合ワーキンググループ  
 CFRP素材の各種仕様とその加工や評価等に関するニーズ等の把握。
- ④ 表面改質ワーキンググループ  
 フラットパネルメーカーの技術ニーズ、太陽電池領域におけるレーザー応用に関するニーズ等の把握。
- ⑤ 粉末成形ワーキンググループ  
 粉末成形の医療関連活用に関する技術情報、レーザーを活用した造形技術に関するニーズ等の把握。



図II.2.4-1 プロジェクトの運営体制

## II.3 情勢変化等への対応等

### II.3.1 加速制度の活用

「多波長複合加工技術の開発の前倒し及び、レーザー高品位化技術の開発の目標値向上」及び、「レーザー高品位化技術の開発の事業化推進」の2テーマで活用した。

#### II.3.1.1 「多波長複合加工技術の開発」の前倒し及び「レーザー高品位化技術の開発」の目標値向上

2010年12月の”74<sup>st</sup> Laser Materials Processing Conference (Tokyo)”において、ドイツの研究機関であるLZH (Laser Zentrum Hannover e.V.) は、航空分野や自動車分野への応用を目指し、数kW級レーザーを利用したCFRP切断に関する研究成果を発表し、更なる研究開発の実施を示唆した。このため、現行の開発計画ペースでは、ドイツに先行される可能性が発生したことから、平成24年度以降に計画していた切断接合技術開発（研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」）及び、研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発」について以下の加速を行った。

平成24年度以降に計画していた切断接合技術開発（研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」）において、30 W級パルス光源システムを平成23年度中に導入し、平成24年度以降に予定していたCFRPの切断接合実験を平成23年度から実施した。

研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発」において、励起用半導体レーザー及び複合ビーム集光用光学系ユニットを導入し、半導体レーザー特性評価及びレーザー安定性評価をそれぞれ実施し、ファイバーレーザー出力の開発目標を200 Wから300 Wにし、更に、高出力波長変換技術について、波長変換素子のコート及び均一冷却に関する最適化を実施し、2倍高調波への変換効率を30%から40%に、3倍高調波への変換効率を10%から13%にした。

これにより、24年度に計画していたCFRP切断に関する開発を23年度に前倒しすることができ、また、開発目標をより高く設定することができる。そして、他国に先駆けてCFRP等の先進材料の加工技術の確立を目指すとともに、レーザー高品位化技術を強化することにより、本技術分野における日本の国際競争優位を確保することができる。

#### II.3.1.2 「レーザー高品位化技術の開発」の事業化推進

2010年5月の”AKL'10 - 8th International Laser Technology Congress (Aachen, Germany)”において、IPG PHOTONICSは、励起用レーザーの消費電力の低減が実現可能なQCWファイバーレーザーに関する研究成果を発表し、更なる研究開発の実施を示唆していたため、現行の開発計画ペースでは、励起用レーザーにおいて、世界をリードする欧米に先行される可能性が発生した。

このため、現行の開発計画ペースでは、励起用レーザーにおいて、世界をリードする欧米に先行される可能性が発生したことから、以下の加速を行った。

研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発 (1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術」について、ファイバー増幅部分に高速変調半導体レーザーを適用し、ファイバー増幅部分の消費電力を現行の連続駆動100%に対し目標値を50%に変更した。

高速変調半導体レーザーを連続駆動用ファイバーレーザーキャビティの励起に適用し、ピーク出力の目標値を300 Wから700 Wに変更した。

上記の目標を設定し、(株)古河電気工業との2/3共同研究契約によって実施し、研究開発成果による

ファイバーレーザー発振器をQCWファイバーレーザーとしてパッケージ化し、早期に実用化を図った。

## II.3.2 開発方針の修正

### II.3.2.1 表面処理技術開発 (株アルバック)

平成23年10月：当初計画のレンズ幅を500 mmと想定していたが、55-inch wide を製品化するマーケット情報入手し、計画していたレンズ幅よりさらに幅広のビームの形成を早期に実現する必要性が発生した。そのため、ビーム幅を500 mm ⇒ 700 mmに変更した。

### II.3.2.2 レーザー高出力化技術 (浜松ホトニクス株)

「開発項目① レーザー高出力化技術」で開発している光源については、既存のレーザー装置の光源に適用することによって、市場への早期展開を目指すことにした。

## II.3.3 開発方針の修正

基本計画、開発計画及び体制の見直しを検討。

これまでの研究開発結果や成果を受け、より出口を意識して目標を具体化する。中間評価結果および今後の情勢変化 (研究進捗、計画の成立性および予算など) を総合的に鑑み、柔軟に対応する。

ユーザーとのさらなる連携強化を図り、加工システム仕様へ反映する。

## II.4 評価に関する事項

### II.4.1 中間評価コメント

平成24年8月に行われた分科会（中間評価）において、本プロジェクトに関して下記のような評価コメントをいただいた。

（以下、中間評価報告書より抜粋）

#### II.4.1.1 総論

##### ① 総合評価

ドイツとアメリカに先行を許した状況の中、日本の産業発展のため、レーザー開発プロジェクトを立ち上げたことは、当然の動きであり評価できる。また、定めた目標値については、達成されている部分が多くあり個別要素技術に開発について努力がなされている。特に、基盤技術となる冷却技術・コンポーネント開発、産業応用に適したレーザー加算技術などをkWのレベルで試験し、それに応じた光学部品などの開発も並行して進んでいることは評価できる。

しかし、本プロジェクトは我が国のレーザー加工分野の世界的競争力を取り戻すという目的で実施されているが、ファイバーレーザー自体がキャッチアップ的である中、独自性を打ち出していくことが求められる。開発期間中にも、世界の経済状態の大幅な変化や、海外競合メーカー技術に著しい技術進展がある。

さらに、切断接合技術開発CFRP（炭素繊維強化プラスチック）加工用レーザーについて、成果を事業化するための具体的な計画を明らかにする必要があると考える。

##### ② 今後に対する提言

レーザー加工に要求される仕様は本プロジェクトの立案時とは、大きく変わってきている。その点を考慮して時代の変化に応じ、当初の目標値に縛られることなく、もう一度世界の状況、国内のマーケットを素直に見直して、ターゲットを設定する必要がある。また、ファイバーレーザー加工装置の優位点が炭酸ガスレーザーに対しては導波路が使える、また他の固体レーザーに対してはコンパクトで安定な特性を活かした加工装置を考えるなど、どのような点にあるか再度見直しが必要である。

3つの個別テーマに注力することにより、諸外国の製品・開発部品に対して圧倒的な優位な立場をとれる要素技術を開発するなど、限られた項目でよいから、光るものをアピールしてほしい。また、新規内容で欧米に対して外国出願ができるような成果を上げてほしい。

#### II.4.1.2 各論

##### ① 事業の位置付け・必要性について

1980年～90年代に比べて、我が国のレーザー加工機産業は世界的に大きく遅れをとっている。次世代のレーザー加工機として有望なファイバーレーザーやThin-Diskレーザーのような先進的なものに関しては、自動車ならびに航空産業や太陽電池、次世代ディスプレイ等への応用が期待されており、早急に遅れを取り戻す必要がある。ファイバーレーザーを中心とし

た光源開発とこれを用いた加工技術開発は、今後のレーザー産業発展の中で必要な技術であり、この技術開発によって新たな産業の創造も可能と考えられることから、NEDOの関与は妥当である。

#### ②研究開発マネジメントについて

世界的動向から、ナノ秒パルスレーザー開発に絞ったことは妥当であり、レーザー開発および加工速度等に関しては、数値目標を定量的に設定していることは評価できる。また、LD(半導体レーザー: Laser Diode) 励起高出力レーザーの開発実績がある大阪大学レーザー研と組む形をとったのは妥当である。

但し、最終的な目標がレーザー出力しか見えていない。単なる数値目標では陳腐化することがあり、他国のメーカーに対して優位に立てるような研究開発の目標を定めなおすべきと考える。また、ファイバーレーザーは海外メーカーが大きく先行しており、技術開発も積極的に取り組んでいることを認識した目標になっていない。海外先行メーカーの技術開発の実態を調査して計画にフィードバックすべきである。

また、市場調査に関しても十分とは言えない。加工の目的がCFRP切断接合、アモルファスシリコンのアニール、粉末成形に限られているが、現在の国内の最終ユーザーの状況などを見るともっと柔軟な対処が必要になっている。当初に設定した計画にとらわれることなく、最終的に我が国のレーザー加工技術、加工産業に貢献ができるように目標設定、開発計画、応用先を再考すべきであると考ええる。

#### ③研究開発成果について

切断接合、表面処理、粉末成形技術とそれに対応したレーザー開発において、一部未達成の部分もあるが達成への道筋が示されており、全体としてほぼ中間目標を達成している。さらに、要素技術の研究開発を実施する上では、各実施者は技術開発能力があり、最終目標を達成できると考える。

一方、目標値はクリアしているが、そこにどのような新しい技術開発があったのか、また、外国の先端企業等に対してどのように技術優位性を獲得していくのか技術開発戦略が明確ではない。LD励起のファイバーレーザーも固体レーザーもアメリカやドイツと比べて遅れている。今回ナノ秒パルスに特化したとは言え、世界的レベルに達するのは容易ではない。

#### ④実用化の見通しについて

加工テーマを3つに分けているので、出口イメージは理解しやすい。また、高出力半導体レーザーおよびQCW(準連続発振)ファイバーレーザーの開発に関しては、実用可能性は高い。

一方、レーザーそのものの技術動向も大きく変化しており、また、ユーザーの状況も大きく変化してきている。アニール用システムは事業化するためのグリーンレーザーのイメージが湧かない。このレーザーは多段増幅も含めて複雑すぎる懸念を持った。また、QCWファイバーレーザーの開発では、CWレーザーで安価なkW級レーザーが市販されており、現状のCWレーザーに対する優位性をアピールする必要がある。今後、最終ユーザーとの連携を強めていく必要があり、そうなれば実用化の可能性を高めることができると考える。

(以上、中間評価報告書より抜粋)

### II.4.1.3 要改善点に関するNEDOと実施者と理解

中間評価で受けた要改善点に関する指摘に関して、NEDOと実施者は下記のように理解した。

- ・開発項目のいくつかがキャッチアップであるため、独自性打ち出しが必要
- ・プロジェクト内および最終ユーザーとの連携体制の構築が必要
- ・総花的に目標を達成して良しとせず、光るものをアピールすべく、集約化が必要

### II.4.2 中間評価を受けての開発方針の見直し

中間評価で受けた要改善点に関する指摘、さらにはプロジェクト開始時から中間評価時点までの状況変化等を鑑み、その後のプロジェクトの在り方や見直しの方向性についてNEDOと実施者の間で協議を重ねて、プロジェクト後半の開発計画の見直し方針を導いた。

#### II.4.2.1 研究開発内容の見直し (図II.4.2-1参照)

##### ①研究開発項目の見直し

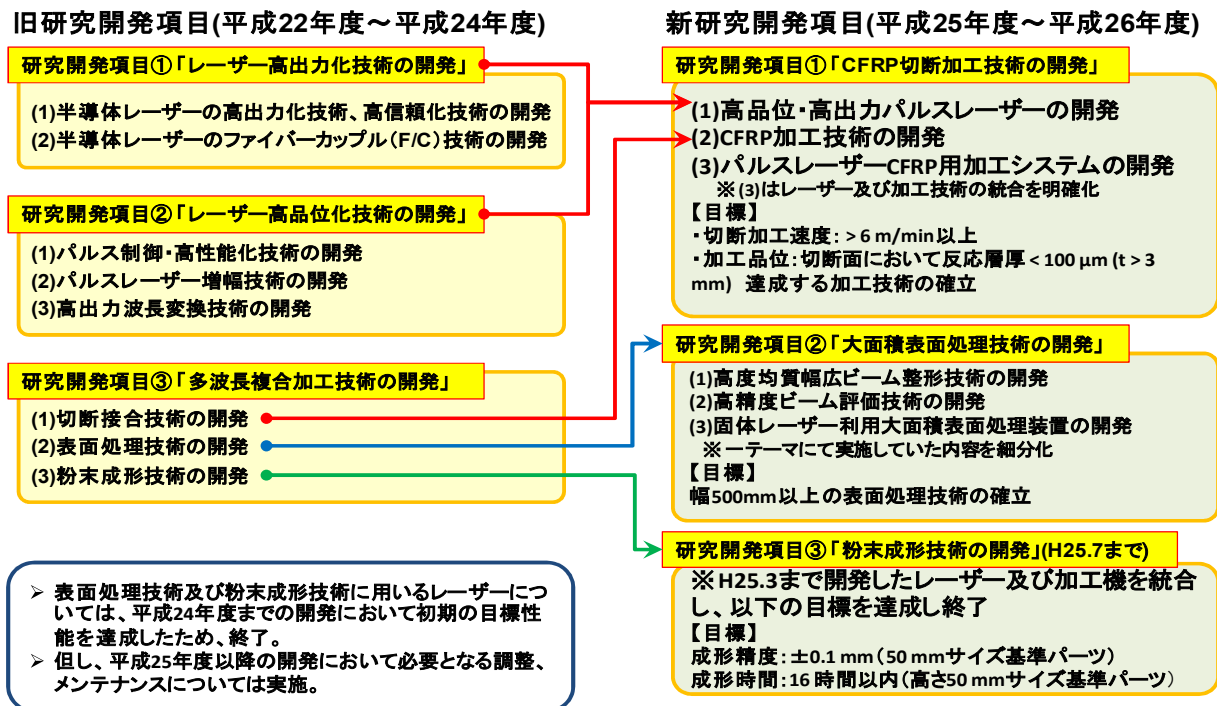
レーザーのプースターを固体からフォトニック結晶ファイバーロッド (Photonic Crystal Fiber Rod: PCF-Rod) へ変更、QCWレーザーの高繰り返し化と高出力化に注力した。

##### ②ユーザーとの連携強化策

阪大～産総研間の連携実験の強化、およびユーザーと連携した加工実験を実施することとした。

##### ③リソースの集約

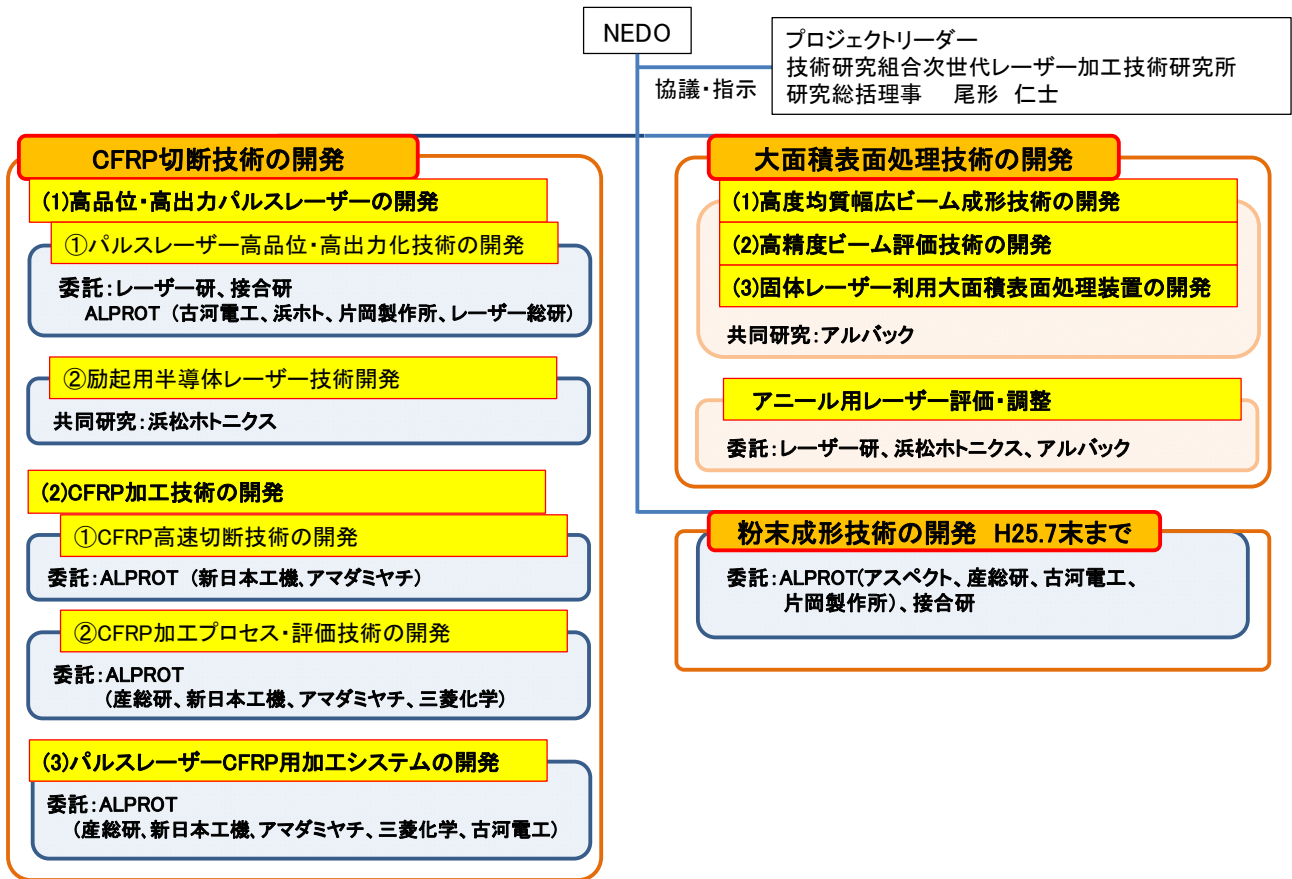
出口イメージを重視して開発項目を再編成し、粉末成形については早期実用化を目指すべく、本プロジェクトから切り離してNEDOイノベーション開発事業へと移行させることとした。



図II.4.2-1 新旧実施項目

#### II.4.2.2 研究開発内容見直しを受けての体制変更

研究開発目標の修正に対応し、プロジェクト期間内でより大きな成果創出につなげるべく、研究開発体制を図II.4.2-2のように変更した。



図II.4.2-2 新実施体制

II.4.2.3 研究開発計画の見直し

研究開発目標の修正に対応し、プロジェクト期間内でより大きな成果創出につなげるべく、研究開発計画ならびに最終目標を図II.4.2-3のように変更した。

	22年度	23年度	24年度	25年度	26年度
半導体レーザー 浜松ホトニクス			半導体レーザー アレイ200 W		半導体レーザー アレイ300 W
ファイバレーザー 接合研、古河電工 片岡製作所			ファイバレーザー 150W,10~200ns,1MHz ⇒ SHG THG		ファイバレーザー 300W,10~200ns,1MHz ⇒ SHG THG
ファイバレーザー 接合研、古河電工	ファイバレーザー 5W,3~10ns,75kHz				
ファイバレーザー 古河電工		QCWファイバレーザー 700Wpeak	QCWファイバレーザー 1500Wpeak		
ブースターレーザー レーザー研、レーザー総研、浜松ホトニクス		PCF増幅 300W	ブースターレーザー 3~10ns,75~150kHz		(CFRP加工実証) 1.5kW, 3~10ns,75~150kHz ⇒SHG THG
アニール用レーザー レーザー研、アルバック、 浜松ホトニクス		アニール用レーザー 200~700W, 1~100kHz, 0.5~100ns, ⇒ SHG			
表面加工システム アルバック				表面加工システム	
CFRP加工システム 産総研、ミヤチテクノス、 新日本工機、三菱化学		加工ノズル 加工ヘッド	CFRP加工システム テスト機	加工ノズル 加工ヘッド	CFRP加工システム
粉末成形システム 産総研、アспект			粉末成形システム テスト機		粉末成形システム

図II.4.2-3 研究開発計画



#### II.4.2.4 研究開発マネジメントの改善

研究開発進捗状況の把握、遂行上の課題、外部状況・環境変化などに柔軟かつ迅速に対応すべく、本プロジェクトのマネジメント方法を見直した。

##### ①研究進捗管理シートの活用

研究開発の進捗を把握するため、プロジェクトの実施当初から下記のような様式の実施者に対して毎月進捗管理シートの提出を義務づけていた。この試み自体は適切であったと考えられるが、中間評価以前のしくみでは実施者からNEDOへ一方通行の状況報告に止まっていて、PDCAサイクルを適切に回すためのツールとして有効に機能しているとは言えなかった。

こうした状況を改善し、研究開発計画を適宜かつ柔軟に見直してより良い成果を創出に寄与することを目指して、以下のように運営上の見直しを図った。

各実施者から提出された進捗管理シートの内容については、尾形プロジェクトリーダーとNEDO推進部の部長がダブルチェックし、この両名が進捗状況に関するコメントをそれぞれ記入して、各実施者へフィードバックすることで、各実施者の研究開発の進捗管理へ適宜反映させるようにした。

これにより、研究開発を進めるうえでの進捗状況や課題、解決策をプロジェクトリーダー、NEDO推進部、実施者の3者が的確かつタイムリーに共有することができるよう改善された。

##### ②サイトビジットの活用

各実施者のもとへ赴いて研究進捗や予算の適正な利用についてチェックするサイトビジットは年1回実施していた。ただし、研究開発をとりまく状況は刻々と変わるのが常で、この頻度では各実施者のもとで生じた課題を適宜把握して解決策を的確かつタイムリーにフィードバックするには必ずしも十分とは言えなかった。

こうした状況を改善し、研究開発計画を柔軟にタイムリーに見直してより良い成果創出に寄与することを目指して、主に予算の適正な利用に関する定期的なサイトビジットに加え、上述の進捗管理シートで課題が浮かび上がった際にもヒアリングのために適宜実施者のもとを訪問して、できるだけタイムリーに研究開発計画の問題点を修正できるようにした。また、訪問に際しては本プロジェクトの予算で取得した実験装置や部品・材料等の現場での活用状況を適切に把握することにも努めて、有効活用されていない場合には改善を促すようにした。さらに、実施者の率直な意見をヒアリングして、プロジェクト運営にあたっての改善にも役立てる仕組みとした。

##### ③推進委員会との連携

本プロジェクトに実施にあたっては、表II.4.2-1のように、研究開発計画、研究開発項目毎の進捗、成果の展開などについて議論し専門的な視点から助言を与える技術調査委員会ならびに技術開発項目毎に4つのワーキンググループが構成されていた。各ワーキンググループには主要実施者のほか、有識者やユーザー企業の専門家を外部委員として招き、議論に加わっていただいた。これら委員会や各ワーキンググループの取り組み自体は有用であったことはもちろんであるが、中間評価以前は、これら委員会やワーキンググループの会合で議論された結果が、NEDO側のマネジメントに直接反映される機会が必ずしも十分とは言えなかった。

この状況を改善し、これら委員会や各ワーキンググループで議論された内容をNEDOマネジメン

トにきちんと反映して研究開発の方向性について常に議論し、プロジェクトリーダー、実施者とも共有してより良い成果創出に寄与することを目指して、これらの会合への関与をより深める試みを進めた。具体的には、全ての委員会にNEDO推進部が原則出席して、技術内容のみならず、上述の研究進捗管理シートのレビューの場としても運営や研究計画について実施者や有識者も含めて議論する場として活用するようにした。

こうした取り組みにより、研究開発計画・進捗・目標修正など、研究開発を進めるうえでの進捗状況や課題、解決策について、上述の進捗管理シートやサイトビジットだけでは完全にカバーしきれなかった部分についても、プロジェクトリーダー、NEDO推進部、実施者、外部委員の間での確かつタイムリーに共有することができるようになり、プロジェクト推進の改善に大きく寄与した。

表II.4.2-1 委員会・ワーキンググループの活動

委員会、WG	委員数	回数	議事内容
技術調査委員会	25名	8回	実用化促進のため、ユーザーニーズの検討を行なった。レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向と標準化、新素材・加工、表面改質、粉末成形の各WGテーマの実施者からの報告、検討を行なった。
国際・戦略テーマWG	10名	6回	現状のレーザー及びレーザー加工技術の動向と、今後どのようなレーザーとレーザー加工技術が必要とされるかの検討を行なった。ドイツの自動車産業におけるレーザー加工や世界的技術動向の現状を把握した。アジア地区の動向や日本の標準化戦略やニーズにマッチしたレーザー及びレーザー加工について検討した。
新素材・加工テーマWG	6名	7回	開発内容を確認し、ニーズ面からどのようなレーザーが必要か検討を行なった。CFRP素材の各種仕様とその加工や評価等に関する報告が行なわれた。ユーザー側のニーズや加工スペック等が提示され、それらの加工が可能なレーザーや加工法に関して検討した。
表面改質テーマWG	7名	6回	本WGでは、ディスプレイや太陽電池の製作に最適なレーザー加工のあり方を検討した。ディスプレイ用途のレーザーアニールの開発目標値とその背景が報告された。ディスプレイ領域の市場動向、フラットパネルメーカーの技術ニーズ、太陽電池製造におけるレーザー加工のニーズ検討を行なった。
粉末成形テーマWG	2名	5回	粉末成形の医療関連活用に関する技術情報を検討した。レーザーを活用した造形技術の現状を報告した。ニーズとしてチタン粉末を活用した医療用部品の仕様等に関して検討を行なった。開発した小型プラットフォームの見学を行ない、開発目標の確認を行なった。

#### ④研究開発成果の普及に向けた広報

本プロジェクトの活動内容や成果、その有用性を広く一般に周知し理解していただくことを目的として、広報活動も推進した。

展示会活動としては、2015年2月12日～13日に開催されたNEDOフォーラム（東京フォーラム）に出展し、本プロジェクトの成果（半導体レーザー、QCWレーザー、CFRP加工サンプル）の展示を行った。レーザー関係者だけでなく、医療やバイオ等幅広い分野の来場者があったが、レーザーならびにレーザー加工応用について興味を持っていただくことができた。

また、2015年4月22日～24日に開催されたLaser EXPO 2015（パシフィコ横浜）にNEDOブースを出展し、活動に関するパネル展示に加えて、加工サンプルや開発レーザー等、本プロジェクトの成果物を持ち込んで展示し、実施者自らに来場者へ説明して研究開発成果をアピールしていただくと同時に、来場者からの生の声を聞く機会として活用していただいた。また、展示会初日の4月22日には、併設した特設会場でレーザー加工シンポジウムを開催した。定員100人の会場の周りに立ち見ができるほどの盛況で、レーザー加工分野ならびに本プロジェクトの成果に関

する関心の高さを伺わせた。さらに、4月23日～24日には、NEDOブース内にて本プロジェクトの成果報告会を終日実施し、各実施者から活動内容ならびに最新成果を紹介いただいた。ブース来訪者は3日間で延べ700名を超え、また成果報告会もシンポジウム同様に立ち見が出る盛況ぶりで、ブース内成果展示物と合わせて、参加者へ効果的にアピールすることができた。



LaserEXPO2015 NEDOブース

レーザー加工シンポジウム

#### 図II.4.2-4 広報活動 (展示会、成果報告会、シンポジウム)

##### II.4.2.5 成果創出加速に向けた施策

研究開発の進捗状況や課題の議論・分析を通じて、テーマを再編して資源を集中的に投入して大きな成果を早期に創出可能と考えられる案件については、実施者から提案された目的・費用・成果目標などの内容についてヒアリングし、NEDO内の関連部署や経済産業省とも折衝を重ねて、加速資金を獲得することに努めた。

平成25年度については、レーザー加工時のアブレーションルームの挙動を観察するための評価設備と波長変換器の購入に20百万円、ファイバーレーザーによるCFRPの熱的影響を高精度に評価分析する分析装置を新たに購入するために40百万円、3次元微加工を高精度に行うための制御機構開発やレーザー加工時に発生して加工部位の平坦性や品質を左右する粉塵・ガスの影響を取り除く集塵装置を導入するために20百万円、計80百万円の資金を獲得して成果創出加速のために投入した。

また平成26年度については、パルスファイバーレーザーのモジュール化およびパワー合成のためのビーム結合系の開発のために20百万円、QCWファイバーレーザー加工機の出力向上の早期実現のために30百万円、QCWファイバーレーザー加工機を用いた高速切断実験とその高精度評価に必要な測定機器の購入に22百万円、計72百万円の加速資金を獲得し、中間評価以後の平成25年度～26年度の2年間で計152百万円の資金をプロジェクトの成果創出加速のために投入した。

これらの施策により、レーザー加工技術をさらに発展させるうえで不可欠な加工現象の物理に対する理解が進捗するとともに、ファイバーレーザー加工機の事業化の実績にも繋がるなど、本プロジェクトの目標達成と成果の実用化に大きく寄与した。各案件の具体的な成果については、それぞれを担当した実施者からの報告に譲る。

また、中間評価の後にいわゆる3次元プリンタとして世界中で俄に注目を集めた研究開発項目3「(3)粉末成形技術の開発」については、世界中で当該分野への新規参入が予想されたことから、同技術の早期実用化・事業化を目指すべく、本プロジェクトから切り離し、NEDOの一連の助成事業のうち、分

野横断的公募事業の平成24年度イノベーション実用化ベンチャー支援事業（プロジェクトコード：P12012）という実用化・事業化のための助成の枠組みを新たに活用できるように推進部として後押しした。その結果、「241507 粉末焼結積層造形技術による軽金属部品の直接製造技術の開発事業」（2/3助成）の獲得に繋がった。また、この新たな事業支援の枠組みの活用に加えて、産業技術総合研究所と連携した共同研究を推し進めることにより、本プロジェクトで立ち上げた研究開発を中断させることなく、実用化・事業化へ繋げることが可能となった。

## II.5 評価に対する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成24年度、事後評価を平成27年度に実施し、中間評価結果を踏まえ、必要に応じその結果を後年度の研究開発に反映することとする。なお、平成25年度までの各年度中に推進委員会等で各研究開発内容を評価し、必要に応じ、プロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 1. 事業全体の成果

本プロジェクトにおいて、成果の出口から見て次の3テーマの開発を行う。

CFRP切断接合技術の開発

表面処理（Siアニール）技術の開発

粉末成形技術の開発

それぞれの開発はレーザーの開発とそのレーザーを搭載した加工システムの開発から成っている。本プロジェクトではCFRP加工、表面処理、粉末成形の3つの加工システムの実用化、または事業化が求められているが、その3つの出口とは別に研究開発項目は3テーマから構成されている。

① 半導体レーザー開発

② レーザー開発（ファイバーレーザー、固体ブースタレーザー、波長変換技術）

③ 加工システム開発（CFRP切断接合、表面処理、粉末成形）

研究開発項目の詳細は、表Ⅲ-1.1の項目から構成されている。

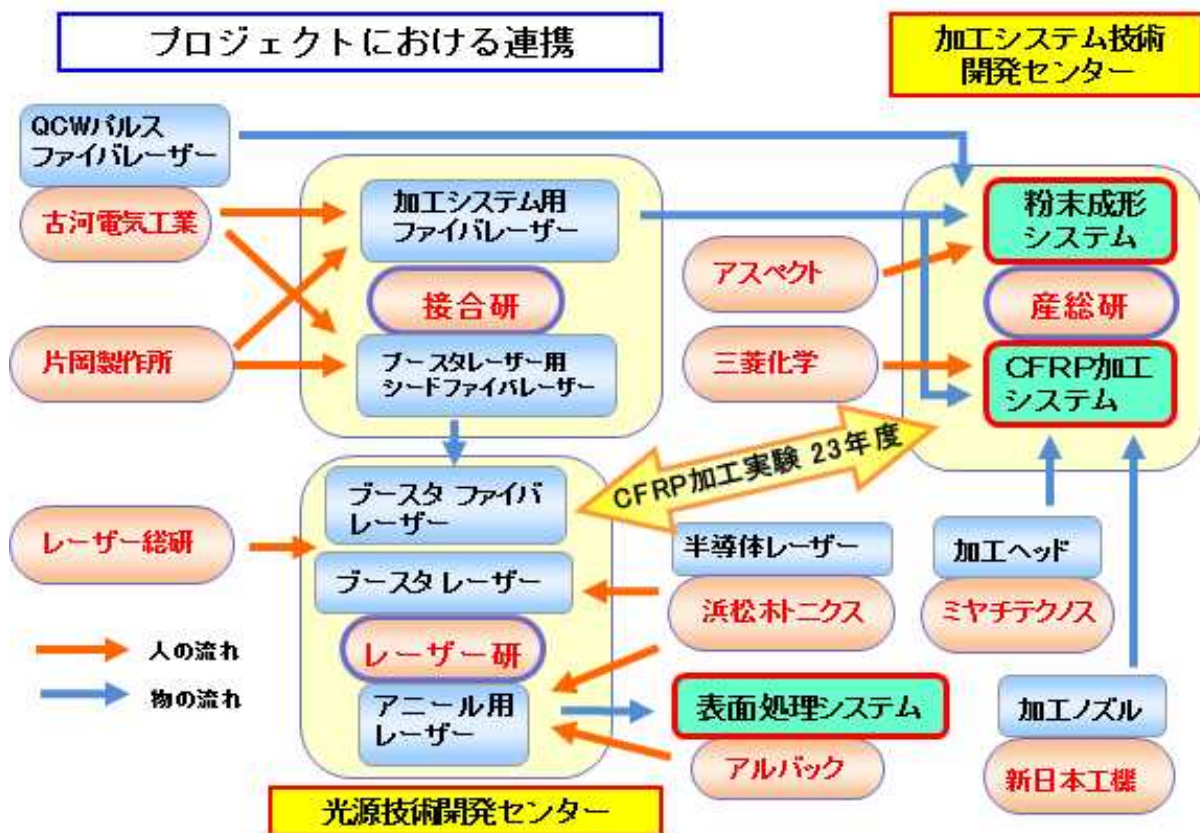
表Ⅲ-1.1 研究開発項目の詳細

① レーザー高出力化技術の開発 <2/3 共同研究> (浜松ホトニクス株式会社) (1) 半導体レーザーの高出力化・高信頼化技術の開発 (2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発
② レーザー高品位化技術の開発 (1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発 1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学) 2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学) 3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発 <委託> (大阪大学) 4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発 <2/3 共同研究> (古河電気工業株式会社) (2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学) 1) kW級ブースター増幅技術の開発 2) アニール用ブースター増幅技術の開発 (3) 高出力波長変換技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学) 1) 波長変換モジュール化技術の開発 2) 波長変換の高効率化技術の開発 3) 加工試験のための整備

③ 多波長複合加工技術の開発		
(1) 切断接合技術の開発	< 委託 >	(ALPROT)
1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発		
2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発		
(2) 表面処理技術の開発	< 2/3 共同研究 >	(株式会社アルバック)
1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発		
2) 大型光学部品研磨技術の開発		
3) 高精度ビーム評価技術の開発		
(3) 粉末成形技術の開発	< 委託 >	(ALPROT)
1) 基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化		
④ 技術開発推進にかかる調査（先端技術、標準化等）・評価・普及促進		
	< 委託 >	(ALPROT)

(ALPROT：研究組合次世代レーザー加工技術研究所)

以上の研究開発を効率よく進めるために、本プロジェクトでは大阪大学内に光源技術開発センター、産業技術総合研究所（産総研）内に加工システム開発センターを設置している。図Ⅲ-1.1に示すように大阪大学の接合科学研究所（接合研）とレーザーエネルギー学研究センター（レーザー研）でレーザー光源開発、産総研で加工システム開発を集中的、かつ効率的に行う体制となっている。光源技術開発センターと加工システム開発センターには連携体制が構築され、平成23年度には大阪大学レーザー研においてCFRP加工実験を共同で行っている。



図Ⅲ-1.1 プロジェクトにおける連携体制

大きな流れとして「② レーザー高品位化技術の開発」で開発したレーザーを用いて、「③ 多波長複合加工技術の開発」を行う計画である。

### 1.1. 研究開発項目別の中間目標達成度

研究開発項目別の中間目標達成度について、表Ⅲ-1.1の順で簡単に説明する。平成24年7月31日時点で大幅に達成しているものは「◎」、平成24年7月31日時点で達成しているものは「○」、計画通り平成24年度中に達成見込みのものは「△」、平成24年度に目標に達しないものは「×」で、達成度を表わした。

#### ① レーザー高出力化技術の開発（浜松ホトニクス）

①-(1) 半導体レーザーの高出力化・高信頼化技術の開発

①-(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発

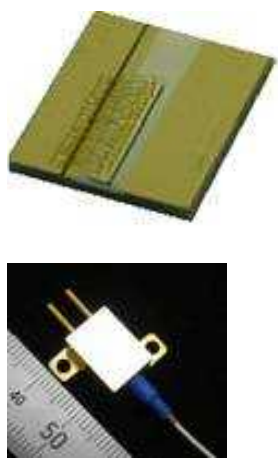
表Ⅲ-1.2に「①レーザー高出力化技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。また図Ⅲ-1.2には「① レーザー高出力化技術の開発」の概要を示した。半導体レーザーの開発において、主な課題は発熱の低減と発生した熱の除去である。これらを解決するため素子構造の最適化、ヒートシンクの改良を行い、出力特性の改善に結びつけた（図Ⅲ-1.2）。また高出力化と高信頼性を両立させるため、端面劣化抑制構造の開発も行った。これらの課題を解決することで、中間目標値の出力を達成した。寿命については現在測定中であるが、計画通り今年度中に達成の見込みである。半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発においては、シングルエミッタのファイバー結合効率の中間目標値80%を達成し、アレイについても目標達成の見込みである。①の開発における中間目標に関してはすべて問題なく達成、もしくは今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.2 「①レーザー高出力化技術の開発」の成果、達成度

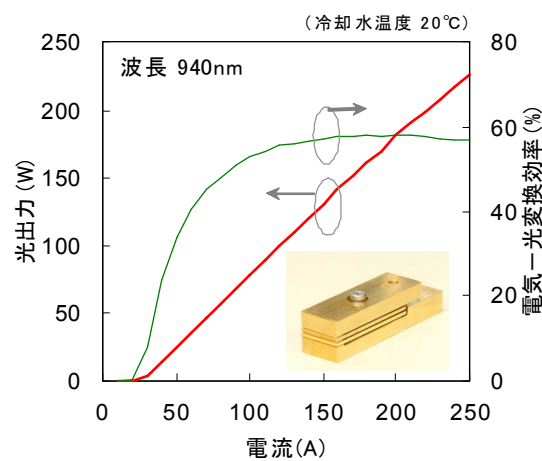
研究項目	評価目標		成果	達成度	
	評価項目	中間目標（基本計画）			中間目標
①-(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発	シングルエミッタ	波長：近赤外帯 出力：15 W、効率：60% 寿命：20,000 時間以上	波長：近赤外帯 出力：15 W、効率：60% 寿命：20,000 時間	900nm 帯 15 W、60% 確認中	△
	アレイ	波長：近赤外帯 出力：200 W 電気-光変換効率：55% 寿命：20,000 時間以上	波長：近赤外帯 出力：200 W、効率：55% 寿命：20,000 時間 自動組立が可能である事	900nm 帯 200 W、55% 確認中 自動組立可能	△
①-(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発	シングルエミッタ	ファイバー結合効率 (コア径 105 μm、NA0.15 相当)：80%以上	ファイバー結合効率：80%	80%以上	○
	アレイ	ファイバー結合効率： 60%以上	ファイバー結合効率：60%	仮組み時 60%以上	△



課題	解決策
発熱の低減と熱の除去 高出力と高信頼性の両立 ファイバ結合効率向上 (シングルエミッタ) (アレイ)	素子構造の最適化、ヒートシンク改良 端面劣化抑制構造の開発  素子特性・レンズ特性の最適化、 スマイル抑制、耐パワー性を有するコネクタ 開発



シングルエミッタ素子とファイバーモジュール



アレイの出力特性

図Ⅲ-1.2 「① レーザー高出力化技術の開発」の概要

② レーザー高品位化技術の開発

②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

(ALPROT、大阪大学)

②-(1)-1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発

②-(1)-2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発

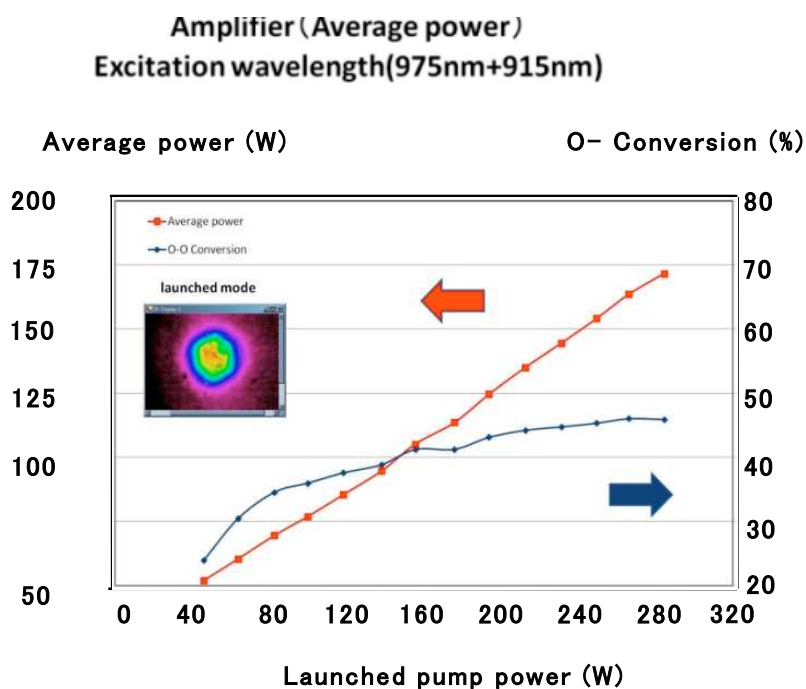
表Ⅲ-1.3 に「②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。

パルスファイバーレーザーの開発において、主な課題は非線形効果（ラマン散乱）の抑制であり、増幅率、コア径、ファイバー長の最適化により解決を図った。また、最適なバンドパスフィルタを設計し除去することで、レーザー出力の高品質化を行った。またフォトニック・クリスタル・ファイバー（PCF）の吸収波長と励起波長の整合性をとり、効率よく増幅を行うことができた。

図Ⅲ-1.3 には半導体レーザーの励起パワーに対する平均出力と変換効率を示した。本開発においては中間目標出力を達成し、他項目も今年度中に目標達成の見込みである。

表Ⅲ-1.3 「②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」の  
成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(1)-1 ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発	粉末成形シーダ 平均出力 繰り返し周波数 ブースタシーダ 平均出力 繰り返し周波数		70W@パルス幅 100ns 1MHz  5W@パルス幅 3-10ns 75kHz	70W@パルス幅 100ns 1MHz  5W@パルス幅 3-10ns 75kHz	○
②-(1)-2 ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発	平均出力 繰り返し周波数 基本波長 パルス幅  ビーム品質	5-100 W 1-1000 kHz 1 μm 帯 0.5-200 ns  シングルモード M2 < 1.5	150W@100 ns 1 MHz 1064 nm パルス幅可変： 10-200 ns 偏光：保持	171W@100 ns 1 MHz 1064 nm  100 ns 偏光：保持	△



図Ⅲ-1. 3 ファイバーレーザーの平均出力と変換効率

② レーザー高品位化技術の開発

②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

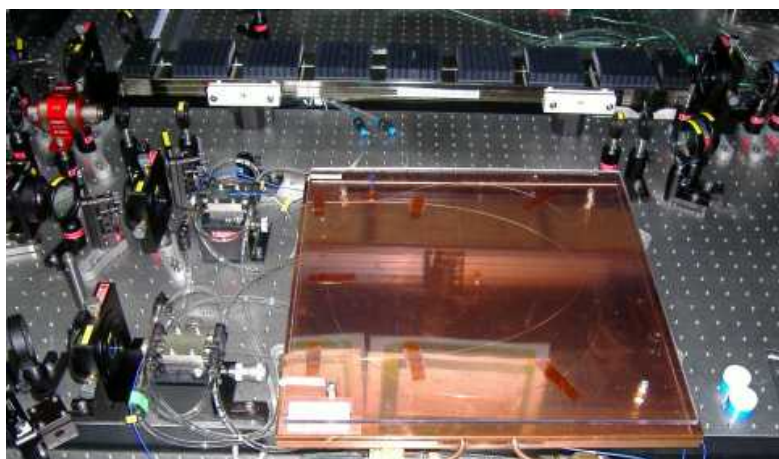
②-(1)-3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発 <委託> (大阪大学)

表Ⅲ-1.4 に「ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。また図Ⅲ-1.4 にファイバー増幅器の写真を示した。本開発における主な課題は発生した熱の除去である。この課題を解決するため PCF ロッドの固定方法と冷却方法を改善し、中間目標を達成した。出力パワーに関しては  $M^2=2\sim3$  で 200W を達成している。中間目標に関してはすべて問題なく達成、もしくは今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.4 「②-(1)-3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(1)-3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発 ブースター注入		繰り返し：75kHz パワー：150W (1ビーム) 波長：1064.1-1064.8nm パルス幅：3-10ns $M^2$ : <1.5	77kHz 170W * 1064.1-1064.8nm 3-10ns 可変 1.5	○

\*  $M^2=2\sim3$  で 200W を達成



図Ⅲ-1.4 ファイバー増幅器

② レーザー高品位化技術の開発

②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

②-(1)-4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発

<2/3 共同研究> (古河電気工業)

表Ⅲ-1.5 に「②-(1)-4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。また図Ⅲ-1.5に開発品のQCWファイバーレーザー装置の外観を示した。この開発における課題は半導体レーザーの輝  
Ⅲ-1-(6) (中間)

度向上である。冷却構造を見直すことで、高輝度半導体レーザーを実現した。またQCWレーザー開発におけるファイバー非線形の低減という課題に対しては、ファイバーのモードフィールド径を最適化することで解決することができた。

開発したQCWレーザー2セットをそれぞれCFRP加工と粉末成形の技術開発の連携のため産総研に納入し、試験運用を開始した。

表Ⅲ-1.5「②-(1)-4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-1)-4) QCW ファイバー レーザーの作製	ピーク出力 平均出力 M <sup>2</sup>		700W 250W 1.1 以下	800W 500W 1.1 以下	○



図Ⅲ-1.5 QCW ファイバーレーザー装置の外観

#### ②-(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発

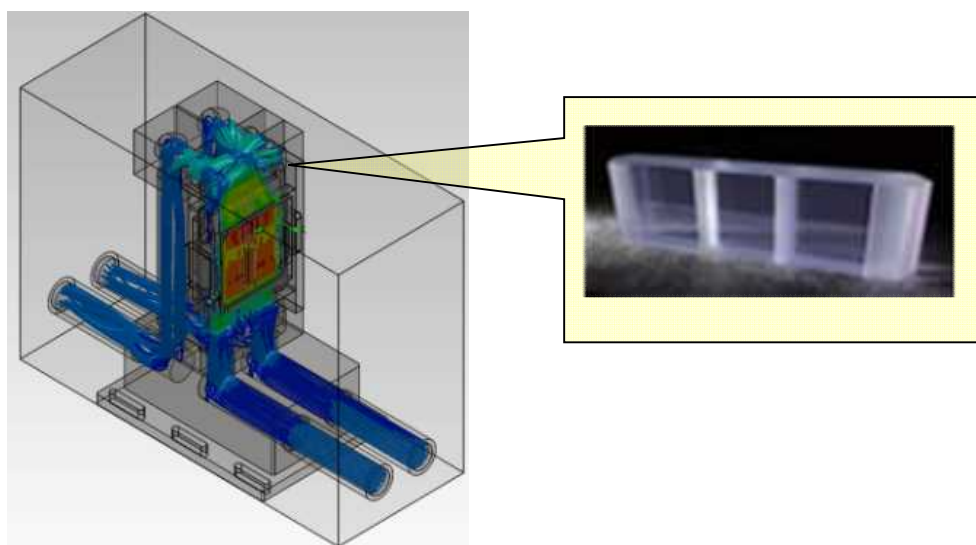
##### ②-(2)-1) kW 級ブースター増幅技術の開発

< 委託 > (ALPROT、大阪大学)

表Ⅲ-1.6 に「②-(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。本開発項目では、いかに効率よくレーザー増幅を行うかが課題である。励起半導体レーザーによって発生した熱の除去と効率的な増幅のため、Nd:YAGセラミック薄板のレーザー媒質をYAGブロックに接合するコンポジット構造を採用した。図Ⅲ-1.6にブースター増幅器とコンポジットYAGセラミック素子を示す。コンポジットYAGセラミック素子における発熱と冷却のシミュレーションコードを開発し、素子構造と冷却パラメータの最適化を図った。その結果、本テーマの開発における中間目標に関してはすべて達成、もしくは今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.6 「②-(2)-1) kW級ブースター増幅技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(2)-1) kW級ブースター増幅器の開発	繰り返し周波数 平均出力 波長(可変) パルス幅	1-150 kHz 200- 700 W 1 μm帯 0.5-100 ns	75kHz 500-700W 1064.1-1064.8nm(最適化) 3-10ns	75kHz 実測利得と計算予測で700W達成見込み 最適化中 3-10ns	△



図Ⅲ-1.6 ブースター増幅器とコンポジット YAG セラミック

②-(2) パルスレーザー増幅(ブースター)技術の開発

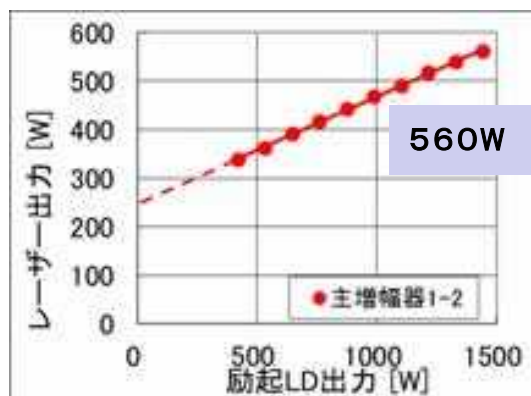
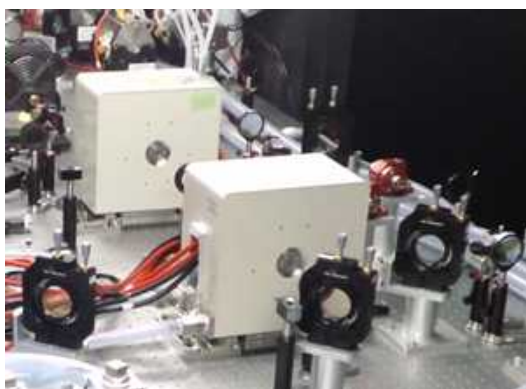
②-(2)-2) アニール用ブースター増幅技術の開発

<委託> (ALPROT、大阪大学)

表Ⅲ-1.7 に「②-(2)-2) アニール用ブースター増幅技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。プリアンプとメインアンプ2台で増幅し、560Wの高平均パワー出力を得ることに成功している。1 μm帯における基本波の開発においてはすべて中間目標を達成し、アニールシステムでの評価のめどが立った。

表Ⅲ-1.7 「②-(2)-2) アニール用ブースター増幅技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(2)-2) アニール用 ブースター増幅 技術の開発		波長： 1 μm 帯 (基本波) 平均出力： 200~700W 繰り返し周波数： 1~150 kHz のうち、 最適値 パルス幅： 0.5~200ns のうち、最適値	1.064 μm 560W 1kHz 105ns	○



図Ⅲ-1.7 「アニール用レーザーシステム」の写真と平均出力

②-(3) 高出力波長変換技術の開発

<委託> (ALPROT、大阪大学)

②-(3)-1) 波長変換モジュール化技術の開発

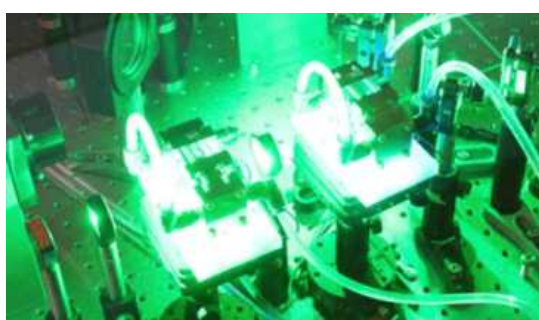
②-(3)-2) 波長変換の高効率化技術の開発

表Ⅲ-1.8 に「②-(3) 高出力波長変換技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。「②-(3)-1) 波長変換モジュール化技術の開発」において、アニール用レーザーはパルス幅が長くピーク出力が低いため、波長変換の効率も低くなるという課題がある。レーザービームの集光強度を上げて波長変換の高効率化を図り、かつ光損傷を考慮した設計により課題を解決した。

また「②-(3)-2) 波長変換の高効率化技術の開発」においては、非常に高平均出力のレーザービームの波長変換を行うため、②-(3)-1)の開発以上に冷却と光損傷に対する対策が必要となる。これらを解決するため、ジグザグスラブ方式の波長変換という独創的なコンセプトを考案した。この結果、非常に高効率の波長変換を実現することができた。表Ⅲ-1.8記載の成果は低パワーで達成されているため、さらに高パワーでは高い効率が見込まれる。本テーマの開発における中間目標に関しては問題なく今年度中に達成の見込みである。図Ⅲ-1.8はジグザグスラブ方式の波長変換実験の装置写真である。

表Ⅲ-1.8 「②-(3)高出力波長変換技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(3)-1) アニーリング用 レーザーの波長 変換モジュール			変換効率 20% (700W 基本波から)	20% (360W 基本波から)	△
②-(3)-2) 波長 変換の高効率化 技術の開発	第2高調波 変換効率 第3高調波 変換効率	≥ 20% ≥ 6%	≥ 20% (基本波 500W) ≥ 6% (基本波 500W)	≥ 60% (基本波 300W) ≥ 40% (基本波 160W)	△



図Ⅲ-1.8 ジグザグスラブ方式の波長変換実験

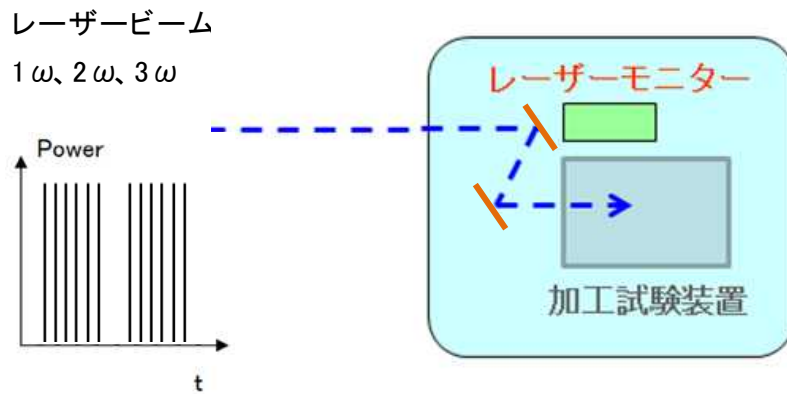
②-(3) 高出力波長変換技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学)  
②-(3)-3) 加工試験のための整備

表Ⅲ-1.9に「②-(3)-3) 加工試験のための整備」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。大阪大学レーザー研の現有YAGレーザーを改造し、3回のCFRP加工実験を産総研と共同で行った。1 $\omega$  (1064 nm)、2 $\omega$  (532 nm)、3 $\omega$  (355 nm) の波長でのレーザービーム照射におけるCFRPの加工特性を評価した。その結果、2 $\omega$ 、3 $\omega$ 、あるいは2波長照射の有意性を実証できた

図Ⅲ-1.9に測定系の概略を示す。

表Ⅲ-1.9 「②-(3)-3) 加工試験のための整備」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(3)-3) 加工試験のた めの整備		現有パルス YAG レーザーの 改造 実験エリアの整備 加工システム技術開発セン ターと連携して CFRP 加工試 験を実施	現有パルス YAG レーザーの 改造した。 実験エリアの整備を行った。 加工システム技術開発セン ターと連携して、3回の CFRP 加工試験を実施した。	○



図Ⅲ-1. 9 測定系の概略

③ 多波長複合加工技術の開発

③-(1) 切断接合技術の開発 <委託>

(ALPROT)

③-(1)-1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発

③-(1)-2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発

表Ⅲ-1.10 に「③-(1) 切断接合技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。複合レーザー照射を可能とする光学系、及びリモート加工が可能な加工ヘッドを開発し、高品位、高速度のCFRPレーザー加工を可能とするシステムの開発を行った。また、様々なレーザーを用いて切断とその評価を行い、切断パラメータの検討を行った。その結果、切断加工速度や反応層厚み、引張強度ではほぼ中間目標を達成できた。図Ⅲ-1.10はCFRPレーザー加工システムである。CFRPの接合については現在実験中であるが、CFRP素材の表面改質後に接合を行うことで計画通り今年度中に達成できる見込みである。

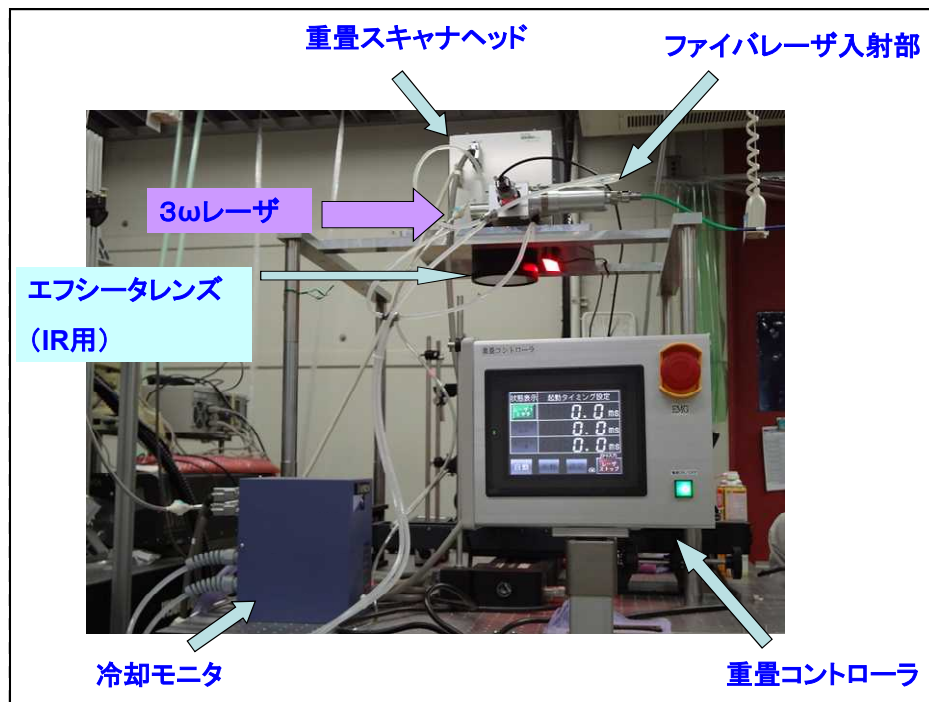
本テーマの開発に関しては、現在一部の中間目標を達成し未達成項目も達成の見通しを得ているため、今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.10 「③-(1) 切断接合技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標（基本計画）	中間目標		
③-(1)-1) 複合材料高速 切断接合シス テム技術の開 発	<ul style="list-style-type: none"> <li>複合レーザー照射方法を確立すること。</li> <li>加工メカニズムを明確にしつつ、加工プロセスを最適化。</li> <li>複合レーザー照射を可能とする光学系、及びリモート加工が可能な加工ヘッドを設計する。</li> <li>レーザー加工試料の評価技術を構築すること。</li> </ul>	切断加工速度 2m/min 以上	1.5m/min(CFRP) 2m/min (CFRTP)	△
③-(1)-2) 複合材料加工 プロセス・評価		反応層厚み 500 μ m 引張強度 15%未満の低減 (参照強度に対して)	350 μ m (CFRP) 300 μ m (CFRTP) 10%未満 (CFRP) 20%未満 (CFRTP)	



技術の開発		接合加工速度 2m/min 以上 引張せん断強度 50MPa	要素技術見極め 中 今年度中に達成 予定	△
-------	--	---	-------------------------------	---



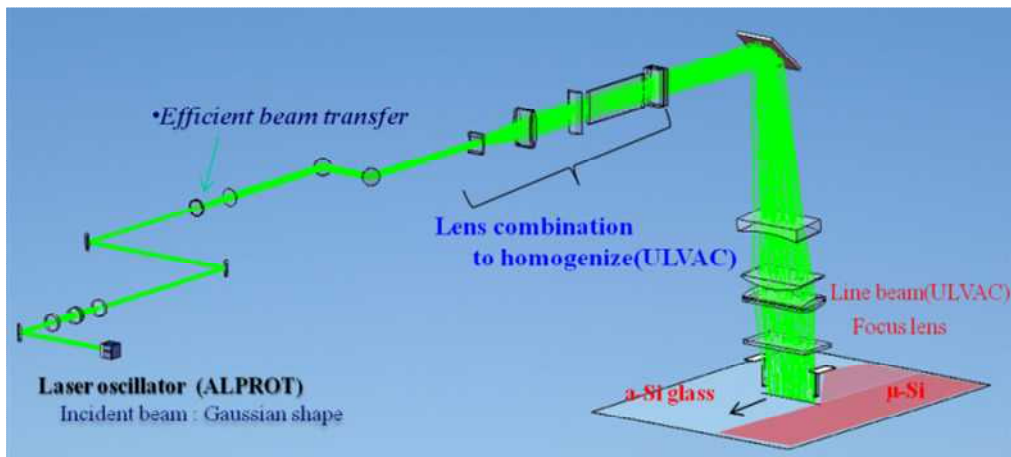
図Ⅲ-1.10 CFRP レーザー加工システム

- ③-(2) 表面処理技術の開発 <2/3 共同研究> (株式会社アルバック)
- ③-(2)-1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発
  - ③-(2)-2) 大型光学部品研磨技術の開発
  - ③-(2)-3) 高精度ビーム評価技術の開発

表Ⅲ-1.11 に「③-(2) 表面処理技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。「大型レンズ研磨装置の開発」では大型異形光学部品の研磨加工技術の開発に成功している。ワイドビーム光学系のシミュレーション技術の確立においても、シミュレーション技術を開発し、ビーム評価ができた。図Ⅲ-1.11にはそのレーザー光線追跡シミュレーション結果の一例を示す。高度ホモジナイズ技術とワイドビーム整形光学系技術の開発、およびビームプロファイラの開発では、アニール用レーザーを搭載し評価を行う予定であり、中間目標に関して今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.11 「③-(2) 表面処理技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標（基本計画）	中間目標		
③-(2) 表面処理技術の開発	大型レンズ研磨装置	・大型異形光学部品の研磨加工技術を開発すること。	研磨幅：500mm	700mm	△
	ワイドビーム光学系のシミュレーション	・光学シミュレーション技術を確立すること。	ビーム幅：500mm 集光幅：20 μm 照射均一性：±7%	700mm 20 μm ±2.5%	
	ワイドビームの形成	・高精度加工された異形レンズ類を用いた高度ホジナイズ技術とワイドビーム整形光学系技術を開発する	ビーム幅：500mm 集光幅：20 μm 照射均一性：±7%	未評価	
	ビームモニタリング	・ワイドビームの形状及び照射均一性を評価するためのビームプロファイラを開発する。	測定精度：±2%以内 測定分解能：5 μm以下	未評価	



図Ⅲ-1.11 レーザー光線追跡シミュレーション結果の一例

③-(3) 粉末成形技術の開発 <委託> (ALPROT)

③-(3)-1) 基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化

表Ⅲ-1.12 に「③-(3) 粉末成形技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。本テーマにおいて、真空下で動作可能な粉末焼結造形装置の開発に成功した。製作・実験開始を開始したが、かなり高速の成形に成功した。図Ⅲ-1.12 に小型プラットフォーム試作機および成形例を示す。また複合レーザー照射による粉末成形システムは大阪大学接合研と共同開発中であり、計画通りに開発が進んでいる。

加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）の最適化、試料の評価技術の確立においても現在開発中であり、本テーマの開発における中間目標に関しては、すべて問題なく達成、もしくは今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.12 「③-(3) 粉末成形技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標（基本計画）	中間目標		
③-(3) 基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化	<ul style="list-style-type: none"> <li>① 粉末焼結積層成形機構開発</li> <li>② 複合レーザー照射方法</li> <li>③ 加工プロセス</li> <li>④ 評価技術構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・真空下においても動作可能な粉末焼結積層造形機構を開発すること。</li> <li>・異なる発振形式のレーザーを用いた複合レーザー照射方法を確立すること。</li> <li>・複合レーザー照射による粉末積層造形メカニズムを明確化</li> <li>・加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）を最適化すること。</li> <li>・レーザー加工試料の評価技術を構築すること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・真空下においても動作可能</li> <li>・照射方法の確立</li> <li>・造形メカニズムの明確化</li> <li>・最適条件の確立</li> <li>・試料の評価技術を構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>製作・実験開始</li> <li>6時間（外挿）程度達成、+0.2mm</li> <li>検討終了・装置作成中（阪大）</li> <li>プロセス条件確立</li> <li>強度評価開始</li> <li>190MPa</li> </ul>	△



図Ⅲ-1.12 小型プラットフォーム試作機および成形例（チェスの駒）

④ 技術開発推進にかかる調査（先端技術、標準化等）・評価・普及促進

< 委託 > (ALPROT)

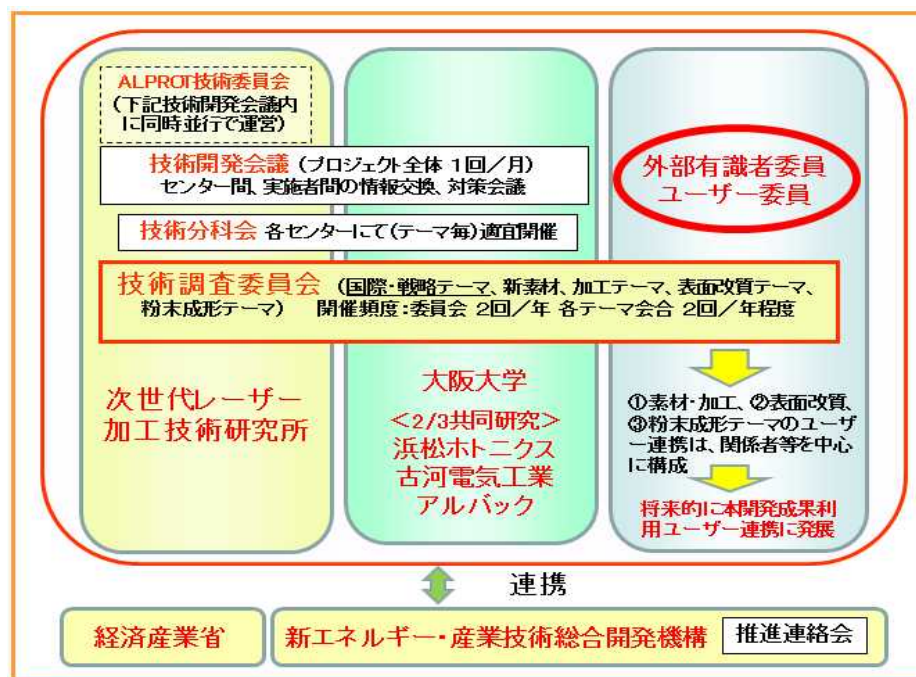
表Ⅲ-1.13に「④ 技術開発推進にかかる調査（先端技術、標準化等）・評価・普及促進」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。

表Ⅲ-1.13 「④ 技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標 (基本計画)	中間目標		
④ 技術開発推進にかかる調査(先端技術、標準化等)・評価・普及促進		<ul style="list-style-type: none"> <li>・レーザー光源の開発状況や使用状況の調査</li> <li>・エンドユーザーニーズを取り入れた光源開発の必要性の把握、および本開発製品の実用化の可能性を明確にする</li> <li>・製品実用化可能性を広げるため、開発中間時点での成果報告会を行う</li> </ul>	技術調査委員会 (2回) 国際・戦略 WG (4回) 素材・加工 WG (4回) 表面改質 WG (4回) 粉末成形 WG (4回) を開催し、レーザー光源等の調査を行った。またユーザーニーズについて議論した。 成果報告会 7/30 開催	○

本テーマの目標はレーザー光源とレーザー加工について有識者を交えた議論を行うことで、本プロジェクトのエンドユーザーニーズを調査することである。そのため、技術調査委員会と4ワーキンググループ(WG)の委員会を開催した。技術調査委員会を含めたプロジェクトの委員会や会議の連携図を図Ⅲ-1.13に示す。技術調査委員会とWGにおいては有識者の貴重な意見を聞くことができ、プロジェクトを超えてレーザー産業全般に対する活発な議論ができた。表Ⅲ-1.14は技術調査委員会とWGの議事内容である。詳細な議事内容については「④ 技術開発推進にかかる調査(先端技術、標準化等)・評価・普及促進」の項目で説明する。また図Ⅲ-1.14は第2回技術調査委員会の風景である。

ユーザー連携と開発成果物の普及促進のため、平成24年7月30日に成果報告会を開催した。中間目標に関してはすべて問題なく達成した。



図Ⅲ-1.13 委員会の連携図

表Ⅲ-1.14 技術調査委員会とWGの議事内容

委員会、WG	委員数	回数	議事内容
技術調査委員会	25名	2回	実用化促進のため、ユーザーからのニーズの検討を行なった。レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向、標準化、新素材・加工、表面改質、粉末成形の各WGテーマのニーズに関する報告、検討を行なった。
国際・戦略テーマWG	10名	4回	現状のレーザー及びレーザー加工技術の動向と、今後どのようなレーザーとレーザー加工技術が必要とされるかの検討を行なった。ドイツの自動車産業におけるレーザー加工や世界的技術動向の現状を把握した。 アジア地区の動向や Photonics West2012（国際会議と展示）の報告から日本の標準化戦略やニーズにマッチしたレーザー及びレーザー加工のあるべき姿を検討した。
新素材・加工テーマWG	6名	4回	開発内容を確認し、ニーズ面からどのようなレーザーが必要か検討を行なった。CFRP素材の各種仕様とその加工や評価等に関する報告が行なわれた。BMWや東レの取り組み等が紹介された。ユーザー側のニーズや加工スペック等が提示され、それらの加工が可能なレーザーや加工法に関する検討を行なった。
表面改質テーマWG	7名	4回	本WGでは、ディスプレイや太陽電池の製作に最適なレーザー加工のあり方を検討することになった。ディスプレイ用途のレーザーアニールの開発目標値とその背景が報告された。 ディスプレイ領域の市場動向報告、フラットパネルメーカーの技術ニーズ、太陽電池領域におけるレーザー応用に関するニーズ検討を行なった。
粉末成形テーマWG	2名	4回	本研究開発の目標を報告し、粉末成形の医療関連活用に関する技術情報を検討した。レーザーを活用した造形技術の現状を報告した。ニーズとしてチタン粉末を活用した医療用部品の仕様等に関する検討を行なった。 ICALEO2011（国際会議と展示）の粉末成形技術の状況の報告と、開発施策の小型プラットフォームの見学を行ない、ニーズに対する目標の確認を行なった。Photonics2012の粉末成形、Additive Manufacturing シンポジウムの状況が報告された。



図Ⅲ-1.14 第2回技術調査委員会

以上、研究開発項目の概要をまとめた。今年度末の達成予定の中間目標に対して、すでに前倒しでかなりの項目が達成されている。それ以外の項目についても、これまでの開発研究と検討結果から今年度末には達成見通しが得られ、プロジェクトは順調に遂行されている。

1.2. 成果要約

1.1節では開発項目の概要を説明したが、3つの出口イメージと調査研究に対しての現在の達成状況の概略は表Ⅲ-1.15のようになっている。計画通り順調に開発は進み、中間目標も今年度末には計画通りすべて達成される見込みである。

表Ⅲ-1.15 現在の達成状況の概略

	目標	達成状況
切断接合技術の開発	CFRP等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。	各種レーザーを用いてCFRP素材の加工実験と評価を行い、高品位のCFRP加工の見通しがついた。
表面処理技術の開発	フラットパネルディスプレイや太陽電池製造に適用できるレーザーSiアニール技術を開発する。	アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現する光学系の構築が、順調に進んでいる。
粉末成形技術の開発	チタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。	小型プラットフォームを製作し、真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。
調査・普及促進	プロジェクトの出口を幅広く外部に求めるため、有識者を含めてプロジェクトのテーマについて議論する。	調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。分科会(WG)では今後のプロジェクトの展開につながる議論ができた。

1.3 知的財産の取得および成果の普及

下記表Ⅲ-1.16 に知的財産、論文などに関する件数を下記の表に示す。

表Ⅲ-1.16 特許・論文等発表件数一覧 平成24年7月31日現在

	平成22年度	平成23年度	平成24年度	計
特許出願 (うち外国出願)	1 (0)	10 (0)	8 (1)	19 (1) 件
研究発表・講演	2	53	15	70 件
論文 (うち査読付き)	0 (0)	9 (7)	6 (4)	15 (11) 件

展示会への出展	0	1	1	2 件
---------	---	---	---	-----

### 1.3.1 知的財産の管理について

最先端技術の開発に関わる本プロジェクトでは、知的財産管理が重要である。ALPROTでは知的財産規程を定めて、組合員の出願特許を有効に活用している。



図Ⅲ-1.15 研究組合における知財マネジメント

### 1.3.2 成果の普及

外部発表や展示会への出品を行い、ユーザーニーズを直接把握し、成果の普及に努めた。

#### ・産総研オープンラボ

産総研オープンラボにおいて、研究組合の展示ブースを設営し、研究組合とプロジェクトの紹介パネルを展示した。来場者にプロジェクトの目的、内容、成果等について説明を行った。

日時： 平成 23 年 10 月 13～14 日

場所： 産業技術総合研究所 本部情報棟 1 階ロビー

#### ・展示会への出展

平成 24 年 6 月 20 日（水）～22 日（金）、東京ビックサイトにて「第 23 回設計・製造ソリューション展(DMS)」が開催された。アспект社ブースにおいて、本プロジェクトで開発した粉末成形装置の展示とデモ



を行った。ユーザーニーズを直接調査できる良い機会であった。

#### ・成果報告会の開催

本プロジェクト開発の関連技術の普及・促進を図るため、プロジェクト中間時点での成果報告会を開催した。本プロジェクトの成果をレーザー加工技術関係のユーザーに幅広く利用してもらうため、これまでのプロジェクト成果について報告した。またユーザー企業側からの視点も重要と考え、ユーザー連携の技術調査委員の講演を行った。

日時： 平成 24 年 7 月 30 日

場所： 品川フロントビル会議室

#### 1.4. 最終目標達成への見通し

1.1 項と1.2 項で示した現時点での成果と目標達成に向けて検討した内容を基に、最終目標に向けての見通し（課題とその対応を含む）について以下の表にまとめた。

研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
①高出力半導体レーザー開発 ①-(1) 半導体レーザーの 高出力化技術・ 高信頼化技術の 開発	シングルエミッタ アレイ	波長：近赤外帯 出力：20 W、効率 65% 寿命 50,000 時間  出力 300 W 効率 60%  寿命 50,000 時間 自動組立が可能であること	900nm 帯 15 W、60%以上 確認中  200 W 55%以上  確認中 自動組立可能	最終目標達成に向けての確認点である中間目標については、順調に開発が完了する見込みである。 最終目標は、素子の熱負荷が大きい状態で高出力化を実現し、かつ寿命を延ばすといった厳しい目標値となっている。 結晶構造、素子構造等について試作、検討を進め、課題の抽出とその解決策を見出すことで、最終目標を達成させる。
①-(2) 半導体レーザーの ファイバーカップル 技術の開発	シングルエミッタ アレイ	ファイバ結合効率 90% ファイバ結合効率 70%	80%以上  仮組 60%以上	最終目標達成に向けての確認点である中間目標については、順調に開発が完了する見込みである。 最終目標を達成に向けては、よりエネルギー伝送効率の高い結合技術、光学系および調心技術の開発が必要である。それらの技術課題の抽出とその解決策を見出すことで、最終目標を達成させる。



研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	評価項目	最終目標	成果 (現時点)	
②-(1)-1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発	粉末成形シーダ 平均出力 繰り返し周波数 ブースタシーダ 平均出力 繰り返し周波数	中間目標と同じ 70W @パルス幅 100ns, 1MHz  5W @パルス幅 3-10ns 75kHz	70W @パルス幅 100ns 1MHz  5W @パルス幅 3-10ns 75kHz	最終目標は中間目標と同じで、達成済み
②-(1)-2) レーザー高品位化技術の研究開発・ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発	平均出力 繰り返し周波数 波長 パルス幅 偏光：保持	150W@100 ns 1 MHz 1064 nm 100 ns 偏光：保持	171 W @100 ns 1 MHz 1064 nm 100 ns 偏光：保持	順調に開発は進んでいる。フィルターの最適化と吸収長と励起波長の最適化に成功したので、最終目標は十分達成可能。

研究項目	評価目標			最終目標の達成見通し (課題とその対応)	
	評価項目	最終目標	成果(現時点)		
②-(1)-3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発	ブースター注入用	繰り返し周波数 平均出力 波長 (可変) パルス幅 M <sup>2</sup>	75-150kHz 300W (2ビーム) 1064.1-1064.8nm 3-10ns <1.5	77kHz 170 W 1064.1-1064.8 nm 3-10ns 可変 1.5	1ビーム出力 150W は達成済み。 2ビーム偏光合成で 300W は確実に達成。
	ビーム波長合成	平均出力 波長	300W 1064, 1070nm	300W 1064, 1070, 1075nm	パワー、2波長ともに達成。 効率>90%の波長合成にめど
②-(1)-4) QCW ファイバーレーザーの開発	ピーク出力 平均出力 ビーム品質	1.6kW 250W M <sup>2</sup> <1.1	800 W 500W M <sup>2</sup> <1.1	順調に開発は進んでいる。励起半導体の輝度向上とファイバーの非線形効果を低減し、ピーク出力を確保する。 最終目標は十分達成可能。	

研究項目	評価目標			最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
②-(2)-1) kW級ブースター増幅器の開発	繰り返し周波数 平均出力 波長(可変) パルス幅	75-150kHz 1.5kW 1064.1-1064.8nm (最適化) 3-10ns	75kHz 700W 達成見込 最適化中 3-10ns	4kW LD 励起で>750W@75kHzを達成見込み。 よって、縦偏光 750W、横偏光 750W の 2 ビーム合成で 1.5kW 達成は確実。 出力 1 ビーム又は 2 ビームの選択は、波長変換の最適化と併せて決定。
②-(2)-2) アニリング用ブースター増幅技術の開発	波長 平均出力 繰り返し周波数 パルス幅	1μm帯(基本波) 200~700W 1~150 kHz のうち、最適周波数 0.5~200ns のうち、最適パルス幅	1.064μm 560W 1kHz 105ns	最終目標は中間目標と同じで、今年度中に全項目達成の予定
②-(3)-1) アニリング用レーザーの波長変換モジュール	変換効率	20% (700W 基本波から)	20% (360W 基本波)	順調に開発は進んでいる。波長変換結晶の光損傷を考慮した設計になっているため、最終目標は十分達成可能。
②-(3)-2) 波長変換の高効率化技術の開発	第2高調波変換効率 第3高調波変換効率	≥ 30% (基本波 1.5kW) ≥ 10% (基本波 1.5kW)	≥ 60% (基本波 300W) ≥ 40% (基本波 160W)	冷却構造の改良と偏光合成(ビーム当たり 750W 入力)によって熱負荷を半減することで、目標達成は可能。

研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
③-(1) 1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発 2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発	切断加工速度 反応層厚み 引張強度 接合加工速度 引張せん断強度	6m/min 100μm 10%未満の低減 (参照強度に対して) 6m/min 100MPa	1.5m/min(CFRP) 2m/min(CF RTP) 350μm(CFRP) 300μm(CF RTP) 10%未満(CFRP) 20%未満(CF RTP) 要素技術見極め 中 接着剤 20MPa	順調に開発は進んでいる。波長、パルス幅と熱損傷の関係が明確になりつつあり、最終目標は十分達成可能。 CFRP の表面改質により見通しあり、最終目標は十分達成可能。
③-(2) 表面処理技術の開発	大型レンズ研磨装置 ワイドビー	研磨幅: 500mm ビーム幅: 500mm 集光幅: 20μm	700mm 700mm 20μm	大型レンズ研磨機が完成したため、光学シミュレーションから導かれるサイズの大型レンズの製造が可能になった。

	ム光学系のシミュレーション  ワイドビームの形成  ビームモニタリング	照射均一性： ±7%  ビーム幅： 500mm 集光幅： 20 μ m 照射均一性： ±7%  測定精度：±2%以内 測定分解能：5 μ m 以下	±2.5%  未評価  未評価	これらとアニーリング用レーザーと組み合わせ、実際のビームの整形評価を実施し、最終目標を達成できる見込み
③-(3) 粉末成形システム開発	成形精度  成形速度 強度	±0.1mm(100mm 基準パーツ) 16 時間以内 860MPa(チタン合金)	+0.2mm  6 時間 (外挿) 190MPa	精度は補正で対応可能。加工速度は問題なし。強度は積層ピッチを縮めて密度を向上することにより実現可能と予測している。

研究項目	評価目標と成果		最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	最終目標	成果(現時点)	
④ 技術開発推進にかかわる調査 (先端技術、標準化等)・評価・普及促進	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発光源および開発された光源を利用した加工システムのユーザーとの連携</li> <li>広範囲なものづくりに活用されるレーザー加工技術の実用化の可能性を明確にする</li> <li>本開発の成果報告会の開催</li> <li>レーザー加工実証試験の開催</li> </ul>	技術調査委員会(2回)と各WG(それぞれ4回)を開催した。 成果報告会を開催した。	技術調査委員会と各WGを中心としてユーザー連携を進める予定。 成果報告会、加工実証試験を行い、成果の普及を図るが、最終目標達成は十分可能である。

以上の表で見ると、いずれの研究開発項目においても課題の見極めができています。またこれまでの開発研究により、その課題に対しては解決策の知見が得られています。その対応策に従い計画的に研究開発を遂行し、技術開発会議や調査委員会の議論を研究にフィードバックすることで、最終目標達成の見通しを得ています。同時に、今後はより応用面に目を向け、成果物の普及のためのユーザー連携の活動や調査にも視野を広げていくことが重要であると考えています。

## 2. 研究開発項目毎の成果

### 2.1 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」

#### 「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」

(浜松ホトニクス株式会社)

#### 2.1.1 事業の目的・意義（目的・概要）

溶接、熱処理、焼き入れ等様々な用途に半導体レーザー（LD）が導入され、省電力化（低炭素排出）に寄与し、自動車産業をはじめとする産業競争力の向上に貢献している。LDに対する産業界からのニーズとして、LDのさらなる小型化、高効率化、また低コスト化の要求が高い。

このような背景を受けて、省資源化・小型化・低コスト化に貢献すべく、半導体レーザーの高出力化・高効率化を図った。

#### 2.1.2 研究開発目標と達成状況

中間目標に対する達成度として、初期特性に関しては現時点で全てクリアした。また寿命に関しては、平成24年度内には寿命20,000時間をクリア出来ると考えられることから、総じて中間目標を達成出来たといえる。

表Ⅲ-2.1.1 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標		
	評価項目	中間目標	最終目標
①-(1) 半導体レーザーの 高出力化技術・ 高信頼化技術の開発	シングル エミッタ	波長:近赤外帯 出力: 15 W、効率: 60% 寿命: 20,000時間	波長:近赤外帯 20 W、65% 50,000時間
	アレイ	波長:近赤外帯 出力: 200 W、効率: 55% 寿命: 20,000時間 自動組立が可能であること	波長:近赤外帯 300 W、60% 50,000時間 自動組立が可能であること

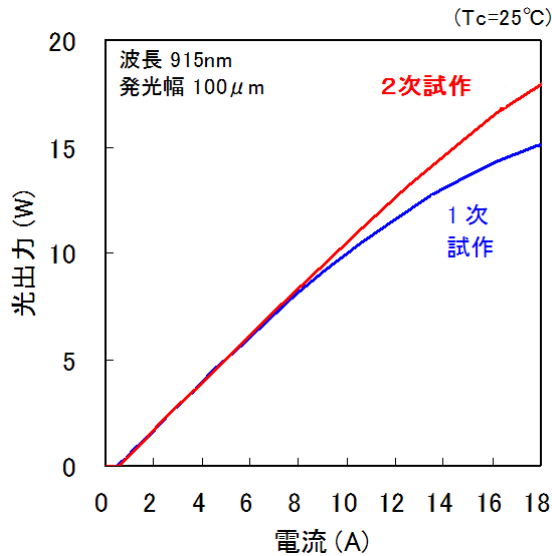
#### 2.1.3 成果の詳細

##### 2.1.3.1 シングルエミッタ

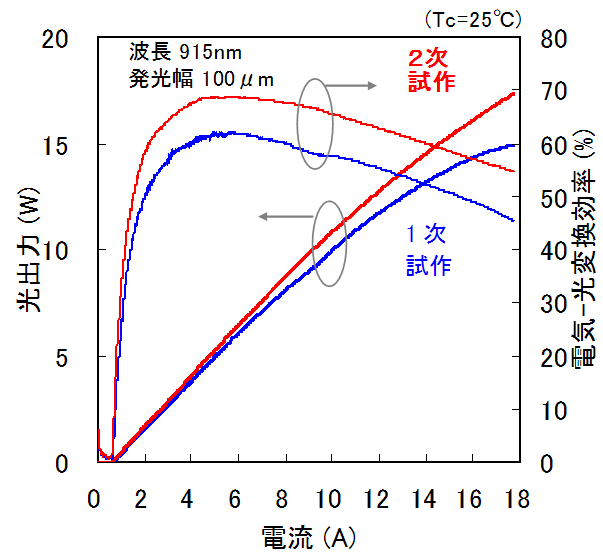
高出力時の発熱低減という課題に対して、素子構造の最適化により解決を図った。そのために高出力と高信頼性の両立シミュレーション技術を駆使し、計算で求められた最適パラメータを使用して、高出力時に出力飽和を起こさないLD素子を開発した。

計算および試作結果を図Ⅲ-2.1.1～図Ⅲ-2.1.2に示す。2次試作において、高出力時の熱負荷による光出力飽和が大きく改善され、中間目標の達成が確認された。

また高出力と高信頼性の両立といった課題に対しては、端面劣化抑制構造を開発した。現在、連続駆動試験による寿命時間の確認を行っており、平成24年度内に寿命20,000時間を確認する。



図Ⅲ-2.1.1 計算結果



図Ⅲ-2.1.2 試作した素子の光出力特性

### 2.1.3.2 アレイ

高出力時の発熱の低減と熱の除去といった課題に対して、素子構造の最適化、ヒートシンク改良といった手法で解決した。また社有技術を利用することで、今回開発したアレイのスマイルを $1\mu\text{m}$ 以下に低減させ、自動組立に対応出来るようにした。

試作したアレイ LD の光出力特性を図Ⅲ-2.1.3 に示す。同図より中間目標である光出力 200W、電気光変換効率 55%の達成が確認される。寿命については現在確認作業を行っており、光出力の急速な低下は認められず、数千時間にわたり安定に動作している。平成 24 年度内に信頼性 20,000 時間を確認する。

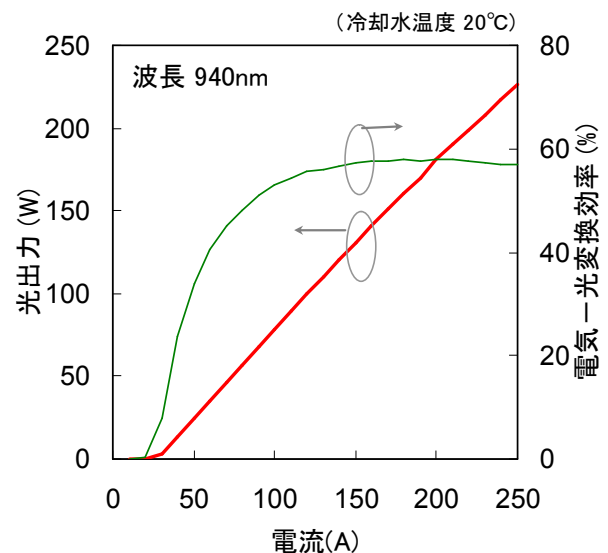


図-2.1.3 アレイ LD の光出力特性

### 2.1.4 最終目標の達成見通し

前述したように最終目標達成に向けての確認点である中間目標については、順調に開発が完了する見込みである。

しかし最終目標達成には、素子の熱負荷が大きい状態で高出力化を実現し、かつ寿命を延ばすといった非常に厳しい目標値となっている。最終目標達成に向け、平成 25 年度は結晶構造、素子構造等について試作、検討を進め、課題の抽出とその解決策を見出す。

### 2.1.5 知的財産権および成果の普及

知的財産権および外部発表に関しては、2.2 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」、「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発」と密接に関係しており、切り離すことが難しいことから、次項でまとめて報告する。

## 2.2 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」

### 「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発」

(浜松ホトニクス株式会社)

#### 2.2.1 事業の目的・意義（目的・概要）

溶接、熱処理、焼き入れ等様々な用途に半導体レーザー（LD）が導入され、省電力化（低炭素排出）に寄与し、自動車産業をはじめとする産業競争力の向上に貢献している。LDに対する産業界からのニーズとして、LDのさらなる小型化、高効率化、また低コスト化の要求が高く、またロボットで使用する場合には、レーザー光出射部の軽量化、小型化が必須となる。

このような背景を受けて、ユーザーフレンドリーな光源とすべく、高輝度ファイバー結合技術の開発を行なった。

#### 2.2.2 研究開発目標と達成状況

シングルエミッタに関しては現時点で中間目標をクリアした。アレイに関しては仮組状態で中間目標をクリアしており、平成 24 年度中にモジュール状態で目標を達成する。

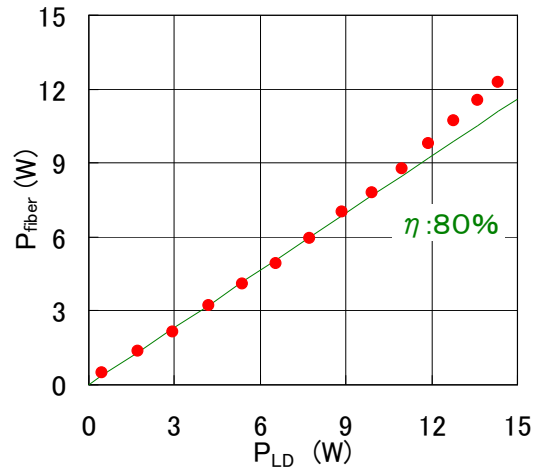
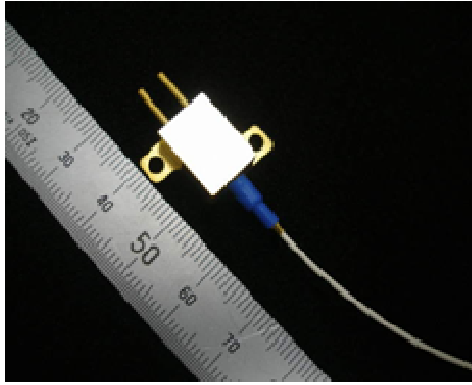
表Ⅲ-2.2.1 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標		
	評価項目	中間目標	最終目標
①-(2) 半導体レーザーの ファイバーカップル 技術の開発	シングル エミッタ	ファイバー結合効率: 80%	ファイバー結合効率: 90%
	アレイ	ファイバー結合効率: 60%	ファイバー結合効率: 70%

#### 2.2.3 成果の詳細

##### 2.2.3.1 シングルエミッタ

ファイバー結合効率向上のために、素子特性・レンズ特性の最適化を行った。ファイバーモジュール化した試作品の外観と、素子出力とファイバー出力の関係を図Ⅲ-2.2.1 に示す。目標としてきた結合効率 80%（ファイバー出射面でのフレネル反射を除く）を達成することを確認した。



図Ⅲ-2.2.1 シングルエミッタファイバーモジュール外観とそのファイバー結合特性

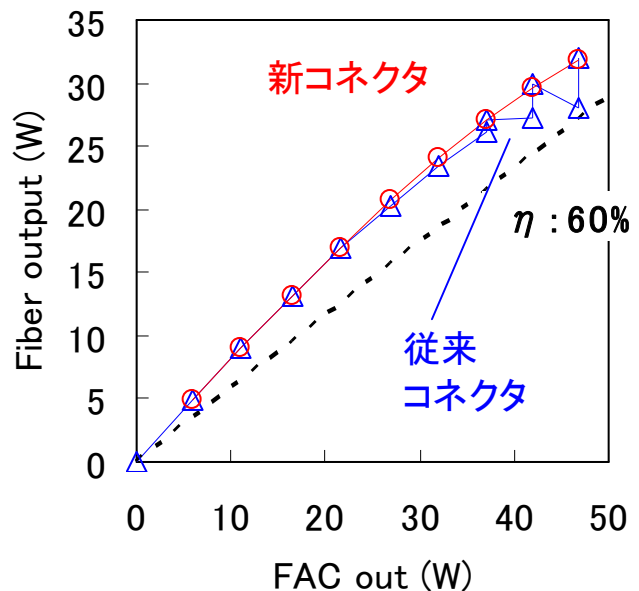
### 2.2.3.2 アレイ

ファイバー結合効率を向上させるために、スマイル抑制、耐パワー性を有するコネクタ開発を行った。

図Ⅲ-2.2.2 はアレイのファースト軸コリメート光出力（FAC out）に対するファイバー出力の関係を示す。

スマイルを抑制したアレイを使用することで高効率結合が実現されている。

また従来のコネクタでは高出力光導入時調芯ずれを起こし、再調芯を行う必要があったが、新規コネクタを使用することにより、安定的に高結合効率が得られることを確認した。



図Ⅲ-2.2.2 アレイのファイバー出力特性

### 2.2.4 最終目標の達成見通し

最終目標達成に向けての確認点である中間目標については、順調に開発が完了する見込みである。最終目標を達成に向けては、よりエネルギー伝送効率の高い結合技術、光学系および調心技術の開発が必要であり、それら技術課題の抽出とその解決策を見出だす。

### 2.2.5 知的財産権および成果の普及

「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」および「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発」に関して知的財産権及び外部発表の件数



をまとめたものを表Ⅲ-2.2.2に示す。素子開発とファイバー結合技術開発を密接に連携して開発することにより、多くの知的財産を生み出し、またその成果を社会に還元することができた。

表Ⅲ-2.2.2 知的財産権および外部発表件数

年度	平成 22 年	平成 23 年	平成 24 年	計
特許出願 (うち外国出願)	1 (0)	2 (0)	5 (0)	8件 (0件)
論文(うち査読付き)	0(0)	2(2)	3(3)	5件(5件)
研究発表・講演	1	4	4	9件

## 2.3 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

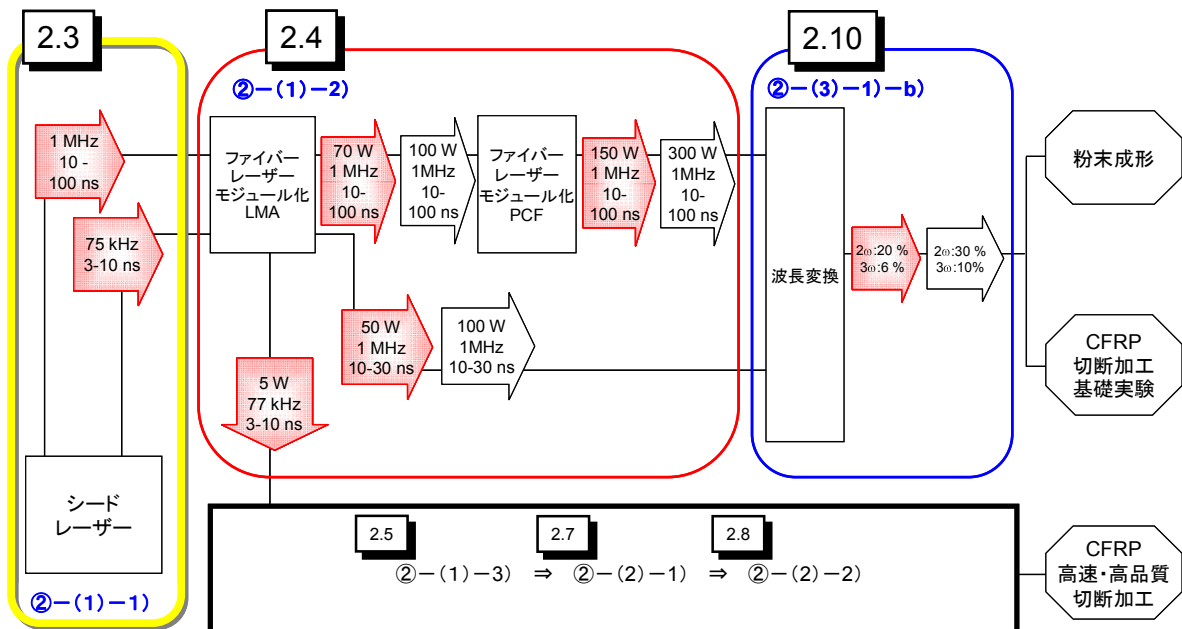
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発」

(阪大接合研、古河電工)

### 2.3.1 事業の背景・意義（目的・概要）

本研究開発では、図Ⅲ-2.3.1に示したように粉末成形、CFRP切断加工基礎実験、およびCFRP高速・高品位切断加工用パルスファイバーレーザーを開発することを目的としている。粉末成形用レーザーには、②-(1)-1)にてシードレーザーを開発する。粉末成形用には、パルス幅 100 ns および 10 ns を中間目標とする。CFRP 用には、パルス幅 3-10 ns、繰り返し周波数 77kHz を中間目標とする。両中間目標については、平成 24 年度末までに達成するとともに、本開発項目の最終目標とする。本項では、図Ⅲ-2.3.1 中の枠（黄色）で示した部分②-(1)-1) について記述する。



図Ⅲ-2.3.1 目的別に開発されるパルスファイバーレーザー開発目標：中間目標（矢印赤）と最終目標（矢印白）

### 2.3.2 研究開発目標と根拠

粉末成形において成形体の構造制御の高度化に必要なレーザーには、100 ns 程度のパルス幅が要求される。成形速度から繰り返し周波数には 1MHz 程度必要となる。CFRP 切断加工基礎実験用には、パルス幅 10ns が必要となる。②-(1)-1)で開発するパルスファイバーレーザー（シード光）光源は、10ns～ 100 ns の範囲でパルス幅 10ns と 100ns を選択可能で、～1MHz の高速繰り返し出力を中間目標とする

CFRP 加工用レーザーには、10ns 以下のパルス幅が求められる。②-(1)-3 高出力

化技術開発においてシード光源として要求される出力を得るため、半導体レーザーの直接変調出力を用い、3～10ns のパルス発生および、偏光保持イットリビウムクラッド励起ファイバー増幅器を開発し、77kHz で出力させる。本レーザーは後段の出力特性向上のため、1nm 程度の波長チューニングを可能とする。また、②-(1)-3において、高出力化のため、異なる波長のレーザーを2台用意し合波させるため、波長1070nmの同一特性のパルスレーザーを開発する。

粉末成形およびCFRP加工システム化のため、上記の特性を有するシードレーザーユニットを作成する。中間目標値を表Ⅲ-2.3.1及び表Ⅲ-2.3.2にまとめる。

表Ⅲ-2.3.1 粉末成形用シードレーザー中間目標値

項目	Min.	Typ.	Max.	備考
波長 (nm)		1064		
パルス幅 (ns)			100	
繰返周波数 (kHz)		1000		

表Ⅲ-2.3.2 CFRP加工用シードレーザー中間目標値

項目	Min.	Typ.	Max.	備考
波長 (nm)		1064	1070	1064nm 及び 1070nm 各 1 台
パルス幅 (ns)	3	5	10	
繰返周波数 (kHz)		77		

### 2.3.3 研究開発スケジュール

24年度はシードレーザーの特性向上を推進し、②-(1)-2)のモジュール化および②-(1)-3)ファイバーレーザーの高出力化技術の開発の成果で得られる出力波形に対しシードレーザーのパルス形状をフィードバック制御する総合動作試験と全体最適化を実施する。2種類のシードレーザーに関してはファームウェア、ソフトウェアの改良を主体に行い、制御回路のハードウェア設計にこれを反映させる。CFRP加工用シードレーザーについては波長多重化のため同期動作も配慮した設計を実施する。粉末成形用シードレーザーに関してはパルス幅可変機能と任意波形生成機能についての最適化を実施する。

開発されたそれぞれのシードレーザーの評価を行い、それらのデータをシードレーザー開発へフィードバック。②-(1)-2)および②-(1)-3)の中間目標を達成するために必要なパルス幅可変機能および任意波形制御技術開発を推進する。

### 2.3.4 研究開発目標と達成状況

研究開発目標に対して現時点での達成度を表Ⅲ-2.3.3 および表Ⅲ-2.3.4 に示す。

表Ⅲ-2.3.3 粉末成形用シードレーザーの開発目標と達成度

項目	中間目標	最終目標	成果	中間目標の達成度
波長	1064nm	1064nm	1064nm	○
パルス幅	100ns	100ns	100ns	○
パルス幅可変	10ns-100ns	10ns-100ns	10ns, 100ns	△
繰返し周波数	1MHz	1MHz	1MHz	○
偏光	直線	直線	直線	○

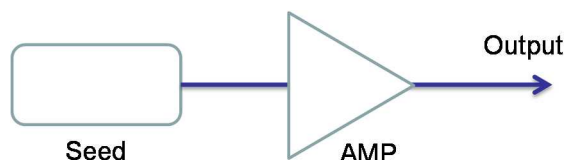
中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

表Ⅲ-2.3.4 CFRP 加工用シードレーザーの開発目標と達成度

項目	中間目標	最終目標	成果	中間目標の達成度
波長	1064nm, 1070nm	1064nm, 1070nm	1064nm, 1070nm	○
パルス幅	5ns	5ns	5ns	○
パルス波形可変	3ns-10ns	3ns-10ns	3ns, 5-10ns	○
繰返し周波数	77kHz	77kHz	77kHz	○
偏光	直線	直線	直線	○

中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

### 2.3.5 成果の詳細



図Ⅲ-2.3.5 パルスファイバーレーザーの構成

図Ⅲ-2.3.1 にパルスレーザーの構成を示す。シードレーザーは、ファイバーレーザー（FL）または半導体レーザーを用い開発する。ファイバーレーザーベースでは、外部変調器を用いることで、短パルス発生を行った。半導体レーザーは、高速変調特性に優位性がある。両者の特性を生かし、粉末成形用 CFRP 用に最適な Seed

に用いて開発を進めた。両者の比較を表Ⅲ-2.3.5に示す。

表Ⅲ-2.3.5 Seedレーザー特性比較

項目	ファイバーレーザー	半導体レーザー	備考
高出力化	○	△	パルス幅、繰返し周波数に依存
短パルス化	△	◎	
繰返し周波数可変	◎	◎	
波長可変性	△	◎	

### 2.3.6 最終目標の達成の見通し

2.3.4に示したように中間目標を最終目標としている

### 2.3.7 知的財産権 及び 成果の普及

本プロジェクトにおけるファイバーレーザー開発に必要な知財として「特開2007-142380」「特開2011-187825」がある。成果の普及として、平成23年度は、16件の研究発表・講演を行っている。平成24年度については、3件行っている。

## 2.4 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

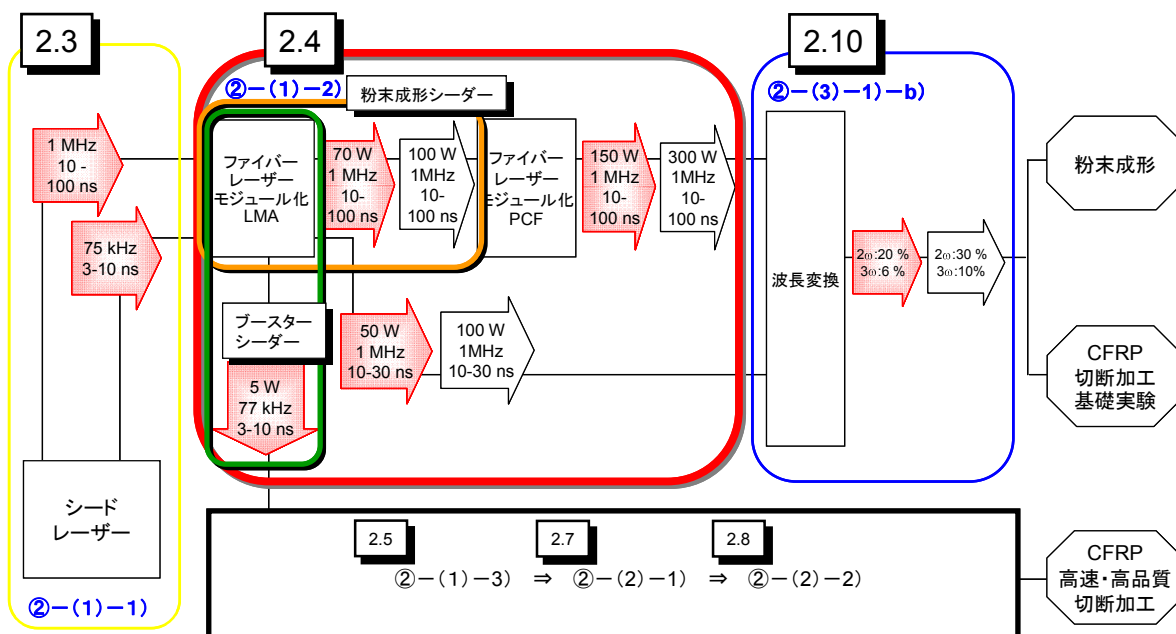
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」

(阪大接合研、古河電工、片岡製作所)

### 2.4.1 事業の背景・意義（目的・概要）

本研究開発では、図Ⅲ-2.4.1に示したように粉末成形用レーザーには、②-(1)-1)で開発した繰り返し周波数1MHz、パルス幅100nsのシードレーザーをLMAファイバーレーザーモジュールにより中間目標と出力して、平均70W、最終目標として平均出力100Wまで増幅し、さらにフォトニッククリスタルファイバーレーザーモジュールにより、中間目標として平均出力150W、最終目標として平均出力300Wまで増幅する。CFRP切断加工基礎実験用レーザーには②-(1)-1)で開発した繰り返し周波数1MHz、パルス幅10nsのシードレーザーを50Wまで増幅する。CFRP高速・高品質切断加工用レーザーには、②-(1)-1)で開発した繰り返し周波数77kHz、パルス幅3-10nsのシードレーザーを平均出力5Wまで増幅する。図Ⅲ-2.4.1中に示したように繰り返し周波数1MHz、パルス幅100ns、平均出力70W（中間目標）および平均出力100W（最終目標）のLMAファイバーレーザーモジュールを「粉末成形シーダー」、繰り返し周波数77kHz、パルス幅3-10ns、平均出力5WのLMAファイバーレーザーモジュールを「ブースターシーダー」と呼ぶことにする。



図Ⅲ-2.4.1 目的別に開発されるパルスファイバーレーザー開発目標：中間目標（矢印赤）と最終目標（矢印白）

### 2.4.2 研究開発目標と根拠

粉末成形において成形体の構造制御の高度化に必要なレーザーには、100 ns 程度のⅢ-5-(1)（中間）

パルス幅が要求される。成形速度から繰り返し周波数には 1MHz、平均出力には 300 W 程度必要となる。CFRP 切断加工基礎実験用には、パルス幅 10ns が必要となる。CFRP 高速・高品質加工用レーザーについては、パルス幅 3-10 ns、繰り返し周波数 1 MHz、平均出力 50 W 程度が必要となる。CFRP 高速・高品質切断加工用レーザーは、②-（1）-3）および②-（2）-1）で所望の平均出力に増幅されるが、そのレーザー増幅器に供給するレーザーには、パルス幅 3-10 ns、繰り返し周波数 77 kHz、平均出力 5 W 要求されるので、同平均出力を目標値とした。本レーザーの波長は 1064 nm であるが、後段の出力特性向上のため、1nm 程度の波長チューニングを可能とするように開発した。また、②-（1）-3）において、高出力化のため、異なる波長のレーザーを 2 台用意し合波させるため、波長 1070nm の同一特性のパルスレーザーを開発する。

粉末成形用レーザーの出力として、②-(1)-1)で開発する繰り返し周波数 1 MHz、パルス幅 100 ns のシードレーザーを最終目標として平均出力 300 W まで増幅することが必要となる。そのために、LMA ファイバー増幅により最終目標として平均出力 100W を達成し、その後、フォトニッククリスタルファイバー増幅により平均出力 300W を得る方法を選択した。中間目標値と最終目標値を表Ⅲ-2.4.1 に示す。

表Ⅲ-2.4.1 粉末成形用パルスファイバーレーザーモジュール開発の中間目標値と最終目標値

研究項目	評価項目		
	評価項目	中間目標	最終目標
②レーザー高品位化技術の研究開発 (1)ファイバーレーザーの パルス制御・高性能化技術の開発 2)ファイバーレーザーの モジュール化技術の開発	ブースター シードレーザー	出力: 5 W@5 ns 繰り返し: 77 kHz 波長: 1064 nm, 1070 nm パルス幅(可変): 3 ns - 10 ns 偏光: 直線	中間目標を最終目標とする
	粉末成形シードレーザー	出力: 70 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅(可変): 10 ns - 100 ns 偏光: 直線	出力: 100 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅(可変): 10 ns - 100 ns 偏光: 直線
	PCF増幅	出力: 150 W@100 ns 偏光: 保持	出力: 300 W@100 ns 偏光: 保持
	CFRP切断加工基礎実験用レーザー	出力: 50 W@10 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm 偏光: 直線	出力: 100 W@10 -30 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm 偏光: 直線

CFRP 切断加工基礎実験用には、短パルス化が必要で、②-（1）-1）にてシードレーザーの短パルス化を行い、本研究開発では、パルス幅を保持したまま平均出力 50W までの増幅を行った。

CFRP 高速・高品質切断加工用レーザーの平均出力 1.5kW、繰り返し周波数 150 kHz およびパルス幅 3-10 ns を最終的に得るために、本研究では、発振波長 1064nm と 1070 nm のそれぞれのそれぞれのレーザーにおいて、パルス幅 3-10 ns、繰り返し周波数 77 kHz、平均出力 5 W を開発目標とした。

### 2.4.3 研究開発スケジュール

2012年6月までの実績及び最終目標達成までの予定を表Ⅲ-2.4.5に示す。24年度はシードレーザーの特性向上を推進し、②-(1)-2)のモジュール化および②-(1)-3)ファイバーレーザーの高出力化技術の開発の成果で得られる出力波形に対しシードレーザーのパルス形状をフィードバック制御する総合動作試験と全体最適化を実施する。2種類のシードレーザーに関してはファームウェア、ソフトウェアの改良を主体に行い、制御回路のハードウェア設計にこれを反映させる。ブースターシーダーについては波長多重化のため同期動作も配慮した設計を実施する。粉末成形シーダーに関してはパルス幅可変機能と任意波形生成機能についての最適化を実施する。開発されたそれぞれのシードレーザーの評価を行い、それらのデータをシードレーザー開発へフィードバック。②-(1)-2)および②-(1)-3)の中間目標を達成するために必要なパルス幅可変機能および任意波形制御技術開発を推進する。

### 2.4.4 研究開発目標と達成状況

研究開発目標に対して現時点での達成度を表Ⅲ-2.4.2、表Ⅲ-2.4.3および表Ⅲ-2.4.4に示す。

表Ⅲ-2.4.2 粉末成形用パルスファイバーレーザーの開発目標と達成状況

研究項目	評価項目			成果	達成度
	評価項目	中間目標	最終目標		
②レーザー高品位化技術の研究開発 (1)ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発 2)ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発	粉末成形シーダー	出力: 70 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅: 100 ns パルス幅(可変): 10 ns - 100 ns 偏光: 直線	出力: 100 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅: 100 ns パルス幅(可変): 10 ns - 100 ns 偏光: 直線	出力: 70 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅: 100 ns パルス幅(可変): 10 ns、100 ns 偏光: 直線	○ ○ ○ △ ○
	PCF増幅	出力: 150 W@100 ns 偏光: 保持	出力: 300 W@100 ns 偏光: 保持	出力: 171 W@100 ns 偏光: 保持	○ ○

中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

表Ⅲ-2.4.3 CFRP切断加工基礎実験用パルスファイバーレーザー開発目標と達成状況

項目	中間目標	最終目標	成果	中間目標の達成度
波長	1064nm	1064nm	1064nm	○
パルス幅	10ns	10-30ns	10ns	○
繰り返し周波数	1MHz	1MHz	1MHz	○
出力	50W	100W	50W	○
偏光	直線	直線	直線	○

中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成



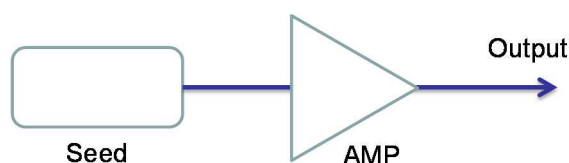
表Ⅲ-2.4.4 ブースターシーダー開発目標と達成状況

項目	中間目標	最終目標	成果	中間目標の達成度
波長	1064nm, 1070nm	1064nm, 1070nm	1064nm, 1070nm	○
パルス幅	5ns	5ns	5ns	○
パルス波形可変	3ns-10ns	3ns-10ns	3ns, 5-10ns	○
繰返し周波数	77kHz	77kHz	77kHz	○
出力	5W@5ns, 77kHz	5W@5ns, 77kHz	5W@5ns, 77kHz	○
偏光	直線	直線	直線	○

中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

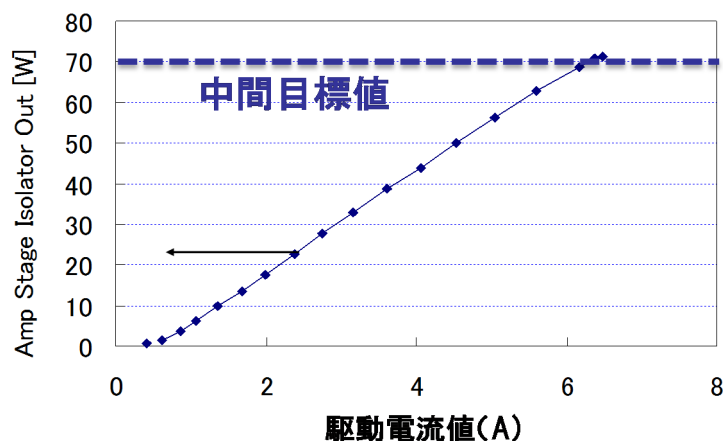
### 2.4.5 成果の詳細

【粉末成形シーダーの開発】



図Ⅲ-2.4.2 パルスファイバーレーザーの構成

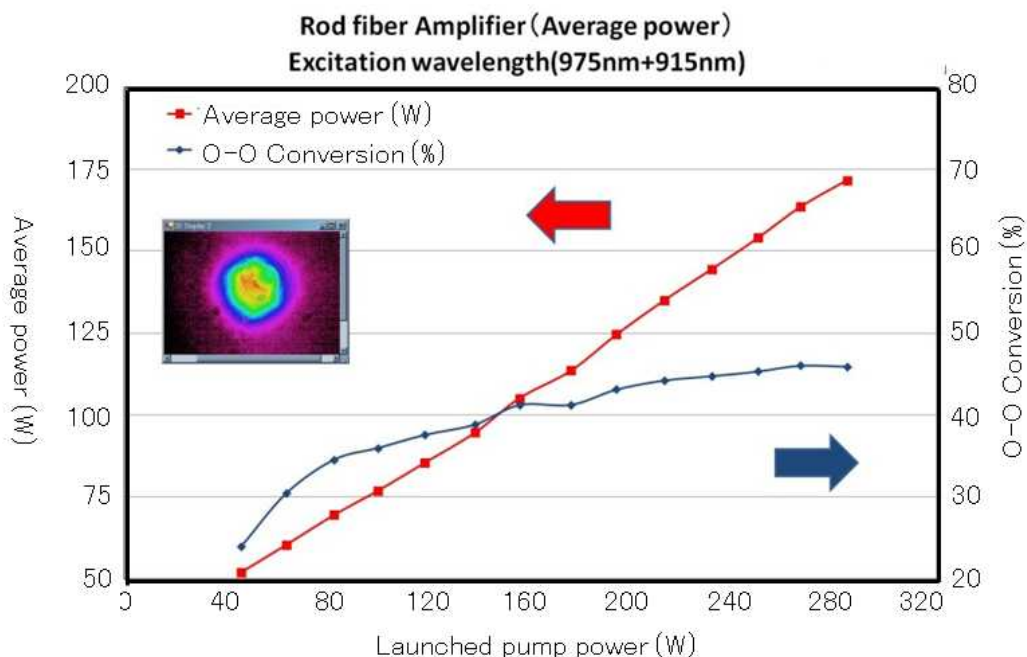
図Ⅲ-2.4.2 にパルスレーザーの構成を示す。シードレーザー(Seed)は、外部変調により初期の目標値である 10ns 及び 100ns パルスを発生させる。Seed からの出力パルスは、クラッド励起イッテルビウムファイバーを用いて増幅される。各増幅器は、最終パルスの出力スペクトルの信号-ノイズ比、ビーム品質を考慮し、増幅器の最適化を行った。出力特性を図Ⅲ-2.4.3 に示す。結果、中間目標値である 70W 出力を達成した。



図Ⅲ-2.4.3 出力特性

上述のシードレーザーを、フォトニッククリスタルファイバーレーザーモジュールにより、中間目標として平均出力 150W のところを、図Ⅲ-2.4.4 に示すように 171 W  
Ⅲ-5-(4) (中間)

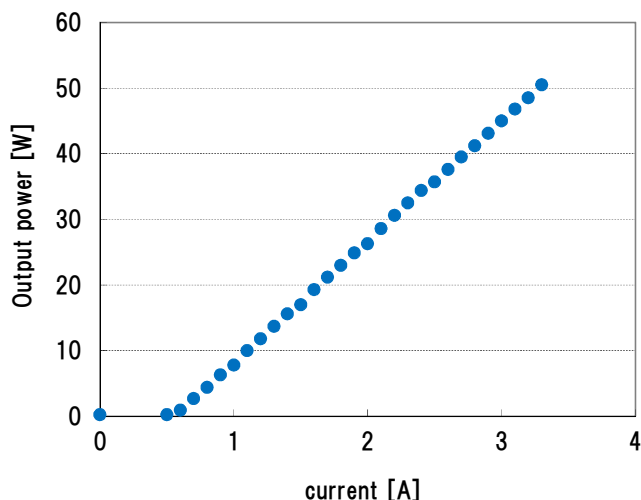
までの増幅に成功した。



図Ⅲ-2.4.4 フォトニッククリスタルファイバーモジュールの出力特性

【CFRP 切断加工基礎実験用レーザーの開発】

上述のパルス増幅技術及び、後述する CFRP 用シードレーザーの開発技術を応用し、パルスアンプの増幅条件及び非線形効果の抑圧条件を最適化することにより、パルス幅 10ns 繰り返し周波数 1MHz において、50W 出力を達成した。 図Ⅲ-2.4.5 に出力特性、図Ⅲ-2.4.6 にパルス波形を示す



図Ⅲ-2.4.5 出力特性 10ns 1MHz

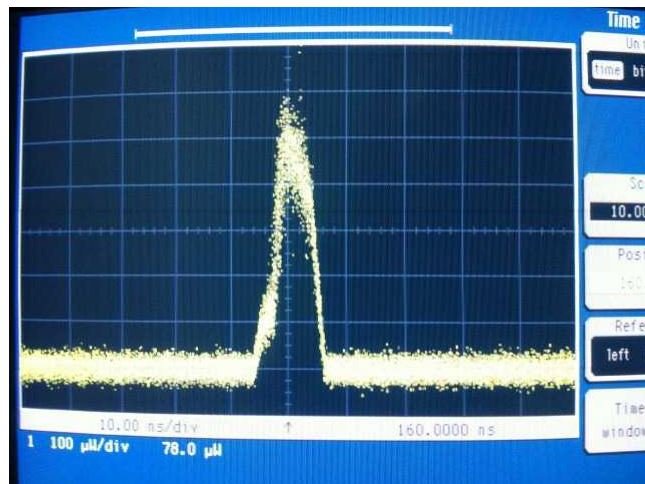


図 III-2.4.6 パルス波形特性 10ns 1MHz 50W

【ブースターシーダーの開発】

Seed は、直接変調により、3~10ns の短パルス発生を行う。パルス幅および繰り返し周波数を可変させるため、プログラマブルなパルス発生が可能な直接変調用半導体レーザー駆動基板を用いた。図 III-2.4.7 に Seed パルス出力の一例として、5ns~30ns までパルス幅の可変性を示す。本 Seed 光源から出力される光パルスを、クラッド励起イッテルビウムファイバーアンプを用いて、目標出力まで増幅させる。出力特性を図 III-2.4.8 に示す。中間目標値である、5ns 77KHz 時 5W 出力を達成した。Seed レーザーの中心波長は、動作温度により制御する。図 III-2.4.9 に出力パルススペクトルを示す。

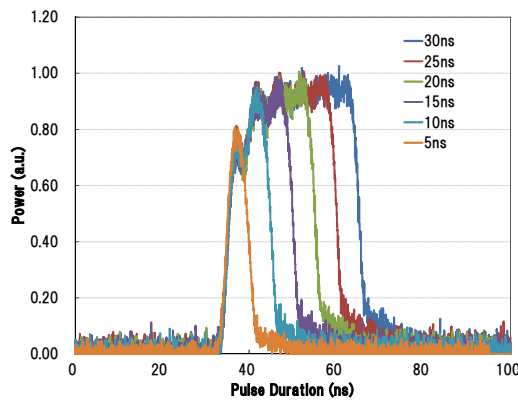


図 III-2.4.7 直接変調半導体レーザー出力(5~30ns)

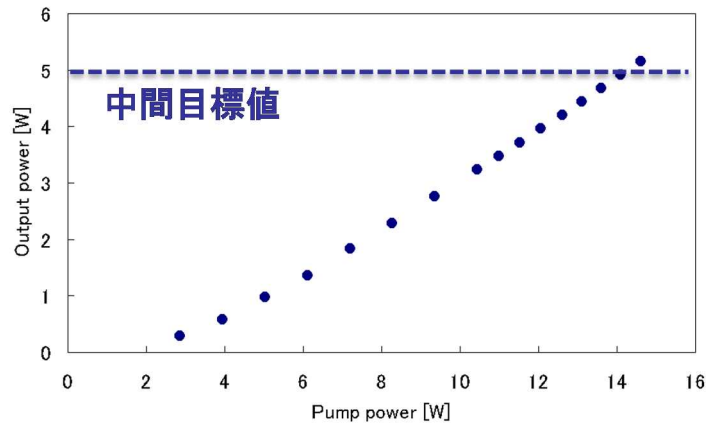


図 III-2.4.8 出力特性 (5ns 77kHz)

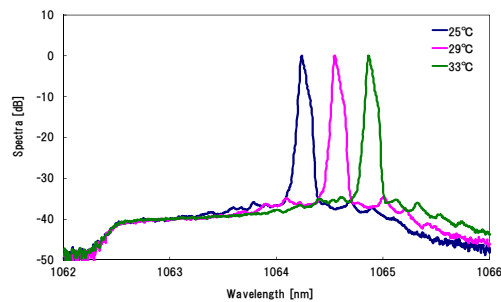


図 III-2.4.9 出力パルススペクトルの波長可変性

上述の特性を有するパルスレーザーをそれぞれ2式作成し、大阪大学接合研およびレーザー研に収め、高出力増幅用のシードレーザーとして評価を進めている。CFRP加工用シードレーザーは、2ビーム合波を行うため、1070nmの波長の異なる同一特性のパルスレーザーを作成した。図III-2.4.10にパルスレーザーユニットの外観を示す。



図 III-2.4.10 パルスレーザーユニット外観

一連の開発を通じ、CFRP切断加工基礎実験用として偏波保持型の50W以上のパルスファイバーレーザー、10ns以下の高いピークパワー出力のパルスレーザーの開発に成功した。ファイバーレーザーの高輝度特性や取り扱いの容易さに加え、高出力化、短パルス化、パルス幅や繰り返し可変性、偏波保持出力により、粉末成形やCFRP加工な

どの成形及び加工条件の最適化開発に重要な光源の特性を（加工条件）を大きく変化させることが可能となった。

#### 2.4.6 最終目標の達成の見通し

最終目標の達成見込みを表III-2.4.5に示す。

表 III-2.4.5 最終目標、成果および最終目標到達見込み

項目	最終目標	成果	最終目標の到達見込み
【粉末成形ブースター】	平均出力：100 W@100 ns 繰り返し周波数：1 MHz 波長：1064 nm パルス幅：100ns パルス幅可変：10 ns - 100 ns 偏光直線	平均出力：70 W@100 ns 繰り返し周波数：1 MHz 波長：1064 nm パルス幅：100ns パルス幅可変：10 ns - 100 ns 偏光：直線	PCFを用いた高出力パルス増幅器に入力する前段のファイバーパルスレーザーの中間目標を達成。出力も最終目標の7割に達しており、プロジェクト期間内に目標達成の見通し。
【PCF増幅】	平均出力：300 W 偏光：保持	平均出力：171 W 偏光：保持	
CFRP切断加工基礎実験用パルスファイバーレーザー	波長：1064 nm パルス幅：10-30 ns 繰り返し周波数：1 MHz 平均出力：100 W 偏光：直線	波長：1064 nm パルス幅：10 ns 繰り返し周波数：1 MHz 平均出力：50 W 偏光：直線	高繰り返し短パルス発生技術を確立。本プロジェクト終了までに励起光出力の増加及び増幅条件の最適化により目標達成の見通し。
ブースターシード	中間目標を最終目標とする。	出力： 5W@5ns, 77kHz 繰り返し周波数： 77kHz 波長： 1064nm, 1070nm パルス幅：5ns パルス波形可変： 3ns, 5 ns - 10 ns 偏光：直線	

#### 2.4.7 知的財産権 及び 成果の普及

本プロジェクトにおけるファイバーレーザー開発に必要な知財として「特開 2007-142380」「特開 2011-187825」がある。平成 24 年 8 月中に「PCF の劣化を抑制する制御方法」および「PCF の空間モードを改善する制御技術」を出願予定である。成果の普及として、平成 23 年度は、16 件の研究発表・講演を行っている。平成 24 年度については、3 件行っている。

## 2.5 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」

「(2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発」

「1) kW 級ブースター増幅器の開発」

「(3) 高出力波長変換技術の開発」

「2) 波長変換の高効率化技術の開発」

### CFRP 加工用レーザーの全体構成とその概要

#### (1) システム構成

システムは、図 1 に示すように、ファイバーフロントエンド、ブースター増幅器及び波長変換部から構成する。基本計画書のブースター増幅器の目標平均出力 (1.5kW) を達成するために、Nd:YAG/YAG コンポジットセラミック増幅器を採用し、そのエネルギー取り出し効率を高めるために注入平均パワーを 300W と設定した。この注入パワーを実現するために、150W×2 ビームのファイバーフロントエンドを用いる。また、高調波変換については、2 倍高調波変換 (SHG)、3 倍高調波変換 (THG) において、各々 40%、13% の変換効率が最終目標である。フロントエンド、ブースター増幅器及び波長変換の個々の課題は図 1 に示す通りであり、システム全体を通して光路設計とビーム結合の最適化を図る。

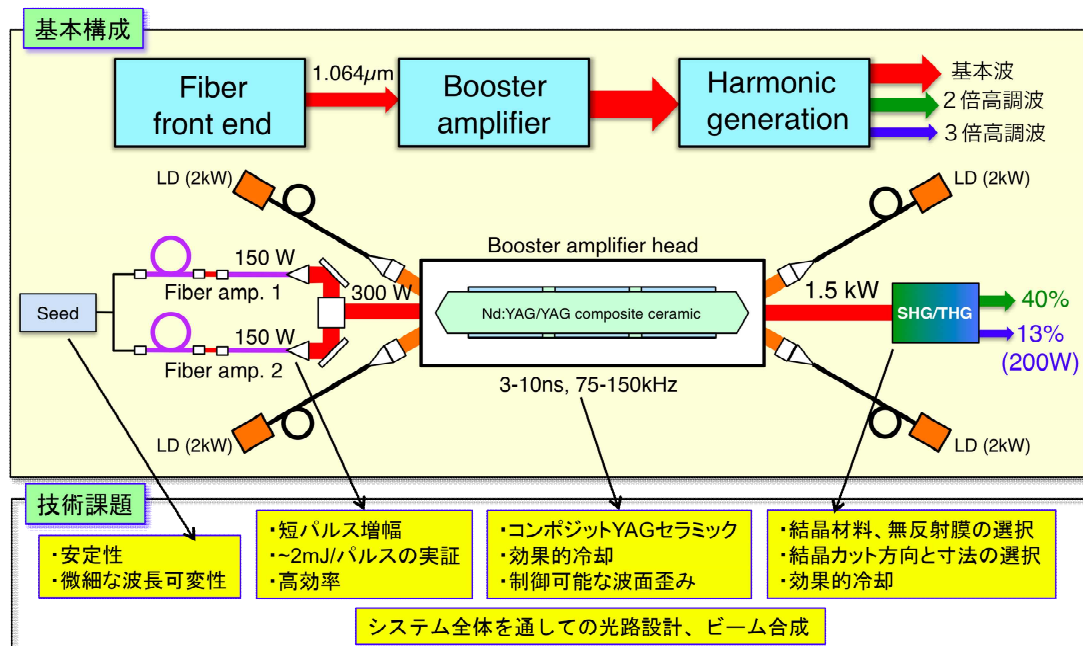


図 1 CFRP 加工用レーザーの全体構成図

#### (2) 開発体制

以下の開発体制で研究を行っている。

種光：

ALPROT (古河電工) が供給

ファイバー増幅器：

光源技術開発センター阪大レーザー研(以下、阪大レーザー研)が中心となり、光源技術開発センター阪大接合研(以下、接合研)、ALPROT(片岡製作所)と連携して開発する。

ブースター増幅器：

阪大レーザー研が中心となり、ALPROT(片岡製作所、レーザー総研)と連携して開発する。

波長変換：

阪大レーザー研が中心となり、ALPROT(レーザー総研)と連携して開発する。

### (3) 開発目標の位置づけ

図2にパルス幅、繰り返し周波数及び平均出力の目標値をプロットし、市販レーザーと比較した。本プロジェクトでは従来の市販レーザーでは対応できない10nsを切るパルス幅で、繰り返し周波数も高い領域を目指している。また、平均出力に関しても、基本波、2倍高調波、3倍高調波ともにトップの性能を目指している。

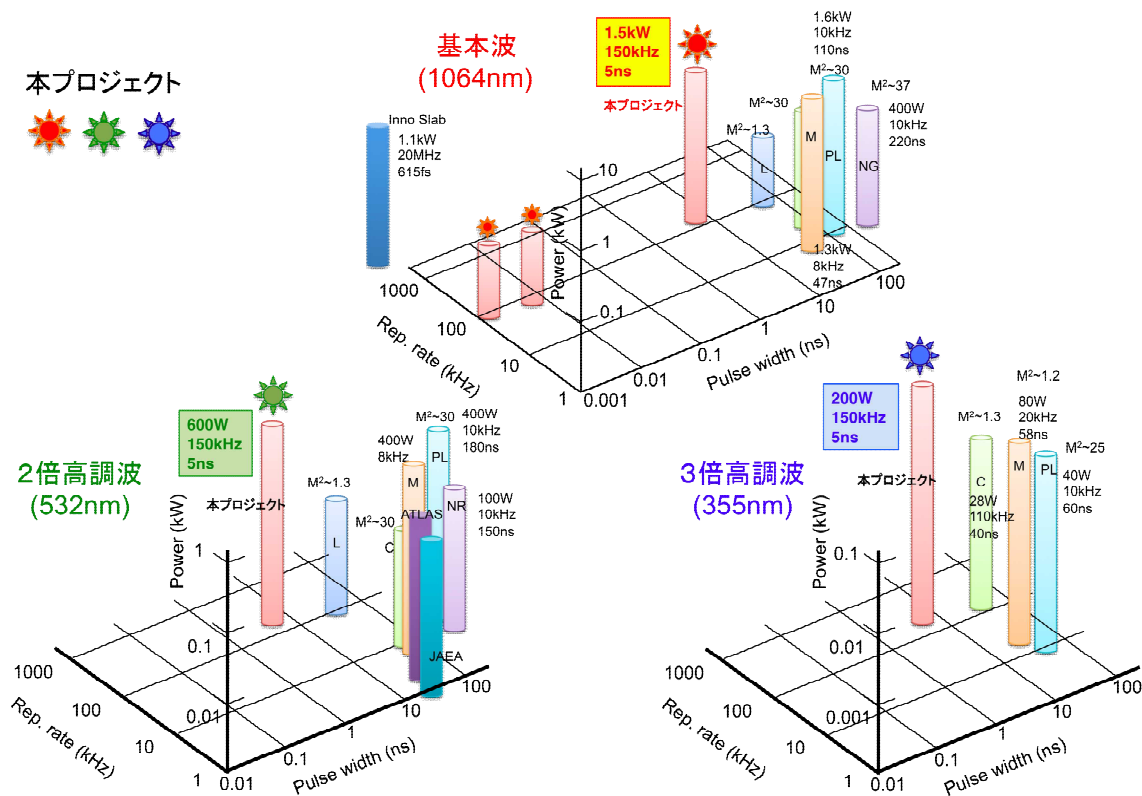


図2 レーザー性能の市販品との比較



## 2.5 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」

(阪大レーザー研、阪大接合研、ALPROT(古河電工、片岡製作所))

※CFRP加工用レーザーの全体構成とその概要を「Ⅲ-6-1、2」頁に記載

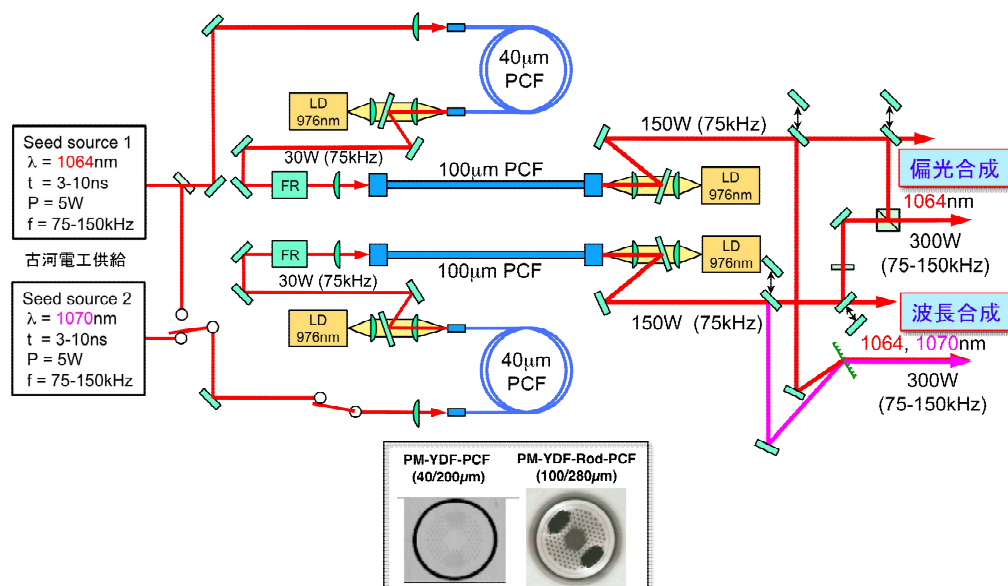
### 2.5.1 事業の背景・意義（目的・概要）

連続発振（CW）ファイバーレーザーは、10kW級の出力を高ビーム品質で達成している。一方、パルスファイバーレーザーは、非線形光学効果や損傷により出力が制限されている。このため、高効率・高平均出力・高ビーム品質パルスファイバーレーザーの開発を行う。

### 2.5.2 研究開発目標と根拠

図Ⅲ-2.5.1に高出力ファイバーレーザーシステムの構成図を示す。増幅部はコア径40 $\mu\text{m}$ 及び100 $\mu\text{m}$ のYb添加フォトニック結晶ファイバーで構成される。励起源は波長976nmのCW半導体レーザーである。この増幅器を2ビーム分設置し、古河電工が供給する種光源（波長1064.1-1064.8nm、パルス幅3-10ns、繰り返し75-150kHz、平均パワー5W）からのパルス列を1ビームあたり150Wまで増幅する。さらに、2ビームを偏光合成して、300Wを後段のブースター増幅器（ジグザグアクティブミラー型Nd:YAGコンポジットセラミック増幅器）の入力として注入する。

また、基本計画書のただし書きに記載されているように、ファイバーレーザー単独で「多波長複合加工技術の開発」に活用できることも、レーザーの高効率化の観点から重要である。そのために、本プロジェクトでは、上記のブースター増幅器注入用のファイバーレーザーの構成を変えることなく、機能付加によって2ビーム波長合成の開発を行い、多波長多ビーム合成技術に基づくスケーラブルな高出力化技術の基盤技術確立につなげる。



図Ⅲ-2.5.1 高出力ファイバーレーザーシステムの構成図

ブースター注入用及び2ビーム波長合成に関する研究開発目標と根拠は以下の通りである。

#### (1) ブースター注入用

基本計画書に記載されているように、ファイバーレーザーの出力は後段のパルスレーザー増幅器（ブースター増幅器）の種光として用いられるため、ブースター増幅器に適した条件で供給する必要がある。以下に、研究開発目標とそれらの根拠を述べる。

#### パルスエネルギー

目標値：2mJ/pulse

設定根拠：既存のフォトニック結晶ファイバーのコア直径は100 $\mu$ m（モードフィールド直径=約80 $\mu$ m）である。パルス幅10nsに対するレーザー損傷閾値からこの目標値を設定した。

#### 繰り返し周波数

目標値：75-150kHz

設定根拠：CFRP切断加工において、前のパルスが生成するブルームの影響を避けることができるパルス繰り返し周波数を設定した。但し、ファイバーレーザー、及び後段のブースター増幅器ともに効率を維持したままさらに繰り返し周波数を上げることは容易であることから、パルス増幅としては困難な条件（比較的低繰り返しで高パルスエネルギー）に目標設定した。

#### 出力パワー

目標値：300W（2ビーム）

設定根拠：CFRP加工速度への要求仕様から、後段のブースター増幅器の出力は1.5kWとなっている。ブースター増幅器において、単純化した光路設計（単一パスあるいはダブルパス）においてエネルギー抽出効率を高めるには、十分な種光パワーが必要である。ファイバー増幅器のビーム当たり出力が150W（2mJ/pulse $\times$ 75kHz）であることから、ファイバーレーザーの2ビーム出力を合成して、300Wをブースターに入力することが妥当である。

#### 波長

目標値：1064.1-1064.8nm（可変）

設定根拠：ブースター増幅器のレーザー材料であるNd:YAGの利得ピーク波長の温度依存性（1nm/200K）、及び計算から予測されるNd:YAGレーザーの最大温度から、上記の波長可変範囲を設定した。ファイバーレーザーとブースター増幅器のシステム化段階では、種光源の波長を最適値に同調する。

#### パルス幅

目標値：3-10ns

設定根拠：CFRP切断加工の品質（反応層（熱変性領域の幅） $<$ 100 $\mu$ m）から要請されるパルス幅を最大値に設定した。一方、パルス幅を短くすることによってファイバー出力端面の損傷が問題となる。繰り返し周波数を設定目標の最大値（150kHz）にすると、パルスエネルギーは1mJ/pulseとなり、レーザー損傷閾値に関するパルス

幅の2乗則から、損傷回避に必要なパルス幅の下限は約3nsとなる。

$M^2$

目標値：1.5

設定根拠：想定されるフォトニック結晶ファイバー増幅器のコア直径(100 $\mu$ m)とNA(0.02)で決まる値(ほぼ限界値)に設定した。

## (2) 2ビーム波長合成

### 出力パワー

目標値：300W

設定根拠：上記ブースター注入用ファイバー増幅器の1ビームを異なる波長で動作させて、回折格子で合成する。回折格子の効率は90-95%が可能であるので、ファイバー損傷のマーゼンの範囲内で300Wは可能である。

### 波長

目標値：1064nmと1070nm

設定根拠：2ビーム波長合成によるスケーラブルな高出力化の技術的実証であるため、ブースター注入用と増幅特性が同等で、かつ回折格子による合成において十分な入射角度差となる波長を選択した。

これらの最終目標と中間目標を併せて表III-2.5.1に示す。

表III-2.5.1 ファイバーレーザーの高出力化の研究開発目標と根拠

ファイバーの高出力化				
項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
ブースター増幅器注入用：後段のNd:YAGブースター増幅器に適切な仕様のパルス列を供給する。(基本計画書の範囲内)				
エネルギー	2mJ/pulse	100 $\mu$ mコアファイバーの損傷閾値	2mJ/pulse	-----
繰り返し	75-150kHz	前のパルスが生成するブルームによる影響を避ける	75kHz	-----
平均出力	300W (2ビーム)	後段のNd:YAGブースター増幅器の取り出し効率を向上させる。 150W $\times$ 2ビーム構成	150W	2mJ/pulse $\times$ 75kHz(1ビーム)
波長(可変)	1064.1-1064.8nm	Nd:YAGブースター増幅器の利得中心波長の温度依存性に対応	1064.1-1064.8nm	-----
パルス幅	3-10ns	下限：ファイバー損傷抑制。 上限：熱変性領域の低減	3-10ns	-----
$M^2$	<1.5	100 $\mu$ mコアフォトニック結晶ファイバーの限界値	<1.5	-----
2ビーム波長合成：高品位のファイバーレーザーの利点を活用して、多ビーム合成によるスケーラブルな高出力パルスレーザーの基盤技術を開発する。				
出力パワー	300W	2ビームを異なる波長で動作させて合成。	波長合成の試験をH24年度内に開始(業務計画書)	
波長	1064, 1070nm	利得の低い長波長側で特性評価のため(1050nm帯は既存装置のデータを活用)		

## 2.5.3 研究開発スケジュール

表III-2.5.2に示すスケジュールで開発を進めている。ブースター注入用ファイバーレーザー(波長：1064nm帯)に関しては、昨年度までに基本的な特性試験を完了し、今年度に入って全ての中間目標を達成した。今後、ブースター増幅器との組み合わせ試験に入る。

2ビームの波長合成については、波長 1070nm の試験を行い、150W の目標値を達成した。次年度に 2 波長合成試験を行い、目標合成出力 300W を達成する計画である。

表 III-2.5.2 ファイバーレーザーの高出力化の開発スケジュール

ファイバーの高出力化						
項目	2010	2011	2012	2013	2014	最終目標値
ブースター増幅器注入用：後段のNd:YAGブースター増幅器に適切な仕様のパルス列を供給。						
エネルギー		▲	●			2mJ/pulse
繰り返し		▲	●			75-150kHz
平均出力		▲	●			300W
波長(可変)		▲	●			1064.1-1064.8nm
パルス幅		▲	●			3-10ns
M <sup>2</sup>		▲	●			<1.5
2ビーム波長合成：多ビーム合成によるスケラブルな高出力パルスレーザーの基盤技術を開発。						
出力パワー			▲	●		300W
波長			▲	●		1064, 1070nm

### 2.5.4 研究開発目標と達成状況

ブースター注入用（波長 1064nm 帯）としては、全ての項目について目標値を達成し、今年度後半にはブースター増幅器との組み合わせ試験に移行する。また、最終目標の 300W を達成するための 2ビーム偏光合成試験を行うとともに、100μm コアファイバーの冷却構造を改善し、目標性能を大幅に超える出力パワーにおいても高ビーム品質の実現を目指す。CFRP 加工のためのパルス幅の最適化（数 ns のパルス幅）については、ファイバーの破壊試験となるため、ブースター増幅器との組み合わせ試験の進捗状況を見て判断する。

表 III-2.5.3 ファイバーレーザーの高出力化の達成状況

ファイバーの高出力化				
項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
ブースター増幅器注入用				
1) エネルギー	2mJ/pulse	2.1mJ/pulse (9.5ns)	○	数nsでの試験
2) 繰り返し	75kHz	77kHz	○	
3) 出力パワー	150W	150W (M <sup>2</sup> =1.5) 200W (M <sup>2</sup> =2-3)	○	偏光合成の前倒し 実証
4) 波長(可変)	1064.1-1064.8nm	1064.1-1064.8nm	○	
5) パルス幅	3-10ns	3-10ns(可変)	○	最適パルス幅対応
6) M <sup>2</sup>	<1.5	1.5 (100-170W)	○	冷却構造の改善
2ビーム波長合成				
1) 出力パワー	-----	2波長で個々に150W	◎前倒し	2波長合成の実証
2) 波長	1070nm	1070, 1075nm	○	

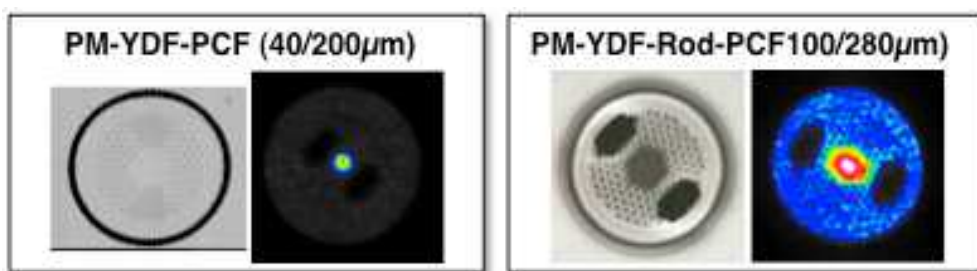
◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

2ビーム波長合成については、波長 1070nm、1075nm での増幅試験を完了し、150W (M<sup>2</sup>=1.5)、200W (M<sup>2</sup>=2-3) の出力パワーを前倒し達成した。高耐力・高効率の石英製

透過型回折格子（開発者：キヤノン、東大物性研）の導入によって、今年度中に2ビーム合成 300W を前倒し達成できる見込みである。

### 2.5.5 成果の詳細

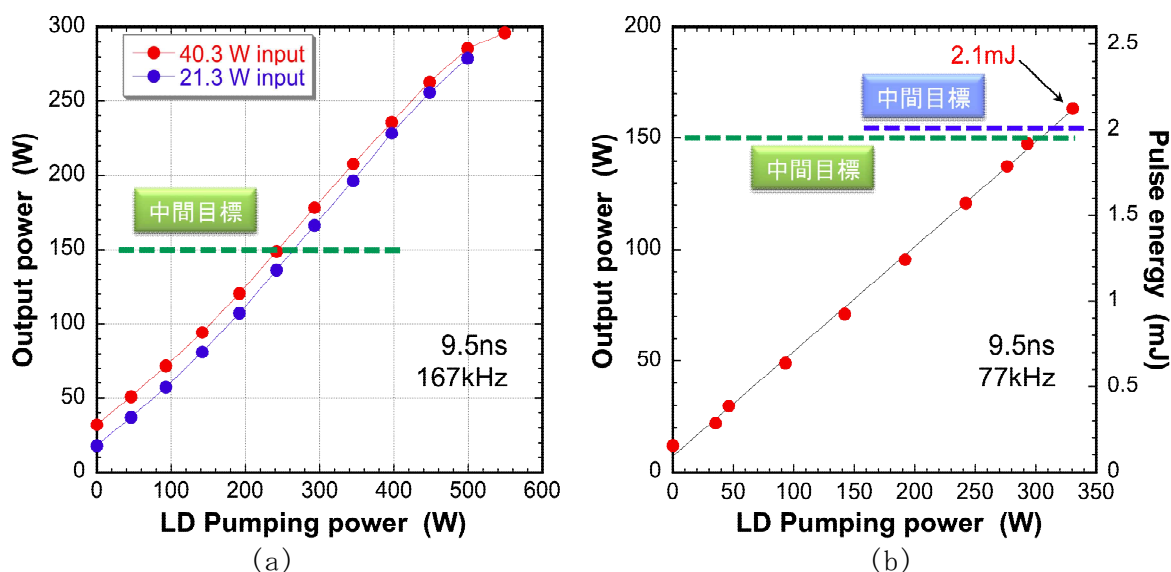
ファイバーシステム（構成図：図Ⅲ-2.5.1）は、LD 直接変調発振器部と偏波保持シングルファイバーモード増幅器部（以上古河電工供給）、フォトニック結晶ファイバー(PCF)の40 $\mu\text{m}$ コア径と100 $\mu\text{m}$ のPCFロッドファイバー増幅器部で構成した。各々のファイバー断面図を図Ⅲ-2.5.2に示す。PCFはYb添加コアを囲む様に配置された空孔によって、ファイバーのNA値を制御できるファイバーであり、NA値0.02-0.03を実現し、優れた出力ビーム性能が得られた。



図Ⅲ-2.5.2 PCFファイバーの断面写真と出力ビームパターン

#### (1) ブースター注入用ファイバーシステムの成果

図Ⅲ-2.5.1の上側の1ビーム（ファイバー①）について励起条件と伝搬モード制御を最適化し、中間目標（出力150W、パルス幅3-10ns、繰り返し周波数75-150kHz、高ビーム品質を達成するとともに、ブースター増幅器への注入に供する。この最適化に基づき、全く同じものをもう1台（ファイバー②、図Ⅲ-2.5.1の下側のビーム）構築する。2台のファイバーレーザーを同一波長で動作させて、2ビーム偏光合成法の試験を行い、1本に合成されたビームの安定性やビーム品質等の課題を明らかにするとともに、その解決手法を開発することを目的としている。



図Ⅲ-2.5.3 ファイバー①の増幅試験結果. (a):平均パワーの試験、(b):1パルスエネルギー取り出し試験.

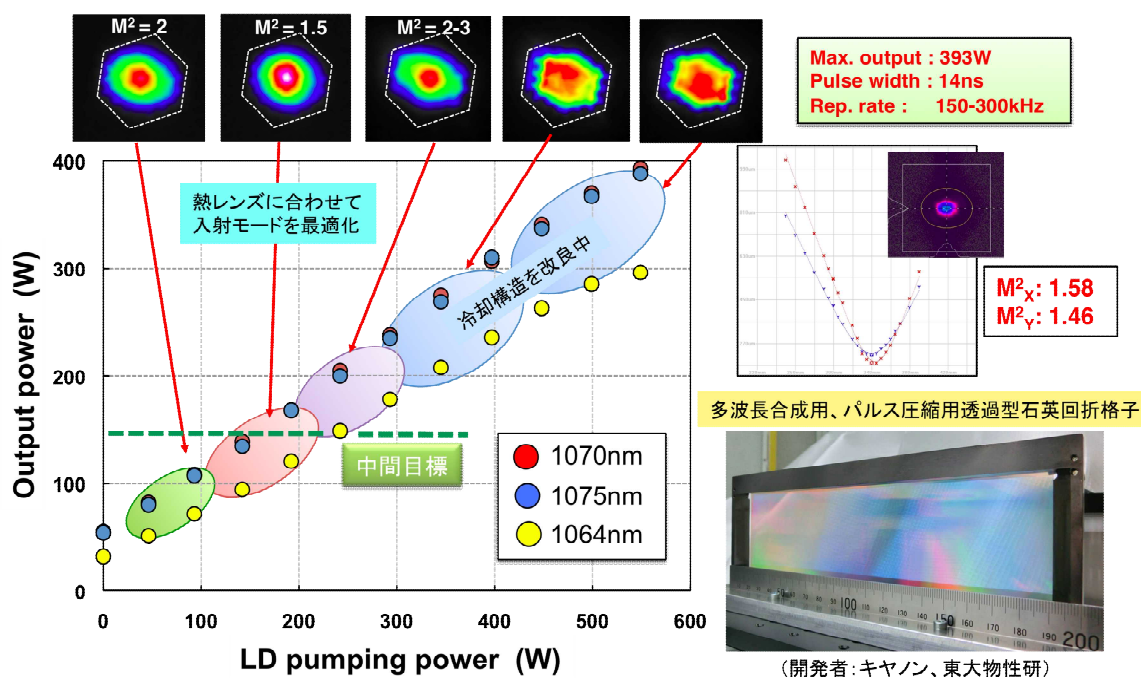
図Ⅲ-2.5-3(a)は、入射パワー21、40W時のCW LD励起パワーに対する増幅出力特性を示す。パルス幅 9.5ns、繰り返し周波 167 kHz の試験を行い、レーザー損傷と非線形過程 (SBS、SRS) を考慮した結果、中間目標値である 150W を大幅に超える平均出力 296W を達成し、約 50% の高効率エネルギー抽出が可能であることを実証した。

また、図Ⅲ-2.5-3(b)は、繰り返し数 77kHz 動作時の 1 パルスエネルギー取り出し実験の増幅特性を示す。中間目標値である 2mJ 出力に対し、レーザー損傷閾値に近い 2.12mJ (ピークパワー 223kW) のパルスエネルギーを達成した。

## (2) 2 波長合成技術開発における成果

ファイバー②をファイバー①と異なる波長で動作させ、2 ビーム波長合成法の試験を行い、1 本に合成されたビームの安定性やビーム品質等の課題を明らかにするとともに最適な波長合成手法を開発することを目的としている。

波長 1070nm 帯の種光源を用い、ファイバー②で増幅試験を行い、図Ⅲ-2.5.4 に示す出力特性が得られた。ここでは、中間目標 150W と  $M^2=1.5$  を両立させて達成するために、種光注入の空間モードがコア径 100 $\mu\text{m}$  ロッドファイバーの熱レンズ効果を相殺するように調整した。結果として、150W ( $M^2=1.5$ ) を達成し、200W (抽出効率 > 60%) においても良好なビーム品質 ( $M^2=2-3$ ) を実証した。現在、冷却構造のさらなる改善を行うことによって、さらなる高出力と高ビーム品質の両立を目指している。



図Ⅲ-2.5.4 異なる波長での増幅試験及びビーム品質の評価

上記のように、異なる波長で個々に 150W 出力が可能となったことから、2 波長合成試験を今年度前倒し試験する計画である。そのために必要な高効率 (回折効率 > 90%) で波面特性の良い石英製透過型回折格子について、国産技術 (図Ⅲ-2.5.4 の右下の写真、キヤノン製、共同開発機関: 東大物性研) 活用の見通しが立った。現在、この回折格子の高耐力無反射層の設計とレーザー耐力試験について、同社と検討を開始して

いる。

#### 2.5.6 最終目標の達成の見通し

##### (1) ブースター注入用

最終目標：75-150kHz, 300W, 1064.1-1064.8nm, 3-10ns,  $M^2 < 1.5$  (平成 26 年度末)

達成見通し：2 ビーム各々150W を達成しており、偏光合成により最終目標達成は容易である。

##### (2) 2 ビーム波長合成

最終目標：75-150kHz, 300W, 1064nm 及び 1070nm, 3-10ns,  $M^2 < 1.5$  (平成 26 年度末)

達成見通し：2 ビーム個々に 1064nm で 150W、1070nm で >150W を達成している。回折格子の効率 (>90%) とファイバー出力のマーヅンから評価して、波長合成の最終目標達成は容易である。

#### 2.5.7 知的財産権及び成果の普及

高出力動作のファイバーレーザーの技術について、光源技術開発センター接合研サイトの片岡製作所と連携して開発を行っている。特に、ロッド型 PCF ファイバーの冷却構造、入射ビームの空間モードとファイバー熱レンズの相殺などのノウハウが蓄積されており、これらに関する特許出願を検討している。また、接合研サイトと連携して開発された技術は、加工技術開発センター産総研サイトに納入されるファイバーレーザーに活用されている。

また、本プロジェクトで得られた出力パワー (162W@77kHz、296W@167kHz、パルス幅約 10ns) は、市販のパルスファイバーレーザー (パルス幅数 10ns) の性能を上回っており、製品化された場合の競争力は十分高いと考えられる。

## 2.6 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「(4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」

(古河電気工業株式会社)

### 2.6.1 背景及び目的

本事業は「高出力多ファイバーレーザー加工基盤技術開発プロジェクト」で進めている次世代レーザー加工技術の研究開発に係わり、昨今のファイバーレーザーの技術動向を踏まえて従来検討してきたレーザーの特性向上と加工適用分野の拡大を狙って、②レーザー高品位化技術の開発のなかの1項目として、(4)「励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」という主題でファイバーレーザー励起半導体レーザーの変調特性改善と信頼性の確保、高速変調可能な励起半導体レーザーの②-(2)「ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」のブースターアンプ部分への適用、さらに高速変調励起半導体レーザーを使ったQCWレーザーの開発を進める。本開発ではさらにプロジェクトの他の実施項目と連携をとりながら加工技術の開発も実施する。

ファイバーレーザー技術の優位性は発振効率の高さや待機電力が小さいという性能から実現できる省エネの効果、ファイバー伝搬に伴うデリバリーの容易さ、さらに高いビーム品質、ビーム品質の高さから活用できるガルバノ等のスキャナ技術との親和性、励起半導体技術の進化にともなう高信頼、メンテナンスフリー機能、等々従来の他のレーザー技術と比較して多数のアドバンテージが見出されており、それに伴い既存のレーザー技術であるランプ励起の固体レーザーや、炭酸ガスレーザーが既に使われている分野での置き換えが進んでいるが、この部分では既存の国産製品が海外製品へと置き換わる動きになっている。レーザー加工機にとって発振器は非常に重要な構成部品であり、製品の安定供給、設計のカスタマイズ、情報の開示性の観点から国内製のファイバーレーザー製品の出現が渴望されている。

半導体レーザー技術はファイバーレーザー技術の一つの基幹技術となっているが、従来の励起方式と比較した場合の大きな特徴である高速変調性能を活用する事でレーザー加工の性能向上が期待されている。QCWファイバーレーザーは既存のCWファイバーレーザーの基本設計を踏襲することで構成が簡単で安価な部品コストを維持しながら、励起半導体レーザーの高速パルス駆動により高いビーム品質を維持したままCW連続光と比較すると熱影響の小さな加工を実現することが出来、切断、溶接、AM等の幅広い用途で今後の応用展開が期待されている。



## 2.6.2 研究開発目標と根拠

### QCW ファイバーレーザーの開発

大電流高速変調が可能な励起半導体レーザーを連続駆動用ファイバーレーザーキャビティの励起に適用し、QCW (Quasi Continuous Wave ; 疑似連続駆動) 動作するファイバーレーザーを実際に試作する。23年度に目標とする特性は平均出力 250W で、パルス駆動時ピーク出力 700W、パルス幅 200  $\mu$  sec $\sim$ CW、中心波長 1080nm $\pm$ 20nm とする。レーザー装置として筐体の実装されたレーザーを試作し、加工拠点での評価のために提出する。ピーク 700W の目標値については既存の CW ファイバーレーザーの性能と早期の試作による加工拠点からの早期のフィードバックを実現するべく決定した。

24年度の開発については、開発した励起半導体レーザーを連続駆動用ファイバーレーザーキャビティの励起に適用し、平均出力 250W、パルス駆動時ピーク出力 1600W、パルス幅 200  $\mu$  sec $\sim$ CW、中心波長 1080nm $\pm$ 20nm を実現するレーザーの開発を行う。23年度で得られた試作結果を基に、加工特性を考慮したレーザー設計を行い、実際に筐体の実装されたレーザーを試作し、加工拠点での評価のために提出する。目標の設定根拠としては金属材料の溶接を主用途とする要求仕様をまず考慮し、同等な設計コンセプトとなっている海外競合製品の仕様を超える性能を確保することも考慮し、また開発期間内に現状のファイバーレーザー技術から十分達成しうる目標として設定した。

最終目標	設定根拠	中間目標 (23年度)	設定根拠
ピーク 1.6kW 平均 250W M2=1.1 以下	金属材料の溶接を主用途とする要求仕様から設定した。  また海外競合製品の仕様を超える性能を確保することを考慮した。  現状のファイバーレーザー技術から十分達成しうる目標として設定した。	ピーク 700W 平均 250W M2=1.1 以下	最終目標の半分のピークパワーとし、技術的に短納期で装置化を行うことができ、なおかつ、既存のレーザーと比較してパルスピークを利用した加工が期待でき、さらに早い時点で加工拠点に試作レーザーを提出することによりしてフィードバックをもらえるような設定をした。

### 2.6.3 研究開発スケジュール

表Ⅲ-2.6.1 研究開発スケジュール

項目	2010	2011	2012	2013	2014	最終目標値
高速変調 半導体 レーザ		— ▲	— ●	(量産化検討) →		
耐パワー光 部品評価			— ●			
ファイバ非線 形低減		— ▲	— ●			
QCWLレーザ 試作		— ▲	— ●	(高出力多重化) →		

### 2.6.4 研究開発目標と達成状況

表Ⅲ-2.6.2 研究開発目標と達成状況 (まとめ)

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標(基本計画)	中間目標		
QCWファイバレーザの作製	ピーク出力		ピーク出力:700W 平均出力:250W M <sup>2</sup> :1.1以下	ピーク出力:800W 平均出力:500W M <sup>2</sup> :1.1以下	○

## 2.6.5 成果の詳細

### QCW ファイバーレーザーの開発

ピーク出力 700W、平均出力 250W 以上、 $M2 < 1.1$  を実現した QCW 動作可能なファイバーレーザーを作成した。

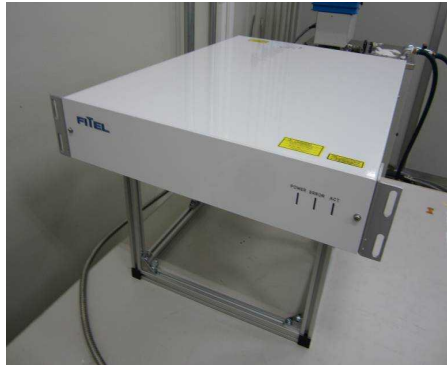


図 III-2.6.1 試作した QCW ファイバーレーザー

試作したピーク出力 700W のファイバーレーザーを用いて、CFRP の試験片の切断検討を行った。ピーク出力 700W 時において、1kHz、duty20%、切断速度 10mm/s の条件で切断加工を行った。CW 条件での切断結果と比較して表面状態として熱影響の小さな切断を実現することができた。

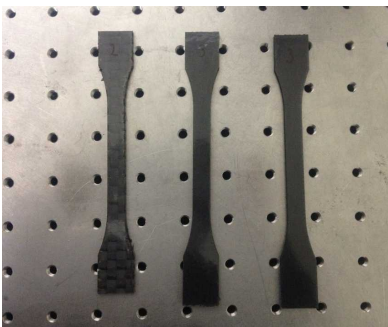


図 III-2.6.2 CFRP 切断検討

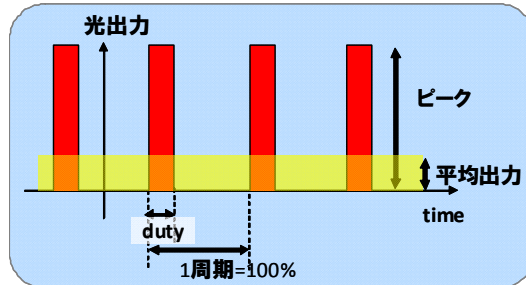


図 III-2.6.3 パルス形状

## 2.6.6 最終目標達成の見通し

表Ⅲ-2.6.4 現状の成果と最終目標達成の見通し

研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
5.1.3 QCWファイバレーザーの開発	QCWファイバレーザー	ピーク出力: 1.6W 平均出力: 250W ビーム品質: M2<1.1	800 W 500W M2<1.1	(課題とその対応) 順調に開発は進んでいる。 励起半導体の輝度向上と ファイバ非線形の低減を行い ピーク出力を確保する。 最終目標は十分達成可能。

## 2.6.7 知的財産権および成果の普及

特許出願については平成 23 年度に 8 件の出願を行った。

関連する研究発表、講演を平成 23 年度に 5 件実施した。

学会発表等

1. ”シングルモードファイバレーザーの開発と加工事例 “ 2011 年 4 月 22 日 シンポジウム「パワーファイバレーザーとその産業応用」
2. ”シングルモードファイバレーザーの特性と加工事例” 2011 年 10 月 17 日 レーザー学会第 419 研究会
3. “シングルモードファイバレーザーの特性と加工応用” 2011 年 10 月 28 日 レーザー学会東京支部第 13 回先進レーザー応用技術セミナー
4. ”High power single-mode fiber laser and a multi-mode delivery cable” Photonics West 2012
5. “シングルモードファイバレーザーの技術と加工応用” 2012 年 2 月 1 日 レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会シンポジウム

## 2.7 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」

#### 「1) kW級ブースター増幅器の開発」

(阪大レーザー研、ALPROT(浜松ホトニクス、レーザー総研))

※CFRP加工用レーザーの全体構成とその概要を「Ⅲ-6-1、2」頁に記載

#### 2.7.1 事業の背景・意義（目的・概要）

ファイバーレーザーからの出力を kW クラスまで増幅するためのブースター増幅器（半導体レーザー（LD）励起セラミック近赤外固体レーザー増幅器）を開発する。本プロジェクトで取り上げられている加工技術においてより難易度の高い CFRP 加工において、高スループットと加工品位（反応層（熱変性領域）を小さくすること）を両立するには、レーザーに対して次の点を考慮しなければならない。

##### 平均出力

スループットの観点から、1.5kW 以上（基本計画書における目標の上限値）を確保する。

##### パルス幅

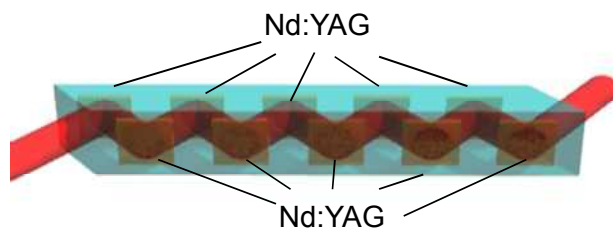
従来の市販レーザーのような長パルス（10ns 以上）の場合、平均出力を高くすることは容易であるが熱変性領域が拡大するため、短パルスが有効である。

##### 繰り返し周波数

繰り返し周波数を極端に高くし CW に近づければ、所要の平均出力を得ることは容易である。しかしながら、断続的なアブレーションによって CFRP を切断するため、先行パルスによるアブレーションルームが後続パルスに影響を与えないよう、繰り返し周波数の最適化が必要である。

#### 2.7.2 研究開発目標と根拠

レーザー材料として我が国の技術であり、熱伝導と効率に優れる Nd:YAG セラミックを採用する。また、増幅器の構成としては、優れた冷却性能が期待される薄型ディスクを採用する。薄型ディスクの欠点である増幅利得が小さいことを補償するため、図Ⅲ-2.7.1 に示すような増幅媒体が有効である。そのために、無添加 YAG セラミックに Nd 添加の薄型ディスク YAG セラミックを数枚張り付けて集積化し、全反射ジグザグ型光路を用いてアクティブミラー増幅器として作用させるとともに、反射膜による熱伝導（冷却効率）の劣化を回避する。



図Ⅲ-2.7.1 集積化ジグザグ型アクティブミラー増幅器（概念図）

Ⅲ-8-(1) (中間)

表Ⅲ-2.7.1 に目標値と設定根拠を示す。

表Ⅲ-2.7.1 目標値と設定根拠

kW級ブースター増幅器の開発				
項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
繰り返し	75-150kHz	CFRP加工からの要請(プルーム中でのパルス重なり)平均パワーに対して、さらなる高繰り返し化は容易。	75kHz	CFRP加工からの要請(プルーム中でのパルス重なり)
平均出力	1.5kW	CFRP加工からの要請(加工速度)	500-700W	最終目標の1/2スケールプロトタイプ
波長	1064.1-1064.8nm(最適化)	Nd:YAGレーザーの動作温度に依存するピーク利得波長に最適化	1064.1-1064.8nm(最適化)	Nd:YAGレーザーの動作温度に依存するピーク利得波長に最適化
パルス幅	3-10ns	CFRP加工からの要請(加工品位の向上)	3-10ns	CFRP加工からの要請(加工品位の向上)

上記の目標設定根拠は、「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」の成果と基本的に同じであるため、それらの説明を割愛し、妥当性を検証する。(詳細は、中間評価会に譲る。)

CW レーザーによる厚さ 3mm の CFRP 切断のデータから、平均出力 1.5kW において 6m/min の切断が可能であると評価でき、単位レーザーエネルギー当たりの CFRP 切削質量は約 6μg/J である。しかしながら、反応層(熱変性領域)の幅は数 100μm にも及び加工品質の低下が深刻である。レーザーパワーを  $P_L$ 、吸収率を  $\eta_{abs}$ 、損失パワーを  $P_{loss}$  とすると、パワーバランスは次式で与えられる。

$$\eta_{abs}P_L = v_s w d \rho (c_p \Delta T + h_s) + P_{loss}$$

ここで  $v_s$ 、 $w$ 、 $d$ 、 $\rho$  は各々、掃引速度、切断幅、切断深さ、CFRP 密度であり、 $c_p \Delta T$  は処理温度までの加熱エネルギー、 $h_s$  は蒸発エンタルピーである。パルス幅が短いレーザーアブレーションの場合、 $w$  はレーザースポットサイズに近づき、反応層の拡大を抑制するために切断効率が向上し、実験データに基づき上式は以下のように近似できる。

$$\eta_{abs}P_L \approx v_s w d \rho \times (43\text{kJ/g})$$

一方、反応層の増大を抑制する(横方向への熱伝導に打ち勝って高速でアブレーションさせる)ためには、 $10^9$ - $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> のレーザー照射強度が必要であると言われている。これらの考察から、レーザー照射の基本設計は以下のように求めることができる。

CFRP 素材：炭素繊維含有量 50%、厚さ 3mm

レーザー条件：パルス幅 10ns、パルスエネルギー 10mJ/pulse、

繰り返し周波数 150kHz、出力パワー 1.5kW

スポット直径：100μm (アスペクト比=厚さ/スポットサイズ=30)

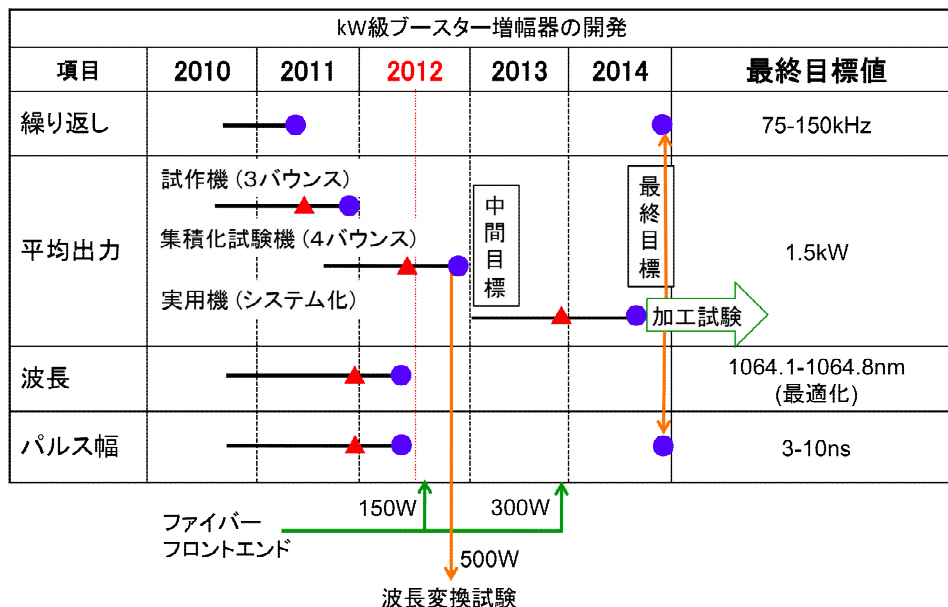
照射強度： $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> (吸収率：75%)、パルス当たりのアブレーション深さ：~20μm

掃引速度：5-8m/s (45-75 回掃引)、切断速度：6m/min

### 2.7.3 研究開発スケジュール

表Ⅲ-2.7.2に研究開発スケジュールを示す。ブースター本体は、試作機（図Ⅲ-2.7.1に示すジグザグ光路は3バウンス）で熱特性と利得を評価し、集積化試作機（4バウンス光路であり、実用機の1/2スケール）で冷却方式を改善し、最適波長等の性能評価を行った後に、実用機につなぐ。今年度後半にファイバーフロントエンドから150Wを供給し、中間目標（500-700W）を達成するとともに、その出力を波長変換試験に供給する。来年度には、ファイバーフロントエンドから300Wを供給し、実用機で最終目標（1.5kW）を達成するとともに、加工試験に供する。

表Ⅲ-2.7.2 研究開発スケジュール



### 2.7.4 研究開発目標と達成状況

試作機（3バウンス光路）の利得試験結果に基づき、集積化試作機（4バウンス光路）では中間目標を達成可能であることがシミュレーションによって明らかとなっている。基本計画にはないがCFRP加工において重要な性能である波面特性に関しても、試作機（3バウンス光路）を用いて波面の評価を行った。波面歪みの大部分を占めるdefocus成分は凹レンズで補正でき、高次の波面歪みは可変形鏡で補正可能である。

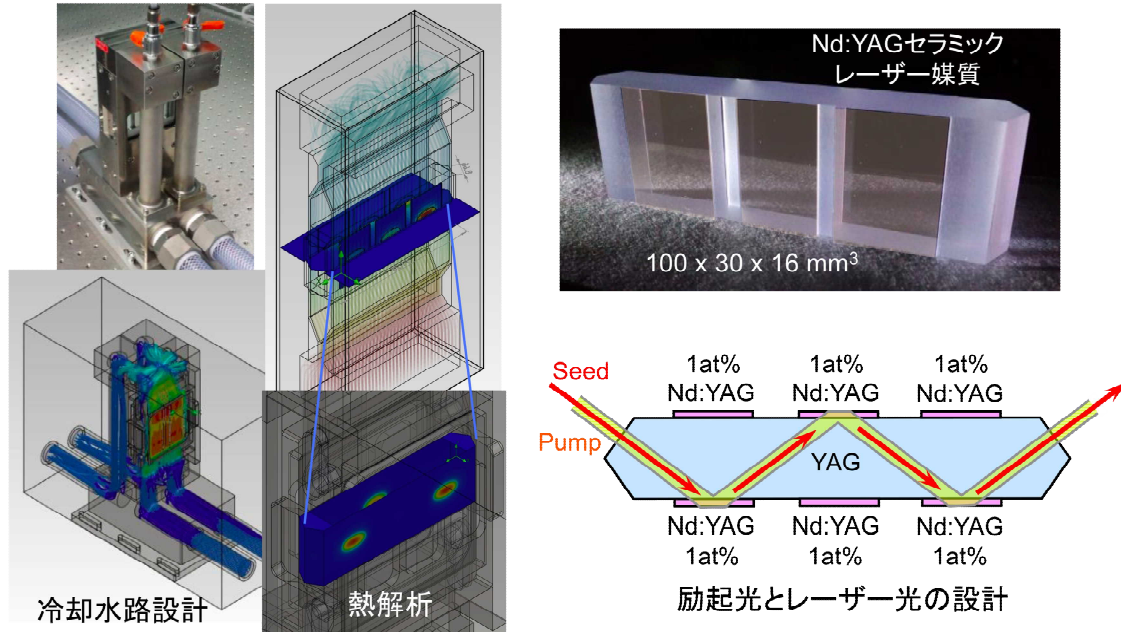
表Ⅲ-2.7.3 ブースター増幅器の達成状況

kW級ブースター増幅器の開発				
	中間目標	成果	達成度	今後の課題
1) 繰り返し	75kHz	CW LD励起 75kHz種光	○	
2) 平均出力	500-700W	利得の実測値 に基づくシミュレーション 600W	△ (H25年3月 達成予定)	ファイバーフロント エンドからの 150Wを種光として増幅試験。 500W出力を波長 変換実験に供給
3) 波長	1064.1-1064.8nm (最適化)	最適化データ 取得	△ (H25年3月 達成予定)	集積化ブー スター試験(500- 700W)でさらに最 適化。
4) パルス幅	3-10ns	3-10ns 種光	○	

◎ 大幅達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

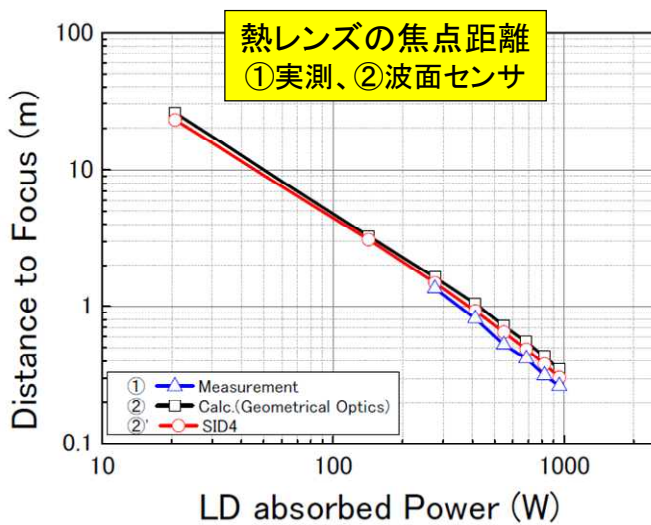
### 2.7.5 成果の詳細

ジグザグアクティブミラー増幅器の試作機（3バウンス光路）を、図Ⅲ-2.7.2に示すような熱解析に基づいて設計・製作した。コンポジットセラミックは同図の写真に示すように、長さ100mm×高さ30mm×幅16mmの無添加YAGセラミックの両面に厚さ1mmのNd:YAGセラミック（添加濃度1at%）を合計6枚 optical bonding したものである。励起LD光（CW）とレーザー光は同軸に伝搬し、全反射によって3回バウンスする構造である。



図Ⅲ-2.7.2 ジグザグ型アクティブミラー増幅器（試作機）

励起用LDは、ファイバー出力の1kW LD 4台で構成する。励起ビームの伝播特性を計測した結果、十分な均一性を保って増幅器中を約7mmのビーム径で伝搬した。プローブ光を用いてレーザー波面変化を計測した結果、波面歪みのPV (Peak to Valley) 値は、最大20λ程度であった。波面変化の主成分は、ゼルニケの defocus 成分であり、



図Ⅲ-2.7.3 熱レンズ焦点距離

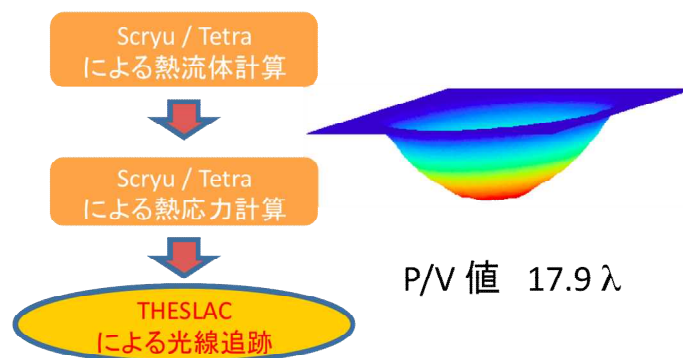
	位相パターン(正面)	位相(3D)	PtV(λ)
Coma Y Z			1.799
Spherical Aberr. I			1.831
Second. Astig 0- I			2.064
Second Coma Y Z			1.907

図Ⅲ-2.7.4 ゼルニケ高次成分



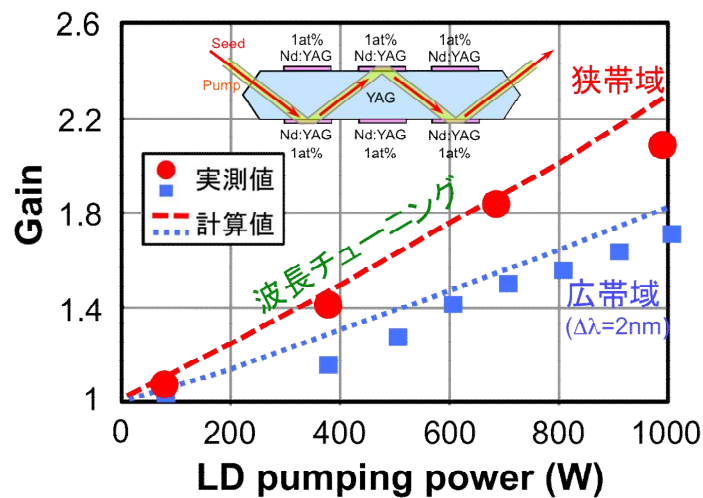
図Ⅲ-2.7.3 に示すように励起強度が上がるにつれ、熱レンズ焦点距離は短くなり、1kW 励起では 30cm 程度であった。この defocus 成分はレンズ光学系を用いて補正が可能である。図Ⅲ-2.7.4 にゼルニケの高次成分を示す。Coma、Spherical、Second Astig. 等が観測されているが、PV 値は、 $2\lambda$  程度と defocus 成分に比べ 1桁小さい。これらの高次成分は可変形鏡を用いて補正を行することができる。

次のステップとして集積化試作機（4バウンス光路）を設計するにあたり、このような熱的波面歪みを正確に評価する必要があるため、計算機シミュレーションによって増幅器の熱特性を評価する手法を確立した（図Ⅲ-2.7.5）。Scryu/Tetra 熱解析ソフトによって熱流体計算を行い、その温度分布に基づいて熱応力計算（変形の計算）を行う。求めた温度分布と変形量を独自開発の TESLAC コードに入力して光線追跡計算し、波面歪みを求める。これらの計算を実験結果でベンチマーキングし、集積化試作機の設計に反映させた。



図Ⅲ-2.7.5 熱レンズ効果の計算機シミュレーション

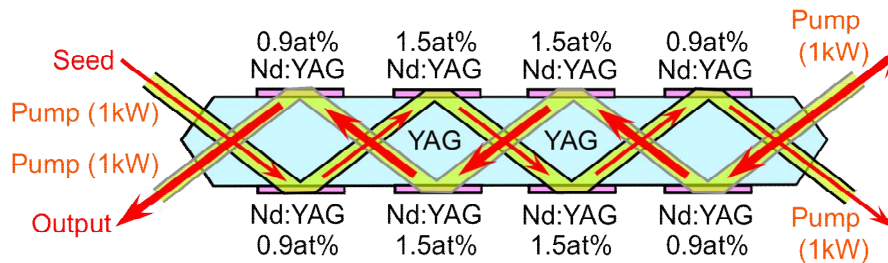
図Ⅲ-2.7.6 に試作増幅器利得の LD 励起パワー依存性を示す。LD 励起は両サイドから行っている。励起パワーに依存する Nd:YAG の温度変化に対応させて狭帯域光（図中の●）の波長を調整し、単一パス利得を求めた。得られた結果は計算予測（図中赤波線）とよく一致した。



図Ⅲ-2.7.6 試作増幅器利得の LD 励起パワー依存性

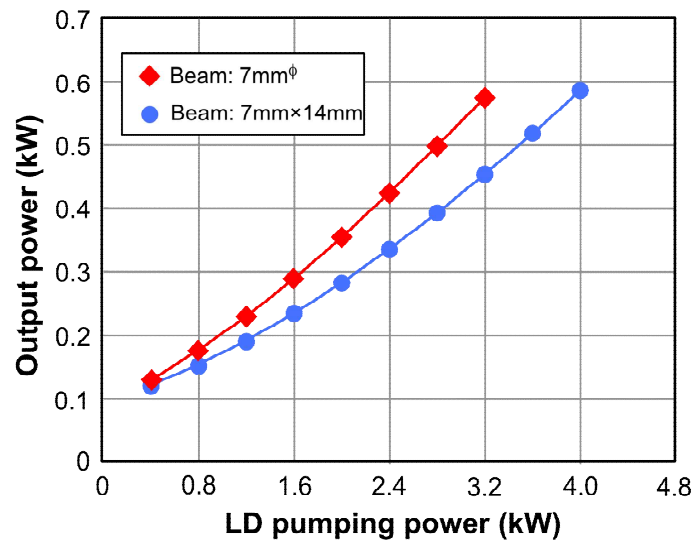
この実験結果と計算機シミュレーションによる熱解析から、1枚目と3枚目の Nd:YAG

薄型ディスクの中心部分では 77℃まで温度が上昇しているのに対し、2 枚目の Nd:YAG 薄型ディスクの中心部分では 66℃と評価された。このように、Nd:YAG 薄型ディスクごとに温度が異なると利得の低下を招くために、集積化試作機（4 バウンス光路）では図Ⅲ-2.7.7 に示すような構造を採用した。片側 4 枚の Nd:YAG 薄型ディスクの内、両サイドの 2 枚の Nd 添加量を 0.9at%、中央の 2 枚を 1.5at%とすることによって、温度上昇を同じ値にすることができる。



図Ⅲ-2.7.7 集積化試作機の増幅媒体構造

ファイバーフロントエンドから 150W を注入した場合の、励起 LD パワーに対するレーザー出力の計算結果を図Ⅲ-2.7.8 に示す。ここでレーザー光は、図Ⅲ-2.7.7 に示す全ての Nd:YAG 薄型ディスクを 1 回ずつ通過する（単一パス）。レーザービームサイズとして 7mm $\phi$ （◆）、7mm $\times$ 14mm の楕円（●）の 2 種類について計算した結果、単一パスによって中間目標を達成できる見通しを得た。また、ダブルパス光路を用いれば、さらに出力を増大させることができる。



図Ⅲ-2.7.8 集積化試作機の平均出力のシミュレーション予測

### 2.7.6 最終目標の達成の見通し

中間目標の平均出力 500~700W を達成する見通しを得た。ファイバーフロントエンド（平均出力 150W）と組み合わせた増幅試験については、7月から開始の予定である。

これと併せて、増幅器設計のためのシミュレーションコードの開発と高精度化を実施し、励起光の吸収分布、レーザー媒質の温度分布・熱歪み分布、ビーム伝播中のレーザー波面について、実験結果を用いてベンチマーキングを行った。また、高繰返し

動作時の反転分布、パルス増幅についてのシミュレーションコード開発は完了しており、今後実験結果と比較しながら高精度化を実施する。

集積化試作機は実用機の 1/2 スケールであり、これをそのまま 2 倍の大きさに拡張して 1.5kW を達成するか、あるいは後段の波長変換結晶の熱負荷低減を考慮して、ブースター増幅器を 2 台並列 (750W×2 台) とするかは、今年度後半の研究進捗状況を見てどちらかを選択する。

#### 2.7.7 知的財産権及び成果の普及

実施計画書は、本プロジェクトが開始される以前の特許に基づいて立案されている。特に、薄型ディスク増幅器やコンポジット型ジグザグスラブ (図Ⅲ-2.7.2 の写真のセラミック構造) の特許ならびに知見が活用されている。また、ブースター増幅器の冷却性能の向上手法に関して、特許出願に向けて明細書作成の最終段階にある。

成果の波及については、コンパクトな増幅器から 1.5kW のレーザー出力が得られれば、高繰り返し高出力レーザーの加工を含む産業応用への展開が加速されると期待される。

## 2.8 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」

「(2) アニール用ブースター増幅技術の開発」

(大阪大学レーザー研、ALPROT（浜松ホトニクス、アルバック）)

### 2.8.1 事業の背景・意義（目的・概要）

低温ポリシリコン TFT を用いた液晶(LCD)や有機発光ダイオード (OLED) は、高精細、高画質（優れた諧調性、高速応答性）なフラットパネルディスプレイ (FPD)として注目されている。この低温ポリシリコン TFT の製造を支える重要な工程の一つがレーザーアニールであり、現状ではエキシマレーザーアニール装置により生産が行われている。エキシマレーザーアニール装置は、レーザー発振管・光学部品の活性ガスによる損傷と活性ガス純度の劣化があり、日常的なメンテナンスが必要不可欠であり、ランニングコスト増にもなっている。このため、動作が安定で、取扱いが容易な高出力固体グリーンレーザー装置の開発が求められている。また、高エネルギーレーザーにより生成できるワイドビームで継ぎ目のない大型 FPD 用高品位アニールプロセスが可能となる。超ワイドビームによる大型 FPD 用アニールレーザープロセスが今後の FPD 市場の発展に寄与すると期待されており、高エネルギー・高平均出力のパルスグリーンレーザーの開発が必要不可欠である。

従来の技術であるエキシマレーザーアニールとの比較を表Ⅲ-2.8.1 に示す。プロセスウィンドウが広いというメリットがある上、繰り返し周波数が高くラインビーム長もさらに伸ばしたアニールプロセスが可能であるためスループットを向上させることが出来る。高品質アニールプロセスかつ、メンテナンス時間の大幅削減ができる。

表Ⅲ-2.8.1 エキシマレーザーアニールとグリーンレーザーアニールの比較

項目	エキシマレーザー XeCl	本開発 YAG2 $\omega$
波長	308nm	532nm
プロセスウィンドウ *エネルギー密度と移動度の関係 (FWHM)	0.35~0.5J/cm <sup>2</sup> → $\Delta$ 0.15J/cm <sup>2</sup>	0.55~0.95J/cm <sup>2</sup> → $\Delta$ 0.4J/cm <sup>2</sup>
繰り返し周波数	300Hz	1kHz
ラインビーム長	450mm	$\geq$ 500mm

第5世代の最大 1150mm×1300mm の基板を均一に少ないスキャン回数でアニールすることができる光源であり、十分な加工性能を発揮できるレーザー出力特性である。本開発によるレーザー装置はポリシリコン生成の均質化や加工速度向上に貢献でき、今後さらなるパネルサイズの拡大に向けて基礎となる評価データが取得できる。

### 2.8.2 研究開発目標と根拠

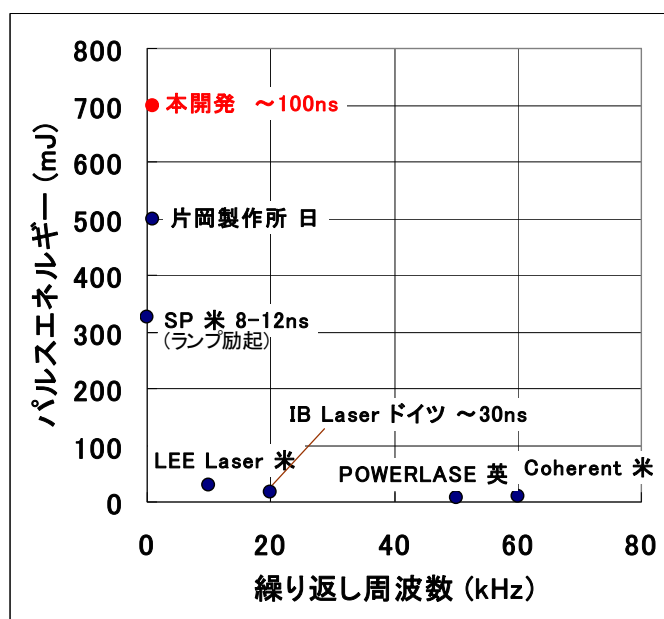
アニールプロセス用にグリーンレーザーによるアニール効果が確認されており、高エネルギー・高平均出力のレーザー装置が要望されている。グリーンレーザーを発生させるために、波長 1 $\mu$ m 帯の基本波レーザーを波長変換することで高出力グリーンレーザーを発生させる。所望の

加工性能を得るためには波長  $1\mu\text{m}$  帯、平均出力  $200\text{W}\sim 700\text{W}$ 、繰り返し周波数  $1\sim 150\text{kHz}$  のうち最適周波数（後に  $1\text{kHz}$  と決定）、パルス幅  $0.5\text{ns}\sim 200\text{ns}$  のうち最適パルス幅（後に  $70\sim 100\text{ns}$  と決定）が必要であり、これを中間目標とした。研究開発目標と設定根拠を表Ⅲ-2.8.2 に示す。

表Ⅲ-2.8.2 研究開発目標と設定根拠

項目	中間目標	設定根拠
波長	$1\mu\text{m}$ 帯(基本波)	グリーン光(波長 $532\text{nm}$ )によるアニーリングが効果的に作用することから、高出力グリーン光を発生させるために基本波を $1\mu\text{m}$ 帯とした
平均出力	$200\sim 700\text{W}$	グリーン光で $140\text{W}$ を得るために必要な基本波出力
繰り返し周波数	$1\sim 150\text{kHz}$ のうち最適周波数	実用性の高い加工速度を得るために必要な繰り返し周波数
パルス幅	$0.5\sim 200\text{ns}$ のうち最適パルス幅	十分なアニーリング効果を得るために必要とされるパルス幅

発生させたグリーンレーザー光を空間的に均一なラインビームに整形しアニーリングを行う。均一パターンを形成するためには光干渉効果が起こらないようにする必要があり、空間横モードマルチ、無偏光を特徴とするレーザー光にする必要があり、これらに留意したレーザー装置開発を行う。図Ⅲ-2.8.1 に市販のレーザー装置を比較したグラフを示す。繰り返し周波数が数  $\text{kHz}$  程度で高エネルギー出力のレーザー装置は少なく、本開発は世界的にもトップレベルの全固体レーザー装置の開発となる。



図Ⅲ-2.8.1 市販レーザー装置の比較

### 2.8.3 研究開発スケジュール

アニーリング用レーザーの研究開発スケジュールを表Ⅲ-2.8.3に示す。

開発初期にレーザーの基本仕様となるレーザー波長、最適な繰り返し周波数、最適なパルス幅を決定し、基本仕様を満足した状態で200～700Wのレーザー出力を達成させる。基本波出力を達成した後に2.9節に示す波長変換モジュールにより波長変換しグリーン出力を得る。最終的に高出力グリーン光を2.15節で示すホモジナイズワイドビーム成形をしてアニーリング加工評価を実施し、加工システムに付随するビーム成形技術に反映させる。

表Ⅲ-2.8.3 アニーリング用レーザー開発スケジュール

項目	2010	2011	2012	2013	2014	最終目標値
波長						1 μm 帯(基本波)
平均出力						200～700W
繰り返し周波数						1～150kHz のうち最適繰り返し周波数
パルス幅						0.5ns～200ns のうち最適パルス幅
変換効率						≥20% (基本波入力 700W)

### 2.8.4 研究開発目標と達成状況

研究開発目標と達成状況を表Ⅲ-2.8.4に示す。繰り返し周波数は1～150kHzのうち最適周波数、パルス幅は0.5ns～200nsのうち最適なパルス幅としているが、予備実験により繰り返し周波数1kHz、パルス幅70ns～100nsがアニーリング加工に適しているため、これを目標として開発を行った。レーザー波長1.064 μm、繰り返し周波数1kHz、パルス幅105nsにおいてレーザー出力560Wを達成した。中間目標である200～700Wの出力は十分得られており、さらに用意しているブースター増幅器により700Wを達成出来る見通しが立った。

表Ⅲ-2.8.4 研究開発項目と達成状況

項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
波長	1 μm 帯(基本波)	1.064 μm	○	最終段の増幅器を駆動し、さらに出力を向上させる
平均出力	200～700W	560W		
繰り返し周波数	1～150kHz のうち最適周波数	1kHz		
パルス幅	0.5～200ns のうち最適パルス幅	105ns		

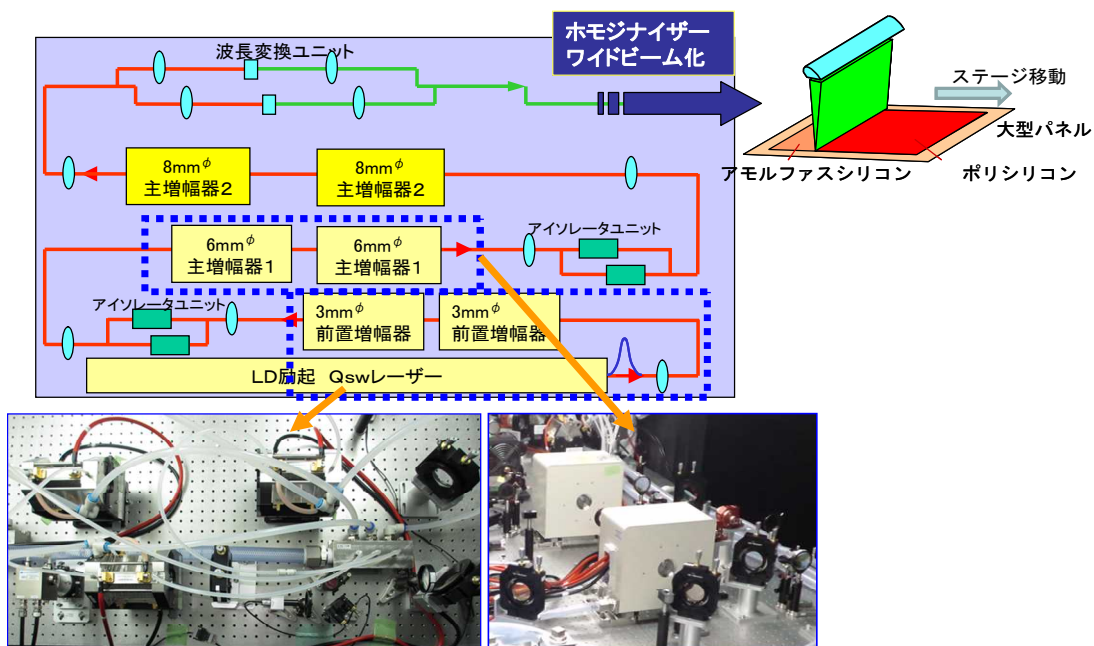
◎大幅達成、○達成、△今年度中に達成見込み、×未達

## 2.8.5 成果の詳細

種光となる発振器と数台の増幅器からなる多段増幅方式により高エネルギーを発生させ、得られた高出力基本波を波長変換することでアニーリングに必要なグリーンレーザー出力を得る。出力エネルギーの増大は増幅器の追加で達成可能であり、パルス幅や繰り返し周波数を可変することも可能である。増幅器の追加で問題となるのが寄生発振の抑制及び熱レンズ効果や熱複屈折によるレーザー光の波面歪みやバイフォーカスの連続が起因する空間モードの変化である。

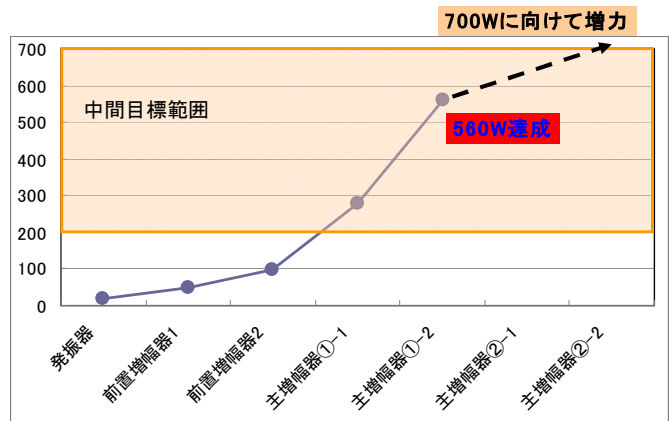
キーコンポーネントとなるレーザーヘッド（発振器、前置増幅器、主増幅器）の励起分布、熱レンズ焦点距離、小信号利得を測定し、その特性を基に多段増幅レーザーシステムを構築した。種光となる発振器ではパルス幅 100ns を得るために長共振器を構築し、出力 19W (19mJ×1kHz) でパルス幅 105ns が得られた。またビーム品質  $M^2$  値は 15 前後が得られているのを確認した。光干渉しにくくかつ加工時の集光性能を得るには十分な特性である。この種光を増幅し 2 台の前置増幅器で 90W まで増力し、次の 2 台の主増幅器 1 で 560W の出力が得られた。光学配置、伝搬ビーム径の最適化を行うことで、予備実験で得られていた 350W の出力より大幅にレーザー出力が向上した。

アニーリング用レーザーの配置図を図Ⅲ-2.8.2 に示す。また、レーザー増幅器毎のレーザー出力結果を図Ⅲ-2.8.3 に示す。



図Ⅲ-2.8.2 アニーリング用レーザー配置図及びレーザーヘッド部

波長  $1.064 \mu\text{m}$ 、繰り返し周波数 1kHz、パルス幅 105ns での増幅結果であり、主増幅器①後で 560W を達成した。パルス幅は増幅後のナローイング等の影響も無く 105ns であった。中間目標である 200～700W は達成しており、最終段の 2 台の主増幅器②により最大出力目標である 700W を達成させ、波長変換試験を行う。波長変換も含め年度内に達成可能であり、Ⅲ-2.15 節で実施しているビーム成形技術との連携により加工評価実験までの目処が立った。



図Ⅲ-2.8.3 レーザー増幅器毎のレーザー出力結果



## 82.9 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(3) 高出力波長変換技術の開発」

#### 「1) 波長変換モジュール化技術の開発」

##### 「アニーリング用レーザーの波長変換モジュール」

(大阪大学レーザー研、ALPROT (浜松ホトニクス、アルバック) )

### 2.9.1 事業の背景・意義 (目的・概要)

FPDの大型化に伴い、アモルファスシリコンのポリシリコン化が重要になる。そのためにはアニーリングレーザーによる表面改質が有効であり、パルスグリーンレーザーでの均一照射が必要である。高出力のグリーンレーザーを得るためには $1\mu\text{m}$ 帯のレーザー光を波長変換結晶に通して二倍高調波を発生させる方法が適切である。パルス幅が $100\text{ns}$ 程度のため一般的な光学素子の損傷閾値である $10\text{J}/\text{cm}^2$ に集光しても強度が $100\text{MW}/\text{cm}^2$ 程度にしかならない。波長変換効率はレーザー強度の自乗に比例して向上するため十分な波長変換効率が得られない。また、マルチモードであることも起因して波長変換効率は低い。また、光損傷閾値近傍のレーザー強度を入射させる設計をすると長時間の使用で波長変換結晶が損傷するため実用化には向かない。そのために高出力レーザーの波長変換効率の向上は重要な課題となっている。

### 2.9.2 研究開発目標と根拠

アニーリング用波長変換モジュールの研究開発目標と設定根拠を表III-2.9.1に示す。グリーン光はアニーリングが効果的に作用することから選択肢の一つとして選定されており、メンテナンスフリーで高出力レーザーを発生させるために半導体励起固体レーザーでかつ実績が多いNd:YAGレーザー(波長 $1.064\mu\text{m}$ )の2倍高調波発生(Second Harmonic Generation:SHG)(波長 $0.532\mu\text{m}$ )が適している。レーザーシステムは従来技術を使うことで早期に加工評価に結びつけることができ、実用化の近道と考えられる。

表III-2.9.1 研究開発目標と設定根拠

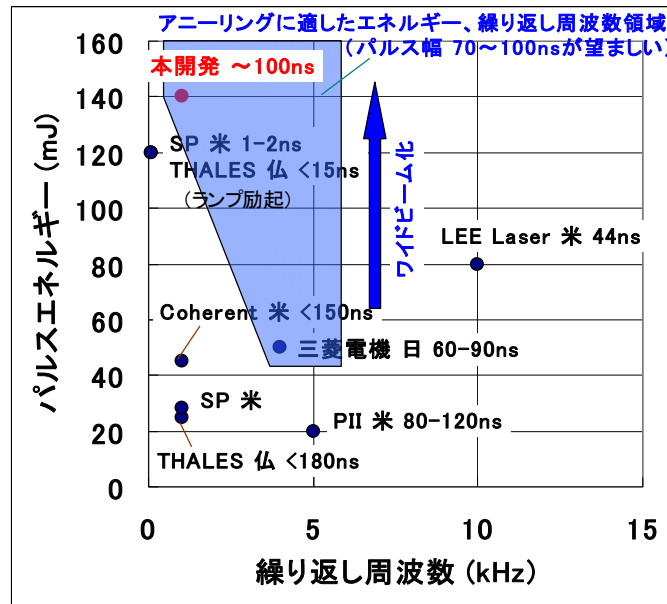
項目	中間目標	設定根拠
変換効率	$\geq 20\%$ (基本波入力 $700\text{W}$ )	$500\text{mm}$ のワイドビームによりアニーリングを達成するには $140\text{mJ}$ ( $140\text{W}/1\text{kHz}$ )のパルスエネルギーが必要であり、予備実験で得られた限界値近くの効率を基に決定

アニーリング用レーザー装置としてターゲットにしている加工方法が $500\text{mm}$ のラインビームによるアニーリングであり、必要とされるレーザー出力はグリーン光において $140\text{W}$ ( $140\text{mJ}\times 1\text{kHz}$ )である。この出力を達成するためには波長変換効率を上げることが重要であり、目標を波長変換効率 $20\%$ 以上として開発を行う。アニーリングとして必要な $140\text{W}$ のレーザー出力を得るには、基本波出力を $700\text{W}$ として波長変換効率 $20\%$ 以上で達成できる。また、レーザーのパルス幅は $70\text{ns}\sim 100\text{ns}$ が適しており、 $100\text{ns}$ 程度を目標として開発を行う。 $20\%$ の波長変換効率は $100\text{ns}$ のロングパルスでは限界性能に近く、光損傷回避を考慮したモジュール化技術が必要となる。

市販の高出力固体グリーンレーザー装置の比較を図III-2.9.1に示す。

アニーリングに適したパルス幅( $70\text{ns}\sim 100\text{ns}$ )でかつ繰り返し周波数が数kHzの高エネルギーレ

レーザー装置は世界的に見ても市販されておらず、開発目標の一つである 500mm のワイドビームに対応させるエネルギー(140mJ)は世界トップレベルの開発目標といえる。500mm のワイドビームは 40 インチクラスの液晶テレビ用 FPD を 1 回のスキャンでアニーリング出来るため、継ぎ目等で発生するムラが無い高品質な加工が可能である。140mJ の出力エネルギーでは、55 インチ以上の FPD のアニーリングにも適用出来る出力を要しており、700mm 超のワイドビーム化の準備も進んでいる。



図Ⅲ-2.9.1 市販のグリーンレーザー装置比較

### 2.9.3 研究開発スケジュール

アニーリング用波長変換モジュール開発スケジュールを表Ⅲ-2.9.2 に示す。

基本波 1.064  $\mu\text{m}$  で 700W 出力のレーザーを発生させ、波長実験を行う。初期の段階で予備実験をしており、360W の出力ではパルス幅 90ns で波長変換効率 20%以上が得られており、700W 基本波入力用波長変換モジュールの開発を進めている。

波長変換実験で目標を達成出来る目処は立っており、年度内にアニーリング用レーザーとして完成させ、Ⅲ-2.15 節に示しているホモジナイズワイドビーム光学系と連携させて加工評価試験を行う。

表Ⅲ-2.9.2 アニーリング用波長変換モジュール開発スケジュール

項目	2010	2011	2012	2013	2014	最終目標値
波長	●					1 $\mu\text{m}$ 帯(基本波)
平均出力		▲	●			200~700W
繰り返し周波数		●				1~150kHz のうち最適繰り返し周波数
パルス幅		▲	●			0.5ns~200ns のうち最適パルス幅
変換効率		▲	●	.....		$\geq 20\%$ (基本波入力 700W)

## 2.9.4 研究開発目標と達成状況

表Ⅲ-2.9.3 にアニーリング用波長変換モジュールの研究開発目標と達成状況を示す。

予備実験では 360W(350mJ×1kHz)の基本波レーザー光を波長変換することで 90W 以上の出力（波長変換効率 $\geq 20\%$ ）を得ている。このときパルス幅は 90ns であり良好な結果が得られている。さらに高エネルギーの波長変換では波長変換結晶内の温度分布が起因して波長変換効率を低下させることも考えられ、波長変換の角度許容幅や温度許容幅による変換効率低下を極力抑えるようにする必要がある。そのため、発散角を出来るだけ抑制するように光路設計を行うことが重要である。

予備実験で得られたデータを基に波長変換素子への入射レーザー強度を決めており、同等の波長変換効率を得られる見通しである。温度分布は抑制する必要がある一方で、入射ビーム径が大きくなるため発散角は抑えることができ、波長変換効率に有利な点もあり、バランスを考慮して配置することで目標達成が可能である。アニーリング用レーザーの開発に於いて 700W 基本波のレーザー出力を達成した後、波長変換試験が行えるように準備を進めており、平成 24 年 8 月中には目標達成見込みである。

表Ⅲ-2.9.3 研究開発目標と達成状況

項目	目標	成果	達成度	今後の課題
変換効率	$\geq 20\%$ (700W 基本波から)	$\geq 20\%$ (360W 基本波から)	△	(平成 24 年 8 月 達成予定)

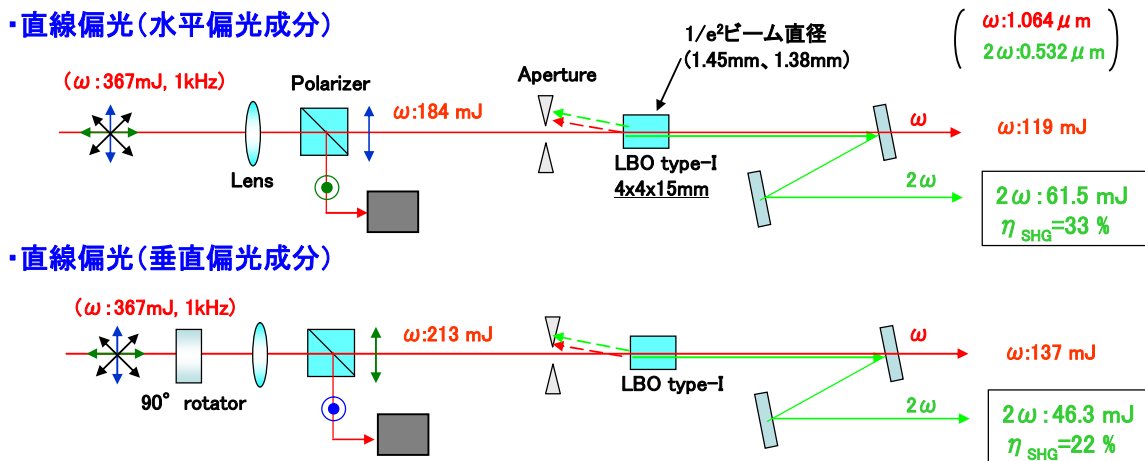
◎ 大幅達成、○達成、△今年度中に達成見込み、×未達

## 2.9.5 成果の詳細

必要とされるグリーン光のエネルギーが 140mJ であるため、光損傷回避するためにはビーム径を大きくする必要があり、バルク型結晶を採用する。また、一般的な波長変換結晶の中で比較的波長変換効率（電気光学定数）が高くレーザー耐力の高い LBO 結晶を波長変換結晶として選定し、波長変換モジュールの開発を行った。

波長変換の予備実験として 360W の基本波(1.064 $\mu\text{m}$ )をマルチモード、無偏向、パルス幅 90ns、繰り返し周波数 1kHz で発生させ、波長変換試験を行った。結晶の切り出し角度により大きく分けてタイプ I やタイプ II と呼ばれる変換方法がある。図Ⅲ-2.9.2 に LBO タイプ I を使った波長変換の予備実験の配置図を示す。ランダム偏光のレーザー光からポラライザーを使って水平偏光成分を取り出し波長変換を行った。基本波入射エネルギー184mJ に対してグリーン光は 61.5mJ が得られた。また、偏光を 90 度回転させる 90 度ローテータを配置することで垂直偏光成分を水平偏光成分に変換し、同じ実験系により波長変換を行ったところ、基本波入射エネルギー213mJ に対してグリーン光で 46.3mJ が得られた。タイプ I では 20%~30%の波長変換効率を得られた。最大の変換効率を得たのは集光フルーエンスが約 10J/cm<sup>2</sup> の場合であり、光損傷閾値近傍で得られたデータである。またタイプ II では波長変換効率が 17%程度であり、タイプ I に比べて十分な効率は得られなかった。波長変換効率を示す光学定数においても LBO 結晶の場合はタイプ I の方が 20%程度高い数値であり、700W のレーザー光を波長変換するための波長変換モジュールではタイプ I の LBO 結晶を使用することとした。また、結晶表面にある無反射コートの光損傷閾値が低いため、コーティング無しの

LBO 結晶により波長変換試験を行う。



図III-2.9.2 LBO タイプ I による波長変換予備実験配置図

ロングパルスで高効率の波長変換を達成することで、さらなる出力増強が必要となった場合にも MOPA システムによる基本波レーザー出力を向上させるだけで、グリーン光出力を増加させることができるメリットがある。また、波長変換結晶に光損傷が起こっても、簡易に波長変換素子を取り替えることができる構造になっており、メンテナンス性も考慮している。さらなるワイドビーム化の準備も進んでおり、グリーン光出力増大には欠かせない波長変換モジュールである。また、高効率で波長変換を達成することはシステム全体の効率を上げることにもつながり、低コスト化に直接繋がる。実用化には高い波長変換効率を維持したまま、光損傷を起こしにくくすることが重要課題である。消耗品のように波長変換素子を交換していたこれまでの加工システムとは違い、信頼性の高い波長変換モジュールを提供するために高エネルギー、高繰り返し周波数のレーザー光により波長変換の評価・検証を重ね実用化に繋げることが重要である。

## 2.10 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(3) 高出力波長変換技術の開発」

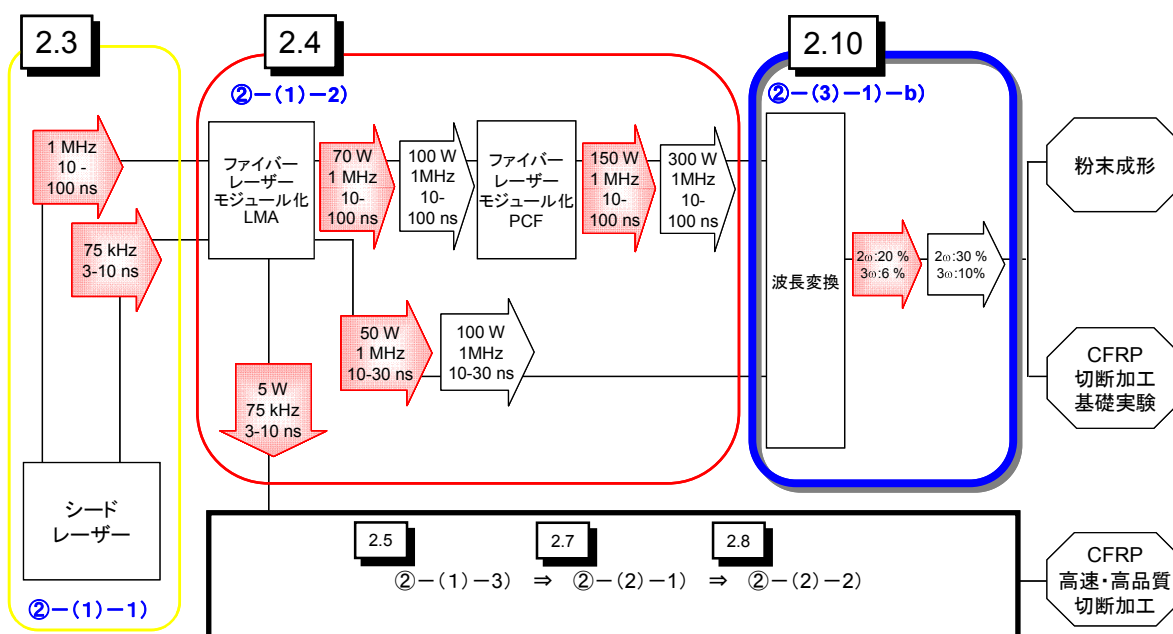
#### 「1) 波長変換モジュール化技術の開発

「ファイバーレーザーの波長変換モジュール」

(阪大接合研、古河電工、片岡製作所)

### 2.10.1 事業の背景・意義（目的・概要）

本研究開発では、図Ⅲ-2.10.1 に示したように、②-(1)-2) でモジュール化したファイバーレーザーを導入し、CFRP 切断に関する基礎技術開発を推進する。本基礎技術開発において、レーザー光の短波長化が要求されているので、高効率波長変換器を得るために波長変換モジュール化技術の開発を行う。



図Ⅲ-2.10.1 目的別に開発されるパルスファイバーレーザー開発目標：中間目標（矢印赤）と最終目標（矢印白）

### 2.10.2 研究開発目標と根拠

図Ⅲ-2.10.1 に示したように、ファイバーレーザーの基本波パルス光に対して、基本波から2倍高調波への変換効率：20%を中間目標としている。基本波の入りに伴う波長変換結晶の温度上昇を考慮すると、最終目標の変換効率30%を達成するには、中間段階で最低限この程度の変換効率が必要である。

また基本波から3倍高調波への変換効率：6%以上とする。基本波の高入力に伴う波長変換結晶の温度上昇を考慮すると、最終目標の変換効率10%を達成するには、中間段階で最低限この程度の変換効率が必要である。

### 2.10.3 研究開発スケジュール

今年度前半に、第2高調波への変換効率20%を達成し、後半に第3高調波への変換効率6%を達成する。

### 2.10.4 研究開発目標と達成状況

表 III-2.10.1 にファイバーレーザーの波長変換モジュール開発目標と達成状況を示す。

表 III-2.10.1 ファイバーレーザーの波長変換モジュール開発目標と達成状況

項目	中間目標値	成果	達成度
ファイバーレーザーの波長変換モジュール	2倍高調波:20% 3倍高調波:6%	2倍高調波:10%	△

### 2.10.5 成果の詳細

開発したファイバーレーザーを用いて、波長変換の基礎実験を行い、波長変換モジュール開発を進めた。その結果、現在、第2高調波で10%の変換効率を達成した。一方で、市販のNd:YAGレーザーを使用して当該波長変換モジュールの評価を行い、この時点で中間目標値の変換効率を達成した。この結果を受けて、ファイバーレーザーの、より高出力、短パルス化が必要なが分かった。また、波長変換の結晶について、国産の結晶が海外のメーカー品と比して同等以上の性能を有していることが分かった

### 2.10.6 最終目標の達成の見通し

開発したファイバーレーザーを用いて、波長変換の基礎実験を行い、波長変換モジュール開発を進めた。その結果、2倍高調波で10%の変換効率を達成した。一方で、市販のNd:YAGレーザーを使用して当該波長変換モジュールの評価を行った。その結果2倍高調波で43%、3倍高調波で9%の変換効率を達成した。表III-2.10-3に、実験に使用した市販のNd:YAGレーザーと本プロジェクトで開発するファイバーレーザーのスペックの違いをまとめた。表III-2.10-3からわかるように市販のNd:YAGレーザーは、他のレーザーに比べて最もレーザーピーク出力が高い。波長変換効率は、波長変換結晶内のレーザーピーク強度に依存する。そのため、市販のNd:YAGレーザーの場合と同様な波長変換効率を得るためには、結晶内のレーザー集光径を小さくすることにより実現できる。今後、波長変換効率増大のための集光光学系の最適化に取り組む。また、高効率波長変換には、結晶の品質の良否も関係してくる。使用したレーザーは、市販のNd:YAGレーザーである。結晶のメーカーによる品質の違いも、変換効率に関係してくることが分かった。また、この時良い成績を出した方の結晶は国産品であり、国産の結晶が海外のメーカー品と比して同等以上の性能を有していることが示された。

表Ⅲ-2.10-3 市販 Nd:YAG レーザー、CFRP 切断加工基礎実験用パルスファイバーレーザーおよび粉末成形用パルスファイバーレーザーの比較

	Nd:YAGレーザー	CFRP切断加工基礎実験用パルスファイバーレーザー	粉末成形用パルスファイバーレーザー
平均出力 (W)	23	50	150
パルス幅 (ns)	40	10	100
繰り返し周波数 (kHz)	10	1000	1000
ピーク出力 (W)	58000	5000	1500

#### 2.10.7 知的財産権 及び 成果の普及

成果の普及として、平成 23 年度は、16 件の研究発表・講演を行った。平成 24 年度については、3 件行っている。

## 2.11 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(3) 高出力波長変換技術の開発」

#### 「2) 波長変換の高効率化技術の開発」

(阪大レーザー研、ALPROT(レーザー総研))

※CFRP加工用レーザーの全体構成とその概要を「Ⅲ-6-1、2」頁に記載

### 2.11.1 事業の背景・意義（目的・概要）

高出力レーザーの高調波変換では、結晶がレーザー光を吸収し発熱する。このため結晶中でビーム断面内及び光軸方向に温度分布が発生し、空間的に位相整合条件が変化して変換効率が低下する。この問題を解決するために、結晶の周囲から熱を除去する必要があり、結晶の冷却方式および、波長変換スキームに関する研究開発を行う。

### 2.11.2 研究開発目標と根拠

最終目標とその根拠は以下の通りである。

最終目標

2倍高調波変換効率：40%以上（基本波入力 1.5kW）

3倍高調波変換効率：13%以上（基本波入力 1.5kW）

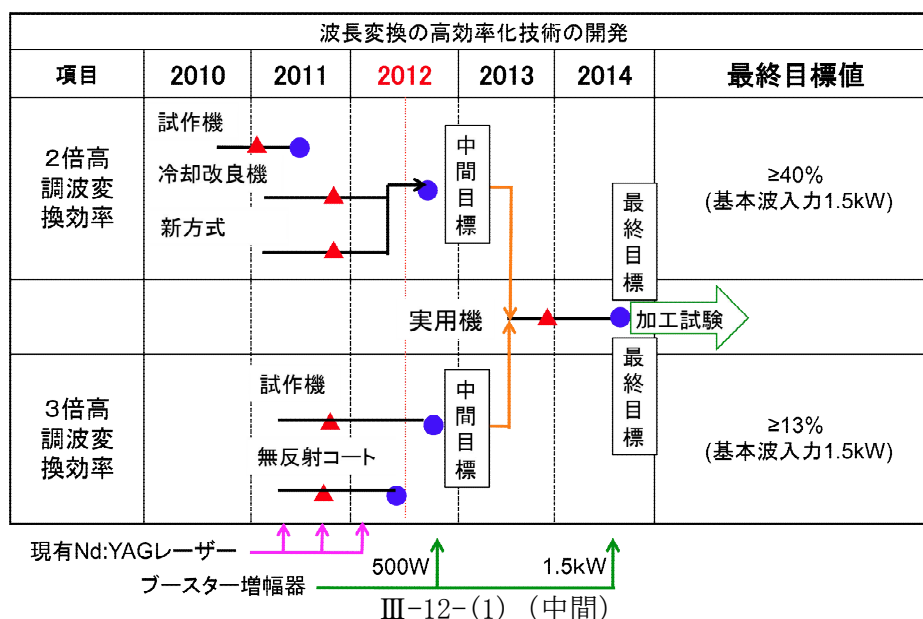
設定根拠

CFRP 切断加工において短波長ほど加工品位が向上する観点から要請されたものである。なお、目標値は、波長 532nm の市販レーザーの最高性能(400W, 10kHz, 180ns,  $M^2 \approx 30$ )に比べて格段に高出力、短パルス(600W, 3-10ns)であり、波長 355nm の市販レーザーの最高性能(80W, 20kHz, 58ns)に比べても格段に高出力、短パルス(200W, 3-10ns)である。

### 2.11.3 研究開発スケジュール

表Ⅲ-2.11.1 に示すスケジュールで開発を進めている。

表Ⅲ-2.11.1 波長変換の高効率化技術の開発スケジュール





2倍高調波変換については、現有のNd:YAGレーザーを用いた試作機試験のデータに基づいて吸収の少ない結晶を選択するとともに冷却構造を改善し、基本波入力300W(中間目標500W入力)までの試験を完了している。また、さらなる冷却効率の改善を目指して、結晶配置の改良および新方式の波長変換の予備試験も昨年度に完了している。今後、ブースター増幅器との組み合わせ試験に入る。一方、3倍高調波変換については、同じく吸収の少ない結晶の選択と冷却構造の改善を行い、基本波入力160W(中間目標500W入力)までの試験を完了している。

今年度後半には、ブースター増幅器から供給される500W基本波を用いて波長変換試験を行い、中間目標を達成する。また、最終年度には1.5kW基本波入力において最終目標を達成する。

#### 2.11.4 研究開発目標と達成状況

2倍高調波変換については、中間目標(基本波入力>500Wにおいて変換効率>20%以上、すなわち平均出力>100W)に対して、基本波入力300Wにおいて変換効率65%(平均出力200W)を達成している。結晶における光吸収係数は短波長ほど大きいため、吸収による発熱パワーとしては、中間目標の2倍の試験を完了したことと等価である。従って、基本波入力>500Wにおいて確実に中間目標を達成できる。

3倍高調波変換については、中間目標(基本波入力>500Wにおいて変換効率>6%以上、すなわち平均出力>30W)に対して、基本波入力160Wにおいて変換効率43%(平均出力65W)を達成している。3倍高調波変換用結晶における吸収による発熱パワーについても(光吸収係数は3倍高調波でもっとも大きい)、中間目標の2倍の試験を完了したことと等価である。従って、基本波入力>500Wにおいて確実に中間目標を達成できる。

現在、これらの波長変換試験は現有のNd:YAGレーザーを用いて行っているが、今年度後半にはブースター増幅器との組み合わせ試験に移行する。

表III-2.11.2 波長変換の高効率化技術の達成状況

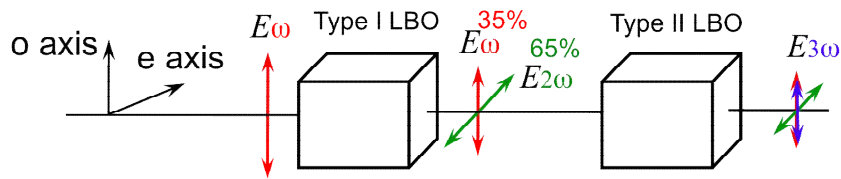
波長変換の高効率化技術の開発				
項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
1) 2倍高調波変換効率	20%以上 基本波入力 500W、75kHz	65% 基本波入力 300W、10kHz	△ (H25年3月 達成予定)	500W熱負荷 高繰返し動作
2) 3倍高調波変換効率	6%以上 基本波入力 500W、75kHz	43% 基本波入力 150W、10kHz	△ (H25年3月 達成予定)	500W熱負荷 高繰返し動作

#### 2.11.5 成果の詳細

##### (1) 波長変換結晶の構成

図III-2.11.1に波長変換結晶の構成を示す。用いる結晶はLBOであり、2倍高調波変換用はType I、3倍高調波変換用はType IIとし、シリーズに配置する。この配置において、2倍高調波変換用結晶には常光線の基本波を入射し、2倍高調波出力は異常光線である。この直交2偏光を3倍高調波変換用結晶に入射して、異常光線の3倍高調波を発生さ

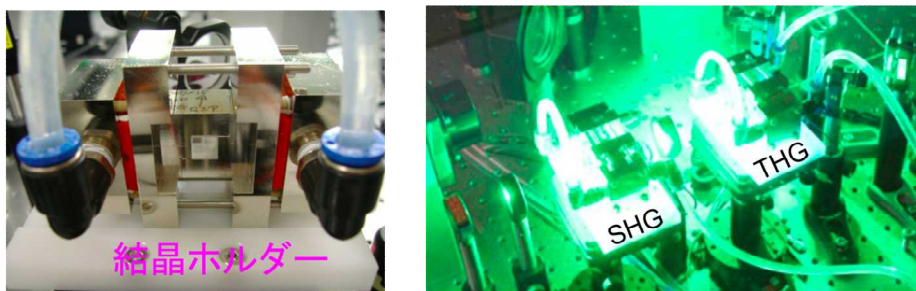
せる。3倍高調波変換では、基本波の光子1個と2倍高調波の光子1個から3倍高調波の光子1個が発生する。したがって、3倍高調波変換の効率を高くするには、基本波と2倍高調波のパワー比が1:2、すなわち2倍高調波変換効率としては約60%であることが理想的である。



図Ⅲ-2.11.1 波長変換結晶の構成と偏光の組み合わせ

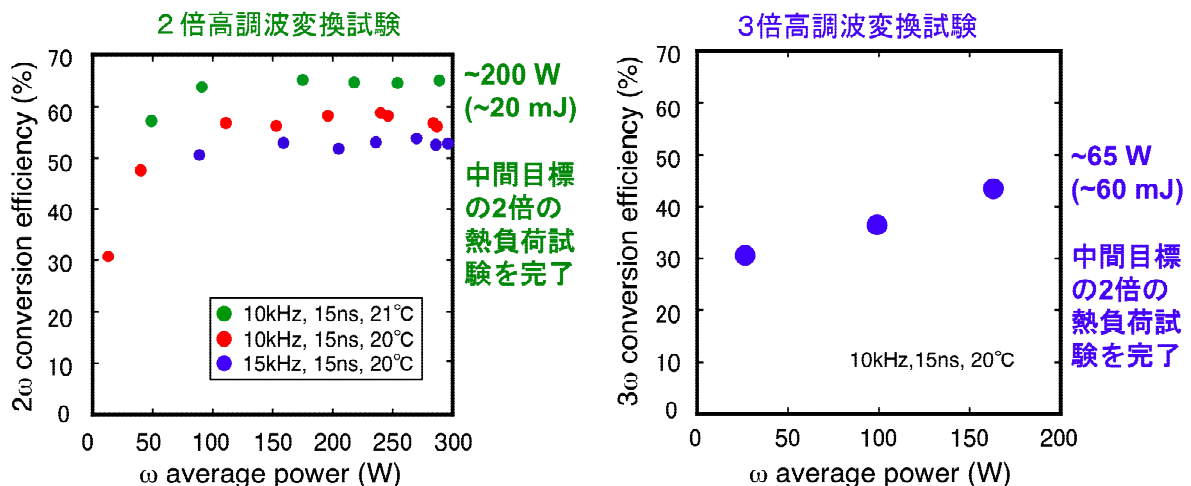
(2) 中間評価に比べて2倍の熱負荷での高効率波長変換試験

まず、予備試験を行い、その結果に基づいてより吸収の少ない結晶を選択するとともに、冷却構造の改良を行った。結晶ホルダーと冷却構造、及び波長変換の様子を図Ⅲ-2.11.2に示す。結晶は左右からペルチェ冷却し、2次冷却は水冷である。



図Ⅲ-2.11.2 結晶ホルダー(左)と波長変換の様子(右)

2倍高調波変換及び3倍高調波変換の試験結果を図Ⅲ-2.11.3に示す。2倍高調波変換においては、理想的な変換効率>60%を基本波入力300Wで実証し、中間目標(2倍高調波出力100W)の2倍の熱負荷試験を完了した。同様に3倍高調波変換を行い、これについても中間目標(3倍高調波出力30W)の2倍の熱負荷試験を完了した。これらの結果から、基本波入力500Wにおいて、各々の中間目標20%と6%の達成は確実であると結論できる。

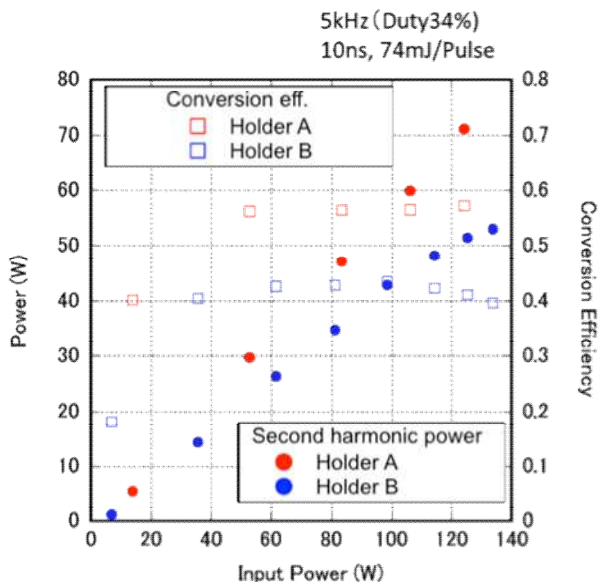


図Ⅲ-2.11.3 2倍高調波変換(左)及び3倍高調波変換(右)の試験結果

(3) 結晶配置の改良による温度勾配の発生を抑制

図Ⅲ-2.11.4に結晶ホルダの構造を示す。図Ⅲ-2.11.5に2倍高調波変換の結果を示す。改良前の結晶配置（ホルダB）の場合は、変換効率が40%台にとどまっておき、熱の影響により変換効率が低下していく（図中の●□プロット点）。一方、改良型結晶配置（ホルダA）では、約60%の変換効率が観測されており、入力パワーの増加に伴う熱の影響がみられていない（図中の●□プロット点）。これらの結果から、結晶ホルダ内での結晶配置の最適化によって、発熱による変換効率の低下を抑制できることが分かった。

非公開



図Ⅲ-2.11.5 2倍高調波変換結果

図Ⅲ-2.11.4 改良型結晶ホルダ

(4) 新方式の2倍高調波変換

2倍高調波変換に関する新しい手法を試験した。図Ⅲ-2.11.6、7に結晶の概要と実際の結晶加工の設計例を示す。

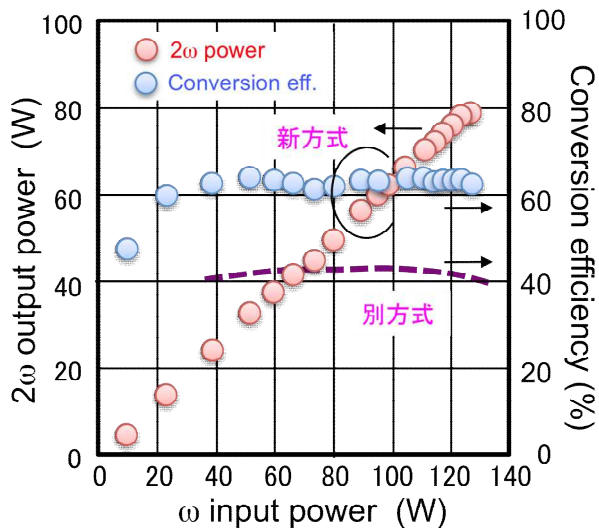
非公開

図Ⅲ-2.11.6 新方式の概念図

非公開

図Ⅲ-2.11.7 結晶加工の設計

非公開



図Ⅲ-2.11.8 新方式波長変換の実験

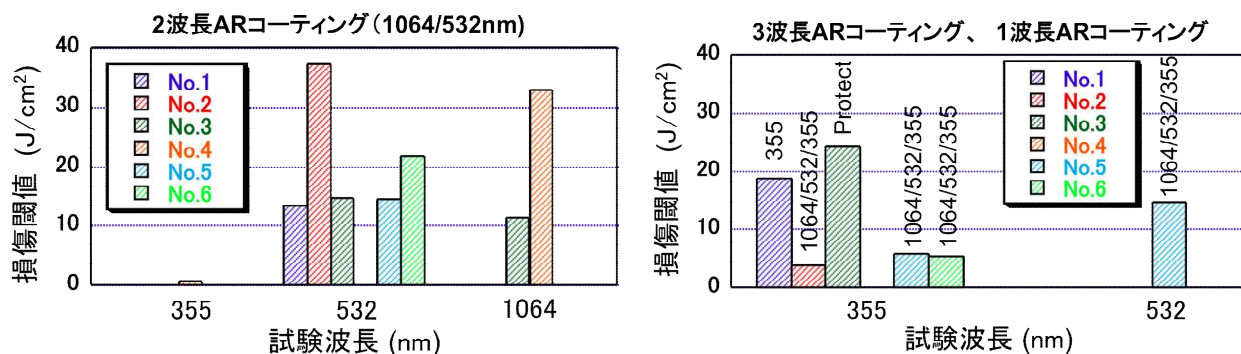
図Ⅲ-2.11.9 新方式での波長変換の結果

図Ⅲ-2.11.8 に実験装置の写真を示す。図Ⅲ-2.11.9 に新方式の結晶を使って 2 倍高調波の発生を行った結果を示す。5kHz、10ns、120W 入力に対して、2 倍高調波 80W、変換効率 65%を達成した。

(5) 高レーザー耐力無反射コーティング膜の検討

LBO 結晶上に国内メーカー製の無反射コートを実施し、それらのレーザー損傷閾値をパルス幅 10ns の条件で測定した。その結果を図Ⅲ-2.11.10 に示す。2 倍高調波変換用結晶の無反射コーティング、ならびに 2 倍高調波変換用結晶の入射側については、同図左に示すように十分な耐力の 2 波長（1064nm/532nm）無反射コーティングが入射可能である。

一方、3 倍高調波変換用結晶の出射側の無反射コーティングについては、3 波長（1064nm/532nm/355nm）の無反射コーティングの損傷閾値は 5J/cm<sup>2</sup>程度であった。安全係数を 2 倍に仮定すると 250MW/cm<sup>2</sup> のビーム強度となり、最終的に必要なパワー密度ぎりぎりとなることから 3 波長のコーティングでは難しい。これに対して、355nm 単独でのコーティングでは、19J/cm<sup>2</sup> という耐力が得られており十分に使用できる。



図Ⅲ-2.11.10 無反射コーティングの損傷閾値. 左：2 波長（1064nm/532nm）、右：3 波長（1064nm/532nm/355nm）及び 1 波長（355nm）コーティング.

2.11.6 最終目標の達成の見通し

(1) 2 倍高調波変換効率

基本波 300W 入力に対して 60%以上の変換を達成しており、このときの 2 倍高調波出力は 200W である。したがって、1.5kW を偏光分離して 750W×2 ビームとした場合の 2 倍高調波出力は 300W であり、現在の冷却手法に格段の改善を必要としない。また、ごく最近の試験では、基本波 420W 入力時に 240W の 2 倍高調波出力（変換効率 57%）を得ており、2 倍高調波吸収による熱負荷が最終目標の条件と同程度まで高い変換効率を保持できることを確認している。したがって、現在の冷却手法と偏光合成技術の併用により最終目標を十分に達成できる。

(2) 3 倍高調波変換効率

基本波 160W 入力に対して 43%の変換を達成しており、このときの 3 倍高調波出力は 65W であるとともに、変換効率の低下は観測されていない。したがって、1.5kW を偏光分離して 750W×2 ビームとした場合の 3 倍高調波出力は 100W であり、現在の冷却手法

に格段の改善を必要としないこと、及び2倍高調波の変換効率が最終目標よりも高くとれることが予測される。したがって、750W×2ビーム波長変換と偏光合成技術の併用により目標を十分に達成できると予測できる。

#### 2.11.7 知的財産権及び成果の普及

結晶冷却の構造や新方式のバウンス型光路の波長変換については、今後特許出願を検討する。これらの波長変換のノウハウについては、本プロジェクト内で必要に応じて共有するとともに、他の高平均出力波長変換が必要な分野でも大いに活用可能と期待される。

## 2.12 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(3) 高出力波長変換技術の開発」

#### 「3) 加工試験のための整備」

(阪大レーザー研)

※CFRP 加工用レーザーの全体構成とその概要を「Ⅲ-6-1、2」頁に記載

### 2.12.1 事業の背景・意義（目的・概要）

kW 級レーザーの開発と併行して、市販レーザーよりも高出力の基本波、2倍、3倍高調波を CFRP の切断加工実験に供給し、加工速度見積もりと最適レーザー条件（パルス幅、波長等）の探索に資する。

### 2.12.2 研究開発目標と根拠

市販レーザーよりも高出力であることを基準とし、基本波 100W、2倍高調波 50W、3倍高調波 30W を供給する。

### 2.12.3 研究開発スケジュール

阪大レーザー研の現有 Nd:YAG レーザーに機能を付加し、平成 23 年度第 2 四半期からレーザー供給を開始し、年度内に基本波、2倍高調波、3倍高調波の供給体制を順次整備する。

### 2.12.4 研究開発目標と達成状況

これまでに以下のレーザーを CFRP の切断加工実験に供給した。

波長	目標	供給実績
基本波（1064nm）	100W	100W（20, 30kHz, 10ns）
2倍高調波（532nm）	50W	50W（30kHz, 5-10ns）
基本波+2倍高調波	100W	100W（30kHz, 10ns）
3倍高調波（355nm）	30W	50W（30kHz, 2ns）

### 2.12.5 成果の詳細

平均出力 50-100W、パルス幅<10ns のレーザーによる CFRP の切断加工の本格的実験を行うことによって、1.5kW レーザーによる加工速度評価が可能となった。また、CFRP 厚さの最終目標の 2 倍（6mm）もレーザー切断可能であること、炭酸ガスレーザーや CW ファイバーレーザーに比べて反応層が大幅に軽減できること、加工品質の最終目標（<100μm）が達成可能であることを実証するなど、本プロジェクトにおける CFRP 加工の最終目標達成への見通しを得ることができた。（詳細は、Ⅲ-15 参照。）

### 2.12.6 最終目標の達成の見通し

該当しない。

2.12.7 知的財産権及び成果の普及  
該当しない。

## 2.13 研究開発項目③ 「多波長複合加工技術の開発」

### 「(1) 切断接合技術の開発」

#### 「① 複合材料高速切断接合システム技術の開発」

(技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所：ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学、産業技術総合研究所)

### 2.13.1 事業の背景・意義（目的・概要） (2.14.1 も含む)

本プロジェクトで開発するパルスファイバーレーザーの高出力化技術ならびに高品位化技術を実用的に有用な技術とするためには、加工機システムとして機能を統合させて最適化する必要がある。特に、先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現することによって、従来手法では困難であった精密加工のブレイクスルー技術として実用に耐える次世代レーザー加工技術を確立する。CFRP(炭素繊維強化複合材料)等の複合材料は、自動車・航空機等の輸送機器の抜本的軽量化技術として期待されている。しかしながら、異種難削材であることから、革新的な製造技術として高精度な切断・接合技術の開発が要望されており、さらに製品製造タクトタイムの大幅短縮化が喫緊の課題である。

本研究開発項目では、CFRPに代表される複合材料に対して自動車・航空機用途の基材を検討対象とし、高品位・高速のレーザー切断接合技術を開発する。具体的には、中型・小型部材を加工するための高速掃引リモート加工ヘッドの開発、自動車のフードやルーフ等の大型部材の加工を行う高速高精度制御加工ノズルの開発、ならびに、プロセス・評価技術の研究開発を行う。以上の研究開発から、低炭素社会の実現に向けた製品の軽量化・高強度化、高機能化に大きな期待が寄せられている先進材料の利活用促進に貢献する。特に、先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現することによって、従来手法では困難であった精密加工のブレイクスルー技術として実用に耐える次世代レーザー加工技術を確立する（スキームⅢ-2.13.1）。

#### 社会的背景

低炭素社会の実現に向けた  
製品の軽量化・高強度化、高機能化に大きな期待



自動車・航空機等の輸送機器の抜本的軽量化技術を開発  
する必要性

#### 事業の目的

異種難削材料の利活用促進に貢献するための革新的な切断・  
接合技術の開発および製品製造タクトタイムの大幅短縮化



自動車・航空機等の輸送機器の抜本的軽量化技術として期待  
されているCFRP(炭素繊維強化複合材料)等に対して、高品位・  
高速のレーザー切断・接合技術を開発



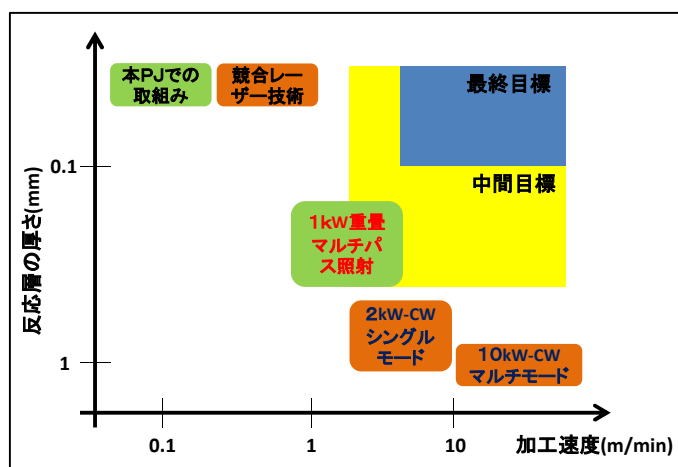
### 2.13.2 研究開発目標と根拠 (2.14.2 も含む)

本研究開発項目は、技術研究組合 次世代レーザー加工技術研究所(ALPROT)に所属する4組織によって実施され、研究開発を効果的に促進するために他の参画組織と連携して研究を行っている。研究項目の担当組織分担内容を以下に示す。また、研究開発目標と設定根拠については、ユーザーにとって魅力的な開発内容とすることに留意している(表Ⅲ-2.13.1、図Ⅲ-2.13.1)。

研究項目	(担当組織)
1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発	
・高速掃引リモート加工ヘッドの開発	(ミヤチテクノス)
・高速高精度制御加工ノズルの開発	(新日本工機)
2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発	
・多波長複合レーザー加工プロセスの最適化	(4組織の合同)
・レーザー加工に適したCFRP材料の構造最適化及び加工試料評価技術	(三菱化学、産総研)

表Ⅲ-2.13.1 研究開発目標と根拠

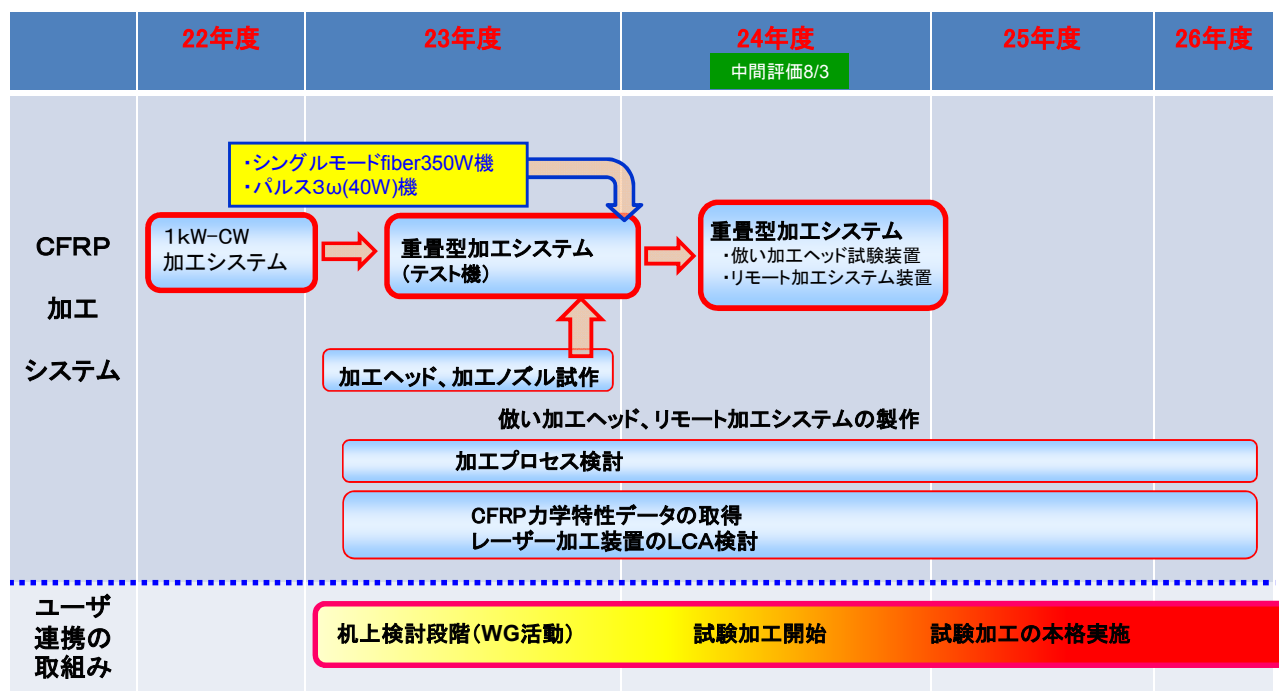
項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
加工速度	6 m/min以上	自動車製造時におけるフードやルーフ等の大型部材の加工を <b>タクトタイム1分以内</b> に完了させるため	2 m/min以上	開発するレーザー技術の適否判断材料として最終目標の1/3を設定
加工品位(切断)	反応層の厚み: 100 μm以下 引張強度: 10%未満の低減に抑制	加工時に発生する部材の熱損傷を定量的に評価するために設定、機械加工と比較した場合の加工時劣化を1割以内に抑制する(ユーザー企業からのリクエスト)	反応層の厚み: 500 μm以下 引張強度: 15%未満の低減に抑制	開発するレーザー技術の適否判断材料として最終目標の500%(反応層厚み)、150%(引張強度)を設定
加工品位(接合)	CFRPと金属板との接合において、凝集剥離で引張せん断強度100 MPa以上	実用的に求められている当該部材の接合強度の最高値を設定	引張せん断強度50 MPa以上(凝集剥離)	開発するレーザー技術の適否判断材料として最終目標の1/2を設定



図Ⅲ-2.13.1 CFRP 切断における所要スペック概要

### 2.13.3 研究開発スケジュール (2.14.3 も含む)

研究開発目標を達成するには、高出力レーザー装置に適用可能な照射システム技術ならびに加工プロセス・評価技術を構築することが重要である。さらに、波長  $1\omega + 3\omega$  および  $1\omega + 2\omega$  を対象とする2波長重畳技術の開発が高品位・高速加工の鍵技術になると考えている。したがって、光源開発と連携し、照射システム技術および加工プロセス・評価技術を並行して研究を行い、各々知見をフィードバックさせる。平成23年度末までに重畳型加工システム(テスト機)を完成させ、平成24年度に機能を更新させる。テスト機用の光源として、プロジェクト開発品のシングルモードファイバーレーザー機およびパルス  $3\omega$  レーザー機を導入している。本研究開発における特徴的な取組みとして、プロジェクト実施期間内におけるユーザー連携が挙げられる。一般にユーザー連携はプロジェクト終了後に実用化・事業化段階で行われることが過去多かったが、平成23年度から机上検討(委員会・ワーキング活動)を中心とするユーザー連携を既に実施している。平成24年度からは試験加工を実施することを計画しており、現在準備を進めている(図III-2.13.2)。



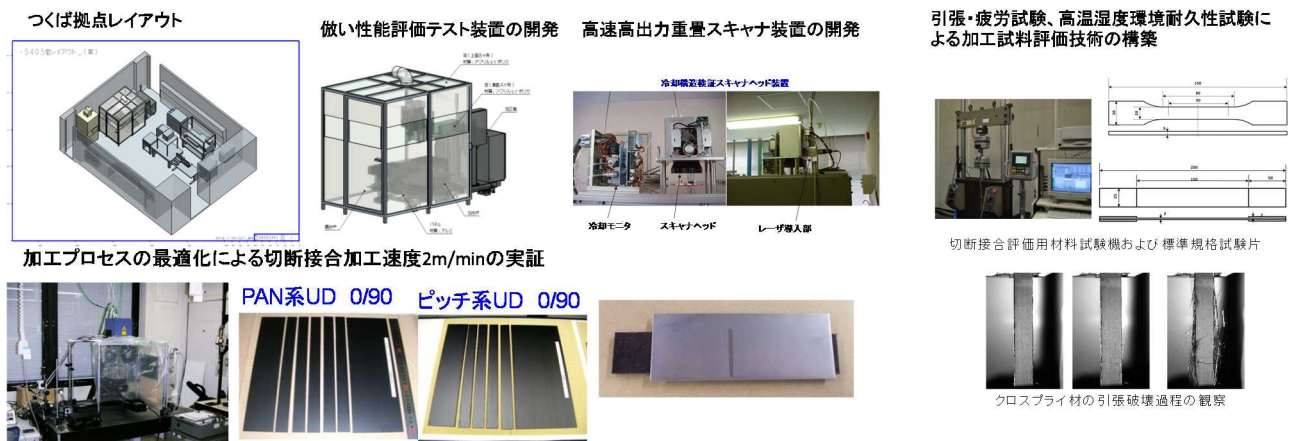
表III-2.13.2 開発スケジュール

## 2.13.4 研究開発目標の達成状況 (2.14.4 も含む)

図Ⅲ-2.13.2には「③-(1)切断接合技術の開発」における研究開発目標と達成状況を示す。現時点において、中間目標について一部達成、または、平成24年度末までに全て達成見込みの予定である。今年度中に達成見込みとなっている項目については、加工システムが現在も構築中であるために、性能向上を図りながら並行して検討を行っていることから現時点では未達状態となっている。

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

研究開発項目	評価項目と目標値	目標値		成果 CFRP系	成果 CFRTP系	達成度 CFRT系、CFRTP系
		中間目標	最終目標			
1) 切断加工技術の開発	切断加工速度	2m/min以上	6m/min	1.5m/min (1kW-CW)	2m/min (1kW-CW)	△、○ (H24年12月達成予定)
	反応層厚み	500 μm以下	100 μm以下	350 μm以下	300 μm以下	○、○
	引張強度	15%未満の低減	10%未満の低減	10%未満	20%未満	◎、△ (H24年12月達成予定)
2) 接合加工技術の開発	接合加工速度	2m/min以上	6m/min	要素技術見極め	要素技術見極め	△、△ (H25年2月達成予定)
	引張せん断強度	50MPa	100MPa	見通しあり	見通しあり	△、△ (H25年2月達成予定)

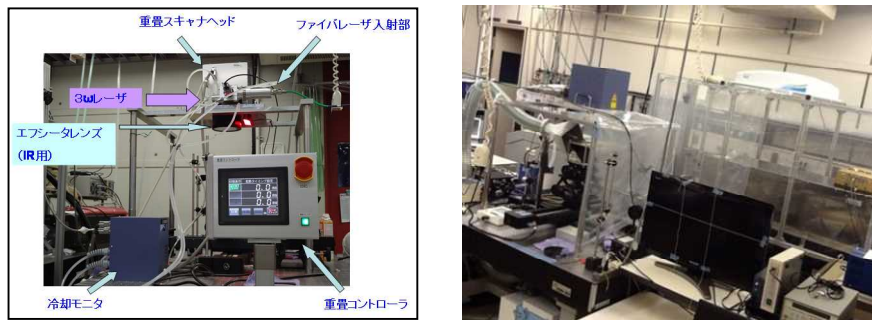


図Ⅲ-2.13.2 研究開発目標と達成状況

## 2.13.5 成果の詳細

### ○高速掃引リモート加工ヘッドの開発 (ALPROT：ミヤチテクノス株式会社)

複合レーザー照射によるリモート加工が可能な複合レーザー加工ヘッドの開発を目的として、高品位・高速加工を実現する複合レーザー照射によるリモート加工可能な複合レーザー加工ヘッド（スキャナー光学系）の設計を行い、基本波＋第三高調波、ならびに、基本波＋第二高調波を複合させる高速高出力重畳型スキャナ装置を製作した。基本波＋第三高調波については、冷却構造を最適化した。(図Ⅲ-2.13.3)。



図Ⅲ-2.13.3 高速掃引リモート加工ヘッドの開発

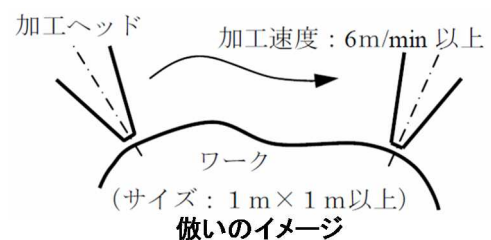
### ○高速高精度制御加工ノズルの開発 (ALPROT：新日本工機株式会社)

高速倣い技術を開発するための倣いセンサー評価システムを設計製作し、最適倣いシステムを構築するための基礎テストを実施した。並行して倣い性能を評価するテスト装置の開発を進め、平成23年度末に産総研内のつくば拠点に設置した。テスト結果を反映させた高速高精度制御の倣い加工ヘッドの設計・製作を現在行っており、可動部の軽量化と高剛性化を行った倣い加工ヘッドを用いた加工テストを平成24年度内に実施する。テスト機の外観図Ⅲ-2.13.5に、図Ⅲ-2.13.6に倣いのイメージを示す。(※高速倣い技術：ワークと加工ノズルのギャップを一定に保つ技術)

光学式センサーの単体評価テストを進めながら、CFRP切断中に発生するブルームと、これが光学式倣いセンサーに及ぼす影響等を調査した。現状、CFRP切断中に発生するブルームの強さが、光学式倣いセンサーの性能に大きく影響することが判明した。倣いセンサーとして、光学式センサー、他の方式のセンサー、または、他の制御方法についてその適否を鋭意検討中である(図Ⅲ-2.13.7)。



図Ⅲ-2.13.5 テスト機の外観



図Ⅲ-2.13.6 倣いのイメージ

六式数	MP-30	測定値 (mm)	MP-27	No. 1	No. 5	No. 9				
1		X=26.6 X'=45.3 Y=***		X=4.8 X'=15.5 Y=20.7		X=5.9 X'=14.6 Y=27.3		X=3.8 X'=15.1 Y=33.3		X=4.4 X'=18.4 Y=32.7
5		X=14.5 X'=49.2 Y=39.3 Y=***		X=6.4 X'=11.8 Y=19.4		X=4.8 X'=12.2 Y=13.0		X=4.4 X'=10.7 Y=13.0		X=3.8 X'=8.9 Y=12.7
10		X=8.7 X'=38.3 Y=21.3 Y=***		X=6.1 X'=10.6 Y=17.9		X=4.9 X'=13.4 Y=18.4		X=3.5 X'=8.4 Y=10.3		X=3.5 X'=7.3 Y=9.9 Y=10.7
15		X=11.4 X'=45.7 Y=22.9 Y=***		X=6.4 X'=11.3 Y=19.7		X=5.9 X'=17.6 Y=15.1		X=3.5 X'=8.6 Y=10.6		X=3.7 X'=8.3 Y=10.7 Y=14.2
20		X=9.0 X'=42.2 Y=16.2 Y=45.6		X=8.8 X'=11.3 Y=14.4 Y=23.3		X=4.5 X'=12.5 Y=14.6		X=3.8 X'=8.4 Y=13.2		X=3.9 X'=11.5 Y=10.8 Y=17.4
25		X=14.3 X'=45.8 Y=20.3 Y=46.7		X=6.4 X'=10.1 Y=14.6 Y=17.3		X=6.7 X'=10.1 Y=9.3 Y=16.5		X=3.4 X'=10.3 Y=15.4		X=3.2 X'=13.2 Y=10.4 Y=19.8
30		X=18.1 X'=49.4 Y=17.9 Y=41.3		X=4.4 X'=9.1 Y=10.0 Y=12.0		X=8.1 X'=13.9 Y=1.1 Y=19.1		X=3.5 X'=18.0 Y=0.9 Y=22.2		X=4.7 X'=18.9 Y=0.5 Y=29.0

図Ⅲ-2. 13. 7 CFRP 切断中に発生するブルーム形状観察

### 2. 13. 6 最終目標の達成の見通し

2. 14. 6 にまとめて記載。

### 2. 13. 7 知的財産権及び成果の普及

2. 14. 7 にまとめて記載。

## 2.14 研究開発項目③ 「多波長複合加工技術の開発」

「(1) 切断接合技術の開発」

「(2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発」

(技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所：ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学、産業技術総合研究所)

### 2.14.1 事業の背景・意義 (目的・概要)

2.13.1 にまとめて記載。

### 2.14.2 研究開発目標と根拠

2.13.2 にまとめて記載。

### 2.14.3 研究開発スケジュール

2.13.3 にまとめて記載。

### 2.14.4 研究開発目標と達成状況

2.13.4 にまとめて記載。

### 2.14.5 成果の詳細

○多波長複合レーザー加工プロセスの最適化 (ALPROT：ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学、産業技術総合研究所)

最先端の各種 CFRP 材を入手し、1kW 級加工システム試験機等を用いて CFRP 切断実験をつくば拠点にて実施した。加工プロセスにおける制御因子の抽出ならびにレーザーの諸特性 (波長、出力等) を変えたレーザー切断加工の比較対照試験を行った。具体的には、加工点のリアルタイム画像を高速ビデオカメラによって観測し、加工の進行状態と同時に、加工点の音響信号、反応光 (赤外光、可視光など) を収集するモニター技術の開発ならびに時間分解型分析法を駆使した加工プロセスのその場観察法を確立した。これらの情報を基に、加工反応や加工点からの信号を基に加工プロセスの概要を掌握し、加工プロセス条件の最適化ならびに加工高品位化の問題点抽出検討を進めている。

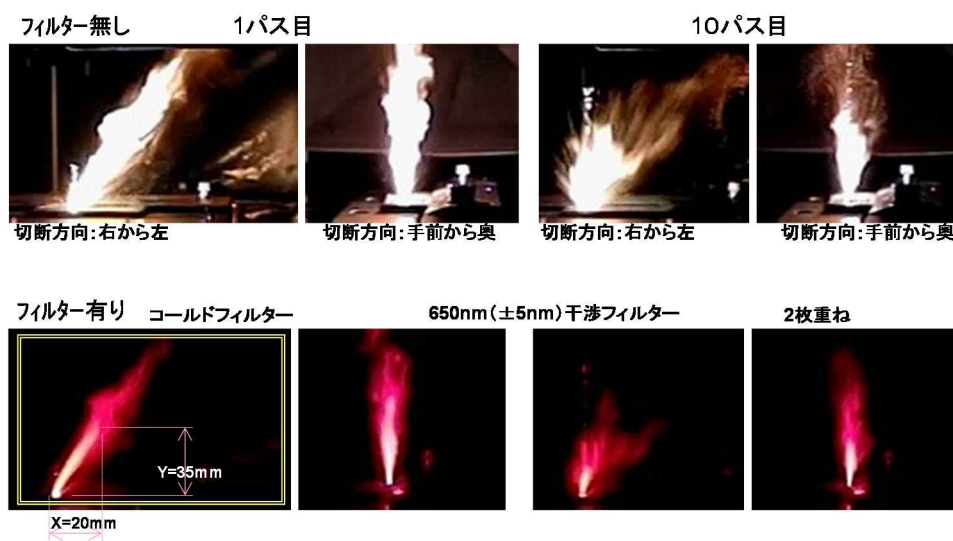
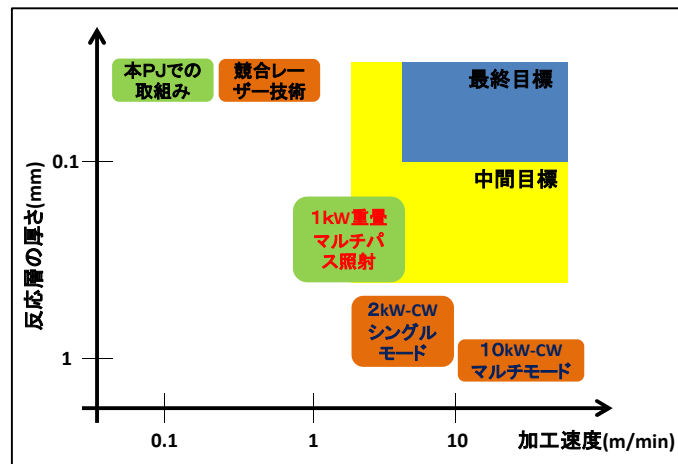
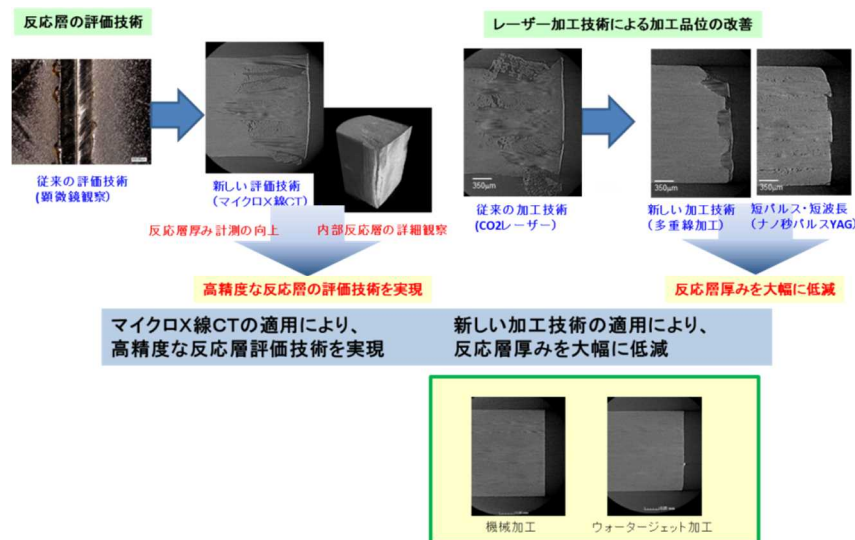


図 III-2.14.1 加工点のリアルタイム画像 (高速ビデオカメラ観測)



図Ⅲ-2.14.2 高出力パルス光源での加工試験の結果概要

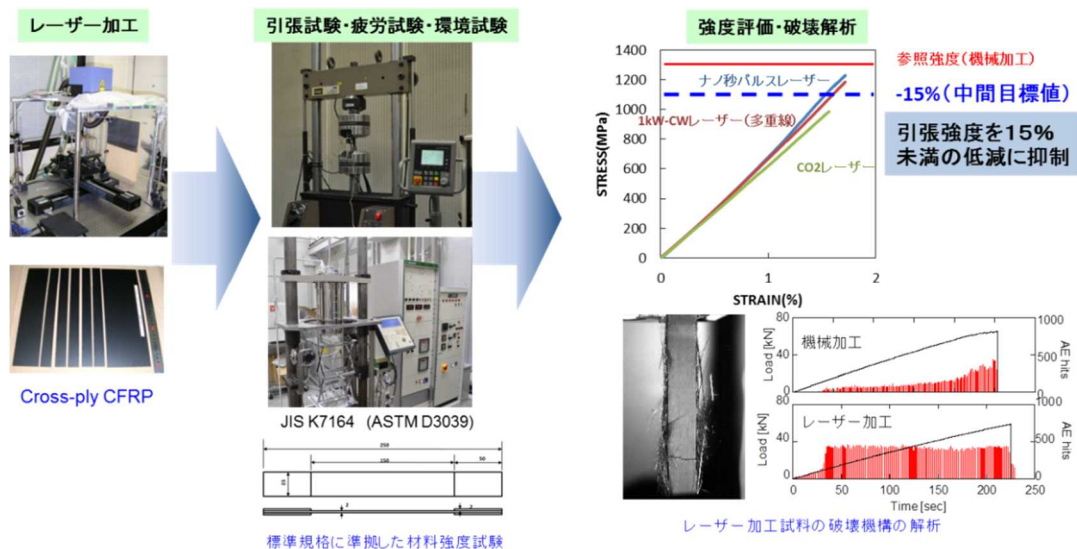
CFRP のレーザー切断加工試料の加工品位評価において、主な課題はレーザー切断時の反応層厚みの高精度な測定評価技術である。従来の測定評価では、光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡による表面反応層の観察や研磨を施した後の断面観察手法であるが、表面反応層の観察では内部構造を観察できないこと、研磨による断面観察では反応層の樹脂や繊維が欠落するなど問題があった。これらを解決するため、非破壊検査手法である高分解能マイクロX線CTを適用した（図Ⅲ-2.14.3）。マイクロX線CTでは反応層がコントラストの違いによって観察できる。また、どの方位層で反応層が大きいかなど高精度な反応層の評価技術を実現した。また、開発段階にあるレーザー切断加工技術では、従来の炭酸ガスレーザー等による加工よりも反応層厚みを大幅に低減することが可能となった。例えば、クロスプライ材の1kW<sub>CW</sub>ファイバーレーザーによる多重線加工では最大350 $\mu$ m、ナノ秒パルスYAGレーザーでは最大150 $\mu$ mとなり、中間目標（反応層厚み：500 $\mu$ m以下）を達成した。また、ナノ秒の短パルス効果、2倍高調波（2 $\omega$ ）や基本波と2倍高調波の複合照射による波長効果によってその領域がさらに小さくなる見通しを得た。なお、図中に示した従来加工法である機械加工やウォータージェット加工法により切断した試料の加工断面には、反応層は全く観察されないが、加工速度が0.1~0.35m/minと遅い。今後は開発レーザーによる加工技術、短パルス・短波長効果を系統的に調べ、加工品位と加工速度との両立を目指して最終目標を達成する。



図Ⅲ-2.14.3 CFRP のレーザー切断加工評価技術の概要

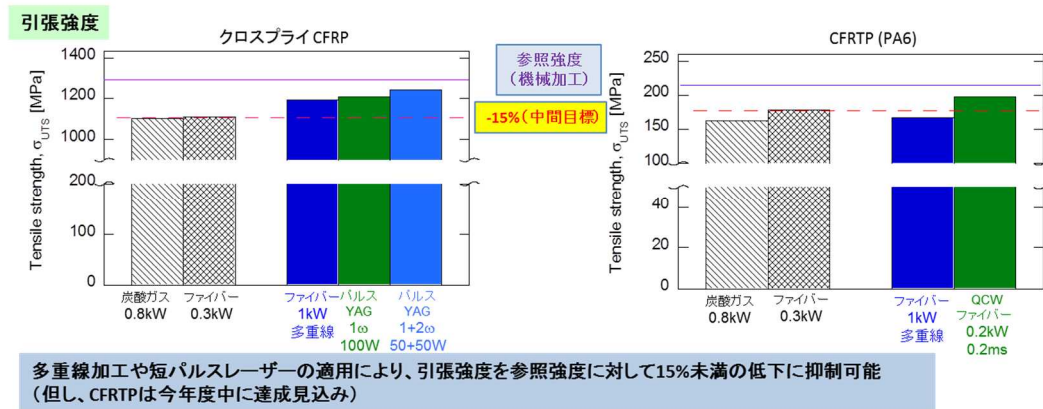
○レーザー加工に適した CFRP 材料の構造最適化及び加工試料評価技術 (ALPROT：三菱化学、産業技術総合研究所)

CFRP のレーザー切断加工試料評価技術において、主な課題はレーザー切断後の試験片による最適な強度評価技術である。レーザー切断後の試験片では、切断面の加工品位が力学特性に影響を与えることが予測される。また、CFRP が自動車等に使用される場合、エンジンルーム内の温度は70-120℃に達し、湿度も 80-95%にもなる (参照：自動車エレクトロニクスと信頼性 電子材料(1979)) ため、使用環境が力学特性に影響を与えることが予測される。これらを解決するため、波長、出力、加工速度等を変えたレーザー加工試験片を用いて引張試験・疲労試験・環境試験を行い、その強度評価及び破壊解析を実施した (図Ⅲ-2. 14. 4)。なお、引張・疲労試験は JIS K7164 (ASTM-D3039)、JIS K7083 (ASTM-D3479) 等の標準規格に準拠した。1kW\_CW ファイバーレーザーやナノ秒パルス YAG レーザーを用いて多重線加工を行った CFRP 材料では、参照強度 (機械加工後の試験片の引張強度) に対して、中間目標値 (参照強度に対して 15%未満の強度低下の抑制) を上回る引張強度の実現に成功した (図Ⅲ-2. 14. 5)。一方、CFRTP 系試料では現在参照強度に対して 80%程度の強度であるが、QCW ファイバーレーザー (ミリ秒パルス) 加工試料では約 93%の強度を実現しており、切断要素技術の見極めができています。また、レーザー加工試験片の反応層厚さは繊維配向によって異なること、樹脂相に耐熱樹脂 (融点 250℃) を用いて反応層を軽減でき、その引張強度の低下を抑制 (反応層は非耐熱樹脂を用いた CFRP よりも 10%軽減、引張強度は参照強度に対して約 5%低下に抑制) できることが明らかになっている。今後は、本プロジェクトで開発するレーザー・加工技術を用いて CFRP を加工し、引張・疲労、環境等の強度評価を系統的に行い、強度評価手法を確立するとともに、繊維配向や樹脂相の組み合わせ等による CFRP 材料の構造最適化を行い、最終目標 (参照強度に対して 10%未満の強度低下の抑制) を達成する見込みである。



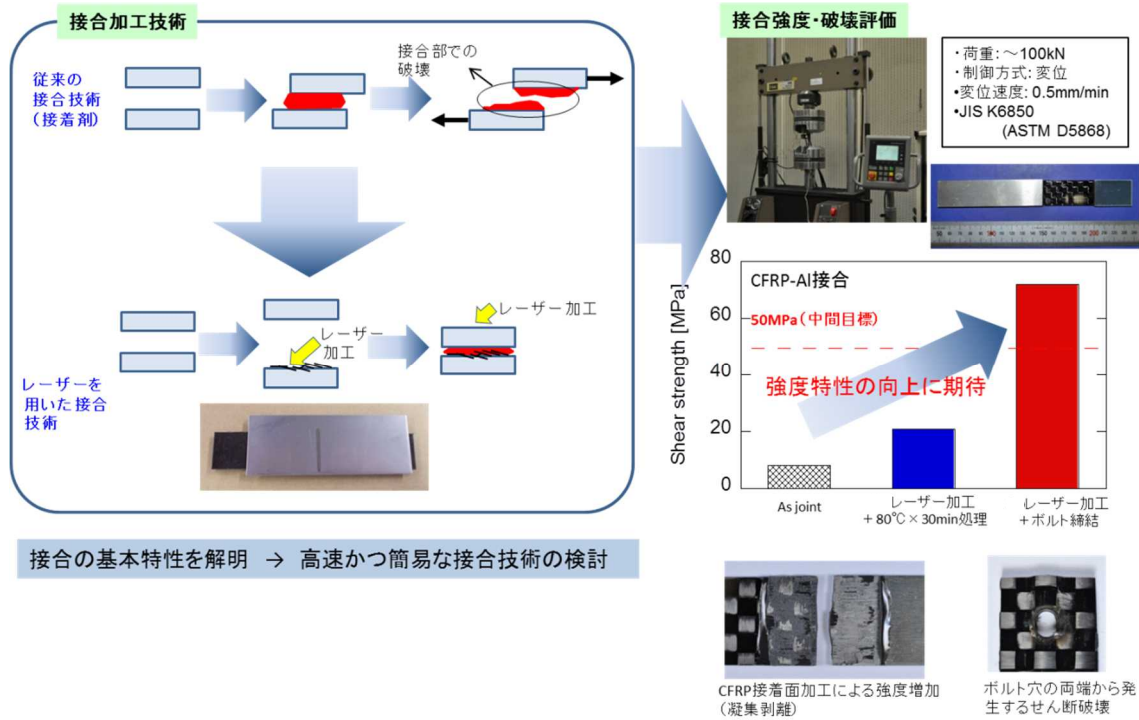
図Ⅲ-2. 14. 4 CFRP のレーザー切断加工試料評価技術の概要





図Ⅲ-2. 14. 5 各種 CFRP 材の引張強度

図Ⅲ-2. 14. 6 には CFRP と金属のレーザー接合加工評価技術の開発における概要と現状の成果を示す。開発レーザーによる接合加工技術が一定の成果を上げてからでないとは詳細な検討はできないが、紫外パルスレーザーを用いて表面加工を行い、接合に関する基本特性を調べた。従来の異材接合技術では、接着剤やボルト締結を用いる方法が一般的である。しかし、この方法では接合部の強度は接着剤やボルトに依存する。実際に汎用自動車用接着剤を用いて CFRP-アルミニウム合金 (A6061) 接合材を作製し引張試験を行ったところ、引張せん断強度は約 10MPa であった (試験方法は JIS K6850 (ASTM-D5868) に準拠)。そこで本開発では、レーザー加工を適用した新しい接合技術を検討している。図に示すように CFRP の接合面にレーザー照射により樹脂を昇華させ接着し加熱を行う。これによって、アンカー効果 (接着層と繊維の絡み) 及び接合部の一体化により母材を超えるせん断強度の上昇が期待される。実際、レーザーによる表面改質を行った CFRP にアルミニウム合金を接着し引張せん断強度を測定した結果、約 21MPa に上昇した。また、他の方法としてボルト締結による検討を行った。従来、ボルト締結による穴あけ加工は超硬ドリルによる手法があるが、加工に時間を要したり、円孔周りに容易にバリが発生し加工品位に問題がある。そこで、レーザーによる高速穴あけ加工を適用し、ボルト締結後の引張せん断強度を評価したところ、CFRP 材からせん断破壊したときのせん断強度が約 71MPa となり中間目標を上回る成果を得ている。今後は、開発レーザーを用いたアンカー効果及び接合部の一体化の効果を用いた接合技術の開発を重点的に行い、接合の基本特性を解明するとともに、CFRP と金属との異材接合に関する高速かつ簡易な接合技術の開発をする方針である。



図Ⅲ-2. 14. 6 CFRP と金属のレーザー接合加工試料評価技術開発概要

## 2. 14. 6 最終目標と達成の見通し

2. 13 項と 2. 14 項で示した現時点における成果と目標達成に向けて検討した内容を基に、最終目標の達成の見通しについて表Ⅲ-2. 14. 1 にまとめた。切断加工技術においては、波長、パルス幅と熱損傷の関係が明確になりつつある。また、接合加工技術においては、CFRP の接合面を表面改質する等による要素技術の見極めができており、最終目標は十分に達成可能である。

表Ⅲ-2. 14. 1 最終目標と達成の見通し

研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
5.1.4多波長複合照射加工技術開発	切断加工速度	6m/min	1.5m/min(CFRP) 2m/min(CFRTP)	(課題とその対応)
	反応層厚み	100 μ m	350 μ m(CFRP) 300 μ m(CFRTP)	
1)複合材料高速切断接合システム技術の開発	引張強度	10%未満の低減 (参照強度に対して)	10%未満(CFRP) 20%未満(CFRTP)	順調に開発は進んでいる。波長、パルス幅と熱損傷の関係が明確になりつつあり、最終目標は十分達成可能。
2)複合材料加工プロセス・評価技術の開発	切断加工速度 引張せん断強度	6m/min 100MPa	要素技術見極め中 見通しあり	

#### 2.14.7 知的財産権及び成果の普及

現時点における知的財産権出願状況、及び、対外発表等の成果の普及について表Ⅲ-2.14.2に示す。対外発表等の成果の普及については今後も積極的な情報発信を行っていくが、特許出願にかんしても平成24年度中にさらに3件出願する予定で作業を進めている。

表Ⅲ-2.14.2 知的財産権及び成果の普及

	22年度	23年度	24年度	計
特許出願(うち外国出願)	0	0	1(0)	1(0)件
論文(査読付き)	0(0)	5(3)	3(3)	8(6)件
研究発表・講演	1	13	5	17件
受賞実績	0	0	0	0件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0件
展示会への出展	0	1	1	2件

※ : 平成24年度7月31日現在

## 2.15 研究開発項目③ 「多波長複合加工技術の開発」

### 「(2) 表面処理技術の開発」

#### 「1) 高度ホモジナイズワイドビーム成型の開発」

(株式会社アルバック)

### 2.15.1 事業の背景・意義（目的・概要）

有機 EL ディスプレイ、液晶ディスプレイに代表される、フラットパネルディスプレイ（以下 FPD）産業は、日本が世界に誇る産業基盤の一つである。次世代の高品位、省エネルギー、高画質 FPD の達成のために低温ポリシリコン(LTPS) 工程が使われると考えられている。高安定性、長寿命の特長を持つ大出力レーザーを用いることにより、安定化多結晶処理を施す事で、次世代 FPD の課題を達成できると期待される。本研究開発では、高品位なレーザー加工による表面処理技術を開発する目的で、均一化ビーム成型に必要な高度ホモジナイズワイドビーム成型について説明する。

#### 高度ホモジナイズと集光特性

LTPS で用いられるレーザー光は、互いに相いれない性質をビームに求める事になる。一つはビーム品質を維持した事による集光性能であり、他方は均一な照射分布を必要とする加工から見た照射均一性への要請である。集光性能について触れておきたい。現在、LTPS 工程では、多くはガスレーザーが用いられている。これは歴史的に固体レーザーが産業応用を確実のものと出来なかった事に起因するだろう。また、小規模であるが、固体レーザーを用いた LTPS も研究されており、パネル点灯試作なども行われている。この事例は、比較的見通しの良い物理諸量を与える。具体的には、量産ライン現場で求められるビーム仕様、コスト、タクト、メンテナンス性等である。従って、これらの知見から、グリーンレーザー光を用いた場合の多結晶化に必要なエネルギー密度がわかる。集光幅は表面改質に必要なエネルギー密度を確保しつつ、加工物(薄膜)の破壊を引き起こさない領域となる。パルス動作するビームを用いる場合、時間的なピークパワーの最大値と空間的な最大強度位置が生じる空間 - 時間タイミングにおいて、レーザー照射対象物は数桁に渡るエネルギー照射強度の変化を経験する。この急峻なエネルギー変化によって、吸収 - 溶解 - (冷却) - 凝固(多結晶成長)へと導かれる。薄膜破壊を生じない領域で過冷却状態を効率よく実現する必要性から、レーザー光のエネルギー密度、パルス幅、ビーム品質が与えられるのである。現在開発中の大出力グリーンパルスレーザーの仕様決定に展開される。

量産性能を有する装置では、その装置構成から要請されるワーキングディスタンス(W.D)を備えなければならない。そこで、ワイドビームの最終集光レンズは W.D=300 mm以上を設計した。

照射ワイドビームの均一性について触れる。当然ながら、ビームの集光性能はコヒーレント性で示される。集光性能が高いビーム品質では到達集光径が回折限界まで達する。しかしそのビーム品質の為に、干渉性を高く有する事になる。均一照射を必要とするワイドビーム成型では、ビームの干渉性が高い場合に、干渉縞の抑制が難しくなる。ビーム干渉を強く生じた場合、加工対象物の表面には、干渉縞のパターンがは

つきりと記憶されることになり、品質劣化を生じる結果となる。この干渉縞は膜面のモフォロジーとして特に影響を及ぼす事になる。具体的には多結晶化膜の表面電位の違いによる TFT 特性のばらつきに影響することが近年、明らかにされつつある。ワイドビームの均一性には単なるレーザー光の照射均一性に留まらず、結晶化膜の結晶粒径と粒界の程度、表面突起などの多くの要素が含まれる。当然、膜構成依存も多く存在することは言うまでも無い。多くのパラメーターが存在するが、膜の多結晶化を施すエネルギードライバーとしてのワイドビームには、高い照射均一性が求められると考えられる。従って、レーザー発振器と共に外部に配置した光学系を駆使して、均一ワイドビームを実現することになる。ここで言う、均一化技術は大きく 2 つの要件が要求される。一つはエネルギーロスが少ないこと。少なくとも所望の LTPS に必要なエネルギー密度が確保されなければならない。もう一つは均一化方向にコヒーレント性を下げて干渉性を抑制することである。

固体レーザーを用いた LTPS では、加工尤度の観点、及び適正レーザー波長の選択から、波長変換の技術による第 2 高調波への変換が必要となる。その変換効率を高めてエネルギーの有効活用が求められる。波長変換技術に関する沢山の知見から、波長変換結晶内に入射する基本波ビームのコヒーレント性が高いことが最も良い条件となる事が判っている。合わせて、入射パルス時間幅の短いこと、ビーム内の偏光が直線偏光であること等が求められる。これらの条件は、レーザーエネルギー有効活用の観点で優位性を示すが、LTPS で求められるような加工品質の均一性が重要になる用途ではむしろ不利となる。加工の均一性とビーム品質は、トレードオフの関係であると言える。コヒーレント性を制御して集光性能を確保したビームエネルギーを生成する技術と、照射均一性の達成に必要な干渉縞の影響を抑制することが重要な開発課題となる。よって高度なホモジナイズ技術の確立が避けられないのである。

均一化ワイドビームの生成に関する従来技術の代表として、透過型グレーティングを用いた構成や、フライアイと呼ばれる多眼レンズによるビームレットへの分岐技術が知られている。これらの前例は、コヒーレント性の比較的低い光源種に対して応用される場合や、ホモジナイズ作用によるエネルギーロスがあまり気にならない微小加工用途に限定されている。更に付け加えるならば同一箇所加工が複数回のパルスエネルギー照射で成立するプロセスであるが故に採用される技術である。特に加工材料側の溶融後の凝集過程における緩和効果が十分に期待できる場合に採用となる。LTPS で採用される第 2 高調波レーザーの表面改質は、パルス毎の多結晶化過程であるので、材料溶融時の照射パターンそのものが履歴として残る。一例として、照射パターン内に不均一分布がある場合の多結晶化後の膜面内を詳細に観察すると、結晶化率の違いが加工領域内に点在し、膜面内に作製された TFT の諸特性がバラつくことが確認されている。このバラつきによって加工品質が悪い状態であると判断される。

以上のように、グリーンレーザーを用いた LTPS は長寿命と言う固体レーザーである点が魅力的な特徴であるが、精度が必要なビームの均一性を得つつ、低コストで生産性に富む量産装置のレベルにまで仕上げる事がこれまでは困難であった。この技術要請に応えられるワイドビーム成形を目指す事が本開発の使命である。

## 2.15.2 研究開発目標と根拠

本開発項目における目標は表 III-2.15-1 の通りである。最終目標として 500mm 幅ビームの形成を目指す。FPD 分野の技術の進展は非常に急速に推移するため、常に市場要求に目を光らせ、常に最新の情報をキャッチできる体制を維持する必要がある。

表 III-2.15-1 研究開発目標値。ワイドビーム形成のためのモデル計算による実現性評価、実ビームによるワイドビーム具現化、ビーム形成に必要な大型レンズの製造、ビームの高精度測定 of 各項目である。

表 III-2.15-1 研究開発目標値

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
③-(2) 表面処理技術の開発	1) 光学シミュレーション ビーム幅: 500mm 集光幅: 20 μm 照射均一性: ±7%	中間目標にて達成	500mm 20 μm ±7%	市場に要求されるビーム幅と結晶化の品質を確保するためのエネルギー密度・分布の経験値
	1) ワイドビームの成形 ビーム幅: 500mm 集光幅: 20 μm 照射均一性: ±7%		500mm 20 μm ±7%	
	2) 大型光学部品研磨 研磨幅: 500mm		500mm	
	3) 高精度ビーム評価 測定精度: ±2%以内 測定分解能: 5 μm以下	市場に要求されるビーム品質を測定するための経験的許容値	—	—

### 市場競争力

ここでは、産業応用を意図した視点から、最も需要が多い40インチワイドのパネルサイズを想定し、500mm以上のワイドビームを目標値とした。光源と加工品質に求められる諸量が明らかなので、照射均一性については±7%以下を目標として開発を行った。

既存レーザー設備を用いたホモジナイズ性の改善を確認

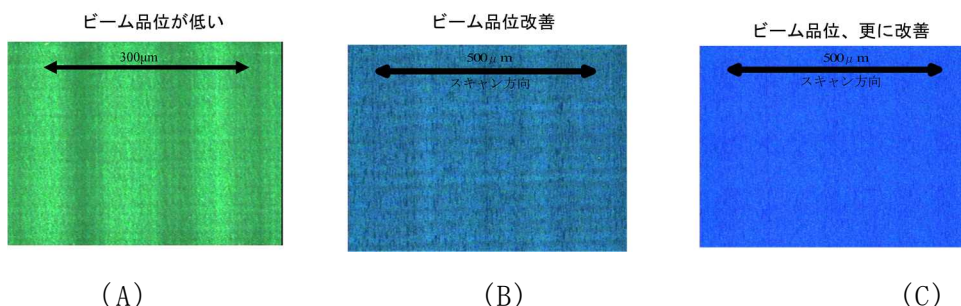


図 III-2.15-1 多結晶化膜面観察(微分干渉モード)

図 III-2.15-1 は、弊社既存のレーザー設備を用いて多結晶化処理された膜面の表面観察イメージである。イメージ(A)では、ビーム内の干渉パターンによる分布があるこ

とが確認された。液晶パネルでの薄膜半導体デバイスの駆動では回路補正によるディスプレイの品位は確保可能だが、自発光型ディスプレイでは品位確保は困難なレベルにあると言える。イメージ(B)では、ビーム内の干渉パターンを抑制した時のメージである。イメージ(A)に比して、大きな干渉による濃淡構造は減った。しかしモフォロジーの改善を必要とするレベルにあると判断される。イメージ(C)では、更なる光学パターン改善を施したことによる、モフォロジーの改善イメージである。モフォロジーは劇的に改善され、均一な状態であることが確認された(一部、膜構成の改善も寄与している)。

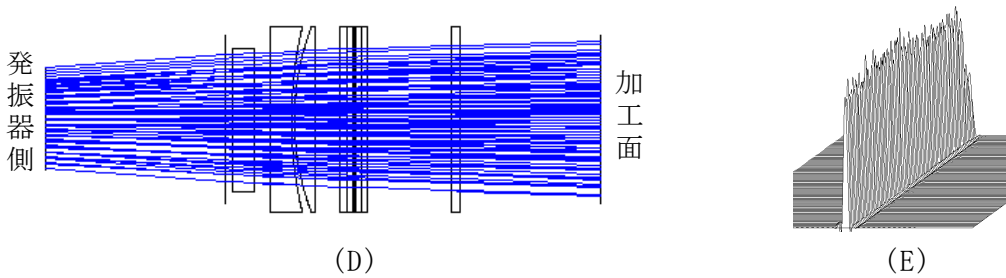


図 III-2.15-2 140 mm ワイドビームのレイトレースと照射分布図

図 III-2.15-2 は既存アニールシステムの改善前の光学特性(図 III-2.15-1A, B に相当)を示している。イメージ(D)では、加工点でのビームは末広りの特性であることがわかる。実際には、よりレーザー発振器側に位置する導波路分岐によるビームの多分岐原理により、約 5 本~7 本のビーム成分となっており、互いのビーム成分が交互に重なりながら加工面まで伝搬しているのである。イメージ(E)は照射分布を鳥瞰図として示している。登頂部位の高さ(=強度)がスパイク構造を有していること、均一性が悪い事がシミュレートされている。

加工面近傍でのビームの広がり、多光束干渉として知られるメカニズムで、定在波を発生し、その定在波が加工面内の多結晶過程に履歴を残す。この顕著な結果がイメージ(A)である。左右方向に  $50\mu\text{m}$  程度の間隔で、濃淡模様が確認される。更に微細構造を有していることが確認出来る。

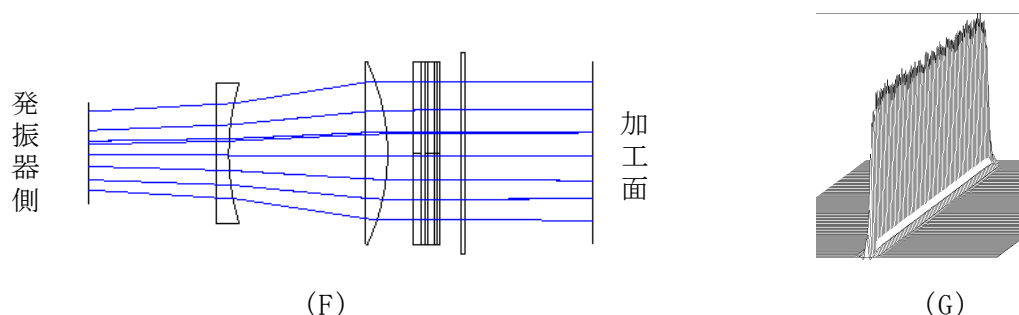
均一アニールに向けて

干渉による縞パターンの抑制は、大きく分けて 3 つの方法が検討された。

- [ I ] 多光束干渉の原理から、ビーム同士が交差する互いになす角度を限りなく小さくする。よって計算上は、著しくきめ細かい縞パターンの生成となり、マクロ的には均一な平面パターンと見なせる。モフォロジーをどこまで細かく微細パターンとするかである。
- [ II ] レーザー発振源は同一の光源である。従って、光の発生起源を同じにすることから、本質的には可干渉性を有している。ビーム面内に、光学的なローパスフィルターを配置して、光伝達特性(OTF)を抑制することが有効と考えられる。但し、集光性能は劣化させない。

〔Ⅲ〕 レンズ幅を大きく扱う様な光学系において、光軸中心近傍と、外周光線において、非球面収差が顕著となる。適切なレンズパワー配置を設計し、ワイドビーム全域に渡り、平行照射ビーム条件が成立するようにする。

多くの過去の知見を基軸に高度ホモジナイズワイドビーム成形では、導波路型のビームレット分割法と、平行多光束ビーム生成による微細パターン内在のビーム技術と（Ⅰ、Ⅱ）、大型ワイドビームの為の大型異型レンズデザイン（Ⅲ）の開発を行った。言うまでも無く、薄膜半導体デバイス基盤の膜改善も同時に行われている。図Ⅲ-2.15-1(C)が改善結果を実験的に示したものである。イメージ(A)、(B)に比してモフォロジーの改善が飛躍的になされていることが明らかである。この結果は特に電流駆動型の TFT で顕著に影響を受ける。モフォロジーがパネル品位を左右するため、発光の妨げにならない均一性が求められるのである。



図Ⅲ-2.15-3 140 mmワイドビームのレイトレースと照射分布図

図Ⅲ-2.15-3は改善された光学系の例である。図中のビームの線数は減らして図示している。加工面に入射するビームの多くは垂直入射条件にした。但し完全に垂直入射成分となっていない条件下であった。このことは照射分布図(G)により推察される（実際の実験では、レンズの加工精度等、計算値とのずれがあった為、もう少し大きな干渉縞の発生があったと推察できた）。近軸中心ビーム成分と外周部のビーム成分に対して収差補正が不十分な為、140 mm幅に渡り照射エネルギー均一性は向上しているが、アニール特性としてのモフォロジーまで加味した均一性はわずかな改善に留まった。このような条件下では図Ⅲ-2.15-1(B)の様なモフォロジーとなる。光路内へのローパスフィルターを挿入した効果と平行光デザインによる干渉縞の抑制で改善されたと考えられる。しかし、照射パターンと干渉によるパターンとの差分が認められ、原因追究を行った。干渉による縞模様の影響の他に、レンズ表面研磨ムラによるアニールムラが認められるに至った。

この様な考えを推し進めて、更にレンズのデザインを改善した。詳細は大型光学部品研磨技術の開発Ⅲ-17に譲るが、レンズ表面の研磨精度に起因するムラがアニール表面のモフォロジー形成に影響している知見を得た。高精度研磨を施したレンズを用いて、同じく図Ⅲ-2.15-3(F)と同等の光学系を構築し、140mm幅程度のワイドビームを用いて得た結果が図Ⅲ-2.15-1(C)である。

平行光は不完全である事を先に述べた。これはビームの広がりや有限の初期ビーム



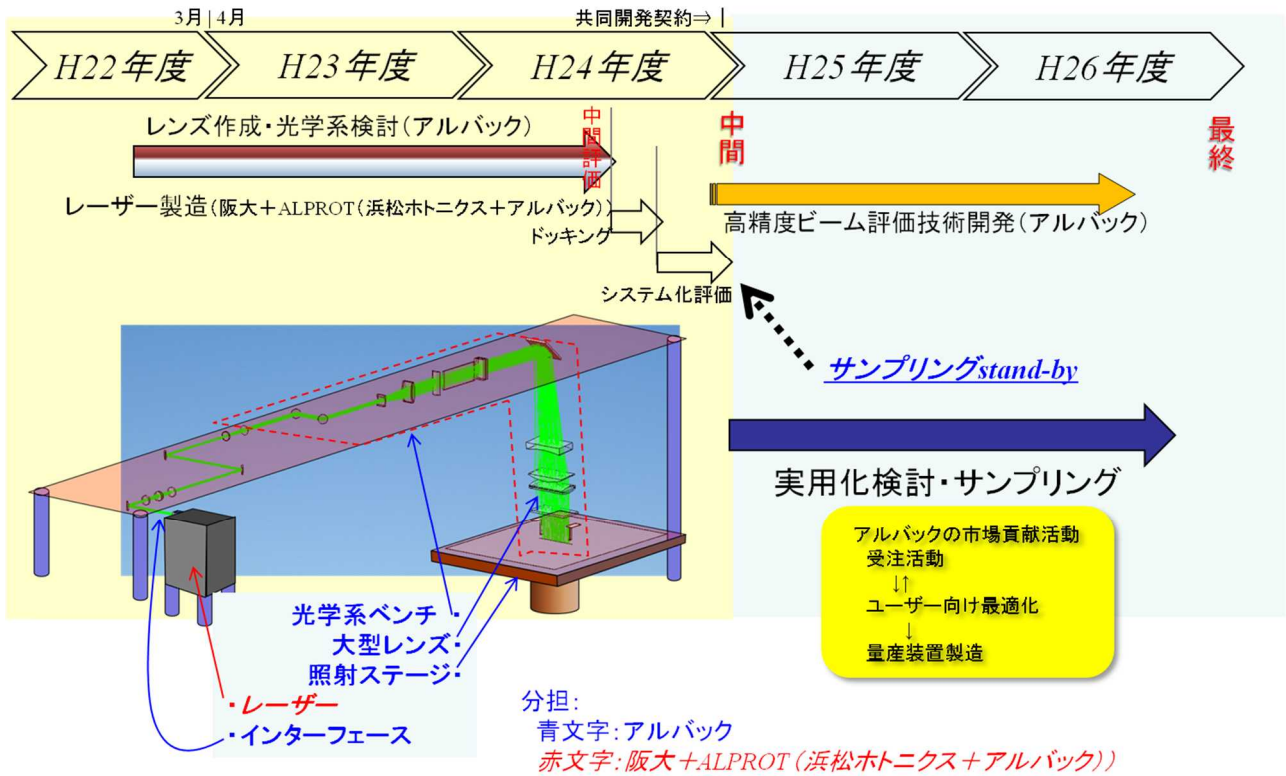
径より拡張することになるので、球面収差が大きく影響するからである。球面収差の抑制手段として、幾種類かのガラス種を用いて補正配置とすることが主流であろう。色消しなども代表的な方法のひとつである。更に近年では、非球面レンズを用いた光学系のデザインが可能な場合がある。球面収差は非球面化したレンズを用いる事で、容易に改善されることが知られている。多くは丸型レンズにおいて実用化されている。

異型レンズの曲面加工において、非球面処理はいまだ未開発領域であろう。特に研磨面の処理と曲率の保証が困難と思われる。従って、ワイドビーム成形には、球面加工のレンズの組み合わせが主流のデザイン条件となる。大型のシリンドリカルレンズともなると高精度研磨加工は未踏技術領域と言わざるを得なかった。同時に大型レンズの取り扱いおよび装置への組み込み(アライメント)は、非常に困難な作業である。故にレンズ構成枚数を減らして調整箇所を少なくすることが必須命題である。イメージ(F)に示すように、幅広方向に寄与するレンズ間の距離を比較的大きくとりながら、ビームの広がりをおだやかにすることと、レンズの母材そのものを厚くして屈折率媒質内のビーム伝搬距離を長くすることで均一性の向上を得る為の収差抑制法をデザインルールの中に見出した。レンズの厚みが増す事で体積に比例した自重となる欠点がある。しかしガラス種を増やさず、球面加工形状レンズだけで均一ワイドビームを達成するには他に解が無い。先にも書き述べたが、実際にはホモジナイズ導波路においてビームレットに多分岐したビームが取り扱われる。それぞれのビーム成分に適した大型異型レンズの曲面加工はそれぞれに固有の数値となるはずである。この開発ではワイドレンズの曲率をなるべく大きくすることで、近軸ビーム外の成分への非球面収差量が最小限に抑えられる工夫が同時に盛り込まれた。

ペッツバル則を加味したレンズパワー設計とビーム光路内に挿入したローパスフィルターと導波路でのビーム分岐数を～10本程度に向上させることにも成功して均一精度を向上することが可能となった。これらの知見は光学デザインのみならず、既存装置にて実験的に裏付けられた。

### 2.15.3 研究開発スケジュール

FPD産業では装置導入に対する投資周期が短いため、開発期間もなるべく短期間に行う事が望ましい。よって、5カ年計画の内、前半で各コンポーネントの個別評価とそれらの連動運転が出来るデモ装置の完成を目指す。後半は実際のパネル製造に近い現場でサンプリングを行いつつ、製造装置への作り込みと更なる要求性能への拡張性を模索する。図Ⅲ-2.15-4 参照。



図Ⅲ-2.15-4 開発スケジュール

図Ⅲ-2.15-4 開発スケジュール。アニール装置の構成要素の内、レーザー発振器を阪大+ALPROT(浜松ホトニクス+アルバック)担当で、その他の要素をアルバック単独の担当にて開発し、前半でアニール結晶化のデモ処理が出来るようにする。

#### 2.15.4 研究開発目標と達成状況

光学系では500(挑戦目標700)mm幅のワイドビームを形成する必要があるが、モデル計算による現実性と実ビームによる具現化の確認が評価項目となる。表Ⅲ-2.15-2参照。

表Ⅲ-2.15-2 ワイドビーム形成の目標値。モデル計算での実現性評価と実ビームでの具現化について、目標値を設けた。

表Ⅲ-2.15-2 ワイドビーム形成の目標値

	目標	成果	達成度	今後の課題 補足の資料
1) ホモジナイズビーム 光学計算の開発	500mm幅以上 ±7%以下	700mm幅 ±2.5%以下	◎	目標値は達成。挑戦目標まで達成見込み
ワイドビームの開発 実ワイドビームの形成	500mm幅以上 ±7%以下	未評価	△(H24年12月 達成予定)	別項で開発する大出力レーザー発振機と光学系部品のドッキング後に評価開始

## 2.15.5 成果の詳細

### ワイドビーム形成のモデル計算

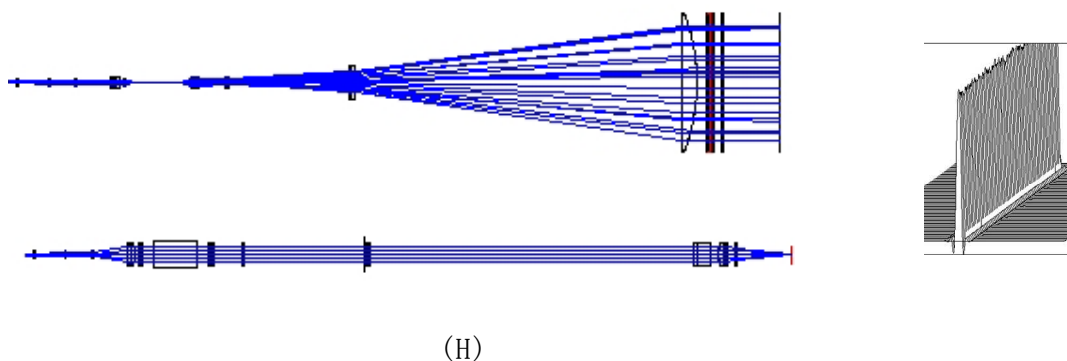


図 III-2.15-5 700 mmワイドビームのレイトレースと照射分布図

図 III-2.15-5 イメージ(H)には、最終目標値である 500mm 幅を大幅に超える 700 mm 対応ワイドビームのデザインを示している。干渉による縞の発生を抑制する方法と、球面レンズのみで構成された大型異型レンズ搭載の全容である。ホモジナイズされたビームは幅広方向に対して、徐々に広がる光学系とした。他方、集光方向はそのビーム品質を維持しつつ最終段の集光レンズによって集光される。イメージ(I)は照射分布図である。イメージ(E)、(G)に比して、パターンが大きく改善されている事が確認出来る(頭頂部の図が切れているのはソフトによる計算値の描画エリアのバグ)。

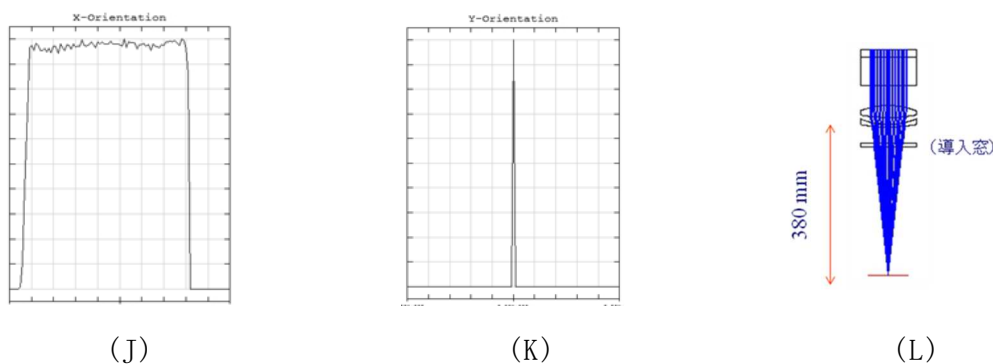
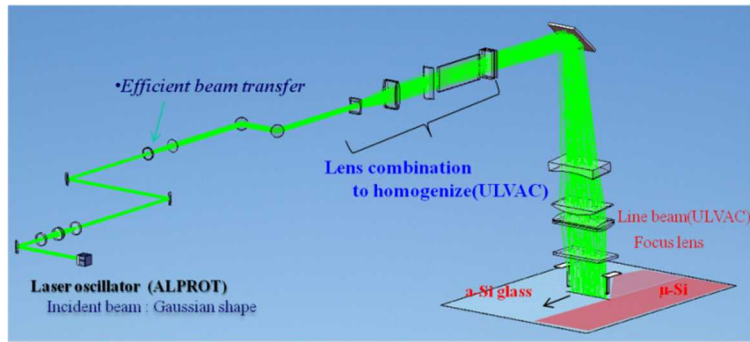


図 III-2.15-6 700 mmワイドビームの幅広方向の分布と集光方向特性

図 III-2.15-6には 700 mm 幅ワイドビームのシミュレーション 1D プロファイルを示す。イメージ(J)より、全幅に渡って均一性が  $\pm 2.5\%$  内に収まるモデリングが達成できた。目標値を上回る改善が行えた。イメージ(K)では、ビームの集光方向の特性を示している。所望の  $< 40 \mu\text{m}$  を達成するモデリングが行えた事を示している。イメージ(L)では、十分なワーキングディスタンスを確保できたことを示しており、装置化への展望を明らかにした。



図Ⅲ-2.15-7 実際の装置搭載をイメージした場合の光学系の配置

図Ⅲ-2.15-7は、実際の装置搭載をイメージした場合の光学系の配置とビーム伝搬の様子を描いたものである。55型ワイドのパネルサイズが一度にアニールできる仕様となる。

実ビームでの形成

別項目(②-(2)-2)、②-(3)-1))にて開発している高品位大出力レーザーを完成させ、次項の大型異形レンズと組み合わせて具現化する予定である。

### 2.15.6 最終目標の達成の見通し

最終目標はビームのモデル計算については現時点で基本計画の目標値を達成しているが、計画策定以降の市場調査結果を鑑み、挑戦的目標として更にビームを拡幅した目標を設定した上でこれも達成できた。一方、実ビームの幅広形整形については前出の大出力レーザーの完成を待って評価する予定である。表Ⅲ-2.15-3参照。

表Ⅲ-2.15-3 研究課題の最終目標の達成見通し

研究課題	最終目標(平成26年度末)	達成見通し
(2)-1) 高度ホモジナイズワイドビーム形成技術の開発	目標: 500mm幅/±7%ビーム 見込み: 光学シミュレーションでは達成済 実ビームではH24年末に達成予定	700mm幅/±2.5%の試算結果では達成。実ビームでの達成はH24年末の予定。

### 2.15.7 知的財産権及び成果の普及

特許出願等状況は以下の通りである。表Ⅲ-2.15-4参照。

表Ⅲ-2.15-4 知的財産権の状況。

	2010以前	2010	2011	2012	計
特許出願(うち外国出願)	1				1件
論文(査読付き)					無し
研究発表・講演					無し
受賞実績					無し
新聞・雑誌等への掲載					無し
展示会への出展					無し

## 2.16 研究開発項目③ 「多波長複合加工技術の開発」

### 「(2) 表面処理技術の開発」

### 「2) 大型光学部品研磨技術の開発」

(株式会社アルバック)

#### 2.16.1 事業の背景・意義（目的・概要）

大型異型光学部品研磨技術について

前項「1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発において、設計された光学レンズの加工を行う技術の確立についてまとめる。ここでは特にレンズ研磨の中でも大型で、シリンドリカル形状、メニスカス形状を加工可能とする研磨機の作製と、研磨技術に伴う内容を述べる。

背景として、フラットパネルの産業用途では、ワイドビームによる一括処理が行われている。市場の先行装置としては、ガスレーザーをエネルギー源としたものが知られている。今日、450 mm幅ビームが量産実績レベルで稼働中である。それ以上の幅広仕様になると生産性が十分に担保できない技術課題を抱えている様子も聞こえてきている。メーカーの公称は 750 mm幅程度と思われる。しかし生産現場との認識の乖離が大きい。

このような装置の日本製は実在しない。主要構成要素はドイツからの調達である。具体的にはエキシマレーザー発振器と大型レンズアレイおよび周辺機器一式である。加えて開発環境も国内にはなく、ドイツを中心とする独占状況にある。

ガスレーザーは半導体のプロセス世界で強く求められ、発展してきた側面がある。その恩恵を受けて、フラットパネル技術領域でも応用用途が見出され、生産には欠かせない装置へと成長した。しかし、ガスレーザー特有のコスト問題、照射エネルギー不安定性、高度な光学系の調整などでコストが上昇する。加えて、光学レンズ類の設計および部品調達もドイツ技術を輸入している実態である。高精度研磨技術は無く、加工精度の保証は無く、実際に装置に組み込んで加工品位を確認しながらレンズの完成度を評価する方法がとられている。彼らの大型レンズの加工方法は、研磨では無く切削に近い方法と職人による仕上げ加工に依存している様子がうかがえる。ガスレーザーではコヒーレント長が短く、LTSPS になんとか使えるといった具合である。実力としては 700 mm幅を超えるアニールシステムは立ちあがっていない。

省みて、これらの基幹要素を国内に保有する必要性が自明の理として大いに検討された。しかし、国内の光学系の開発環境を調査すると、大型の異型レンズ研磨加工環境が存在せず、小規模にとどまることが独自の調査の結果、明らかとなった。研磨技術に集約される事として、寸法精度、面粗さなど、研磨レンズの評価手法も乏しい事も認められ、大型で高精度の研磨技術を要求した場合、国内での対応が出来なかった。

とりまく環境

昨今の FPD 業界の産業的勢力分布は、アジアを中心とした韓国、台湾、特に近年では中国へと移行していると言って過言ではない。国内の技術力の低下と、特に人件費

に代表されるコストが製品の競争力を低下させている側面は甘んじて享受するところである。同時に最終製品の技術力優位な差別化が陳腐化しているきらいがある。価格競争では完全に引き離された様相である。最終製品の市場競争力が低下し、ブランド戦略も危ぶまれている今日の中で、唯一、生産装置技術力が優位にあると分析される。

量産工場へ視点を移してみる。アジア諸国においても生産装置の自社開発による技術力が向上してきており、日本のメーカー装置の圧倒的な優位性が目立たなくなってきた。コモディティ化した生産装置類はコスト競争力を失い海外での生産に移行するか、事業そのものを移管している例が珍しくない。核となる装置類だけが国内技術で維持されている状況下では、企業活動そのものが脅かされる。

レーザー応用装置では、先に述べたようにドイツの独壇場であるが、性能とコスト課題が実態にそぐわない。しかし、パネルメーカーでは、必要性に迫られてコスト高のレーザー装置を配備しているのである。

#### 2.16.2 研究開発目標と根拠

本開発テーマでは、これらの背景を踏まえ、最終製品の高機能化を意図した開発に着手した。生産現場で求められる実践力のある装置仕様を調査して、短期に開発を達成する事で貢献する。前項の 2.15.2 参照。

当該プロジェクト発足時には、ワイドビームに求められる幅は 500 mm 程度を想定していた。これは一般家庭に普及するディスプレイサイズと周辺生産技術水準に照らして目標値とした経緯がある。近年、我々の調査によれば、生産装置世代が大幅にすすむ事を予測した。従い、55 型ワイド仕様のパネルサイズが効率よくアニール処理できるようにワイドビームの最終目標値の前倒し及び更なる拡幅対応を行った。当然ながら、異型レンズ研磨機の設計も変更を行い、>700 mm 幅ビームが狙えるレンズ研磨装置へと改修した。

#### 2.16.3 研究開発スケジュール

前項の 2.15.3 参照。

#### 2.16.4 研究開発目標と達成状況

光学系では 500 (挑戦目標 700) mm 幅のワイドビームを形成するためビーム長以上の幅を持つ、高度に精細研磨された大型シリンドリカルレンズを得根ければならない。従って、国内初の大型レンズに対応できるレンズ研磨機の製造と高精細研磨大型レンズの作成が評価項目となる。表 III-2.16-1 参照。

表 III-2.16-1 大型レンズの精細研磨の目標値。アニール用途のビーム形成に必要な研磨精度での有効レンズサイズの目標値が設けられている。

	目標	成果	達成度	今後の課題 補足の資料
2) レンズ研磨技術の開発 研磨機とレンズ作成	500mm幅以上	700mm幅	◎	

### 2.16.5 成果の詳細

#### 研磨装置



図 III-2.16-1 大型異型レンズ研磨装置の外観(粗研磨/仕上げ研磨共通タイプ)

図 III-2.16-1 に大型異型レンズ研磨対応の研磨機外観を示す。中央ステージの上にはダミーガラスによる研磨途中の状態が見て取れる。レンズの長手方向は 700 mm オーバーのサイズとなる。高精度研磨を実現するために、研磨パッド可動部の剛力を向上させ、大型レンズ加工への対応範囲を大幅に向上させた。上面可動部は吊り天井構造を採用して、支点からの研磨皿へ掛る加重配分を均等化する工夫をした。稼働方向は装置奥行き方向のみの 1 軸直線往復運動を正確に行う。ストロークは 100 mm 程度であるが、直線性を  $100 \mu\text{m}$  以下に抑えるべく軸調整がなされている。下部ステージは  $900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$  のサイズである。ステージ稼働方向は、左右のみの 1 軸直線往復運動を行う。同様に直線性を  $100 \mu\text{m}$  以下となるように調整されている。ストロークは 200 mm 程度に留めている。



図 III-2.16-2 研磨加工ステージ部詳細

図 III-2.16-2 は研磨皿を加工している工程である。光学的にシミュレートされたレ  
III-17-(3) (中間)



レンズデザインデータを基に、研磨皿を作製する。粗取り段階の型皿としては、旋盤等の別に設けられた加工装置にて作製する。その後、研磨加工機を用いて皿の形状を整える。研磨精度を決める要素を多分に占める治具となる。材質はA1を用いた。その後、ある程度の曲率を確認できた所で、パッド材を上皿と下皿の間に挟み込み、更に曲面加工を行う。その様にして作られたパッド曲面が実際にガラスを研磨する為の参照となる。



図 III-2.16-3 異型レンズ用途の研磨皿例

図 III-2.16-2 の工程で、加工された研磨皿の仕上げイメージを図 III-2.16-3 に示す。これはレンズ形状や曲率等が異なると、その面の数だけ必要となる治具である。この後、研磨皿の表面には高精度の研磨段階(追い込み仕上げ)で、パッド研磨またはピッチ研磨となるため、それぞれが治具に貼り付けられることになる。



図 III-2.16-4 大型シリンドリカルレンズ(700mm オーバー)

図 III-2.16-4 には仕上げ工程終了後のレンズを示している。曲率の仕上げ精度は3次元測定器 UA3P 等の市販測定機器を併用した。市販 UA3P の測定ステージは大型ガラスが搭載できないので、改造して大型レンズ搭載可能な準備を行った。所望の外形をモニターしながら、研磨作業を続ける方式である。粗摺りから始まる工程そのものは、通常の球面レンズ加工と差はない。球面加工では、高精度の研磨面を得るために、オスカータイプが多用される。これは円運動を取り入れた研磨方式になる(詳細割愛)。容易に高精度研磨が達成できることで知られている。シリンドリカルレンズなどの異

型レンズ研磨では、円運動を研磨工程に採用することが困難である。加えて、原理的に研磨皿のガラス母材に加えられる荷重バランスが取りにくい構造を有しているため、偏った荷重研磨をしてしまう癖が本質的に回避できない。これらの特徴の為に、多くのレンズメーカーがシリンドリカルレンズに代表される、異型レンズの高精度研磨は困難対象であると認識している。シリンドリカルレンズの高精度研磨は、大型になるほど困難さが増すことになる。量産性も低い加工対象なので、敬遠されることが多い。

#### 研磨精度向上

研磨工程の間、レンズ形状を常にモニターする構造はとりにくい。研磨皿が往復運動してガラス面との接触している箇所には、研磨剤を常に注ぐ必要があるからである。レンズ研磨の進捗は研磨を止めて確認することを繰り返す地道な作業となる。適度な経験より、研磨の完成度を高めてゆくのである。

研磨皿の荷重がガラスの両端や中央部で均等になる様な工夫が盛り込まれた。従来の装置では掛る荷重が上皿を吊るす支柱の中央部に配置している為、レンズ長手方向の端部で機械的にビビリが生じてしまう。結果、レンズ表面には微少な波打つ筋が発生してしまった。同時に研磨剤の流れがガラス全体に均一に流れない為に、パッド面のガラス面へのアタリが良くない事象が発生した。レンズとしては中央部位と両端部で研磨精度に大きな隔たりが生じ、事実上、中央部しか磨けていない事になる。大型の異型幅広レンズ加工が困難であるのはこの為であった。ガラス全体に均一な力で研磨の荷重を掛ける事が困難である事、研磨剤の流れが偏る事が如実に証明された。これら原因を追及して、対策を講じた。

- 1) 上皿の稼働範囲にあるビビリを無くすために支柱の剛性を更に増強した。同時にパッド材とピッチ材の使い分けを行った。
- 2) 研磨剤の選定を行った。レンズ両端部での研磨剤の回りこみを改善する為、活性剤粒を小さくした。従って研磨時間の長期化になるデメリットを許容する。
- 3) 研磨剤温度の管理を厳しく行った。

機械的剛性を強める事で、ガラス面と上皿との摩擦で生じるビビリを剛勢力により抑え込んだ。但し、強めすぎると荷重のバランスを崩し、指定曲率以上の歪みを中央部で促進してしまう。ここで研磨剤の掛け方を端部に増やすなどの管理を行った。また流れ込み量をピッチ研磨工程では全体的に抑制した。研磨剤を小さいサイズを用いる事で、研磨速度を遅くした。その為、レンズ母材と研磨皿の放熱作用で研磨剤の温度が最適値より大幅にずれてしまった。この放熱量を見越した研磨剤の温度管理を強化した。

#### 研磨精度判断

最初の段階では、各研磨工程段階での研磨仕上げの到達の判断は通常的光学検査手

法を使って行った。その後、顕在化処理を施す。この顕在化処理を行う事で、特に微少な研磨ムラを検出しやすくする。

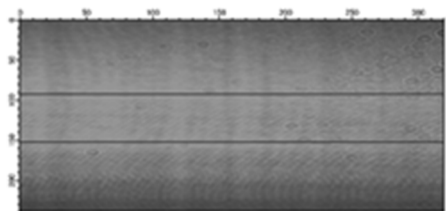


図 III-2. 16-5(A)

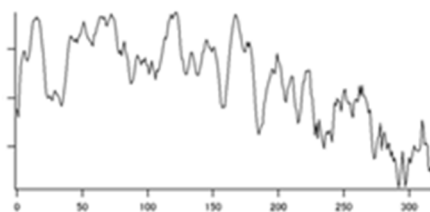


図 III-2. 16-5(B)

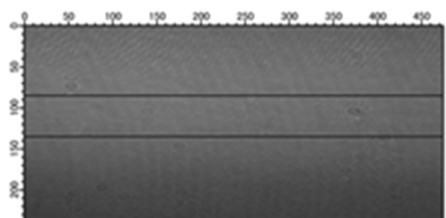


図 III-2. 16-6(A)

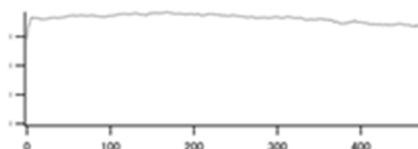


図 III-2. 16-6(B)

図 III-2. 16-5(A) は研磨不十分なレンズ表面の微小な凹凸に起因するスペックルを観察している。

十分にコリメートされた平行光をレンズに照射し、その透過光の波面乱れを高感度に検出する方法を採用している。図 III-2. 16-5(B) にはレンズ中心部位の1次元プロファイルを示した。光学的な顕在化処理を行うことで、リアルタイムに広域の加工状態が確認出来るのである。UA3Pでは広域のリアルタイム測定には不向きである。従って、外形寸法の測定には使えても、広域の表面研磨状態を決定できない弱点がある。AFMなどの機器類でも大型のサンプルとなると用途に役立たないと言わざるを得ない。顕在化の手法は、研磨途中にあるレンズを治具から完全に取り外すことなく、反射方式でも検査可能であるので、実研磨面そのもののモニターとして適用される。従い、研磨の進捗管理、完成度の判定が容易となるのである。図 III-2. 16-6(B) には、研磨面の微小な凹凸に起因する脈り構造が広域に渡り劇的に改善された結果を示している。高精度研磨面を有するレンズを搭載したアニール実験結果を図 III-2. 16-7(C) に示す。

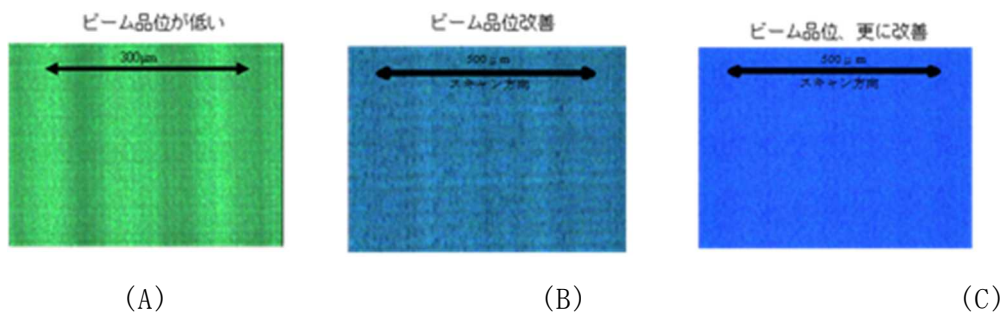


図 III-2. 16-7

我々は、顕在化処理による観察と研磨を繰返しながら所望の縞ムラの無い高精度の研磨面を有する大型のシリンダリカルレンズの加工技術に到達したと言える。研磨結

果の写真を図 III-2.16-8 に示す。

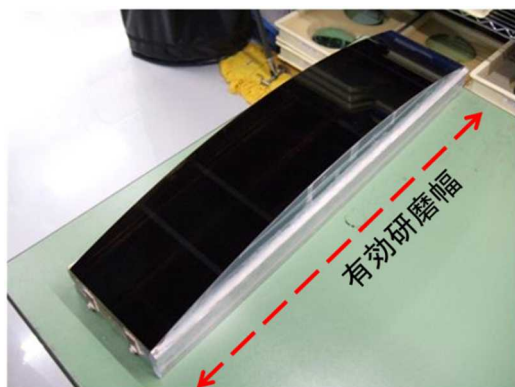


図 III-2.16-8 本開発で製造されたレンズ研磨機で高精細研磨されたレンズ。

#### 2.16.6 最終目標の達成の見通し

基本計画における最終目標は 500mm の有効研磨幅であるが、計画策定以降の市場調査結果を鑑み、挑戦的目標として更にビームを拡幅した目標(700mm 幅)を設定した上でこれも達成できた。表 III-2.16-2 参照。

表 III-2.16-2 研究課題の最終目標の達成見通し。

研究課題	最終目標(平成26年度末)	達成見通し
(2)-2) 大型光学部品研磨技術の開発	目標: 500mm幅の高精細研磨機の製造 見込み: 既に達成	挑戦目標700mm幅に拡幅した設計でレンズを製造中。 H24/8月完成予定。

#### 2.16.7 知的財産権 及び 成果の普及

特許出願等状況は前項 2.15.7 参照。

## 2.17 研究開発項目③ 「多波長複合加工技術の開発」

「(2) 表面処理技術の開発」

「(3) 高精度ビーム評価技術の開発」

(株式会社アルバック)

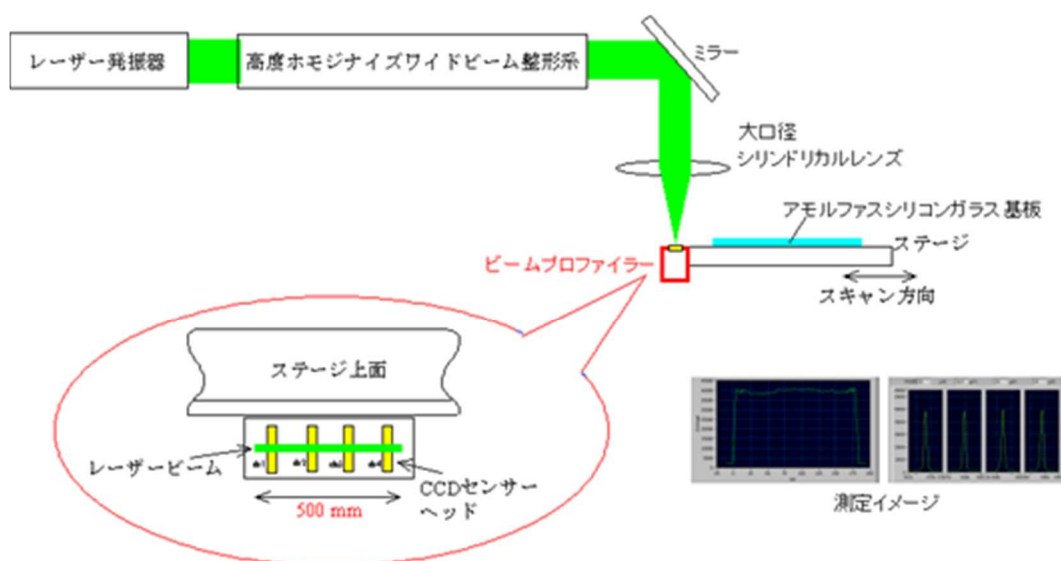
### 2.17.1 事業の背景・意義（目的・概要）

2.15、2.16 項に記されているように、レーザーアニール用途のラインビームは照射エネルギーの均一性が重要となる。従って、アニール基板へのレーザー照射位置でのビームエネルギーの測定に関しても高精度測定が必要となる。

### 2.17.2 研究開発目標と根拠

前々項、前項にて光学成形したワイドビームの照射焦点位置でのビーム形状、強度分布、集光程度を確認するツールとして、ビームプロファイラを設計・製作する。(前項の 2.15.2 参照。)

高繰り返しレーザービームを測定するので、高速動作可能な高分解能の診断技術が必要となる。測定は画像処理機能を有した PC に接続した高速動作を伴う CCD センサーヘッドを照射領域に適宜移動して画像取得を行う。(図 III-2.17-1)



大型ステージ端に取り付けられたセンサーを用いて加工近傍の照射均一性と、集光幅を測定する。

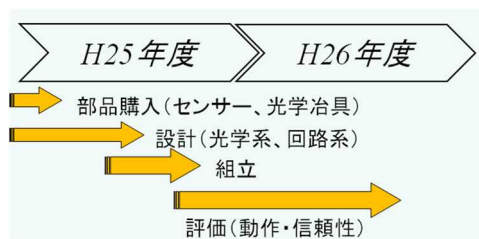
図 III-2.17-1 照射位置近傍に設けたビームプロファイラ

このテーマは実際にアニール加工ステージ装置に各種ワイドレンズ系が搭載され、同時に浜松ホトニクス殿、大阪大学殿と共同で開発中の大出力グリーンレーザー発振器とがドッキングされた暁に必要なビーム評価測定機器の開発となる。

### 2.17.3 研究開発スケジュール

開発しようとしているユニットは、CCD センサー、光学部品、高速信号処理機構からなり、可能な限り市販の汎用品の組合せで安価に構成する必要がある。また、光学設

計、回路設計等に工夫を凝らし、信頼性の高いユニットを目指す。構成部品の入手、各設計、組立、信頼性等の評価期間が必要になる。開発のスケジュールを図Ⅲ-2.17-2に示す。



図Ⅲ-2.17-2 開発スケジュール

現在、本項目は未着手である(但しビーム幅 700mm オーバー仕様として)。周辺の開発進捗を鑑みて、平成 24 年度末の開発着手で検討している。(前項の 2.15.3 参照)

#### 2.17.4 研究開発目標と達成状況

大出力レーザー発振機と光学系を組み合わせて実ビームを形成し、そのエネルギー分布を測定する。この時に要求される測定精度は表 III-2.16-1 となる。

表Ⅲ-2.17-1 高精度ビーム評価技術の開発の目標値。実ビームでの評価を予定している。

表Ⅲ-2.17-1 高精度ビーム評価技術の開発の目標値

	目標	成果	達成度	今後の課題 補足の資料
3) 高精度ビーム評価技術の開発	測定精度: ±2%以内 測定分解能: 5μm以下	未評価	△(H26年12月 達成予定)	別項で開発する大出力レーザー発振機と光学系部品のドッキング後に評価開始

#### 2.17.5 成果の詳細

300mm 幅ビームにおける測定テストは進めているが、700mm 幅(挑戦目標)のワイドビームでは、実ビームの形成時期に合わせて評価を開始する予定である。

#### 2.17.6 最終目標の達成の見通し

実ビームでの評価を計画しているため、目標達成は中間目標以降の予定である。表Ⅲ-2.17-2 参照。

表Ⅲ-2.17-2 研究課題の最終目標の達成見通し

研究課題	最終目標(平成26年度末)	達成見通し
(2)-3) 高精度ビーム評価技術の開発	目標:測定精度±2%以内 空間分解能 5μm以下 見込み:H26年度末	ライン状の実ビームの形成をH24年末に予定しているため、これを使用した評価はH25年度以降達成予定。

#### 2.17.7 知的財産権 及び 成果の普及

特許出願等状況は前項 2.15.7 参照。

## 2.18 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発

### 「(3) 粉末成形技術の開発」の成果

(アспект、産総研実施)

#### 2.18.1 事業の背景・意義 (目的・概要)

最初に本項目で行う粉末成形技術の概要について記す。粉末成形技術としては、粉末冶金、射出成形 (Injection Molding) 等もあるが、次世代の加工法として期待され、レーザー加工を有効に利用できるシステムである積層造形法を用いた成形システムの開発を行うこととした。今回最終製品として医療用の部品を当初開発の目標品としたが、医療用部品では、ポーラス・緻密の使い分けや軽量化のための方策が求められ、さらに個人対応という点では一品生産が可能な事が求められる。これらを実現する方法として後述のように粉末積層成形技術は優れた手法である。

粉末積層成形技術は、古くは Rapid Prototype (RP) 技術や Rapid Manufacturing (RM) 技術として、素早く形状を作る技術として進展してきたが、最近は一歩進んだ形として通常の加工法では担えない形状を作る新しい加工技術との位置付けへと進化し、2009 年 1 月の ASTM 国際会議で Additive Manufacturing (AM) 技術と呼ぶことに統一された。RP、RM と呼んでいた時代は 3D のデータから一品物を素早く作る技術として、切削や金型利用の加工技術の試作としての位置づけであった。すなわち基本は切削やプレス加工での成形であり、3D-CAD で作ったデータや、形状測定データを基に素早く形にする事が主体であった。一方 AM 技術としては、粉末積層造形法の特徴を生かし、切削や金型加工では実現できない構造の作成技術として、新しい加工技術の位置付けでのものづくり技術となっている。表Ⅲ-2.18.1 に一般的な加工法との比較、図Ⅲ-2.18.1 に粉末成形システムの目指す姿を示す。この表と図で示した通り、RP、RM 時代の一品加工にも特徴があるが、切削、鋳造、鍛造・板金プレス加工では実現できない製品を自由に作成できる事が AM 技術としての最大の価値である。この自由度は粉末積層成形技術の作成方法に因るものである。粉末積層成形技術は、図Ⅲ-2.18.2 および、図Ⅲ-2.18.3 に示したように、最初に作成する構造を 3D のデータとして用意し、これを積層厚さ毎にスライスしたデータとして再構築する。製造システムでは、積層厚さ分の粉原料を正確に敷き詰め、スライスデータの造形部分だけをレーザーや電子線により結合させる。これを一層ずつ造形データすべての層を積み重ねることにより形状を生み出す。加工の厚さが積層厚さのため、切削では工具が入らない、鋳造では中子が複雑すぎて作れない、鍛造・プレスでは不可能な構造の内部を自在な形状に作成することが可能である。さらに結合させる領域の最小のサイズは粉の原料寸法やレーザーや電子線のビーム径、分解能等で決まるが、 $10\mu\text{m}\sim 0.1\text{mm}$  程度のオーダーとなる。粉の結合状態はレーザーや電子線によるエネルギーを変化させることにより調整可能であり、緻密な構造も、空孔を残すポーラス構造も作れる特徴がある。これらの特徴を生かして、複雑な内部構造により強度は十分だが軽量のユニット、熱交換の効率を最大化するような内部構造を持つ熱交換器、航空機・自動車等向けに、隙間を使った複雑形状の部品類等他の加工では実現できなかった部品を作成し、最終製品の高性能化や高機能化に資する技術としての真価が期待されている。特に医療用の人工関節等の製品は個人個人に応じた製品の実現が望まれるが、この粉末成形法を用いることにより実現可能であ



り、欧米を含め開発が進められている。

表Ⅲ-2.18.1 粉末成形法（積層造形）と一般的加工法の比較

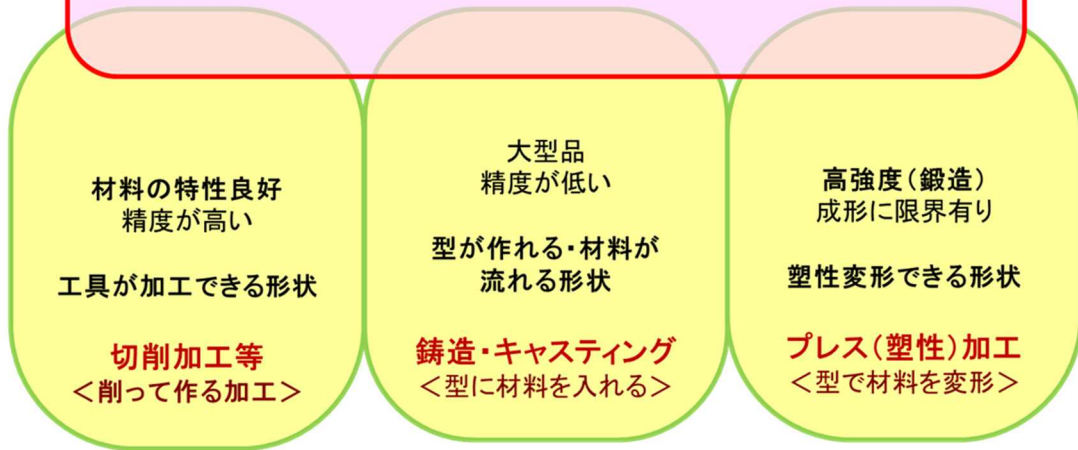
	粉末積層成形	切削等	鑄造等	プレス等
原料	粉末	ブロック状	溶融体	板・ブロック
成形方法	積み上げ	削り出し	鑄込み	変形
精度	△	◎	△	○
量産	○	○	△	◎
一品加工	◎	○	○	×
材料調整	○	×	○	×
自由な形状作成	◎ 成形に使わなかった原料の分離が可能な事等 僅かな制約	△ 工具が入り加工が出来る形状で 有る事	△ 型の形状・中子の固定等 ライナー部必要	△ 加工（塑性変形）の限界以下 型から外れる 加工方向が基本的には1方向
構造の自由度	◎	×	×	△ (部分的強化)

# 粉末成形システムの目指す姿

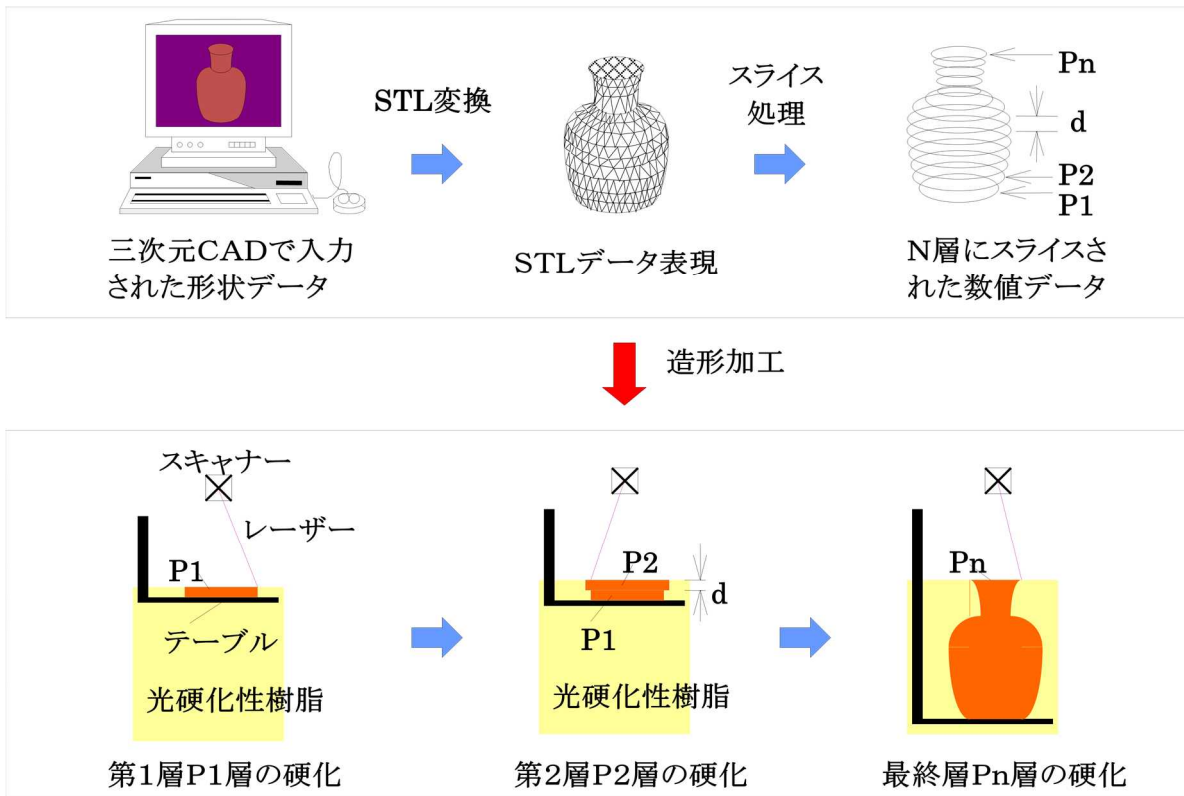
切削・鋳造・プレス  
の代替加工ではなく  
新しい加工システムとして  
自由な製品設計に寄与する

## 粉末成形システム

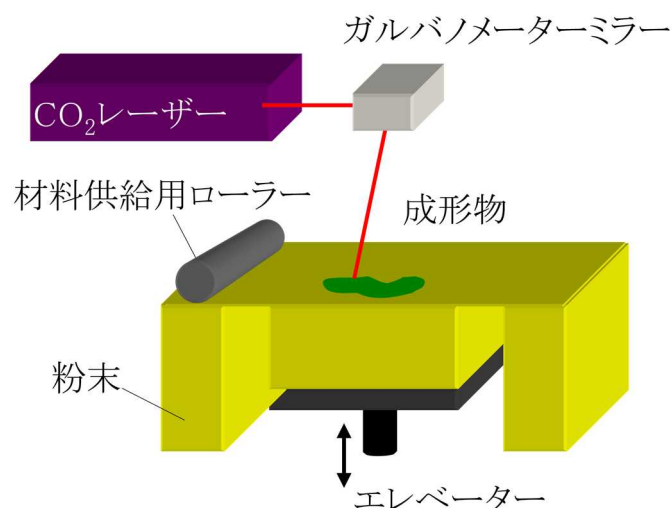
＜薄い層構造を作成し積み上げる＞  
形状の自由度が高い3D-CADの形をそのまま実現  
緻密・ポーラス等構造の違いを同時に作成  
粉を混ぜる～材質を制御できる



図Ⅲ-2. 18. 1 粉末成形システムの目指す姿



図Ⅲ-2. 18. 2 粉末積層成形の成形方法概要図



図Ⅲ-2.18.3 粉末積層成形装置の概要

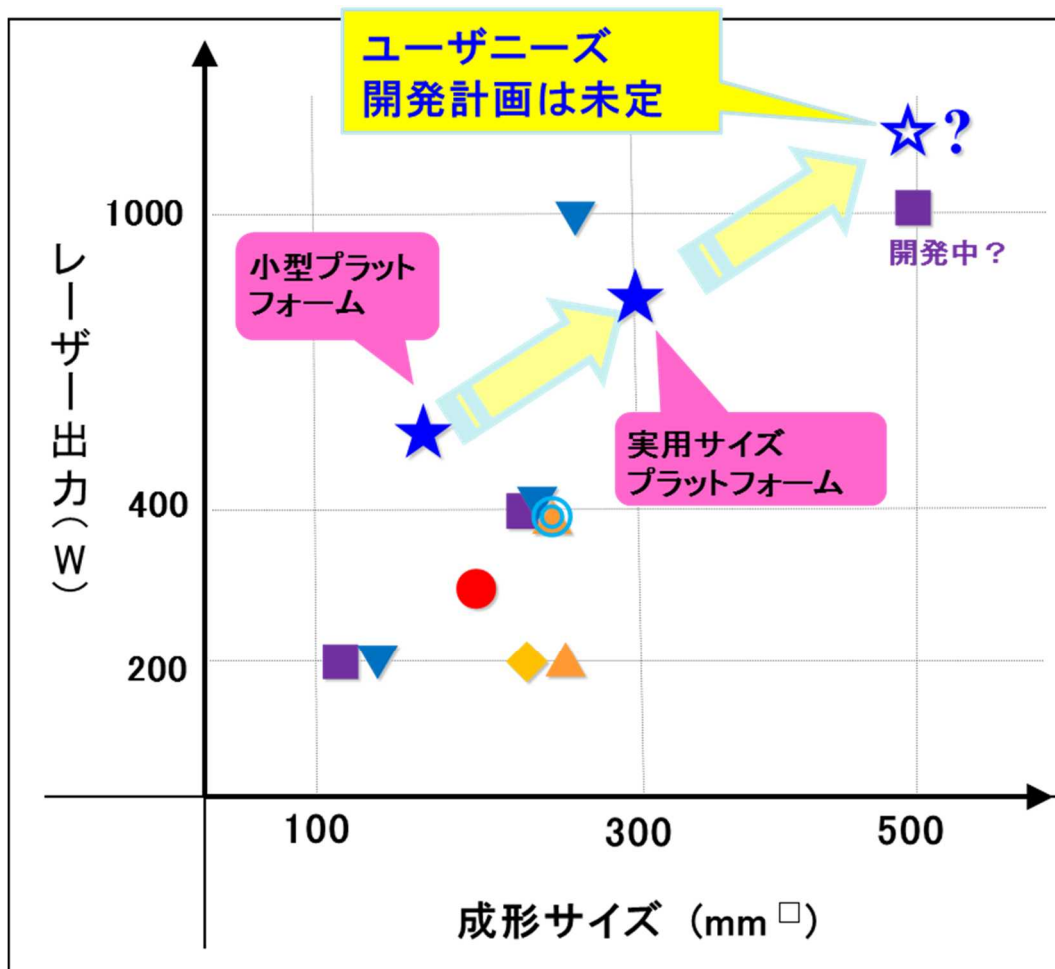
次に国内外での金属粉末による積層造形装置の開発動向について記載する。AM 技術はヨーロッパ、アメリカ、日本という先進国での開発が進んでいる技術であり、競合技術についてもこれらの地域・国による。図Ⅲ-2.18.4 に金属用粉末積層造形機の成形サイズとレーザー出力比較を示す。

ヨーロッパでは、ドイツに3社、イギリスに1社、スウェーデンに1社があり最大勢力となっている。A社は250×250サイズのプラットフォームのみで、CWの200Wと400Wの2種類の装置が製品化されているが、造形環境は造形室内に強制的に加圧アルゴンガスを注入したアルゴン置換雰囲気であり、酸素は完全に除去できていない。B社はA社と同じく250×250サイズのプラットフォームで、CWの200Wのみが製品化されている。造形環境はA社と同様である。C社は125×125、250×250、280×280の3サイズのプラットフォームが製品化されており、それぞれ全てCWレーザーの100W/200W、200W/400W、400W/1000Wという構成で、Low/High 2台のレーザーを搭載している。成形する部品の外郭は、低速度、Low Power、ガウシアンビームで走査し、内部構造の塗りつぶしは、高速度、High Power、ハットトップビームでレーザーを切り替えて走査をすることで高速性を高めるといった特徴を有している。D社は現時点では125×125 (CW200W)、250×250 (CW400W)の2サイズのプラットフォームを製品化している。500×500 (CW1000W)の大型サイズの開発をしているとの記事が2年ほど前に報じられていたが、いまだ製品化はされていないようである。C社とD社は真空注型装置も事業として手がけていることから、造形環境を一旦真空にしてから加圧アルゴンガスを注入しており、A社やB社の装置よりも造形環境における酸素濃度が低く抑えられているようである。F社は200×200サイズとやや小さめのプラットフォームであるものの、光源としては唯一電子線描画を持ち、装置の能力としては非常に高出力で高速な電子ビーム走査が可能であるが、実ユーザーからの情報に依れば、実際の成形では300W程度の出力で走査しているとのことである。なお、F社の装置は電子線を利用する関係で $10^{-2}$ Pa程度の真空造形室での加工を行っている。

日本では E 社がある。E 社は加工精度を高めるため、造形室内に NC の工作機械を内蔵し、粉末造形と NC 切削加工を交互に行うシステムとして特徴がある。E 社の装置は金型の要求精度を満足するために開発された金型造形用の専用機として開発されたが、最近では部品の成形も可能なようになってきているようである。

アメリカでは G 社が D 社の OEM 供給を受けているが、自社開発はしていない。ただし、アメリカにおいては 2012 年より 3 年弱のプロジェクトとして、DoD (Department of Defense) , NASA, DoE、NSF 等が 300 万ドルの予算規模の開発を進めることになっている。したがって、日本国内の活性化を進めないと自動車・航空機・医療等の産業における最終製品での優位性が危惧される。

以上を踏まえ当初医療用の製品製造技術として、チタン合金をターゲットとした粉末成形システムの開発を行うこととした。人工関節では患者の体格によるが最大 250mm 程の大きさが求められることもあり、300mm クラスの製品を自在に作れることをターゲットとしている。この大きさであれば、波及効果として自動車や航空機等への展開も期待できる。



- ▲A社(独)
  - 250<sup>□</sup>, 200W (CW)
  - 250<sup>□</sup>, 400W (CW)
- ◆B社(独)
  - 250<sup>□</sup>, 200W (CW)
- ▼C社(独)
  - 125<sup>□</sup>, 100/200W (CW, 切替)
  - 250<sup>□</sup>, 200/400W (CW, 切替)
  - 280<sup>□</sup>, 400/1000W (CW, 切替)
- D社(英)
  - 125<sup>□</sup>, 200W (CW)
  - 250<sup>□</sup>, 400W (CW)
  - 500<sup>□</sup>, 1000W (CW, 開発中?)

- ◎E社
  - 250<sup>□</sup>, 400W (CW)

**真空成形環境**

- F社(スウェーデン)
  - 200<sup>□</sup>, 50-3000W (電子線)
  - 300W (実使用出力)
- ★本プロジェクト
  - 150<sup>□</sup>, 500W (QCW平均実力値)
  - 300<sup>□</sup>, 500W+300W (重畳)

図Ⅲ-2. 18. 4 金属用粉末積層造形機の成形サイズとレーザー出力比較

## 2.18.2 研究開発目標と根拠

これらの開発状況等を踏まえ、既存技術より進化したシステムとして開発を行う事を目標に、1) 真空成形技術、2) パルスおよび重畳レーザー技術、という二つの特徴を持つ装置を開発することとした。また他社製品では、ベースプレートと呼ぶ金属板を設置し、その上に造形を進める手法を中心としているが、不連続な造形や、重ねて多数の製品の成形を行えるようにベースプレートを使わない技術としての確立を目指した。

具体的な目標としては、中間目標として

- ① 真空下においても動作可能な粉末焼結積層造形機構を開発すること。
- ② 異なる発振形式のレーザーを用いた複合レーザー照射方法を確立すること。
- ③ 複合レーザー照射による粉末積層造形メカニズムを明確にしつつ、加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）を最適化すること。
- ④ レーザー加工試料の評価技術を構築すること。

の4項目である。真空中での成形装置は電子線を利用するF社製のものが唯一あるが、レーザーを使用した装置は存在していない。また、レーザーについても市場にある全ての装置はCWレーザーを利用しているものであり、複合レーザー照射の照射方法、プロセス条件は未知である。真空下での装置を目標としたのは、金属材料の造形において、粉末の金属材料は粒子径が小さくなると消防法上の危険物の指定を受けているように、空気中の酸素との反応が強く、場合によっては発火・爆発等の危険を伴うリスクがある他、製品についても酸化し品質の低下を招く。特に粉末成形では、製品を薄くスライスし積み重ねるため、製品の内部まで酸化した状態となるため、酸化防止の対処が必須である。通常市場の装置では不活性ガスを利用しているが、原料のストック部に大量に入れた粉の中に含まれる空気分を完全に除去することは難しい。一方真空では、 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$  オーダーの真空度を確保すれば、内部の分子の平均自由行程が1m程度となり、容易に酸素分圧を下げられる。さらに粉の表面の水分の吸着なども考慮しておくことが必要だが、真空下の方が蒸気圧が下がるため脱離しやすくなり、この点においても酸化リスクの低減が図れる。また仮に不活性ガスを導入する場合にも一度真空にしてからの導入する方が、酸素分圧を下げやすく安定した加工に繋がる。そこで今回の開発では真空での装置開発とした。一方、真空装置にも課題があり、積層造形の機構上、駆動部が多く、特に駆動機構の真空シール部への金属粉の影響は明らかではない。金属粉の装置内への浮遊（特に真空の引き始め・ベントによる大気解放時）の発生のしやすさ等の課題等解決が必要な内容を持つため、まずは装置を具現化し各種の条件に付いて最適化を進めることを第一の目標とした。その後その結果を踏まえ実用化サイズの装置を開発し、300mmクラスの人工関節等の試験作成を実現することとした。

加えてレーザー光源についても市販の装置は全てCW光を利用しているが、製品品質の向上を目的とし、パルス光の優位性を生かした装置開発とした。CW光では、製品製造時にはレーザーパワーと走査のパラメータが利用可能なパラメータとなる。一方パルス光では繰り返し周波数、duty というパラメータの利用が可能となる。熱を与えない時間が存

在することにより、材料の温度を下げる効果と、空間的に熱を与える領域、与えない領域を生み出す事が可能という違いがある。自由な形状をした製品は小さな領域だけを造形する場合と広い面積を造形する場合があり、造形の条件を変化させる必要がある。連続した線で塗りつぶす CW では均質化が難しいが、無数の点により描画するパルス光では安定した造形が可能となると期待できる。さらに、パルス光だけでは平均的な熱量が不足する場合、弱い CW 光と重畳することにより安定造形する手法について開発を目指す。パルスレーザーと重畳レーザーについては大阪大学を中心に開発し、ALPROT において開発する加工装置と組み合わせ実現する。既存の加工法と異なるため、レーザー光の照射方法の確立や、加工条件の最適化が重要であり、これを中間目標としている。

また、造形品についてその特性評価技術は、バルク材料と同等の試験方法はあるが、粉末造形では欠点として内部に空孔を持つような欠陥を生じるリスクがあり、このリスクに対して評価できる手法が望まれる。装置が完成し試験片の開始後評価方法について構築することとした。

最終目標としては

- ① 成形精度：±0.1 mm (100 mm サイズ基準パーツ)
- ② 成形時間：16 時間以内 (高さ 100 mm サイズ基準パーツ)
- ③ 引張強度：チタン合金 840 MPa 以上 (生体部品用途)

である。中間目標において造形技術が確立したのち、粉末造形技術を実用的な装置として利用可能にするための目標値として設定している。それぞれの目標値の位置づけとして、成形精度は粉末成形の欠点とされており、原料の粉の粗さが表面に残る点と、粉の隙間に生じる空孔を埋めるためと材料の縮小、残留応力等を原因とする精度の低下がある。現在市場の他社製品では実際の成形精度が±0.2mm 程度であり、その半分を成形目標とした。

成形時間は金属粉末積層造形装置のユーザーに事前ヒアリングしたところ、現在使用している金属粉末積層造形装置で高さ 100mm のものを造形するのに、現状 20 時間程度かかっているとのことなので、その能力の 2 割アップの設定とした。

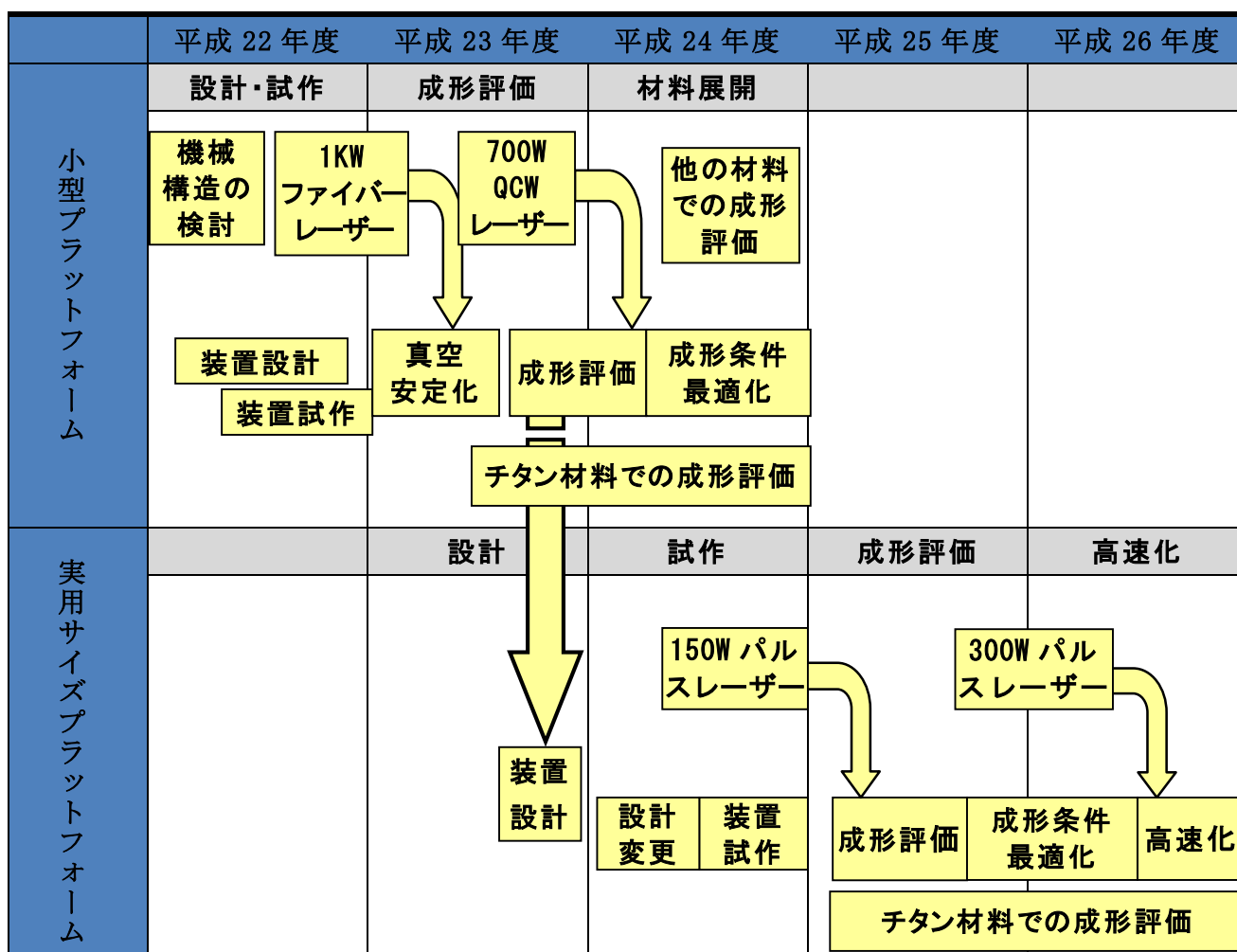
引張強度は、医療用チタン材に関する ASTM F136 の Ti-6Al-4V ELI 規定値 795MPa (0.2%耐力) の 5%増しの値とした。この規格を満足しないと製品化は実現できない。なお、国内で調達できるチタン原料粉は JIS 規格に基づき購入でき、バルクの規格として 930MPa である。その 1 割減である。なお、“ELI”は Extra Low Interstitial Elements で、エリー材と呼ぶ 64 チタンの材料の一種である。Ti-6Al-4V でも「酸素、窒素、水素及び鉄の含有率を特別に低く抑えている」材料である。

### 2.18.3 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを、表Ⅲ-2.18.2 研究開発スケジュール に示す。平成 22 年度と平成 23 年度は実用型のプラットフォームの作成に先立ち、小型のプラットフォームを用いた、真空装置、リコータ、シリンダ等の設計・試作・動作確認等を経て、同装置を用いた成形実験を行い評価および最適化を実施した。これらの結果を同時進行的に実用化サイズプラットフォームの設計へ反映させた。平成 24 年度には実用型プラットフォームの試作を完了し、ALPROT と大阪大学で開発する重畳型レーザーを搭載し、高品質な成形試験を行い実用化へ繋ぐ。

なお、平成 24 年度については、計画変更を行いチタン以外の材料についても成形の実験を行い、医療以外の分野への実用化展開を早期に実現できるようにする。そのためユーザーからのニーズ調査などを行い、ニーズの高い材料について検討する。

表Ⅲ-2.18.2 研究開発スケジュール





#### 2.18.4 研究開発目標と達成状況

中間目標の達成度については現時点では以下の通りである。

(達成度の基準：◎大幅達成、○達成、△今年度達成見込み、×未達)

- ① 真空下においても動作可能な粉末焼結積層造形機構を開発すること。  
真空下においても動作可能な粉末供給や積層動作に適合した部品選定と機械構造を検討し、成形環境を真空にした小型プラットフォームの試作を完了した。  
したがって達成度は○とした。
- ② 異なる発振形式のレーザーを用いた複合レーザー照射方法を確立すること。  
大阪大学と連携して、複合レーザー照射方法として、穴あきミラーを使用する方式や、偏光ミラーを使用する方式も検討したが、ダイクロイックミラーを使用して重畳する方式が2ビームの結合効率が一番良いことから、最終的にダイクロイックミラーを使用複合レーザー照射方法の確立を進めている。今年度中には完了見込みだが現時点では準備中であることから、達成度は△とした。
- ③ 複合レーザー照射による粉末積層造形メカニズムを明確にしつつ、加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）を最適化すること。  
QCW レーザーを小型プラットフォーム機に搭載し、CW レーザーと、パルスレーザーでの成形物の違いの評価と加工プロセスの最適化を実施中である。平行して大阪大学のパルスレーザーを用いて照射実験を実施することにより、粉末積層造形メカニズムの明確化を進めている。  
今年度中には完了見込みだが現時点では完了していないことから、達成度は△とした。
- ④ レーザー加工試料の評価技術を構築すること。  
チタン粉末による成形物の形状を定め、それを分析することにより、成形条件と成形物の組織、構造、密度、機械物性の評価と評価技術の構築を実施した。したがって達成度は○とした。

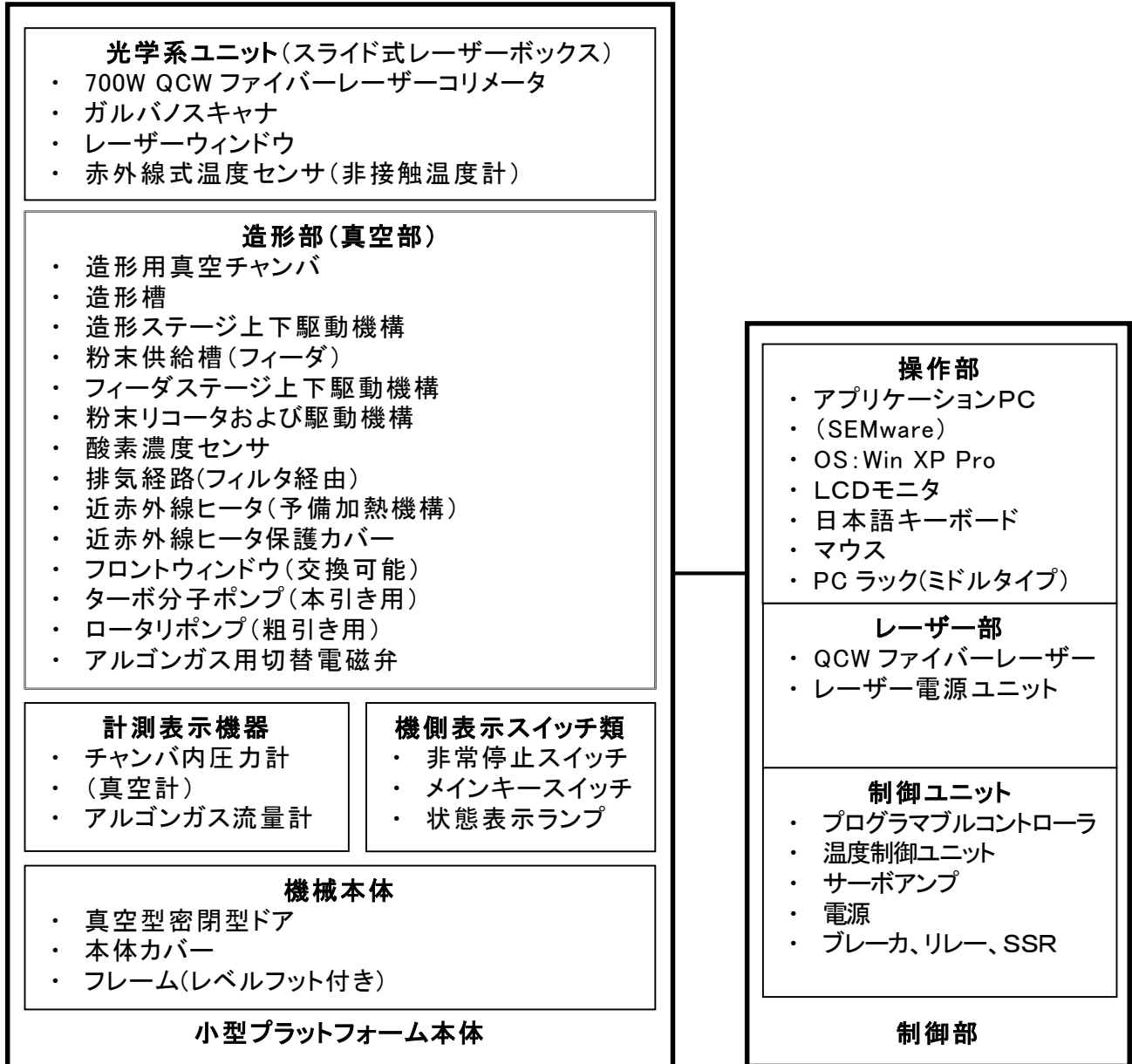
### 2.18.5 成果の詳細

以下現在までの開発の状況について記す。

真空下においても動作可能な粉末供給や積層動作に適合した部品選定と機械構造を検討し、成形環境を真空にした小型プラットフォームの試作を完了した。機械構造としては、ステンレスおよびアルミを使用した真空チャンバ内に造形用のシステムを組み込む方式を採用した。図Ⅲ-2.18.5 に小型プラットフォーム外観、図Ⅲ-2.18.6 に小型プラットフォーム試作機のシステム構成図、表Ⅲ-2.18.3 に小型プラットフォーム試作機の基本的な仕様を示す。



図Ⅲ-2.18.5 開発した小型プラットフォームの外観



図Ⅲ-2. 18.6 開発した小型プラットフォーム試作機のシステム構成図

表Ⅲ-2. 18.3 小型プラットフォーム試作機の基本的な仕様

機械本体	
有効ワークエリア	X:120 × Y:120 × Z:200 mm
造形ステージサイズ	X:150 × Y:150mm (レーザービーム最大照射範囲 X:135 × Y:135mm)
最小積層ピッチ	0.05mm
造形室構造	真空構造(真空圧 $10^{-2}$ Pa 以下) 真空ポンプは、ロータリポンプ(粗引き)とターボ分子ポンプ(本引き)の2種類を使用
材料酸化防止、真空開放機構	不活性ガス(アルゴンガス)充填(酸素濃度センサ付き)
造形ステージ駆動機構	AC サーボモータボールネジ駆動方式
粉末積層機構	片持ち構造ブレードリコータ(ローラリコータ搭載可)
粉末材料供給方式	非交換カートリッジ方式
材料加熱	真空用近赤外線クォーツヒータ
レーザー光学系	
搭載レーザー	プロジェクト新規開発品 QCW ファイバーレーザー
レーザービーム走査	ガルバノミラー方式 (近赤外線仕様、リニアトランスレータ付き)
制御部	
機械制御装置	プログラマブルコントローラ
データ処理装置	デスクトップパソコン Pentium4 3GHz 以上 17 インチ液晶モニタ Windows <sup>®</sup> XP Professional
アプリケーションソフトウェア	日本語オリジナルソフトウェア SEMware
入力データ	STL フォーマット
その他	
電源	AC200V 三相 20A(ヒータ) AC200V 単相 30A(QCW レーザー用) AC200V 単相 10A(レーザーチラー用) AC100V 単相 30A(制御用)
動作環境	20℃～28℃(造形中は±2℃以内), 湿度 70%以下
寸法および重量	本体:1,260(W)×963(D)×662(H) 制御装置:853(W)×557(D)×700(H) 総重量:500kg

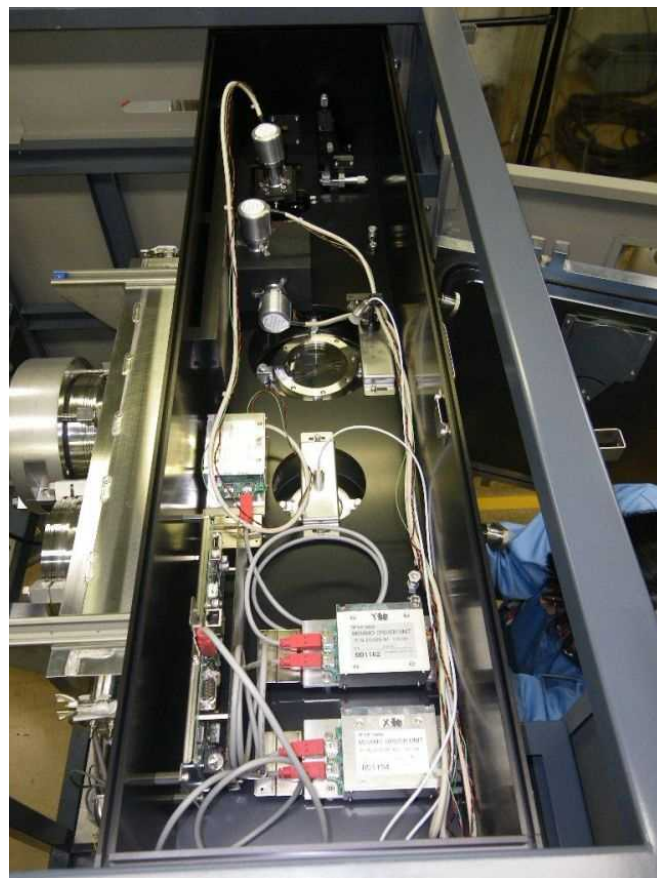
造形装置の構成としては、原料となる粉末を準備しておく粉末供給槽（フィーダ）、フィーダから造形場所に金属粉末を敷くリコータという粉末積層機構、真空装置外に設置したレーザー光源とガルバノ・ミラー・スキャナという光源関連装置、真空チャンバと真空ポンプの真空機構、制御用 PC や各種センサ類という制御機構から構成される。順次開発した内容を以下に記す。

粉末積層機構としては、金属粉末材料は樹脂粉末材料に比較して比重が大きく、同じ容量を取り扱おうと大荷重に耐える構造で製作する必要がある。たとえば今回の研究開発では 6-4 チタン (Ti-6%Al-4%V) 合金を使用しているが、この比重は 4.7 程度である。大気圧の窒素ガス雰囲気下の装置では樹脂材料を用いているが、その比重は最大でも 1.5 程度なので、3 倍以上重たいことになる。150×150×200 の造形ボリュームに多少の余裕分が加わり、単純計算では最大で 21kg 程度の重量となる。しかし、粉末のかさ密度は高くても 0.5 程度なので、実際の粉末の重量は「容積×比重」の約半分程度で、10kg 程度となる。なお、金属粉末材料は造形開始後に粉末供給槽（フィーダ）から徐々に造形槽に移動するため、造形ステージとフィーダステージは荷重の変動にも耐える構造になっていなければならない。したがって、造形ステージ駆動機構およびフィーダステージ駆動機構には、図 III-2.18.7 に示す通り、大荷重とその荷重の変動にも影響されにくく精度の高い位置決めが可能な AC サーボモータボールネジ駆動方式を採用した。粉末積層造形装置では造形エリアに取り付けたステージ機構を用いて 1 層分の厚さを下げる。逆にフィーダ側では一層分の粉の量に相当する厚さ分、ステージを持ち上げる。持ち上がった粉末はリコータを用いて造形エリアに敷くことになる。フィーダと造形部では、造形高さに安定分のボリュームを加えた量を保持し、かつ各層 0.1mm 以下で正確に動作させる必要がある。さらに粉末の出し入れのためカートリッジ式の造形構造を作る方が有利であり、そのための着脱機構および、真空容積をできる限り小さくする方が真空度を高くするのに有利であること、真空内は機械油などの利用が不適であり、駆動機構は真空外に設置する必要があることから、各種の機構を新規に開発し、チタンを設置した場合にも 0.01mm での精度での動作が可能となっている。

光源関係の構成としては、装置外に設置したレーザー光源から光ファイバーを利用し装置へ導入する。粉面上にフォーカスしたレーザー光を走査するため、デジタル制御式ガルバノ・ミラー・スキャナ装置（図 III-2.18.8）を設置し、レーザー光を X Y Z 方向に走査しながら必要な造形パターンへの照射を実現している。ガルバノ・ミラー・スキャナは真空外に設置されているため、真空内の造形粉面へは真空装置の上面境界に取り付けられたレーザーウィンドウ（光学窓）を経由して導入している。ガルバノスキャナでのレーザー光の走査速度は粉面上で最大 2m/s とし、最終目標である高速造形速度を確保できるようにしている。今回の装置では、金属造形の最適化として、造形形状や走査パターンに応じてレーザーパワーや走査速度を変化させる高度の制御を行えるようにしてある。



図Ⅲ-2.18.7 AC サーボモータボールネジ駆動方式



図Ⅲ-2.18.8 ガルバノ・ミラー・スキャナ装置

真空チャンバとしては、ステンレス製の容器とアルミ製の扉機構を持ち、内部に原料粉の供給様フィーダ、造形エリア、原料粉のリコータ、余分な原料粉を改修するボックスからなり図Ⅲ-2.18.9のような内部構造となっている。真空ポンプには、粗排気用ロータリベーンポンプ（図Ⅲ-2.18.10）と主排気用ターボ分子ポンプ（図Ⅲ-2.18.11）を設置し、実際の成形条件で $1 \times 10^{-3}$  Pa程度が確保できている。真空計としては、ピエゾ式とホットフィラメント式真空計を設置してある。ターボ分子ポンプは400L/minクラスのポンプであり、装置サイズが小型といえる点からも十分な性能である。実際の成形試験では、ロータリベーンポンプクラス $2 \times 10$  Pa程度では、残留酸素の影響によると思われる製品の変色が見られ十分な成形とならなかった。ターボ分子ポンプの効果が見られる十分な真空度としては $2 \times 10^{-2}$  Pa程度と見込んでおり、ここまでの真空度への到達時間は30分弱であった。真空到達時間は短いに越したことは無いが、真空引き開始後に他の造形準備作業があるため、実用上は全く問題がなく、製造装置としても十分な性能とすることができた。時間経過に対する真空圧のグラフを図Ⅲ-2.18.12および図Ⅲ-2.18.13に示す。図Ⅲ-2.18.12は粗排気用ロータリベーンポンプによる真空圧、図Ⅲ-2.18.13主排気用ターボ分子ポンプによる真空圧を示している。主排気用ターボ分子ポンプは粗排気用ロータリベーンポンプが動作開始して18分経過後に動作開始しており、図Ⅲ-2.18.13の横軸の時間はその後の経過時間を示している。



図Ⅲ-2.18.9 真空チャンバ内部の様子

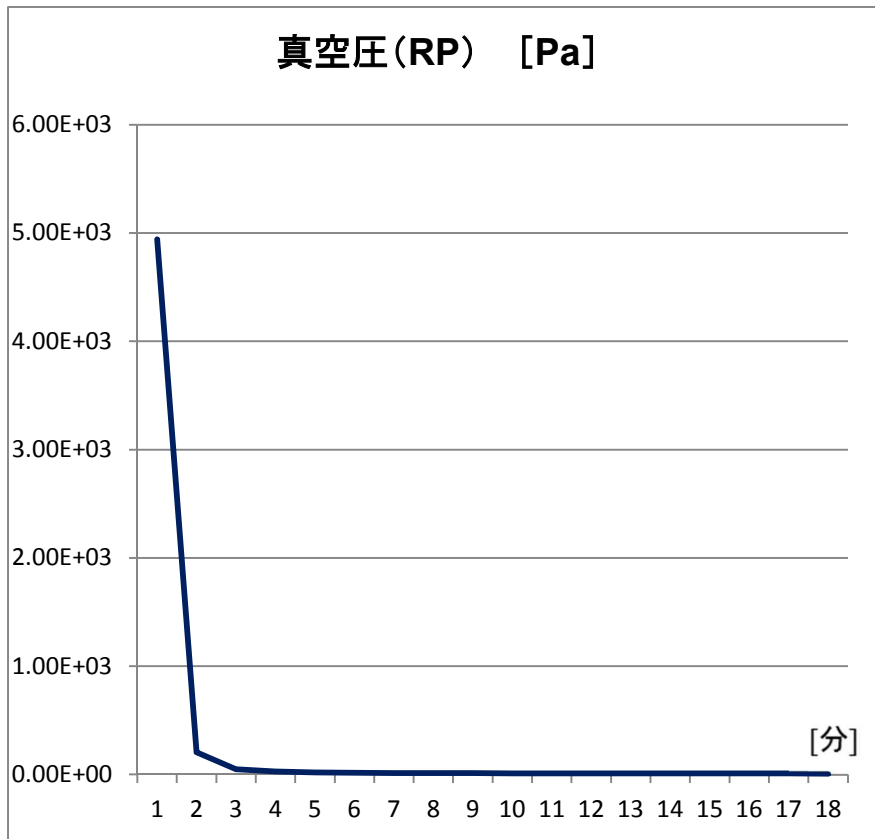


図Ⅲ-2. 18. 10 粗排気用ロータリベーンポンプ

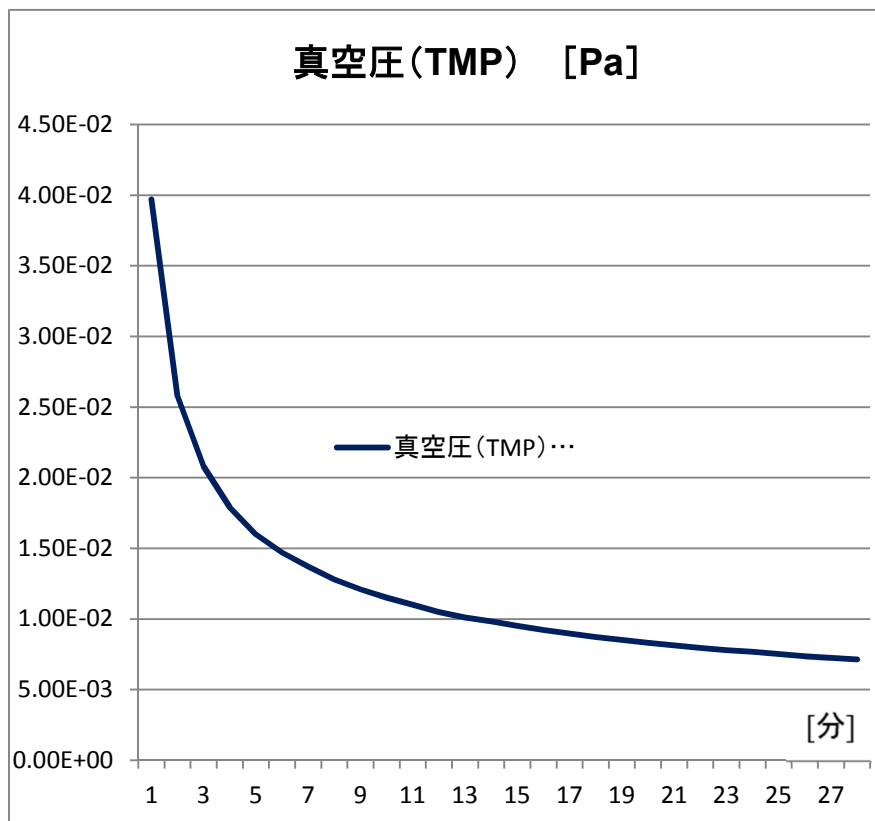


図Ⅲ-2. 18. 11 主排気ターボ分子ポンプ





図Ⅲ-2. 18. 12 粗排気用ロータリベーンポンプによる真空圧



図Ⅲ-2. 18. 13 主排気用ターボ分子ポンプによる真空圧

ソフトウェアについては、アスペクト社製の粉末積層造形装置 SEMplice シリーズのアプリケーションソフトウェア SEMware をベースとし、真空型小型プラットフォームへの対応として、チタン成形の安定成形、成形物の高密度化や高精度化を図るための改良を実施した。

光源関係としては、プロジェクトで開発したレーザーが提供されるまでの期間において、当初は溶接用の 1KW ファイバーレーザー (CW) を搭載し開発を進めたが、レーザー出力をリアルタイムに変更できないことや、ガルバノ・ミラー・スキャナの走査速度に対しての出力応答に遅れにより、最適成形条件を十分に導くことができなかった。しかしながら、全体として大まかなパワーの算定や、スキャン方法等に関する知見を得ることができた。金属 (チタン) 粉末では樹脂粉末とは状況が異なり、細かな制御が必要であることが明らかとなった。実際にチタン粉末をしっかりと焼結させるレーザー出力でいきなり成形を行った例を図 III-2.18.14 に示すが、開発初期の成形品は表面がでこぼこしたり数珠玉のように丸まって溶けたりする現象が確認できた。この状況では製品の凹凸が大きく、リコータブレードによる粉敷きの際に積層厚さ 0.2~0.3mm はこの凹凸の方が高く、リコータブレードと成形物が接触し、粉内で動かしてしまい、安定した成形は実現できなかった。



図 III-2.18.14 開発初期の成形品

造形装置の高度化にはレーザー光源の変更が重要であった。パルスレーザーについては、短時間での熱吸収、熱伝導速度以下での加熱の終了という瞬間的な熔融凝固は表面張力による球状化を抑える、蒸発も抑える等の効果が期待できるので、プロジェクト内での開発を進めているが、現時点では未完成状況である。そこで、このパルス状加熱、安定加熱という状況を確保するため、計画を変更し、プロジェクト内で切断用として古河電工が開発していた QCW レーザーを利用した実験を行うこととした。平成 23 年度末にレーザー装置を導入しパラメータを自在に変更した実験を開始した。特に立体形状においては、作成形状での走査線の長短・それまでの成形形状ボリュームによる熱の蓄積、下層の造形物の有無等が異なる状況での造形が必須である。このような初期状態の違いを踏まえたうえで安定な造形を行う必要がある。

これらの結果を踏まえ、より複雑な形状を持つ製品の造形実験を行った。図Ⅲ-2.18.15は試作した小型プラットフォーム機で成形したチェスの駒のサンプルである。加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）の最適化により反りのない形状が現されていることに加え、真空下で成形したことからチタンの金属色が損なわれていないことがわかる。



図Ⅲ-2.18.15 小型プラットフォーム試作機で成形したチェスの駒

以上述べたように小型プラットフォームの試作が完了し、成形条件の構築を進めている。装置性能としては現在十分なレベルである。この成果を踏まえ実用化プラットフォームの試作機の設計と製作にかかっている。現在詳細な設計の修正や本プロジェクトで光源グループが開発した 700W QCW レーザーを小型プラットフォーム機に搭載し、CW と、疑似パルスでの成形物の違いの評価を進めており、平行して大阪大学のパルスレーザーを使用した照射実験を進めることにより、粉末積層造形メカニズムの明確化を進めている。加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）の最適化については引き続き実施中である。

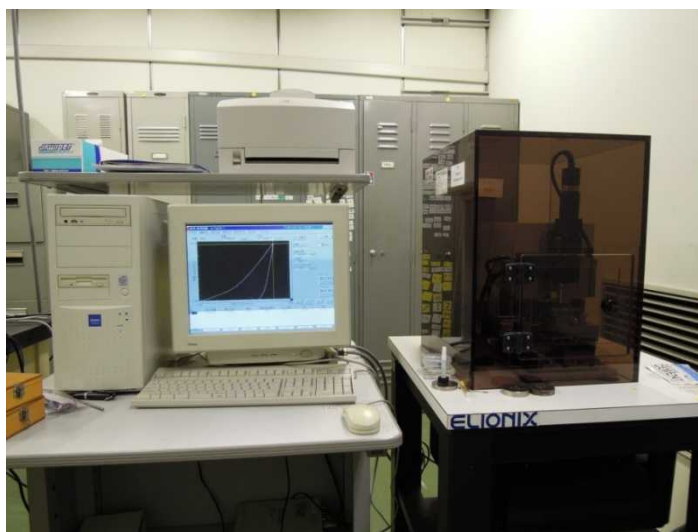
異なる発振形式のレーザーを用いた複合レーザー照射方法の確立については、大阪大学と連携しダイクロイックミラーを使用して重畳する方式で製作を進めている。

レーザー加工試料の評価技術としては、光学顕微鏡、SEM(Scanning Electron Microscope)等による観察、機械的強度評価および X 線 CT スキャナによる内部構造評価等を実施している。機械的強度評価としては、マイクロ硬さ試験機を用いた硬さ測定、引張試験である。

密度測定は、現状として開放型ポーラス構造部があるためにアルキメデス法が不適當であることから、形状寸法と重量から求める手法とした。その結果、初期の溶接用レーザー用いたサンプルでは緻密な Ti6Al4V 合金の値に対し 50%程度と空乏が多いことが判った。その後造形条件の見直しから 70%程度に向上している。現在さらに高密度化するための条件出しを行っている。

硬さ測定には、エリオニクス社製、ENT-1100(図Ⅲ-2.18.16)を用い三角錐形 Berkovich 圧子 先端稜間角  $115^\circ$  を用い、荷重 5g、保持時間 10 秒で実験した。測定結果について、200W 造形の測定結果を図Ⅲ-2.18.17 に、レーザーパワー毎の平均値を図Ⅲ-2.18.4 に示す。図Ⅲ-2.18.17 の様に測定にばらつきが生じている。結果は  $288\sim 369 \text{ mgf}/\mu\text{m}^2$  と

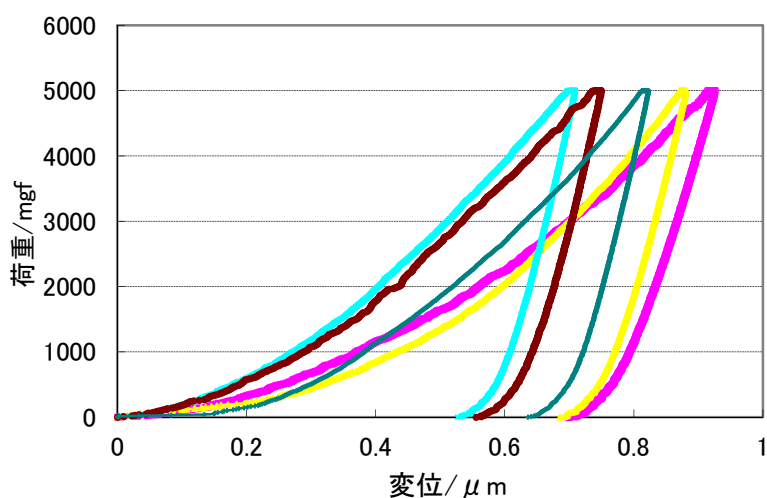
なった。測定方法の違いの影響があり相当値としての比較になるが、Ti6Al4V 合金の JIS 値 375 HV に比べ若干低い値と考えられる。内部の焼結が不十分であり、空孔が生じていることによる影響は測定結果の標準偏差の大きさに現れたと考えられる。



図Ⅲ-2.18.16 エリオニクス社製硬さ試験機 ENT-1100

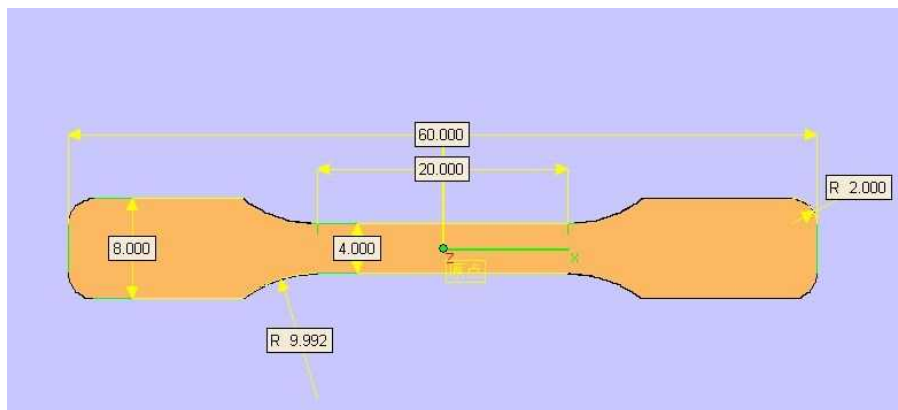
表Ⅲ-2.18.4 硬さ測定例

レーザーパワー(W)	硬さ (mgf/ $\mu\text{m}^2$ )
120	305 $\pm$ 65
150	354 $\pm$ 61
200	288 $\pm$ 65
300	369 $\pm$ 33



図Ⅲ-2.18.17 硬さ測定例 (200W)

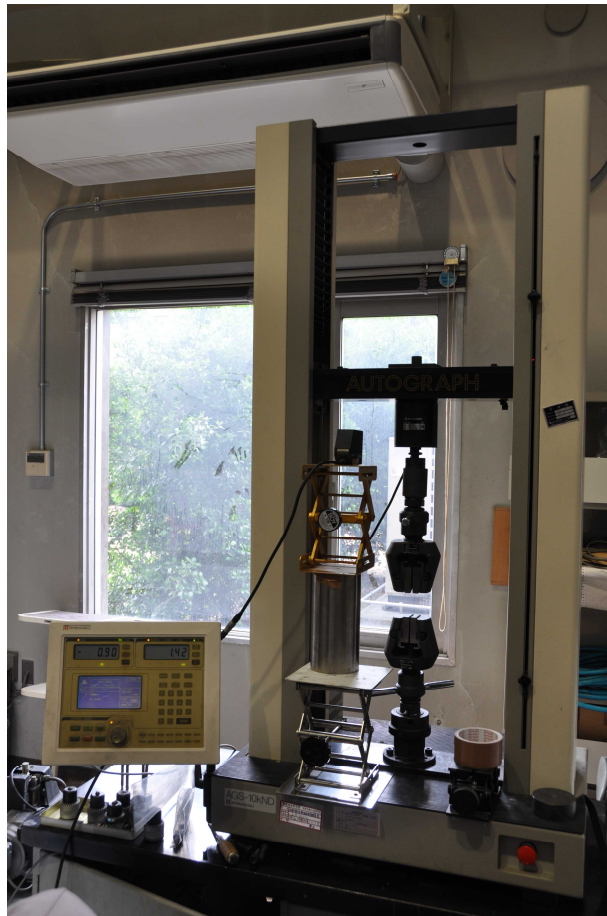
引張試験については、島津製作所製 Autograph AGS-10 kND を利用して行った。引張速度一定で実験し、5mm/min で実験した。ロードセルは 10kN の物を用いた。変位はキーエンス社製のレーザー変位計を用いて測定ベッドの位置を用いている。今回は試験片のサイズが小さいのと十分な強度が得られていないので、ひずみゲージや評点間の計測は行わず、概算による算出とした。図Ⅲ-2.18.18 にチタン粉末による成形物の機械物性評価形状、図Ⅲ-2.18.19 に実際の試験片、図Ⅲ-2.18.20 に試験装置の写真を示す。荷重変位線図の例を図Ⅲ-2.18.21 に示す。結果はほぼ直線的に伸び、破断している。破断面を観察すると、図Ⅲ-2.18.22 のように層状構造が見られ、全体の焼結となっていない事が分かる。そのため、空孔も多く実際の断面積が小さい点と、焼結が行われた薄膜層の集合体としての測定になったため、十分な強度となっていない事が分かった。破断強度は 190~198MPa になった。今後積層間隔を小さくして焼結状態を向上する必要がある。



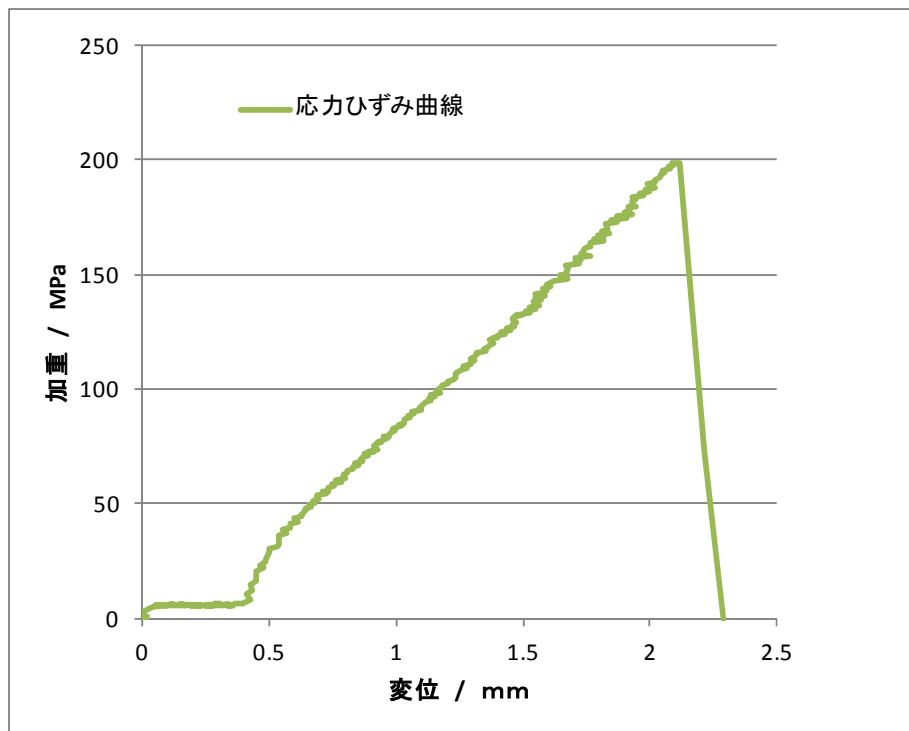
図Ⅲ-2.18.18 チタン粉末による成形物の機械物性評価形状



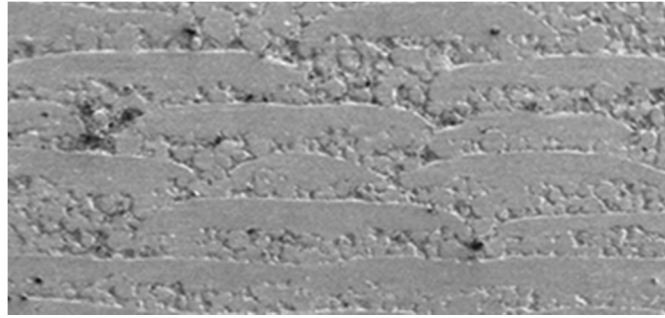
図Ⅲ-2.18.19 実際に作成した引張試験片



図Ⅲ-2.18.20 引張試験機（島津製作所 AGS-10kND）

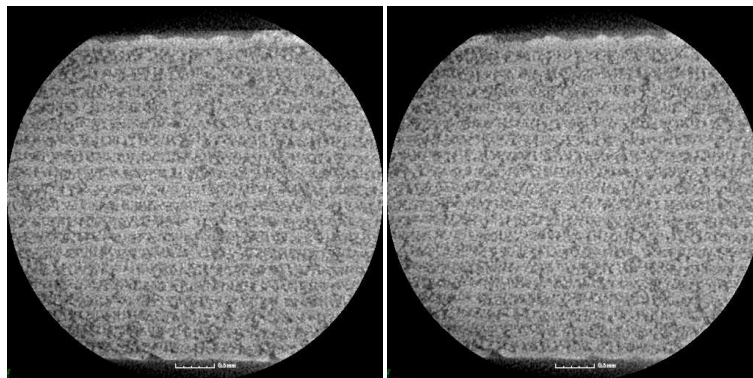


図Ⅲ-2.18.21 加重変位線図



図Ⅲ-2. 18. 22 試験片断面

さらに CT スキャナを用いた内部構造評価を行った。実験は XMS 社（ヤマト科学）TDM1000H-S $\mu$  / TDM1600H-II を用いている。タングステンフィラメントを用い、100keV の加速電圧である。サンプル中の  $\Phi$ 5mm、長さ 5mm の領域を測定した。試験片の長手方向の位置の違いによる断面写真を図Ⅲ2. 18. 23 に示す。この試験片は溶接用レーザーを用いた 200W 造形サンプルである。位置が変わってもほぼ均一に溶融が進んだ面と不十分な面が積層構造となっている事が分かる。断面を切断し、光学顕微鏡・SEM で観察した場合と同じ結果であり、CT スキャナを用いると非破壊で内部構造が把握できる事が分かる。サンプルの層の間隔は 0.2mm であり、レーザーの溶融が表面に留まり、内部まで十分に結合できていない様子が分かる。レーザー光の吸収は表面で生じるため、表面の温度は十分に上がるが、粉の接触点からの伝熱がまだ不十分で内部まで十分な溶融には至っていない。積層間隔と粉末の粒度分布を変えて、リコート後のかさ密度を可能な限り向上する事が有効な解決策と予測している。



図Ⅲ-2. 18. 23 CT スキャナ測定例(200W 造形品)

測定位置で（左）26 層目、（右）256 層目

以上の結果から、粉末積層造形品の評価としては、非破壊で内部構造が大きく検討できる X 線 CT スキャナが非常に有効であること。引張試験も強度測定には有効であるが、硬さ試験は必ずしも実際の品質を表していない事が分かる。

## 2.18.6 最終目標の達成の見通し

最終目標の達成度については現時点では以下の通りである。

### ① 成形精度：±0.1 mm（100 mm サイズ基準パーツ）

現在のところ+0.2mm である。熱の伝わりにより想定より大きな領域が焼結しているためと考えられ、複合レーザーによる微妙な熱量の制御に加え、より正確な温度制御とそれに併せた描画条件の設定により最終目標値の達成を目指している。また造形寸法により成形精度が異なっている。補正プログラムの最適化等を検討し、最終目標値の達成を目指す。

### ② 成形時間：16 時間以内（高さ 100 mm サイズ基準パーツ）

一番大きなチェス駒（キング）の高さは 77mm で、成形時間は約 4 時間であることから、高さ 100 mm サイズ基準パーツを造形した場合には比例計算で 5 時間半程度と予測できる。現在密度が低く、焼結のためレーザー照射時間を延ばして対応する、粉の大きさを小さくして積層厚さを薄くする等による対応策を検討しているが、時間にして 2.9 倍の余裕があるので、目標値は達成できると考えられる。

### ③ 引張り強度：チタン合金 840 MPa 以上（生体部品用途）

190MPa ～198MPa と現状は低い。密度が低く、ミルフィーユ型の積層構造となっている事が原因である。積層間隔を小さくして厚さ方向の焼結状態の改善により最終目標値到達を目指す。



## 2.18.7 知的財産権及び成果の普及

(発表等)

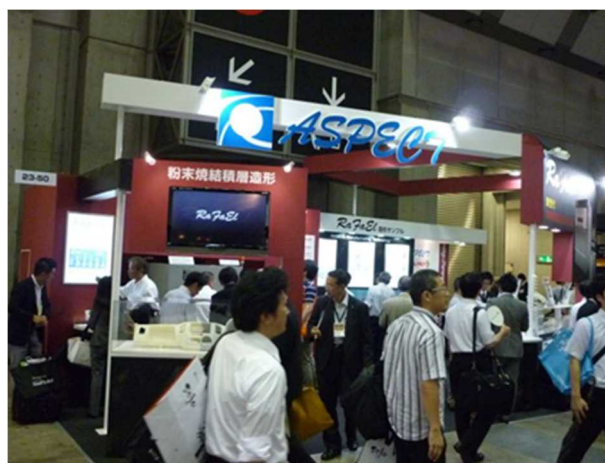
表Ⅲ-2.18.5 に示す通り、特許については平成 24 年度に国内出願 1 件、国際出願 1 件、論文については合計 3 件 (図Ⅲ-2.18.24 AM シンポジウムでの発表)、外部発表としては東京ビッグサイトで平成 24 年 6 月 20 日から 22 日において開催された設計製造ソリューション展で、今回開発した小型プラットフォームを出展し、潜在ユーザーの掘り起こしを実施した。会場の様子を図Ⅲ-2.18.25 に示す。なお、今年から設計製造ソリューション展に医療関係の展示会が合同開催となったため、医療ビジネスに携わっている潜在ユーザーがアスペクト社のブースを訪れ、興味深く話を聞く姿が連日見受けられた。

表Ⅲ-2.18.5 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT 出願	査読付き	その他	
平成 22 年度	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
平成 23 年度	0 件	0 件	0 件	0 件	1 件 (口頭発表)	0 件
平成 24 年度	1 件	1 件	0 件	0 件	2 件 (口頭発表)	1 件 (設計製造ソリューション展に出展)



図Ⅲ-2.18.24 AM シンポジウム



図Ⅲ-2.18.25 設計製造ソリューション展

## 2.19 研究開発項目④「技術開発推進にかかる調査(先端技術、環境等)・評価・普及促進の成果」

(ALPROT)

実用化、事業化を研究開発と同時進行で推進する上で、プロジェクト関係者、必要に応じた外部有識者、プロジェクト成果活用ユーザー企業メンバーからなる技術調査委員会を構成。本研究開発の技術的な方向性や最新技術の動向把握、分析等国内外の情報をいち早く入手(例、応用物理学会、レーザー学会、ICALEO(International Congress on Application of Lasers and Electro-Optics)、Photonic West ASSP(Advanced Solid-State photonics)、LPM, E-mars(欧州材料学会)、Cleo等調査分析結果を開発計画内に反映する。また、本開発成果の活用による製品製造に関わる素材・製品加工・実用化生産システムの可能性評価、本開発技術およびそれら成果を利用した製品製造工程の環境対応等幅広い視点で、プロジェクトに対する進捗、環境影響等分析を行い、時々刻々変わる技術動向の中でより効率的な開発推進、高信頼性製品の確立、高ロバスト性を確保するため、外部有識者やエンドユーザー、レーザー加工機メーカーとの連絡を密にして技術開発項目の内容や進捗を明確にし、開発推進計画に織り込む。そのほか、本開発技術の幅広い普及を目指し、可能な範囲での技術交流を目的とした成果報告会、セミナー、シンポジウムを実施する。それら報告会等を通じ、可能な範囲で成果を活用したレーザー加工技術のエンドユーザー、レーザー加工機メーカーに利用してもらい、その評価を受け、今後の開発内容の見直し等に活用する。

[平成22年度]

プロジェクト関係者、外部有識者を中心として、本研究開発の技術的な方向性や最新技術の動向把握、分析等国内外の技術や市場等情報を入手し、調査分析を行い開発計画内に反映する。また、本開発に関わる評価、環境対応等幅広い視点で、プロジェクトに対する影響分析を行い、時々刻々変わる技術の進捗方向の正当性を明確にし、開発推進計画に織り込む。また、平成22年度の段階における、ユーザー参加企業、レーザー加工機メーカーが求めるスペック等の条件を記載した参加企業リストを作成し、プロジェクトでのアウトプットとエンドユーザー企業、レーザー加工機メーカーの要求スペックをリスト表として作成しプロジェクト内に発信を行なった。

[平成23年度]

プロジェクト関係者、外部有識者を中心として、本研究開発の技術的な方向性や最新技術の動向把握、分析等国内外の技術や市場等情報を入手し、調査分析を行い開発計画内に反映する。また、本開発に関わる、評価、環境対応等幅広い視点で、プロジェクトに対する影響分析を行い、時々刻々変わる技術の進捗方向の正当性を明確にし、開発推進計画に織り込む。平成22年度に作成した、ユーザー参加企業、レーザー加工機メーカーが求めるスペック等の条件を記載した参加企業リストを拡充、整備し、プロジェクトでのアウトプットとエンドユーザー企業、レーザー加工機メーカーの要求スペックのリスト表を拡充、整備しプロジェクト内に発信を行なった。

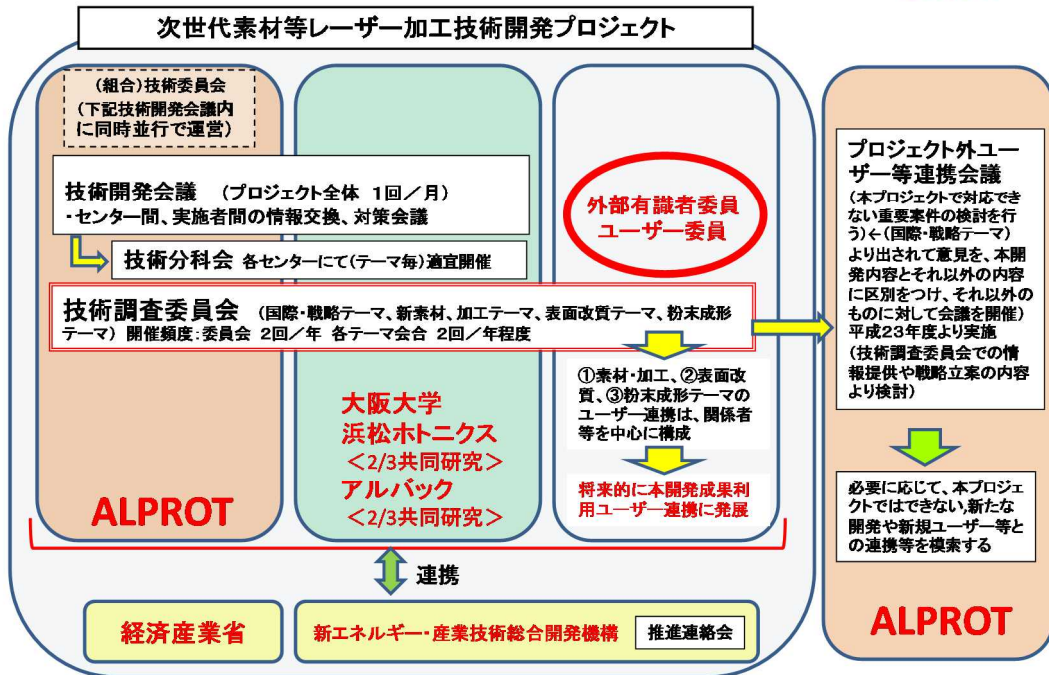
[平成24年度]

プロジェクト関係者、外部有識者、エンドユーザー企業を中心として、本研究開発の技術的な方向性や最新技術の動向把握、分析等国内外の技術や市場等情報を入手し、調査分析を行い開発計画内に反映する。また、本開発に関わる評価、環境対応等幅広い視点で、プロジェクトに対する影響分析を行い、時々刻々変わる国内外の本開発の関連技術の進捗・内容を適宜確認する。本開発内容や進捗状況と比較、実用化製品化の活用可能な技術開発の方向性を見直しを行い、開発推進計画に織り込む。また、本開発の可能な範囲での技術の普及・促進を行うための報告会、セミナー、シンポジウムを実施する。それら報告会等を通じ、成果をレーザー加工技術のユーザーに利用してもらい、その評価を受け、今後の開発内容の見直し等に活用する。平成23年度までに作成した、ユーザー参加企業、レーザー加工機メーカーが求めるスペック等の条件を記載した参加企業リストを拡充、整備し、プロジェクトでのアウトプットとエンドユーザー企業、レーザー加工機メーカーの要求スペックのリスト表を拡充、整備しプロジェクト内に発信する。

ユーザー、レーザー加工機メーカーとプロジェクトの窓口となり、ユーザーがプロトタイプ、デモ機を使用した結果を集約、課題、問題点を報告し、開発スペック等の見直しのベースとする。また、評価方法、守秘義務の扱い方、体制を構築する。

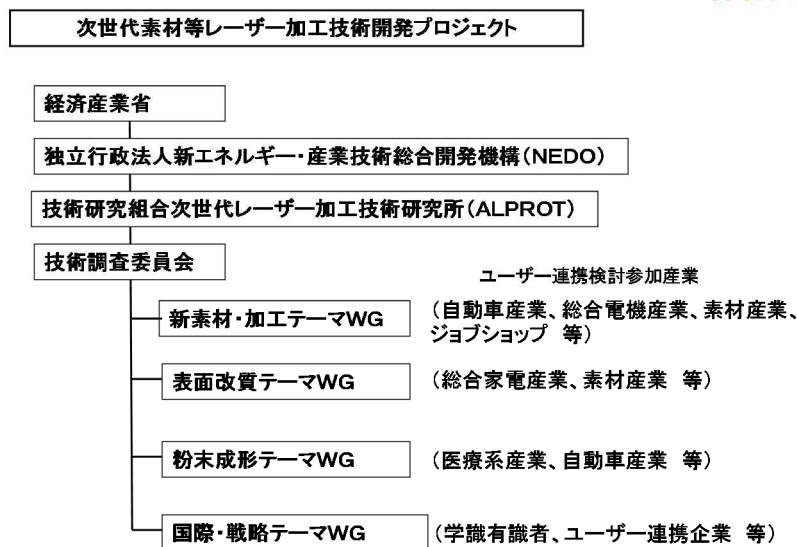
事業項目	22年度				23年度				24年度					
	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期		
④技術開発推進にか かる調査（先端技術、 環境等）・評価・普及 促進 1)最先端技術・市場 調査 2)開発成果の利用 促進検討 3)環境等検討 4)成果普及・促進シ ンポジウム		最先端技術の現状確認および市場調査	開発成果利用レーザー加工メーカーの調査	レーザー加工システム環境等動向評価調査		最先端技術の動向調査および市場調査	開発成果利用加工メーカーニーズスペック分析・検討	レーザー加工システム環境等動向評価調査		最先端システム化技術の動向調査および市場調査	ニーズスペックの実現性評価手法・体制の検討	レーザー加工システム最適化調査	中間実証試験・シンポジウム	

具体的体制と作業内容



成果 (ユーザー企業リストの作成:平成24年6月1日現在)

ユーザー企業として、技術調査委員会委員に各主要ユーザー産業企業をリストアップ、それぞれの企業のメンバーがリスト化されている。また、7月30日開催のプロジェクトとしては初めての中間成果報告会(ユーザー連携シンポジウム)により、広く一般に広報し、ユーザーニーズ等の収集等を行なった。



ニーズ表に関しては以下のような成果をとりまとめた（抜粋）

要求ニーズ	基本計画	ニーズと基本計画の違い
<p>会社別 自動車メーカー</p> <p>製品別 構造材</p> <p>部品別 プラットホーム(台車部) 外板(フード、ルーフ)</p> <p>加工手法別</p> <p>CFRP板(連続繊維、短繊維)の外形加工</p> <p>用途:車体形成(構造部品)</p> <p>要求スベック</p> <p>CFRP種別: PAN系、ビッチ系 厚さ: 2~3mm タクトタイム: 1分以内</p> <p>レーザー出力 波長</p> <p>評価手法 強度試験(引張試験、圧縮試験、疲労試験、衝撃試験)</p>	<p>基本計画</p> <p>研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」</p> <p>研究開発の必要性</p> <p>本プロジェクトで開発するバルスファイバーレーザーの高出力化技術ならびに高品位化技術を要用的に有用なものとするためには、加工機システムとして機能を統合させて最適化するとともに、低炭素社会の実現に向けた製品の軽量化・高強度化・高機能化に大きな期待が寄せられている先進材料の活用促進に貢献するためのレーザー加工技術を開発する必要がある。特に、先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現することによって、従来手法では困難であった精密加工のブレークスルー技術として実用に耐える次世代レーザー加工技術を確立する。</p> <p>1) 切断接合技術の開発</p> <p>CFRP(炭素繊維強化複合材料)等の複合材料は、自動車・航空機等の輸送機器の抜本的軽量化技術として期待されている。しかしながら、異種難削材であることから、革新的な製造技術として高精度な切断・接合技術の開発が要望されており、さらに製品製造タクトタイムの大幅短縮化が喫緊の課題である。本研究開発では、CFRPに代表される複合材料に対して自動車・航空機用途の基材を検討対象とし、高品位・高速のレーザー切断接合技術を開発する。具体的には、中型・小型部材を加工するための高速導引リモート加工ヘッドの開発、自動車のフードやルーフ等の大型部材の加工を行う高速高精度制御加工ノズルの開発、ならびに、プロセス・評価技術の研究開発を行う。</p> <p>① 複合材料高速切断接合システム技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高速導引リモート加工ヘッドの開発: 複合レーザー照射によるリモート加工が可能な複合レーザー加工ヘッドの開発を行う。</li> <li>・高速高精度制御加工ノズルの開発: 可動部の軽量化と高剛性化ならびに高速微細加工技術の開発を行う(高速微細加工技術: ワークと加工ノズルのキャッチを一定に保つ技術)。</li> </ul> <p>② 複合材料加工プロセス・評価技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・多波長複合レーザー加工プロセスの最適化: 高品位・高速加工を実現する高速走査重量照射技術の開発、ならびにインプロセスモニタリング技術を確立する。</li> <li>・レーザー加工に適したCFRP材料の構造最適化及び加工試験評価技術: レーザー照射時の反応層(熱損傷層)を極力低減する材料構造の最適化、ならびに、加工後試料の特性評価手法を確立する。</li> </ul> <p>最終目標(平成26年度)</p> <p>① 切断接合技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・切断および接合加工速度: 6 m/min以上(大型部材として1m級サイズ以上、中型・小型部材として50 cm級サイズ以上のCFRP基材に対して、基材厚み3 mm以上)</li> <li>・加工品位 切断: 切断面において反応層の厚みが100 μm以下 レーザー切断処理試料の引張り強度を10%未満の低減に抑制</li> <li>接合: CFRPと金属板との接合において、凝集剥離で引張りせん断強度100 MPa以上 (CFRP基材厚み3 mm、金属板厚み2 mm)</li> </ul>	<p>ニーズと基本計画の違い</p> <p>(ニーズ)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・素材: CFRP2~3mm厚</li> <li>・外形加工(タクトタイム: 1分以内)</li> </ul> <p>(基本計画)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・CFRP3mm厚、6m/min以上</li> <li>・切断面において反応層の厚みが100 μm以下</li> <li>レーザー切断処理試料の引張り強度を10%未満の低減に抑制</li> </ul>

(委員会の開催状況)

技術調査（ユーザー連携）委員会及び各ワーキンググループ検討概要

出席者は委員とプロジェクト開発実施者、NEDO、METI、事務局

委員会、WG	委員数	回数	議事内容
技術調査委員会	25名	2回	実用化促進のため、ユーザーからのニーズの検討を行なった。レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向、標準化、新素材・加工、表面改質、粉末成形の各WGテーマのニーズについての報告、検討を行い、ユーザーニーズのマッチングを行なった。
国際・戦略テーマWG	10名	4回	現状のレーザー及びレーザー加工技術の動向と、今後どのようなレーザーとレーザー加工技術が必要とされるかの検討を行なった。ドイツの自動車産業におけるレーザー加工や世界的技術動向の現状を把握した。アジア地区の動向やPhotonics West2012（国際会議と展示）の報告から日本の標準化戦略やニーズにマッチしたレーザー及びレーザー加工のあるべき姿を検討し、開発スペックとの比較を行なった。
新素材・加工テーマWG	6名	3回	開発内容の確認し、ニーズ面からどのようなレーザーが必要か検討を行なった。CFRP素材の各種仕様とその加工や評価等についての報告が行なわれた。BMWや東レの取り組み等が紹介された。ユーザー側のニーズや加工スペック等が提示され、それらの加工が可能なレーザーや加工法についての検討を行い、開発スペックとの比較を行なった。
表面改質テーマWG	7名	4回	本WGでは、ディスプレイや太陽電池の製作に最適なレーザー加工のあり方を検討することになった。ディスプレイ用途のレーザーアニールの開発目標値とその背景が報告された。ディスプレイ領域の市場動向報告、フラットパネルメーカーの技術ニーズ、太陽電池領域におけるレーザー応用に関するニーズ検討を行い、開発スペックとの比較を行なった。
粉末成形テーマWG	2名	4回	本研究開発の目標を報告し、粉末成形の医療関連活用に関する技術情報を検討した。レーザーを活用した造形技術の現状を報告した。ニーズとしてチタン粉末を活用した医療用部品の仕様等についての検討を行い、開発スペックとの比較を行なった。ICAL02011（国際会議と展示）の粉末成形技術の状況の報告と、開発施策の小型プラットフォームの見学を行ない、ニーズに対しての目標の確認を行なった。Photonics2012の粉末成形、Additive Manufacturingシンポジウムの状況が報告された。

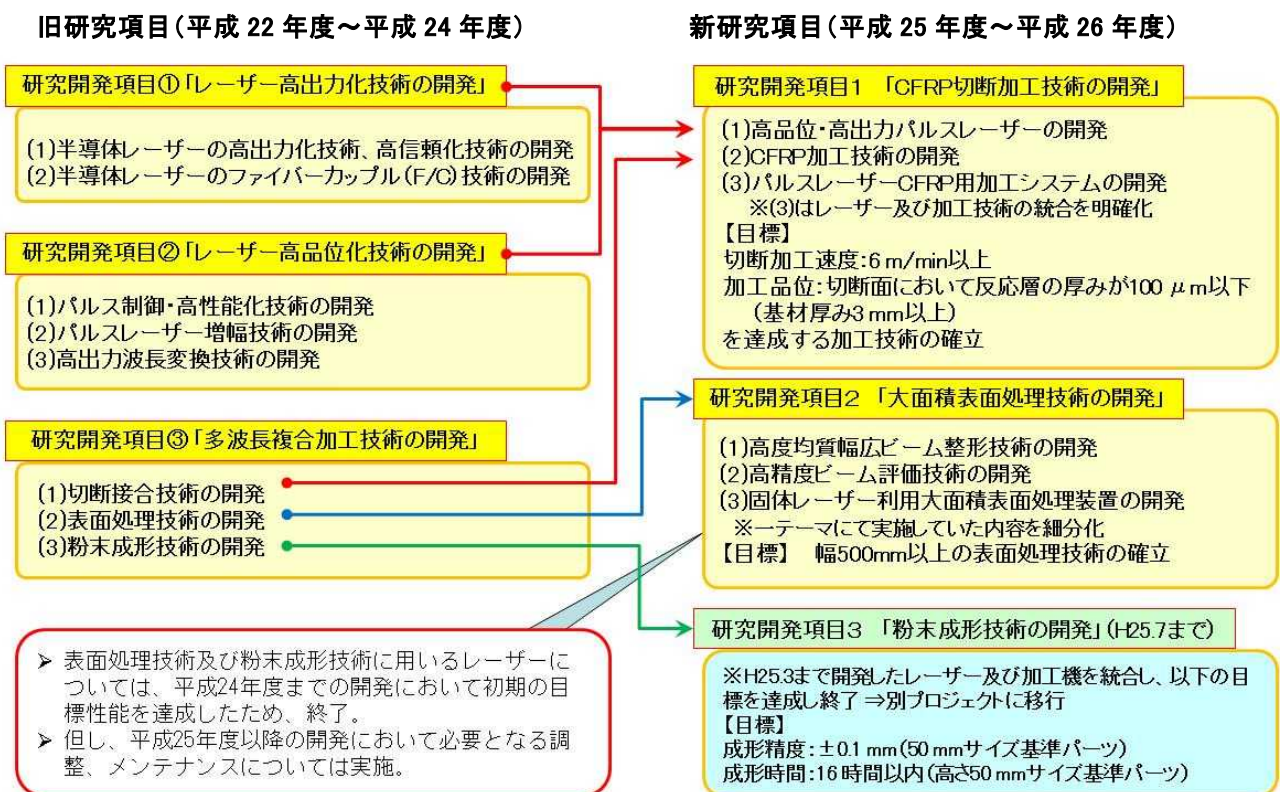
### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 1. 事業全体の成果

平成22年度～中間評価（平成24年8月）の期間においては、プロジェクトの各テーマにおいて中間目標（平成25年3月）をほぼ達成、または目標達成の見通しを得た。中間評価～平成26年度の期間においては、最終目標を達成しプロジェクト成果を実用化・事業化に結びつけることを目指して研究開発を実施した。

#### 1.1 事業の概要

本プロジェクトは事業化・実用化テーマとして3つのテーマが設定されている。この3テーマはいずれもレーザー開発とそのレーザーを応用するシステム開発から成っている。中間評価を経て、平成25年度より図Ⅲ-1.1のような研究体制の変更となった。半導体レーザー、ファイバーレーザー、及び固体レーザーはこれまでは独立したテーマであったが、平成25年度からは出口イメージ重視の考え方から、CFRP切断加工の中の開発項目となった。



図Ⅲ-1.1 平成25年度からの研究体制の変更

平成25年度からのテーマの詳細と実施機関を以下に示す。研究開発項目4は調査研究テーマである。

#### 研究開発項目1「CFRP切断加工技術の開発」

(1/3 実施者負担テーマは企業単独での開発)

##### (1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発

##### ①パルスレーザー高品位・高出力化技術の開発

(阪大レーザー研、阪大接合研、古河電工、片岡製作所、浜松ホトニクス、レーザー総研)

1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発

②励起用半導体レーザー技術開発

(浜松ホトニクス 1/3 実施者負担)

(2) CFRP 加工技術の開発

(産総研、アマダミヤチ、新日本工機、三菱化学)

①CFRP 高速切断技術の開発

②CFRP 加工プロセス・評価技術の開発

(3) パルスレーザーCFRP 用加工システムの開発

(産総研、古河電工、アマダミヤチ、日本工機、三菱化学)

#### 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」

大面積表面処理システム開発 (アルバック 1/3 実施者負担)

1) 高度ホモジナイズドワイドビーム成形の開発

2) 高精度ビーム評価技術の開発

3) 固体レーザー利用大画面表面処理技術の開発

4) アニール用グリーンレーザー評価・調整 (アルバック、阪大レーザー研、浜松ホトニクス)

#### 研究開発項目 3 「粉末成形技術の開発」

(産総研、アスペクト、接合研、片岡製作所、古河電工)

#### 研究開発項目 4 「技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」

(ALPROT)

図Ⅲ-1.2 はテーマを簡単にまとめたものである。以下、このテーマに沿って説明を行う。



(1/3 実施者負担テーマの QCW ファイバーレーザー開発は平成 23、24 年度)

図Ⅲ-1.2 プロジェクトの 4 テーマ

以上の研究開発を効率よく進めるために、本プロジェクトでは大阪大学内に光源技術開発セン

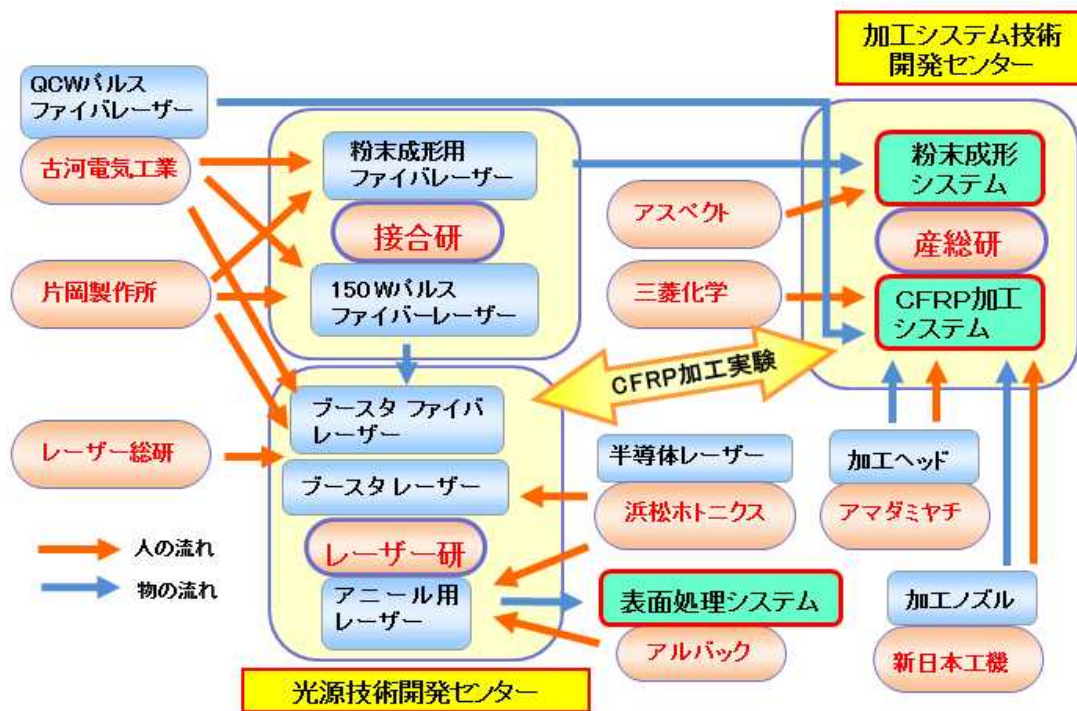


ター、産業技術総合研究所（産総研）内に加工システム開発センターを設置している。図Ⅲ-1.3の実施拠点図に示すように大阪大学の接合科学研究所（接合研）とレーザーエネルギー学研究センター（レーザー研）でレーザー光源開発、産総研で加工システム開発を集中的に行う体制となっている。光源技術開発センターと加工システム開発センターはCFRP加工実験を協力して行う連携体制を構築している。平成23年度には大阪大学レーザー研所有の固体レーザーを用いて、また平成25年からはプロジェクト開発レーザーを用いてCFRP加工実験を共同で行った。

図Ⅲ-1.4にプロジェクト全体の研究項目間の連携図を示す。各実施機関から人と開発物を効果的に移動する体制となっている。



図Ⅲ-1.3 実施拠点図



図Ⅲ-1.4 開発項目間の連携

## 1.2 研究開発項目別の目標と達成状況

図Ⅲ-1.5にプロジェクト期間の開発の進捗状況（抜粋）と外部動向を示す。CFRPは航空機と自動車への適用が進んできた。CFRPを機体に大量に採用したボーイング787が2011年9月に羽田空港に到着して、話題となった。また自動車ではドイツのBMW社が、量産モデル「i3」にCFRPをボディ骨格に採用すると2013年7月に発表した。国内ではトヨタが燃料電池車「MIRAI」を2011年11月に発表した。東レ製の炭素繊維材料を採用している。採用部位は燃料電池スタックフレーム（熱可塑性CFRP）、燃料電池スタックの電極基材（カーボンペーパー）、高圧水素タンク（高強度CFRP）であり、他のメーカーにおいてもCFRPの適用が進められることを期待している。

3Dプリンタについては、米オバマ大統領が2013年2月に一般教書演説において「3Dプリンタを活用してアメリカに製造業を呼び戻す」と宣言して、世界的ブームとなった。日本でもアスペクト社がテレビで取り上げられるなどの3Dプリンタの爆発的ブームとなったが、いわゆる3Dプリンタは樹脂成形主体の安価なものから金属粉末成形のできる高価なものまで幅広い分野にわたっている。本プロジェクトの粉末成形装置は産業用の装置であり、真空環境でチタン合金等の金属の成形を行うことが特長である。3Dプリンタブームが訪れた時には、中間評価を経てプロジェクト終了となったことは残念であった。

3Dプリンタとは反対に、このプロジェクト期間で国内のフラット・ディスプレイ業界は縮小した。シャープは2013年3月に9000億円を超える最終赤字を計上し、深刻な経営危機となった。また、パナソニックも2013年12月にプラズマディスプレイの生産を終了した。ソニー、東芝、日立の中小型ディスプレイ事業を統合して、株式会社ジャパンディスプレイが2012年4月1日に事業を開始したが、苦戦している状況である。

	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H26FY
		H23.3.11 東日本大震災	中間 評価	安倍内閣 発足	
テーマ1: CFRP切断加工 技術の開発		半導体レーザー 15W, 60% ファイバレーザー 平均出力250W 固体ブースタレーザー CFRP加工テスト 倣い加工テスト 既存レーザー 加工共同実験		半導体レーザーシングル 20W, 65% ファイバレーザー 平均出力6kW PCFブースタレーザー 三次元スキャナ加工機 三次元倣い加工機 開発レーザー 加工共同実験	
		H23 9月 ボーイング 787 羽田空港に到着		H25 7月 BMW i3 CFRPを車体に採用	
テーマ2: 表面処理 技術の開発		アニール用レーザー		表面加工システム	
		H24 4月 ジャパン・デ ィスプレイ事業開始	シャープ 経営危機	H25 12月 パナソニック プラ ズマ・ディスプレイ生産終了	
テーマ3: 粉末成形 技術の開発		パルスレーザー	粉末成形システム	終了	
				3Dプリンタ 爆発的ブーム	

図Ⅲ-1.5 プロジェクト期間の開発の進捗状況と外部動向

すべてのプロジェクトテーマと開発の主担当機関、達成度を表Ⅲ-1.1にまとめた。

大幅に達成「◎」、達成「○」、部分達成「△」、目標に達しなかったものは「×」で、達成度を表わした。以下、サブテーマすべての達成度についても同じ記載方法である。

開発テーマのすべての開発目標に対して、目標は達成した。

表Ⅲ-1.1 プロジェクトテーマと開発の主担当、達成度の概要 ※ 1/3実施者負担テーマ

テーマ	サブテーマ	開発内容	開発主担当	達成度
テーマ1: CFRP 切断加工技術の開発	高出力半導体レーザー開発	半導体レーザー開発 ※	浜松ホトニクス	○
	QCWファイバーレーザー開発	ファイバーレーザー開発 ※ (1/3 実施者負担テーマ H23、24 年度)	古河電工	◎
	パルスレーザー増幅技術の開発	固体/PCF ブースタ設計・開発 プリアンプ開発 PCF ブースタ製作	レーザー研・浜ホト 古河電工 片岡製作所	○
	CFRP レーザー加工・評価技術の開発	三次元スキャナ加工装置開発 三次元削り加工装置開発 加工・評価、材料準備	アマダミヤチ 新日本工機 産総研、古河電工、 三菱化学	○
	パルスレーザー開発とCFRP 切断機構の解明	プリアンプ開発 PCF レーザー開発 加工実験	古河電工 片岡製作所 接合研	◎
テーマ2: 表面処理技術の開発	Si アニール用レーザー開発	グリーンレーザー開発	レーザー研、浜松ホトニクス、アルバック	○
	アニール用システム開発	アニール用システム開発・評価 ※	アルバック	○
テーマ3: 粉末成形技術の開発	粉末成形用レーザー開発	プリアンプ開発 PCF レーザー開発 加工実験	古河電工 片岡製作所 接合研	○
	粉末成形システム開発	粉末成形装置開発 成形実験・評価	アспект 産総研	△

以下、サブテーマごとの研究開発目標の達成度の概略を示す。詳細は実施者の報告に譲る。

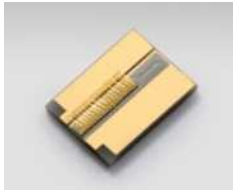

◆CFRP切断加工技術の開発 高出力半導体レーザー開発 (浜松ホトニクス)

表Ⅲ-1.2に「高出力半導体レーザー開発」における中間目標と最終目標の達成度を示す。

半導体レーザーの開発において、主な課題は発熱の低減と発生した熱の除去である。これらを解決するため素子構造の最適化、ヒートシンクの改良を行い、出力特性の改善に結びつけた。

シングルエミッタで出力 20 W、効率 65 %、ファイバー結合効率 90%以上。アレイでは出力 300 W、効率 60% を達成した。また高出力化と高信頼性を両立させるため、端面劣化抑制構造の開発も行った。これらの課題を解決することで、すべての目標値を達成することができた。さらに事業化の検討を開始している。

表Ⅲ-1.2 「高出力半導体レーザー開発」における中間目標と最終目標の達成度

中間目標	最終目標
<p><b>シングルエミッタ</b>            波長: 近赤外帯            出力: 15 W 効率: 60 %            寿命: 20,000 時間以上</p> <p><b>アレイ</b>            波長: 近赤外帯            出力: 200 W 効率: 55%            寿命: 20,000 時間以上            自動組立が可能なこと</p> <p>ファイバー結合効率※            シングルエミッタ: 80%以上            アレイ: 60%以上</p> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; display: inline-block; color: red; font-weight: bold;">達成! 世界最高位</div>	<p><b>【参考】</b>  <b>シングルエミッタ</b>            出力: 20 W 効率: 65 %            ファイバー結合効率※: 90%以上</p>  <p><b>アレイ</b>            出力: 300 W 効率: 60%            事業化の検討の実施</p> <div style="border: 2px solid red; padding: 5px; display: inline-block; color: red; font-weight: bold;">達成! 世界最高位</div>  <p>※ファイバーコア径 105 μm、NA0.15 相当</p>

課題	解決策
発熱の低減と熱の除去 高出力と高信頼性の両立 ファイバー結合効率向上(シングルエミッタ) 実用化・事業化の検討	素子構造の最適化、ヒートシンク改良 端面劣化抑制構造の最適化 素子特性・レンズ特性の最適化 試作した素子を使った光源試作で有用性を確認

◆CFRP切断加工技術の開発 QCWファイバーレーザー開発 (古河電気工業)

表Ⅲ-1.3に「QCWファイバーレーザー開発」における目標値と達成度を示す。また図Ⅲ-1.6に開発品のQCWレーザー装置の外観を示した。

半導体レーザーの輝度向上とファイバー非線形の低減が課題である。冷却構造を見直すことで、半導体レーザーの輝度向上を実現した。60Wの励起LDモジュールを開発して量産化を行い、また低非線形Ybファイバーを製作することで課題を克服した。

開発したQCWレーザーは産総研に設置し、CFRP加工実験を行った。

表Ⅲ-1.3 「QCWファイバーレーザー開発」における目標値と達成

研究項目	評価目標			コメント	達成度
	評価項目	目標	成果		
研究開発項目 1 (3)パルスレーザー-CFRP用加工システムの開発  シングルモード QCW ファイバーレーザーの作製	ピーク出力 平均出力 $M^2$ 高速変調	1.6kW 0.5kW 1.1 以下 $\geq 100\text{kHz}$	2kW 1 kW 1.1 以下 $\geq 100\text{kHz}$	ピーク2kWについては26年度加速予算 平均出力1kWについては製品化	◎
大出力マルチモード QCW ファイバーレーザーの作成	ピーク出力 平均出力	6.4kW 2kW	6kW 6kW	マルチモード装置 平均出力6kWまでの製品化を実施	◎

課題	解決策
半導体レーザーの輝度向上とファイバー非線形の低減	60W 励起 LD モジュールの実現と量産化 低非線形 Yb ファイバーの製作



SM2kW-QCW機



MM5kW-QCW機

図Ⅲ-1.6 開発品のQCWファイバーレーザー装置の外観

◆CFRP切断加工技術の開発 パルスレーザー増幅技術の開発

(レーザー研、浜松ホトニクス、古河電工、片岡製作所)

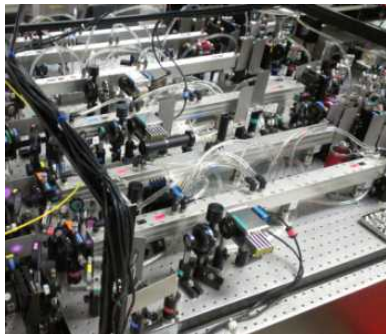
表Ⅲ-1.4 に「パルスレーザー増幅技術の開発」における目標値と成果、及び達成度を示す。また図Ⅲ-1.7 にファイバー増幅器等の写真を示した。本開発における主な課題は発生した熱の除去である。この課題を解決するため PCF ロッドの冷却方法を改善し、 $M^2 \leq 1.3$  という高ビーム品質化することが可能となった。また高出力化のために必要なコヒーレント結合技術を開発し、ビーム結合出力 1.5kW を達成することができた。

産総研との CFRP 加工の連携実験のため、現有 YAG レーザーを改造し、実験エリアの整備を行った。また、開発した 1kW 級 PCF レーザーによる加工実験もおこなった。全 40 日間の長期の CFRP 加工実験を協力して実施したが、多様な条件のレーザーを供給して、CFRP 加工条件探索のための多くのデータを得ることができた。

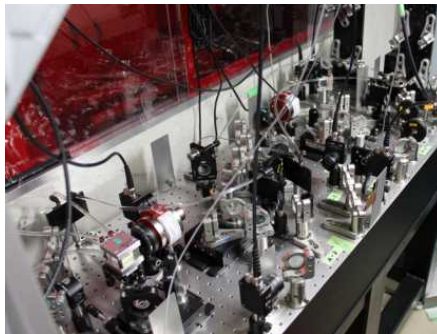
表Ⅲ-1.4 「パルスレーザー増幅技術の開発」における最終目標値と達成

研究項目	評価目標		成果	達成度
	評価項目	目標		
研究開発項目 1 (1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発	ビーム品質 $M^2$ 平均出力 波長 繰り返し周波数 パルス幅1 パルス幅2	2~3 1.5kW 程度 1 $\mu$ m 帯 75kHz~1,000kHz サブナノ秒~10ns の範囲で選択 ピコ秒~ナノ秒可変(1ビーム、加速案件)	$\leq 1.3$ 1.52kW 1035,1040,1045 nm 150kHz~4MHz 可変 400ps-70ns 可変 0.7ps-920ps 可変	◎ ○ ○ ◎ ◎ ○
	ビーム結合技術 ファイバー全出力 4ビームコヒーレント結合効率 3ユニット総合結合効率	自主目標 1,75kW 90% 85%	1.79kW 85~90% (530~600W) 85%	○ △ ○
	第2高調波変換出力、 第2高調波変換効率 第3高調波変換出力、 第3高調波変換効率	600W (200W×3ビーム) 40% 200W (70W×3ビーム) 13%	340W (1ビーム) $\geq 50\%$ (基本波 700W) 100W (1ビーム) $\geq 20\%$ (基本波 500W)	△ ○ △ ○
	加工試験 (実験エリアの整備、加工システム技術開発センターと連携)	現有 YAG レーザーを改造してパルス供給。 1.5kW ファイバーレーザーによる加工実験。 CFRP 加工試験を実施。	全 40 日間の CFRP 加工試験を実施し、多様な条件のレーザーを供給した。	○

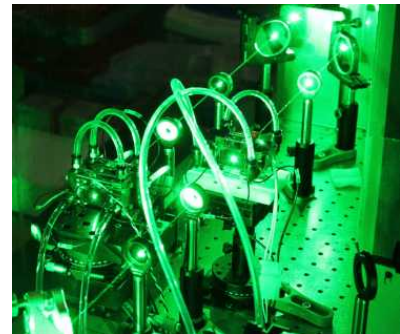
課題	解決策
増幅器コンセプト	高出力ファイバーの冷却対策による高ビーム品質化
高出力化のスケラビリティ	高効率ビーム結合技術: コヒーレント結合、インコヒーレント結合
高機能性	パルス幅・繰り返し周波数可変技術



ファイバー増幅器



ビーム結合



波長変換

図Ⅲ-1.7 ファイバー増幅器

◆CFRP切断加工技術の開発 CFRPレーザー加工・評価技術の開発

(産総研、アマダミヤチ、新日本工機、三菱化学、古河電工)

表Ⅲ-1.5に「CFRPレーザー加工・評価技術の開発」における最終目標値と成果、および達成度を示す。三次元レーザースキャナ加工機、三次元微加工機、QCWファイバレーザーを開発し、高品位で高速度のCFRPレーザー加工を可能とするシステムの開発を行った。また、つくば拠点設置機と大阪大学開発機を用いて切断とその評価を行い、切断パラメータの検討を行った。その結果、切断加工速度や反応層厚み、引張強度において最終目標を達成できた。CFRPは炭素繊維と樹脂の組み合わせで様々な種類があるが、全12種のCFRP/CFRTP材料に対して加工特性を検討した結果、10種において最終目標値を達成することができた。

図Ⅲ-1.8はCFRP立体成形品の加工例である。

表Ⅲ-1.5 「CFRPレーザー加工・評価技術の開発」における最終目標値と達成度

研究項目	最終目標	達成度
研究開発項目1 (2)CFRP 加工技術の開発 (3)パルスレーザーCFRP用加工システムの開発	1. 各種 CFRP 材の系統的な切断加工データ取得 ・連続繊維型熱硬化性樹脂 (CFRP) ・短繊維型熱可塑性樹脂 (CFRTP) 2. CFRP 加工装置のグランドデザインを完成 3. 切断加工速度:6 m/min 以上 (基材厚み 3 mm 以上) 4. 加工品位: 切断面において反応層の厚み (HAZ) が 100 μm 以下 (基材厚み 3 mm 以上) 引張強度 10%未満の低減(参照強度* に対して) *参照強度: 機械加工試験片の引張強度	「達成」○ (2)つくば拠点設置機を用いて、 1. 全12種の CFRP/CFRTP 材料に対して切断加工データを取得 2. 平板基板だけでなく、自動車用部材を模擬した立体成形品への精密加工を実証 3. 4. 加工特性の最高値として、 CFRP 材料(6m/min、HAZ100 μm 以下、引張強度 -4%)、CFRTP 材料(10m/min、70 μm 以下、-5%) (3)大阪大開発機を用いて、 1. CFRP および CFRTP 各1種の平板基板 2. キロワット出力のナノ秒パルス光(1.1kW、5ns)による高品位加工を実証 3. 4. 加工特性の最高値として CFRP(4m/min、HAZ30 μm 以下)、 CFRTP(5m/min、80 μm)を達成



図Ⅲ-1.8 CFRP加工サンプルの例 (立体成形品)

◆パルスレーザー開発とCFRP切断機構の解明 (接合研、古河電工、片岡製作所)

表Ⅲ-1.6に「パルスレーザー開発とCFRP切断機構の解明」における最終目標値と達成度を示す。

パルスファイバーレーザーの開発において、主な課題は非線形効果（ラマン散乱）の抑制であり、ファイバーの増幅率、コア径、長さの最適化により解決を図った。またフォトニック・クリスタル・ファイバー（PCF）増幅器の開発では水冷機構を検討し、効率よく増幅を行うことができた。

開発したレーザーを用いてレーザーアブレーション評価実験を行った。アブレーションルームの挙動とCFRP加工の切断機構を解析し、短パルス化と短波長化の効果を明らかにした。

表Ⅲ-1.6 「パルスレーザー開発とCFRP切断機構の解明」における最終目標値と達成度

研究項目	評価目標		達成度
	評価項目	最終目標	
研究開発項目1 (1)高品位・高出力パルスレーザーの開発 ①ファイバーレーザーの高出力化技術の開発 1)ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発	150 W、10 ns、75kHz ファイバーレーザーによる評価実験	・150 W、10 ns、75kHz のファイバーレーザーを用いたCFRP切断基礎実験の推進 ・CFRP切断加工システム開発のための基礎データの取得	◎
	150 Wパルスファイバーレーザー開発、モジュール化技術開発および評価実験	・サブナノ秒ファイバーレーザー用のシード光源（パルス幅：400 ps、繰返し：1MHz）の開発 ・平均出力150WのPCF増幅器の開発 ・2ビーム結合のための結合ユニットの開発	◎
	150 Wサブナノ秒ファイバーレーザーアブレーション評価実験	・アブレーションルームの挙動解析 ・CFRP加工の切断機構解析 ・短パルス化と短波長化の効果を明らかにする	○

◆表面処理技術の開発 アニール用レーザー開発

(レーザー研、浜松ホトニクス、アルバック)

表Ⅲ-1.7に「アニール用レーザー開発」における最終目標値と成果、および達成度を示す。レーザーはプリアンプとメインアンプで増幅する構成であるが、高出力、かつビーム特性・パルス幅をアニール加工用途に適合させることが不可欠である。このためLD励起レーザー技術とビーム結合技術を開発し、全てを満足するレーザーを実現することができた。

アニール用レーザー波長は532 nmであるため、第二高調波に変換する必要がある。しかし、基本波のパルス幅が長くピーク出力が低いため、波長変換の効率も低くなるという課題がある。新しく光学系をデザインし、目標を大幅に上回る出力を達成することができた。本開発においてすべて最終目標を達成し、アニールシステムに搭載することができた。



表Ⅲ-1.7 「アニール用レーザー開発」における最終目標値と達成度

研究項目	評価目標と成果		成果	達成度
	評価項目	最終目標		
研究開発項目 2 アニール用ブ ースター増幅 技術の開発	平均出力	200～700W (1 μm 帯: 基本波)	702W (波長 1.064 μm: 基本波)	○
	繰り返し周波数 (実用性の高い加工速度 を得るために必要)	1～150kHz のうち最 適周波数	1kHz	○
	パルス幅	0.5～200ns のうち 最適パルス幅	122ns	○
アニール用レ ーザーの波長 変換 モジュー ル開発	変換効率 (十分なアニーリングには 532 nm で 140W が必要)	20% (700W 基本波から)	≥ 25% (700W 基本波から)	◎
	パルス幅 (十分なアニーリング効果 に必要)	100ns 程度	100ns	○

◆表面処理技術の開発 アニール用システムの開発 (アルバック)

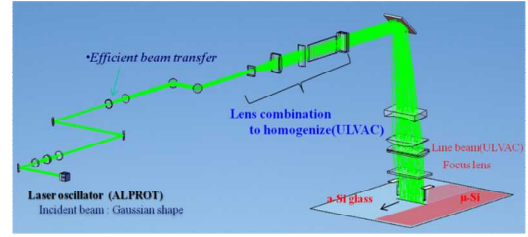
表Ⅲ-1.8 に「アニール用システムの開発」における最終目標と成果、および達成度を示す。「大型レンズ研磨装置の開発」では大型異形光学部品の研磨加工技術の開発に成功し、目標値500 mmに対して850 mmの研磨幅を達成した。ワイドビーム光学系のシミュレーション技術の確立においても、シミュレーション技術を開発しビーム評価ができた。

大型レンズを組み上げアニールシステムを構築したが、ビーム幅750mmと目標を大きく上回る成果を出すことができた。

表Ⅲ-1.8 「アニール用システムの開発」における最終目標値と達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	最終目標	目標		
研究開発項目 2 表面処理技術の開発	大型レンズ研磨装置	・大型異形光学部品の研磨加工技術を開発すること。	研磨幅: 500mm	850mm	○
	ワイドビーム光学系のシミュレーション	・光学シミュレーション技術を確立すること。	ビーム幅: 500mm 集光幅: 20 μm 照射均一性: ±7%	750mm 20 μm ±7%	○
	ワイドビームの形成	・高精度加工された異形レンズ類を用いた高度ホモジナイズ技術とワイドビーム整形光学系技術を開発する。	ビーム幅: 500mm 集光幅: 20 μm 照射均一性: ±7%	750 mm 20 um ±7%	○
	ビームモニタリング	・ワイドビームの形状及び照射均一性を評価するため、ビームプロファイラを開発。	精度: ±2%以内 分解能: 5 μm 以下	±2% 2.5 μm	○

課題	解決策
実アニールでの信頼性 (事業化レベル)	実際に TFT での評価をする。 ユーザーとの連携。



◆粉末成形技術の開発 粉末成形用レーザー開発 (接合研、古河電工、片岡製作所)

表Ⅲ-1.9に「粉末成形用レーザー開発」における最終目標値と達成度を示す。本開発レーザーは表Ⅲ-1.6「パルスレーザー開発とCFRP切断機構の解明」における開発レーザーと構成等は同じであり、周波数やパルス幅が異なっている。したがって、開発においては同様の課題があるが、最終的には150 W, 100 ns, 1 MHz のレーザーを開発し、ファイバーレーザーとQCWファイバーレーザーの重畳ユニットを粉末成形プラットフォームに提供した。

表Ⅲ-1.9 「粉末成形用レーザー開発」における最終目標値と達成度

研究項目	評価目標		達成度
	評価項目	最終目標	
研究開発項目 3 粉末成形技術の 開発	複合重畳レーザープラットフォームの開発	・150 W, 100 ns, 1 MHz ファイバーレーザーとQCWファイバーレーザーの重畳可能なプラットフォームの開発	◎

◆粉末成形技術の開発 粉末成形システム開発 (産総研、アспект)

表Ⅲ-1.10 に「粉末成形技術の開発」における最終目標値と成果、および達成度を示す。本テーマにおいて、真空下で動作可能な粉末焼結造形装置の開発に成功した。

複合レーザー照射による粉末成形システムは大阪大学接合研と共同開発し、加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）の最適化、試料の評価技術の確立に取り組んだ。

残念ながら本テーマは平成 25 年 7 月で終了となり、当初掲げたすべての目標値の達成はできなかったが、独自に開発にも取り組んだ結果、製品化に成功したことは大きな成果である。

表Ⅲ-1.10 「粉末成形システム開発」における最終目標値と達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	最終目標(基本計画)	最終目標		
研究開発項目3 基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化	①粉末焼結積層成形機構開発 ②複合レーザー照射方法 ③加エプロセス ④評価技術構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>・真空下においても動作可能な粉末焼結積層造形機構を開発すること。</li> <li>・異なる発振形式のレーザーを用いた複合レーザー照射方法を確立すること。</li> <li>・複合レーザー照射による粉末積層造形メカニズムを明確にしつつ、加エプロセス(照射条件、予備加熱条件)を最適化する。</li> <li>・レーザー加工試料の評価技術を構築すること。</li> </ul>	真空下においても動作可能 照射方法の確立 造形メカニズムの明確化 最適条件の確立 試料の評価技術を構築 成形時間: 16時間(高さ50mm) 精度: ±0.1mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>・製作・実験開始6時間(外挿)程度達成、精度+0.2mm</li> <li>・パルスレーザーとCWレーザーの重畳実験実施</li> <li>・プロセス条件確立</li> <li>・強度のみならず組織評価が重要であることがわかった</li> </ul>	△

課題	解決策
真空下で動作する金属積層造形装置を実現しその効果を示した	NEDO イノベーション事業に移行し、実用化に向け装置を開発



研究開発項目4 「技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」 <委託> (ALPROT)

表Ⅲ-1.11に「研究開発項目4 技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」における最終目標値と現状の成果、および達成度を示す。

表Ⅲ-1.11 「技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」における目標値と達成度

研究項目	最終目標	達成度
研究開発項目4 技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発光源および開発された光源を利用した加工システムのユーザーとの連携</li> <li>・広範囲なものづくりに活用されるレーザー加工技術の実用化の可能性を明確にする</li> <li>・本開発の成果報告会の開催</li> <li>・レーザー加工実証試験の開催</li> </ul>	「達成」○ 技術調査委員会とテーマ作業部会(国際・戦略、素材・加工、表面改質、粉末成形)を開催し、レーザー光源等の調査を行い、ユーザーニーズについて議論した。成果報告会/シンポジウムや展示会を開催し、成果をアピールできた。

本テーマの目標はレーザー光源とレーザー加工について有識者を交えた議論を行うことで、

本プロジェクトのユーザーニーズを調査することである。そのため、技術調査委員会とWGの委員会を開催した。技術調査委員会を含めたプロジェクトの委員会や会議の連携図を図III-1.9に示す。



図III-1.9 委員会の連携図

図III-1.9に記載の技術開発会議において、実施者から研究開発の報告を受け、プロジェクトの進捗状況の把握をしている。海外出張報告も行い、海外の学会や展示会でのレーザーとレーザー応用技術の動向について議論を行った。

#### 技術開発会議の概要

会議委員長：プロジェクトリーダー

参加者：プロジェクト実施者、NEDO、経産省

開催回数：プロジェクト全期間で27回（中間評価以降は13回）

議事内容：プロジェクトの進捗報告、海外出張報告

技術調査委員会とテーマWGにおいては有識者の貴重な意見を聞くことができ、プロジェクトを超えてレーザー産業全般に対する活発な議論ができた。表III-1.12は中間評価以降のプロジェクトの技術調査委員会とテーマWGの議事内容である。詳細な議事内容については「研究開発項目4 技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」の項目で説明する。

会議は技術調査委員とプロジェクト実施者、NEDO、経産省から構成されている。技術調査委員会委員長は慶應大学名誉教授の小原実先生に依頼した。委員会では有識者の貴重な意見を聞くことができ、プロジェクトを充実させることができた。

また、ユーザー連携と開発成果物の普及促進のため、平成26年12月15日に虎ノ門ヒルズフォーラムにおいて成果報告会/シンポジウムを開催した(図Ⅲ-1.10)。研究開発進捗の報告を行い、「日本のレーザー及びレーザー加工システム開発」についてパネルディスカッションを行った。多くの参加者があり成果の普及に有効であった。

表Ⅲ-1.12 技術調査委員会とWGの議事内容(回数はプロジェクト全期間)

委員会、WG	委員数	回数	議事内容
技術調査委員会	25名	8回	実用化促進のため、ユーザーニーズの検討を行なった。レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向と標準化、新素材・加工、表面改質、粉末成形のWGテーマの実施者からの報告、検討を行なった。
国際・戦略テーマWG	10名	6回	現状のレーザー及びレーザー加工技術の動向と、今後どのようなレーザーとレーザー加工技術が必要とされるかの検討を行なった。ドイツの自動車産業におけるレーザー加工や世界的技術動向の現状を把握した。アジア地区の動向や日本の標準化戦略やニーズにマッチしたレーザー及びレーザー加工について検討した。
新素材・加工テーマWG	6名	7回	開発内容を確認し、ニーズ面からどのようなレーザーが必要か検討を行なった。CFRP素材の各種仕様とその加工や評価等に関する報告が行なわれた。ユーザー側のニーズや加工スペック等が提示され、それらの加工が可能なレーザーや加工法に関して検討した。
表面改質テーマWG	7名	6回	本WGでは、ディスプレイや太陽電池の製作に最適なレーザー加工のあり方を検討した。ディスプレイ用途のレーザーアニールの開発目標値とその背景が報告された。ディスプレイ領域の市場動向、フラットパネルメーカーの技術ニーズ、太陽電池製造におけるレーザー加工のニーズ検討を行なった。
粉末成形テーマWG	2名	5回	粉末成形の医療関連活用に関する技術情報を検討した。レーザーを活用した造形技術の現状を報告した。ニーズとしてチタン粉末を活用した医療用部品の仕様等に関して検討を行なった。開発した小型プラットフォームの見学を行ない、開発目標の確認を行なった。



図Ⅲ-1.10 第2回ユーザー連携実用化推進シンポジウム

以上、研究開発項目の概要をまとめた。プロジェクトの最終目標はすべて達成することができ、プロジェクトは順調に遂行された。

### 1.3 事業全体の目標と達成状況

1.1節では開発項目の概要を説明したが、プロジェクトテーマに対して達成状況の概略は表Ⅲ-1.13のようになっている。計画通りに開発は進み、最終目標はすべて達成された。

表Ⅲ-1.13 目標達成状況の概略

	目標	達成状況
CFRP 切断加工技術の開発	CFRP等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。	各種レーザーを用いてCFRP素材の加工実験と評価を行い、高品位のCFRP加工の見通しがついた。
表面処理技術の開発	高精細フラットパネルディスプレイやフレキシブルディスプレイ製造に適用できるレーザーアニール技術を開発する。	アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現し、アニール実験が順調に進んだ。
粉末成形技術の開発	チタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。	真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。開発した装置を展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。
調査・普及促進	プロジェクトの成果の普及のため、有識者を含めてプロジェクトのテーマについて議論する。	調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。展示会・シンポジウム等を開催し、成果の普及促進に努めた。

### 1.4 知的財産、及び成果の普及

#### 1.4.1 知的財産、論文発表等の件数

表Ⅲ-1.14に知的財産、論文などに関する件数を示す。(詳細は添付ファイル参照)

表Ⅲ-1.14 特許・論文等発表件数一覧

	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H26FY	計
特許出願(外国出願)	1	18 (3)	17 (2)	6	9 (1)	51 (6) 件
論文(査読付き)	0	15 (8)	17 (11)	25 (20)	17 (16)	74 (55) 件
研究発表・講演	1	47	67	73	58	246 件
受賞実績	0	0	1	0	1	2 件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	3	1	2	6 件
展示会への出展	0	1	2	4	9	16 件

プロジェクト終了後の件数はH26FYに含む

#### 1.4.2 知的財産の管理について

最先端技術の開発に関わる本プロジェクトでは、知的財産管理が重要である。ALPROTでは知的財産規程を定めて、組合員の出願特許の有効活用をめざしている。図Ⅲ-1.11は知財マネジメントとして、知財の届の提出から出願までの流れを表したものである。

プロジェクト実施者から発明届が提出された場合、出願の前に発明者の認定等のため発明審議会を開催した。

##### 発明審議会の概要

議長：研究部長

参加者：発明者および、出願に関する関係者

議事内容：発明についての説明

他のプロジェクト実施者の寄与がないことの確認

発明者の認定、権利の帰属、および持ち分の決定



図Ⅲ-1.11 研究組合における知財マネジメント

#### 1.4.3 成果の普及

外部発表や展示会への出品を行い、ユーザーニーズを直接把握し、成果の普及に努めた。

##### ・成果報告会の開催

(詳細は「研究開発項目 4 技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」参照)

本プロジェクト開発の関連技術の普及・促進を図るため、2回の成果報告会を開催した。同時にユーザー連携実用化推進シンポジウムを行い、有識者との意見交換を行った。

・展示会（各実施者の展示会については添付資料を参照）

プロジェクト成果を広く知ってもらう目的で、NEDO 主催のプロジェクト全体の展示会を2回行った。

(1) NEDOフォーラム

- ・平成27年2月12日～2月13日
- ・東京国際フォーラム ホールB7

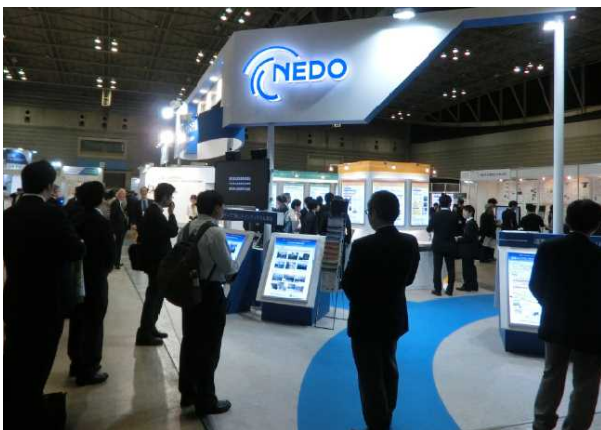
本プロジェクトの成果（半導体レーザー、QCW レーザー、CFRP 加工サンプル）の展示を行い、来場者に説明を行った。レーザー関係者だけでなく、医療やバイオ等幅広い分野の来場者があったが、レーザーとレーザー加工について興味を持っていただくことができた。

(2) レーザー-EXPO2015

- ・平成27年4月22日～4月24日
- ・パシフィコ横浜

国際会議 OPIC2015 (OPTICS & PHOTONICS International Congress) と同時開催。加工サンプル（CFRP 加工、粉末成形）や半導体レーザー、PCF レーザー、表面処理の大型シリンダリカルレンズ等のプロジェクトの成果物展示を行った（図Ⅲ-1.12）。展示パネルの説明を行い、成果物のパンフレットを配布した。多くの来場者にプロジェクトとその成果をアピールすることができた。

併設する会場で「NEDO レーザー加工技術シンポジウム ～レーザー加工が拓くものづくりの未来～」と題し、シンポジウム/成果報告会を開催した（図Ⅲ-1.13）。100人以上の参加があり盛況で、レーザー加工に関する要望が強いことがわかった。



図Ⅲ-1.12 レーザー-EXPOでの展示風景



図Ⅲ-1.13 レーザー-EXPOでのシンポジウム



(参考)

(詳細は「研究開発項目 4 技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」参照)

CFRP 加工の国際会議 LPCC2013 を ALPROT 自主事業として運営した。同時に CFRP のレーザー加工に関するワークショップを主催した。

- ・平成 25 年 4 月 23 日～4 月 25 日
- ・パシフィコ横浜・会議センター

・LPCC2013 (International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials)

CFRP 等複合材料のレーザー加工に関する国際シンポジウムであり、光とレーザーに関する国際会議 OPIC2013 (Optics & Photonics International Congress) の専門会議の一つとして開催した。海外研究者と CFRP 加工に関する議論ができ、有益な知見が得られた。

・CFRP 材料の産業応用研究最前線ワークショップ

講演者として名古屋大学・ナショナルコンポジットセンター、東レ(株)、三菱樹脂(株)、トヨタ自動車(株)、(株) I H I の講師を招き、国家プロジェクトでの CFRP 加工の取り組みや、自動車/航空機を中心とした CFRP 適用の講演会を開催した。ユーザー連携につながる取り組みができた。

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2. 研究開発項目毎の成果

##### 2.1 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」

###### 「(1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発」

###### 「①パルスレーザーの高品位・高出力化技術の開発」

###### 「1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」の成果

(阪大レーザー研、古河電工、レーザー総研、阪大接合研、片岡製作所 実施)

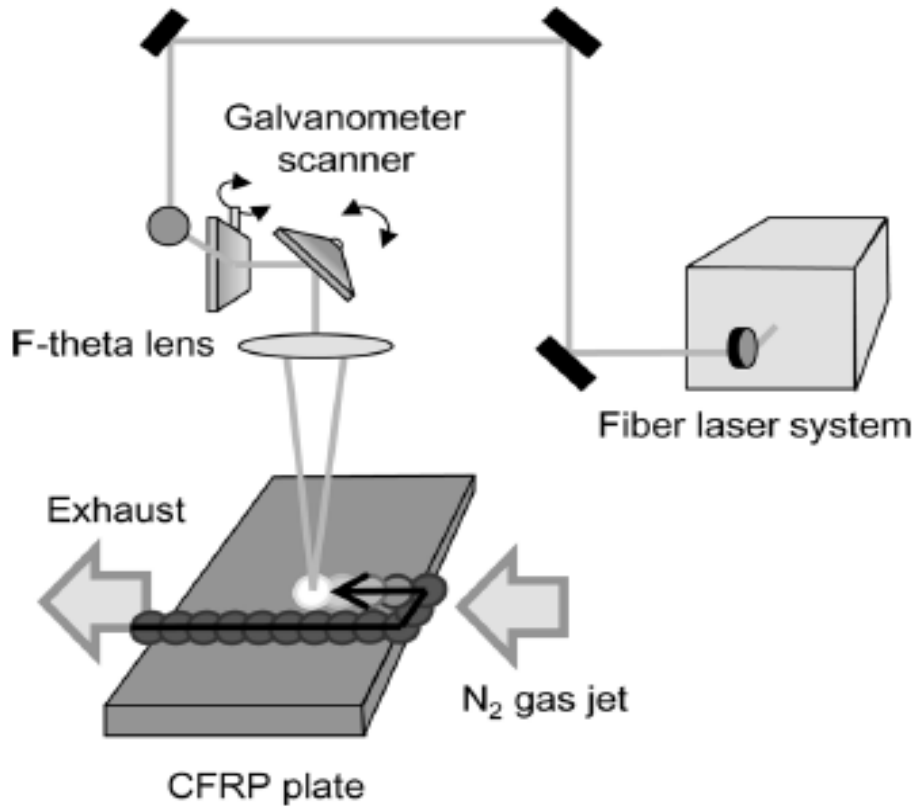
##### 2.1.1 「ナノ秒パルスの固体ブースター増幅器への供給及び CFRP 加工実験へのビーム供給」

平成 24 年度に完成したファイバー増幅器のナノ秒パルス出力を固体ブースター増幅器に供給する。また、技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所（加工システム技術開発センター：産業技術総合研究所、新日本工機）が大阪大学レーザーエネルギー学研究センターで行う CFRP 加工実験に 1 ビーム（基本波 150W、パルス幅 10ns、繰り返し周波数 75～150kHz）を供給するとともに、その集光・照射特性をレーザー技術総合研究所と協力して評価した。

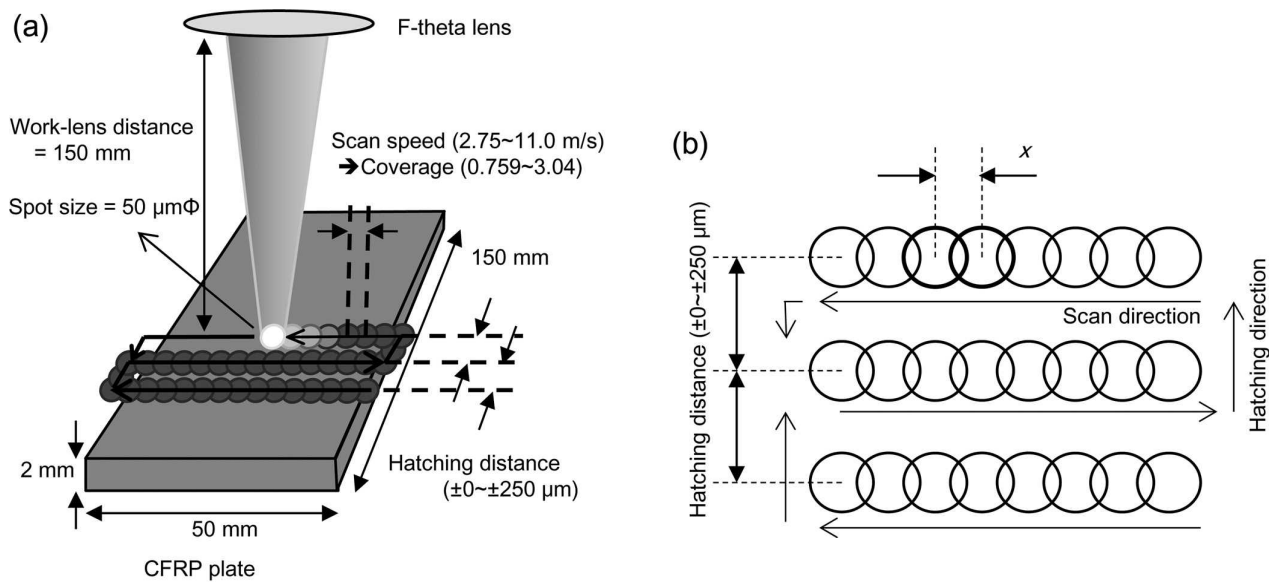
##### 2.1.2 「150 W, 10 ns 75kHz ファイバーレーザーによる評価実験」

接合科学研究所は、新日本工機に協力し、平成 22 年度～平成 24 年度にレーザーエネルギー学研究センターにて開発された 150 W, 10 ns, 75kHz のファイバーレーザーを用い CFRP 切断基礎実験を推進する。CFRP 切断基礎実験のデータを積み重ねることで、平成 26 年度に実施される 1.5 kW パルスレーザー開発および当レーザーによる CFRP 切断加工システム開発のための基礎データとした。

当該加工実験には、自動車・航空機産業に最も採用される可能性が高いと思われる CFRP 材料を使用した。当 CFRP は、カーボン繊維を  $0^{\circ}$  ～  $90^{\circ}$  の方向に交互にクロスして重ねてエポキシ樹脂を含浸させて硬化した試料を用いた。レーザーには、レーザーエネルギー学研究センターにて開発された Yb ドープフォトニッククリスタルファイバー増幅パルスファイバーレーザー用い、波長 1064nm、平均出力 150 W、パルス幅 10 ns、繰り返し周波数 164 kHz である。図Ⅲ2.1-1 に CFRP 切断加工レーザーシステムの概略図を示す。レーザー強度は、減衰器を通して  $5.1 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> に調整し、ガルバノスキャナを用いて、掃引速度 2.75、11 m/s で掃引照射を行った。このときレーザーのスポット径は、ガウシャンビームを有し、 $1/e^2$  で 50μm である。図Ⅲ2.1-2 にレーザーの掃引パターンの概略図を示す。レーザーの走査経路は、8 の字を描き、その時のハッチング距離を 0 から 50μm 刻みに 250μm まで変化させた。



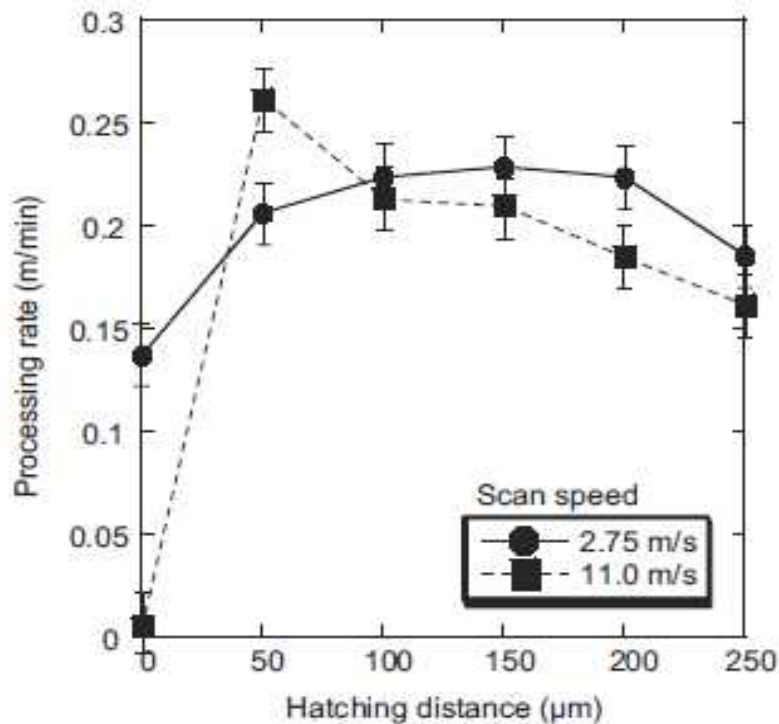
図Ⅲ2.1-1 150 W, 10 ns, 75kHz ファイバーレーザーによる CFRP 加工実験概略図



図Ⅲ2.1-2 CFRP 加工のスキヤンパターン

図Ⅲ2.1-3 にハッチング距離に対する加工速度依存性を示す。図Ⅲ2.1-3 に示したように、ハッチング幅が 0 の時には、掃引速度が 2.7m、11m とともに最も加工速度が遅く、ハッチング幅を大きくすると加工速度が早くなる。掃引速度 2.75m/s の場合 100~200μm のハッチング幅で、スキャン速度 11.0m/s

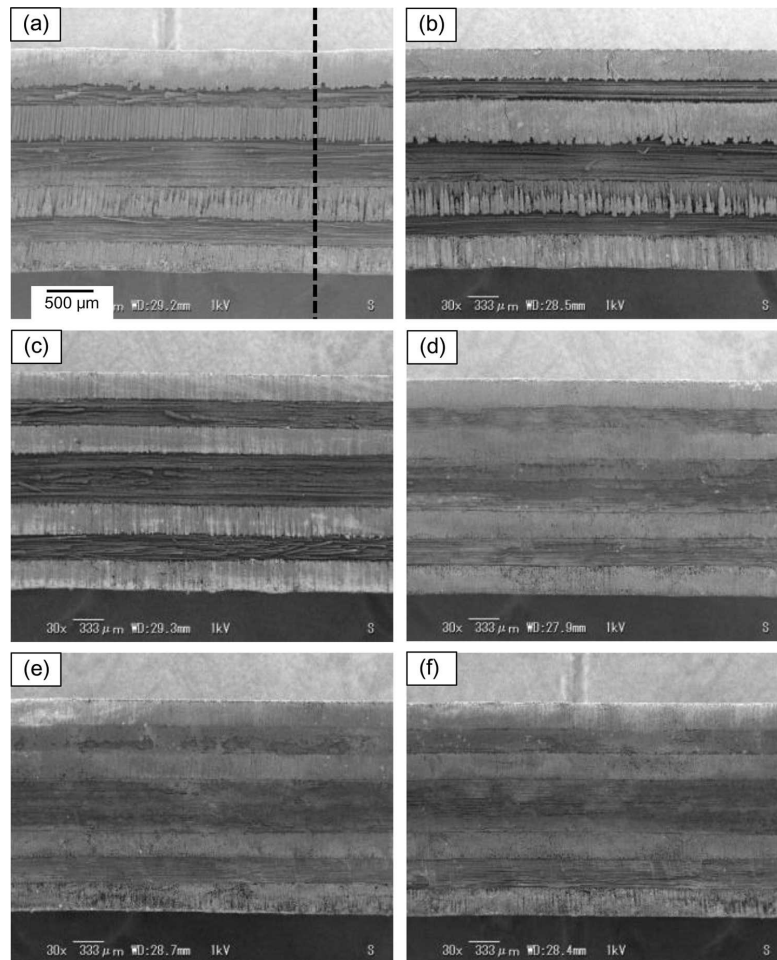
の場合 50~150 $\mu\text{m}$ のハッチング幅のときもっとも加工速度が速い。これはハッチング幅を設けることによりグループ内へのレーザー光の進入がし易くなり、加工が進みやすくなるものと考えられる。ハッチング距離をこれ以上大きくすると、加工時に取り除くアブレーション体積が大きくなり、加工速度が遅くなってしまふ。これらの結果から、レーザーを照射すると、まずアブレーションが発生し、その後、残留熱による燃焼が起き、樹脂の分解、熱変性が生じる。8の字でCFRPを掃引すると、掃引ハッチング内のCFRPにできた熱的変質、破砕部分を、両外側のレーザーパルス照射時に発生する反動圧力で取り除くため、加工速度が速くなるものと考えられる。



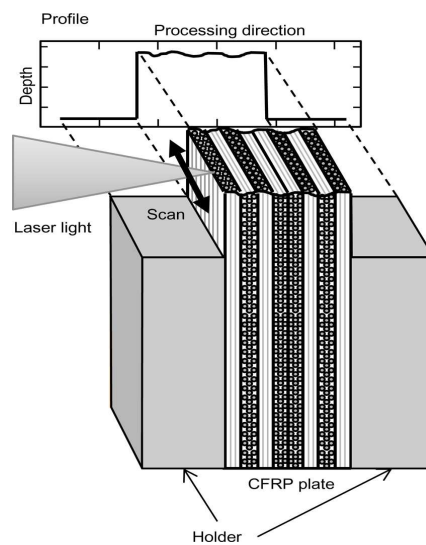
図III.2.1-3 ハッチング距離に対する加工速度依存性

次に、レーザー照射後のHAZの評価を行うために、SEMおよびレーザー顕微鏡観察を行った。図III.2.1-1は掃引速度2.75m/sでCFRPを切断加工したときの断面SEM像で(a)ハッチング距離0 $\mu\text{m}$ 、(b)50 $\mu\text{m}$ 、(c)100 $\mu\text{m}$ 、(d)150 $\mu\text{m}$ 、(e)200 $\mu\text{m}$ 、(f)250 $\mu\text{m}$ にそれぞれ対応する。(a)から(c)では、エポキシ樹脂が蒸発して、カーボン繊維が露出した領域が断面全般にわたって観測でき、熱損傷領域が生じている事が解かる。ハッチング距離を150 $\mu\text{m}$ 以上にした(d)から(f)までには、カーボン繊維が露出した領域は見られず、平坦な加工面が得られた。

次に、レーザー照射後のCFRPの加工断面の影響を調べるために、レーザーコンフォーカル顕微鏡 (Confocal laser scanning microscopy (CLSM)) を用いて断面プロファイル計測を行った。図III.2.1-5に断面プロファイルの測定方法を示す。

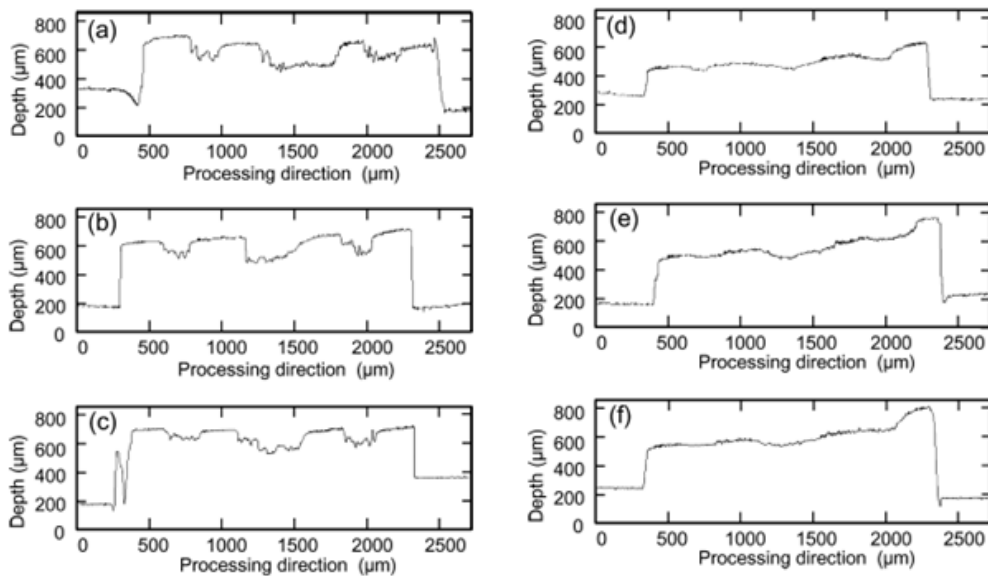


図Ⅲ.2.1-4 掃引速度 2.75m/s で切断した CFRP の断面 SEM 像、ハッチングディスタンス  
 (a) 0 $\mu$ m, (b) 50 $\mu$ m, (c) 100 $\mu$ m, (d) 150 $\mu$ m, (e) 200 $\mu$ m, (f) 250 $\mu$ m

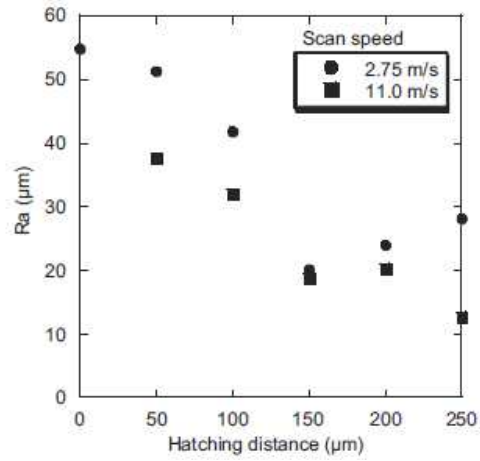


図Ⅲ.2.1-5 断面プロファイルの測定方法

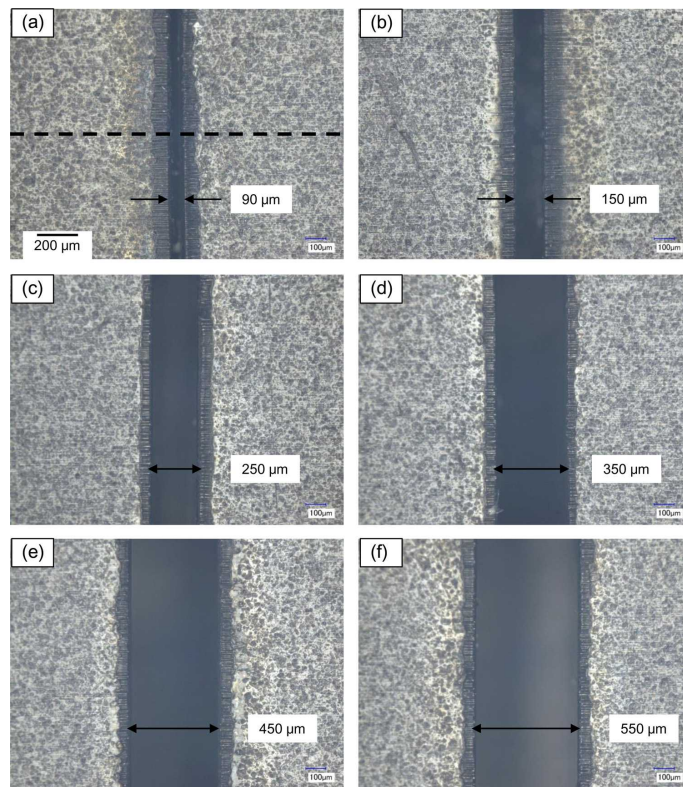
図Ⅲ2.1-6は図Ⅲ2.1-4(a)内に示す直線部の断面のプロファイル測定結果である。(a)はハッチング距離0 $\mu\text{m}$ 、(b)は50 $\mu\text{m}$ 、(c)は100 $\mu\text{m}$ 、(d)は150 $\mu\text{m}$ 、(e)は200 $\mu\text{m}$ 、(f)は250 $\mu\text{m}$ である。レーザーはx軸は、CFRPの厚さ方向を示し、x=0からレーザーが入射されている。(a)より、x=500からCFRPの表面に達し、約70 $\mu\text{m}$ 毎に炭素繊維が切断方向に対して、垂直層と平行層が表れ、Depth=±100 $\mu\text{m}$ の凹凸が形成されている事が分かる。ハッチング距離が大きくなると、Depthの凹凸が少なくなり平坦面が形成された。(a)、(b)、(c)では、凹凸の凸部は、切断面に垂直な層で凹部では平行層に相当することも分かる。凸部は炭素繊維がスキャン方向に対して垂直な層であるため熱が炭素繊維に沿ってすぐに伝導し拡散され冷却される。一方、凹部は炭素繊維が切断方向に対して平行な層であるため熱が拡散されず熱がたまる。そのため、樹脂が高温で融解しやすく炭素繊維が簡単に剥離されてしまう事が示唆される。図Ⅲ2.1-7は、掃引速度2.75m/s、11m/sの掃引速度で加工したとき、加工断面の算術平均粗さRaのハッチング距離依存性を示す。どちらの掃引速度でもハッチング幅の増加とともにRaが小さくなり、ハッチング幅±150 $\mu\text{m}$ 以降、Ra値は飽和する。掃引速度11m/s、でハッチング距離250 $\mu\text{m}$ の時、Raは13 $\mu\text{m}$ と最も小さくなった。



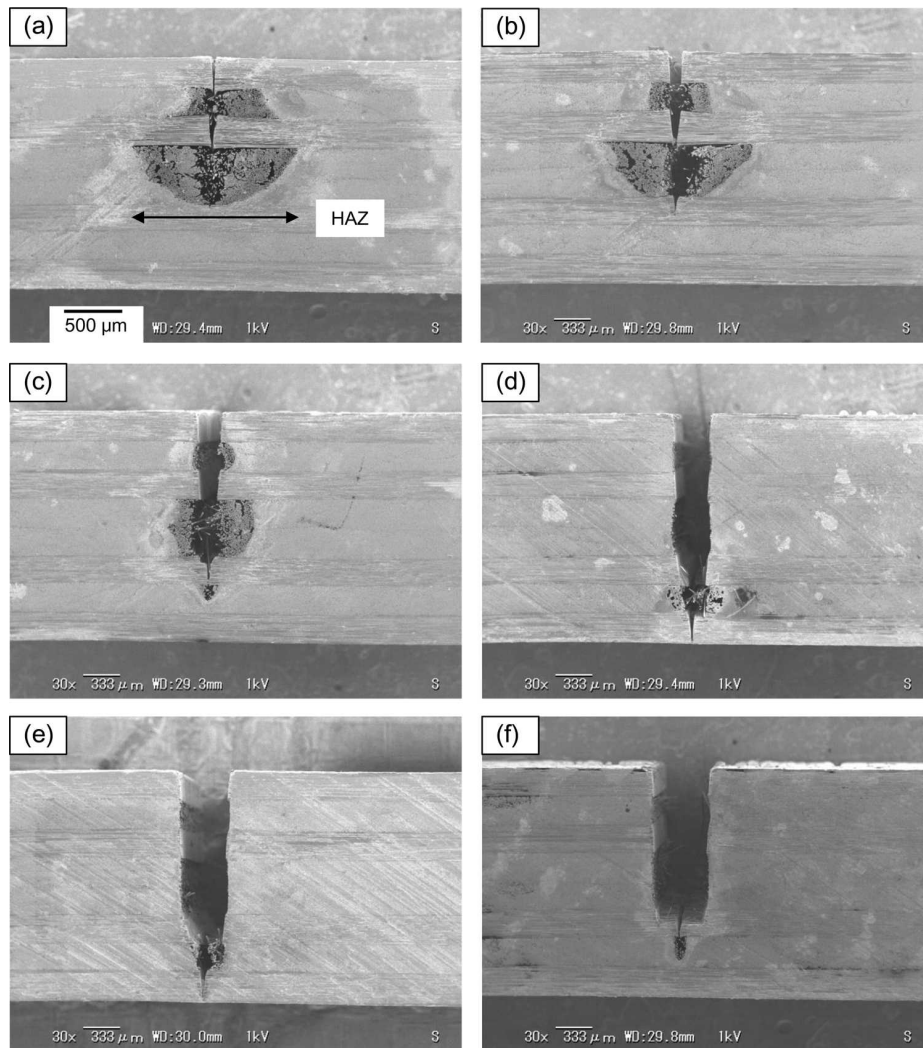
図Ⅲ2.1-6 掃引速度2.7m/sで切断後のCFRP加工断面プロファイル ハッチングディスタンス  
(a)0 $\mu\text{m}$ , (b)50 $\mu\text{m}$ , (c)100 $\mu\text{m}$ , (d)150 $\mu\text{m}$ , (e)200 $\mu\text{m}$ , (f)250 $\mu\text{m}$



図III.2.1-7 ハッチングディスタンスに対する算術平均粗さ Ra 依存性



図III.2.1-8 掃引速度 2.75m/s で切断したときのカーフ幅 ハッチングディスタンス  
(a) 0μm, (b) 50μm, (c) 100μm, (d) 150μm, (e) 200μm, (f) 250μm



図III.2.1-9 2.75m/s で掃引照射したときの CFRP 断面 SEM 像

次に、厚み 2mm の CFRP にスキャン速度 2.75m/s でレーザーを 8 秒間照射し、その後 CFRP 表面の光学顕微鏡観察を行った。図III.2.1-8 は、CFRP 表面の微鏡像を示している。(a)ハッチング距離±0μm、(b)は±50μm、(c)は±100μm、(d)は±150μm、(e)は±200μm、(f)は±250μm にそれぞれ対応する。図III.2.1-8 (a)より、スポット径 50μm のレーザー光は幅 90μm の加工溝を形成している。これは、CFRP がアブレーションで加工とレーザースポットからの熱伝導による蒸発、つまり熱加工が起きている事を示唆する。加工後の品質は、表層の樹脂は、幅約 100μm にわたってカーボン繊維が露出し、その後、樹脂の変色領域が観察され、これらを併せて本報告では HAZ と定義する。ハッチング距離 0μm の HAZ は、120μm である。図III.2.1-8 (b)のハッチング距離は±50μm、カーフ幅は約 150μm である。これはスポット径とハッチング距離に一致する。以下、(c)から(f)においても、ハッチング距離と加工溝幅が等しくなり、これらはアブレーション加工が支配的であることを示唆している。しかし、(c)から(f)では、HAZ が 70μm である。(a)と(b)に比べて小さい。ハッチング距離が広がるとアブレーション加工が支配的となり、熱的影響が小さくなったと考えられる。

CFRP 内部の熱影響を調べるために、図III.2.1-8 (a)の破線部に沿って機械切断を行い、断面観察を



行った。図Ⅲ2.1-9は、断面のSEM像を示している。図Ⅲ2.1-9(a)では中層部を中心にHAZが広がっている様子が観測され、HAZ幅は500 $\mu\text{m}$ である。これは、ハッチング距離が短いと途中でアブレーション加工が止まり、レーザーエネルギーが熱に変わって、熱が拡散し、HAZを拡大させていると考えられる。また、炭素繊維の積層方向によって熱拡散が変わるので、切断面に垂直な層では熱が炭素繊維に沿ってすぐに伝導し拡散され冷却されやすいが、炭素繊維が切断面に平行な層は熱が拡散されず熱がたまるためHAZが大きい。(b)から(f)にかけて、ハッチング距離が広がるとアブレーションが進行するので熱の蓄積が少なくなり、HAZが低減する。特に、ハッチング幅 $\pm 150\mu\text{m}$ 以上ではHAZが70 $\mu\text{m}$ と低減されている。つまり、レーザーによる切断加工を行う場合には、アブレーションによる加工物を排出し易くするため、溝幅を十分確保する必要があることを明らかにした。

### 2.1.3 「150 Wパルスファイバーレーザー開発、モジュール化技術開発および評価実験」

古河電気工業は、モジュール化対応のパルスシート光源開発を行った。片岡製作所は、150W級のパルスファイバーレーザーのモジュール化技術開発を行った。開発パルスファイバーレーザーモジュールのパルス幅および繰り返し周波数は、平成25年に行われた実験結果から明らかになったパルス幅および繰り返し周波数とした。さらに2台のパルスファイバーレーザーモジュールをビーム結合技術により結合するためのパルスファイバーレーザーモジュール結合ユニットを開発し、出力を2倍にした。接合科学研究所は、開発されたパルスファイバーレーザーモジュールを用い、雰囲気制御下においてCFRP切断の基礎実験を行った。切断後の熱的影響部を評価し、得られた基礎データを本レーザーモジュール化技術開発にフィードバックした。

#### 2.1.3.1 150W級パルスファイバーレーザー用シートレーザー開発

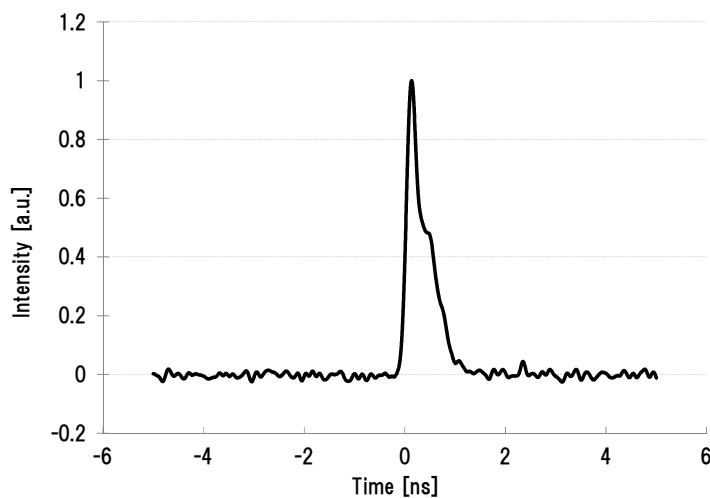
本開発では、150W級パルスファイバーレーザー用シートレーザーとして、パルス幅380ps、出力3W及びパルス幅10ns、出力50Wのパルスシートレーザーを開発した。外観写真を図Ⅲ2.1-10に示す。ナノ秒、サブナノ秒オーダーのパルス出力を繰り返し周波数やパルス幅の可変性を実現するため、パルスシートレーザーの光パルス発生に直接変調型半導体レーザー(LD)を用いた。ナノ秒、サブナノ秒の光パルス生成には、光パルスと同じ時間形状の電圧出力特性をもつ電気パルスが必要になるため、ナノ秒、サブナノ秒の電気パルス出力かつ繰り返し周波数の可変性を持たせた半導体レーザー駆動基板を開発した。その基板を用いて直接変調型半導体レーザーを駆動することで、ナノ秒、サブナノ秒の光パルス出力を実現した。本開発では、主に380ps及び10nsの光パルス出力を用いた。直接変調型半導体レーザーから出力された光パルスは、偏波保持型クラッド励起イットリビウムファイバーアンプにより増幅され、所望の出力に増幅される。光パルスの尖頭値が高くなると、光ファイバー中の非線形効果により誘導ラマン散乱や誘導ブリリュアン散乱が起これ、エネルギー散逸や光パルスの時間波形歪が生じる。本パルスシートレーザー出力はPCF増幅器により150Wまで増幅されるため、ワットクラスの平均パワーと高いビーム品質を両立させることが重要である。本要請を満たすため、非線形性の低いかつシングルモード性の高い偏波保持型イットリビウム添加ファイバーを用い、さら

に、増幅条件の最適化を行い、結果、パルス幅 380ps、繰り返し周波数 1MHz 時に出力が 3W、パルス幅 10ns、繰り返し周波数 1MHz 時に出力が 50W を達成した。この時パルスピークパワーはそれぞれ、約 8kW、5kW である。出力パルスの時間波形をそれぞれ、図Ⅲ2.1-11 及び図Ⅲ2.1-12 に、出力特性を図Ⅲ2.1-13 及び図Ⅲ2.1-14 に示す。

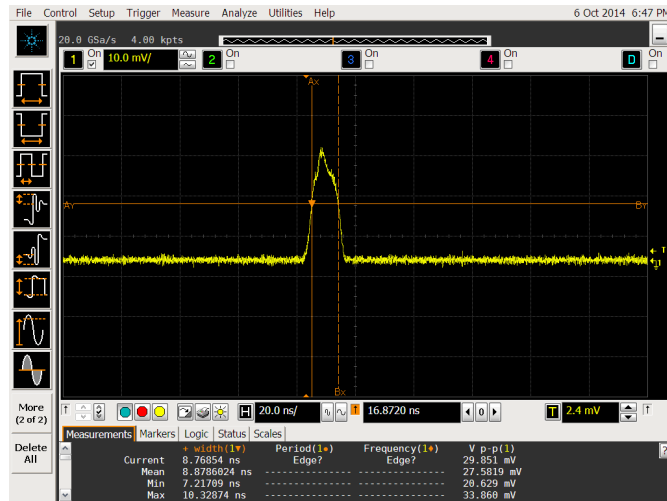
また、開発したパルスシードレーザーの安定性を評価するために、連続動作試験を行った。結果をそれぞれ図Ⅲ2.1-15 及び図Ⅲ2.1-16 に示す。380ps パルスシードレーザーでは最大出力 3W、10ns パルスシードレーザーでは最大出力 50W で安定に出力されていることを実証した。当該レーザーを用いた CFRP 加工評価については、2.1.4 「150 W サブナノ秒ファイバーレーザーアブレーション評価実験」にて後述する。



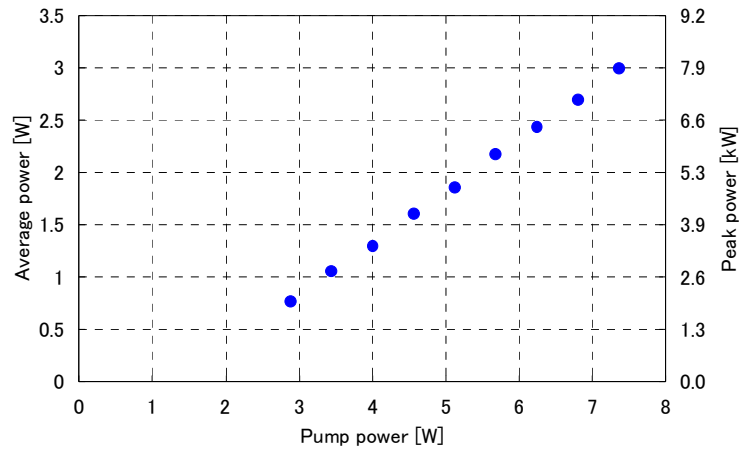
図Ⅲ2.1-10 150W 級パルスファイバーレーザー用シードレーザー



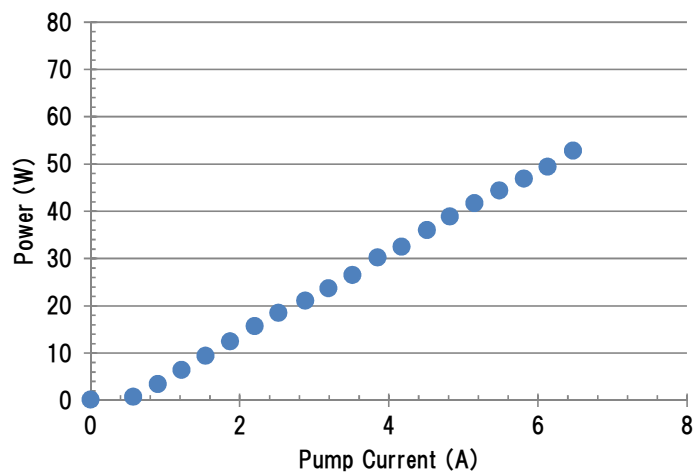
図Ⅲ2.1-11 380ps パルスシードレーザーの出力時間波形



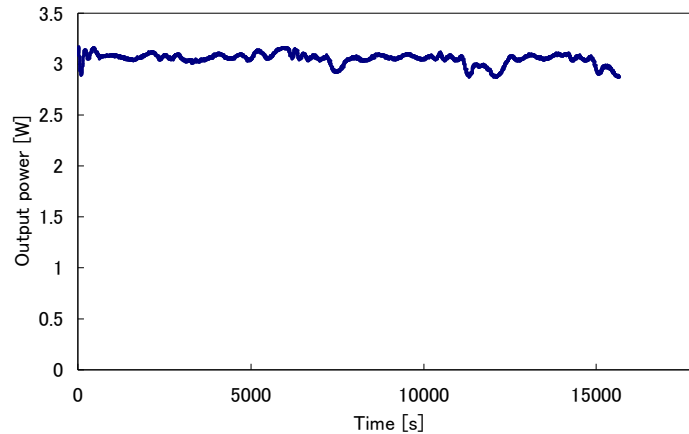
図Ⅲ2.1-12 10ns パルスシードレーザーの出力時間波形



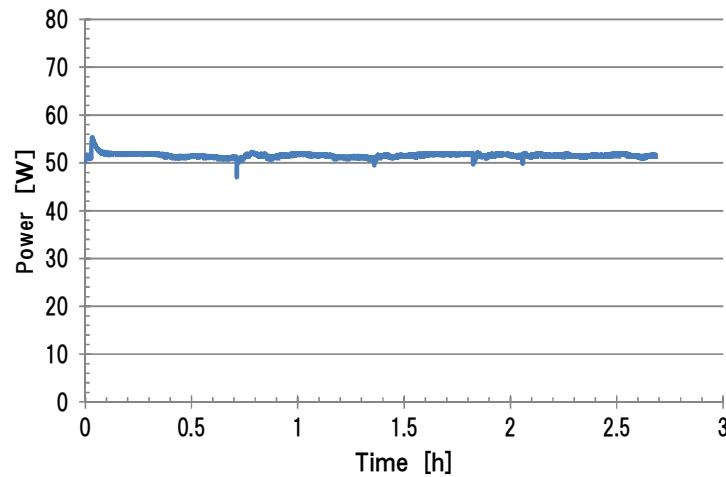
図Ⅲ2.1-13 380ps パルスシードレーザーの出力特性



図Ⅲ2.1-14 10ns パルスシードレーザーの出力特性



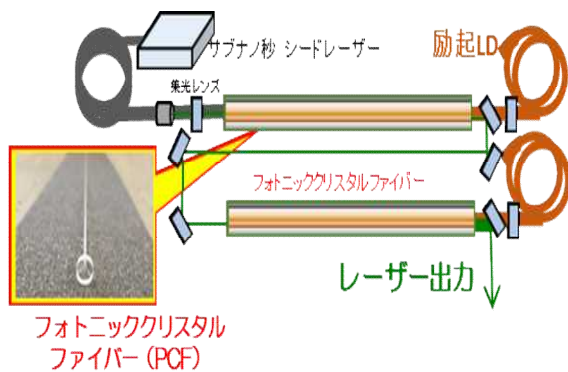
図Ⅲ2.1-15 380ps パルスシードレーザーの出力安定性



図Ⅲ2.1-16 10ns パルスシードレーザーの出力安定性

### 2.1.3.2 フォトニッククリスタルファイバー増幅器

本項では先述した LMA ファイバーから出力されるレーザー光を、フォトニッククリスタルファイバー(PCF)を2段用いて増幅した。フォトニッククリスタルファイバーは、赤外光から可視光に渡る広い波長帯で単一モードでビームを伝搬できる利点を持ち、しかも非線形現象を抑制し、高ピーク出力の発生が可能となる。図Ⅲ2.1-18 に PCF 増幅パルスファイバーレーザーの概略図を、図Ⅲ2.1-17 にシステムの写真を示す。先述したパルス幅 400ps のシード光を PCF のコアに導光し、クラッド部から励起光である波長 975nm の半導体レーザーを導光し、シード光レーザーを増幅させた。その結果、励起光パワーを増加していくとシード光は、線形に増幅され、300W 入力で最大 172 W の出力を得た。励起 LD に対するレーザー増幅値をスロープ効率とし、効率  $\eta$  を求めた。励起光を高くすると効率も高くなり、励起光を 50 W のときスロープ効率が 48%に達し、その後飽和した。増幅の内訳は、2 段の増幅の内、一段目の増幅で 36W、二段目の増幅で 172W である。



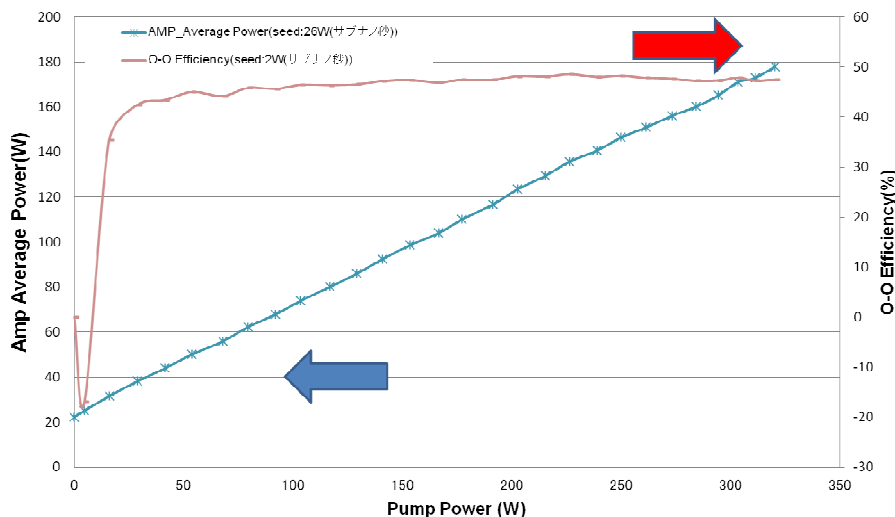
図Ⅲ2.1-17 PCF 増幅パルス

ファイバーレーザーの概略図



図Ⅲ2.1-18 サブナノ秒パルス

ファイバーレーザーシステム

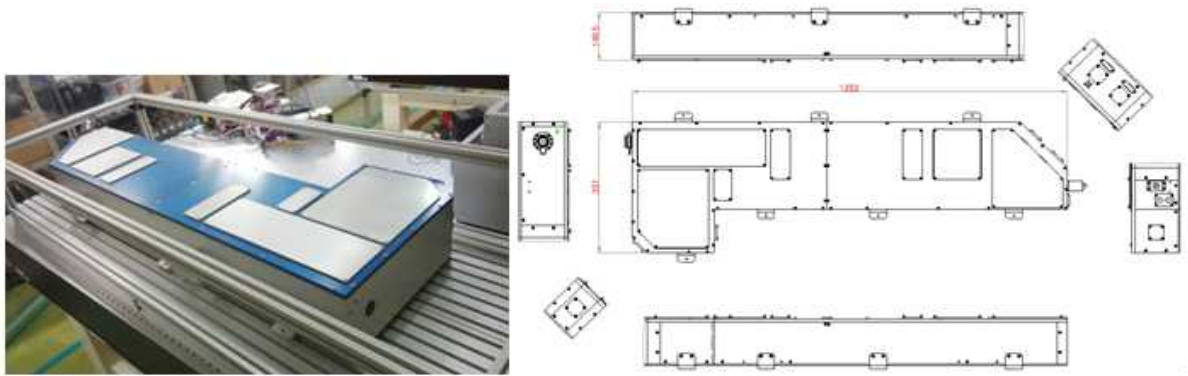


図Ⅲ2.1-19 励起光に対する平均出力および光変換効率

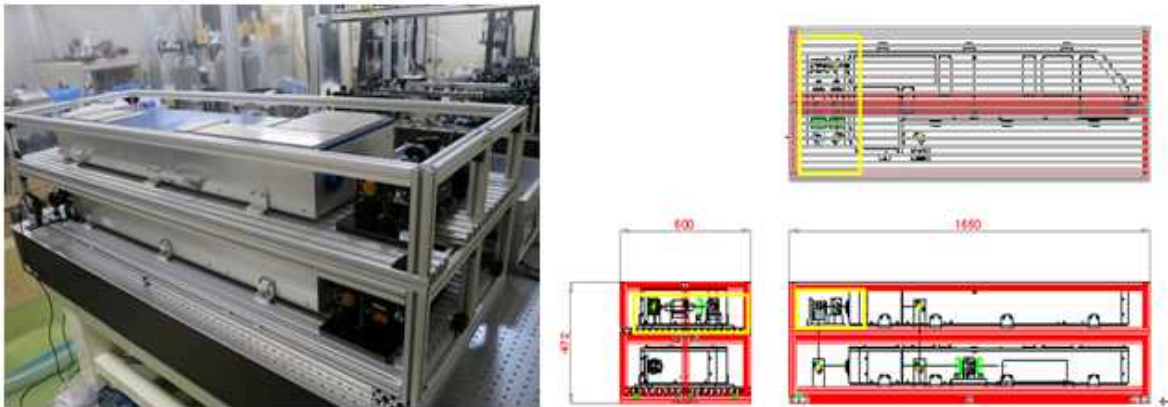
### 2. 1. 3. 3 モジュール化技術の開発

本開発では、直接変調型半導体 LD とファイバー増幅器を用いて作られた短パルス高ピークパワーのパルスファイバーレーザーをシード光源として使用できる「高出力パルスファイバーレーザーモジュール」を開発した。図Ⅲ2.1-20 に開発した高出力パルスファイバーレーザーモジュールを示す。本レーザーモジュールは、高集光性能（横モード）を維持したまま、高平均パワー150W、繰返し周波数 1MHz、パルス幅は、10ns を得ることに成功した。さらに、モジュールを並列化することで更なる高出力化を可能とした。図Ⅲ2.1-21 にパルスファイバーレーザーモジュール結合ユニットを示す。上下段に配置された各パルスファイバーレーザーのビームを偏波合成の出来る結合ユニットにて結合することが出来る。図Ⅲ2.1-22 にパルスファイバーレーザーモジュール結合ユニットのスロープ効率を示す。各レーザーの平均出力がそれぞれ 90W のとき、結合ユニットでビーム結合するとトータル出

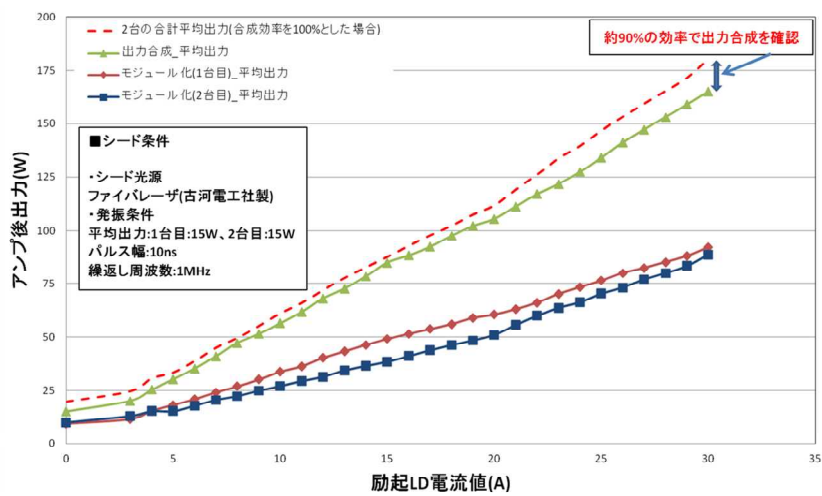
力が 162W となり、結合効率は 90%を達成している事が解かる。



図Ⅲ2.1-20 150W,10ns, 1MHz,PCF 増幅パルスファイバーレーザーモジュール



図Ⅲ2.1-21 並列化した PCF 増幅パルスファイバーレーザーモジュールファイバーレーザー



図Ⅲ2.1-22 2 ビーム結合したときのスロープ効率

#### 2.1.4 「150 W サブナノ秒ファイバーレーザーアブレーション評価実験」

接合科学研究所は、古河電気工業および片岡製作所と協力し、サブナノ秒ファイバーレーザーを用いた CFRP 加工実験において、高速度ビデオカメラ観察によるアブレーションプルームの挙動解析、構成元素計測位置特定ユニットおよびエネルギー分散型蛍光エックス線ユニットによる加工後 CFRP の元素分析、およびレーザーラマン分光光度計システムによる CFRP 加工の切断機構分析を行う。これにより、加工品質に対する短パルス化および短波長化の効果を明らかにした。

##### 2.1.4.1 CFRP のアブレーション挙動解析とアブレーションレートの実験方法

実験試料には、PAN 系炭素繊維素材（炭素繊維直径：6 $\mu\text{m}$ ）を 5mm 幅で経糸と緯糸として 0 度～90 度に平織したクロスシートをエポキシ樹脂で含浸硬化させた厚さ 0.6mm のクロス CFRP を用いた。CFRP のエポキシ樹脂と炭素繊維は重量比で 4.5 : 5.5 である。実験に用いた CFRP の熱特性を明らかにするために示差熱重量測定を行った。図 III.2.1-23 に示差熱重量測定(Differential Thermal Analysis)の概略図を示す。加熱炉内に試料と基準物質を配置し、加熱炉の温度を 10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  で 40 度から 1000 度まで昇温させたときの、基準物質とサンプル間の温度差および示差熱を測定し、CFRP の樹脂部の融点および融解熱量を測定した。ここで基準物質には $\alpha$ アルミナを用いた。

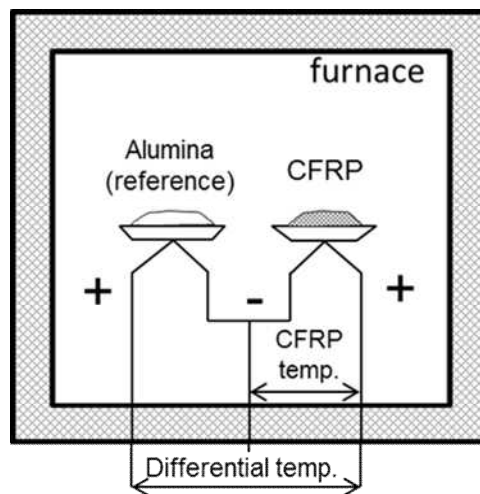


図 III.2.1-1 Experimental setup for differential thermal analysis.

図 III.2.1-24 にレーザーによる CFRP アブレーションの実験光学系の概略図を示す。クロス CFRP を x-y ステージ設置し、減衰器を通ったレーザー光を焦点距離 f200mm のレンズで集光照射した。レーザーには、Nd:YAG レーザーの基本波 (Surelite III, Continuum, Ltd.)を用いている。レーザー照射条件は、表 III.2.1-1 に記す。レーザーパルス幅、平均出力、繰り返し周波数は、それぞれ 1064nm、6ns、10Hz である。レーザー照射時のビームプロファイルは、CFRP の後方に配置した CCD カメラで実測し図 III.2.1-24 に示す様にレーザーのスポット径は、FWHM で 100 $\mu\text{m}$ に設定した。1 パルスあたりのアブレーションマスを測定するために、ビーム径 100 $\mu\text{m}$  のレーザー光を、1mm/sec で掃引照射を行い、

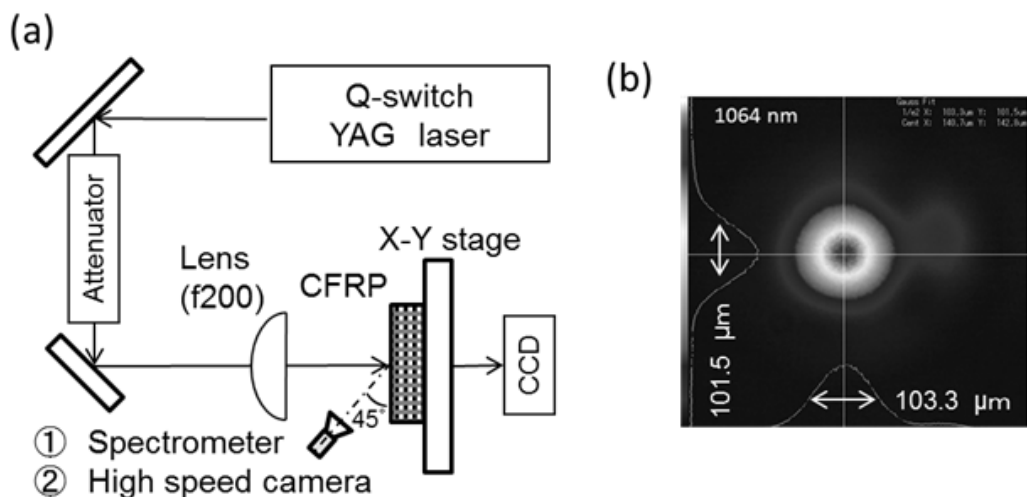
3次元レーザー顕微鏡(VK-X100 keyence co. jp)を用いて加工体積を測定する。アブレーションマス  $M_{ab}$  は、アブレーション体積  $V_L$  と総レーザーショット数  $n$  で次式から求めた。

$$M_{ab} = \frac{\rho V_L}{n} \quad (1)$$

$$n = \frac{fa}{v} \quad (2)$$

$f$ : 繰返し周波数、  $a$ : ビーム径、  $v$ : 掃引速度、  $\rho$ : CFRP 密度

ここで CFRP の密度は、炭素繊維の密度  $2.26 \text{ g/cm}^3$  とエポキシ樹脂の密度  $1.85 \text{ g/cm}^3$  および CFRP の構成比から算出し、CFRP の密度  $\rho$  は、 $2.096 \text{ g/cm}^3$  となる。



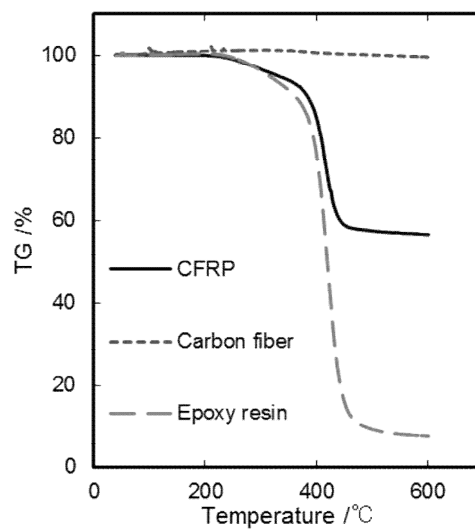
図III.2.1-24 Schematic arrangement of experimental set up (a) and beam profile measured (b).

窒素雰囲気中で CFRP、エポキシ樹脂、炭素繊維を加熱したときの熱重量変化 (Thermogravimetry :TG) の結果を図III.2.1-25 に示す。サンプルにエポキシ樹脂を用いた場合には、 $420^\circ\text{C}$  で TG が減少をはじめ、 $440^\circ\text{C}$  で TG は 0% に達した。一方、炭素繊維では、 $40^\circ\text{C}$  から加熱を続けても  $1000^\circ\text{C}$  まで TG の変化は見られなかった。サンプルに CFRP を用いた場合には、エポキシ樹脂と同様に、 $420^\circ\text{C}$  で CFRP の重量の減少が始まり  $440^\circ\text{C}$  では、CFRP の重量が 55% となった。この時の熱量は、 $-479.5 \text{ J/g}$  であった。その後、 $1000^\circ\text{C}$  まで昇温続けても、重量変化は見られなかった。測定後、サンプルを取り出すと、熱分解残渣が得られた。これは、炭素繊維は  $3600^\circ\text{C}$  で昇華するので、CFRP 内の炭素繊維が熱分解残渣になったと考えられる。また、 $420^\circ\text{C}$  での融解熱は、CFRP のエポキシ樹脂が熱分解を起こし、 $479.5 \text{ J/g}$  の吸熱反応を起こしていると考えられる。



表Ⅲ2.1-1 Experimental conditions.

Wavelength (nm)	1064
Laser power (W/cm <sup>2</sup> )	4.7x10 <sup>9</sup>
Pulse width (ns)	6
Frequency (Hz)	10
Intensity (mJ/pulse)	2.19
Focal length (mm)	200
Spot diameter (μm)	100



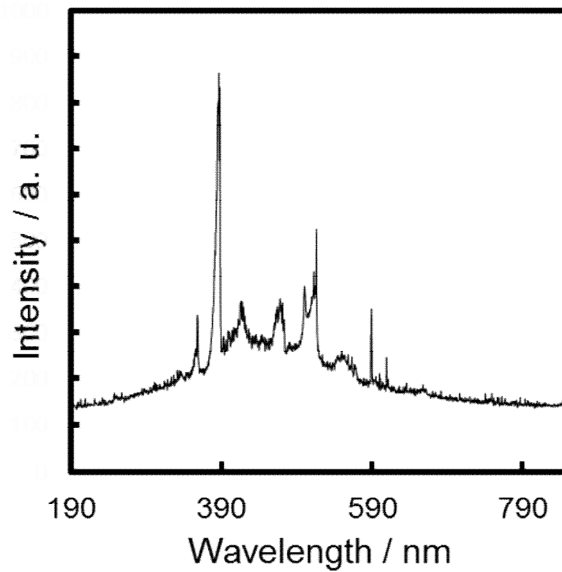
図Ⅲ2.1-25 Differential thermal analysis of CFRP in N<sub>2</sub> gas ambience.

#### 2.1.4.2 レーザーアブレーションの分光測定

CFRP のアブレーションプラズマの発光を、分光器を用いてスペクトル解析を行った。その結果を図Ⅲ2.1-26 に記す。プラズマ内には、波長 330、356、467nm の O II の発光スペクトルと、515nm の C II の発光スペクトルを観察することができた。これは、レーザーアブレーションによって蒸発したプラズマ内の C および O がイオン化していることを示唆している。さらに、次式に示す様にウィーンの変位則を用いてプラズマ温度  $T_v$  を算出した。

$$T_v = \frac{b}{\lambda_{\max}} \quad (3)$$

$b=2.898 \times 10^{-3}$  (mK)、 $\lambda_{\max}$  は発光分光のピーク波長を示している。図Ⅲ2.1-26 より、利得ピーク波長は 450 nm であるので、プラズマ温度  $T_v$  は、6673 K と算出される。

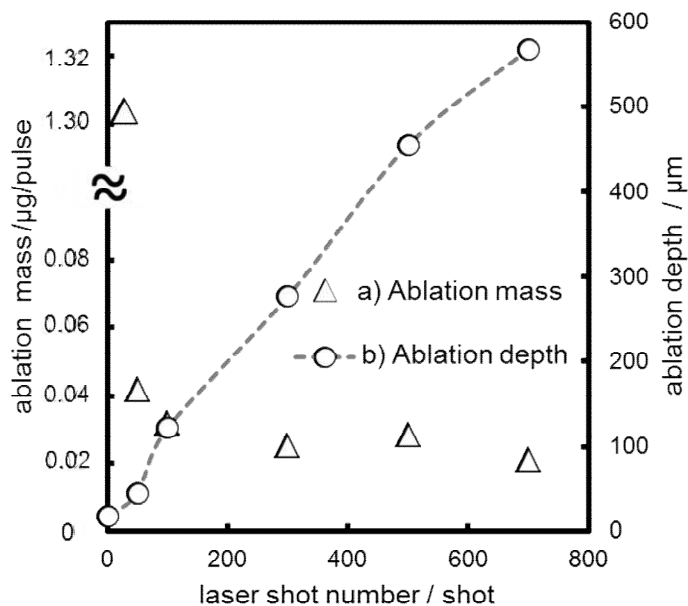


図Ⅲ2.1-26 Emission spectra of CFRP ablation

#### 2. 1. 4. 3 アブレーションマスの測定

式(1)を用いて求めたアブレーションマスに対するレーザー照射数依存性を図Ⅲ2.1-27 に示す。

a)はパルスあたりのアブレーションマス、b)は加工深さを示している。レーザー照射数が増加すると、パルスあたりのアブレーションマスは、1 shot 照射時には、 $1.31 \mu\text{g}/\text{pulse}$ であったが、50 shot では、 $0.04 \mu\text{g}/\text{pulse}$ 、500 shot では  $0.028 \mu\text{g}/\text{pulse}$  と加工深さが大きくなるにつれて減少して行くことが判った。また、レーザー照射数が 700shot の時、厚さ 0.6mm の CFRP は切断することができた。この時の平均加工深さは、 $0.85 \mu\text{m}/\text{pulse}$  であった。



図Ⅲ2.1-27 Correlation between the laser shot number and ablation mass per pulse and ablation depth.

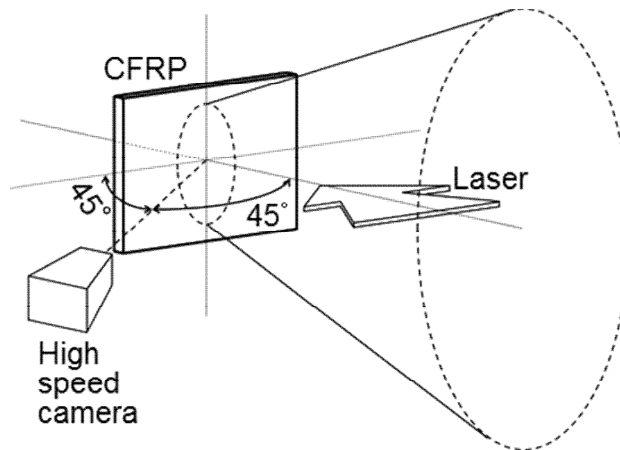
#### 2.1.4.4 ハイスピードカメラによるレーザープルームの挙動解析

1shot 照射時のレーザーアブレーションの挙動を解析するために、高速度ビデオカメラ (MEMRECAM HX-3, nac(株),)を用いて CFRP のアブレーションの撮影を行った。高速度ビデオカメラは、200000 fps、露光時間は 0.8  $\mu\text{sec}$  に設定し、図III.2.1-28 に示す様に、レーザー入射面から  $45^\circ$  傾斜させて撮影した。レーザー照射条件は、表III.2.1-1 で示した通りである。

図III.2.1-29 (a)~(f)は、 $5\mu\text{sec}$  毎のフレーム写真を示している。レーザーが  $t=0 \text{ sec}$  で CFRP に入射されると、 $5\mu\text{sec}$  後にアブレーションが発生し、強い発光を伴いながら膨張を始める。

その後、アブレーションプルームは膨張をつづけ、約 25  $\mu\text{sec}$  後に消滅した。今回実験に用いたレーザーは、繰り返し周波数が 10 Hz と、パルス間隔が  $100\mu\text{sec}$  となるためプルームの寿命が  $25\mu\text{sec}$  であり次のレーザーパルスに重なることはない。次にプルームの移動速度を測定すると、約 15 m/s で移動していることがわかった。

次に 1 shot 照射後の CFRP の表面の SEM 写真を図III.2.1-30 に示す。CFRP 表層のエポキシ樹脂部がレーザーによって蒸発し、炭素繊維が剥き出しになっていることがわかる。エポキシ樹脂の波長 1064nm の吸収係数は、 $0.75 \text{ cm}^{-1}$  と吸収が低く、炭素繊維の  $14\mu\text{m}^{-1}$  と高い。そのため、図III.2.1-31 に示す様に波長 1064nm のレーザー光はエポキシ樹脂部を殆ど透過し、炭素繊維層で吸収される。吸収された炭素繊維は、温度上昇し、CFRP 内部で昇華し、この圧力膨張によって表層のエポキシ樹脂層と一緒に吹き飛び、アブレーションが起こる。図III.2.1-27 の最初のレーザー照射時にはアブレーションマスが  $1.31 \mu\text{g/pulse}$  と、2 shot 目以降の平均  $0.028 \mu\text{g/pulse}$  に比べて高くなるのは、表層の樹脂がアブレーションによって除去されるためと考える。

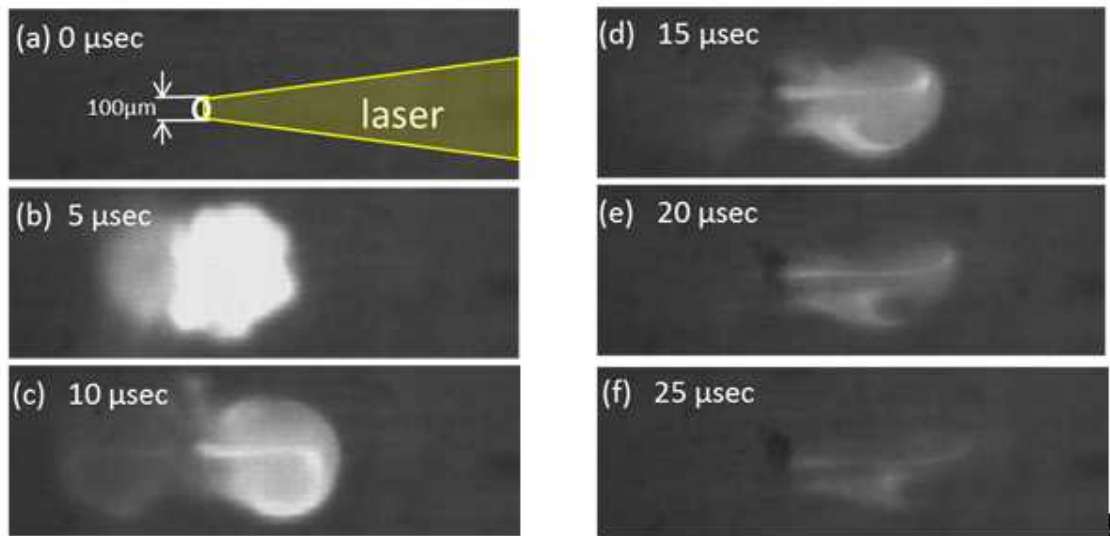


図III.2.1-28 Investigation of ablation dynamics with high speed video camera

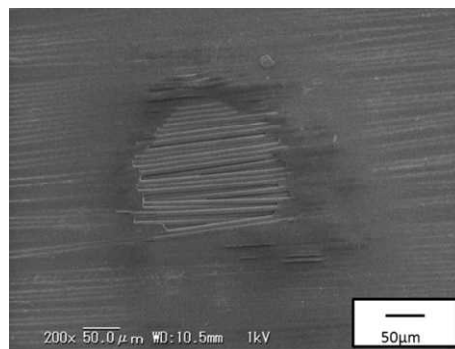
#### 2.1.4.5 エネルギーバランス

前述したように CFRP に波長 1064nm のレーザー光を集光照射すると、炭素繊維が光を吸収し、加熱、蒸発によって CFRP を構成するマトリックス樹脂、ここではエポキシ樹脂が破壊され、飛散して除去される。この結果、CFRP が除去される。このレーザーの投入エネルギーは、樹脂および炭素繊維の加熱、蒸発、イオン化のエネルギー  $E_{CFRP}$ 、輻射  $E_R$ 、プルームの運動エネルギー  $E_k$  にエネルギー

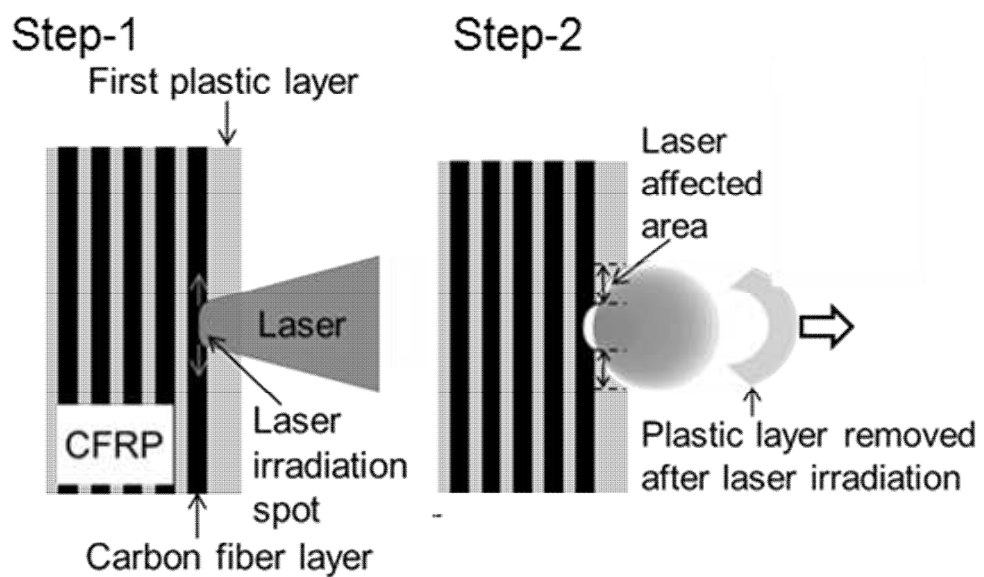
ギー遷移するので、次式の様に表すことが出来る。



図Ⅲ2.1-29 CFRP ablation with 1064 nm laser captured by high speed video camera, (a) 0μsec, (b) 5μsec, (c) 10μsec, (d) 15μsec, (e) 20μsec, (f) 25μsec in first laser shot at 20,000 fps and 5μsec shutter speed.



図Ⅲ2.1-30 SEM image of 1 shot laser irradiation on CFRP



図Ⅲ2.1-31 Ablation mechanism on CFRP with Nd: YAG laser irradiation

$$\alpha I_{\text{laser}} = E_{\text{CFRP}} + E_R + E_k \quad (4)$$

ここで $\alpha$ は、CFRPのレーザーに対する吸収係数を示す。式(4)の各項は、それぞれ以下のように表せる。

$$E_{\text{CFRP}} = \beta M_{\text{CFRP}} (c_{\text{CF}} \Delta T_v + L_{\text{CF}} + \gamma E_{(\text{O}, \text{C})}) + (1 - \beta) M_{\text{CFRP}} (c_{\text{EP}} \Delta T_v + L_{\text{EP}} + \gamma E_{(\text{O}, \text{C})}) \quad (5)$$

$$E_R = \sigma T^4 \quad (6)$$

$$E_k = \frac{1}{2} M_{\text{CFRP}} v^2 \quad (7)$$

$\beta$  : 炭素繊維の重量比率

$c_{\text{CF}}$  : 炭素繊維の比熱 J/gK

$c_{\text{EP}}$  : エポキシ樹脂の比熱 J/gk

$L_{\text{CF}}$  : 炭素繊維の昇華熱 J/g

$L_{\text{EP}}$  : エポキシ樹脂の融解熱 J/g

$E_{(\text{O}, \text{C})}$  : OおよびCのイオン化エネルギー-J/k

$\gamma$  : イオン化率

$\sigma$  : シュテファン・ボルツマン定数 W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>

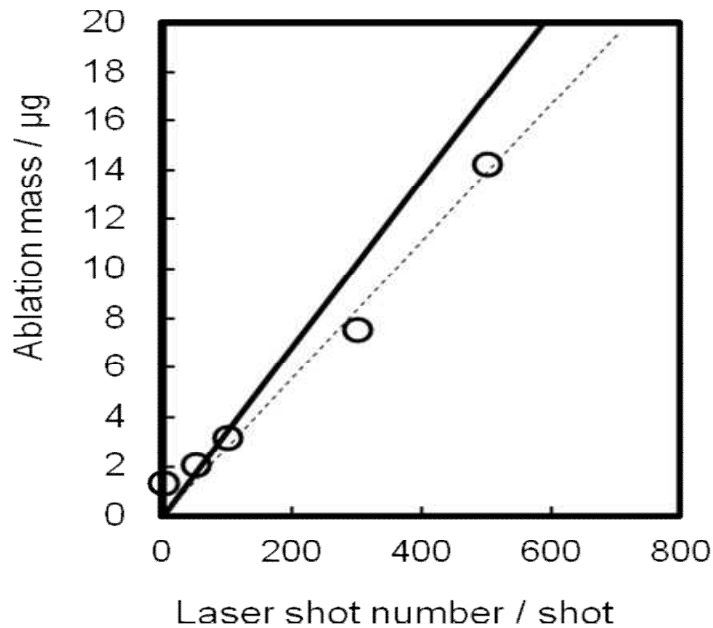
$v$  : プルームの上昇速度 m/s

式(4)からアブレーションマス  $M_{\text{CFRP}}$  は、次式で表すことができる。

$$M_{\text{CFRP}} = \frac{\alpha I_{\text{laser}} - E_R - E_k}{\beta (c_{\text{CF}} \Delta T_v + L_{\text{CF}} + \gamma E_{(\text{O}, \text{C})}) + (1 - \beta) (c_{\text{EP}} \Delta T_v + L_{\text{EP}} + \gamma E_{(\text{O}, \text{C})})} \quad (8)$$

本研究では、CFRPのエポキシ樹脂の融点および融解熱は、示差熱重量測定、プルームの温度およびイオン化については、プルームの分光測定、プルームの運動エネルギーは、高速度ビデオカメラを用いてそれぞれ実測した。それらの値を用いて式(8)にて、アブレーションマスを評価した。その結果を図III.2.1-32に記す。破線は実験値、直線はモデル値を示している。実験で求めた平均アブレーションマスは、0.028  $\mu\text{g}/\text{pulse}$  であったのに対し、モデル計算では、0.031  $\mu\text{g}/\text{pulse}$  とほぼ同値が得られた。レーザーショット数が増加すると計算値と実験値の差が大きくなるが、これは加工溝が深くなるとアブレーションによって発生したガスにレーザーが吸収されてしまい、レーザーのエネルギーがCFRPのアブレーションに遷移するエネルギー量が減少するためだと考える。

また、レーザーのエネルギーが炭素繊維の顕熱および昇華熱、エポキシ樹脂の顕熱、融解熱、炭素および酸素のイオン化エネルギー、輻射エネルギー、プルームの運動エネルギーに遷移するが、エネルギーの多くが酸素と炭素のイオン化エネルギーに費やされていることがわかった。そのため、加工効率を増加させるためには、プルームの温度を減少させることが重要であることを示唆する結果となった。



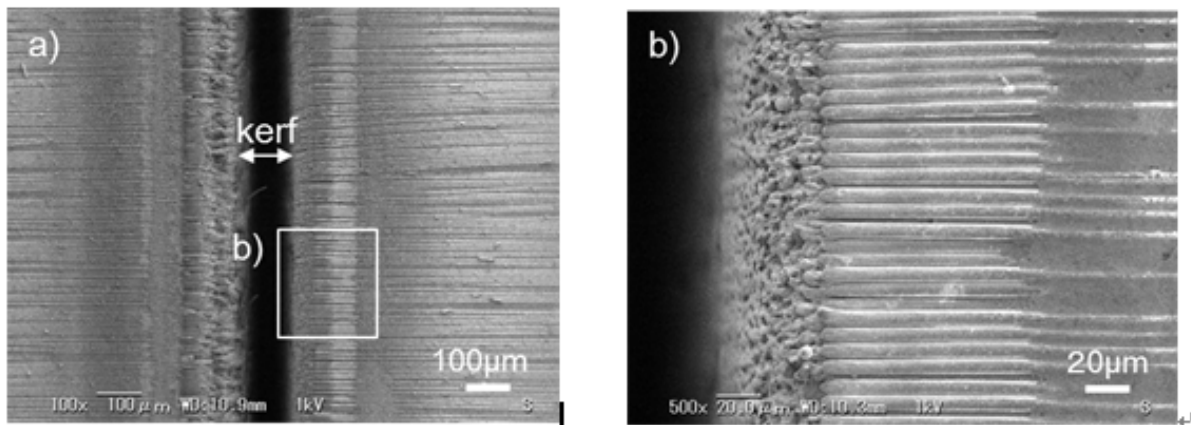
図III 2.1-32 Comparison of CFRP ablation mass between experiments and calculation as function of shot number.

#### 2. 1. 4. 5 SEM およびラマン分光による CFRP 加工の切断機構分析

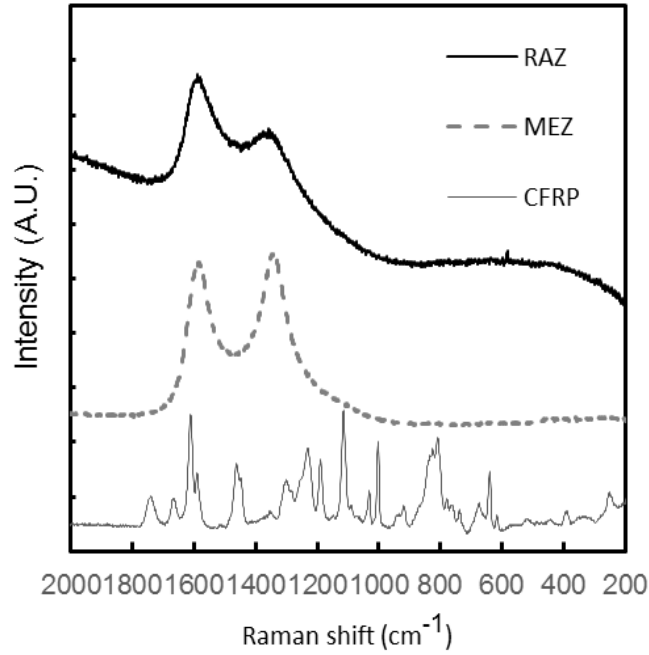
CFRP にレーザーを掃引照射して切断加工を行い、加工痕近傍に生じた HAZ を SEM (VE-9800, Keyence.co) 観察を行った。さらに、レーザー加工後の試料は、ラマン散乱分光光度計 (NRS-4100, Jasco co.) を用いて、HAZ の解析を行った。ラマン分光測定では、波長 532nm、出力 20 mW のレーザーを 100 倍の対物レンズでスポット径を約 1μm に集光し、分光解析を行った。図III 2.1-33 にレーザー強度が  $1 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>、700 回の掃引照射した CFRP の SEM 像を示す。図III 2.1-33 a) では、レーザー照射によって形成された加工溝とその周辺に熱影響部が形成されていることが確認できる。b) より、熱影響部内には炭素繊維が露出している領域である MEZ、樹脂が変性している領域である RAZ が共に形成されていることが確認できた。そこで母材の CFRP、MEZ、RAZ のそれぞれの箇所のラマン散乱分光測定を行った。図III 2.1-34 にレーザー照射後の各部のラマン散乱スペクトル測定の結果を示す。CFRP のラマン散乱スペクトルは、エポキシ樹脂由来のスペクトルが確認できる。MEZ 部では、樹脂の散乱スペクトルは一切現れず、カーボン由来の D バンドおよび G バンドの強いピークが現れた。これは、レーザーアブレーションによって、400℃～800℃に達し、樹脂が分解してしまい、炭素繊維が露出した領域 MEZ が生じたと示唆される。RAZ 部では、図III 2.1-34 よりカーボン由来の D バンドおよび G バンドとともに 800 cm<sup>-1</sup> から 2000 cm<sup>-1</sup> にブロードな蛍光が発している事が確認できた。また、蛍光スペクトルは、波数が長くなるほど強度が高くなっていることが判った。これまでの研究にてレーザー照射前後の CFRP のフーリエ変換赤外分光解析および熱重量解析を行った結果、レーザー照射によってエポキシ樹脂が 100℃以上に加熱されると、-OH 基が消失し、樹脂が変性する事が明らかになっている。そのため、この-OH 基が消失した樹脂は変性が生じ、そこから蛍光が発せられたと考えられる。Rita ら<sup>17)</sup> の報告によれば、エポキシ樹脂を 120℃で 2 時間熱処理すると蛍光スペクトルは長波長側にシフトすると報告しており、当該結果は、これと定性的に一致する。

次に、波数  $200\sim 2000\text{cm}^{-1}$  の測定スペクトルで最も強度が高く、炭素や樹脂ではスペクトルが現れない波数  $2000\text{ cm}^{-1}$  の強度分布をレーザー加工溝から  $30\text{ }\mu\text{m}$  間隔に 20 点の蛍光強度を測定し、マッピングを行った。図Ⅲ2.1-35 に波数  $2000\text{ cm}^{-1}$  の等高線図を示す。加工部から  $120\text{ }\mu\text{m}$  までは、蛍光強度が低い領域が続き  $120\text{ }\mu\text{m}$  で蛍光強度が高くなり、その後、 $250\text{ }\mu\text{m}$  まで強度は緩やかに小さくなった。その後再び蛍光は上昇するが  $330\text{ }\mu\text{m}$  で蛍光は小さくなった。図Ⅲ2.1-33 の SEM 像と比較すると、炭素繊維が露出した領域と蛍光強度が小さい  $120\text{ }\mu\text{m}$  までの箇所が一致しており、MEZ であると確認できた。次に蛍光強度の高い  $120\text{ }\mu\text{m}$  から  $210\text{ }\mu\text{m}$  の箇所では、SEM 像では、表層が黒色した領域が見られ、この領域と蛍光強度が高い領域が一致する。RAZ 部では、樹脂が熱変性を起こし、変性した樹脂が蛍光を発するものと考えられる。RAZ 部では  $2000\text{cm}^{-1}$  の強度が徐々に小さくなっているのは、熱変性の度合いがレーザー照射領域からの距離に依存していることを示唆している。つまり、RAZ は温度履歴として  $100\sim 400^\circ\text{C}$  に達した領域と推察することが解る。また、SEM 像から加工溝から  $250\mu\text{m}$  付近にデブリが付着していることから、アブレーションデブリとして炭素繊維や樹脂の残差の付着が起こり、蛍光強度が小さくなったと考えられる。その後、加工部から  $330\mu\text{m}$  以上の箇所では、蛍光強度は小さくなり、これは母材の CFRP を示していることが判る。

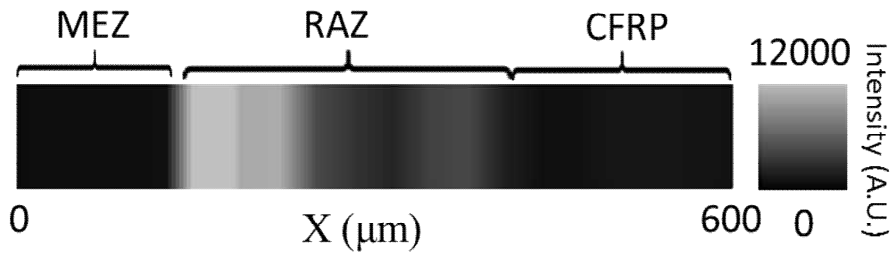
以上、上述した温度履歴と蛍光マッピングから、MEZ、RAZ がそれぞれ、 $120\mu\text{m}$ 、 $210\mu\text{m}$  となり、大気下でレーザー照射を行った CFRP の HAZ は、MEZ と RAZ を足し合わせた  $330\text{ }\mu\text{m}$  である事が判る。



図Ⅲ2.1-33 SEM image of CFRP after laser irradiation at the laser intensity of  $1\times 10^{10}\text{ W/cm}^2$  under air ambience, a)  $\times 100$  and b)  $\times 500$ .



図Ⅲ2.1-34 Raman shift of MEZ RAZ and CFRP after laser irradiation.



図Ⅲ2.1-35 Mapping of Raman shift at the wavenumber of 2000  $\text{cm}^{-1}$  from kerf to distance of 600  $\mu\text{m}$  on CFRP after laser irradiation

#### 2. 4. 1. 6 ガス雰囲気における CFRP の評価

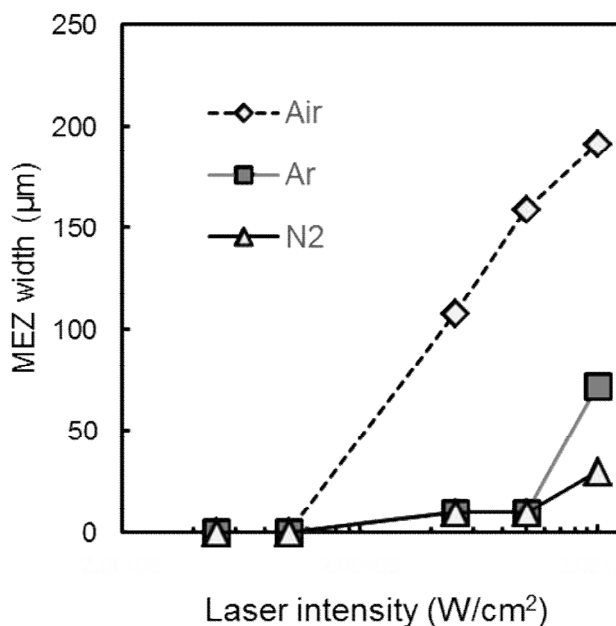
レーザー照射雰囲気にて Ar ガスおよび  $\text{N}_2$  ガスを 0.1MPa 充填した状態でレーザー強度  $1.0 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$  を CFRP に照射した。表Ⅲ2.1-2 に大気とアルゴンガス雰囲気にて加工した CFRP の実験結果を示す。その結果、大気、Ar、 $\text{N}_2$  雰囲気での加工レートは、それぞれ  $1.30 \mu\text{m/pulse}$ 、 $1.37 \mu\text{m/pulse}$ 、 $1.37 \mu\text{m/pulse}$  とほぼ同値となり、アブレーションマスおよび加工溝の幅は雰囲気の影響が小さい事が判る。一方、HAZ の評価として MEZ および RAZ のラマン散乱解析の結果を比較すると、アルゴン雰囲気および  $\text{N}_2$  雰囲気では MEZ が  $30 \mu\text{m}$  以下、RAZ は  $130 \mu\text{m}$  と大気と比べて HAZ が小さくなる事が判った。

表Ⅲ2.1-2 HAZs and ablation mass evaluation of CFRP after laser irradiation

	Air	Ar gas	$\text{N}_2$ gas
MEZ ( $\mu\text{m}$ )	108	30	0
RAZ ( $\mu\text{m}$ )	215	130	105
HAZ ( $\mu\text{m}$ )	323	160	105



次にレーザー強度を  $2.8 \times 10^8$ ,  $1.0 \times 10^9$ ,  $1.0 \times 10^{10}$ ,  $3.0 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> と変化させたときの大気および Ar ガス雰囲気下で加工した MEZ の依存性を図Ⅲ2.1-36 に示す。その結果、レーザー強度が  $2.8 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> の時の MEZ は、大気および Ar ガス雰囲気下では、どちらも約 30 μm であったが、レーザー強度が高くなると、大気雰囲気では徐々に MEZ が大きくなり、Ar 雰囲気下では、レーザー強度が  $1.0 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> 以上で大きくなり、 $3.0 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> の時には、MEZ が 200 μm となった。いずれのレーザー強度においても Ar および N<sub>2</sub> 雰囲気下でレーザー照射した CFRP の MEZ は小さいことが明らかになった。以上の結果、N<sub>2</sub> ガスを用いて 150W パルスファイバーレーザーでの加工雰囲気ガスとして用いることにした。



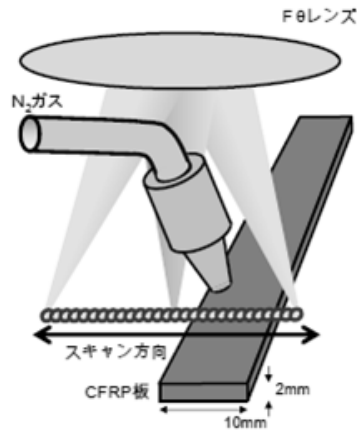
図Ⅲ2.1-36 Correlation between the laser intensity and width of MEZ on CFRP.

#### 2.4.1.7 150 W サブナノ秒ファイバーレーザーによる CFRP 加工評価

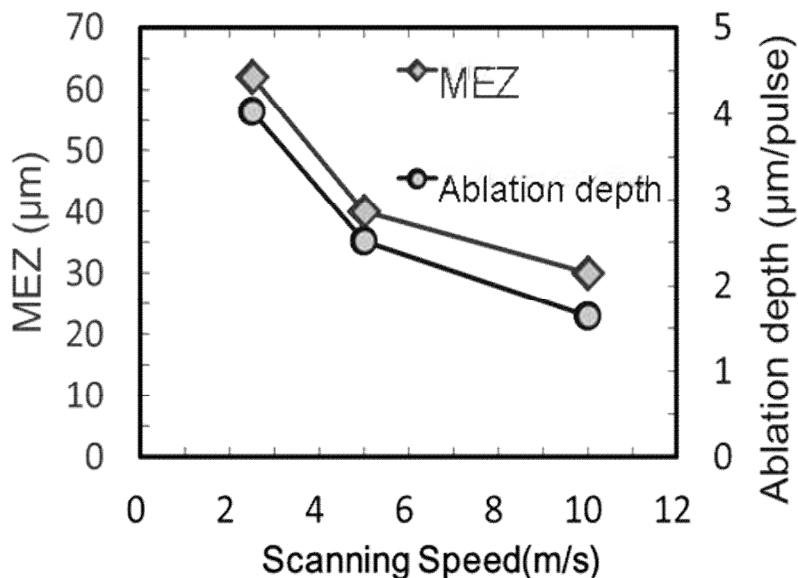
図Ⅲ2.1-37 にサブナノ秒パルスファイバーレーザーを用いた CFRP 切断加工実験の概略図を示す。レーザーはフォトリソグラフィ増幅パルスファイバーレーザーを用い、波長、パルス幅、繰返し周波数、平均出力はそれぞれ 1064 nm、0.4 ns、1 MHz、150 W である。レーザー強度は減衰器を通して  $1.3 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> に調整し、試料は厚さ 2.2 mm のクロス N を使用した。ガルバノスキャナを用いて、掃引速度 10~2.5 m/s のレーザーをステージに固定されたクロス CFRP に掃引照射を行った。レーザー照射後の試料を走査型電子顕微鏡(SEM)およびレーザー顕微鏡を用いて観察し、HAZ と加工レートを測定した(図Ⅲ2.1-38)。その結果、掃引速度が速くなると、アブレーション深さが小さくなり、同様に MEZ 小さくなることが解かった。これは、2.1.2 「150 W, 10 ns 75kHz ファイバーレーザーによる評価実験」に記載したように、掃引速度が遅いと、アブレーション作用と熱作用が現

れるため加工速度が高くなる。一方、掃引速度が速いとアブレーション作用が支配的になり加工速度は遅くなるが熱影響部の小さい加工となる事が解った。

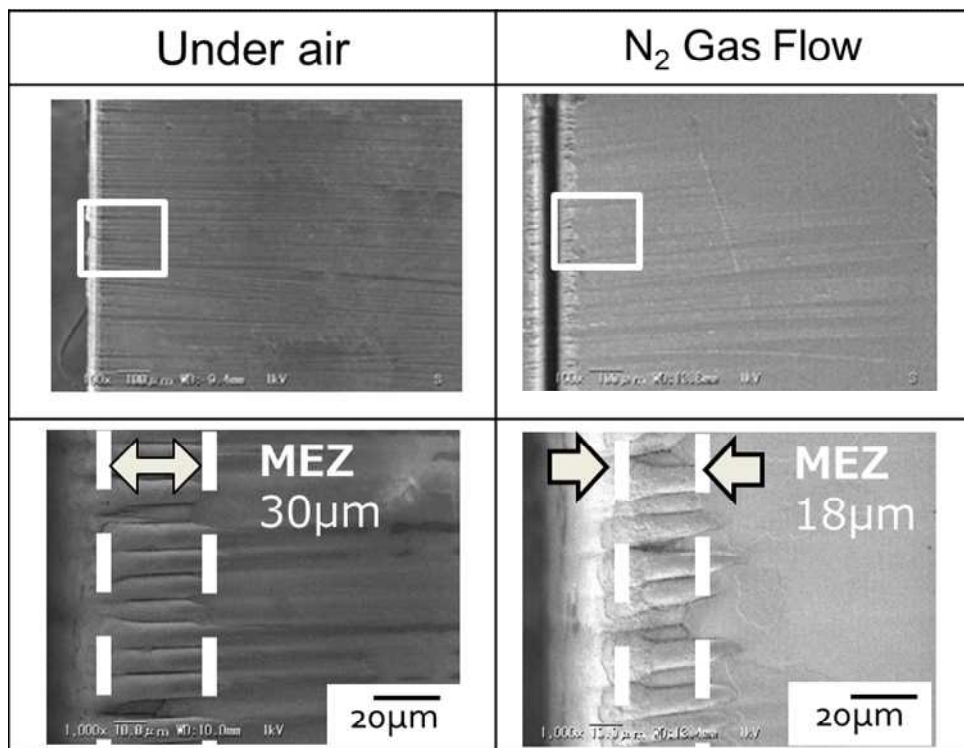
次に、レーザー照射時に N<sub>2</sub> ガスを吹き付けて、雰囲気酸素濃度を低くした状態で CFRP の加工を試みた。N<sub>2</sub> ガスは、アブレーション除去量から見積もり、100L/min とした。図Ⅲ2.1-39 に大気で照射した試料の表面 SEM 像と N<sub>2</sub> ガス吹付試料の SEM 像を示す。この時のレーザー強度は、 $1.3 \times 10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> である。大気下では、MEZ は 30 $\mu$ m であったが N<sub>2</sub> ガスを吹き付けした試料では、MEZ が 18 $\mu$ m と小さくなった。またに CFRP 切断面の SEM 像を示す。大気下で切断した CFRP では、炭素繊維回りのエポキシ樹脂が分解、蒸発してしまい、空孔やボイド等が発生した熱影響領域が面全体に出来ているのが確認できる。一方、N<sub>2</sub> ガスを吹き付けながら切断した CFRP では、ボイドは現れず加工面も平坦な面に仕上がっていた。以上の結果、図Ⅲ2.1-40 に示す様に品質が高くなることを実証した。



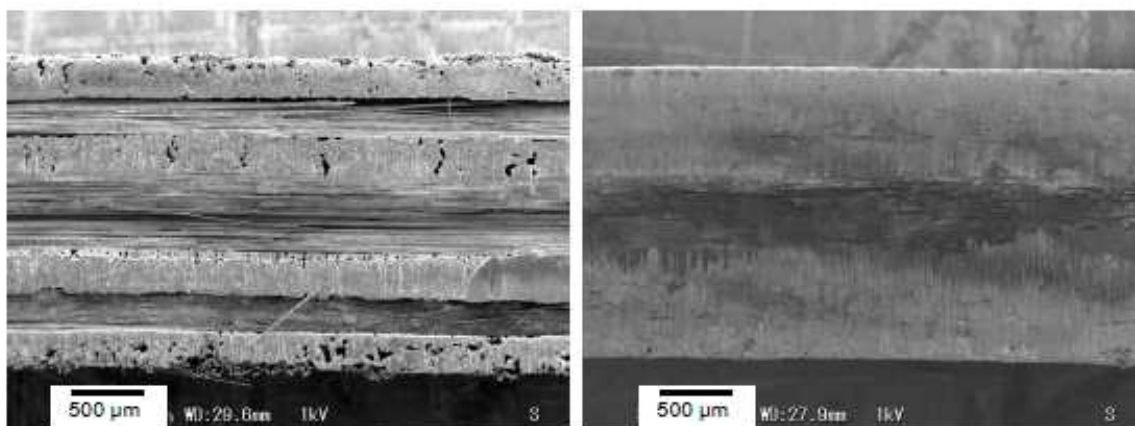
図Ⅲ2.1-37 Experimental set up with sub-nano second pulse fiber laser



図Ⅲ2.1-38 Scanning speed dependence on MEZ and Ablation depth



図Ⅲ2.1-39 Effect of ambient gas on MEZ



図Ⅲ2.1-40 SEM image in a) air b) N<sub>2</sub> gas flow

#### 2.4.1.8 150 Wサブナノ秒ファイバーレーザーと150W ナノ秒パルスファイバーによるCFRP加工評価

前項のサブナノ秒ファイバーレーザーと同様の実験セットアップにて、150W ナノ秒パルスファイバーレーザーを用いて CFRP の切断試験を試みた。実験条件は、平均出力 100W、スポット径 50µm、繰返し周波数 1 MHz、掃引速度 10m/s で単重線掃引とした。サンプルには、0.6mm 厚の CFRP を用

いた。表Ⅲ2.1-3 に加工結果を示す。パルス幅 10ns の時には、加工速度が 21.54cm/min で MEZ は、53 $\mu$ m であったが、パルス幅を 0.4ns に短くすると、加工速度は 15.48cm/min と遅くなるが、MEZ は、18 $\mu$ m と小さくなった。つまり、加工速度はパルス幅に依存して速くなり、加工品質は、パルス幅が短い方が品質が高い事が実証された。「150 W サブナノ秒ファイバーレーザーの波長変換技術開発・CFRP 加工評価実験」の項で  $2\omega$  での試験結果とほぼ同等の結果が得られている事が解かる。この結果、波長 1064nm のレーザーを用いて、加工雰囲気制御することによって、加工速度が速く、しかも加工品質が高い加工を実現することが明らかになり、本手法が CFRP のレーザー加工を先導していくものとする。

表Ⅲ2.1-3 パルス幅に対する加工速度および MEZ

パルス幅	加工速度[cm/min]	MEZ[ $\mu$ m]
10ns	21.54	53
0.4ns	15.48	18

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.2 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」

##### 「(1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発」

##### 「①パルスレーザーの高品位・高出力化技術の開発」

##### 「(2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発」の成果

(阪大レーザー研、片岡製作所、浜松ホトニクス、レーザー総研)

#### 2.2.1 事業背景・目的

CWファイバーレーザーでは、多モードで100kW級が達成されている。一方、パルスファイバーレーザーは、非線形光学効果やレーザー損傷により出力が制限されているため、市販品は100Wレベルに止まっている。このため、CFRPの高速・高品位切断加工を目的として、パルスファイバーレーザーを開発する。1.5kW級の高平均出力を達成するために、「Yb<sup>3+</sup>添加の大口径フォトニック結晶ファイバー」と「ビーム結合技術」を2本柱として開発を進める。また、CFRP加工品位の向上と多様な材料の加工への対応のために、2倍高調波及び3倍高調波変換の高効率化技術の開発にも取り組む。

##### 2.2.1.1 大口径フォトニック結晶ファイバー増幅器

大口径フォトニック結晶ファイバー (Photonic crystal rod fiber: PCF Rod) 増幅器における技術的課題は、メーカー推奨出力レベルの1.5倍以上の動作において、高ビーム品質と横モード安定性を確保するために不可欠な冷却効率の向上とファイバーの応力の抑制である。このことは、PCF Rodが単一モードファイバーとは全く異なる点であり、ビーム結合のためにも必要不可欠である。すなわち、多ビーム結合において、個々のビームに求められる高ビーム品質 (低発散角)、近視野パターンの同一性 (空間強度分布の関数形とビームサイズの一致)、及びポインティングの安定性 (CPF Rodの時間的・空間的温度変動に伴って伝搬モードが高速変動あるいはドリフトすることの抑制)を確保するためである。なお、本研究では、Yb<sup>3+</sup>添加のPCF Rod を採用し、その動作波長を利得ピーク波長 (1030nm) から若干長波長側に設定し、自己吸収による損傷を低減する。

レーザー加工では、一般的に短パルスほど非熱加工 (高品位の加工) となるが、CFRP切断加工においてパルス幅 (及び繰り返し周波数) の最適条件は明らかではない。そこで、本研究では、サブns~10nsの範囲で動作可能なパルスファイバーレーザーシステムを構築し、系統的な加工試験データベースに基づいて最適パルス幅を選択することとした。また、同一システムで所望のパルス幅に任意設定できれば、CFRP以外の様々な加工対象にも対応可能となる。

また、CFRPの高速切断のみならず、多様なCFRP部品の高品位加工への応用に有用な技術として、短パルス化技術の開発を行う（加速予算案件）。具体的には、1ビームについて、数ps～1ns程度の範囲でパルス幅を可変とするための技術開発を行う。さらに、大口径ファイバーの国産技術に関しても可能な範囲で試験的開発を進める。

#### 2.2.1.2 多ビーム結合

多ビーム結合は、この技術によってビーム本数に比例したシステム出力を得ることができるスケラブルな高出力化技術であるため、CFRP加工のみならず、多様な加工や科学技術・学術用のツールとしてパルスファイバーレーザーを活用する道を拓く。そのために、本研究では、「コヒーレント結合」と「波長結合」の2方式を採用した。コヒーレント結合では、増幅器や伝搬光路での位相変化に追従してリアルタイム位相制御を行い、ビーム結合出力の安定化を達成する。波長結合のためには、透過型回折格子による合波方式とシャープエッジ反射鏡による合波方式を採用する。なお、コヒーレント結合と波長結合を同時に行うことにより、次世代の高繰り返し・高出力超短パルスレーザーの実現に繋げることも念頭に開発を行う。

#### 2.2.1.3 波長変換

非線形光学結晶を用いた2倍高調波（波長 $\approx 520\text{nm}$ ）、3倍高調波（波長 $\approx 347\text{nm}$ ）変換では位相整合が必要不可欠であり、波長変換結晶の温度は均一に保つ必要がある。しかし、結晶での光吸収係数は短波長光ほど大きいために、波長変換出力の増大に伴って結晶温度が局部的に高くなり、変換効率の低下を招くだけでなく結晶の損傷を引き起こす。この光吸収は、ビーム中心及び結晶の出口側で強く発生し、2倍高調波よりも3倍高調波変換の方がその傾向が顕著となる。さらに、短波長領域ほど屈折率分散が大きいために、温度上昇による変換効率の低下は、3倍高調波では大きな問題となる。

本研究では、非線形光学結晶の冷却構造や結晶カットの方法を工夫して、波長変換の高効率化と高出力の両立を達成する。

#### 2.2.1.4 CFRP加工試験へのレーザー供給

CFRP切断加工の高速化と高品位化を達成するためには、パルスレーザーの出力、パルス幅、繰り返し周波数、波長の最適化が必要であり、系統的データベース構築のために現有及び本研究で開発したレーザーを用いて、多様なパルスレーザー出力を供給する。加工実験は、光源技術開発センターの大阪大学レーザーエネルギー学研究中心において、加工技術開発センター（産総研、企業各社）と連携して行う。

2.2.2 研究開発目標と根拠

表Ⅲ-2.2.1 研究開発目標と根拠

研究項目	評価目標		設定根拠	
	評価項目	最終目標		
パルスファイバーブースター増幅技術の開発	パルスファイバーレーザーシステムの構築	ファイバー保持機構と励起条件等の最適化	高ビーム品質・高効率で、スケラブルな高出力化技術の確立、及び多様な加工用途に対応可能な高機能性の実現。	
	ビーム品質 $M^2$	2~3	高品位加工の観点。	
	平均出力	1.5kW 程度	CFRP 加工速度の目標設定値からの推定値。	
	波長	1 $\mu$ m 帯域	Nd, Yb系レーザー材料を想定。	
	繰り返し周波数	75~1,000kHz	高品位加工の観点。	
	パルス幅	サブ ns ~ 10ns の範囲で選択	高品位加工の観点から最適化するため。	
	中間評価後に採用したビーム結合技術（自主目標）			
	ファイバー全出力	1.8kW	150W $\times$ 12 ビームを想定。	
3ユニット総合結合効率	84%	ファイバー全出力 1.8kW から結合出力 1.5kW を得るため。3段ビーム結合で、1段当たり94%は実現可能。		
パルス幅可変ファイバーレーザーシステムの開発	パルス幅可変性（1ビーム）	数 ps~1ns	非熱微細加工の観点。	
国産大口径ファイバーの開発	大口径ファイバー	40 $\mu$ m 以上 高ビーム品質	大口径ファイバーの国産技術に資する。	
波長変換の高効率化技術の開発	2倍高調波変換出力	600W (200W $\times$ 3)	基本計画書での設定値 200W $\times$ 3ユニット	
	2倍高調波変換効率	40%	600W/システム基本波出力 1.5kW	

	3倍高調波変換出力	200W (70W×3)	基本計画書での設定値 70W×3ユニット
	3倍高調波変換出力	13%	200W/システム基本波出力 1.5kW
CFRP加工試験へのレーザー供給	CFRP加工の系統的データ取得のため、加工システム技術開発センターと連携して試験を実施。そのためのレーザーを供給。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現有YAGレーザーを改造してパルス供給。</li> <li>・ファイバーレーザーによる加工実験。</li> <li>・実験エリアの整備。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ファイバーレーザーシステム完成まで、現有YAGレーザーを活用してパルス供給。</li> <li>・最適パルス幅評価のため。</li> <li>・ビーム供給のための整備。</li> </ul>

### 2.2.3 研究開発目標と達成状況

パルスファイバースター増幅技術の開発において、基本計画に関する全ての評価目標を達成するとともに、加速予算案件目標と自主設定目標も達成した。開発したパルスファイバーレーザーの高出力化技術は、従来の市販ファイバーレーザーに比べて、パルス幅の可変性および繰り返し数の可変性、ビーム結合技術によるスケラブルな高平均出力化動作が可能であり、完成したレーザーシステムは世界のトップレベルである。これらの基礎技術成果の企業移転により、日本の関連企業において製品化に向けた設計・開発、製造可能となることが期待できる。

表Ⅲ-2.2.2 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標		達成度	課題と解決方針 ※未達の場合のみ
	評価項目	最終目標		
パルスファイバースター増幅技術の開発	パルスファイバーレーザーシステムの構築		○	
	ビーム品質 M <sup>2</sup>	2~3	◎	
	平均出力	1.5kW 程度	○	
	波長	1μm 帯域	○	



	繰り返し周波数	75~1,000kHz	◎	
	パルス幅	サブ ns~10ns の範囲で選択	◎	
	中間評価後に採用したビーム結合技術（自主目標）			
	ファイバー全出力	1.8kW	○	
	3ユニット総合結合効率	84%	○	効率 82%。ユニット毎の特性の違いにより総合効率が低下。
パルス幅可変ファイバーレーザーシステムの開発	パルス幅可変性（1ビーム）	数 ps~1ns	○	
国産大口径ファイバーの開発	大口径ファイバー	40 $\mu$ m 以上 高ビーム品質	○	
波長変換の高効率化技術の開発	2倍高調波変換出力	600W (200W $\times$ 3)	△	1ユニットで210W実証。現有 YAG レーザー1ビームで340W達成。
	2倍高調波変換効率	40%	○	
	3倍高調波変換出力	200W (70W $\times$ 3)	△	1ユニットで80W達成。現有 YAG レーザー1ビームで100W達成。
	3倍高調波変換出力	13%	○	
CFRP 加工試験へのレーザー供給	CFRP 加工の系統的データ取得のため、加工システム技術開発センターと連携して試験を実施。そのためのレーザーを供給。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現有 YAG レーザーを改造してパルス供給。</li> <li>・ファイバーレーザーによる加工実験。</li> <li>・実験エリアの整備。</li> </ul>	○	

◎ 大幅達成、○ 達成、△ 部分達成 × 未達成

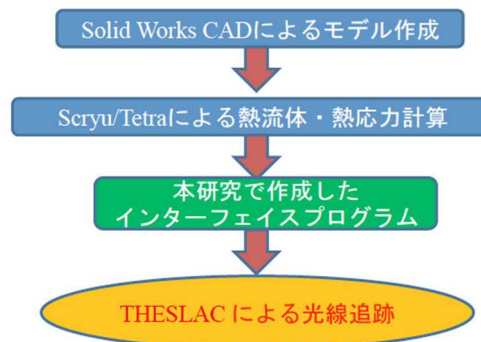
## 2.2.4 成果の詳細

### 2.2.4.1 固体ブースター増幅技術の開発（平成 24 年度末で終了）

#### 2.2.4.1-1 ジグザグアクティブミラー増幅器の動作シミュレーション

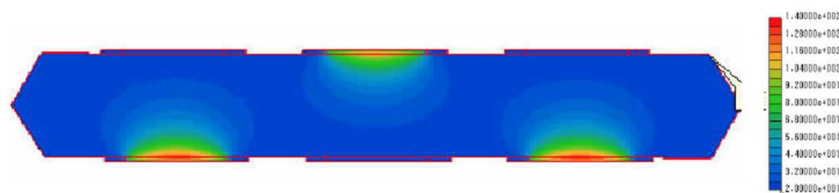
ジグザグアクティブミラー集積化試作機を設計するにあたり、熱的波面歪みを正確に評価する必要があるため、計算機シミュレーションによって増幅器の熱特性を評価する手法を確立した。市販ソフトウェアの Solid Works を用いて CAD モデルを作成し、Scryu/Tetra 熱解析ソフトによって熱流体計算を行い、その温度分布に基づいて熱応力計算（変形の計算）を行う。求めた温度分布と変形量を独自開発の THESLAC コードに入力して光線追跡計算し、波面歪みを求める。

以下に図Ⅲ2.2.4-1 に示したシミュレーションの流れに沿った計算例を示す。対向 2 ビーム励起の LD 光が伝播し、Nd:YAG 中で吸収され発熱する。それにより温度分布が生成され、熱効果が発生する。LD 光の強度分布を考慮し、厚さ 0.5mm の Nd:YAG 中に発熱分布を与える。温度分布を計算した結果を図Ⅲ2.2.4-2 に示す。

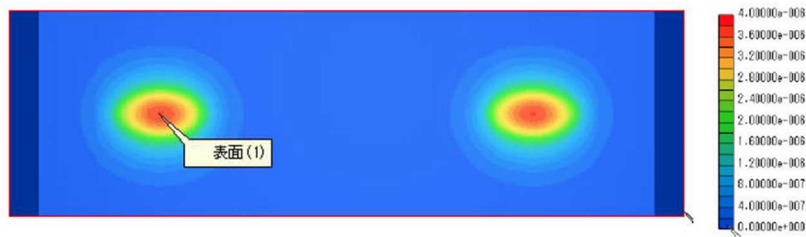


図Ⅲ2.2.4-1 熱レンズ効果の計算機シミュレーション

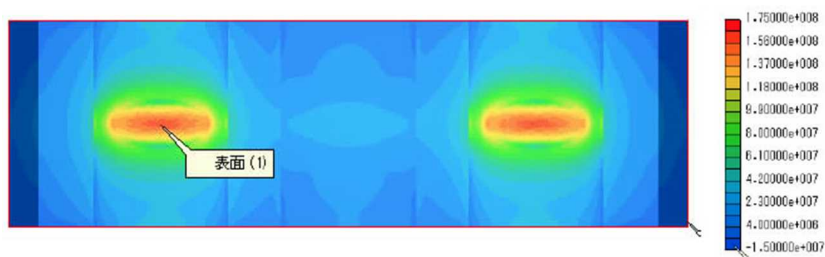
発熱するのは Nd:YAG 部分のみであるが、Non-doped YAG セラミクス部分にも温度分布が生成されている。この温度分布に対応した媒質の変位量及び応力分布を求めた。図Ⅲ2.2.4-3 に媒質冷却面の変位量、図Ⅲ2.2.4-4 に媒質冷却面の最大主応力分布の計算結果を示す。



図Ⅲ2.2.4-2 1kW, 2 ビーム励起時の温度分布計算結果

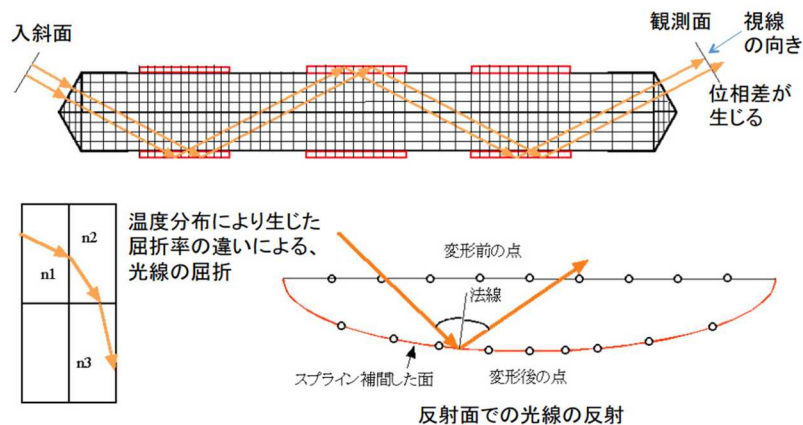


図III.2.2.4-3 1kW, 2 ビーム励起時の媒質冷却面の変位量計算結果 (最大変位 3.6mm)

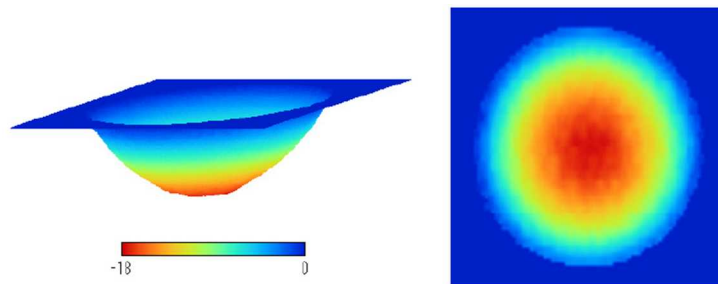


図III.2.2.4-4 1kW, 2 ビーム励起時の媒質冷却面の最大主応力分布計算結果

図III.2.2.4-5 に THESLAC における光線追跡の概要を示す。多数の光線を計算機上で伝搬させ、場の関数として定義された屈折率の変化に基づきスネルの法則に従って屈折を計算する。境界面近傍に光線が達した場合、境界面の変形データに基づき補間曲面と接平面を求め、光線を反射させる。



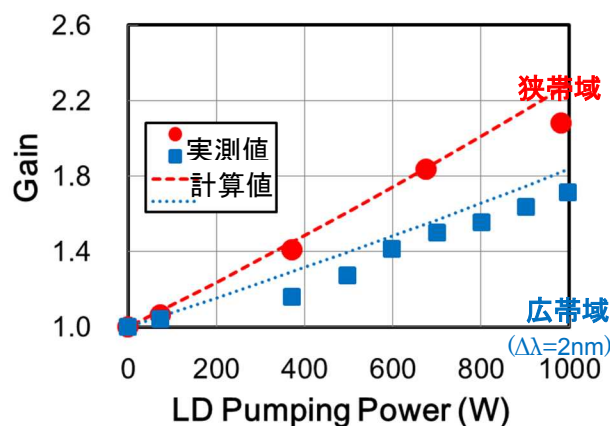
図III.2.2.4-5 THESLAC における光線追跡の概要



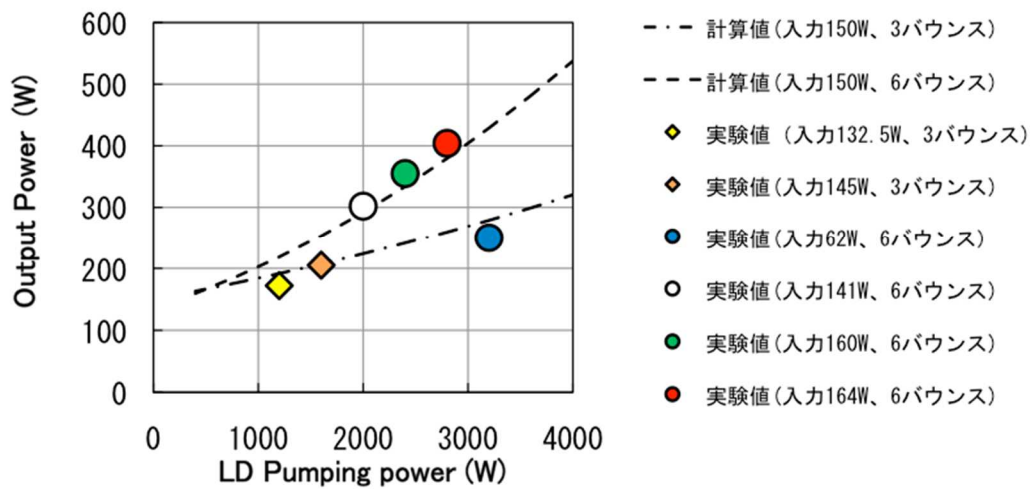
図III.2.2.4-6 1kW, 2 ビーム励起時の媒質伝搬後の波面歪み計算結果

注意すべき点は、Non-doped YAG セラミクス中の屈折率分布による熱レンズ効果に加えて、媒質の変形によるビームの収束効果が発生することである。各々の光線の光学光路長、および観察面での光線の位置を求めることにより波面歪量を評価した。図III.2.2.4-6 に 1kW、2 ビーム励起時の媒質伝搬後の波面歪み計算結果を示す。この場合、peak to valley 値で 17.6 波長であった。また、中心付近が円形でなく楕円形になっていることが分かる。

これらの計算を実験結果でベンチマーキングし、集積化試作機的设计に反映させた。図III.2.2.4-7 に試作増幅器利得の LD 励起パワー依存性を示す。励起は 1kWLD を 2 台用いて両サイドから行っている。励起パワーに依存する Nd:YAG の温度変化に対応させて狭帯域光（図中の●）の波長を調整し、単一パス利得を求めた。得られた結果は計算予測（図中赤破線）とよく一致した。試作増幅器を用いた高出力増幅試験を実施し、入力 164W、全励起パワー 2.8kW 時に出力 404W を得た（図III.2.2.4-8）。この結果より、最大励起パワー 4kW において中間目標の 500W を上回る 540W が得られることがシミュレーションで示された。

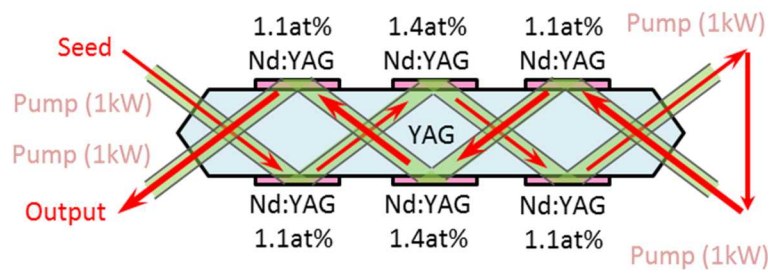


図III.2.2.4-7 試作増幅器利得の LD 励起パワー依存性



図III.2.2.4-8 試作増幅器の高出力増幅試験

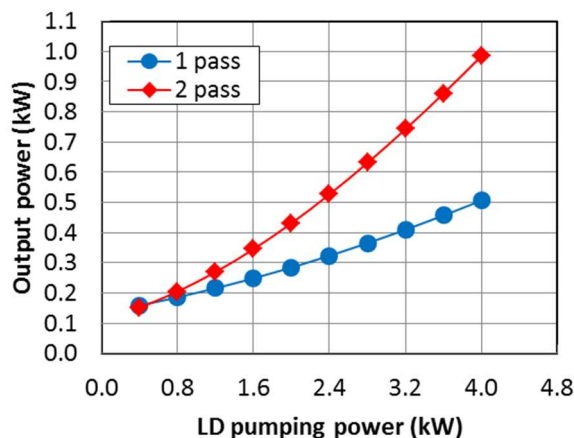
図III.2.2.4-7、-8の実験結果と計算機シミュレーションによる熱解析から、1枚目と3枚目のNd:YAG薄型ディスクの中心部分では77℃まで温度が上昇しているのに対し、2枚目のNd:YAG薄型ディスクの中心部分では66℃と評価された。このように、Nd:YAG薄型ディスクごとに温度が異なると利得の低下を招くために、集積化試作機では図III.2.2.4-9に示すような構造を採用した。片側3枚のNd:YAG薄型ディスクの内、両サイドのNd添加量を1.1at%、中央の1枚を1.4at%とすることによって、温度上昇を同程度にすることができる。また、Nd:YAG薄型ディスクの厚みを0.5mmから0.4mmへと薄くすることにより、Nd:YAG薄型ディスクにかかる熱負荷を低減させ、4kW励起が可能となる。



図III.2.2.4-9 集積化試作機の増幅媒体構造

ファイバーフロントエンドから150Wを注入した場合の、励起LDパワーに対するレーザー出力の計算結果を図III.2.2.4-10に示す。ここでレーザー光は、図III.2.2.4-9に示す全ての

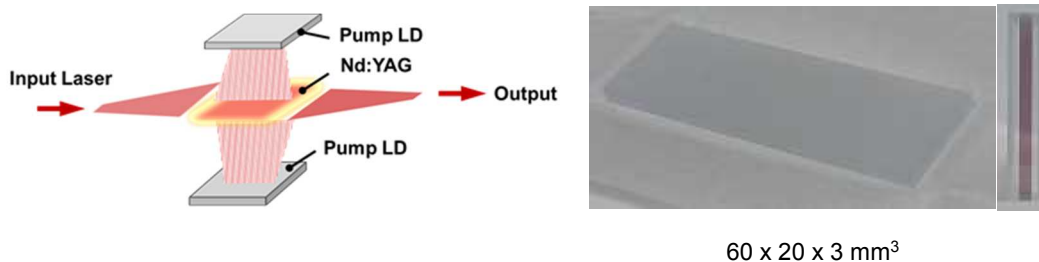
Nd:YAG 薄型ディスクを1回ずつ通過する（単一パス）。7mm のレーザービームサイズについて計算した結果、図Ⅲ2.2.4-9 の媒質が製作できれば、単一パスによって 500W を達成できることが分かる。また、ダブルパス光路を用いれば、さらに出力を増大させることができる。



図Ⅲ2.2.4-10 集積化試作機の平均出力のシミュレーション予測

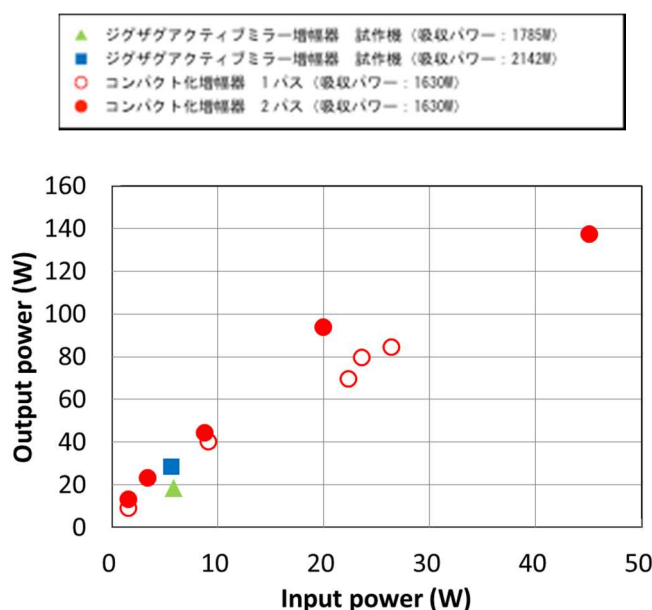
#### 2. 2. 4. 1-2 コンパクト化スラブ増幅器

ジグザグアクティブミラー増幅器を更に小型化するため、コンパクト化増幅器の製作を行った。コンパクト化増幅器の概念図とレーザー媒質を図Ⅲ2.2.4-11 に示す。コンポジットセラミックは、長さ 60mm×幅 20mm×厚み 1mm の Nd:YAG セラミック（添加濃度 2-3at%）の両面に厚さ 1mm の無添加 YAG セラミックを optical bonding したものである。励起用 1.5kWLD は、増幅器において 10mm×40mm の断面になるよう成形し、2 方向から照射される。吸収長が 1mm と薄いため、Nd のドーピング量を増加し（2-3at%）吸収率を増やす。厚みと直角の方向（長手方向）に入射光を伝搬することにより増幅長が 40mm と長く、高利得が得られる。コンパクト化増幅器は、増幅媒質が 1 枚であり、ジグザグアクティブミラー増幅器に比べ、シンプルかつコンパクトな構造である。



図Ⅲ2.2.4-11 コンパクト化増幅器の概念図（左）とレーザー媒質（右）

コンパクト化増幅器の増幅実験結果を図Ⅲ2.2.4-12に示す。コンパクト化増幅器では厚み方向の熱レンズ効果が顕著に見られるため、励起 LD 光をパルス運転にして励起を行った。同等の励起 LD 吸収パワーに関して、ジグザグアクティブミラー増幅器の実験結果と比較すると、同等以上の利得が得られている。励起 LD 光を CW 動作にする場合、媒質の厚み方向の熱レンズ効果を補正しなければいけないという課題はあるが、ジグザグアクティブミラー増幅器よりもコンパクトな設計で同等の利得を得ることを実証した。



図Ⅲ2.2.4-12 コンパクト化増幅器の増幅特性

(コンパクト化増幅器の励起 LD 光はパルス運転デューティ 3%)

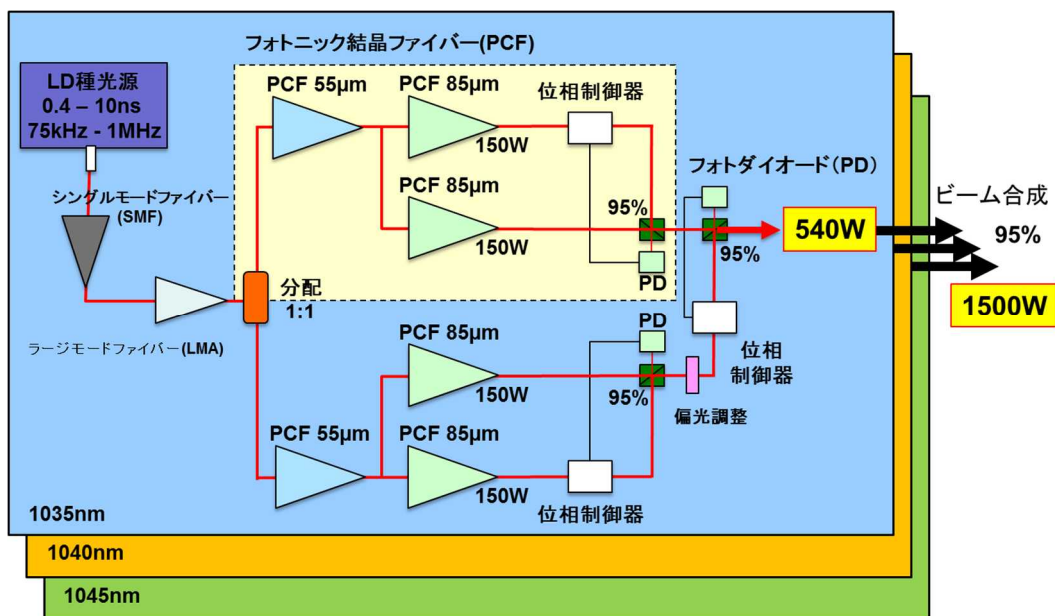
#### 2.2.4.2 ファイバースター増幅技術の開発

CFRP 加工の系統的实验データの構築のため、パルス幅可変 (240ps~70ns) で繰り返し周波数が 75kHz から 5MHz まで可変可能なシード光源を開発し、ファイバ増幅器へ供給した。片岡製作所及び浜松ホトニクスとの協力により、パルス幅 300ps~10ns の増幅特性において、1 ビーム当たり PCF Rod 増幅器のレーザー出力は約 130~160W、ビーム品質は  $M^2 \approx 1.3$  が得られ、12 ビーム合計出力 1.8kW が可能となった。

国産大口径マルチモードファイバーの試作においては、レーザー伝搬時の高次モードを除去する方法として、ファイバ増幅器のテーパ化を提案した。レーザー技術総合研究所と協力して、試作ファイバーの伝送特性および増幅特性評価を行った。

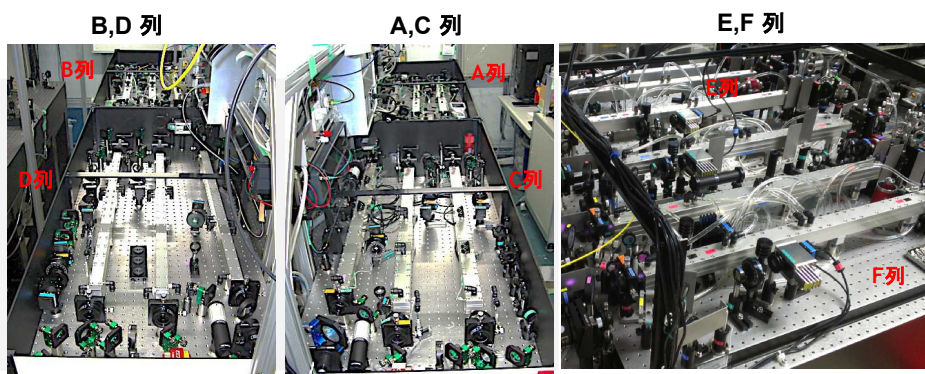
### 2.2.4.2-1 ファイバースター増幅器の基本システム構成

図Ⅲ2.2.4-13 にビーム結合ファイバースター増幅器の基本構成図を、図Ⅲ2.2.4-14 にユニットのレーザーシステム写真を示す。シードレーザー光には、半導体レーザー光（連続発振時スペクトル線幅約 13pm）をパルス電流駆動により、パルス幅は約 240ps～70ns、繰り返し周波数 75kHz～5MHz で動作させた。PCF Rod 増幅器出力の 3 波長合成を行うため、発振波長 1035、1040、1045nm の 3 種類を用意した。種光はラックタイプの SMF と LMA ファイバーにより 5W 以上まで増幅した後、空間配置された PCF Rod（コア径 55 $\mu$ m と 85 $\mu$ m）により 2 段増幅した。1 波長（1 ユニット）当たり 4 ビームの増幅出力は、コヒーレント結合により最大出力 500W 以上を得た後に、3 ユニットの出力光は透過回折格子やシャープエッジ高反射鏡による波長合成を行う。



図Ⅲ2.2.4-13 ビーム結合ファイバースター増幅器の基本構成図

(結合効率は目安である)

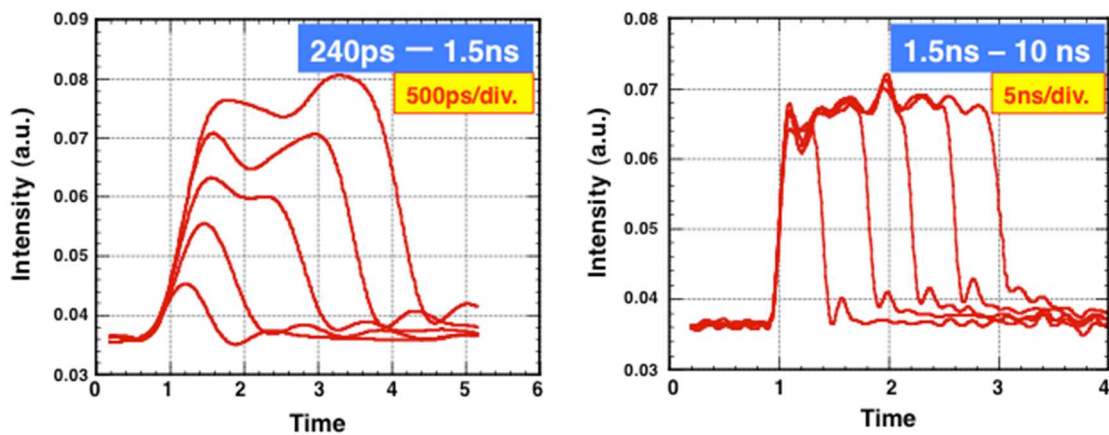


図Ⅲ2.2.4-14 3ユニット（全 12 ビーム）のレーザーシステム写真



#### 2.2.4.2-2 種光用半導体パルスレーザー発振器

シードレーザー発振器としては、(1) 任意波形制御 LN 強度変調器を用いて、単一縦モード連続発振ファイバーレーザー光から数 10ps~数 10ns に切り出す方法、(2) 狭線幅ファイバーブラッグ回折格子 (FBG) を用いて、フェムト秒広帯域パルス光から波長選択して数ナノ秒パルスを発生させる方法、および (3) LD 光による直接パルス駆動による方法について検討した。結果として、産業用シード光を意図して、小型、簡索性、安価等から (3) の狭線幅 LD パルス発振器を採用した。Yb 添加ロッド型 PCF の高い利得帯域は 1030~1050nm である事から、半導体レーザーの中心波長 1035、1040、1045nm を採用した。出力パルス幅は約 240ps から最大パルス幅約 70ns まで連続的に調整可能である。図III.2.2.4-15 に代表的なパルス波形特性を示す。最小パルス幅は約 240ps が得られ、繰り返し数 1MHz 時パルス幅約 300ps では最大出力 11 $\mu$ W (11pJ)、パルス幅 2.5ns では最大出力 330 $\mu$ W (330pJ) が得られた。パルス出力時、スペクトルのコントラスト比は約 60dB であった。

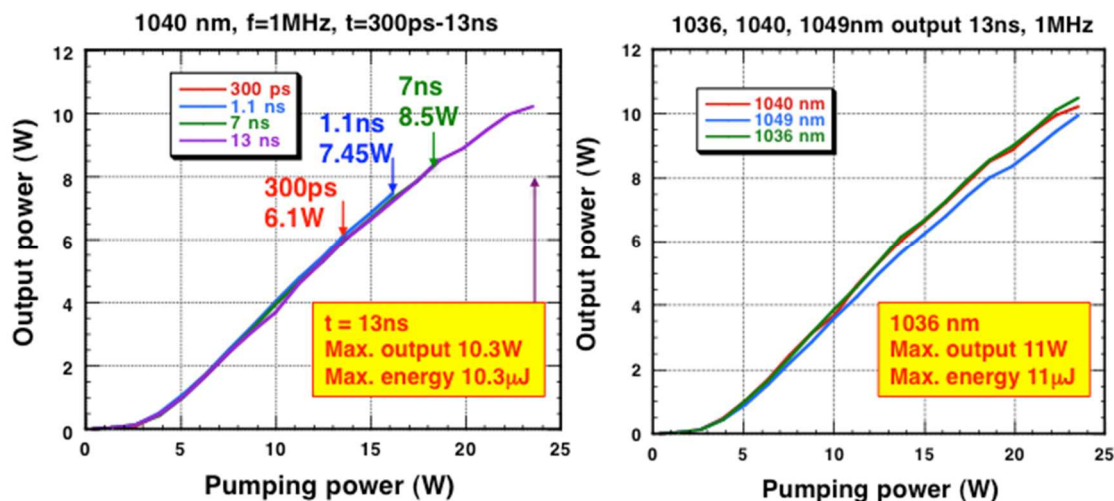


図III.2.2.4-15 代表的なパルス波形特性

#### 2.2.4.2-3 LMA ファイバー増幅器の出力特性

SMF(コア径 6 $\mu$ m、クラッド径 125 $\mu$ m) と LMA ファイバー(コア径 25/クラッド径 250 $\mu$ m, NA0.06、約 4m) により、約 50 $\mu$ W (パルスエネルギー50pJ、繰り返し数 1MHz) の発振器出力を最大約 10W まで増幅した。図III.2.2.4-16 (a)に各パルス幅での増幅特性結果を示す。パルス幅 300ps 増幅時で最大出力 6.1W、13ns パルス幅の場合は約 23W の励起入力時に最大出力 10.3W (10.3 $\mu$ J) が得られた。出力光のビーム品質  $M^2$  値は約 1.1 程度であり、ほぼ回折限界である。ファイバー長の最適化により、SRS や SBS 等の非線形現象発生は観測さ

れていない。図Ⅲ2.2.4-16(b)にシード波長による増幅特性結果を示す。波長 1035nm の場合最大出力約 10.5W に対し、波長 1049nm は約 10W が得られ、シード波長差による増幅出力の違いは僅かであり、後段の PCF Rod の 2 段増幅により 150~200W 出力が可能である。



(a) 各パルス幅での増幅特性結果

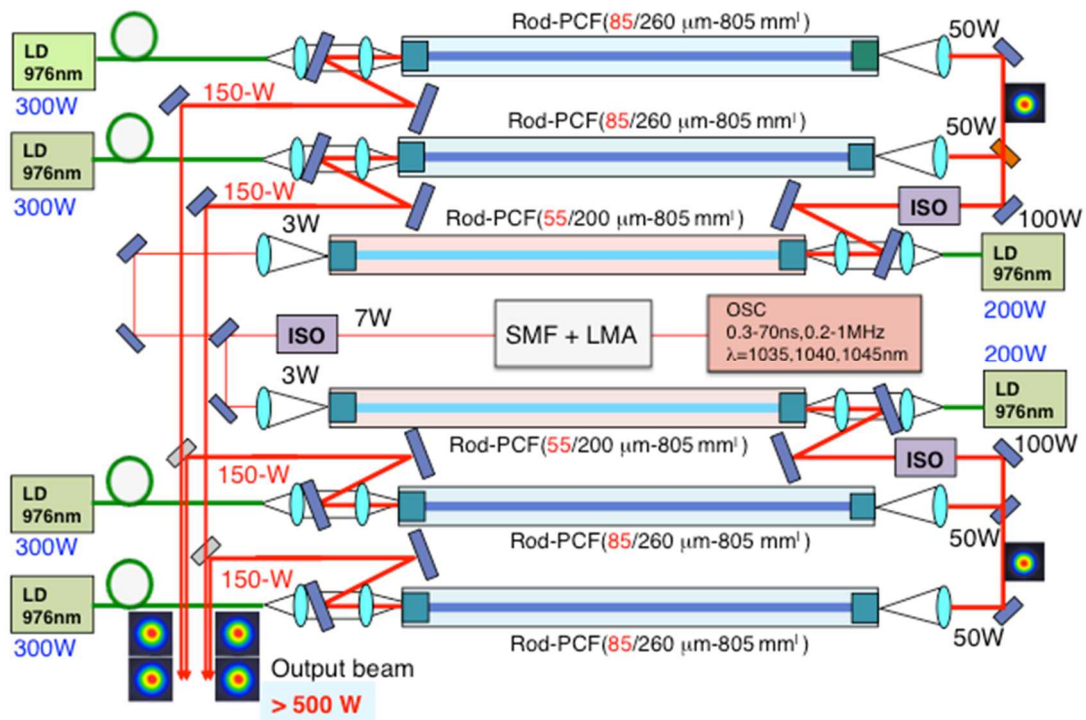
(b) シード波長による増幅特性

図Ⅲ2.2.4-16 LMA ファイバーの増幅特性

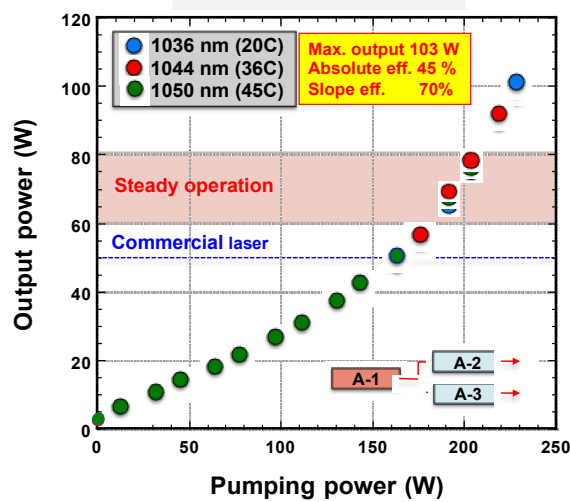
#### 2. 2. 4. 2-4 ロッド型偏波保持 PCF 増幅器の出力特性

図Ⅲ2.2.4-17 に、1 ユニット 4 ビーム構成の偏波保持大口径 PCF Rod 増幅器の光学配置図を示す。主増幅器の 2 段 PCF Rod ファイバー増幅器特性について述べる。実験に用いた初段増幅用ファイバー寸法は、コア径 55μm、モードフィールド径 45μm、クラッド径 200μm、長さ 80.5cm の偏波保持 PCF Rod である。モードフィールド面積 1600μm<sup>2</sup> と非常に大きく、コア NA 値は 0.02 と非常に小さいのが特徴で、入射端面の表面損傷を抑制するため、ファイバー入射端面にバルク石英を炭酸ガスレーザーによって融着したエンドキャップが施されているため、石英ガラス材料のバルクレーザー耐力まで動作が可能である。波長 975nm 励起用 LD にはファイバー結合 (コア径 200μm) 型を用い、レンズ光学系によりファイバー出射端側より励起した。増幅出力光は分離ミラー (入射角 20-25 度、975nm 透過、1040nm 反射) によって取り出した。励起入力パワーに対するレーザー出力を図Ⅲ2.2.4-18 に示す。入射レーザー光は波長 1036、1044 と 1050nm、パルス幅 7ns、繰り返し周波数 1MHz で 2.5W である。入射レーザー波長による出力の違いは見られず、波長 1036nm の時、最大励起 230W の場合最大レーザー出力 103W が得られた。この時、総合効率約 45%、スロープ効率約 70%

を達成した。励起パワーの増加に伴うスロープ効率の増加は、最大励起時に LD 波長 976nm となる様 LD 冷却温度を設定した。市販レーザーの動作レベルが約 50~60W に対し、約 80W 以上の高出力定常動作を行った。

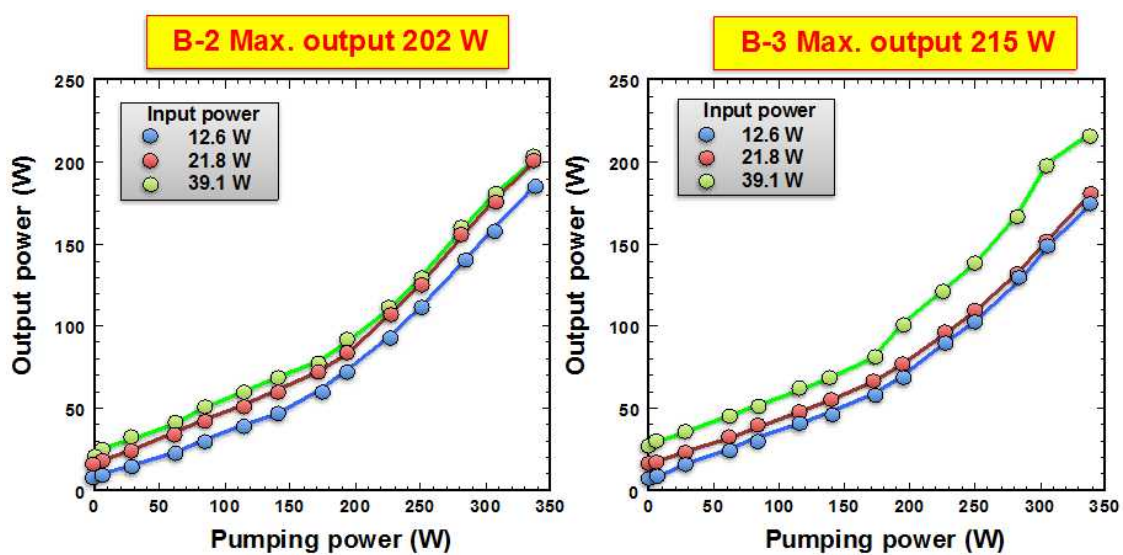


図Ⅲ2.2.4-17 4 ビーム構成(1 ユニット)の大口径 PCF Rod 増幅器光学配置図

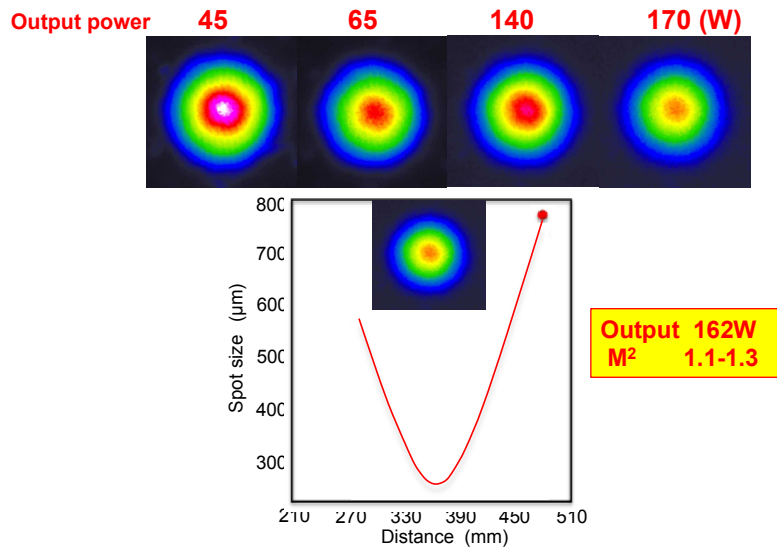


図Ⅲ2.2.4-18 55μm PCF Rod の増幅特性

初段 PCF 増幅器出力光は 50%部分透過ミラーによって 2 ビームに分割後、2 段目の偏波保持 PCF 増幅器に入射した。ファイバー寸法は、コア径 85 $\mu\text{m}$ 、モードフィールド径 65 $\mu\text{m}$ 、クラッド径 260 $\mu\text{m}$ 、長さ 80.5cm の PCF 型である。モードフィールド面積 3300 $\mu\text{m}^2$  と非常に大きく、コア NA 値は 0.015-0.02 と非常に小さい。パルス幅 10ns 時のバルク石英のレーザー損傷しきい値は約 60J/cm<sup>2</sup> であり、モードフィールド面積 3300 $\mu\text{m}^2$  からパルスエネルギー限界は約 2mJ であり、1MHz 動作で平均出力 2kW も可能である。しかしながら、出力 200 以上では空間モード変動が発生する事が報告されている。励起入力パワーに対する 1 ビームのレーザー出力結果を図Ⅲ2.2.4-19 に示す。入射レーザーには波長 1035nm、パルス幅 10ns、繰り返し周波数 1MHz を用いた場合、入射パワー 12.6、21.8、39.1W に対して、最大励起 340W の時に最大出力 202~215W が得られた。このときの、総合効率は約 54%、最大微分効率は 80%以上が得られた。市販レーザーの動作レベルが約 80~100W に対して、本システムに要求される定常運転出力である約 150W 動作を実現した。各波長ユニット 4 ビームの総出力は 560-600W が得られており、3 ユニット全 12 ビームの出力として 1.8kW が可能であることを実証した。



図Ⅲ2.2.4-19 85 $\mu\text{m}$  PCF Rod の増幅特性



図III.2.2.4-20 大口径 85 $\mu$ m PCF Rod の増幅出力ビーム特性

図III.2.2.4-20 に大口径 85 $\mu$ m PCF Rod の増幅出力のビーム特性を示す。出力を増大させたときのビーム品質の劣化は観測されず、170W までのビーム品質  $M^2$  値は約 1.3 と良好であった。また、2 時間動作時の出力変動は約 0.64% rms と良好であった。しかしながら、狭線幅レーザー増幅の場合は、出力 150~180W の時にコア径内でのモード移動が観測された。モード変動の要因は、基本モードと高次モードがファイバー内を伝搬する時、干渉強度パターンを作成して、コヒーレントな干渉を発生する事に起因していると考えられる。

#### 2.2.4.2-5 コヒーレントビーム結合アルゴリズムの開発

高出力のパルスレーザーをコヒーレント結合 (CBC) するために、原理実証実験を行った。図III.2.2.4-21 に実験配置図を示す。パルス幅 10ns、繰り返し 1MHz のレーザーをビームスプリッターで 4 本に分岐し、ビームスプリッターで再結合する。このとき、分割されたそれぞれのビームの光路長は等しくしている。外部から操作を行わない場合、PIN フォトダイオード (PD) で計測される電圧は 4 本のビームを足しあわせた電圧と等しくならず、時間によって変動する。これは振動や熱により、それぞれのビームの光路長がランダムに変化し、結合の際に位相変化が起きるためである。ここでなんらかの制御を行い、光路長を等しくすることにより、それぞれのビームの位相が結合時に等しくなり、4 ビームのパワーをほぼ足しあわせることができる。

また、ディザリング方式において、制御ソフトウェアは以下の式を用いてプログラミングをおこなった。

$$V_i = V_{i,n-1} + g \delta V_i (P_+ - P_-) \quad (1)$$

ここで  $V_i$  が実際に出力する電圧で、 $V_{i,n-1}$  が  $n$  回試行後のベルヌーイ電圧、 $g$  はゲイン定数、 $\delta V_i$  がディザリング電圧、 $P_+$  と  $P_-$  が正と負にディザリング電圧を加えた後に PD で読み込んだ電圧である。この式を用いたソフトウェアを使って制御モジュールを作成し、PD で受けた信号を Piezo Actuator (PA) の制御電圧に返すことにより、合成ビーム検出の PD の電圧が最大化される。PD の信号が最大化された場合、 $P_+ - P_-$  が 0 に近づき、制御を行っている間は常に最大値に保持される。また、制御モジュールには Windows PC を使用した。この原理実証試験器の制御帯域は 40Hz 以下であった。

図 III.2.2.4-22 に結合したビームのプロファイルを示す。制御が働いた場合、4 ビームを結合したビームプロファイルは 1 ビームの場合とほぼ同じガウス型になっている。結合効率は 85% であった。これらの結果から、制御のアルゴリズムは問題なく働き、ビームを結合できることが分かった。

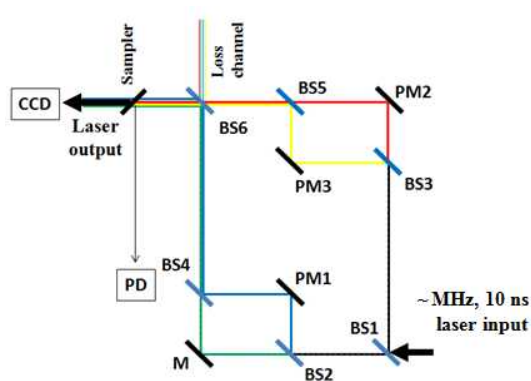


図 III.2.2.4-21 パルスレーザーの結合試験の配置図

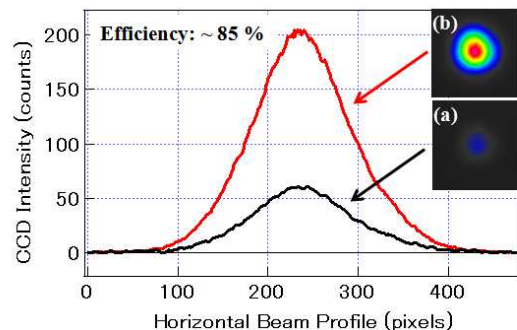
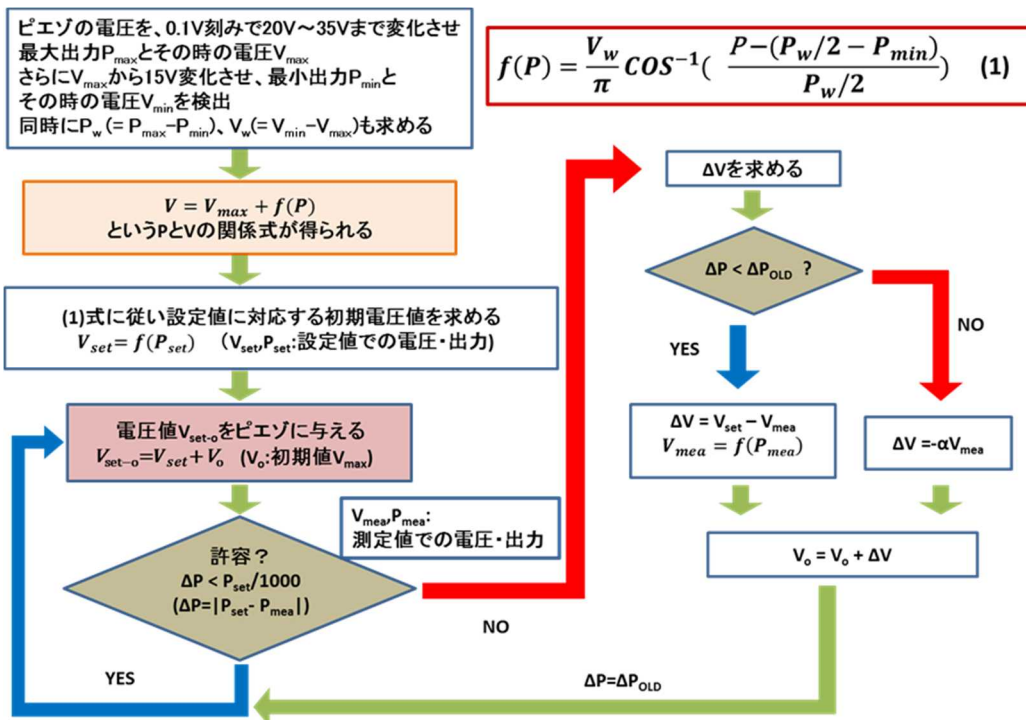
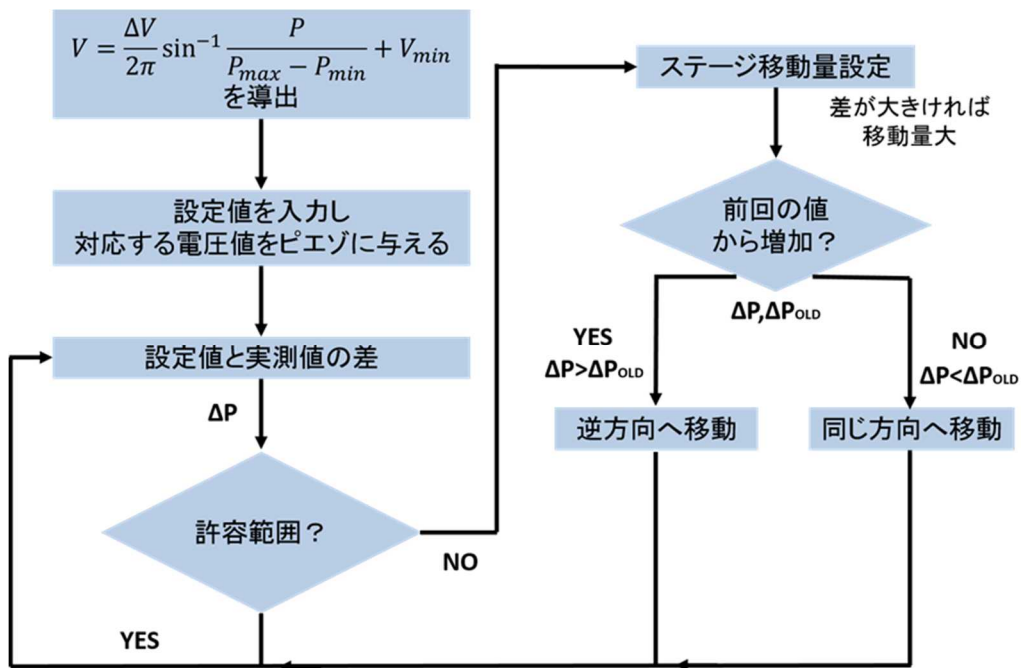


図 III.2.2.4-22 シングルビーム(a)と4ビーム結合したビーム(b)の強度分布

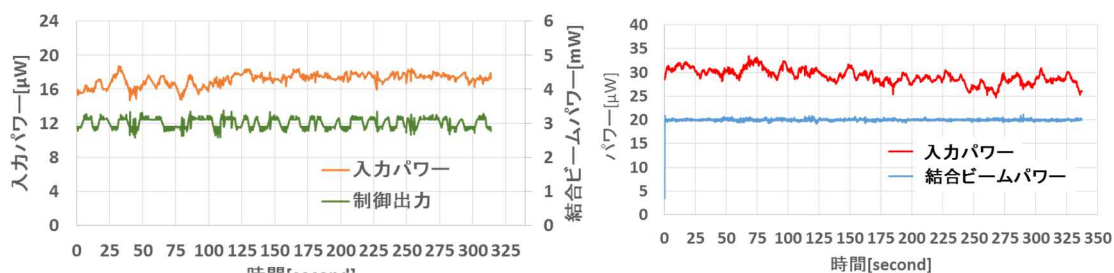
上記の方式と併行して開発したコヒーレントビーム結合では、結合後のパワーをモニターし、その値を基にしてビーム間の光路長差を調整することでフィードバック制御を行った。制御のために、2種類（比例制御と位相差推定制御）のプログラムを開発した。図 III.2.2.4-23 に2種類のアルゴリズムのフローチャートを示す。



図III.2.2.4-23 ビーム結合アルゴリズム、フローチャート。

上図：比例制御、下図：位相差推定制御

比例制御では、ビーム間の位相差に関係なく設定値からの誤差を基準とするため、収束が遅く入力ビームのパワー変動の影響を受けやすいという欠点はあるが、アルゴリズムが単純なだけでなく極値付近での制御も行える利点をもつ。一方、位相差推定制御アルゴリズムでは、2ビーム干渉の式を基にして、入力パワーと結合パワーを計測することで位相差を直接求めている。そのため、収束が速く入力ビームのパワー変動の影響を受けにくいという利点を持つが、極値付近では制御が振動しやすい。

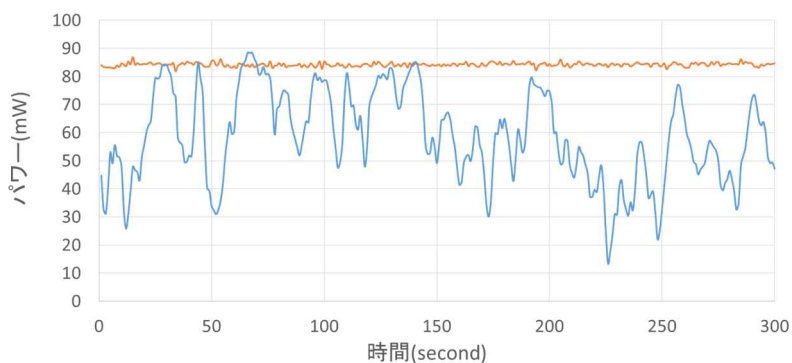


(a) 比例制御

(b) 位相差推定制御

図III.2.2.4-24 2つのアルゴリズムによる2ビームコヒーレント結合の安定性

図III.2.2.4-24に2つのアルゴリズムによる2ビームコヒーレント結合の結果を示す。この図から、比例制御では結合前の入力パワー変動の影響を受けていることがわかる。結合前の入力パワー変動は約5%あり、比例制御における結合出力変動は約5%であった。位相差推定制御では、結合後のパワー変動は0.6%であり大きく改善された。



図III.2.2.4-25 位相差推定制御による4ビームパルスレーザーのコヒーレント結合結果. 橙色がフィードバック制御、青色が無制御である。

図III.2.2.4-25は、4ビームのコヒーレント結合を位相差推定制御により行った結果を示している。制御しない場合は28%の変動であるのに対して、フィードバック制御を行うこと

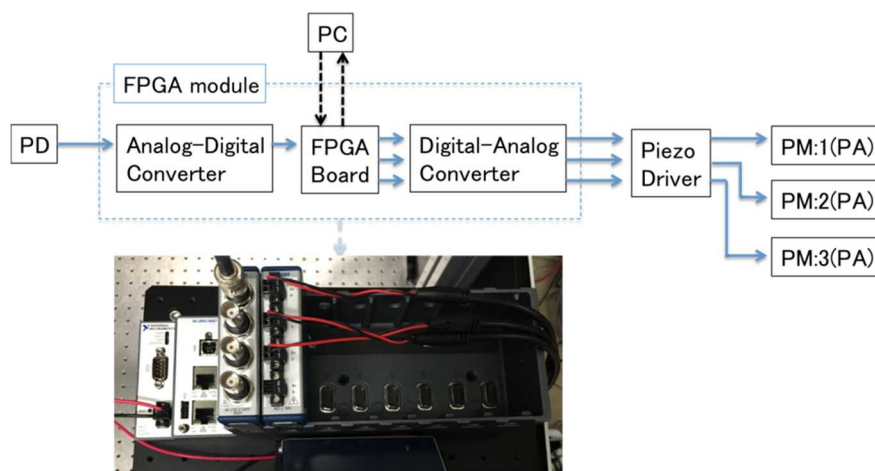


により、0.8%にまで安定化された。

#### 2.2.4.2-6 パルスファイバーレーザーのコヒーレントビーム結合

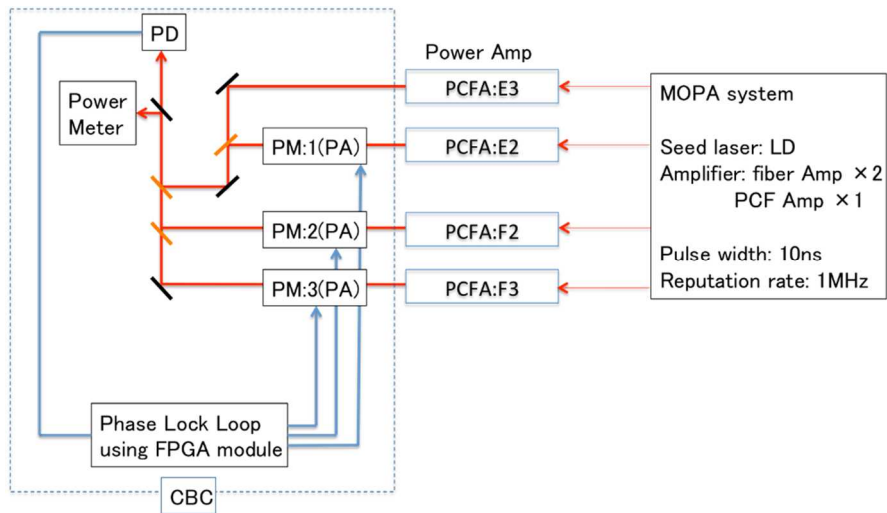
上記の原理実証実験では Windows PC を使った制御を行った。Windows PC はソフトウェア応答に~10ms のランダムな遅延が起きる。そのため制御帯域がソフトウェア応答の早さで制限されてしまう (数 10Hz)。 piezoアクチュエーター (PA) の本来の帯域である kHz 帯の高速制御を行うためには、別の制御ハードウェアを使う必要がある。そこで制御ハードウェアを、Windows PC から時間確定で高速制御が行える Field Programming Gate Array (FPGA) module に変更した。これらの改善を行った後に、増幅ビームの結合実験を行った。

図III.2.2.4-26 に示すのが NI 社製の FPGA module である。AD converter と DA converter はそれぞれ 1  $\mu$ s 以下の遅延があり、ソフトウェアを含めたシステム全体の遅延としては数  $\mu$ s であり、さらにオンボードの 40MHz のクロックで動作しているので、時間確定の制御を行うことができる。これらのことから、ソフトウェアだけであれば数 100kHz までの制御帯域が取れる。PA はカタログ値では 6kHz までの周波数応答を有するため、今回のシステムでは PA の性能をそのまま生かした制御を行うことができる。

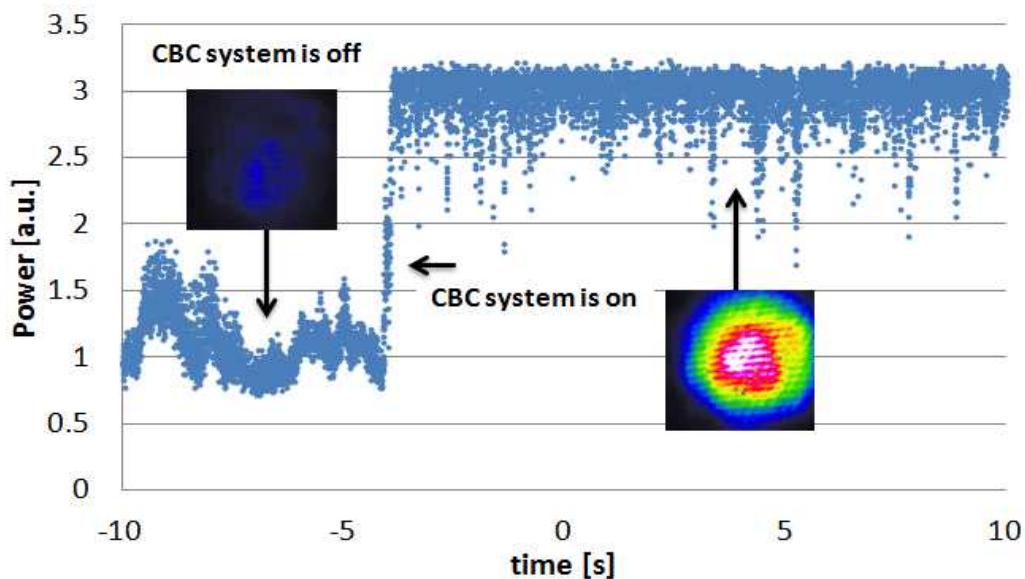


図III.2.2.4-26 FPGA module と制御の概念図

この FPGA module を使い、レーザーのパワーが比較的低い状態でビーム結合の試験を行った。図III.2.2.4-27 に実際の実験装置の概略図を示す。結合するビームはシード光を LD から出射後、Fiber 増幅器を使って増幅し、最終的に 4 本に分割し PCF Rod で増幅する。シード光のパルス幅は 5ns、繰り返し周波数は 1MHz に設定した。



図Ⅲ2.2.4-27 増幅ビーム結合実験配置図

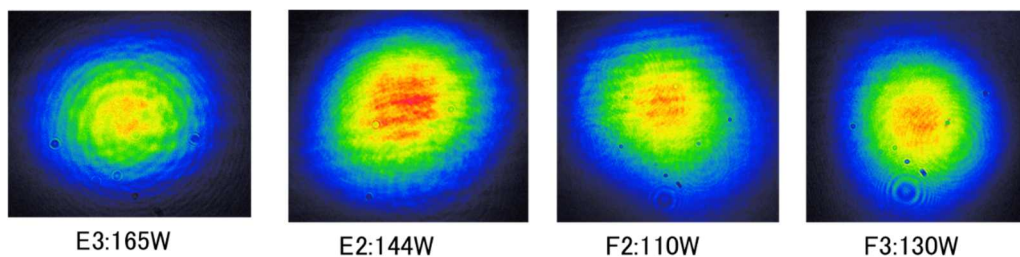


図Ⅲ2.2.4-28 低出力動作時のビーム結合出力の時間変化

図Ⅲ2.2.4-28 に低出力動作時のビーム結合出力を示す。CBC システムがオフの場合、ビームパワーはランダムな値を示す。CBC システムをオンにするとビームパワーが最大となるように制御がかかり、パワーが最大に近い状態が安定して続くようになる。制御の立ち上がりは 0.5s 以下である。ビームパターンを見ると、無制御時のパワーが最小に近い状態ではほぼ Out of Phase の状態であるが、制御時には 4 つのビームの位相が揃った In-Phase 状態で

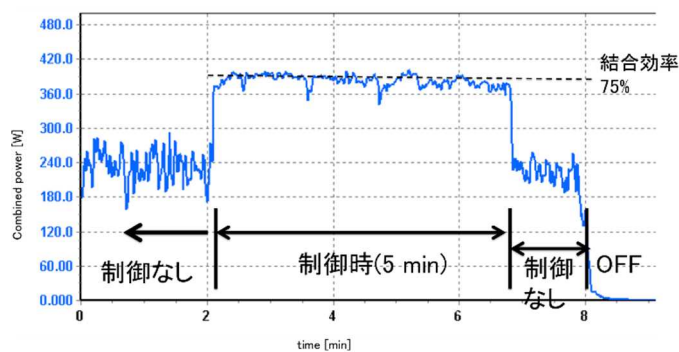
あることが確認できた。

次にレーザーの出力を最大にして実験を行った。図Ⅲ2.2.4-29 にそれぞれのビームパターンとパワーを示す。E2、E3 および F2、F3（図Ⅲ2.2.4-14 参照）をそれぞれ2ビームコヒーレント結合し、その後偏光合成することで4ビームの結合を行った。



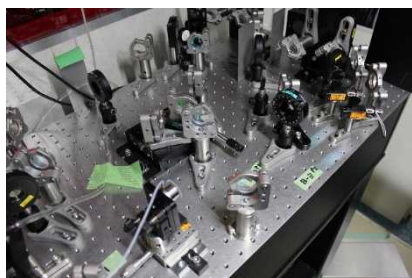
図Ⅲ2.2.4-29 4ビーム（E2, E3, F2, F3）のパターン

図Ⅲ2.2.4-30 に高出力時のビーム結合パワーの時間変化を示す。このときのビーム結合の出力は409W、結合効率は75%であった。

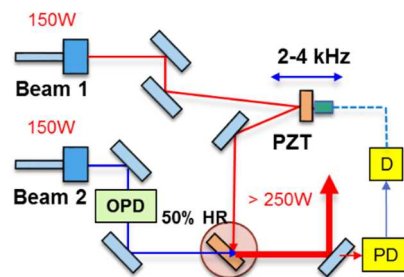


図Ⅲ2.2.4-30 高出力動作時のビーム結合出力の時間変化

図Ⅲ2.2.4-23 のアルゴリズムに基づく4ビームコヒーレント結合装置内で、2ビーム結合部の写真と配置を図Ⅲ2.2.4-31 に示す。



(a) 2 ビーム結合部の写真



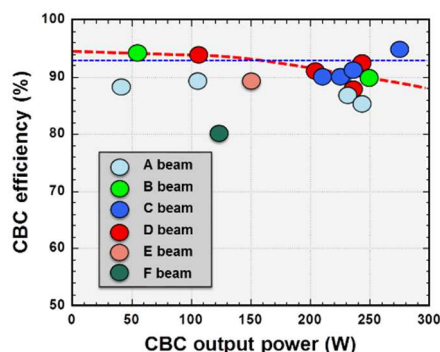
(b) 2 ビーム結合部の光学配置

図Ⅲ2.2.4-31 ファイバースタンプ増幅の出力部に設置したコヒーレント結合装置

OPD は 2 ビームの時間差調整用のディレイステージ、PD はピンフォトダイオード、D はピエゾのドライバーである。2つのブースター増幅器からの出力をハーフミラーにより重ねている。結合後のパワーはミラーの透過成分を計測し、開発したコヒーレント結合制御器 (図Ⅲ2.2.4-32) に入力し、制御器からの出力によりピエゾを駆動する。

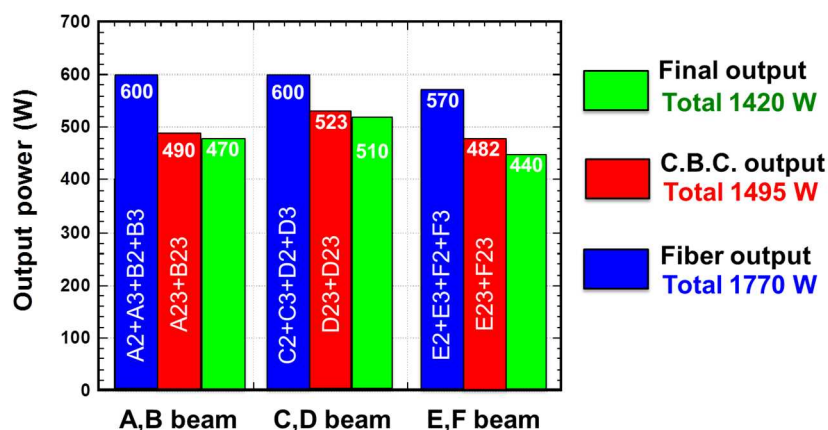


図Ⅲ2.2.4-32 コヒーレント結合制御器  
効率



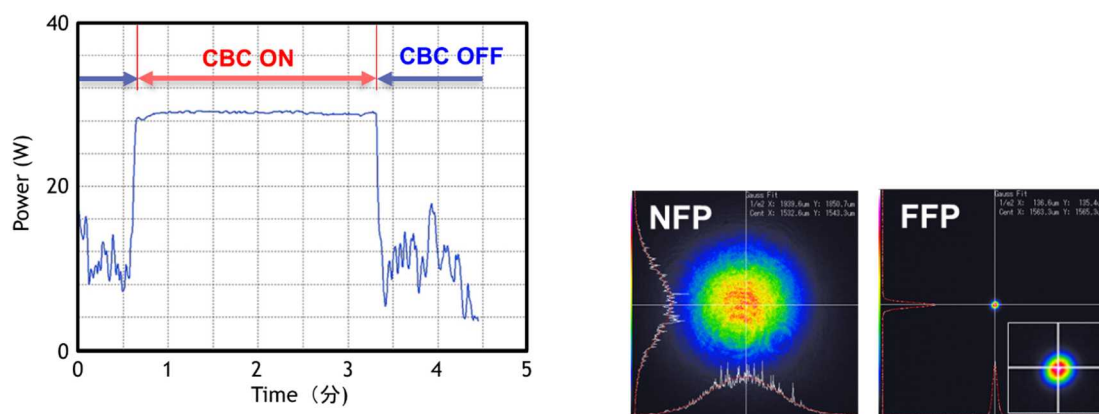
図Ⅲ2.2.4-33 各ユニットの 2 ビーム結合

図Ⅲ2.2.4-33 に各増幅器ユニットにおける 2 ビームコヒーレント結合の結果を示す。各々の結合効率として 90%~95%を達成した。図Ⅲ2.2.4-34 に各ユニットのビーム結合前後のパワーを示す。結合前パワーの全出力合計は、約 1.8kW を達成している。2 ビーム結合後のパワーの合計は 1.5kW、全ビーム結合後は 1.4kW となった。



図Ⅲ2.2.4-34 各ユニットのビーム結合前後のパワー

図Ⅲ2.2.4-35 に、4 ビームのコヒーレントビーム結合のパワーの時間変動と近視野および遠視野像を示す。フィードバック制御をしている間は出力が安定していることが分かる。また、近視野像 (NFP) および遠視野像 (FFP) とともに大きな乱れはない。集光スポットサイズはほぼ回折限界であった。



図Ⅲ2.2.4-35 4 ビームコヒーレント結合のパワー安定性 (左) とビームパターン (右)

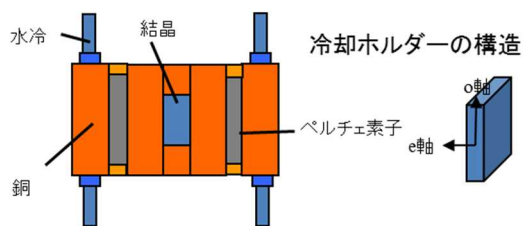
### 2.2.4.3 波長変換の高効率化技術の開発

#### 2.2.4.3-1 薄板構造による温度勾配の発生を抑制

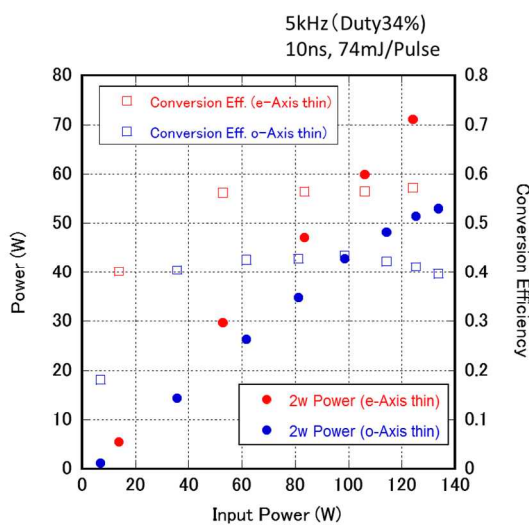
図Ⅲ2.2.4-36 に結晶ホルダーの構造を示す。結晶は一方向に薄い構造をしており、その方向にペルチェ素子を配置することで冷却効率を高める構造である。波長変換では、一般的に、結晶の常光線軸に比べて異常光線軸方向の位相整合条件が厳しい。薄板構造の結晶を用

いることで効率的な冷却を行い、温度分布の発生を抑えることができる。

図Ⅲ2.2.4-37に薄型 Type I 結晶で2倍高調波変換を行った結果を示す。基本波の常光線偏光方向に長い結晶（図中の赤プロット）では、変換効率（図中の□）は60%以上が観測されており、入力パワーの増加に伴う熱の影響が見られていない。これに対して、常光線軸方向が薄い場合（図中の青プロット）は、変換効率（図中の□）が40%台にとどまっており、熱の影響により変換効率が低下していく。これらの結果から、高調波の偏光方向に対して薄い構造の結晶の方が熱による変換効率の低下を抑制できることが分かった。



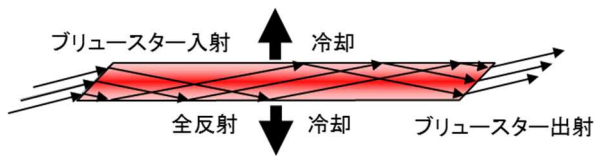
図Ⅲ2.2.4-36 冷却用結晶ホルダー



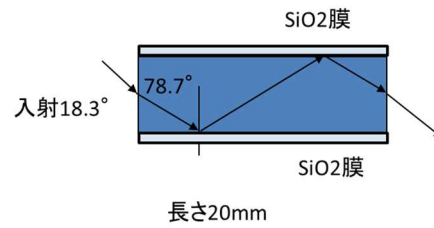
図Ⅲ2.2.4-37 2倍高調波変換結果

### 2.2.4.3-2 ジグザグ伝播による温度分布補償

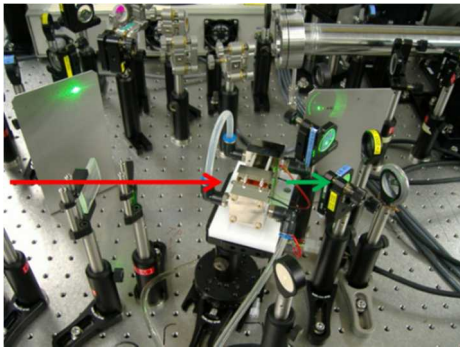
薄板状の結晶中をジグザクに伝搬させることで温度分布は平均化される。図Ⅲ2.2.4-38、-39にジグザク伝播用の結晶の概要とLBO結晶での設計結果を示す。実際の設計ではブリュースター入射は行わず、無反射コーティングを行っている。側面には全反射するように、エバネッセント波の染み出しを考慮して、SiO<sub>2</sub>を1μmの厚みでコーティングした。図Ⅲ2.2.4-40に実験装置の写真を示す。左から入射されるレーザーに対して結晶が大きく傾いていることがわかる。2倍高調波に変換されたレーザー光の一部が結晶端面で反射されて入射とは違う方向に戻っている。図Ⅲ2.2.4-41にジグザク伝搬構造の結晶を使って2倍高調波の発生を行った結果を示す。5kHz、10ns、120W入力に対して、2倍高調波80W、変換効率65%を達成した。



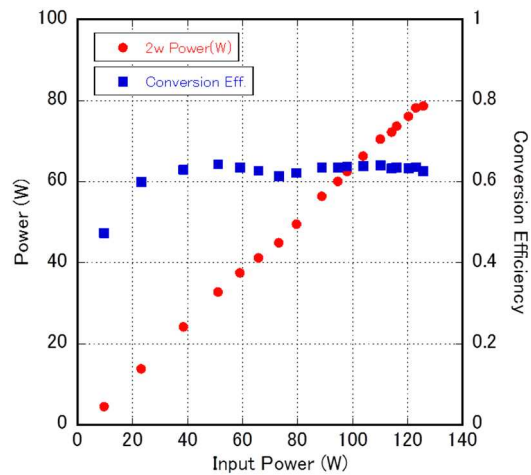
図Ⅲ2.2.4-38 ジグザグ伝搬の概念図



図Ⅲ2.2.4-39 LBO 結晶のジグザク伝播設計



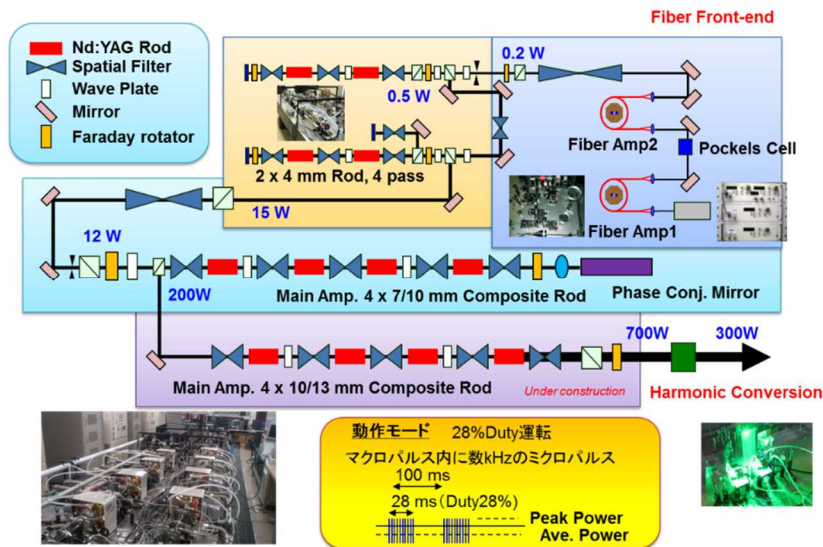
図Ⅲ2.2.4-40 波長変換実験装置



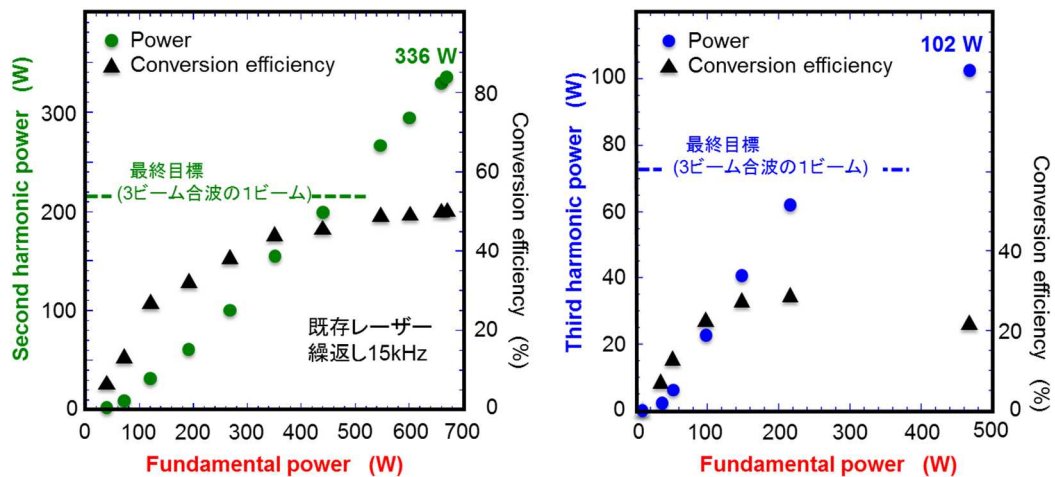
図Ⅲ2.2.4-41 ジグザク伝播波長変換の結果

### 2.2.4.3-3 既設レーザー装置を用いた波長変換による熱効果の調査

既設のレーザー装置を用いて、高平均出力レーザーを入射した場合の波長変換特性を評価する高熱負荷試験を実施した。図Ⅲ2.2.4-42に既設レーザー装置の概略を示す。出力700W、繰返し15kHz、パルス幅10nsでの運転が可能である。図Ⅲ2.2.4-43に高調波変換実験の結果を示す。結晶はLBO結晶を用いた。入射光は繰返し15kHz、パルス幅10nsである。基本波入力680Wの時に最大変換効率50%が得られた。2倍高調波光は680W入力時に336W（世界最高値）が得られた。3倍高調波発生にはLBO結晶を用い、基本波入力470Wに対して102Wの3倍高調波の発生に成功した。この時の変換効率は22%である。このようにして、高熱負荷に耐えうる波長変換器の技術を確立した。



図III.2.2.4-42 既設Nd:YAGレーザー装置の概略図

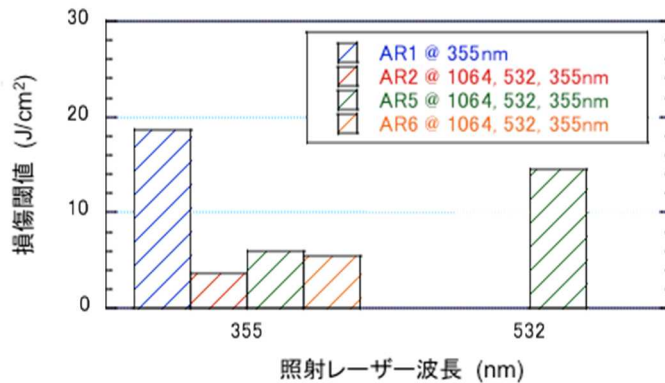


図III.2.2.4-43 波長変換モジュールの高熱負荷試験の結果

#### 2. 2. 4. 3-4 無反射コーティング膜のレーザー損傷閾値の評価と高耐力化の検討

図III.2.2.4-44 に無反射膜の損傷閾値の計測結果を示す。波長 355nm の光に対して、3 波長の無反射コーティングは  $5\text{J}/\text{cm}^2$  程度であった。安全係数を 2 倍に仮定すると  $250\text{MW}/\text{cm}^2$  のビーム強度となり、最終的に必要なパワー密度ぎりぎりとなることから 3 波長のコーティングでは難しい。これに対して、355nm 単独でのコーティングでは、 $19\text{J}/\text{cm}^2$  という耐力が得られており、十分に使用できる。一方で、波長 532nm に対しては 3 波長コーティングでも  $15\text{J}/\text{cm}^2$  が得られている。これらのことから、3 倍波用結晶では、入射側と出射側で異なるコーティングを施すことで、無反射コーティングを利用可能であると言える。

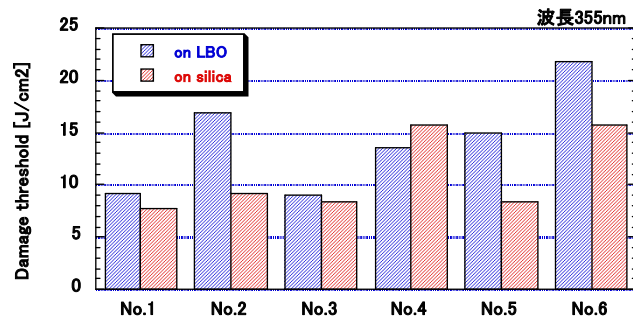




図III.2.2.4-44 無反射コーティングの損傷閾値

非線形光学素子を用いて高効率波長変換を達成するためには、高いパルス強度であること、大きな非線形光学定数をもつ非線形結晶であること、十分な結晶長を有することが必要である。しかし、光学素子は高いパルスレーザー強度に曝されると、しばしばレーザー損傷を引き起こす。そのため、レーザー損傷はレーザー装置の出力を制限する大きな要因になっている。特に、非線形光学結晶の表面に施される反射防止膜のレーザー損傷閾値は、他の光学素子のそれに比べてかなり低い。

市販されている数種類の LBO 結晶上反射防止膜のレーザー損傷閾値を評価した結果、355nm のレーザーパルスに対して多くの反射防止膜は 10J/cm<sup>2</sup> 以下であった。LBO 結晶の反射防止膜のレーザー損傷耐力を向上するために、結晶表面の研磨方法を改良し、コート材料の選択と低温コート条件の最適化を行った。LBO 結晶は潮解性を持つため、表面研磨後、大気中の水分により表面荒れを引き起こす。特に僅かな研磨痕も時間とともに強調されるので、研磨最終仕上げ中の雰囲気とコートまでの保管にも配慮した。

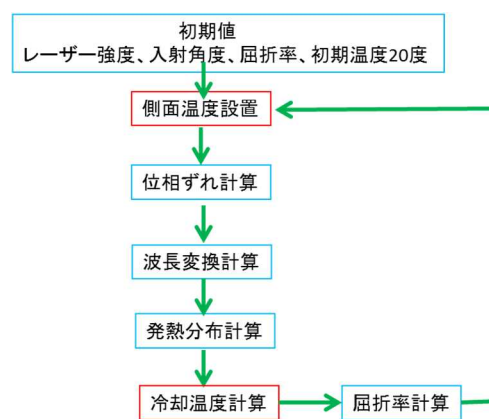


図III.2.2.4-45 試作 LBO 結晶反射防止膜のレーザー損傷閾値

試作した反射防止膜のレーザー損傷しきい値の結果を図Ⅲ2.2.4-45に示す。比較のために、石英ガラス基板上に同時製膜した反射防止膜の損傷しきい値を示す。結果、研磨仕上げを改良した試料 No.2 と、研磨仕上げとコート条件を改良した No.6 において、大きくレーザー損傷しきい値を向上することに成功した。今後、さらに条件を改良することにより、高耐力、長寿命の反射防止膜の製作が期待できる。

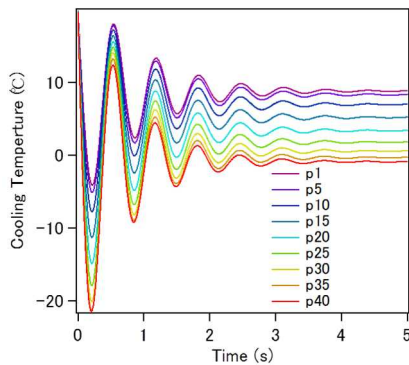
#### 2.2.4.3-5 高平均出力レーザーの波長変換素子の温度最適化

波長変換に必要な位相整合条件は結晶温度に対して敏感であり、高平均出力レーザーにおいては、非線形光学結晶の僅かな光学吸収でも発熱、温度分布を形成するために、外部から温度制御をする必要がある。最適な制御温度を求めるために、図Ⅲ2.2.4-46に示すような計算フローチャート考えた。計算では、レーザーおよび非線形結晶の初期条件を設定し、波長変換を計算し、基本波および高調波の吸収による発熱、必要な冷却温度、結晶内の屈折率分布を求める。屈折率が異なるために、波長変換に必要な位相整合条件から外れるために、波長変換効率が低下し、基本波および高調波のエネルギーも変化する。これを繰り返すことにより、最適な外部制御温度を求める。

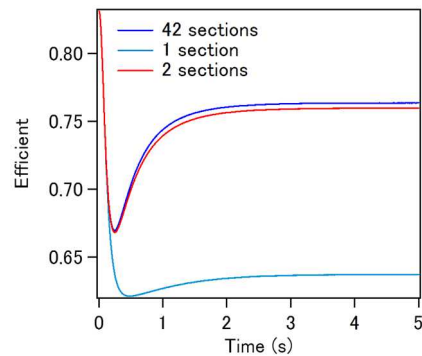


図Ⅲ2.2.4-46 最適制御温度の計算フローチャート

2倍高調波変換結晶の最適外部冷却温度を求めた計算結果の例を図Ⅲ2.2.4-47に示す。40点の外部温度制御箇所を考え、それぞれの設定温度の時間変化を示した。図より、全ての制御箇所において、約3秒で制御温度が収束していることが分かる。この結果では、制御箇所 p1（レーザー光入射側）では+9℃、制御箇所 p40（レーザー出射側）では -1℃にすることにより、初期値に近い温度分布が形成され、高効率変換が維持できることを意味している。



図III2.2.4-47 非線形結晶外部最適温度の計算例 (制御点 40 ヶ所)



図III2.2.4-48 外部温度制御数に対する変換効率の時間変化

実際には、20mm 程度の非線形光学結晶の側面を制御できる数は限定されるため、制御点の数に対する変換効率への影響を計算した。図III2.2.4-48 は、制御箇所を 1 点、2 点、42 点の場合に温度を制御し波長変換した場合の変換効率の時間変化を示す。計算初期は、約 85% あった変換効率は、照射時間とともに温度が上昇し低下する。制御箇所 1 点では、約 61% まで変換効率は低下し、その後側面冷却により約 63% まで改善された。一方、制御点 2 点および 42 点では、約 67% まで低下した後、約 76% まで改善した。2 点と 42 点の変換効率の差は、僅か 1% であることから、非線形結晶を 2 分割し温度制御することで十分であることが分かった。

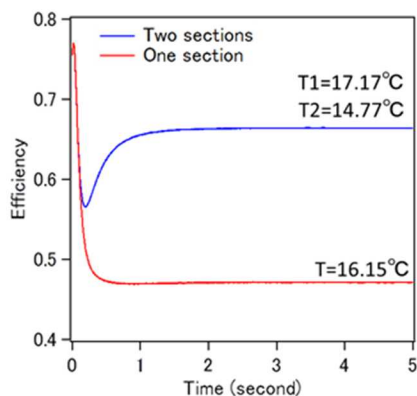
上述の計算方法により、開発する高平均出力レーザーの条件における波長変換の最適制御温度および変換効率を求めた。計算に使用したレーザー条件、LBO 結晶のパラメータを表III2.2.4-1 に示す。入射レーザー光は、750W×2 ビームを想定し、それぞれのビームを波長変換するものと仮定した。また LBO 結晶の吸収係数は、製造メーカー、成長インゴットによっても異なるが、1064nm に対しては 0.1%/cm、532nm および 355nm に対しては 0.3%/cm とした。

表III2.2.4-1 計算に使用したレーザー条件と LBO 結晶パラメータ

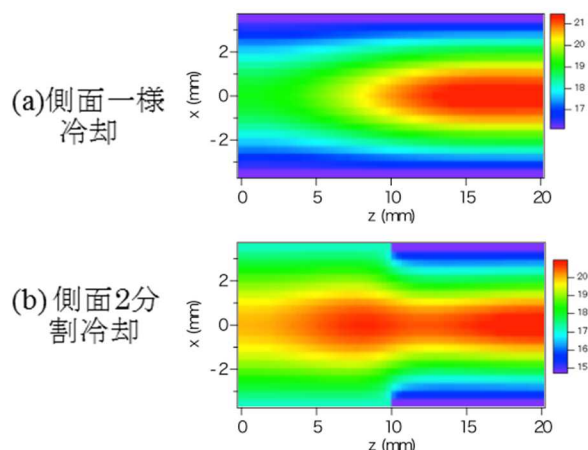
基本波		SHG Type-I	THG Type-II※
波長	1064 nm	0.96	0.78
パルス幅	1 ns	6.54	0.3
出力	750 W	4.7	3.7
周波数	75 kHz	1	-
ビーム径	3 mm	0.6	0.5
		※Laser Crystal Solutions data	

LBO 結晶長 20mm の場合の 2 倍高調波変換の計算結果を図III2.2.4-49 に示す。図の赤線

は、結晶側面を一様に冷却した場合、青線は結晶を入射側、出射側の2分割で温度制御した場合の結果である。側面一様冷却では、冷却温度 16.15°Cにおいて最も高い47%の変換効率を得た。一方、2分割制御では、入射側 (T1) で 17.17°C、出射側 (T2) で 14.77°Cにおいて、65%の変換効率を達成した。一様冷却時と2分割冷却時の結晶内部の温度分布を図III.2.2.4-50に示す。一様冷却の場合には、出射側結晶中心で21°Cを超え、入射側中心で18°Cになった。これは基本波に対する吸収係数が 0.1%/cm であるのに対して、2倍高調波に対する吸収係数が 0.3%/cm と大きく、出射側では2倍高調波のパワーが最大となるためである。結果として、位相整合条件である 20°Cからずれていることが分かる。一方、2分割冷却の場合には、入射側 17.17°Cに対して、出射側を 14.77°Cに下げることにより、結晶中心では入射側から出射側まで  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  の温度分布に抑制されていることが分かる。

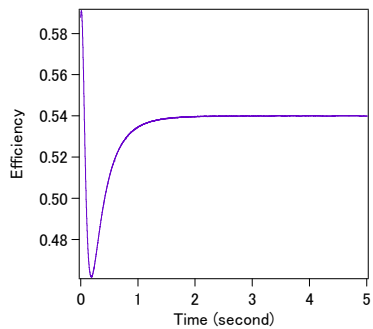


図III.2.2.4-49 LBO 結晶による 2 倍高調波変換効率の計算結果

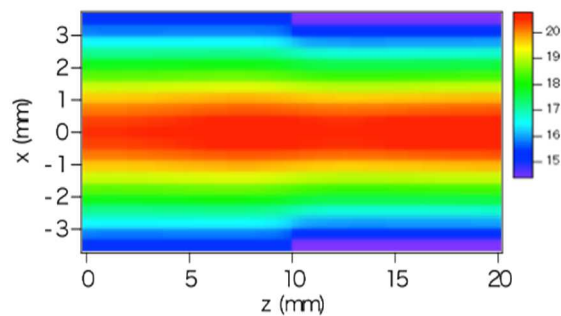


図III.2.2.4-50 2倍高調波変換時のLBO 結晶内部温度分布

上記で得られた2倍高調波変換効率(65%)より、基本波 262W、2倍高調波 488W を固定し、3倍高調波変換の効率と最適外部温度の評価を行った。結晶長は 20mm で、側面2分割冷却した変換効率の結果と、内部温度分布の結果を図III.2.2.4-51に示す。照射当初は約59%であった変換効率は、2秒後には約54%に落ち着いた。この時の2分割制御温度は、入射側、出射側、それぞれ 15.12°C、14.43°Cであった。入射側と出射側の温度差が 0.7°C程度となった理由は、532nm と 355nm に対する吸収係数を 0.3%/cm と同じにしているためである。結晶内部の温度分布も、2倍高調波の結晶内分布に比べて比較的一様であることが分かる。以上のことから、750W の高平均出力を持つ基本波の波長変換では、非線形結晶を外部より2分割で温度制御を行うことにより、2倍高調波 65% (488W)、3倍高調波 54% (405W) の高効率変換が期待される。



(a) 変換効率

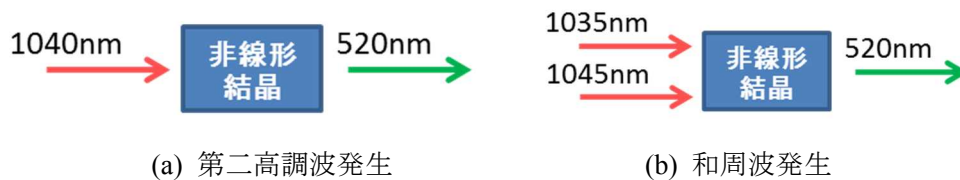


(b) 結晶内部温度分布

図Ⅲ2.2.4-51 LBO 結晶による第三高調波変換効率と結晶内部温度分布

### 2. 2. 4. 3-6 多波長ビームによる和周波発生

異なった波長をもつ 2 本のビームを 1 つにするためには、通常、回折格子やダイクロイックミラー等の波長依存性を持つ光学素子が利用されている。しかし、2 本のビームの波長差が小さい場合には、これらの光学素子で結合することは難しい。そのため、偏光で結合し、直交した偏光をもつ 2 波長のレーザー光で直接波長変換（和周波発生）することを想定し、計算を行った。図Ⅲ2.2.4-52 は単一波長の第二高調波発生と 2 波長による和周波発生のスキームを示す。



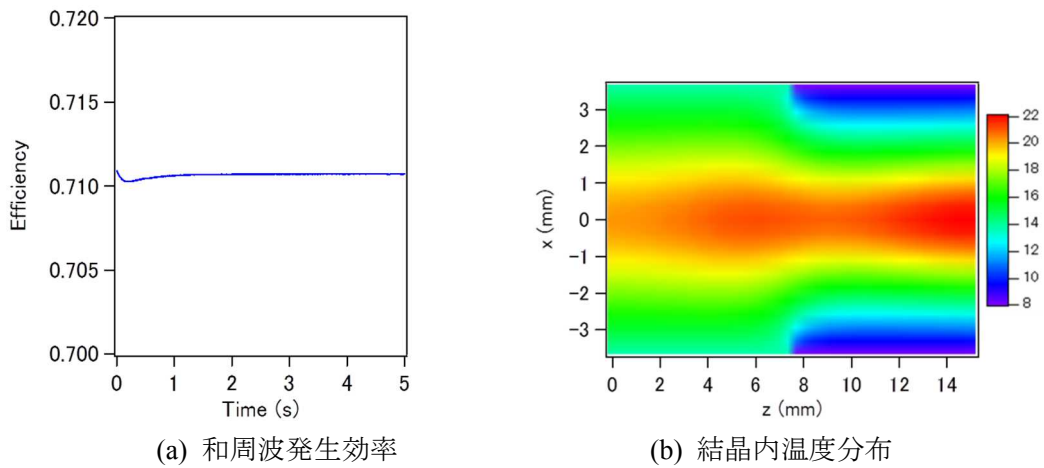
図Ⅲ2.2.4-52 非線形光学結晶による第二高調波、和周波発生スキーム

波長 1035nm と 1045nm の直交偏光をもつ入射ビームから LBO 結晶を用いて和周波発生する発生効率を計算した。結晶は Type II、長さ 15mm とし、入射 1035nm、1045nm に対する吸収係数は 0.1%/cm、和周波 520nm の吸収係数は 0.3%/cm とした。その他入射レーザーの条件は表Ⅲ2.2.4-2 にまとめた。

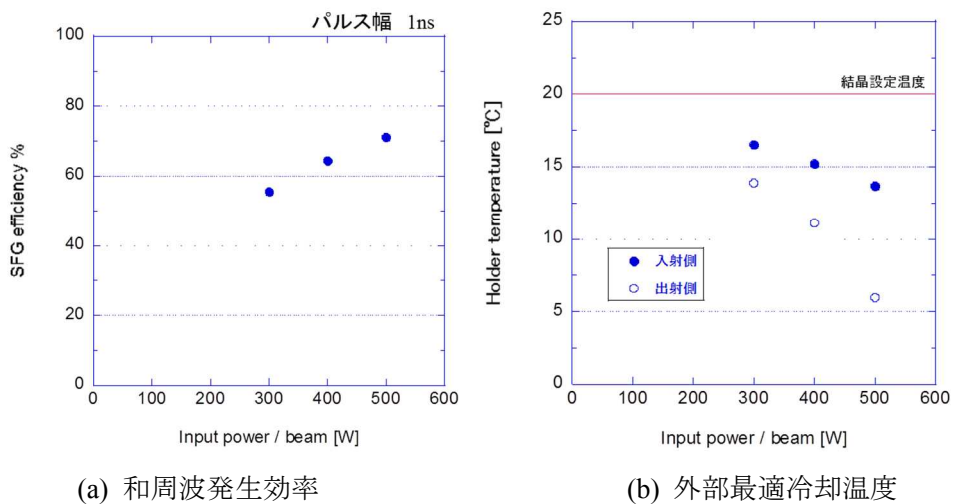
表Ⅲ2.2.4-2 和周波発生入射レーザー条件

波長	パルス幅	平均パワー	繰返し周波数	ビーム径
1035 nm	1 ns	500 W	150 kHz	3 mm <sup>φ</sup>
1045nm	1 ns	500W	150 kHz	3 mm <sup>φ</sup>

外部冷却は側面冷却として、前述同様、入射側と出射側の2分割を制御するように、最適温度を求め、和周波発生効率、結晶内温度分布を求めた。図Ⅲ2.2.4-53に発生効率の時間変化と5秒後の結晶内温度分布を示す。結果、入射開始後3秒後には、入射側13.7℃、出射側8.0℃の冷却温度にすることにより、発生効率71.1%（出力711W）を維持することが分かった。その時の温度分布は、結晶中心部で $20\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ に保持されていることが分かる。また、2つの入射レーザーパワーが減少した場合の発生効率と最適冷却温度を図Ⅲ2.2.4-54にまとめた。それぞれの入射パワーが300Wまで低下した場合でも、発生効率は55%（550W）を維持できることが分かった。



図Ⅲ2.2.4-53 入射 500W×2 ビームによる和周波発生計算結果



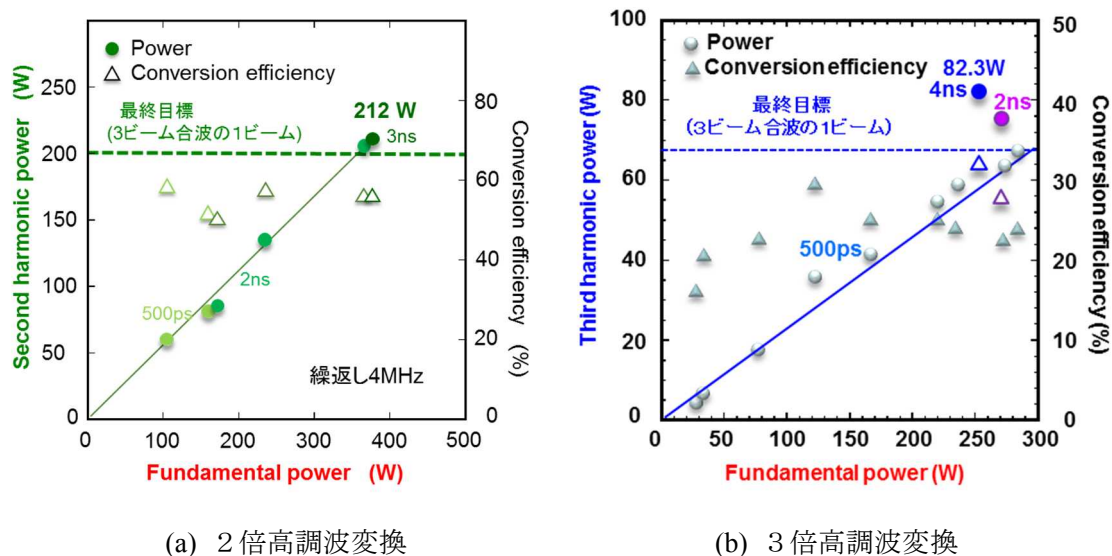
図Ⅲ2.2.4-54 入射パワーに対する和周波発生効率と最適冷却温度

一方、入射レーザーのパルス幅が1nsよりも長くなった場合には、パルスピーク強度が低

下するために、発生効率は急激に低下する。この場合は、入射レーザービーム径を縮小して、同等程度のピーク強度にして使用することにより発生効率は維持できるが、結晶中心部の温度上昇が大きいいため、レーザー光による損傷に注意するとともに、側面冷却温度を更に下げる必要があることが分かった。

#### 2.2.4.3-7 ビーム結合ファイバースター増幅器出力による波長変換

図Ⅲ2.2.4-55にビーム結合ファイバースター増幅器の1系列の出力を用いて高調波変換を行った結果を示す。繰返しは4MHz、パルス幅は3nsである。基本波入力380Wに対して、2倍高調波出力212W、3倍高調波出力82.3Wを得ることができ、ユニット当たりの目標値を達成した。ファイバースター増幅器を3系列もちいることにより、得られる最終出力は2倍高調波光で600W、3倍高調波光で240Wを越えると期待できる。

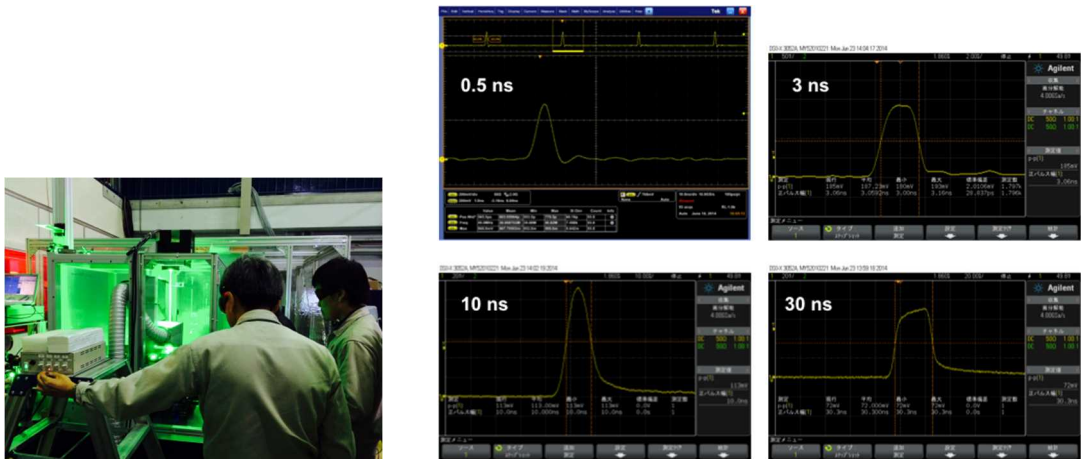


図Ⅲ2.2.4-55 ファイバースター増幅器出力1ユニットによる波長変換の結果

#### 2.2.4.4 CFRP 加工実験へのレーザー供給

技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所(加工システム技術開発センター:産業技術総合研究所、新日本工機)と大阪大学接合科学研究所が協力して大阪大学レーザーエネルギー学研究中心で行う CFRP 加工の系統的实验データ構築のため、片岡製作所及び浜松ホトニクスと協力して、条件に応じてパルス幅および繰返し数を変化させたレーザーを供給した。

平成23年度には、既設レーザー装置を用いて、基本波100W、20kHz、Duty36%、2倍高調波50W、20kHz、Duty36%、3倍高調波50W、30kHz、Duty41%のレーザーを供給した。



図Ⅲ2.2.4-56 CFRP 加工実験風景（左）と供給したパルス波形の例（右オシロトレース）

平成 25 年度には、本プロジェクトで開発したファイバースター増幅器による 1 回目の加工試験を行った。基本波 150W、150kHz、10ns、2 倍高調波 60W、150kHz、3 倍高調波 30W、150kHz のレーザーを供給した。

平成 26 年度 7 月には、既設レーザー装置を用いて、基本波 240W、150kHz～40MHz、Duty32%、パルス幅 0.5ns～30ns のレーザーを供給した。さらに、平成 26 年度後半に基本波 12 ビーム結合により合計出力約 1.5kW が可能となり、一部のレーザー基本波出力約 1.3kW 出力を供給した。

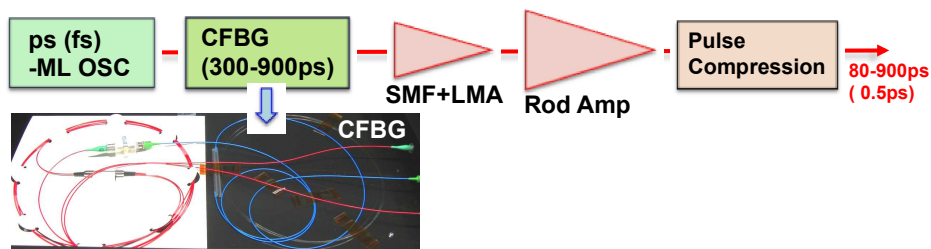
5 年度にわたる連携実験の延べ日数は 54 日（H22 年度：3、H23 年度：1、H24 年度：17、H25 年度：20、H26 年度：13 日）であった。

#### 2. 2. 4. 5 パルス幅可変ファイバーレーザーシステムの開発（平成 26 年度加速予算）

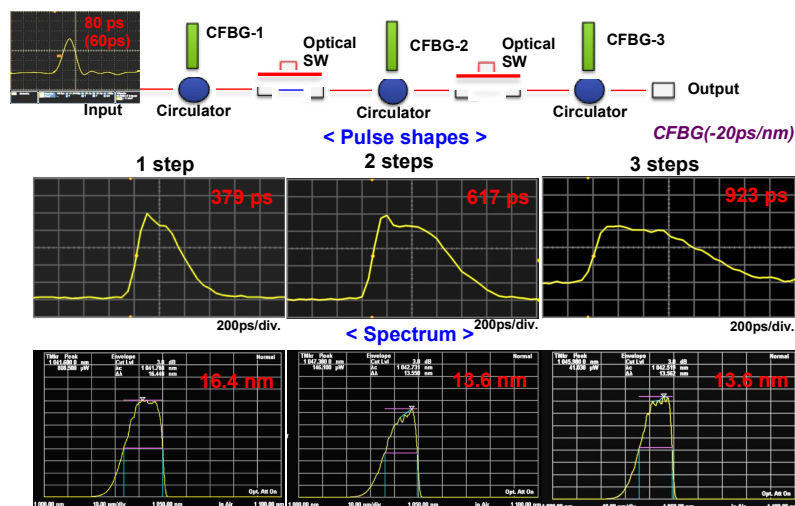
半導体レーザーによるパルス幅可変レーザーは、パルス幅可変がサブ ns 域から ns 域可変であるが、より短いパルス約数 100fs から数 100ps で可変可能なファイバーレーザーシステムを開発した。

図Ⅲ2.2.4-57 にシステムブロック図を示す。種光源には 100MHz 動作の Yb 添加ファイバー偏波回転モード同期発振器（中心波長 1040nm）を用い、3 段の CFBG（Chirped Fiber Bragg Grating）によってパルス伸長した。その後、シングルモードファイバー、LMA ファイバー、PCF Rod によって増幅した。図Ⅲ2.2.4-58 に伸長したパルス幅とスペクトル特性結果を示す。入射パルス約 60ps は、CFBG の段数増加により、一段 379ps、2 段 617ps、3 段 923ps が得られ、パルス幅が可変である。また、スペクトル幅は CFBG のスペクトル制限により、3 段目出力時約 13.6nm となった。



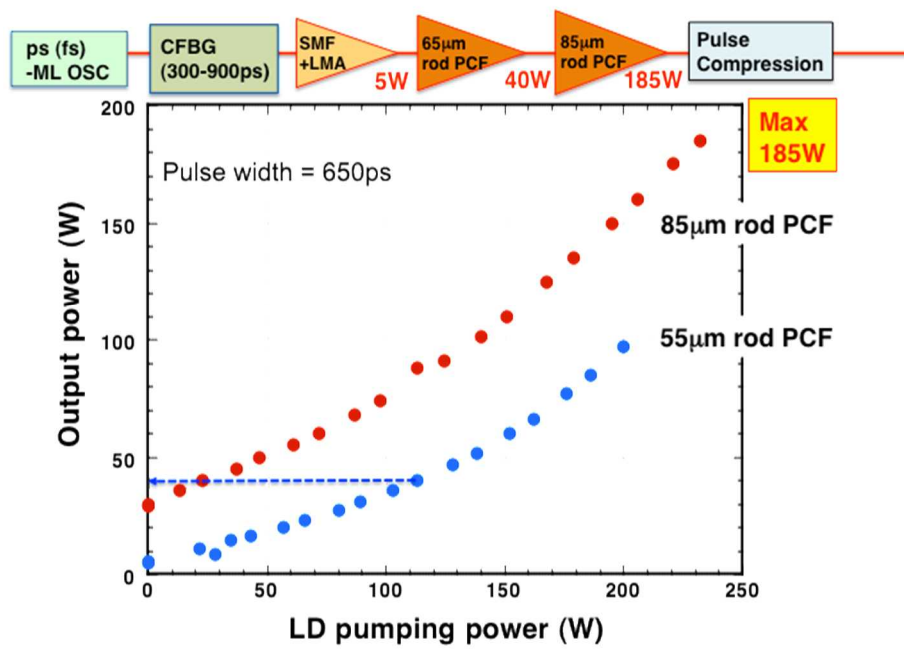


図Ⅲ2.2.4-57 パルス幅可変ファイバーレーザーシステム図



図Ⅲ2.2.4-58 伸長パルス幅とスペクトル特性結果

CFBG 出力光をシングルモード増幅器と LMA 増幅器により最大出力 6W まで増幅した後、偏波保持大口径 PCF Rod 増幅器によりチャープパルス増幅を行った。図Ⅲ2.2.4-59 に増幅特性結果を示す。チャープパルス幅 600ps、入射パワー約 5W 時、コア径 55 $\mu$ m の PCF Rod の最大出力は約 100W、コア径 85 $\mu$ m の PCF の最大出力は約 185W が得られた。出力ビーム品質はほぼ回折限界と良好であった。透過回折格子対によるパルス圧縮後の最短パルス幅としては、約 700fs が得られた。よって、回折格子間隔可変のパルス圧縮器により、パルス幅サブ ps から 920ps のパルス幅可変が可能である。また、温度制御 CFBG、プリズム対やダズラー等の高次分散補償光学系の挿入により、数 100fs も可能となる。



図Ⅲ2.2.4-59 ファイバーチャープパルス増幅特性

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.3 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」

「(1)高品位・高出力パルスレーザーの開発」

「②励起用半導体レーザー技術開発」の成果

(浜松ホトニクス株式会社 実施、1/3 実施者負担共同研究)

##### 2.3.1 本開発項目の成果概要

前半の研究開発を継続するものなので、前半の内容も関連付けて記載することとした。

プロジェクト開始時に設定された中間目標、中間評価後に見直された最終目標、それぞれの目標に対していずれの項目も達成した。ファイバーレーザーの励起用光源としての特性は、世界最高位の光出力ー電気光変換特性を有しており、また連携先である古河電気工業により、「開発されたシングルエミッタ素子は高効率でありファイバーレーザーの高効率化に有用である」との評価を受けている。またベンチマークテストとして、海外製品との性能比較を実施し、その優位性も確認できている。本開発項目は 1/3 実施者負担の共同研究であり、より事業化を意識したものである。プロジェクト終了後の事業化・実用化をにらんだ知的財産戦略として特許出願も積極的に実施し、国内出願 16 件（出願準備中 3 件含む）、中国への出願 1 件を行った。

またプロジェクト成果を世界に普及するため、外部発表について重要視し、26 件の外部発表、13 件の論文発表を実施した。特に世界レベル成果の妥当性・有用性を検証するため、国際学会での口頭発表、査読付海外論文誌での発表に積極的に取り組んだ。昨今では、半導体レーザーをレーザー半田、レーザー樹脂溶着、レーザー焼き入れなど局所熱加工光源としての利用も増えてきている。我々もこれらの用途に向けた光源を製品ラインナップしているが、開発した技術を自社製品に組み込み、既に社会に普及させては始めている。

##### 2.3.2 事業の背景・目的

溶接、熱処理、焼き入れ等様々な用途に半導体レーザー（LD；レーザーダイオード）が導入され、省電力化（低炭素排出）に寄与し、自動車産業をはじめとする産業競争力の向上に貢献している。LD に対する産業界からのニーズとして、LD のさらなる小型化、高効率化、また低コスト化の要求が高い。またロボットで使用する場合には、レーザー光出射部の軽量化、小型化が必須となる。

さらにファイバーレーザーの更なる高性能化、低コスト化のためには、励起用半導体レーザーの高出力化、高効率化、高信頼性が不可欠である。このため、高出力領域での効率と信頼性を両立した高出力半導体レーザー及び半導体レーザーから発生させたレーザー光を無駄なく光ファイバーに伝送出来る技術を開発することを目的とした。

##### 2.3.3 研究開発目標と根拠

研究開発目標を表Ⅲ 2.3.1 に示す。平成 22 年度～平成 24 年度はプロジェクト開始時の目標値であり、平成 25 年度年度～平成 26 年度は中間評価を受けて変更した目標である。中間評価<sup>(1)</sup>では

「目標設定がキャッチアップ的であり、独自性に欠ける、総花的に目標を達成してよしとするのではなく、光るものをアピールすること」とあった。このことから、プロジェクト開始当初立てた目標について関係各所と協議を重ね、選択と集中を考慮した目標とした。また同中間評価では「成果を事業化するための具体的な計画を明らかにする必要がある」とのコメントも受けた。このことから、平成 25 年度～平成 26 年度に高効率高出力 LD の事業化に向けた検討を実施した。

シングルエミッタでは先行海外メーカーの平成 22 年までのトレンドを調査した結果、最大光出力が 12W、電気光変換効率が 60%であった。このことから高い変換効率を維持したまま、高出力化する目標設定とした。プロジェクト開始後、中間目標値と同じ光出力 15W の製品がリリースされたが、平成 24 年にスペックダウンされた。また過去の 15W 製品も電気光変換効率が低く、中間評価年度である平成 24 年度では、達成した中間目標値 15W と電気光変換効率 60%は世界的に最高位であった。このことから最終目標として光出力 20W、電気光変換効率 65%とし、それらの目標は達成できた。その成果はいまだ世界最高位であるが、平成 27 年 2 月の Photonics West では類似した報告がされはじめた<sup>(2)(3)</sup>。今後については全く油断ができない状況であり、本プロジェクト終了後も継続して研究開発に取り組むことが望まれる。

アレイにおいては、光源の高出力化・高効率化・長寿命化を両立させることで、省資源、低コスト、生産性向上、省エネルギー化を満足させるレーザー加工システムが必要となる。中間評価年度における市販品としては、期待寿命 1 万時間で、光出力も 80～100W 程度であった。中間評価では当時の特性を凌駕する光出力 200W、電気光変換効率 55%、寿命 2 万時間を達成し、最終目標では光出力 300W、電気光変換効率 60%とし、その目標は達成し、また約 2,000 時間の安定動作も確認した。この目標については現在でも世界最高位であるものの、類似した報告が出てきている<sup>(3)</sup>。

表Ⅲ 2.3.1 実施計画に盛り込まれた目標値

	平成 22 年度～平成 24 年度	平成 25 年度～平成 26 年度
中間 目標	シングルエミッタ 波長：近赤外帯 出力：15 W 効率：60 % 寿命：20,000 時間以上 アレイ 波長：近赤外帯 出力：200 W 効率：55% 寿命：20,000 時間以上 自動組立が可能なこと ファイバー結合効率※ シングルエミッタ：80%以上 アレイ：60%以上	/
最終 目標	シングルエミッタ 波長：近赤外帯 出力：20 W 効率：65 % 寿命：50,000 時間 アレイ 波長：近赤外帯 出力：300 W 効率：60% 寿命：50,000 時間 自動組立が可能なこと ファイバー結合効率※ シングルエミッタ：90%以上 アレイ：70%以上	<b>【参考】</b> シングルエミッタ 出力：20 W 効率：65 % ファイバー結合効率※：90%以上 アレイ 出力：300 W 効率：60% 事業化の検討の実施

※ファイバーコア径 105 μm、NA0.15 相当

ファイバー結合についてはプロジェクト開始当時は開口数の大きなNA0.22ファイバーを使用したモジュールが主流であり、NA0.15ファイバーを使用したファイバーモジュールは明確な仕様設定がなされていないことが多かった。このことから、光線入射許容角が小さなNA0.15ファイバーでも、NA0.22ファイバーと同等の結合効率を得ることを目標とした。現時点ではNA0.15ファイバーを使用したモジュールは一般的になりつつあるが、最終目標としたシングルエミッタ素子出力20W時にファイバー結合効率90%を実現した他例はまだない。

### 2.3.4 研究開発スケジュール

開発スケジュールを表Ⅲ 2.3.2に示す。本表では、シングルエミッタをSE、アレイをAと略して表記した。当初の計画に対して遅延なく、また年度ごとの修正計画に対しても遅滞なく遂行できた。また、シングルエミッタ、アレイともに事業化を見据えた試作検討を行い、プロジェクト終了後の実用化に道筋をつけることができている。

表Ⅲ 2.3.2 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発スケジュール

	平成22年度		平成23年度				平成24年度			
	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
SE	結晶成長および評価体制確立									
	素子形成プロセス工程確立									
	結晶構造・素子構造検討		素子評価方法検討							
			試作評価、問題点抽出				中間目標を満たす素子の試作と評価			
A	結晶成長および評価体制確立									
	素子形成プロセス工程検討									
	結晶構造・素子構造検討		素子評価方法検討							
			試作評価、問題点抽出				中間目標を満たす素子の試作と評価			
ファイバー結合 (SE)	LD・レンズドファイバー最適化設計									
	仮組調芯実験		調芯装置導入	調芯技術確立	中間目標を満たすモジュール試作・評価					
ファイバー結合 (A)	LD・光学系最適化設計									
	高出力コネクタ設計		高出力コネクタ試作							
			仮組調芯実験				調芯固定技術確立			
							中間目標を満たすモジュール試作・評価			

平成 25 年度				平成 26 年度			
1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
最終目標を達成するための 技術課題抽出				最終目標を満たす素子の試作			
				最終目標を満たすシングルエミ ッタファイバーモジュールの試 作			
高効率高出力 LD の事業化に 向けた検討に着手				高効率高出力 LD の事業化に 向けた検討を実施			

### 2.3.5 研究開発目標と達成状況

表Ⅲ 2.3.3 に最終目標に対する達成度を示す。実施計画に示された数値目標に対して問題なく達成できた。

表Ⅲ 2.3.3 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発達成度

	最終目標	達成度	備考
シングル エミッタ	出力：20W	○	ファイバーコア径 105 $\mu$ m、NA0.15 相当
	電気-光変換効率：65%	○	
	ファイバー結合効率：90%以上	○	
アレイ	出力：300W	○	
	電気-光変換効率：65%	○	

	中間目標	達成度	備考
シングル エミッタ	波長：近赤外帯	○	900nm帯
	出力：15W	○	
	電気-光変換効率：60%	○	
	信頼性（寿命）：20,000 時間	○	
アレイ	波長：近赤外帯	○	900nm帯
	出力：200W	○	
	電気-光変換効率：60%	○	
	信頼性（寿命）：20,000 時間	○	
ファイバ ー結合	※自動組み立てが可能なこと	○	スマイル 1 $\mu$ m以下
	シングルエミッタ：80%以上	○	ファイバーコア径 105 $\mu$ m、NA0.15 相当
	アレイ：60%以上	○	

◎大幅達成、○達成、×未達

## 2.3.6. 開発の詳細について

### 2.3.6.1 シングルエミッタ素子の開発について

#### 2.3.6.1.1 結晶構造の最適化

光出力を増大させるためには、大電流時の出力飽和の抑制と、大出力時の出射端面の劣化を防止する必要がある。ここでは注入電流増大に伴う出力の飽和を抑制するための結晶構造と共振器長の最適化を行った。

大電流時の出力の飽和は、素子の発熱による温度上昇によりキャリアが活性層からオーバーフローしてしまう事が主要因となっている。したがって、素子温度が上昇するのを抑制する事が重要であり、まずは素子構造を最適化することによって発熱密度の低下と冷却効率の上昇を実現した。

温度上昇を抑制するため共振器長を伸ばしすぎると、内部損失の増大に起因すると考えられる特性劣化が発生する。このため発熱が大きくなる大電流域でも、キャリアを活性層へ有効に閉じ込める LD 積層構造の最適設計が必要となる。また電気-光変換効率の悪化を防ぐため、極力電圧の上昇を避けるようにした。

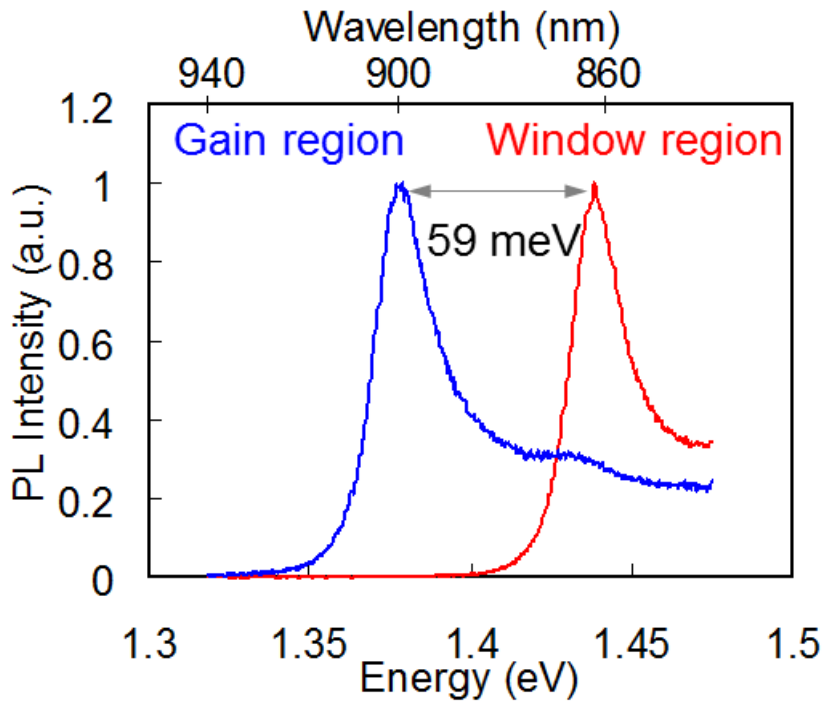
別途、開発の一環として、開発した素子と分布帰還型構造を組み合わせることで、単一波長化が可能かどうかについても検討を行った。波長安定化の指標の一つとして、光出力に対する発振波長のシフト量がある。分布帰還型構造を入れない LD ではこれが 1.1nm/W であるのに対して、0.3nm/W と 1/3 以下にする事が出来る事を確認した。これにより、今後ファイバーレーザーの高出力化に伴い要求が高まると思われる単一波長型 977nm 励起光源の実用化に向けての足がかりも得ることが出来た。

#### 2.3.6.1.2 端面構造改良による端面劣化レベル (COMD レベル) の向上

開発当初の素子は低出力においても、短時間で突然劣化するという問題を抱えていた。突然劣化した素子のレーザー光出射端面を観察すると熔融痕跡が認められ、COMD (Catastrophic Optical Mirror Damage) による劣化であることが確認された。

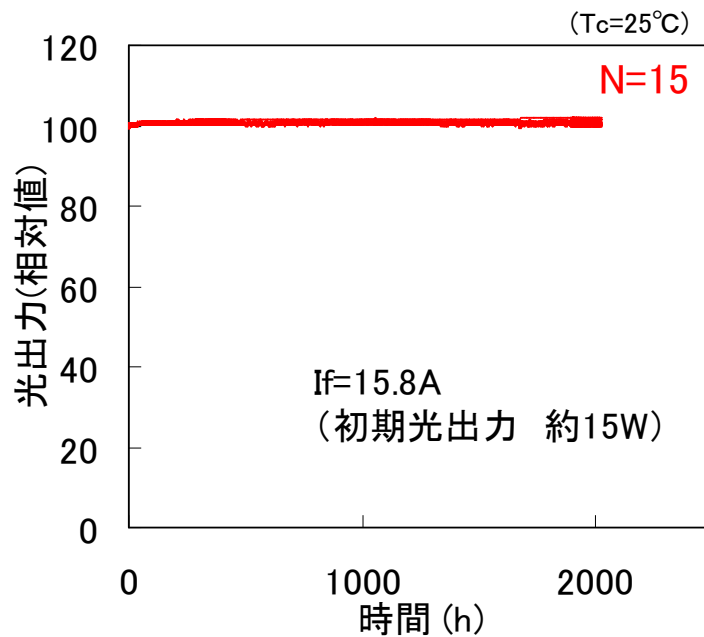
COMD とは、共振器端面の表面準位による光吸収が起きると非発光再結合が発生し、その結果光吸収が発生、温度上昇、バンドギャップ縮小という悪循環で、端面の温度が急激に上昇し、端面が熔融するという現象である。これを防止するためには、端面付近のバンドギャップをあらかじめ大きくし、端面近傍のレーザー光の吸収を抑制する手法が効果的である。これを一般的に窓構造<sup>(4)</sup>と呼ぶ。

窓構造の形成は端面近傍の活性層を選択的に無秩序化することでバンドギャップを拡大することで行った。バンドギャップの評価にはフォトルミネッセンス法を用い、端面近傍の内部に対するバンドギャップシフト量を測定し、端面近傍のバンドギャップが拡大したことを確認した (図 III.2.3.1)<sup>(5)</sup>。



図Ⅲ2.3.1 室温で測定した端面近傍と内部からのフォトルミネッセンススペクトル

さらに我々は窓構造の最適化を図るべく、窓構造のバンドギャップシフト量の最適化を行い、素子の信頼性の評価を行った。最適化した素子においては、光出力 15W で 2,000 時間の安定な動作を確認した (図Ⅲ2.3.2) <sup>(5)</sup>。一方、最適化されていない素子は短時間で頓死劣化した。別途実施したマルチセルテストで、統計的に計算される寿命 (MTTF; Mean Time To Failures) を算出したところ、30,000 時間を超えることを確認した。



図Ⅲ2.3.2 窓構造を採用した素子の連続駆動試験結果<sup>(5)</sup>



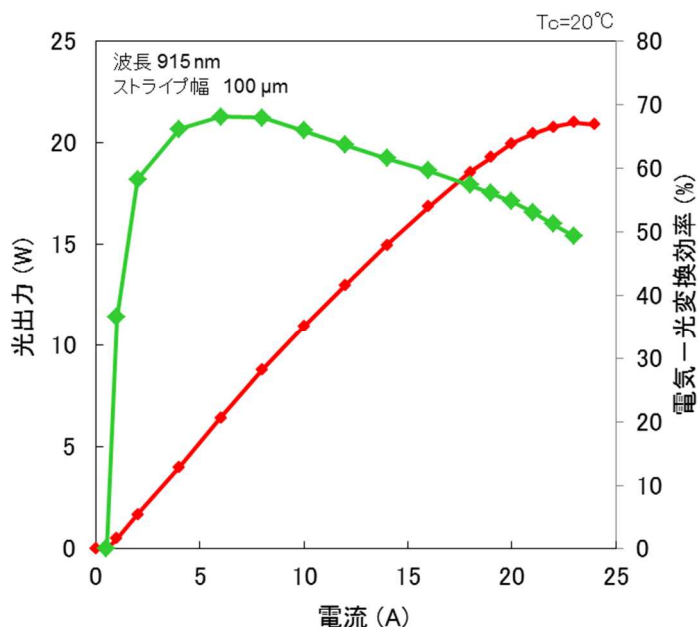
### 2.3.6.1.3 特性評価

開発したシングルエミッタ LD チップをサブマウントにダイボンドし、COS(Chip On Submount)型の素子を作製し(図Ⅲ2.3.3)、さらに COS を排熱性能を高めたヒートシンクに実装した。



図Ⅲ2.3.3 COS 型素子

素子温度 20°Cにおける光出力、変換効率の特性を図Ⅲ2.3.4 に示す。結晶構造、素子構造の最適化および排熱性能を向上させたことにより、最大光出力 21 W、最大変換効率 68%が得られた<sup>(6)(7)</sup>。なお最大光出力は COMD ではなく熱的飽和で制限されており、窓構造が 20 W 以上の光出力に対しても耐性があることが実証された。



図Ⅲ2.3.4 最終評価に供したサンプルの光出力、電気-光変換効率の電流依存性

さらに 20 W での連続動作試験を実施したところ、5,000 時間の安定動作を確認した。また別途

行ったマルチセル試験で、20 W@20°Cにおける MTF は 40,000 時間と見積もられた<sup>(7)</sup>。

#### 2.3.6.1.4 シングルエミッタ LD におけるファイバー結合に適した素子設計

LD のファイバー結合においては、結合光学系のデザインのみならず、LD の出射パターンを最適化することも重要な要素となる。出射パターンは遠視野像 (FFP) および近視野像 (NFP) で特徴付けられ、それぞれ水平方向 (-H) と垂直方向 (-V) がある。

LD の積層構造により決まる垂直方向のパターンは、NFP-V は数  $\mu\text{m}$  かつ FFP-V の広がり角は 20 度以上となるため、ファイバーコア径 105  $\mu\text{m}$ 、NA0.15 のファイバーに集光するためには、光学系による幾何光学的な変換が必要になる。しかし垂直方向の特性は LD 駆動条件に対して安定しており、素子設計的には一義的に決めることができる。

一方で水平方向の NFP-H は、ストライプ幅や駆動条件により、そのパターンは変動する。このため、駆動条件による水平方向のパターンの変動を抑制する事が、結合効率を上げる 1 つの鍵となる。このため我々は熱解析を併用して低発散角素子を設計した。

#### 2.3.6.1.5 シングルエミッタ LD のファイバー結合特性

先述したとおり、シングルエミッタの場合、垂直方向についてはモードフィールド厚さ 1~2  $\mu\text{m}$  の単一モード的な挙動で、水平方向に対してはストライプ幅 90~100  $\mu\text{m}$  のマルチモードで発振し、出射面からのビームは垂直方向に急激に広がる楕円型の遠視野像を示す (図 III 2.3.5)。

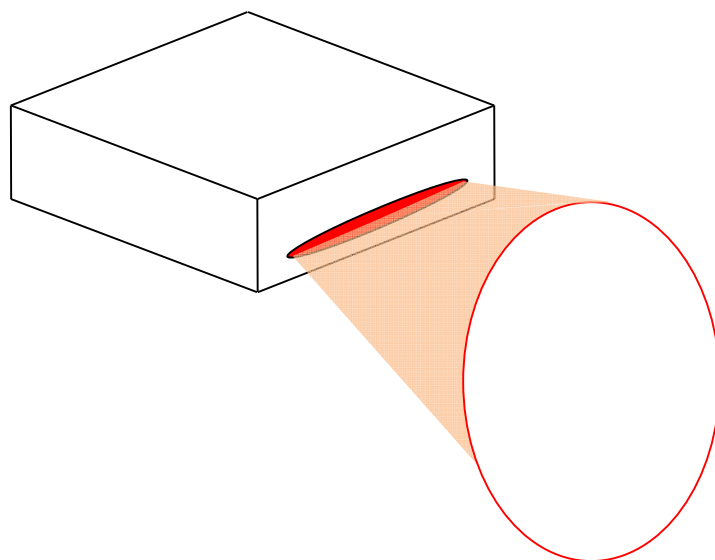
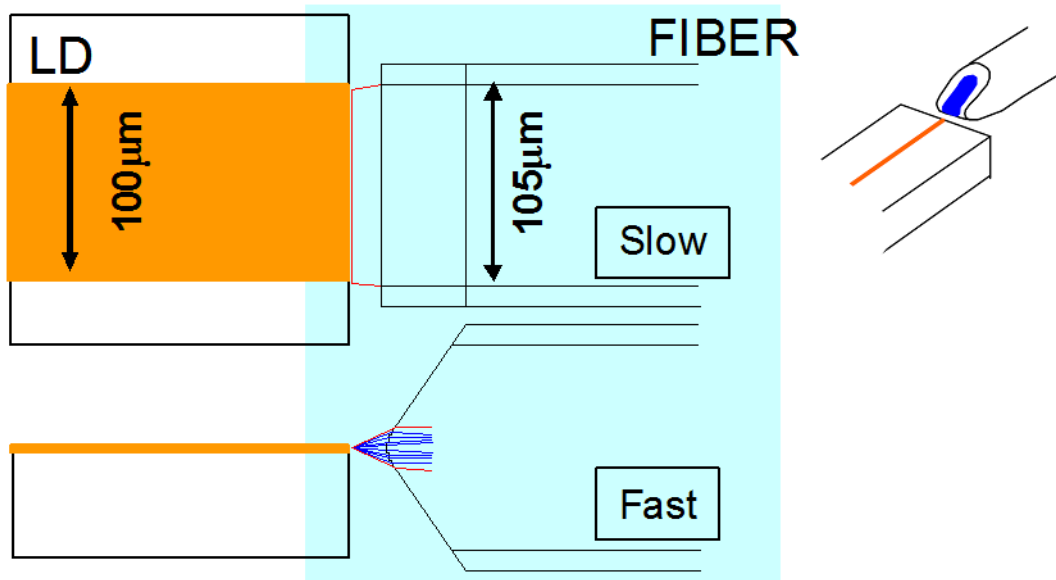


図 III 2.3.5 シングルエミッタ素子からのビーム

Slow 軸の発散角は熱レンズ効果により光出力の増加とともに急激に大きくなる。ストライプ幅が大きいほど熱レンズ効果は緩和されるが、ファイバーコア径よりも小さくするよう最適化しなければならない。先述したように、水平方向の発散角については素子側で対策を講ずるのが有効となる。

一方、垂直方向については幾何光学的に変換する必要があり、最適なレンズ設計を行う必要が

ある。図Ⅲ2.3.6は先球楔レンズドファイバーの最適設計例である。このように光線追跡法を用いて、ファイバーに入射する光線角度がほぼ0となるように、楔角度と先球半径を最適設計する。なおファイバーへの許容入射角度は垂直方向と水平方向のベクトル和で決まるため、垂直方向の光線角度を極力0とすることで、水平方向の許容角度を広くとることが出来る。



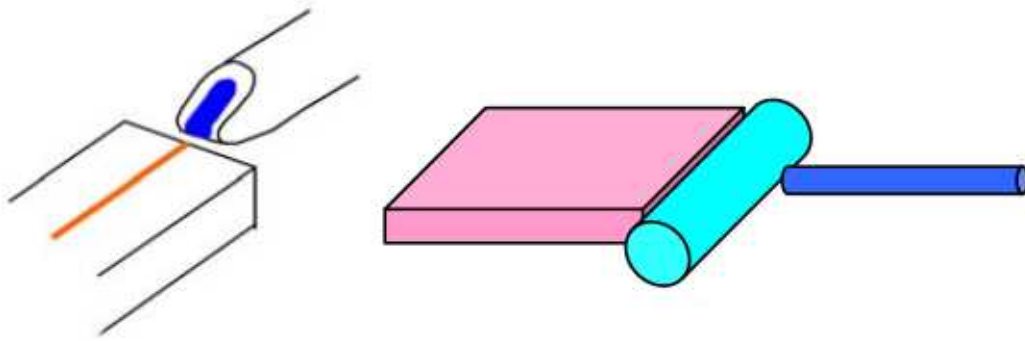
図Ⅲ2.3.6 先球楔レンズドファイバーの最適設計

垂直方向の幾何光学的変換は、先球楔レンズドファイバーを使用する方法と、超小型シリンドリカルレンズ (FAC レンズ ; Fast Axis Collimator レンズ) を使用する方法の2種類がある。

レンズドファイバー方式の特徴としては、構造がシンプル、理論的に戻り光の影響を受けにくい構造であるなどの長所があるものの、高い製造技術が必要なこと、調芯トレランスが少なく、実用化するためには高いパッケージング製造技術が必要になるといった技術の壁がある。レンズ設計パラメータとしては、先球の微小半径と楔角度の最適化が必要である。

FAC レンズ方式の特徴としては、量産性に優れるということにある。本研究では屈折率分布型光ファイバーをシリンドリカルレンズとして用いた<sup>(8)</sup>。このタイプのレンズは母材 (プリフォーム) が出来てしまえば、線引きすることで数 Km のファイバー状態にすることが容易であり、数十万本の FAC レンズにすることが出来る。この点、一本一本研磨などにより先球楔加工するレンズドファイバーとは大きく異なる。

先球と楔角度で最適化されるレンズドファイバーと比較して、FAC レンズ方式はレンズ直径だけがパラメータとなる。レンズ直径が大きくなるほど光線は緩やかにファイバーに入射されるが、その直径が大きくなるにつれ素子とファイバー間の距離が広がってしまい、広すぎると光線がファイバーコアからあふれてしまう。このことから、本研究では 50~100 μmφ の間で最適化した。また FAC 型の場合、レンズドファイバー方式と比較して調芯トレランスは緩い、素子とファイバー間にダイクロミックミラーなどが挿入できるなどといったメリットもある。短所としては構造上素子への戻り光が発生しやすい、レンズドファイバー方式と比較して、素子とファイバー間の距離が大きいため、ストライプ長を小さめに設計する必要があるなどが挙げられる。



図Ⅲ2.3.7 シングルエミッタのファイバー結合方法

(左) 先球楔レンズドファイバーを使用した方法、(右) FAC レンズを使用した方法

最終目標達成のためには、設計面ではファイバー結合に適した素子設計とレンズパラメータの最適化の双方が重要である。それとともに、組立技術として従来のマルチモード結合系で要求されるレベルを超えた高い調芯技術が要求された。このため、開発途上ではシングルモードLDとシングルモードファイバーを用いてサブミクロンにまで調芯・固定精度を上げることで技術力を向上させた。

前項にて説明した素子の熱拡散を促進した素子を使用することで、90%以上のファイバー結合効率が得られた<sup>(9)</sup>。

## 2.3.6.2 アレイ

### 2.3.6.2.1 素子構造の最適化

アレイLDは複数のエミッタが一定の幅に並んだ構造の素子であり、シングルエミッタLDよりも高い光出力を実現することができる。アレイLDでもシングルエミッタLDと同様、発熱による効率低下が高出力化を妨げる要因である。そこで結晶構造については、シングルエミッタLDの開発と同じ手法に基づき、高電流域でキャリアオーバーフローが起こりにくい活性層構造を求めた。そして、光出力300Wを高効率で実現するために、発光幅、発光間隔、および共振器長の最適化を施したアレイを試作した。

### 2.3.6.2.2 水冷ヒートシンクの最適化<sup>(10)(11)</sup>

高出力、高変換効率を実現するには、冷却効率の向上は不可欠である。新規素子構造に適した冷却構造とするため、数値計算による熱解析を実施した。ヒートシンク内部には微細な水路と、当社独自の冷却技術<sup>(12)</sup>が使われている。最終目標値である光出力300W達成に向けて、さらに増大する発熱対策として、水路構造の最適化を行い、ヒートシンク内の流路が複数層からなる水冷ヒートシンクを設計した。これにより、複数形成されたマイクロチャンネルへの冷却水の流れが並列化され、各マイクロチャンネル部での流速が一定化することで、素子全体を安定的に冷却できる。また、ヒートシンク内での圧力損失が低減し、過剰な負荷が抑制されることで流路劣化の抑

制も期待できる。素子の発熱量を 200W と仮定した数値計算では、温度分布は約 2°C 改善、圧力損失は 25% 低減する結果となった。今回試作したヒートシンクの流れる冷却水の圧力と流量の関係を図 III 2. 3. 8 に示す。冷却水流量が同圧力で従来の 2 倍以上になることを確認した。

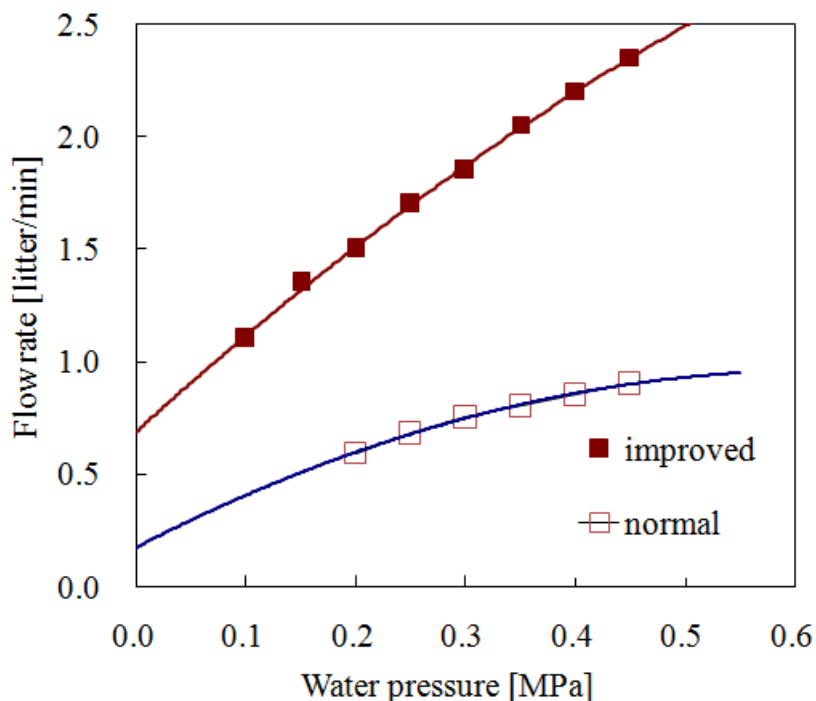
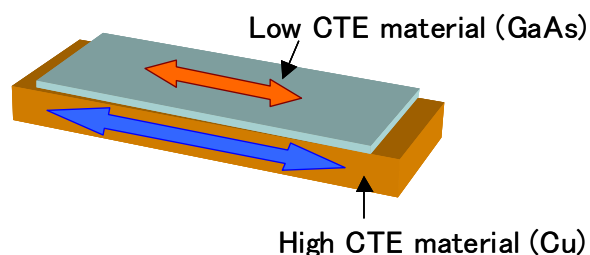


図 III 2. 3. 8 改良前後の噴流ヒートシンクの水圧－流量特性

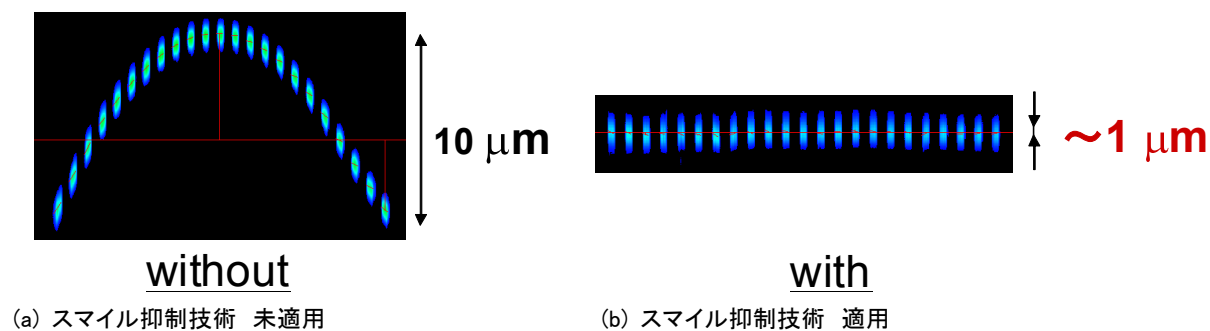
### 2. 3. 6. 2. 3 スマイル抑制

アレイ LD の出力ビームを平行化あるいは集光するためには素子にシリンドリカルレンズ等を装着する必要があるが、これを自動組立する際には「スマイル」が問題となる。スマイルとは素子の反りによるエミッタ配列の曲がりのことであり、このスマイルが大きいと設計通りのビーム成形ができない。スマイルは図 III 2. 3. 9 に示すように高温で半導体材料と銅ヒートシンク材料をハンダ付けした後、それぞれの熱膨張差に起因して反ることが原因である。特に信頼性の高い高融点ハンダを使って実装した場合にはスマイル値が  $10\ \mu\text{m}$  程度までになっていた (図 III 2. 3. 10(a))。

我々が既に開発していた” Thermal Expansion Controlled Assembly Technology”と呼ぶ方法を、今回の開発試作品に適用し、同手法は本開発素子にも有効であることを確認した。スマイルが  $1\ \mu\text{m}$  以下と優れた特性が得られることが明らかとなった (図 III 2. 3. 10(b)) <sup>(10)(13)</sup>。



図Ⅲ2.3.9 スマイルの原因



図Ⅲ2.3.10 開発試作素子におけるスマイル抑制実証

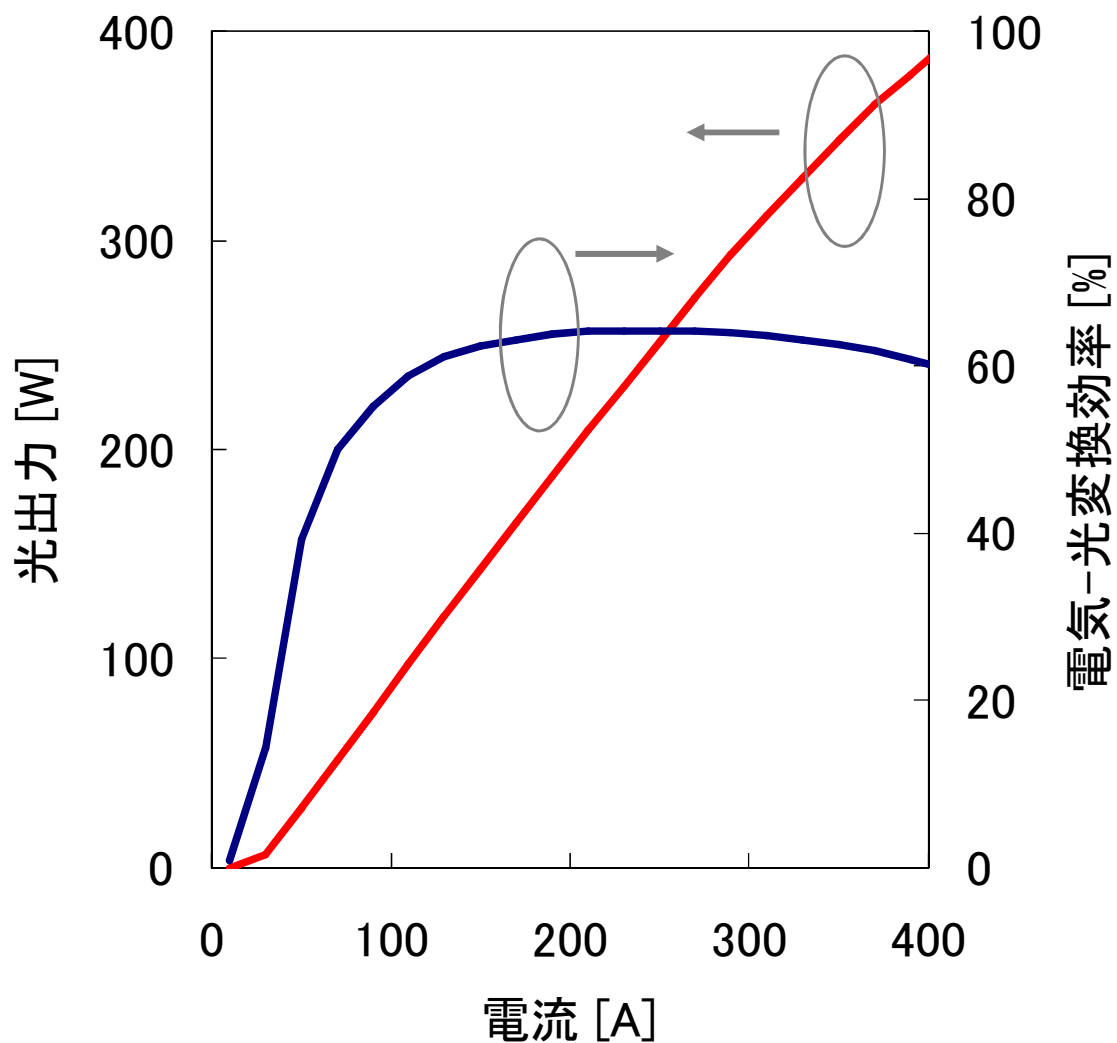
高輝度化するために配列変換し集光した際、スマイルは $1\mu\text{m}$ 以下にしないと集光できないことがシミュレーションにより明らかとなっており、自動組立てにはスマイル $1\mu\text{m}$ 以下に抑制する必要があることがわかった。

#### 2.3.6.2.4 応力緩和技術

アレイLDは、面積が大きいため応力が発生しやすい。応力は、偏光特性や信頼性に悪影響を与える。高い信頼性を実現するためには、応力緩和は重要であるため、最適な構造設計をおこなった。

#### 2.3.6.2.5 光出力特性および信頼性

試作した波長 $940\text{nm}$ のアレイLDの光出力特性を図Ⅲ2.3.11に示す。光出力 $300\text{W}$ 以上、最大電気-光変換効率 $60\%$ が得られた<sup>(6)(13)</sup>。連続駆動試験を実施したところ、全てのエミッタで劣化することなく、 $2000$ 時間にわたり安定に動作していることを確認した。

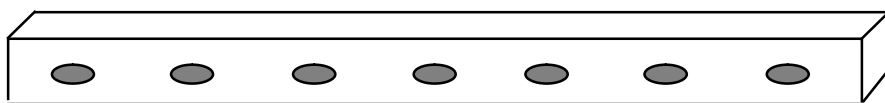


図Ⅲ2.3.11 アレイ LD の光出力、電気-光変換効率特性

#### 2.3.6.2.6 アレイファイバーモジュール<sup>(14)</sup>

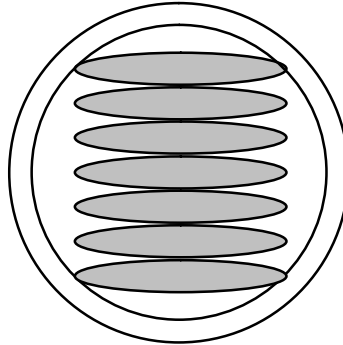
アレイ LD の形態としては、発光素子を一次元配列し一体化した LD バーと呼ばれる構成をとることが多い (図Ⅲ2.3.12)。バーの幅は 10mm とすることが多く、素子間隔は排熱やファイバー結合などの状況を踏まえて、0.4~1.0mm の間隔で配列されることが多い。

バーの出力は FAC (Fast Axis Collimator) と呼ばれるシリンダリカルレンズでファースト軸 (垂直方向) を平行光化 (コリメート) される。



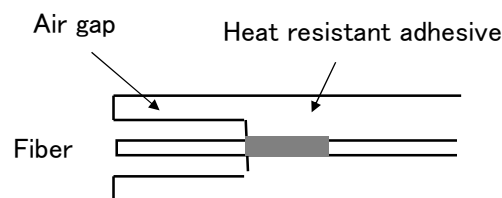
図Ⅲ2.3.12 アレイ LD における発光点

円形の光ファイバーに導光するためには、ファイバーコアの中に図Ⅲ2.3.13のような配列で各エミッタを集光する必要があり、ビームプロファイルを立体的に折り返すことで、配列を変換、かつ充填率を上げる方法を用いた。



図Ⅲ2.3.13 ファイバー入射で要求されるビーム形状

このような光線変換方式を用いて、アレイ LD をコア径  $105\ \mu\text{m}$   $\phi$ 、NA0.15 ファイバーに結合させた。アレイ LD のスマイルを  $1\ \mu\text{m}$  以下にすることにより、高結合効率でファイバー出力が得られていることが確認できる（図Ⅲ2.3.17）。さらに高出力化するための技術課題としては、ファイバーコネクタの調芯ずれを抑制することにあつた。LD からの出射光を高効率でファイバーに結合させても、残念ながら主にレンズの光学収差などの制約により、すべての光を完全にファイバー結合させることは出来ない。高出力化につれてこの漏れ光が無視できなくなってくる。



図Ⅲ2.3.14 エアギャップ SMA コネクタの模式図

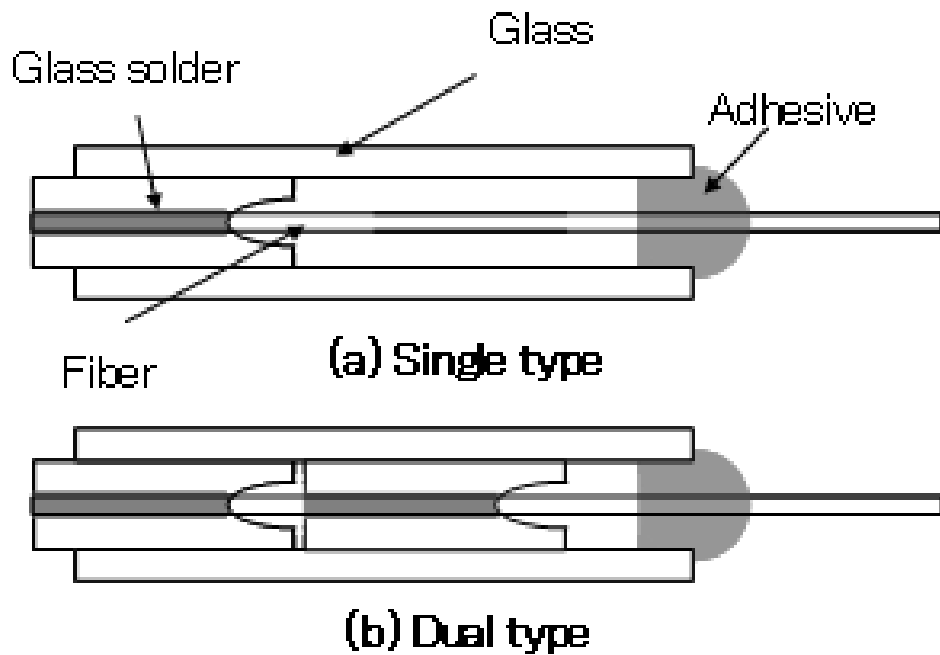
この実験には図Ⅲ2.3.14 に示す高出力対応となっている耐熱性接着剤を用いたエアギャップ構造の SMA コネクタを用いた。このコネクタはファイバーコアに入りきらなかった漏れ光が、直接接着剤に照射され、接着剤を焦がすことを防止するために、エアギャップ構造とすることで高光出力耐性を持たせる設計思想となっている。しかし実際に高出力光が導入された際、ファイバー NA を超える成分が、エアクラッドモードとなってファイバー中を伝搬し接着剤まで到達してし、発熱し変形したことで、ファイバーの調芯ずれを引き起こされたものと考えられる。この状態でファイバーモジュール化した場合、接着剤中に含まれる有機物が分解、飛散し、LD 端面やレンズなどに付着し、トラブルを引き起こしたりする可能性がある。

これらの問題を回避するために、我々は独自のコネクタを設計、試作した。模式図を図Ⅲ2.3.15 に示す。ガラス細管中に片側コーン状となったガラスフェルールを挿入し、そのキャピラリー中



にファイバーを通し、その後、ガラス溶剤を用いて固定する方法である。このような構成とすることで、ファイバー端面から離れたコーン部分でクラッドモードが傾斜的に除去され、外側にあるガラス細管を通じて除去される。

接着剤と比べ、耐熱性が高く、ガラス溶剤を使用することで光学耐性が向上し、またフェルルール素材も光学透過率の高い石英もしくはホウケイ酸ガラスを使用することにより、漏れ光によるファイバー周囲での温度上昇を抑制する効果がある。ガラスフェルルールが1段のものと2段のもの2種類を試作した。2段構成とすることで、ファイバー被覆へのクラッドモード伝搬はより抑えられる。今回のような数10Wレベルであればシングルタイプで十分である。



図Ⅲ2.3.15 新規開発コネクタの模式図

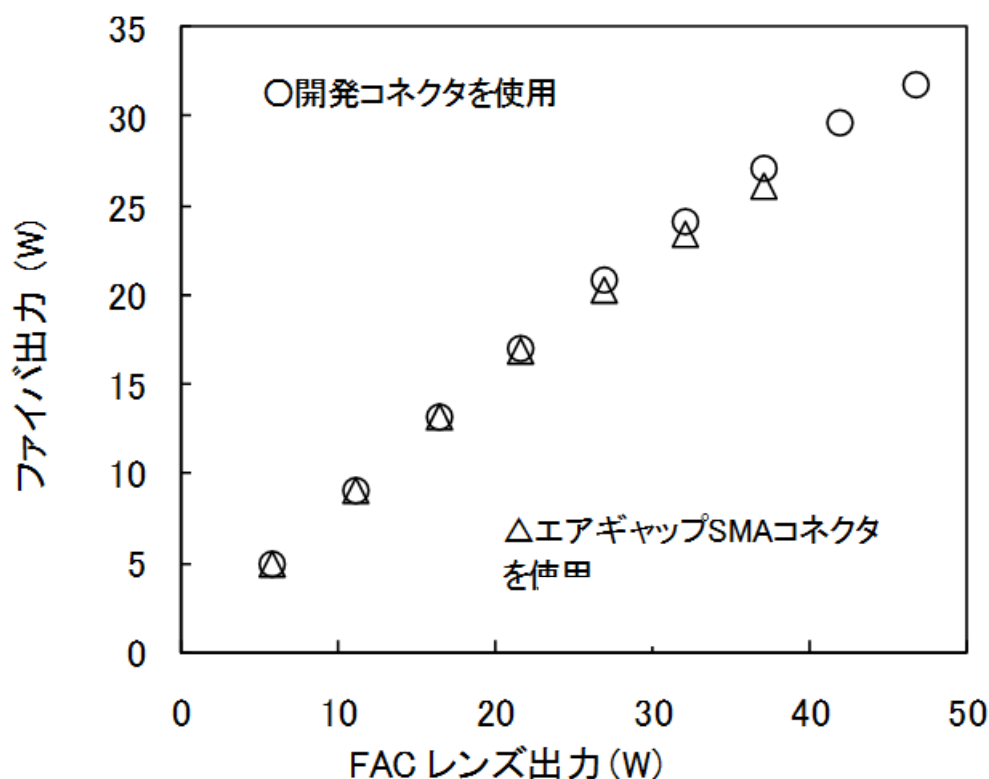
本フェルルールを用いて、試作コネクタとして組み立てた。外観としては図Ⅲ2.3.16のようになる。全長は約90mmであるが、その半分以上は緩衝用のゴムブーツとなっている。



図Ⅲ2.3.16 試作コネクタ外観

図Ⅲ2.3.17はストライプ幅 $100\mu\text{m}$ 、素子間隔 $1\text{mm}$ の7素子LDバーを2枚のマイクロステップミラーを使用して、コア径 $105\mu\text{m}\phi$ 、NA0.15ファイバーに結合させた結果である。図中の○は開発したSingle type(図Ⅲ2.3.15(a))のフェルルールを使用したコネクタ、△は従来の図Ⅲ2.3.14のエアギャップ構造コネクタの結果を示している。入射される光出力が大きくなると、開発した高出力コネクタの特性改善効果が大きいことがわかる。開発したコネクタではファイバー

端面までフェルールで固定されており、また漏れ光による発熱が抑え、調芯ずれを抑制できているものと推定される（図Ⅲ2.3.17）。また開発したコネクタでは目標としていた結合効率 60%以上を安定に得られることを確認できた。



図Ⅲ2.3.17 新規コネクタによる調芯ずれ改善

この技術を利用したモジュールを試作し、パッケージング状態においても中間目標値である結合効率 60%以上をクリアしたことを確認した。しかし目標値はクリア出来たものの、ファイバー調芯のトレランスが非常に狭いこと、バーを使っている関係上、大型となってしまう冷却効率が悪く、また非常に高い構造剛性が要求され実用的ではないという課題が残った。

同時期には、シングルエミッタを多数個束ねる手法が、105 $\mu$ m コアファイバーで高効率結合を得られ、かつ冷却効率・構造剛性などの面で優位であるなどの面から、数十ワットのファイバーレーザー励起モジュールを構築することが主流となった。本プロジェクトの他項目で取り組まれることなどを考慮して、本技術開発は平成 24 年度で完了した。

### 2.3.7 知的財産および成果の普及

知的財産権及び外部発表の件数をまとめたものを表Ⅲ 2.3.6 に示す。素子開発とファイバー結合技術開発を密接に連携して開発することにより、多くの知的財産を生み出し、またその成果を外部発表という形で社会に還元することができた。

特許出願については精力的に行い、レーザー半田付需要が伸びている中国への国際特許出願も行った。

外部発表については成果を評価してもらおう意味でも、率先して口頭発表に応募した。特に世界的な評価を受ける意味でも国際学会にも精力的に発表という形で参加した。また中間評価での指摘を受けて、成果を実用化に結びつける道筋を立てるべく、展示会での展示はもちろんのこと、開発した技術を入れ込んだ製品リリースも実現した。

論文については学会発表同様に、成果の妥当性を第三者に評価してもらおうことも踏まえて、査読付のものに優先的に取り組むようにした。

また開発成果の一部については、海外メディアから注目記事として取り上げられた。

表Ⅲ 2.3.6 知的財産および外部発表などの件数

項目	内訳、件数など
特許出願 17 件	国内出願 16 件（うち出願準備中 2 件）
	国際出願（中国） 1 件
外部発表 26 件	国内展示会 6 件、その他 2 件
	製品リリース 1 件
	国際学会 8 件（すべて口頭発表、うち招待講演 2 件）
	国内学会 9 件（すべて口頭発表、うち招待講演 3 件）
論文 13 件	海外誌 9 件（うち査読付 9 件）
	国内誌 4 件（うち査読付 1 件）
紹介記事 2 件	海外メディア 2 件

### 2.3.8 まとめ

LDの高出力化・高効率化、ファイバー結合効率の向上というテーマに対して、結晶・素子構造および冷却構造・光学設計を最適化することで、最終目標とした数値目標をクリアすることが出来た。また本プロジェクトで開発した技術について、実用化に結びつける検討として、試作品の環境試験を実施したり、既存光源の高性能化検討を行った。また開発した技術の一部はすでにリリースした製品に組み込まれ、アジア圏でのレーザー半田付け産業の発展に貢献しつつある。

さらに、ファイバーレーザーのさらなる高性能化、低コスト化のためには、開発したシングルエミッタ素子について、本プロジェクトでファイバーレーザー励起モジュール試作を担当している古河電気工業株式会社から、ファイバーレーザー励起モジュールとして仕上げた際に電気-光変換効率が高く、ファイバーレーザーの省エネルギー化が期待できるとの評価を得た<sup>(15)</sup>。このことから本開発により、CFRP レーザー切断加工技術の実用化と技術発展に貢献すると考えられる。

### 参考文献

- (1) NEDO 第33回研究評価委員会資料 3-2-3.
- (2) A. Demir et al., Proc. SPIE, 9348, 9348-20 (2015)
- (3) M. Zorn et al., Proc. SPIE, 9348, 9348-20 (2015)
- (4) J. H. Marsh et al., Semicond. Sci. Technol., vol. 8, pp. 1136-1155(1993).
- (5) T. Morita et al., IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, 19, 1502014 (2013).
- (6) T. Uchiyama et al., Abstract of the 4th Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS15-2.
- (7) H Naito et al., IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 27, pp. 1660-1662(2015).
- (8) V. Sturm et al, Proceedings of SPIE Vol. 3097, 717-726(1997).
- (9) J. Maeda et al., Abstract of the 1st Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS4-3.
- (10) N. Kageyama et al., Proc. SPIE, 8241, 82410I (2012).
- (11) N. Kageyama et al., J. of Quantum Electronics, 48, 991(2012).
- (12) H. Miyajima et al., OPTICS LETTERS 29 pp. 304-306(2004).
- (13) 影山進人 他、電子情報通信学会技術研究報告.R, Vol.114, pp45-49(2014).
- (14) 前田純也 他、レーザー加工学会誌 19, pp. 2-6(2012).
- (15) ALPROT、次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト平成26年度 第26回プロジェクト技術開発会議議事録、平成26年11月18日

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.4 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」

##### 「(2) CFRP 加工技術の開発」

##### 「①CFRP 高速切断技術の開発」

(アマダミヤチ、新日本工機 実施)

#### (1)2 波長重畳三次元リモート加工システムの開発 (ALPROT : 株式会社アマダミヤチ)

平成 22 年度～中間評価の期間においては、高品位・高速加工を実現する複合レーザー照射によるリモート加工可能な複合レーザー加工ヘッド (2 次元スキャナー光学系) の設計を行い、基本波+第三高調波、ならびに、基本波+第二高調波を複合させる高速高出力型スキャナー装置を製作した。基本波+第三高調波については、冷却構造を最適化した。

中間評価～平成 26 年度の期間においては、上記の結果を踏まえ、段差や傾斜面、湾曲面を持ったワークへのスムーズな加工を目指して 3 次元リモート加工ヘッドの設計ならびに製作を行った。

##### 2.4(1).1 事業の背景と目的

CFRP は高強度、軽量で自動車産業や航空産業など、さまざまな分野で利用されてきている。従来、CFRP の加工にはダイヤモンドコーティングされた超硬工具による機械加工やウォータージェット加工が使用されてきた。しかし、加工速度は十分とは言えず、工具の消耗が激しいという問題がある。

CFRP の加工において、レーザー加工には多くの特有の利点がある。自動化がしやすい、加工時にワークに加わる加工力が少ないため、層間剥離の防止となる、高速である、研磨剤入りの液体が不要などである。これまでも、CFRP 加工の代替技術としてレーザー加工はしばしば提案されてきたが、樹脂に生じる熱影響層 (HAZ : Heat Affected Zone) を抑えつつ、高速で加工することが課題である。

本研究では、高品位・高速の加工を実現する IR (赤外) と UV (紫外) の 2 波長重畳レーザー照射による 3 次元リモート加工ヘッド (4 軸スキャナー光学系) の設計ならびに製作を行った。高速レーザー加工にはレーザービームを高速かつ高精度に繰り返しスキャンできることが必要である。このため、本研究ではガルバノスキャナーを採用した。また、CFRP の高速切断には kW 級の高出力 IR レーザーも必要である。そのため、スキャナーヘッドは kW 級の出力に耐えられるものでなければならない。本研究では加工ヘッドの冷却構造の最適化を行った。さらに、高品位な加工には UV レーザーが望ましい。UV レーザーは短波長であるため、非熱的な加工が支配的となるためである。

自動車や航空機で使用される CFRP 材は平板だけではなく、段差や傾斜面、湾曲面を持ったワークである。したがって、段差や傾斜面、湾曲面に対してもスムーズに加工できることが、高品位で高速の CFRP レーザー加工の実用化に極めて重要である。そのためにはレーザービームの焦点位置を可変できる 3 次元スキャナーが不可欠である。本研究では、IR と UV の 2 波長のレーザーを重畳しつつ、3 次元リモート加工を実現するために、4 軸スキャナー光学系の最適化を行った。

さらに、傾斜面や曲面を持つ自動車部品などのレーザー加工を容易にするため、3 次元 CAD (Computer-Aided Design、コンピューター支援設計システム) で作成されたレーザー加工対象の

データファイルを、レーザービーム駆動命令が書き込まれたスキャナー・データファイルに変換するソフトウェアを開発し、傾斜面や曲面の3次元レーザー加工の最適化を図った。

また、加工時の粉塵や煙をスムーズに除去し加工品質のばらつきと低下を抑制するため、広範囲リモート加工用集塵システムを構築した。

#### 2.4(1).2 研究開発目標と根拠

表Ⅲ-2.4(1).1 研究開発目標と根拠

研究項目	評価目標		設定根拠
	評価項目	最終目標	
3次元スキャニング技術の開発	スキャニングエリア	500×500mm	自動車や航空機で使用される段差や傾斜面、湾曲面を持った中型・小型部材の加工をターゲットとして設定。
	Z軸方向補正量	90mm以上	

#### 2.4(1).3 研究開発目標と達成状況

本研究で開発した2波長重畳3次元リモート加工システムに2kWピークQCWシングルモードファイバーレーザー装置を接続して3次元加工実験を推進し、レーザービームを制御して、500mm×500mmの一山型曲面CFRPパネル（山の高さ60mm）の湾曲面に渦巻き状の矩形切断加工、放射状矩形切断加工、ALPROTロゴのような複雑な形状の切断加工を実現した。また、90mmの高低差のあるワークへの切断加工も実施した。したがって、目標は達成できており、段差や傾斜面、湾曲面を持った中型・小型部材のレーザー加工に展開できる。

IRとUVの2波長重畳を行うことにより、IRまたはUVを単独で照射するよりも速くCFRPを切断できる。また、本研究開発機ではIRレーザーとUVレーザーで照射位置が一致しているため、用途、材料に応じて使用するレーザーを柔軟に選択することが可能である。例えば、広範囲を高速で加工する際には二波長重畳または、IRレーザーで加工を行い、より高品位が求められる部分をUVレーザーのみで加工するといったことができる。

3次元CADデータインポート機能を搭載したことにより、市販の3次元CADの強力な作図機能を利用して、湾曲面、傾斜面等に複雑な形状の切り抜き切断加工が実現できる。また、3次元CADソフトは近年、シミュレーションソフトとの連携が発展してきており、構造等の加工前検証をシミュレーションソフトで行い、その際に使用したデータを基に、本研究開発機で容易に実加工を行うことができる。したがって、本研究で開発したシステムは、設計、検証、製造の連携が取りやすく、少量多品種対応、リードタイム短縮を可能とする加工システムである。

表Ⅲ-2.4(1).2 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標		達成度	課題と解決方針 ※未達の場合のみ
	評価項目	最終目標		
3次元スキャニング技術の開発	スキャニング グエリア Z軸方向補 正量	500×500mm  90mm以上	達成	

## 2.4(1).4 成果の詳細

### 2.4(1).4.1 開発装置

本研究で開発した2波長重畳3次元リモート加工システムを図Ⅲ-2.4(1).1に示す。



図Ⅲ-2.4(1).1 2波長重畳3次元リモート加工システム

特長は以下のとおりである。

- IRとUVのレーザー光を重畳し、高効率のCFRP切断加工が可能

- 広域スキャナー

広域スキャナーにより、500×500mmエリアの一括加工が可能

更にX-Yステージとの組み合わせで□500mm以上の大型ワークの加工も可能

- 3次元切断加工機能

ワークの曲面、傾斜面に対し、スキャナーの3次元制御で90mmの高低差に対する切断加工が可能

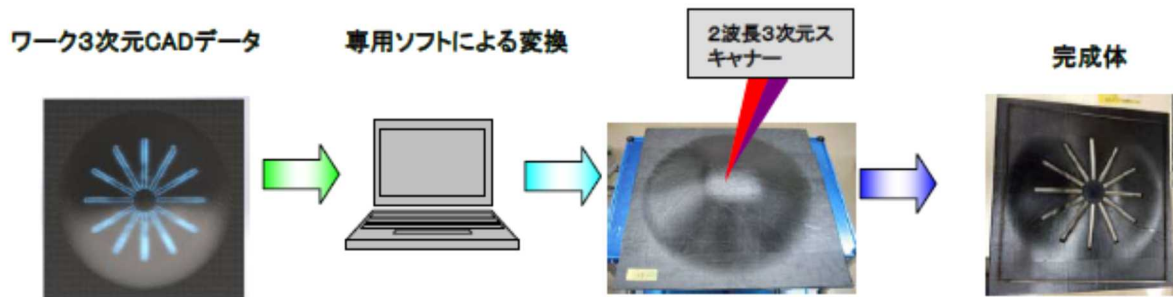
- 観察カメラ機能

スキャナーを介して加工ポイントのモニターが可能

- 3次元CADデータインポート機能

3次元CADで作成された最終形状のワークデータをインポートし、切断加工データを容易に作成可能(図Ⅲ-2.4(1).2)

少量多品種対応、リードタイム短縮が可能



図Ⅲ-2.4(1).2 3次元CADデータインポート機能



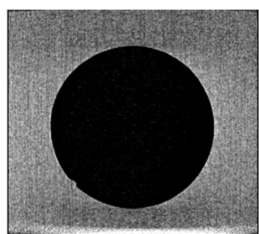
#### 2.4(1).4.2 2波長重畳レーザー加工の効果

CFRP 平板に円形穴あけ加工を行った場合の結果の一例を表Ⅲ-2.4(1).3 に示す。Pitch(0/90)では IR レーザーのみでは 600 回スキャンしても穴あけ加工が完了できなかったが、UV レーザーのみでは 360 回スキャンすると穴あけ加工ができた。さらに、IR レーザーと UV レーザーを重畳して照射することにより、わずか 126 回のスキャンで穴あけ加工ができた。PAN(0/90)では IR レーザーのみでは 99 回スキャンすると穴あけ加工ができたが、UV レーザーのみでは 1200 回スキャンしても穴あけ加工が完了できなかった。IR レーザーと UV レーザーを重畳して照射することにより、84 回スキャンすると穴あけ加工ができた。このように IR レーザーまたは UV レーザーの単独照射でなく 2 波長重畳することにより、より少ないスキャン回数で（より高速に）穴あけ加工ができる。

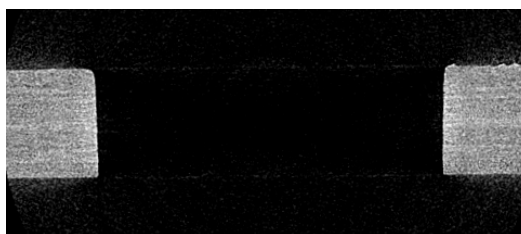
表Ⅲ-2.4(1).3 CFRP 平板への円形穴あけ加工の結果（一例）

試料	照射レーザー	スキャン回数	結果
Pitch(0/90)	IR 175W	600	切断不可
Pitch(0/90)	UV 35W	360	切断可
Pitch(0/90)	IR 175W + UV 30W	126	切断可
PAN(0/90)	IR 350W	99	切断可
PAN(0/90)	UV 36W	1200	切断不可
PAN(0/90)	IR 350W + UV 36W	84	切断可

図Ⅲ-2.4(1).3 に穴あけ加工した CFRP サンプルの X 線 CT スキャナー画像の一例を示す。UV レーザーのみで加工した場合に、熱影響層が非常に小さく、高品位な加工が実現できている。



(a) 正面から見た断面

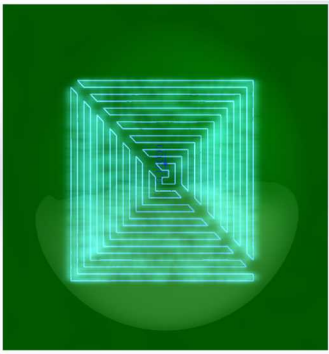


(b) 横から見た断面

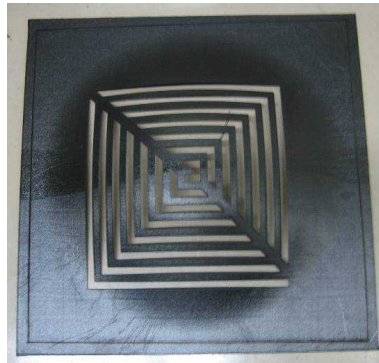
図Ⅲ-2.4(1).3 穴あけ加工した CFRP サンプルの X 線 CT スキャナー画像の一例

#### 2.4(1).4.3 3次元リモート加工性能の確認

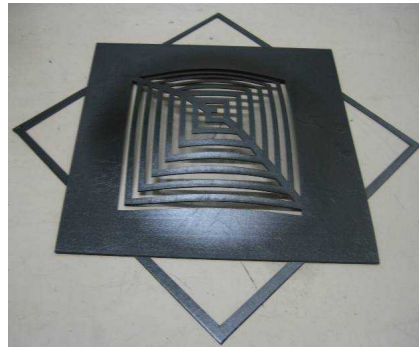
本研究で開発した 2 波長重畳 3 次元スキャナーを使用して、500mm×500mm の一山型 CFRP 曲面パネル（山の高さ 60mm）に対し、切断加工を行った。IR レーザーとして、本プロジェクトで開発された 2kW ピーク QCW シングルモードファイバーレーザー装置を接続した。市販の 3 次元 CAD で切断したい図形を描画し、本研究で開発した専用変換ソフトを使用することにより、レーザービームを駆動する命令が書き込まれたスキャナー・データファイルに変換できる。変換後のファイルをスキャナーコントローラーに読み込ませることで切断加工ができる。



(a) 3次元 CAD データ



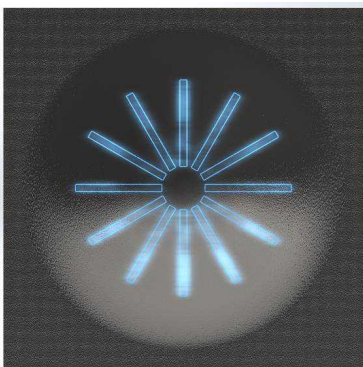
(b) 完成品 (上方から)



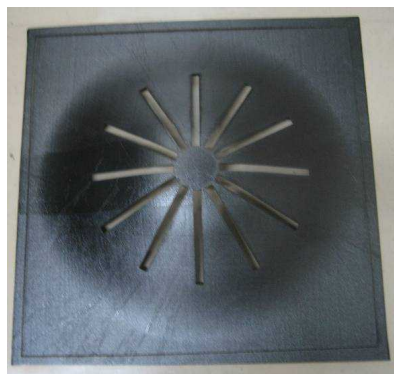
(c) 完成品 (斜め上方から、  
外周切断加工部をずらす)

#### 図Ⅲ-2.4(1).4 渦巻き状矩形切断加工

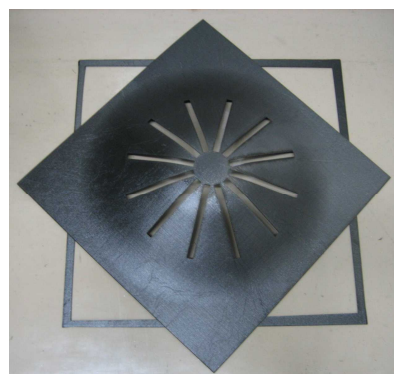
一山型曲面パネルの湾曲面上を矩形で渦巻き状に切断加工を行った (図Ⅲ-2.4(1).4)。湾曲面上の位置により、曲面の曲率、高さは変化するが、それに対応したビーム制御が実現できた。外周も本研究開発機により切断した。



(a) 3次元 CAD データ



(b) 完成品 (上方から)



(c) 完成品 (外周切断加工部をずらす)

#### 図Ⅲ-2.4(1).5 放射状矩形切断加工

一山型曲面パネルの湾曲面上に、中心 (山の頂点) から放射状に矩形を切り抜いた (図Ⅲ-2.4(1).5)。各方向で湾曲面に沿った矩形切断加工が実現できている。外周も本研究開発機により切断した。



(a) 3次元 CAD データ



(b) 完成品 (斜め上方から)



(c) 完成品 (上方から)

#### 図Ⅲ-2.4(1).6 ALPROT ロゴ切り抜き加工

ALPROT のロゴとロゴマークを一山型曲面パネルの湾曲面上に切り抜いた（図Ⅲ-2.4(1).6）。  
ロゴのような複雑な形状であっても湾曲面上に高速、高品位に切り抜くことができる。

#### 2.4(1).5 知的財産、及び成果の普及

Ⅲ-2-5 報告にまとめて記載。

#### (2) 1m 級三次元加工機システムの開発（ALPROT：新日本工機株式会社）

Ⅲ-2-4-(8)（事後）～（21）（事後）を参照

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.4 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」

##### 「(2) CFRP 加工技術の開発」

##### 「①CFRP 高速切断技術の開発」

(アマダミヤチ、新日本工機実施)

#### (1)2 波長重畳三次元リモート加工システムの開発 (ALPROT：株式会社アマダミヤチ)

Ⅲ-2-4-(1) (事後) ～ (7) (事後) ページを参照

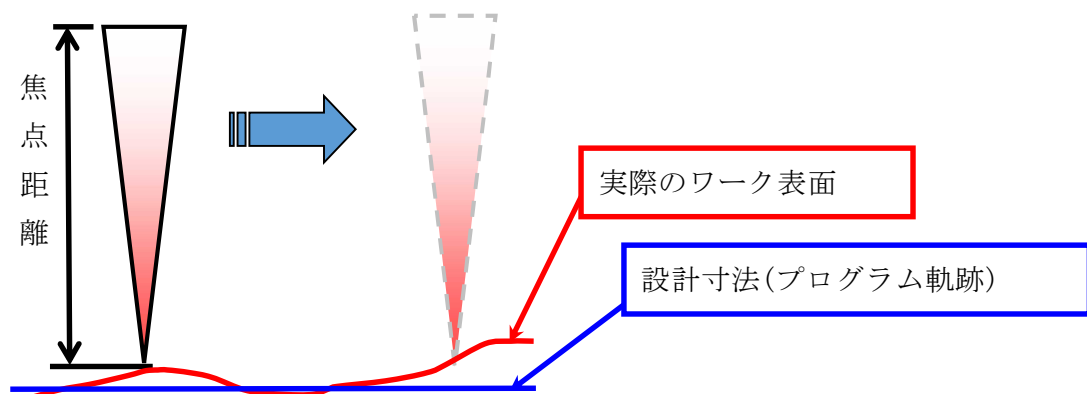
#### (2) 1m 級三次元加工機システムの開発 (ALPROT：新日本工機株式会社)

##### 2.4(2).1 事業の背景・目的

本開発は CFRP の立体ワークを高品位高速に安定加工する事を目的としており、安定加工を実現する為にはワーク表面に対してレーザービームの焦点位置を一定に保つ必要がある。特に 1m 級の大型立体ワークでは設計寸法と実際の製品寸法とで数 mm の差が発生することも考えられる。焦点位置とワーク表面に許容範囲と超える差が発生すると切断品質の低下あるいは切断不良となる。

ワークが金属のように導電性の良い材料であれば従来の金属レーザー加工機用のセンサーが適応可能であるが、CFRP は導電性が微弱な材料であるため、従来のセンサーが使用できない。CFRP に対応した高速倅い制御システムを開発し、三次元加工機システムを開発することで、大型立体ワークに対して高品位高速安定加工を実現することが可能である。図Ⅲ-2.4(2).1 に倅い制御概要を示す。

※倅い制御とは設計寸法と実際のワーク表面位置との差を補正し、一定の距離を保つ制御である。



図Ⅲ-2.4(2).1 倅い制御概要

## 2.4(2).2 研究開発目標と根拠

後期基本計画には

「可動部の軽量化と高剛性化ならびに高速倣い技術の開発を行う」と記載されている。  
高速の加工制御をおこなうために可動部の軽量化と高速倣い技術が不可欠である。

表Ⅲ-2.4(2).1 研究開発目標と根拠

研究項目	最終目標	設定根拠
1m 級三次元加工機 システムの開発	可動部の軽量化と高剛性化 高速倣い技術の開発	高速の加工制御を行うために不 可欠である

## 2.4(2).3 研究開発目標と達成状況

「2.4(2).4 成果の詳細」で詳述するように可動部の軽量化と高剛性化、高速倣い技術の開発を達成し、高速の加工制御装置を開発できた。

表Ⅲ-2.4(2).2 研究開発目標と達成状況

研究項目	最終目標	達成度
1m 級三次元加工機 システムの開発	可動部の軽量化と高剛性化 高速倣い技術の開発	○ 達成

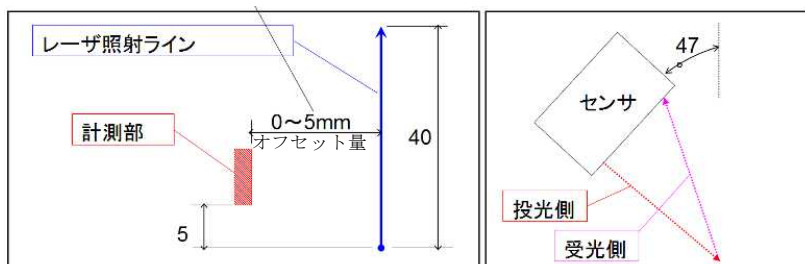
## 2.4(2).4 成果の詳細

### 2.4(2).4.1 倣いセンサーの調査

金属のレーザー切断で一般的に倣いセンサーとして採用されているのが静電容量タイプのギャップセンサーである。CFRP は金属と比べ導電性が悪く、そのままでは倣いセンサーに適用できないため、他のタイプのセンサーについても調査した。

### 2.4(2).4.2 光学式センサーの評価

図Ⅲ-2.4(2).2 にセンサーの計測部とレーザー照射の位置関係及び、センサーの取付け状態、図Ⅲ-2.4(2).3 に実験装置外観を示す。

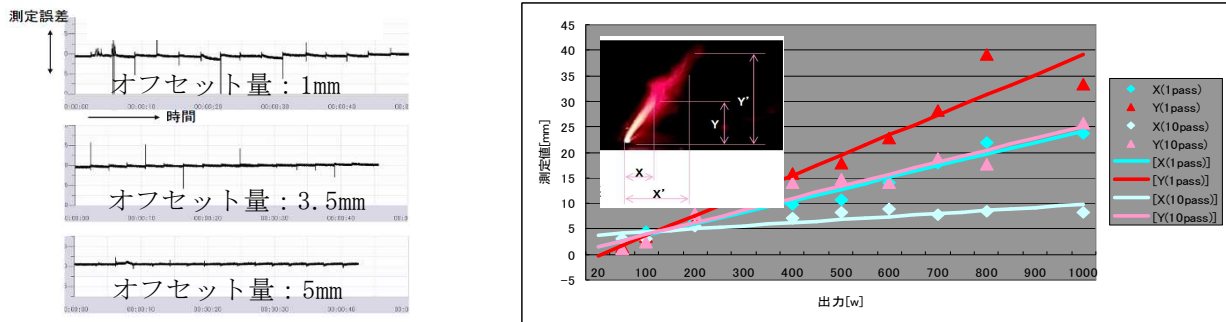


図Ⅲ-2.4(2).2 評価実験模式図

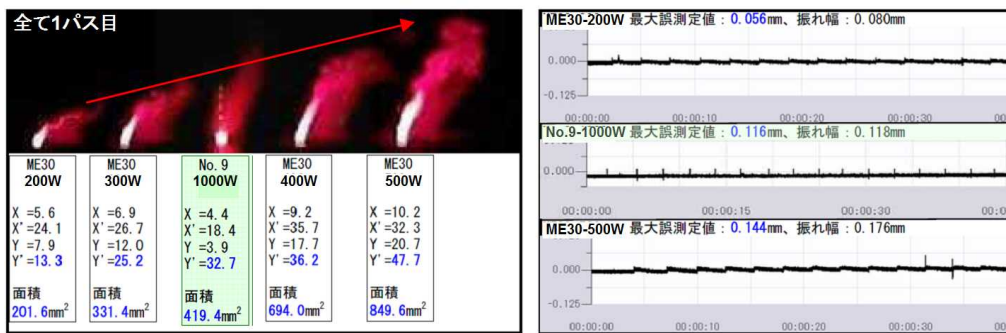


図Ⅲ-2.4(2).3 評価実験装置  
外観

レーザー出力、センサー計測部のレーザー照射位置からのオフセット量 (図Ⅲ-2.4(2).2 参照) を変化させて、センサーの出力値、プルームの大きさを調査した。図Ⅲ-2.4(2).4 にオフセット量と測定誤差を示す。オフセット量を大きくすれば測定誤差が小さくなることが分かるが、オフセット量を 5mm としても測定誤差が 0.1mm 以上となっていることが分かる。図Ⅲ-2.4(2).5 に出力とパス数、プルームサイズの関係を示す。レーザー出力が大きく照射パス数は少ない方がプルームの大きいことが分かる。図Ⅲ-2.4(2).6 にプルームの大きさと測定誤差を示す。プルームが大きくなると測定誤差が大きくなることが分かる。

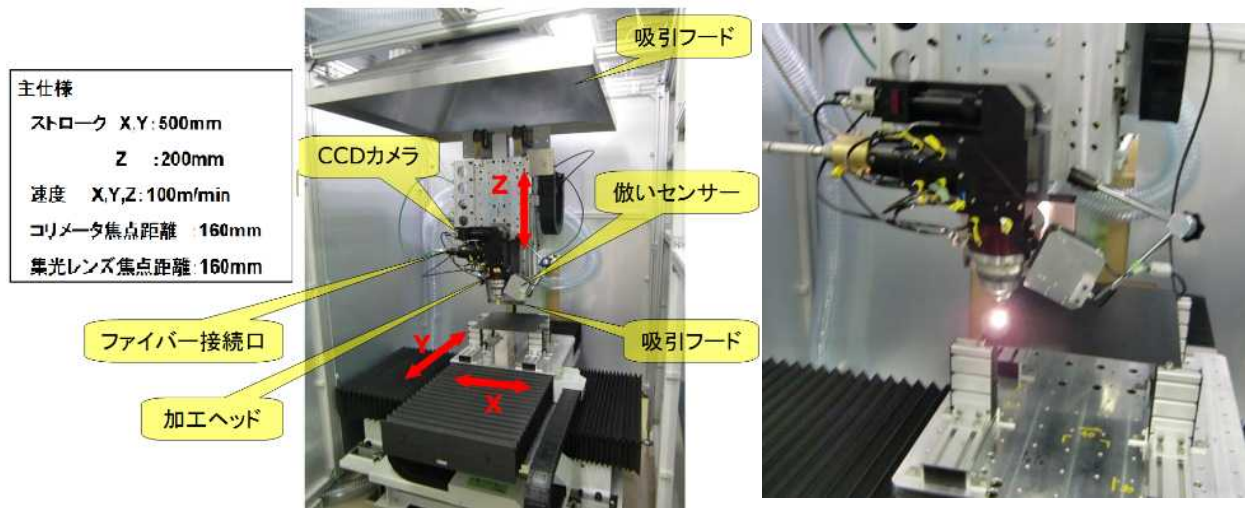


図Ⅲ-2.4(2).4 オフセット量と測定誤差 図Ⅲ-2.4(2).5 レーザー出力、照射パス数とプルーム



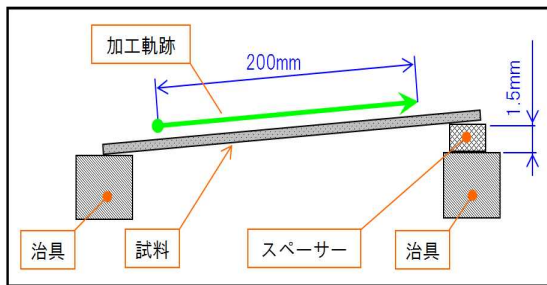
図Ⅲ-2.4(2).6 プルームの大きさと測定誤差

図Ⅲ-2.4(2).7 に平成 23 年度製作し産業技術総合研究所(つくば)に設置したレーザー加工トーチ型の試験装置及び主仕様、図Ⅲ-2.4(2).8 に光学式倅いセンサーの倅い性能評価試験情景を示す。

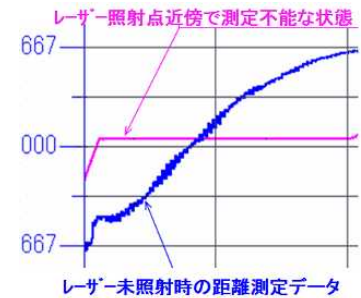
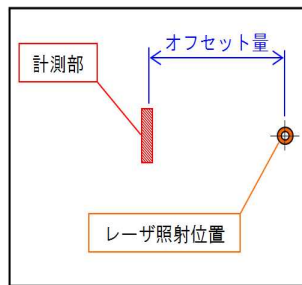


図Ⅲ-2.4(2).7 トーチ型評価試験装置外観 図Ⅲ-2.4(2).8 センサーの加工評価試験

図Ⅲ-2.4(2).9に評価実験模式図を示す。CFRP 試料を傾けてセットし、レーザーを照射しながら傾斜を上る方向にワークを動かしてセンサーにて距離測定をする。図Ⅲ-2.4(2).10にセンサー出力値を示す。センサーが正常に動作する場合は、青色ラインの様になり、ブルーム等のノイズで測定不能となればピンク色ラインとなる。



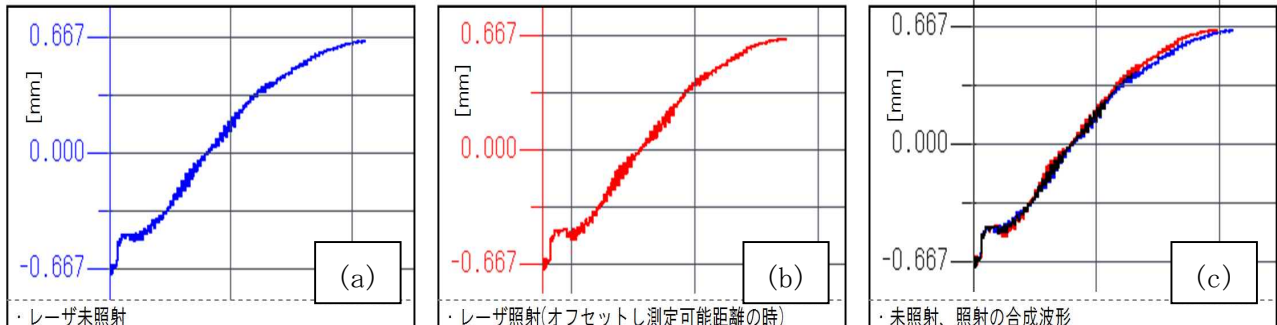
図Ⅲ-2.4(2).9 評価実験模式図



図Ⅲ-2.4(2).10 センサー出力値

レーザー照射部近傍では距離測定不能となるが、レーザー照射部からのオフセット量を十分取ることで正常に距離測定することができた。図Ⅲ-2.4(2).11(a)にレーザー未照射時の出力値、(b)にオフセット量を十分取った時のレーザー照射時の出力値、(c)にレーザー照射、未照射の出力値を重ね合わせたものを示す。レーザー照射、未照射の出力値がほぼ一致しており、レーザー照射時でも測定可能ということが分かる。

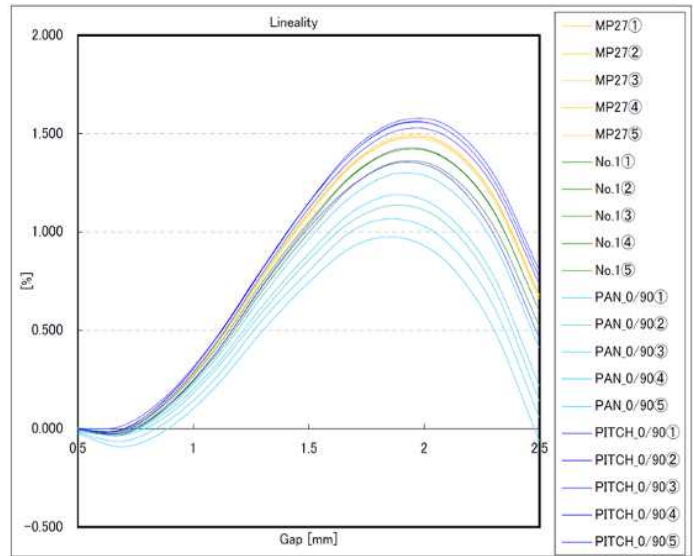
しかしオフセット量を十分に取ると複雑な形状に対応できなくなるため、他の方式のセンサーも検討する。



図Ⅲ-2.4(2).11 レーザー照射、未照射時センサー出力値比較

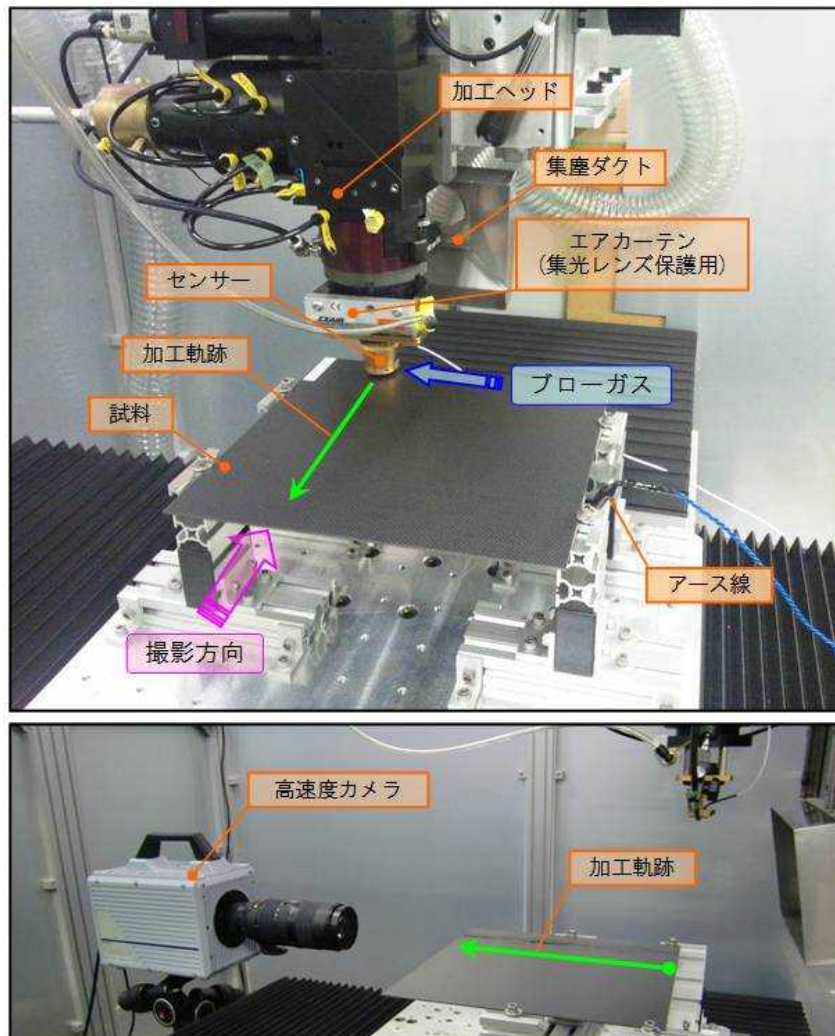
#### 2.4(2).4.3 高感度静電容量式センサーの評価

高感度静電容量式センサーにて様々な CFRP 材について距離測定が可能かどうかの検証試験を実施した。図Ⅲ-2.4(2).12 に示すように様々な材料に対してギャップ測定誤差が 1.5%程度以下となり、倣いセンサーとして使用可能であることが分かった。



図Ⅲ-2.4(2).12 様々なCFRP材料に対するギャップ測定誤差

図Ⅲ-2.4(2).13に示すようにワークと高速度カメラをセットし、レーザー照射中のプルームの挙動とセンサー出力値を測定した。

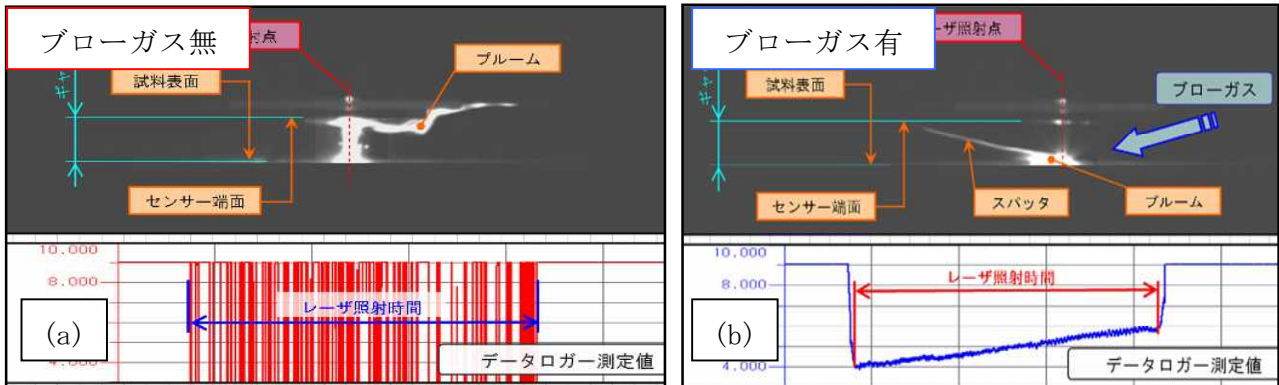


図Ⅲ-2.4(2).13 センサー評価実験



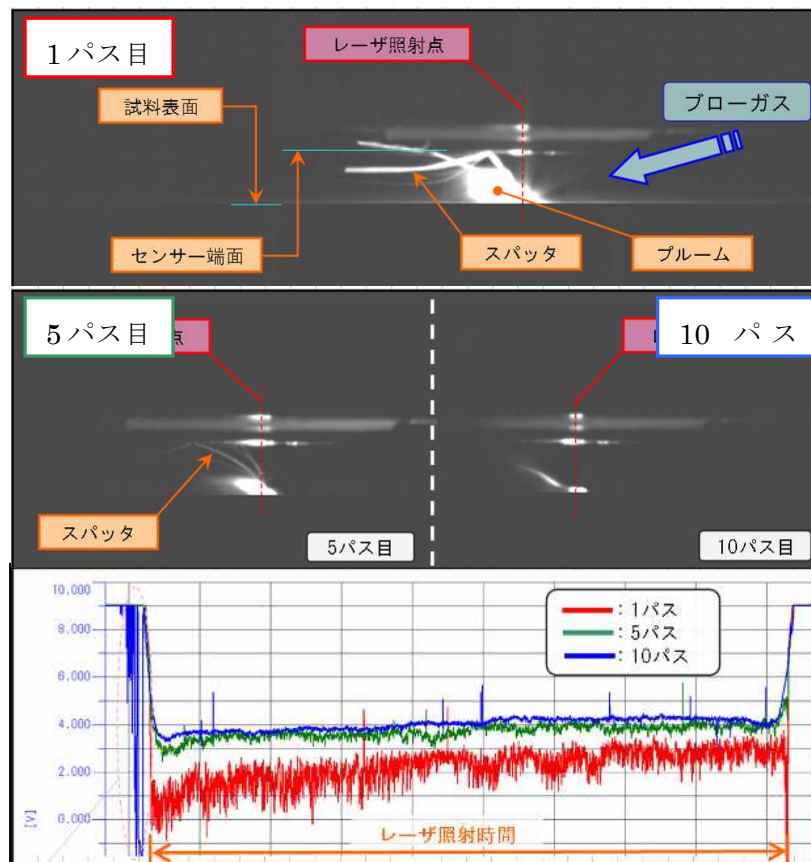
図Ⅲ-2.4(2).14(a)にブローガス無しの状態での高速度カメラ映像及び、センサー出力値を示す。プルームがセンサー端面に接触しセンサーの出力が測定不可の状態となっている。

図Ⅲ-2.4(2).14(b)にブローガスを当てプルームを吹き飛ばした状態の高速度カメラ映像及び、センサー出力値を示す。プルームを飛ばすことにより安定して測定できることが分かる。



図Ⅲ-2.4(2).14 センサー出力に対するブローガスの効果

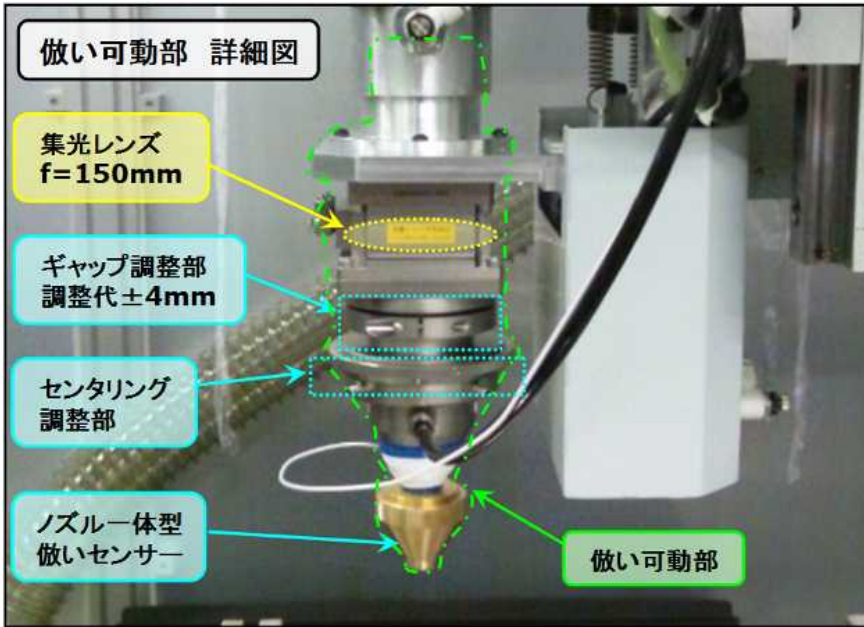
図Ⅲ-2.4(2).15に照射パス数ごとの高速度カメラ映像及び、センサー出力値を示す。レーザー照射パス数が増えるに従いプルームが小さくなり、センサー出力値の振れ幅が小さくなり安定する。



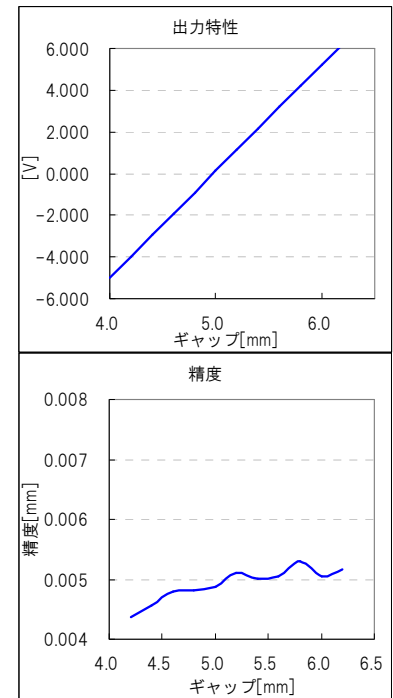
図Ⅲ-2.4(2).15 照射パス数によるプルームの影響

以上の結果より、本タイプのセンサーを採用しノズル型体のセンサーを製作し、仮いシステムとして評価実験を進めることにした。

図Ⅲ-2.4(2).16 に平成 24 年度に製作したノズル型倣いセンサーを組み込んだ加工ヘッドの外観を示す。図Ⅲ-2.4(2).17 にノズル型倣いセンサーの出力特性及び精度を示す。ギャップに対して良好な出力特性となり、静的精度も測定範囲全域で良好な結果となった。

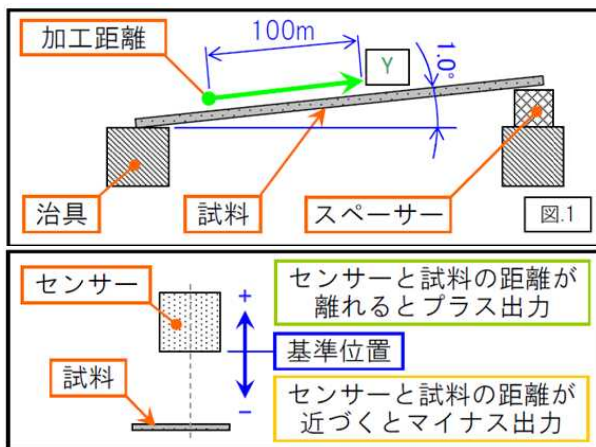


図Ⅲ-2.4(2).16 倣い加工ヘッド外観

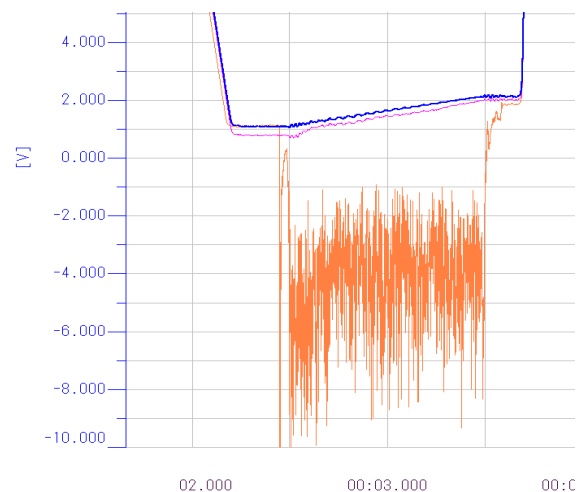


図Ⅲ-2.4(2).17 倣いセンサー出力特性

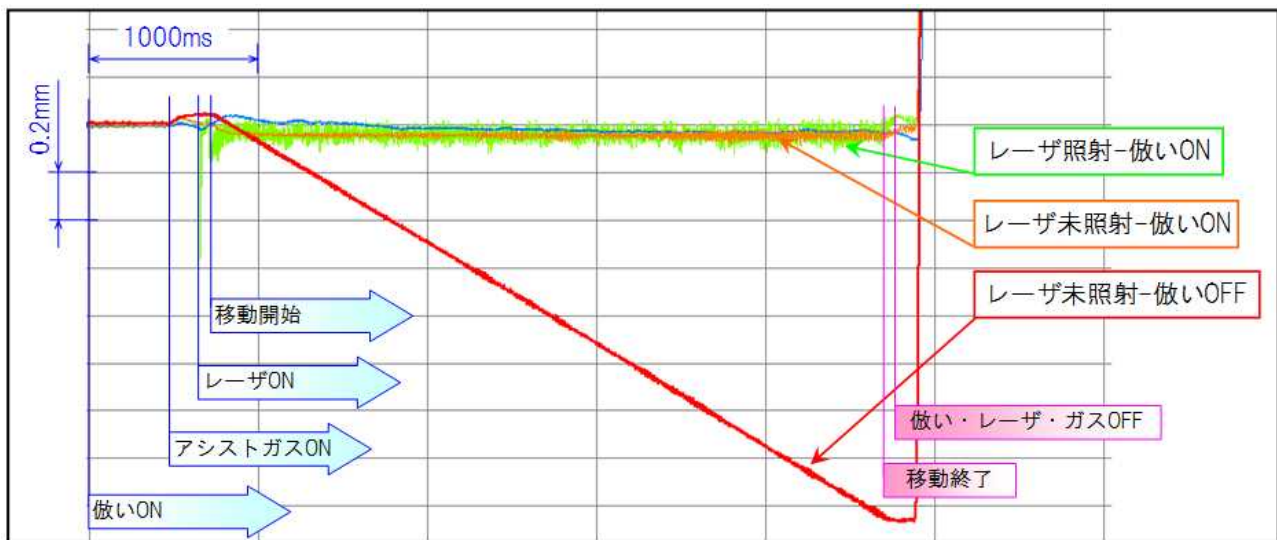
図Ⅲ-2.4(2).18 に示すように CFRP 試料を傾けてセットし、レーザーを照射しながら傾斜を上る方向にワークを動かして本倣いシステムの性能評価試験を実施した。図Ⅲ-2.4(2).19 に 1 パス貫通切断時の結果を示す。貫通切断におけるセンサー出力値は加工中の変動も少なく、傾斜した試料を切断できたことから、安定して倣い機能が有効に作動していると言える。図Ⅲ-2.4(2).20 に 1 パス非貫通切断時のセンサー出力値を示す。青色ラインがレーザー未照射時、オレンジ色ラインがレーザー照射時の値である。1 パスでの非貫通のレーザー照射時はブルーム等の影響により誤差過大となった。



図Ⅲ-2.4(2).18 評価実験模式図



図Ⅲ-2.4(2).20 非貫通切断時のセンサー出力値

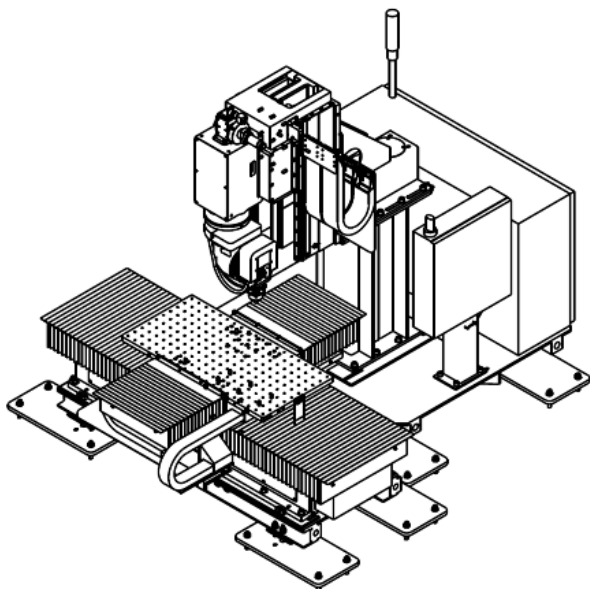


図Ⅲ-2.4(2).19 貫通切断時のセンサー出力値

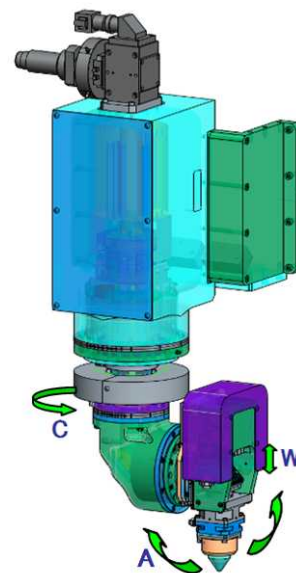
以上の結果より、CFRP用倣いセンサーとして加工点近傍の距離が検出でき、1パス貫通切断加工時にプルームの影響を受けにくい高感度静電容量式センサーを採用する。

#### 2.4(2).4.4 1m級三次元加工機システム

平成24年度まで実施したモニタ方式と距離測定センサーを決定するための調査、及び基礎評価実験結果に基づいて、高感度な静電容量センサーを三次元5軸加工ヘッドに組み込んだ1m級三次元加工機システムの開発を平成25年度より開始した。図Ⅲ-2.4(2).21に加工機システムの外観図、図Ⅲ-2.4(2).22に倣いセンサーを組み込んだ5軸加工ヘッドの外観図を示す。5軸加工ヘッドの先端にはA軸、C軸等の旋回軸が組み込まれ、三次元加工を容易に行うことができる。



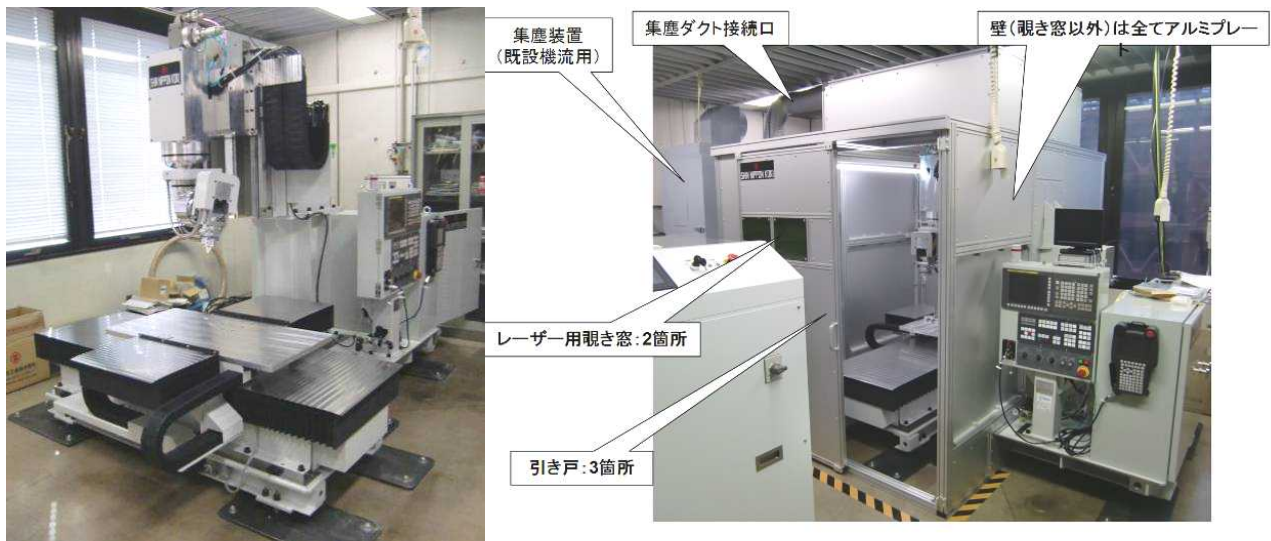
図Ⅲ-2.4(2).21 加工機システム外観図



図Ⅲ-2.4(2).22 5軸加工ヘッド外観図

平成25年度末に三次元加工機本体を産業技術総合研究所(つくば)に設置した。加工中は粉塵と煙および異臭が発生するので、安全キャビネットを設置した。機械全体を覆い、集塵機により内部を吸引して粉塵や煙、臭いを取り、きれいな空気を室内に排出し安全な環境を維持している。

図Ⅲ-2.4(2).23 に加工機本体の外観、図Ⅲ-2.4(2).24 に安全キャビネット外観を示す。



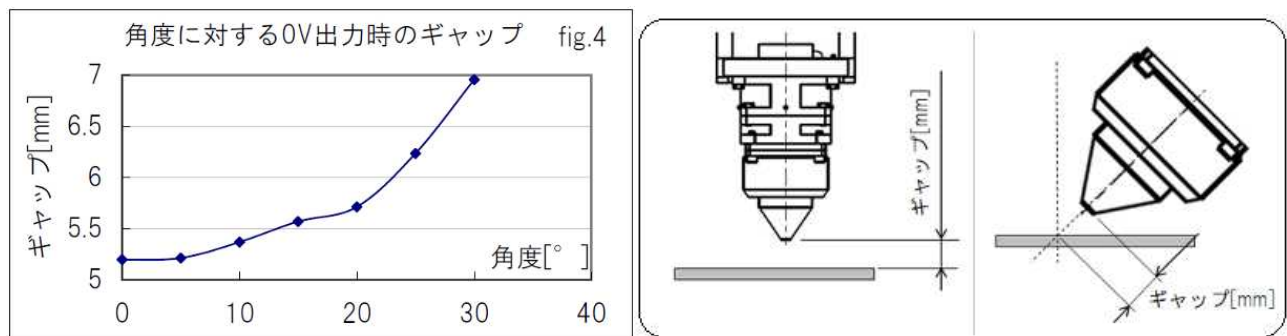
図Ⅲ-2.4(2).23 産総研に設置した加工機本体外観 図Ⅲ-2.4(2).24 安全キャビネット外観

本5軸加工ヘッドの基本的な削り性能の評価実験を実施した。評価項目は以下の通りである。

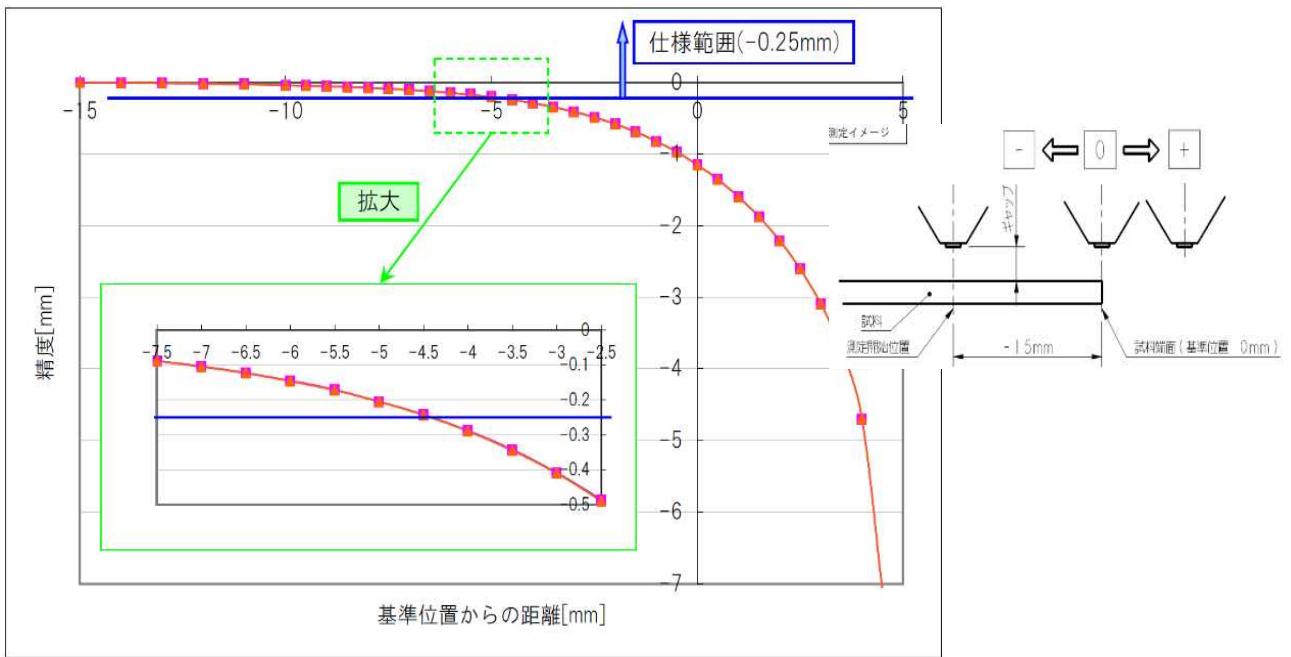
- ・ ヘッドの傾斜に対するギャップ誤差(図Ⅲ-2.4(2).25)
- ・ ワーク端面近傍でのギャップ変動(図Ⅲ-2.4(2).26)
- ・ 各種材料に対するセンサーの出力特性(図Ⅲ-2.4(2).27)
- ・ 削りの応答性(図Ⅲ-2.4(2).28)

図Ⅲ-2.4(2).25 に示すようにヘッドの傾斜が10度以上になると垂直時と比べてギャップが広くなり、切断に支障が出る可能性がある。ガード電極の形状を最適化すればギャップの変動は小さくなると思われる。

図Ⅲ-2.4(2).26 のワーク端面近傍でのギャップ変動データより、ワーク端から約5mm程度以下のエリアではギャップが小さくなり、切断に支障が出る可能性があることが分かる。

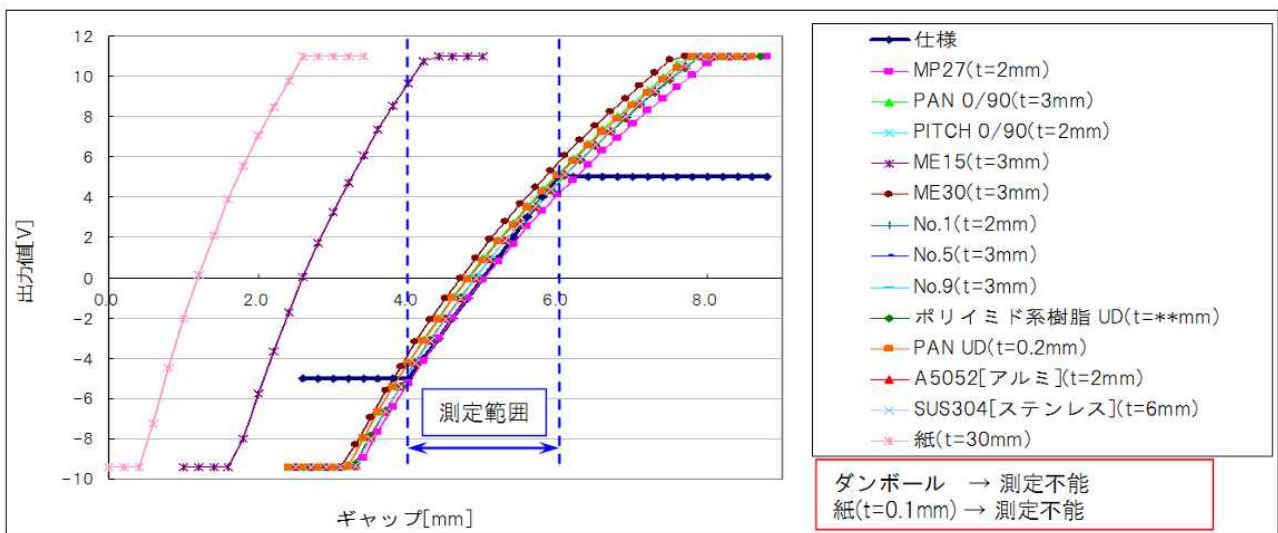


図Ⅲ-2.4(2).25 ヘッドの傾斜に対するギャップ誤差



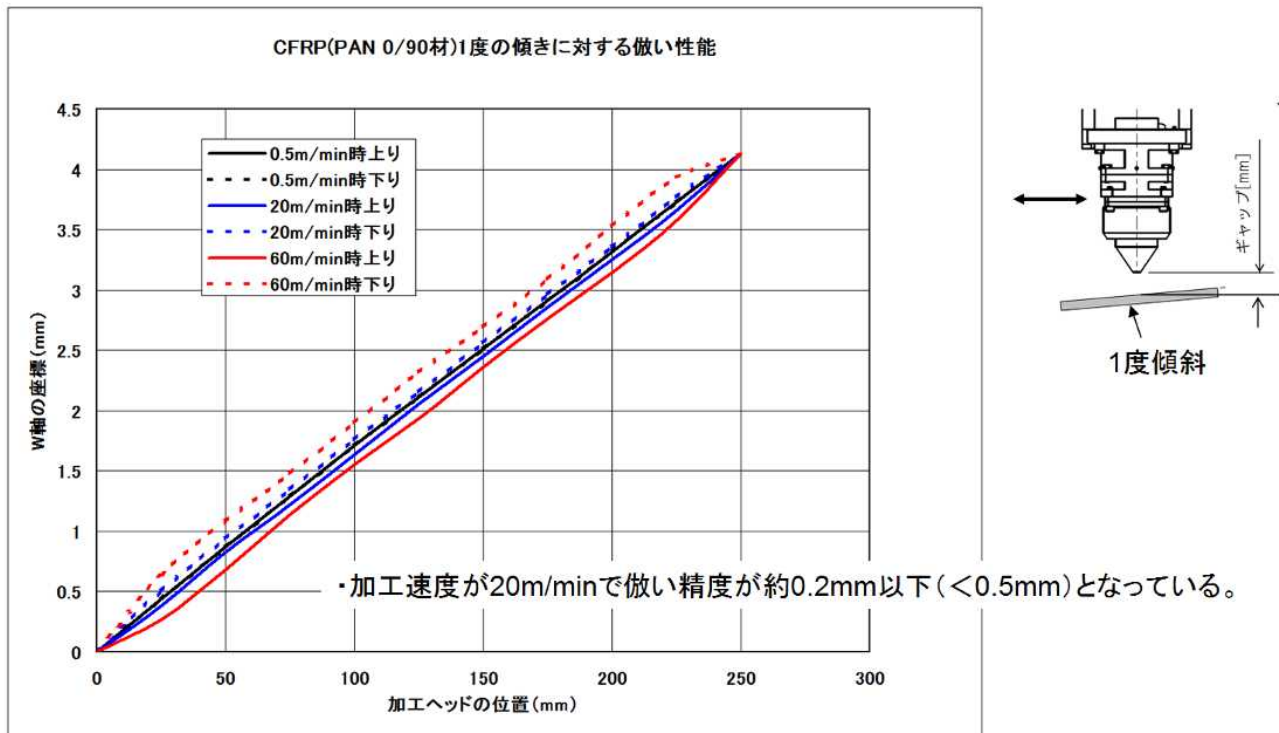
図Ⅲ-2.4(2).26 ワーク端面近傍でのギャップ変動

図Ⅲ-2.4(2).27に各種材料に対するセンサーの出力特性を示す。炭素繊維の含有量が少ない材料(ME15)が他の材料と比較してギャップが小さくなる方向に特性がシフトしているが、材料毎に補正することで倣いの制御は可能である。



図Ⅲ-2.4(2).27 各種材料に対するセンサーの出力特性

図Ⅲ-2.4(2).28の倣いの応答性の結果より、本加工ヘッドにて1度の傾斜を60m/minで倣い走行した時に、応答性としてギャップ誤差が約±0.2mm程度で倣えることが分かった。次のステップで軽量化、高速化を図り、更なる応答性向上を図る。

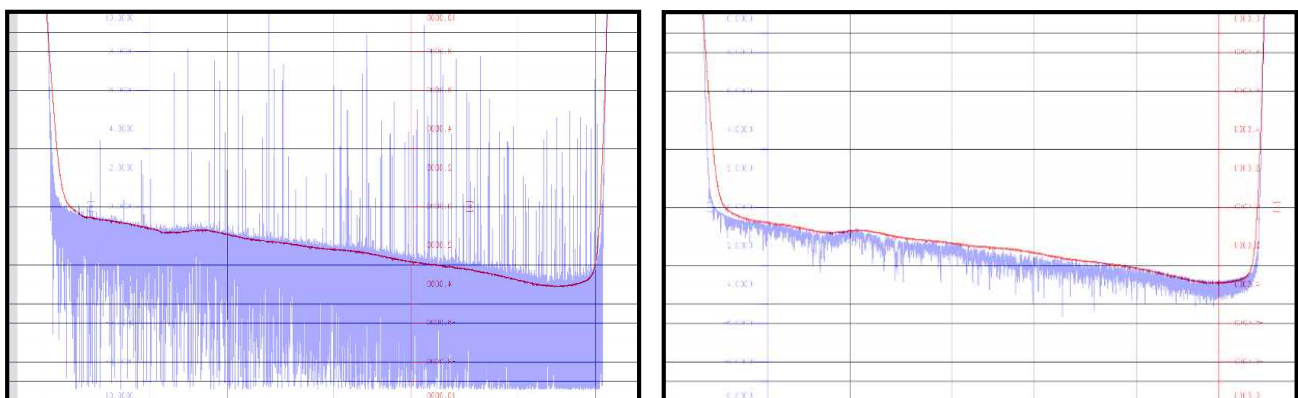


図Ⅲ-2.4(2).28 倣いの応答性

古河電工製 QCW ファイバーレーザー(定格出力 2kW、パルスピーク出力 6kW)と接続し、倣い加工および立体ワークの加工実験を実施した。

図Ⅲ-2.4(2).29 にレーザー照射時の倣いセンサー出力特性を示す。赤色ラインがレーザー未照射時の倣いセンサーの出力を、紫色ラインがレーザー照射時の倣いセンサーの出力を表している。(a)が非貫通切断状態の場合で(b)が貫通切断状態の場合のセンサー出力を示している。貫通切断状態の場合、紫色ラインが赤色ラインとほぼ一致しており、倣い制御が可能であることが確認できた。

非貫通切断状態の場合は、プラズマの影響であろうと思われる大きなノイズが発生しているため、倣い制御はできない。ただし、大きな発生ノイズはレーザー未照射時の倣いセンサー出力値に沿っているため、フィルター処理などにより倣う事が出来る可能性がある。

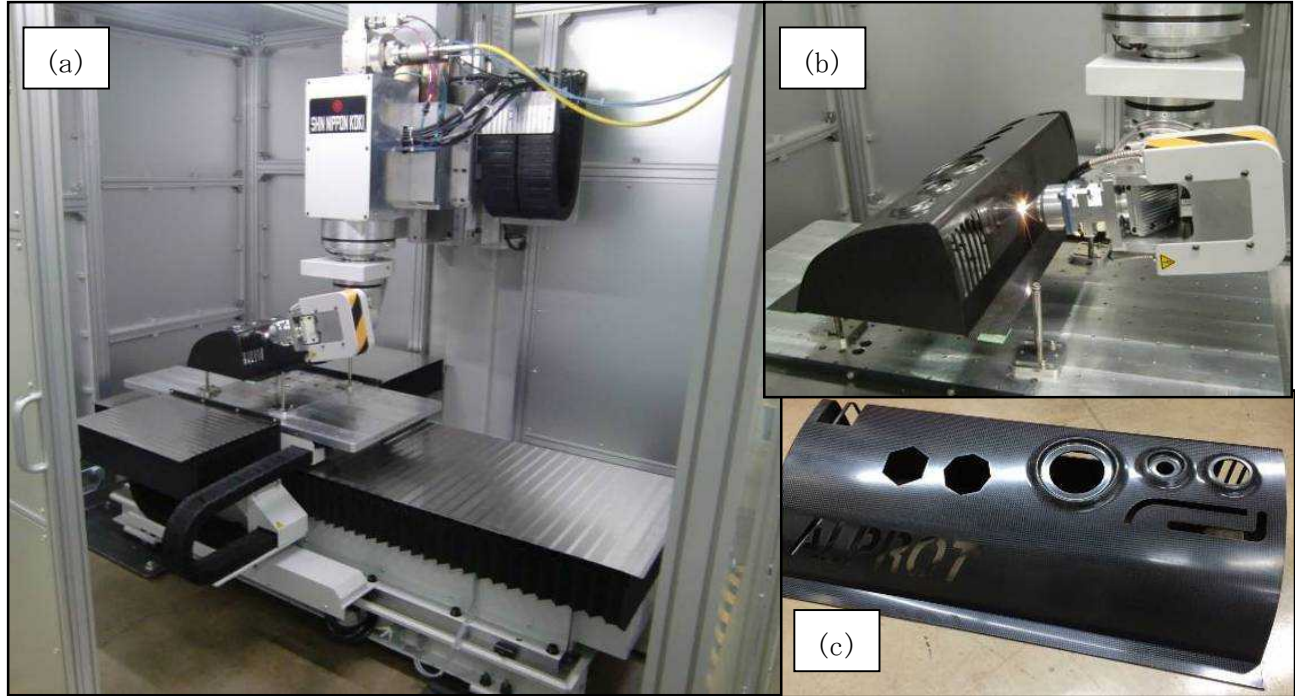


(a) 非貫通切断時

(b) 貫通切断時

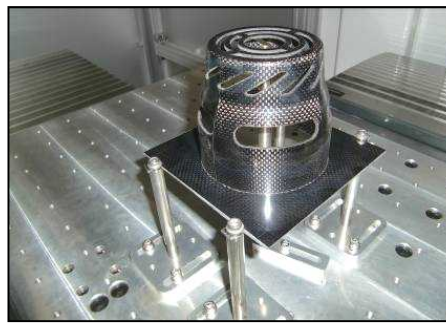
図Ⅲ-2.4(2).29 レーザー照射時の倣いセンサー出力特性

倣いセンサーの実験と平行して、立体ワークの加工試験を実施した。自動車のダッシュボード形状を模した CFRP 試料(600×300×160mm)に対して曲面加工及び外周トリミング加工を行い、良好な加工品質を得た。図Ⅲ-2.4(2).30の(a)に加工装置全体外観、(b)にレーザー照射時の加工部、(c)に加工後の立体ワークを示す。



図Ⅲ-2.4.30 立体ワークの加工

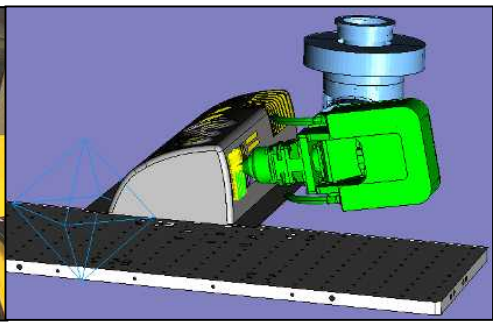
図Ⅲ-2.4(2).31に簡易治具にセットされた加工後のカップ形状加工サンプルを示す。  
加工用 NC データ作成は、CAD/CAM システムに三次元 CAD データを読み込み加工ラインを指示するだけで、加工面に対して垂直な姿勢の NC プログラムを自動生成できる。実際の加工手順としては、NC プログラムを元にパソコン上で立体ワークとの衝突シミュレーションを行い、加工機で動作確認の後に加工開始する。図Ⅲ-2.4(2).32に CAD/CAM システム、図Ⅲ-2.4(2).33に CAD/CAM によるシミュレーション画面を示す。



図Ⅲ-2.4(2).31  
加工後のカップ形状サンプル

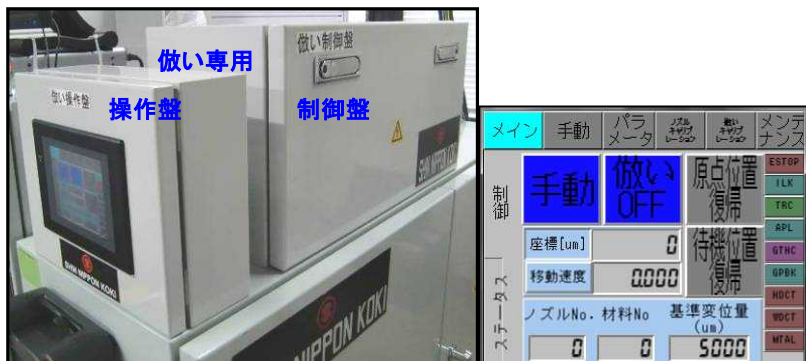


図Ⅲ-2.4(2).32  
CAD/CAM システム

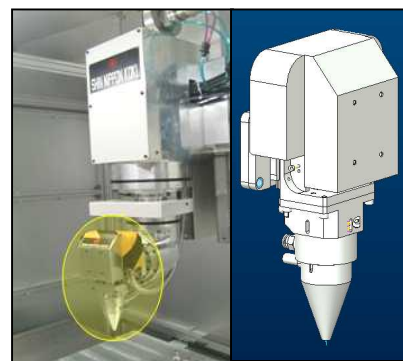


図Ⅲ-2.4(2).33  
CAD/CAM シミュレーション画面

倣い制御システムの更なる応答性向上のため、加工ヘッドのコンパクト化、軽量化および制御システムの高速度化を図った。図Ⅲ-2.4(2).34 にリニアモータの高速度制御が可能な倣い専用の制御装置外観及び画面、図Ⅲ-2.4(2).35 にコンパクト化し、軽量化した倣い加工ヘッドの外観及び外観図を示す。



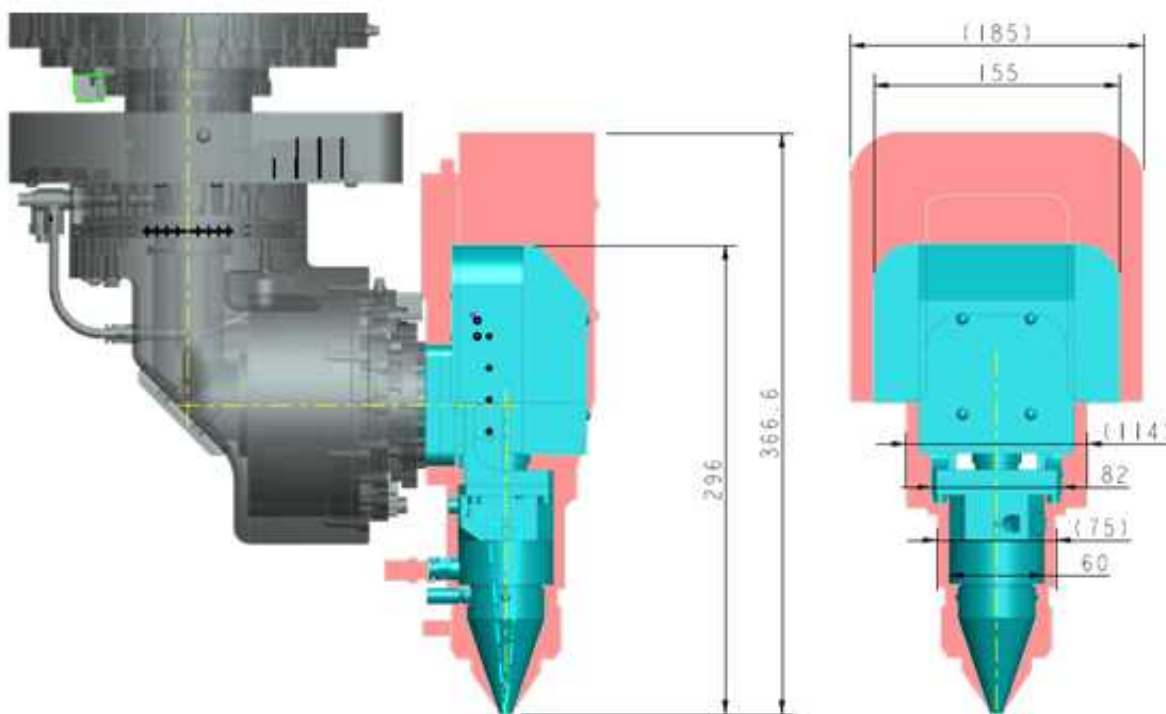
図Ⅲ-2.4(2).34 高速倣い制御装置外観と操作画面



図Ⅲ-2.4(2).35  
コンパクト倣い加工ヘッド

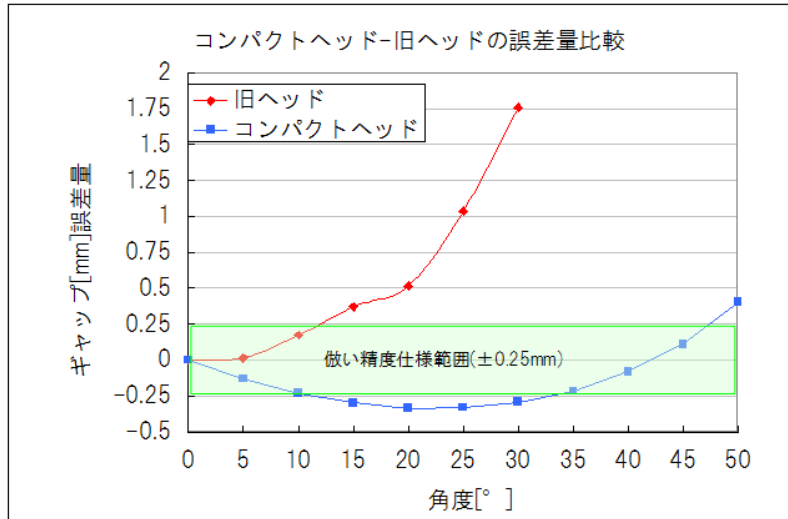
図Ⅲ-2.4(2).36 に倣い加工ヘッドの新旧外観比較を示す。赤色が旧ヘッド、青色が新ヘッド(コンパクトヘッド)の大きさを表している。重量で約 1/3 に軽量化できた。また、ノズル先端形状の最適化によりワーク形状による干渉を軽減することができた。

図Ⅲ-2.4(2).37 にヘッドの傾斜に対するギャップ誤差を示す。赤色が旧ヘッド、青色が新ヘッド(コンパクトヘッド)の値である。ノズル先端形状の最適化によりヘッドの傾斜に対するギャップ誤差が大幅に向上した。



図Ⅲ-2.4(2).36 倣い加工ヘッドの新旧外観比較

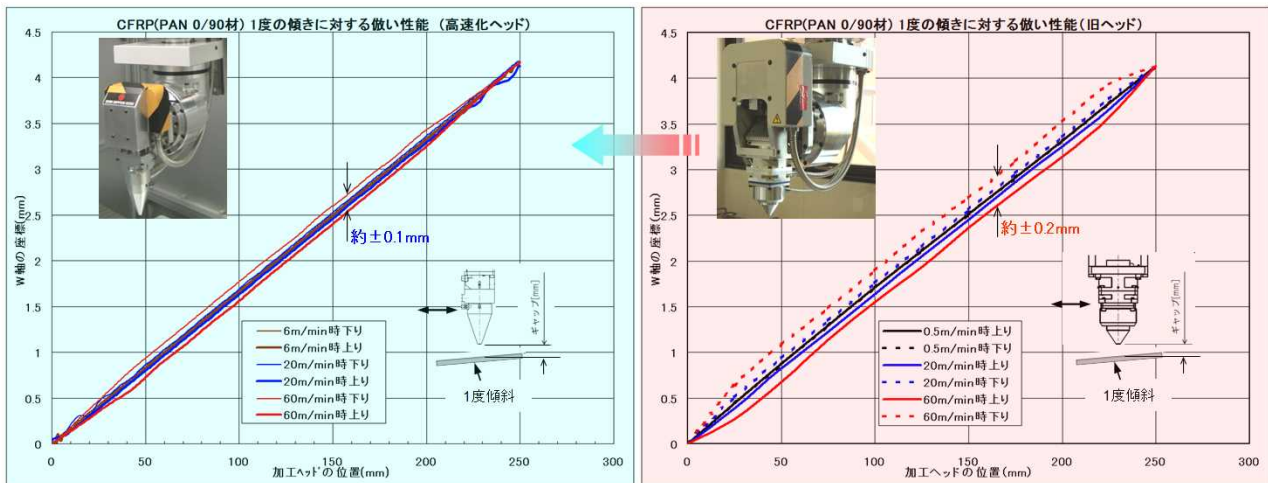




図Ⅲ-2.4(2).37 ヘッドの傾斜に対するギャップ誤差比較

図Ⅲ-2.4(2).38に新旧ヘッドで1度の傾斜を60m/minで倣い走行した時の応答性の測定結果を示す。(a)が新ヘッド(コンパクトヘッド)で(b)が旧ヘッドである。軽量化、制御の高速化によって、応答性が約2倍向上した。

本研究で開発した1m級三次元加工機システム、及び高速倣い制御機能付きコンパクトヘッドを用いることにより、立体ワークへの高速加工が可能となり、最終目標を十分達成することができた。また、安全キャビネットや集塵システム、CAD/CAMシステムを併用することによって、安全な環境かつ効率的にCFRP切断加工を可能とするシステムを構築することができた。



図Ⅲ-2.4(2).38 倣い応答性比較

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.5 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」

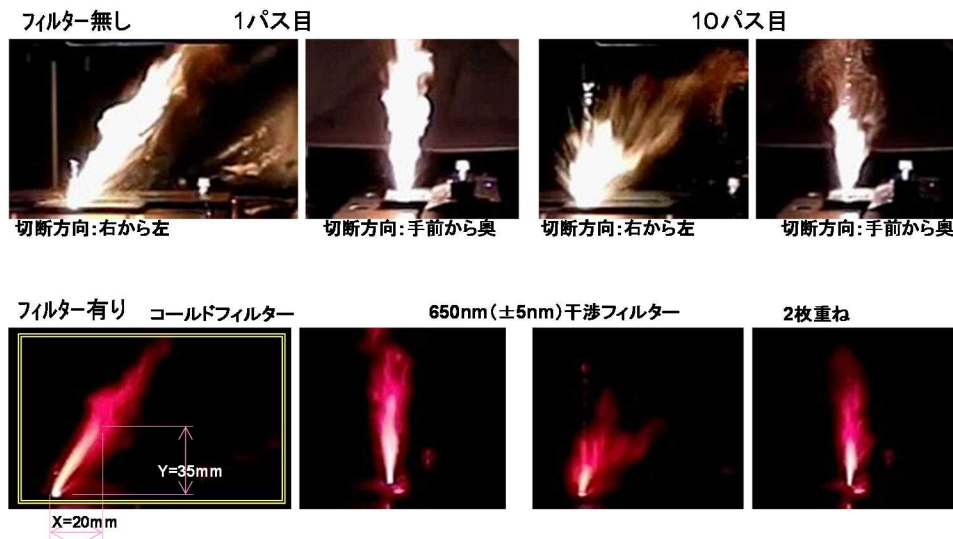
##### 「(2) CFRP 加工技術の開発」

##### 「②CFRP 加工プロセス・評価技術の開発」の成果

(アマダミヤチ、新日本工機、三菱化学、産総研 実施)

#### 2.5.1 多波長複合レーザー加工プロセスの最適化

最先端の各種 CFRP Carbon Fiber Reinforced Plastic 材を入手し、古河電工開発品の 6kW ピーク出力の QCW ファイバーレーザー光源装置等を用いて CFRP 切断実験をつくば拠点にて実施した。加工プロセスにおける制御因子の抽出ならびにレーザーの諸特性（波長、出力等）を変えたレーザー切断加工の比較対照試験を行った。具体的には、加工点のリアルタイム画像を高速ビデオカメラによって観測し、加工の進行状態と同時に、加工点の音響信号、反応光（赤外光、可視光など）を収集するモニター技術の開発ならびに時間分解型分析法を駆使した加工プロセスのその場観察法を確立した。これらの情報を基に、加工反応や加工点からの信号により加工プロセスの概要を掌握し、加工プロセス条件の最適化ならびに加工高品位化の問題点抽出を実施した。

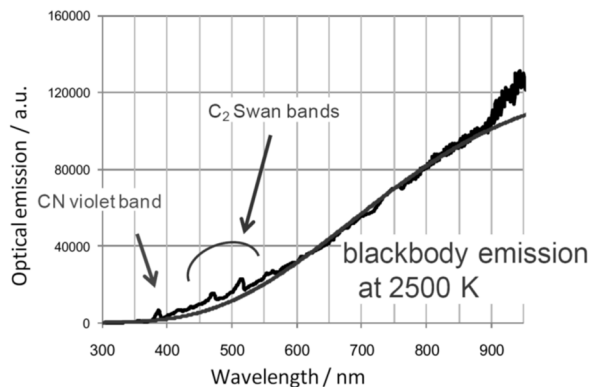


図Ⅲ-2.5.1 加工点のリアルタイム画像（高速ビデオカメラ観測）

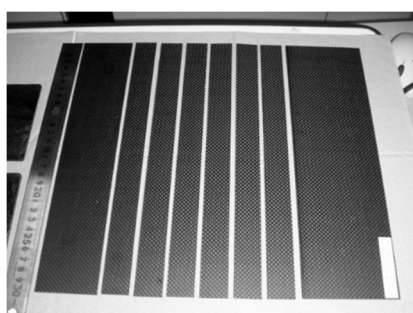
図Ⅲ-2.5.1 に示すように、ファイバーレーザー照射ではパス数によって、レーザービーム走査方向に対するブルームの放出方向が変化する現象が観測された。これは、初期のパス数では加工底部に傾斜面が生じているために斜めにブルームが放出されると考えられ、レーザー照射部位に熔融池が生成していることを示している。一方、ブルームの発光スペクトルから微弱な  $C_2$  発光および CN 発光が観測されたが、図Ⅲ-2.5.2 に示すように主要シグナルは黒体放射に帰属されるものが主体であった。

レーザービームの高速掃引法を導入し、加工ラインに沿って多重線および多重回照射（多重線マルチパス照射）を行うことで、2～3mm 厚の基板に対しても完全切断に至る照射回数を大幅に低減させることができた（図Ⅲ-2.5.3）。さらに、樹脂層の熱損傷についても、0.1mm 程度に抑制できていることがマイクロ X 線 CT 測定結果から判明した。

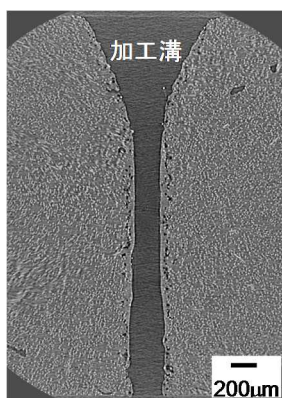
波長 1 ミクロン帯の平均出力、kW 級のファイバーレーザーを CF 短繊維が 30%混入したポリカーボネート材プレス成形平板品（CFRTP、板厚 3mmt）に照射した。



図Ⅲ-2.5.2 近赤外加工におけるプルームの発光スペクトル測定



図Ⅲ-2.5.3 30cm角 CFRP 基板への切断加工

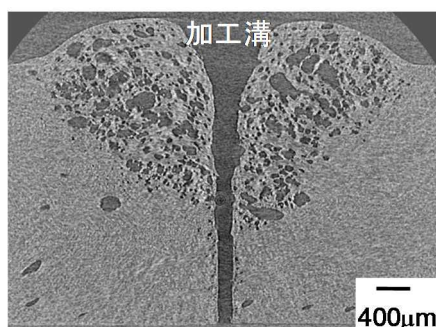


図Ⅲ-2.5.4 X線CT測定によるCFRTP板加工部の断面像

(レーザー平均出力 1kW、CW ビーム走査速度 0.8m/s、14 パス照射、集光レンズ  $f=160\text{mm}$ )

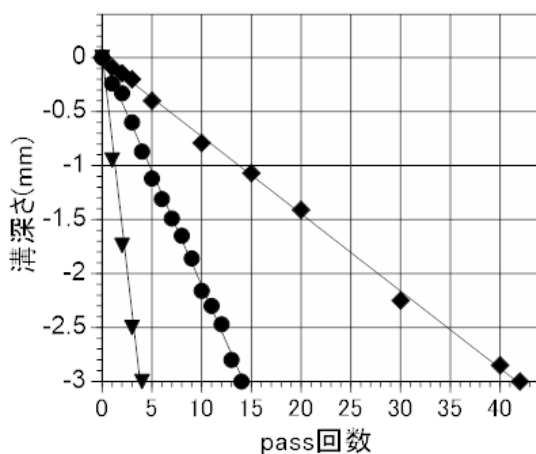
CW 高出力光の高速掃引照射を加工線に沿って多重回照射（多重線マルチパス照射）を行うことで、徐々に加工溝深さが深くなるとともに、加工部樹脂の熔融領域低減に大きな効果があることがわかった。図Ⅲ-2.5.4にレーザー平均出力 1kW（マルチモード光）、CW ビーム走査速度 0.8m/s で、14 パス照射した CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastic) 試料の X 線 CT 断面像を示す。レーザー光は写真上部側から入射しており、CF 短繊維は白色の点である。加工溝のカーブ幅は 0.2mm であった。図Ⅲ-2.5.5 の低速 0.2m/s での掃引照射では、入射面側が大きく膨らむバンプ構造が形成され、1mm を超える内部領域に激しい熱損傷が生じていることがわかる。したがって、加工面上において、レーザー

光を高速掃引照射することで、大幅に熱損傷を低減させることができることが判明した。これらの結果から、CFRTP 材ではレーザー走査のパス数増加によって加工溝深さは比例して増加することから（図Ⅲ-2.5.5）、試験片の完全切断に必要なパス数を容易に推定できる。さらに、図Ⅲ-2.5.4の加工溝部位を詳しく観察すると、溝の表面から 50 $\mu\text{m}$  の深さの領域に黒色の点が並んでいることがわかる。図Ⅲ-2.5.4ならびに図Ⅲ-2.5.5において、黒色箇所は密度の低い部位である設定であるから、黒色点は樹脂やCFなどの固体（図中では白色または灰色部位）ではなく、気体状の空孔であると推定される。これは、加工時における熱損傷過程を示していると考えられる。加工部位の顕微ラマンスペクトルを測定したところ、加工溝表面に近い領域では母材樹脂部とは形状の全く異なる蛍光性のスペクトルが得られた。その強度は母材のラマン信号よりも約2桁高強度であった。ラマン測定の励起光は波長532nmであるので、この波長に吸収を有する物質が熱損傷過程で生成していると考えられる。表Ⅲ2.5.1にCW2kWレーザー照射による加工結果を示す。CFRTP材では3mmt基材も6m/minを超える加工速度が得られ、HAZも0.1mm以内に抑制することができた。



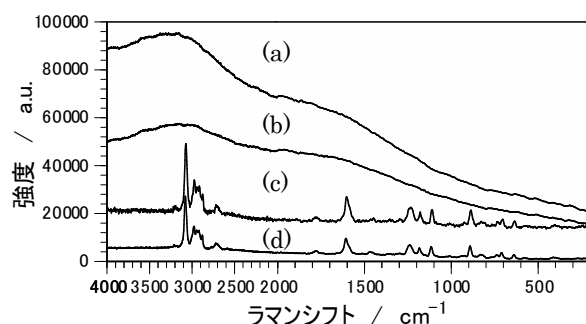
図Ⅲ-2.5.5 X線CT測定によるCFRTP板加工部の断面像

(レーザー平均出力1kW、CWビーム走査速度0.2m/s、4パス照射、集光レンズf=160mm)



図Ⅲ-2.5.6 CFRTP板(板厚3mmt)の加工深さ特性：レーザー走査パス数依存性

(レーザー平均出力CW1kW；▼走査速度0.2m/s、●0.8m/s、◆2.3m/s)

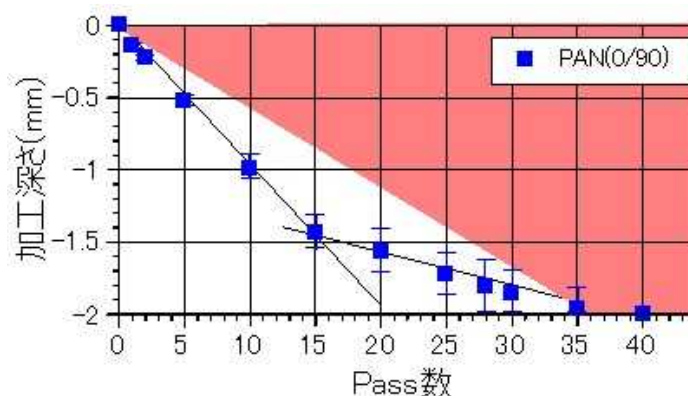


図Ⅲ-2.5.7 加工部位の顕微ラマンスペクトル；加工溝表面からの距離 (a)：3 $\mu$ m(縦軸拡大倍率1倍)、(b)：8 $\mu$ m(2倍)、(c)：43 $\mu$ m(1000倍)、(d)バルク部位(500倍)。

表Ⅲ2.5.1 CW2kW レーザー照射による加工結果

レーザーcw2kW (f $\theta$ レンズ:f=306mm) ビーム走査速度3.6m/s、15cm長	加工速度 (完全切断のpass回数)	熱損傷領域(HAZ) by XCT
ピッチ短繊維PC樹脂 プレス成形 CFRTP: ME30 3mmt	10 m/min (20~21 パス)	~70 ミクロン
PAN短繊維PA6樹脂 射出成形 CFRTP: 3mmt	7.7 m/min (28 パス)	~100 ミクロン
PAN連続繊維エポキシ樹脂 オートクレーブ成形 CFRP: PAN(0/90) 2mmt	5.4 m/min (40パス)	平均 90 ミクロン

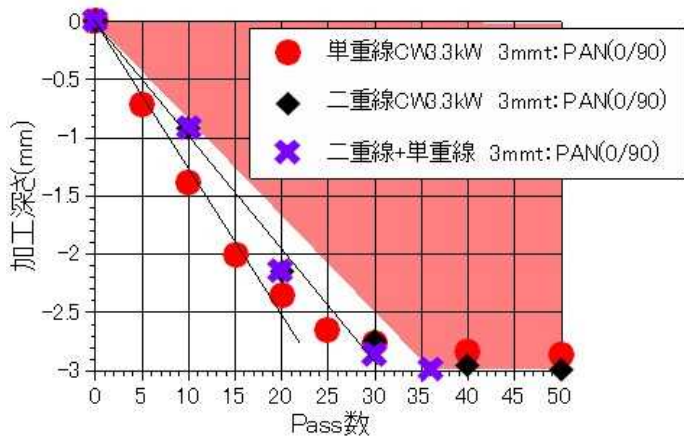
一方、連続繊維型のCFRP材料[PAN(0/90配向) epoxy樹脂、試料板厚さ2mmt]では、加工速度は5.4m/minに留まり、CW2kW照射では出力が不足していることが判明した。この原因を解明するために、加工深さのパス数依存性を詳しく調べたところ、2つの加工速度を持つ領域が認められた。加工初期と後期では速度が異なり、後期では速度が低下した。2つの速度領域を分ける屈曲点が観察された。短繊維型のCFRTP材料では、全領域において一定値の直線関係が得られているので、CFRPとCFRTPでは加工特性が大幅に異なることが判明した。



図Ⅲ-2.5.8 CW2kW照射時の加工深さとパス数依存性 (CFRP: PAN-epoxy, 2mmt)

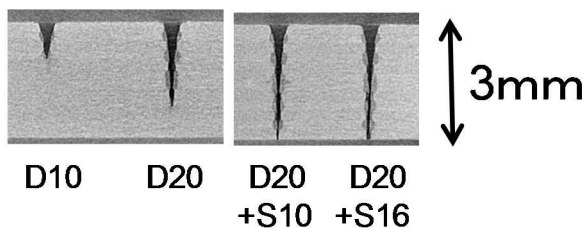
連続繊維型の3mmtのCFRP材料に対して、6m/min超の加工速度を得るために、レーザー出力の向上ならびに照射方法の最適化を行った。CW3.3kWレーザーを3.6m/sの走査速度で照射したところ、単重線照射では、照射後も完全切断には至らなかった(図Ⅲ-2.5.9)。しかしながら、0.1mm幅の二重線照射では50パス照射で完全切断できた。これは、カーブ幅の大きさが大きく影響しているためと考えら

れる。そこで、二重線照射と単重線照射の併用を最適化することで、完全切断に至る照射パス数を低減することが可能になる。走査速度 3.6m/s で、二重線 20 パスおよび単重線 16 パスの併用照射（合計 36 パス）によって、3mmt の CFRP 試料においても 6m/min の速度で完全切断結果を得ることができた（図Ⅲ-2.5.10）。この併用照射によって、PAN 系 CFRP ならびにピッチ系 CFRP において熱損傷領域が低減されたプロジェクト目標値を達成することができた。（表Ⅲ2.5.2）



図Ⅲ-2.5.9 CW3.3kW 照射時の加工深さとパス数依存性 (CFRP: PAN-epoxy、3mmt)

(二重線+単重線)併用照射



図Ⅲ-2.5.10 CW3.3kW 照射時の(二重線+単重線)併用照射でのXCT断面像 (PAN-epoxy、3mmt)

表Ⅲ2.5.2 CW3.3kW レーザー照射による加工結果

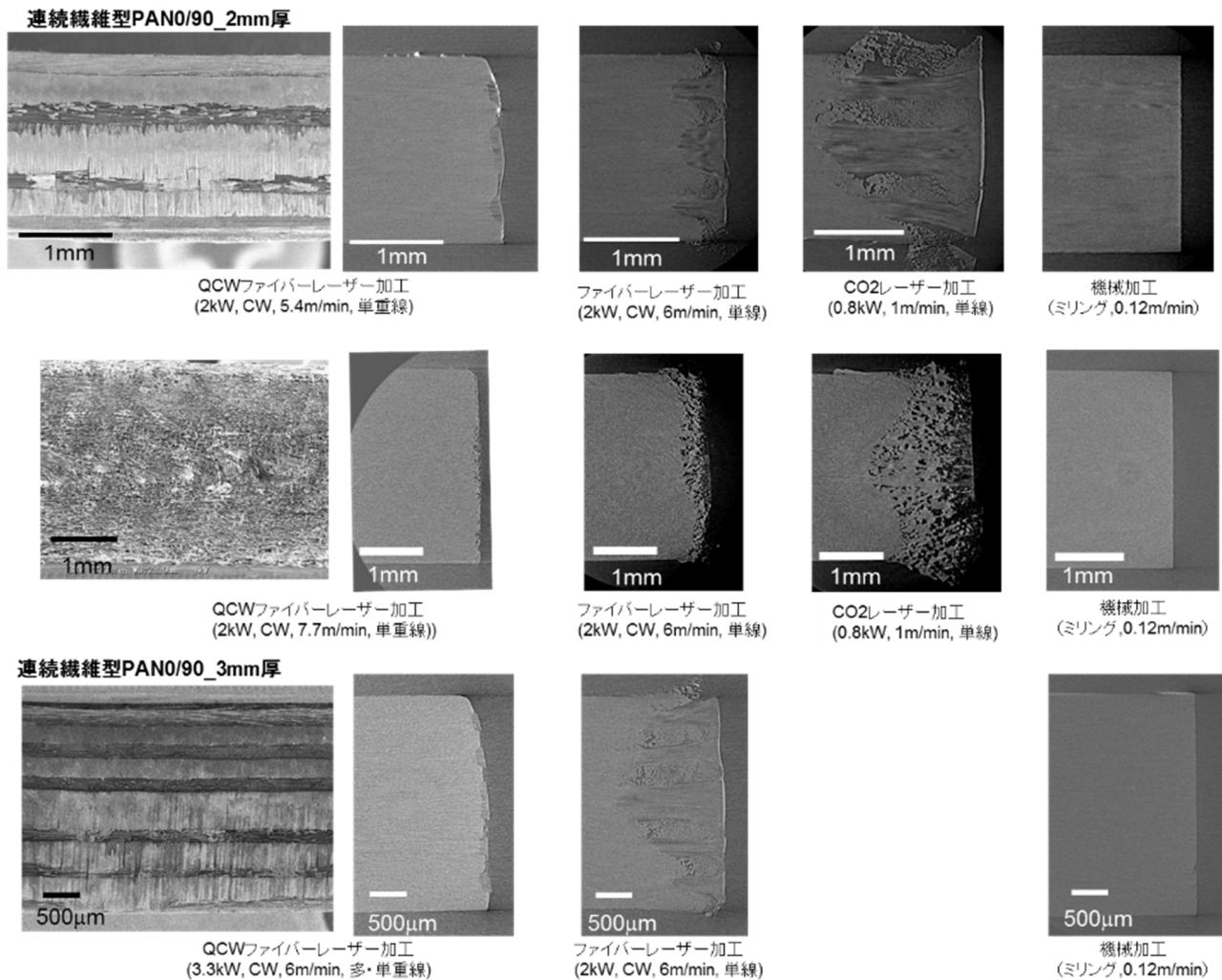
レーザーcw3.3kW (fθレンズ:f=306mm) ビーム走査速度3.6m/s、15cm長	加工速度 (完全切断のpass回数)	熱損傷領域(HAZ) by XCT	
PAN連続繊維エポキシ樹脂 オートクレーブ成形 CFRP: PAN(0/90) 3mmt 二重線(0.1mm幅)+単重線	6 m/min (D-20パス+S-16パス)	平均95ミクロン	
PAN連続繊維エポキシ樹脂 オートクレーブ成形 CFRP: PAN(0/+45/90/-45) 3mmt 二重線(0.1mm幅)+単重線	6 m/min (D-20パス+S-16パス)	平均100ミクロン	
PITCH連続繊維エポキシ樹脂 オートクレーブ成形 CFRP: ピッチ(0/90) 3mmt 二重線(0.1mm幅)+単重線	6 m/min (D-20パス+S-16パス)	平均95ミクロン	
PAN連続繊維エポキシ樹脂 オートクレーブ成形 CFRP: PAN(0/90) 3mmt <i>単重線のみ</i>	(50パス未切断、深さ2.9mm) ※4.3m/min以下、裏面到達	平均95ミクロン (130、60ミクロン)	

## 2.5.2 レーザー加工に適した CFRP 材料の構造最適化及び加工試料評価技術

CFRP のレーザー切断加工試料評価技術において、主な課題はレーザー切断加工後の試験片による最適な強度評価技術である。レーザー切断後の試験片では、切断面の加工品位が力学特性に影響を与えることが予測される。そこで、レーザーの種類、波長、出力、加工速度（スキャン速度）、切断加工法等を変えて大きさの異なる熱損傷域を生成させたレーザー加工試験片を用いて引張試験・圧縮試験・疲労試験を行い、その強度評価及び劣化・損傷評価に関する研究開発を実施した。なお、引張試験は JIS K7164, K7165 (ASTM D3039, ISO 527-4, 5)、圧縮試験は JIS K7093(有孔圧縮強さ試験に準拠)、疲労試験は JIS K7083(ASTM D3479/D3479M)等の標準規格に準拠した。平成 22 年度から中間評価の期間においては、市場に流通するレーザーを用いて 2m/min で加工した CFRP 試験片(2mm 厚)の引張試験を実施し、引張強度は CFRP 系で 10%未満(参照強度に対して)、接合においても 50MPa のせん断強度を達成し、これを通じてレーザーの諸条件と熱反応層の関係が明らかとなり最終目標達成の見通しを得た。中間評価～平成 26 年度の期間においては、上記の結果を踏まえ、最終目標の達成および強度評価手法の構築を目指してレーザー加工材の引張・圧縮、疲労試験を実施した。

### 2.5.2.1 レーザー加工による熱反応層に関する評価

図Ⅲ-2.5.11 にはレーザー切断加工を行った連続繊維型クロスプライ積層板 PAN0/90 (2mm 厚, 3mm 厚)と短繊維型射出成形 CFRTP (3mm 厚)の X 線透過像および加工断面の SEM 画像を示す。既市販レーザーによる加工では、反応層厚みにおいて炭酸ガスレーザー(0.8kW, 8 $\mu$ s, 1m/min, single-cut)が 1200~1500 $\mu$ m、ファイバーレーザー(2kW, CW, 6m/min, single-cut)では約 300~1200 $\mu$ m に渡り広がっている。これらは単線での加工のため熱が素材に拡散したためと想定される。一方、古河電工が開発した 2kW\_QCW ファイバーレーザーではスキャナーの走査速度を速め多重線や単重線加工をすることによって熱反応層を抑制でき、その領域は 100 $\mu$ m 以内となり最終目標(反応層厚み: 100 $\mu$ m 以下)を達成した。また、SEM による加工断面を観察から、加工面では樹脂相の欠落が抑制されており高品位な加工が実現できている。そこでこれら様々な反応層厚みを生成させた試験片を用いて引張強度を求めた。



図Ⅲ-2.5.11 連続繊維型 PAN0/90 と短繊維型射出成形 CFRTP のレーザー加工時の熱反応層評価  
(加工条件：レーザーパワー、パルス幅、加工速度)

### 2.5.2.2 レーザー加工試験片の引張強度評価

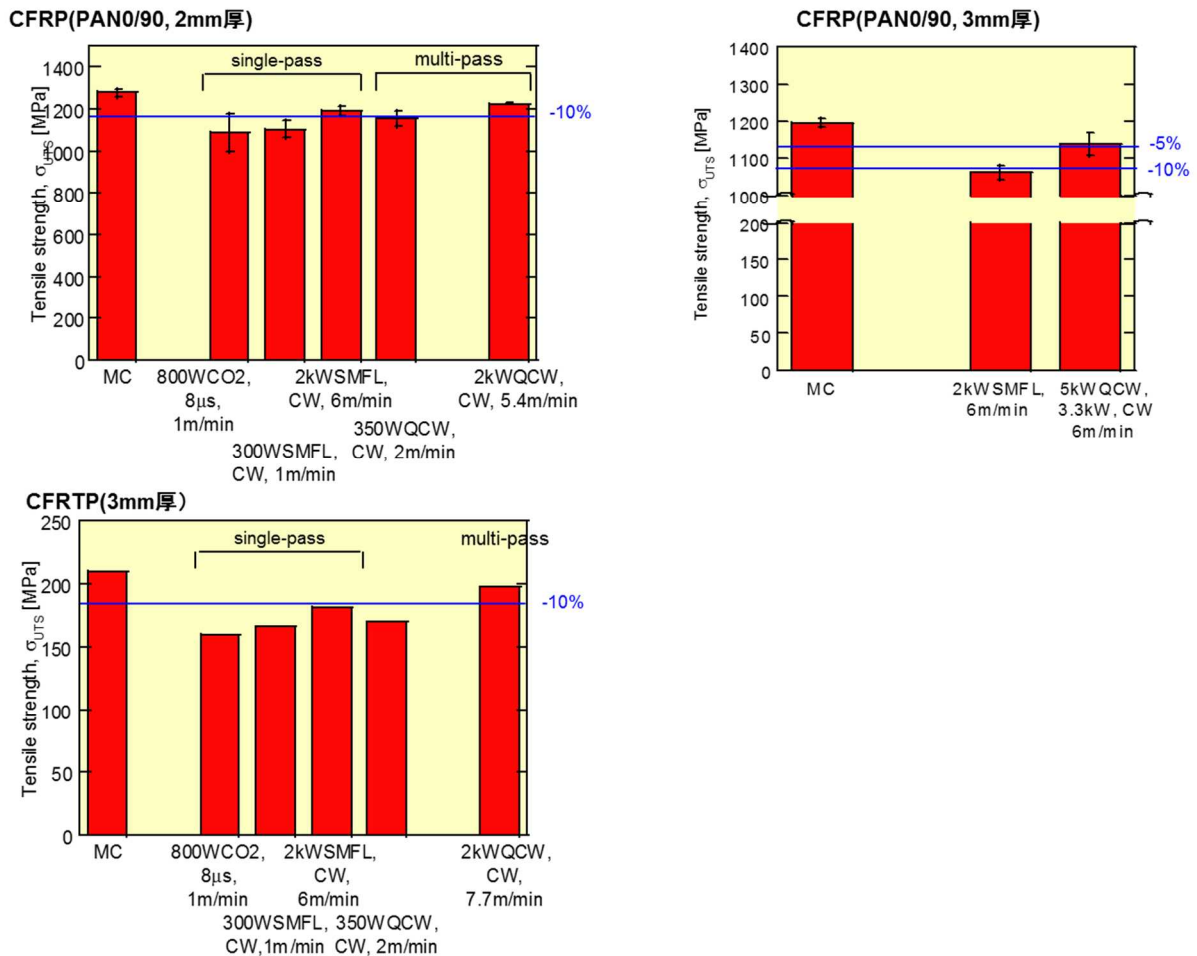
図Ⅲ-2.5.12 にはレーザー切断加工をして様々な反応層厚みを作成した試験片を用いて、JIS K7164, K7165 (ASTM D3039, ISO 527-4, 5)に準拠した引張試験を行った。図には連続繊維型クロスプライ積層板 (PAN0/90)、短繊維型射出成形 CFRTP の引張強度の一例を示す。比較のため、それぞれの図の左端に機械加工 (MC; ミリング, 0.12m/min) した試験片の結果も示す。レーザー加工試験片の引張強度の結果から、炭酸ガスレーザー (0.8kW,  $8\mu s$ , 1m/min) や 0.3kW ファイバーレーザー加工 (0.3kW, CW, 1m/min) では単線加工のため熱反応層 (700~1500  $\mu m$ ) が広く、参照強度 (機械加工値) よりも 15% 以上低下する。しかしながら、2kW\_QCW ファイバーレーザー (2~3.3kW, CW, 5.5~7.7m/min) による高速スキャナーを用いた多重線加工では 6% 以内の強度低下に抑制される。

これらの傾向は多くの種類の CFRP 系でも同様である。炭素繊維にピッチ系を用いた連続繊維型クロスプライ積層板 (PICTH0/90) 系、樹脂に耐熱樹脂や PEEK を用いた連続繊維型クロスプライ積層板 (PAN0/90) 系、ポリカーボネイト樹脂の短繊維型 CFRTP 系、繊維配向の異なる連続繊維型 0, 90, 45, 0/45/90 系などについても 2kW-QCW ファイバーレーザー加工によって熱反応層の大きさが 100  $\mu m$  以下に制御した試験片では 7% 以内に引張強度低下を抑制した。また、圧縮試験においては、連続繊維型クロスプライ積層板 (PAN0/90) において、2kW\_QCW ファイバーレーザーによる多重線加工試験片は参照強



度に比べて約 5%低下であった。QCW レーザーと短波長レーザーを重畳させて実施した穴あけ加工試験片では、引張および圧縮強度が約 7%低下に抑制できた。

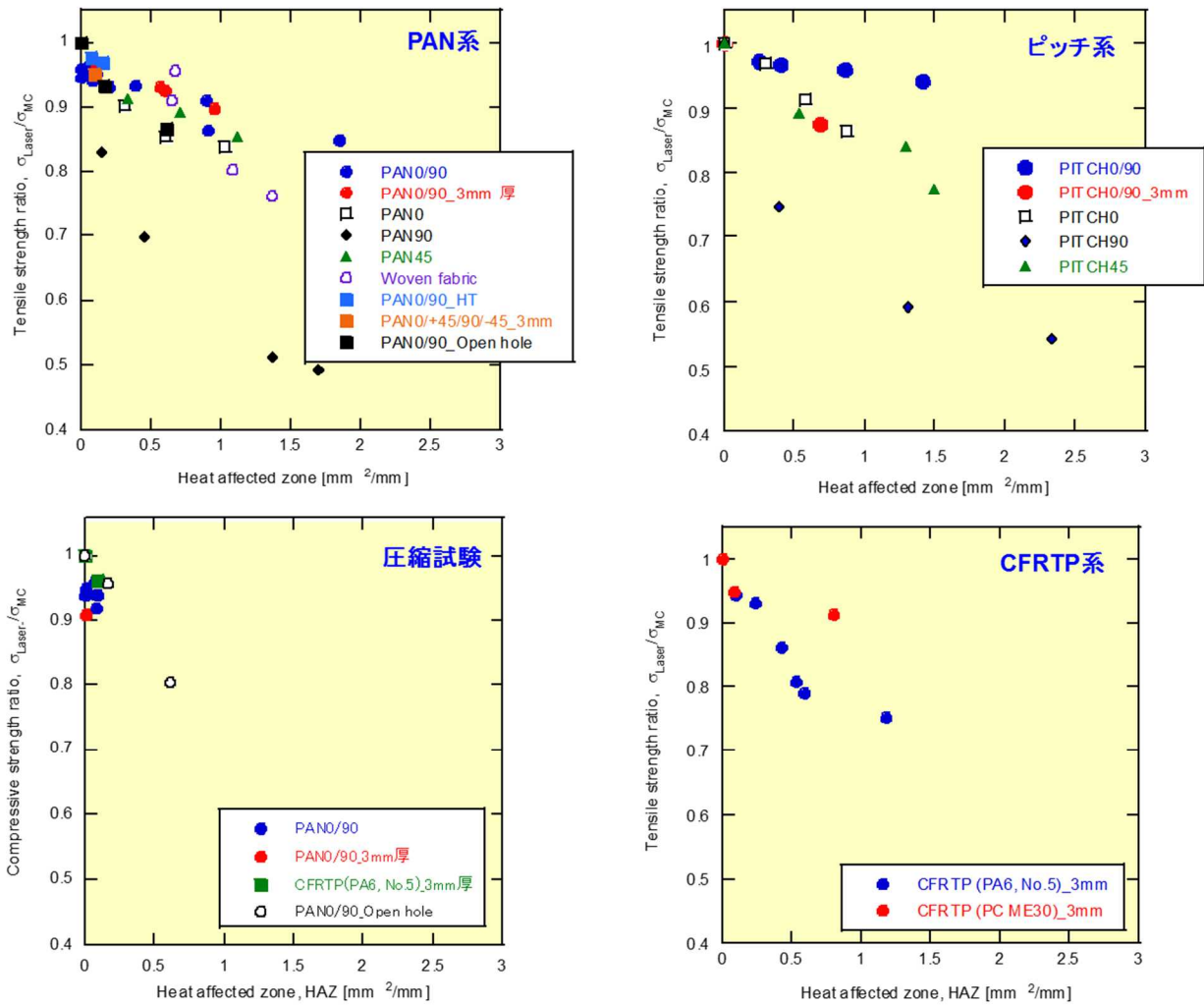
### CFRP(PAN0/90\_2mm, PAN0/90\_3mm, CFRTP\_3mm)の引張強度



図Ⅲ-2.5.12 各種 CFRP のレーザー加工試験片の引張強度

図Ⅲ-2.5.13 にレーザー加工により生成した反応層と強度比（レーザー加工試験片の引張強度／機械加工試験片の引張強度）の関係をまとめた。反応層には試料の厚さで正規化した面積を用いた。図中に示す反応層の面積（Heat affected zone, HAZ と定義）と強度比の関係から、一方向材(0, 90)、疑似等方材(0/90, +45/-45, 0/45/90)、織物材、CFRTP、円孔材は強度が反応層厚さと相関関係にあることがわかり、レーザー切断時に生成する反応層が強度特性の低下に影響を与えていることが明確である。例えば、連続繊維型レーザー加工時の熱損傷を 10%以内の引張強度の低下に抑制するためには反応層厚みが 400  $\mu$ m 以下である必要がある。一方、PAN90, ピッチ 90, CFRTP 系, 円孔材圧縮などはその傾きが大きく、反応層厚みの増加とともに急速に強度が低下する。これらは破壊形態（90 材や CFRTP は主に樹脂破壊や樹脂と繊維の界面破壊が支配的）が異なるためと考えられる。

### 熱反応領域と引張・圧縮強度の関係

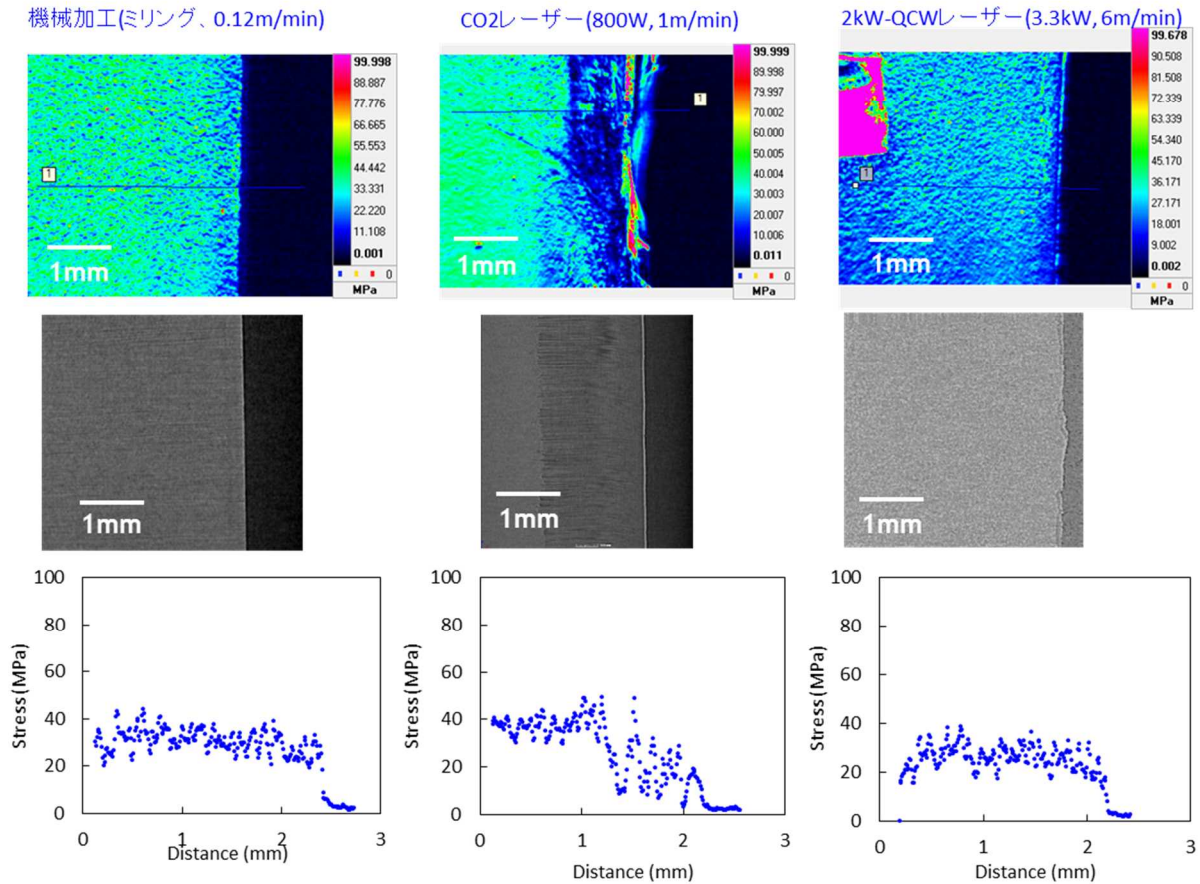


図III-2.5.13 各種CFRPのレーザー加工時の熱反応層と引張強度の関係

次に、レーザー加工試験片の破壊機構を調べるために、サーモグラフィを用いた熱弾性応力解析を行った。物質に引張や圧縮を加えると吸熱や発熱を発生する。この温度変化量は主応力の変化と相関関係があり、この熱弾性効果を利用した測定法である。図III-2.5.14には機械加工、炭酸レーザー加工および2kW-QCWレーザー加工後のクロスプライ積層板(PAN0/90, 2mm厚)試験片の解析結果を示す。図中にはX線CTによる透過像も示す。熱反応層のない機械加工試験片や100 $\mu$ m以下に抑制した2kW-QCWファイバーレーザー加工試験片では加工端部に大きな変化は見られないが、1mm以上ある炭酸レーザー加工では加工端部で低応力な領域が観察される。すなわち、レーザー加工により生成した熱反応層では試験片に応力を与えても健全部よりも小さな応力域となり、結果として熱反応層のない試験片よりも強度が低下することを明らかにした。

## 熱弾性応力解析

試料: PAN0/90 疲労条件:  $\Delta\sigma=36\text{MPa}$ , 5Hz, 4000cycles



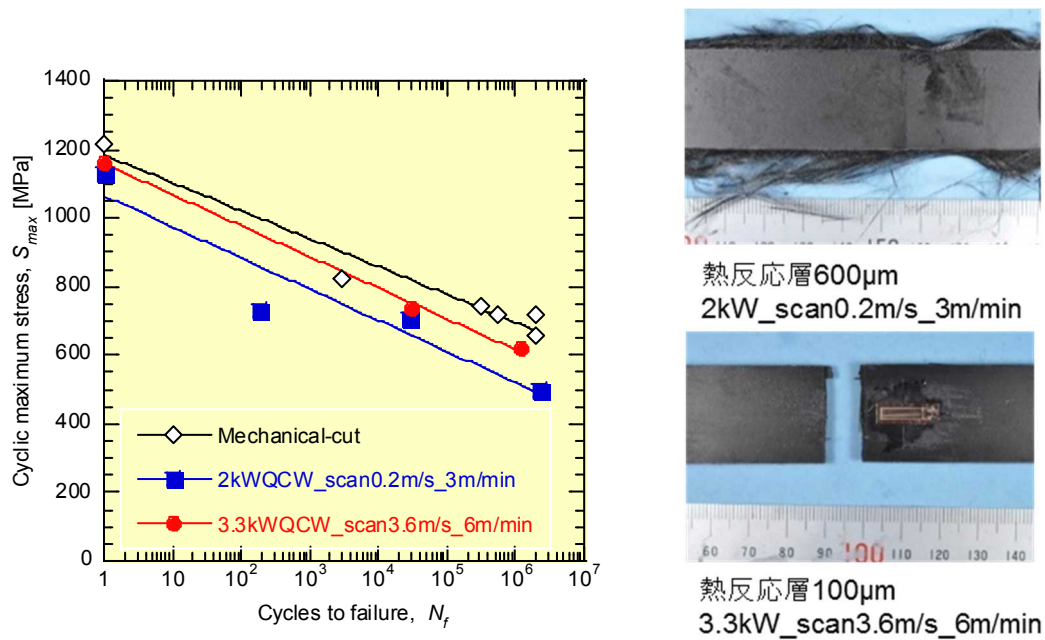
図III-2.5.14 各種加工したクロスプライ積層板 (PAN0/90) 試験片の熱弾性応力解析

### 2.5.2.3 レーザー加工試験片の疲労強度評価

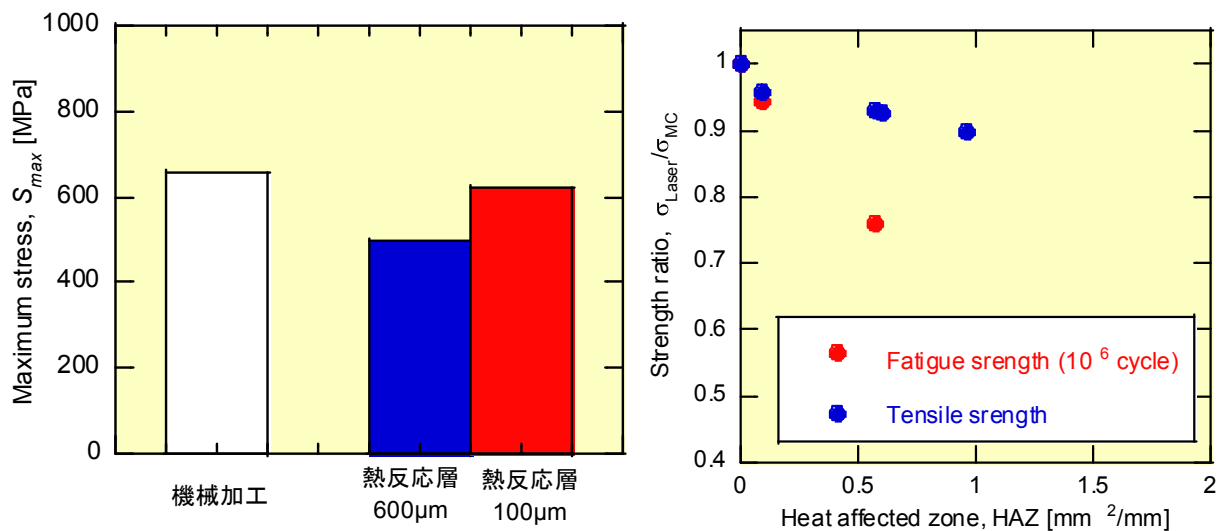
疲労特性に及ぼす熱反応層の影響について調べた。図III-2.5.15には連続繊維型クロスプライ積層板 (PAN0/90, 3mm厚) の疲労試験の成果を示す。2kW-QCWファイバーレーザー加工を用いて熱反応層を平均  $600\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$  を与えた試験片を用いて、室温、引張—引張 ( $R=0.1$ )、繰り返し周波数 5Hz にて試験を実施した。また、機械加工試験片の結果も同様に示す。2kW-QCWファイバーレーザー加工試験片は機械加工試験片よりも疲労寿命が低下した。特に、熱反応層の大きい試験片では他の加工よりも低下率が高い。この要因として、CFRPは微小き裂の伝播により疲労が進行することが知られており、レーザー加工時の切断面での亀裂生成の影響と想定される。

また、疲労回数が  $10^6$  回での疲労振幅の上限を疲労強度と定義し、それぞれのレーザー加工試験片の時間強度を機械加工試験片と比較した結果を図III-2.5.16に示す。この結果から、熱反応層が  $600\mu\text{m}$  試験片では約 25%、 $100\mu\text{m}$  試験片では約 4.5%の低下となっている。そこで、右図に熱反応層と強度比をまとめた。疲労強度では引張強度の結果と比べて傾きが急になることがわかる。これは、レーザー加工によって生成した熱反応層とともに微小き裂が導入されることによる影響を示唆する。例えば、熱反応層を  $600\mu\text{m}$  与えたレーザー加工試験片と機械加工試験片について、サーモグラフィを用いて算出した散逸エネルギー変化を測定した。散逸エネルギーとは繰り返しサイクルを与えたときの温度上昇量のこと、試料内部に発生した亀裂等の損傷の程度を表す。

測定結果から、熱損傷を与えた試験片は疲労試験中は明らかに散逸エネルギーの変化が大きく特に中期のサイクルでの値が大きく、熱反応層を大きく与えた試験片では微小き裂の伝播が多く発生していることを示唆した。



図Ⅲ-2.5.15 連続繊維型クロスプライ積層板 (PAN0/90) の疲労寿命曲線と疲労破壊後の写真



図Ⅲ-2.5.16 連続繊維型クロスプライ積層板 (PAN0/90) の  $10^6$  回の時間強度、熱反応層と強度比の関係

#### 2.5.2.4 レーザー接合材のせん断強度評価

CFRP を自動車等の輸送機器に適用する場合、金属との接合箇所が存在する。そのためには、接着剤やボルト締結を用いる方法が一般的である。そこで、予備実験として、CFRP と高張力鋼を用いて接着接合(二液性エポキシ接着剤；自動車用)を行い、引張試験を行った。図Ⅲ-2.5.17 にはその変位-荷

重曲線を示す。接着剤を使用した接着接合材では 24 時間室温硬化させた接合材よりも、80℃、30 分の熱処理を加えその後室温で 24 時間させた方が倍近くせん断荷重が得られることがわかった。しかしながら、両手法とも接着剤の硬化には室温にて 24 時間程度の硬化時間が必要であった。そこで、熱処理の代わりにレーザーの熱源利用による迅速硬化を試みた。二液性エポキシ接着剤を接合面に塗布したあと、1kW ファイバーレーザーにより金属面から照射して硬化させた。その後、室温にて 5 時間保持し、引張試験を行った。試験方法は JIS K6850 (ASTM D5868) に準拠した。なお、せん断強度（応力）はせん断破壊した荷重を接合面積（照射面積）で割ることによって算出した。その結果を図 III-2.5.18 に示す。

CFRP-高張力鋼のレーザー加工を適用した接着接合材では、20m/s の照射速度の加工において 50MPa を超える引張せん断強度が得られており、中間目標を達成した。中間目標達成後は、CFRP のレーザー切断加工実験に注力するため、本実験は終了した。

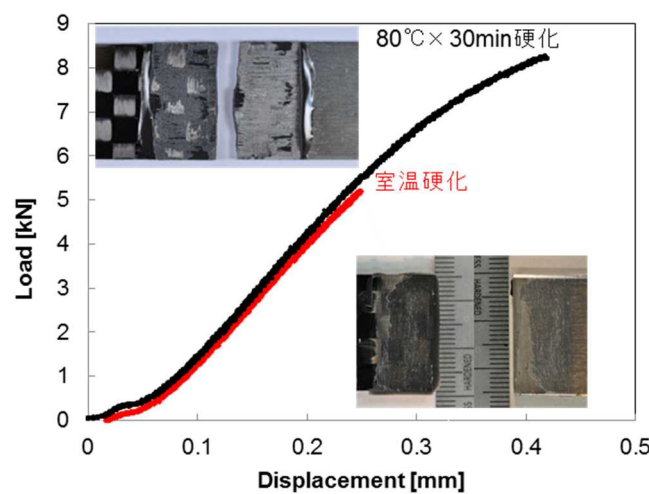


図 III-2.5.17 CFRP と高張力鋼の接着接合材の変位－荷重曲線

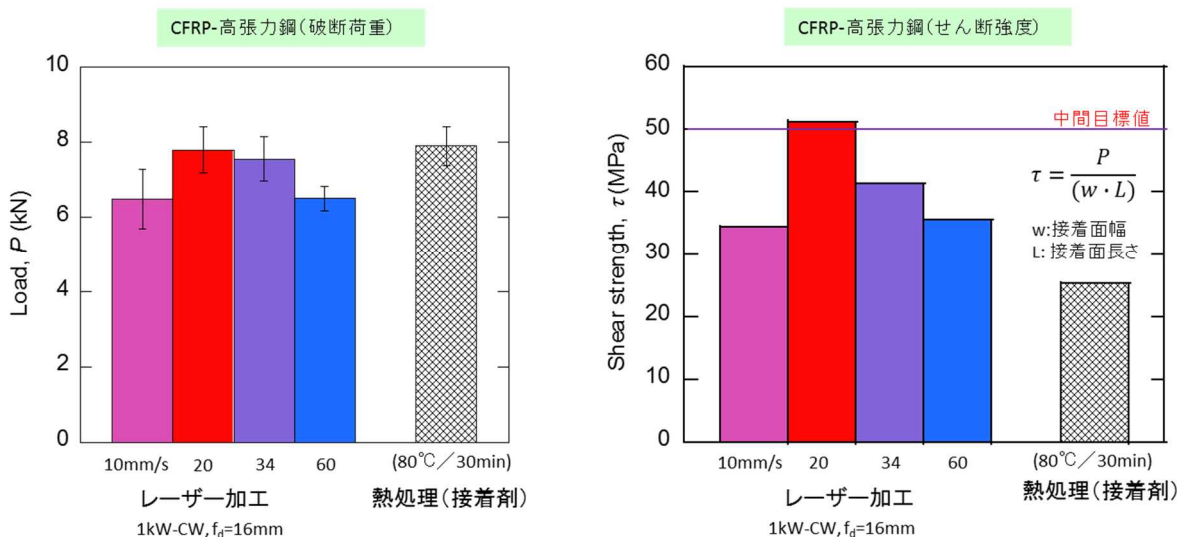


図 III-2.5.18 CFRP と高張力鋼のレーザー接着接合材のせん断荷重とせん断強度

### 2.3.5 まとめ

表 III-2.5.3 にはこれまでに得られた結果を切断加工技術と穴あけ加工技術にわけて、切断加工速

度、反応層厚み、引張高度、圧縮強度、疲労強度（ $10^6$ 回の時間強度）にまとめた。古河電工開発の2kW-QCWファイバーレーザーを用いて多重線加工を行った連続繊維型熱硬化性樹脂CFRP材料(PAN0/90)では、加工速度6m/min以上、熱損傷領域 $100\mu\text{m}$ 以下で切断でき、参照強度（機械加工後の試験片の強度）に対して目標値（参照強度に対して10%未満の強度低下の抑制）を大幅に上回る引張強度・圧縮強度・疲労強度の実現に成功した。また、QCWファイバーレーザーと三菱電機製短波長レーザーを重畳させ穴あけ加工した試験片では、引張と圧縮強度はともに7%に強度低下を抑制した。一方、短繊維型熱可塑性樹脂CFRTP試料（射出成形）では、加工速度7m/min以上、熱損傷領域 $100\mu\text{m}$ 以下で切断でき、参照強度（機械加工後の試験片の強度）に対して目標値（参照強度に対して10%未満の強度低下の抑制）を大幅に上回る強度の実現に成功した。

CFRPと金属の接合加工技術では、金属に高張力鋼を用いて接着剤をレーザーで瞬時に加熱する方法で中間目標値である50MPa以上の引張せん断強度を得ている。また、レーザー加工試験片の反応層領域では低応力場が生成すること、反応層厚さは繊維配向によって異なること、樹脂の種類によって熱反応層の生じ方が異なること、反応層厚さと強度には相関関係があることを明らかにし、引張・圧縮・疲労等の強度評価を系統的に行い、強度評価手法を構築した。

表Ⅲ2.5.3 中間目標と最終目標に対する各種強度値

研究開発項目	評価項目と目標値			研究成果 CFRP系 (PAN[0/90]3mm厚)	研究成果 CFRTP系 (射出成形3mm厚)
		中間目標	最終目標		
1) 切断加工技術の開発	切断加工速度	2m/min以上	6m/min	6.0m/min (QCWレーザー 3.3kW_CW, 3.6m/s)	7.7m/min (QCWレーザー 2kW_CW, 3.6m/s)
	反応層厚み	$500\mu\text{m}$ 以下	$100\mu\text{m}$ 以下	平均 $93\mu\text{m}$ (QCWレーザー 3.3kW_CW, 3.6m/s)	平均 $89\mu\text{m}$ (QCWレーザー 2kW_CW, 3.6m/s)
	引張強度	15%未満の低減*	(10%未満の低減)*	4.3%* (QCWレーザー 3.3kW_CW, 3.6m/s)	6.1%* (QCWレーザー 2kW_CW, 3.6m/s)
	圧縮強度	—	(10%未満の低減)*	5.1%* (QCWレーザー 3kW_CW, 3.6m/s)	3.8%* (QCWレーザー 2kW_CW, 3.6m/s)
	疲労強度( $10^6$ 回)	—	(10%未満の低減)*	5.3%* (QCWレーザー 3.3kW_CW, 3.6m/s)	5.0%* (QCWレーザー 2kW_CW, 3.6m/s)
2) 穴あけ加工技術の開発	引張強度	—	(10%未満の低減)*	7%* (IR+3 $\omega$ 重畳)	
	圧縮強度	—	(10%未満の低減)*	7%* (IR+3 $\omega$ 重畳)	
3) 接合加工技術の開発	引張せん断強度	50MPa	—	51.2MPa	

\*参照強度（機械加工）に対して

### III. 研究開発成果について

#### 2.6 研究開発項目1 「CFRP 切断加工技術の開発」

##### 「(3) パルスレーザーCFRP 用加工システムの開発」の成果

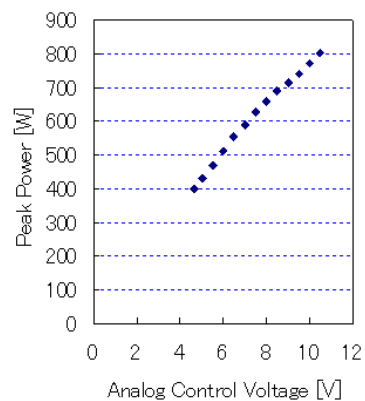
(古河電工、アマダミヤチ、新日本工機、三菱化学、産総研 実施)

#### 2.6.1 2kW-QCW ファイバーレーザー装置

プロジェクトの中で、本開発については平成 23 年度に開始の着手を行った。初年度はシングルモードファイバー出力で、平均出力 250W、ピーク出力 700W、パルス幅  $200\mu\text{sec}$  を目標とした。最終的にはピーク光強度 800W、平均光強度 500W を実現し、光学ユニットと電源ユニットからなる試作機を 2 式製作し、産総研に設置した。1 式は粉末積層成形機 (3D プリンタ、産総研・東事業所内)、もう 1 式は CFRP 加工試験機 (産総研・つくば中央第 5 事業所内) に実装した。



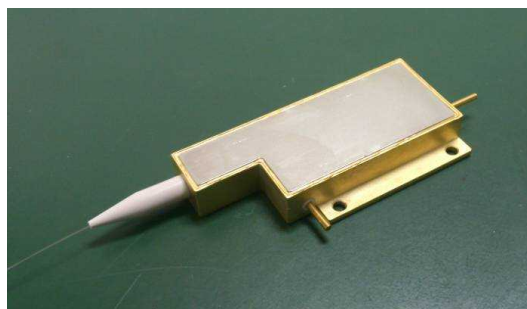
(a) 装置写真



(b) 出力特性

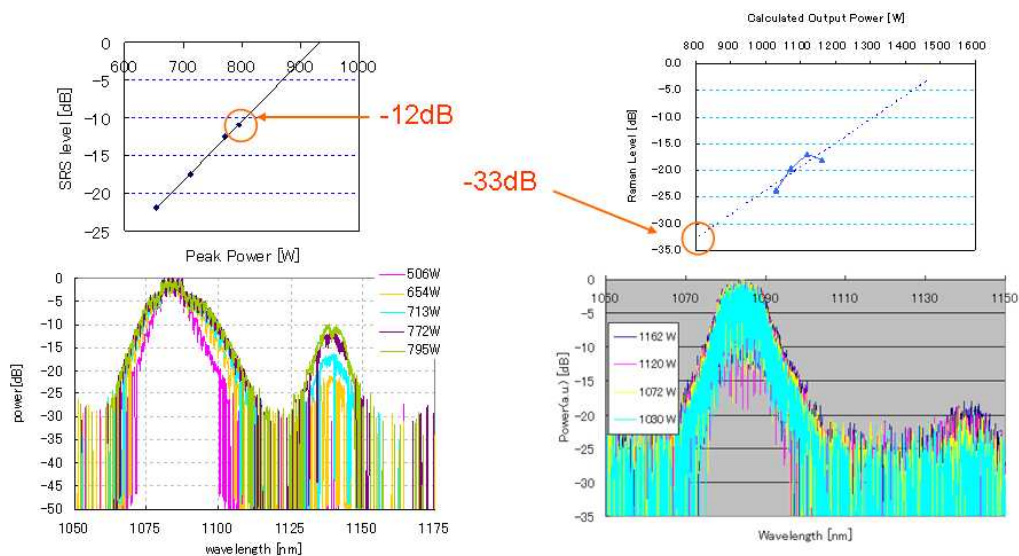
図III-2.6.1 三次元積層装置に実装された QCW ファイバーレーザー

平成 24 年度においては、特性の向上を図るために基本部品の特性向上を目指した。励起半導体レーザーの特性向上を狙い、6 個の LD 素子を空間結合にて 1 本の NA0.15、コア径  $105\mu\text{m}$  のマルチモードファイバーに結合させる励起光源 LD モジュールの開発をおこなった。LD 電流値 10A で光結合効率 92% を達成し、これにより駆動電流 10A の条件で光ファイバー端出力値で 50W を実現した。さらに 10kHz-Duty 比 10% (パルス幅  $10\mu\text{s}$ ) の QCW 駆動にて 22A の駆動電流で 100W のピーク出力を達成した。



図III-2.6.2 50W 6LD-MM 励起レーザーモジュール

平成 24 年度は、平成 23 年度の成果を基に、1kW 超級の尖頭光強度を出力可能なシングルモード QCW ファイバーレーザーの達成に向けて、光学構成を大きく変更した。第一に、非線形成分の増大を抑制するためにファイバー長の最適化を検討した。第二に、励起光-信号光変換効率の向上のために励起波長を 915nm から 975nm に変更した。第三に、出力向上のためにレーザーダイオードを定格出力 25W から 55W のレーザーに変更した。結果、1,160W における非線形成分が-17dB と良好な結果が得られ、前年度試作機と同じ 800W にて比較すると-20dB、すなわち 100 分の 1 まで低減した。



図Ⅲ-2.6.3 非線形(SRS)改善

また、レーザーダイオード変更に伴って印加電流が増大することから、レーザーの高速駆動を維持・向上するために電流分配機構とドライブ回路の改良と評価を実施した結果、立ち上がり時間は  $20 \mu\text{s}$  となり、前年度試作機と比較して 4 倍の高速化を実現した。

平成 24 年度の成果を新規に設計したレーザー筐体に取り入れて、ピークパワー 1,160W として試作機を作成した。産総研サイトに設置し、加工評価を開始した。図Ⅲ-2.6.4 が作成した試作レーザーである。

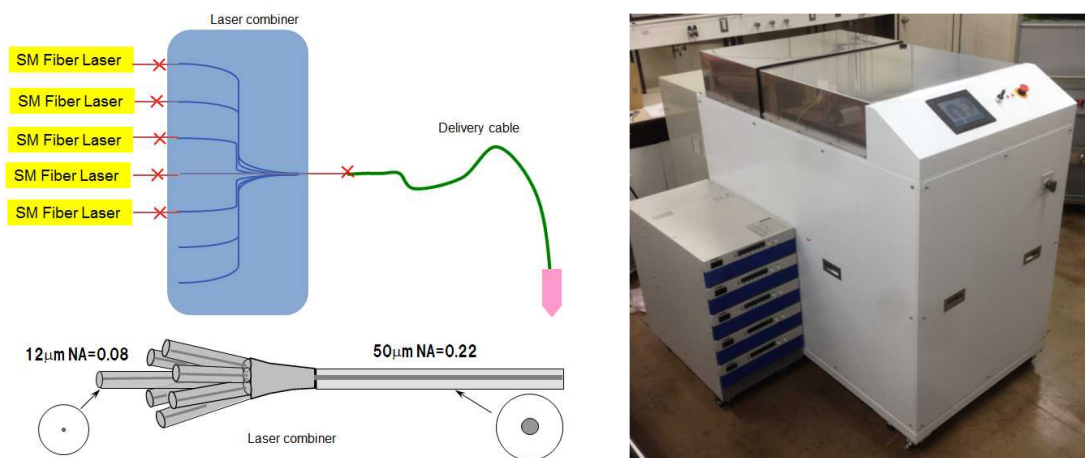


図Ⅲ-2.6.4 24 年度製作 QCW ファイバーレーザー(1.16kW ピーク)

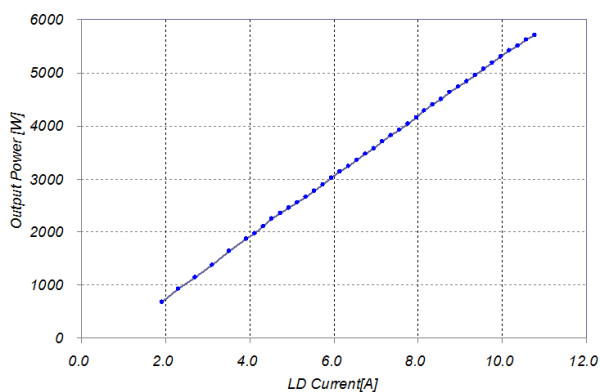
平成 25 年度はさらなる平均出力とピーク出力の向上を目指し、24 年度に得られたシングルモードファイバーレーザーを図Ⅲ-2.6.5 に示す様に多重化する形でマルチモードピーク出力で 6kW のファ



イバーレーザーの製作を目指した。励起半導体レーザーの特性向上、ファイバーレーザーキャビティの非線形低減、ファイバーレーザーの制御性の向上を進め、50 $\mu\text{m}$  コアのファイバーから図III-2.6.6の通りピーク出力6kWを実現した。また平均出力についても最大4kWまで確認し、CFRPの切断加工試験を実施した。

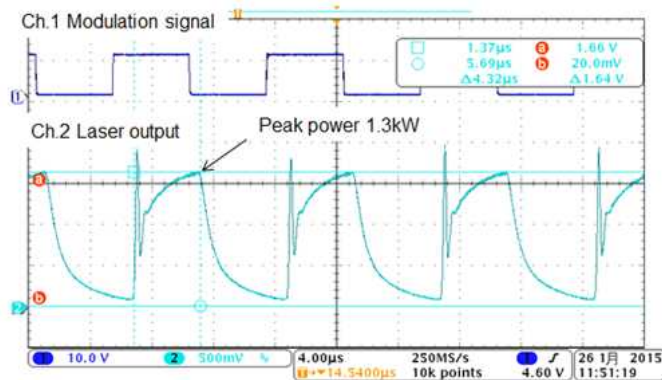


図III-2.6.5 6kW ピークマルチモードファイバーレーザーの構成と外観



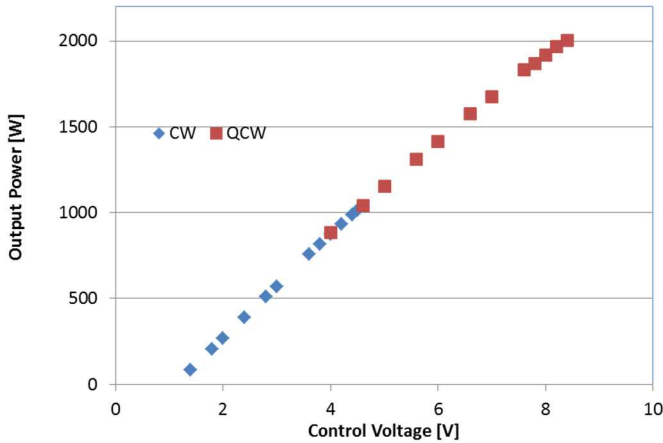
図III-2.6.6 6kW ピークマルチモードファイバーレーザーの出力特性

平成 26 年度は 2 つの装置の開発を実施した、制御回路を見直し高速変調性能を向上させ、図III-2.6.7に示すように100kHzで2 $\mu\text{sec}$ 以下のパルス立ち上がり特性を確認した。



図III-2.6.7 シングルモードファイバーレーザーの100kHz動作

また、シングルモードファイバーレーザーキャビティの非線形低減を進めることにより、図III-2.6.8に示す通りパルスピーク出力2kWを達成した。

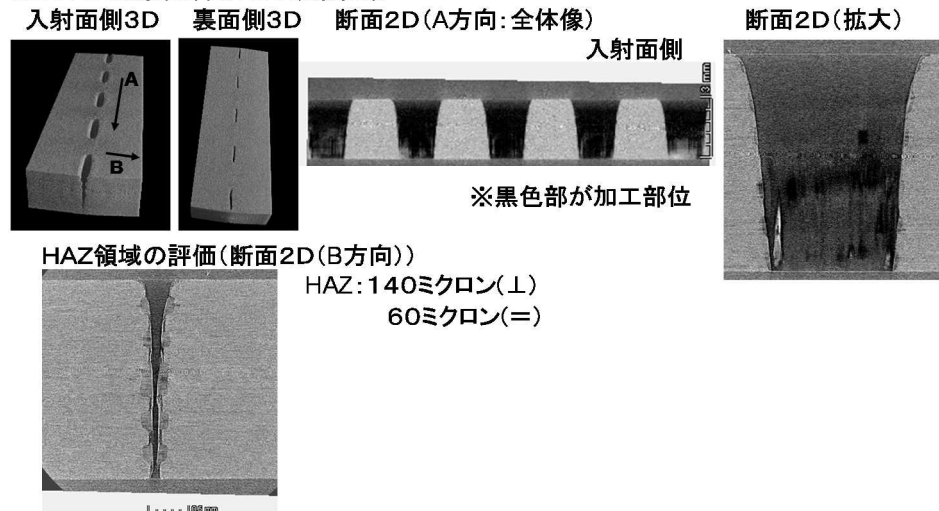


図Ⅲ-2.6.8 シングルモード 2kW 出力特性と外観

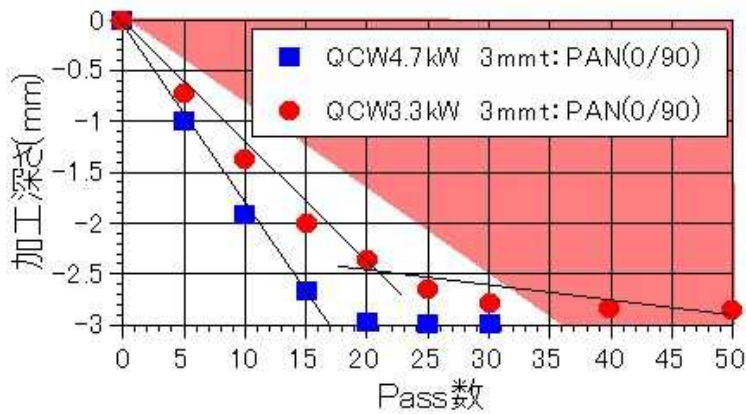
6kW ピークマルチモードファイバーレーザーの光出力を 4.7kW (実測)、800Hz duty40% に設定し、PAN(0/90)連続繊維エポキシ樹脂 CFRP (3mmt) に単重線で、ビーム走査 3.6m/s にて照射したところ、30 パス (7.2m/min) で完全切断することができた。XCT 装置で評価した熱損傷領域は、100 $\mu$ m であった (図Ⅲ-2.6.9)。照射パス数と加工深さの関係は大部分の領域で直線関係が得られることが判明した (図Ⅲ-2.6.10)。

PAN(0/90) 3mmt 単重線加工  
 レーザー QCWピーク6kW 800Hz duty40%  
 スキャナ 3.6m/s f306mm →入射表面側の加工線長:2.4mm  
 パス数 裏面到達22パス(表面繊維配向方法と平行照射)

◎30パス照射試料のXCT観察結果



図Ⅲ-2.6.9 30 パス照射試料のXCT観察結果  
 PAN(0/90)連続繊維エポキシ樹脂 CFRP (3mmt)



図Ⅲ-2.6.10 照射パス数と加工深さの関係  
PAN(0/90)連続繊維エポキシ樹脂 CFRP (3mmt)

### 2.6.2 阪大実験用加工システムの開発

大阪大学で開発するナノ秒パルスの高出力レーザー発振器について、CFRPの加工性能の評価実験を実施するための加工システムの開発を行う。対応する発振器の主仕様を表Ⅲ-2.6.1に示す。

表Ⅲ-2.6.1 対応発振器主仕様

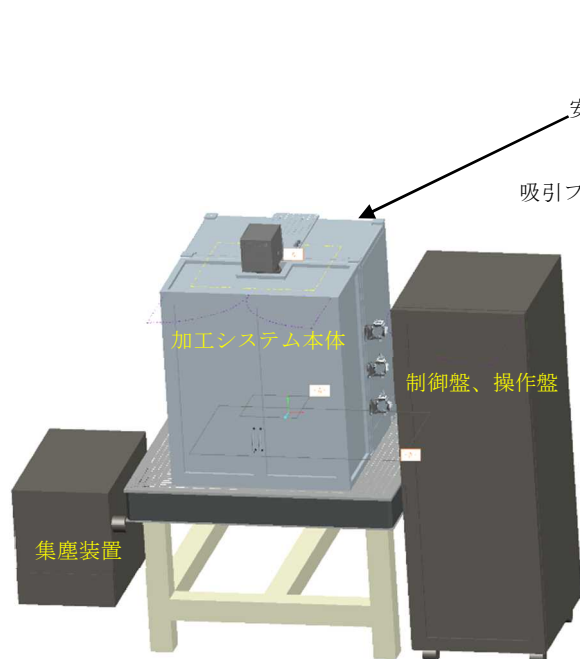
	平成 25 年度設置システム			平成 26 年度設置システム
	波長 (nm)	1,064	532	355
平均出力 (W)	500			1,500
周波数 (kHz)	150～			150～
パルス幅 (ns)	0.4～			0.4～

本実験用加工システムの主仕様を以下の表Ⅲ-2.6.2に示す。

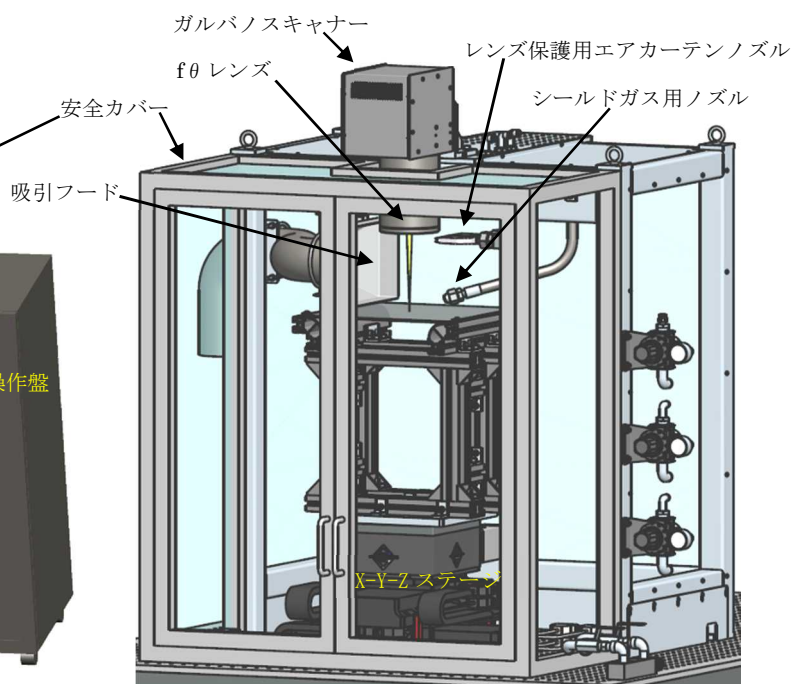
表Ⅲ-2.6.2 阪大実験用加工システム主仕様

ガルバノスキャナースキャン速度 (m/sec)	～15
ガルバノスキャナースキャンエリア (mm)	50×50
入射ビーム径 (mm)	φ20 以下
ステージ加工エリア (mm)	200×200
ステージ加工速度 (m/sec)	0.5
周辺装置	安全カバー、集塵システム

図Ⅲ-2.6.11は本実験用加工システム全体の外観である。加工中は粉塵と煙および異臭が発生するので、装置全体を安全カバーで覆い、内部を吸引して集塵、集煙し脱臭するシステムとなっている。



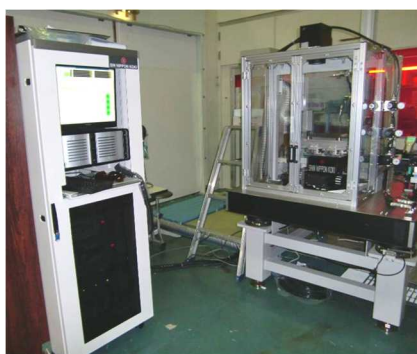
図III-2.6.11 加工システム全体外観



図III-2.6.12 加工システム本体外観

図III-2.6.12 は実験用加工装置本体の外観図である。ガルバノスキャナーシステムと X-Y-Z ステージとの組み合わせで、強度評価用の引張試験片（長さ 200mm）の作製も可能としている。また、レンズ保護用のエアカーテンノズルおよび加工点をシールドするガス用のノズルを装備している。

平成 25 年度に 500W 対応の CFRP 加工実験用システムを大阪大学に設置し、大阪大学にて開発したナノ秒パルスレーザー発振器の CFRP 加工評価実験を実施した。図III-2.6.13 は装置の設置情景である。集塵装置（図III-2.6.14）は脱臭が必要なため活性炭フィルター付を採用した。



図III-2.6.13 加工システム全体



図III-2.6.14 集塵装置外観



図III-2.6.15 2倍波照射実験

先ず初めに基本波（ $1\omega$ ）の 125W、次に 2 倍波（ $2\omega$ ）の 50W、3 倍波（ $3\omega$ ）の 20W について CFRP 加工評価実験を実施した。レーザーの照射条件を表III-2.6.3 に示す。

使用した材料は PAN 0/90 度、板厚 2mm 材である。基本条件出し、X 線 CT 観察用サンプル作成、および強度評価用試験片を作製した。図III-2.6.15 は 2 倍波照射実験の情景である。

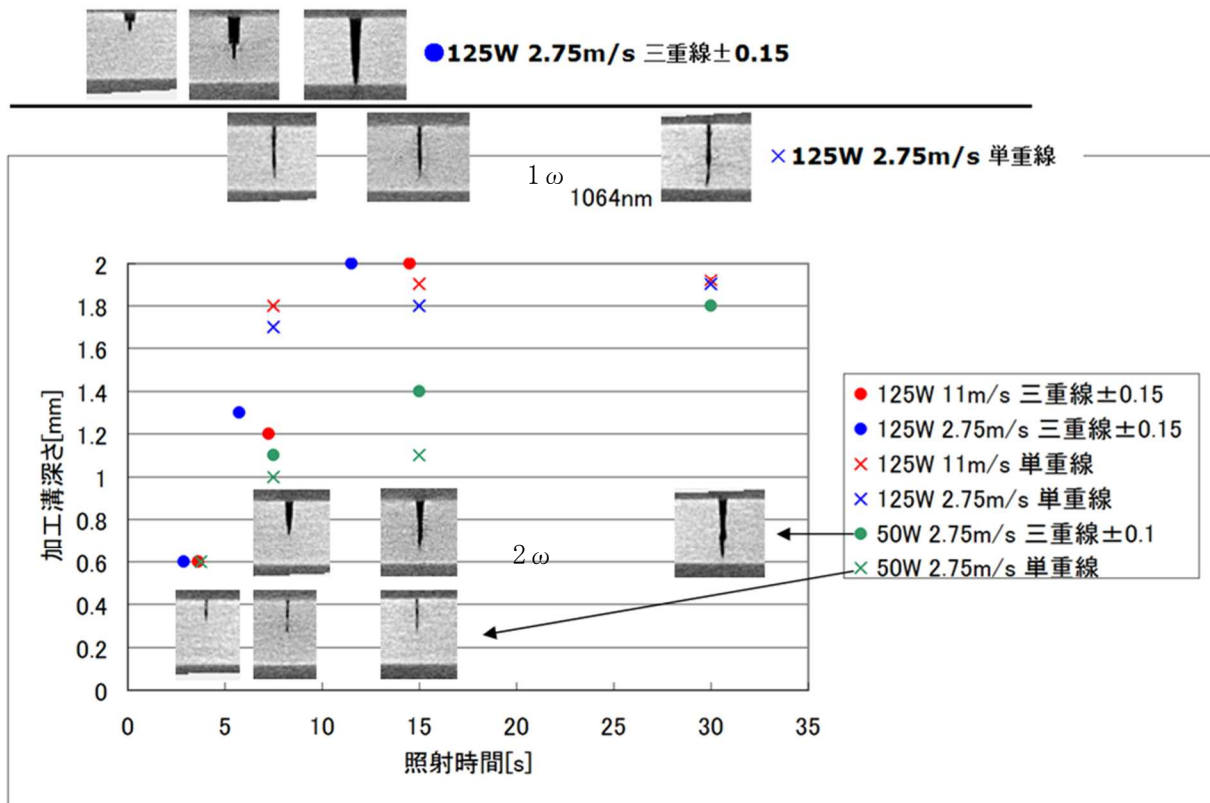
表Ⅲ-2.6.3 レーザー照射条件

波長 (nm)	1064 (1 $\omega$ )	532 (2 $\omega$ )	355 (3 $\omega$ )
平均出力 (W)	125	50	20
パルス幅 (ns)	10		
周波数 (kHz)	167		
掃引速度 (m/sec)	2.75~11		

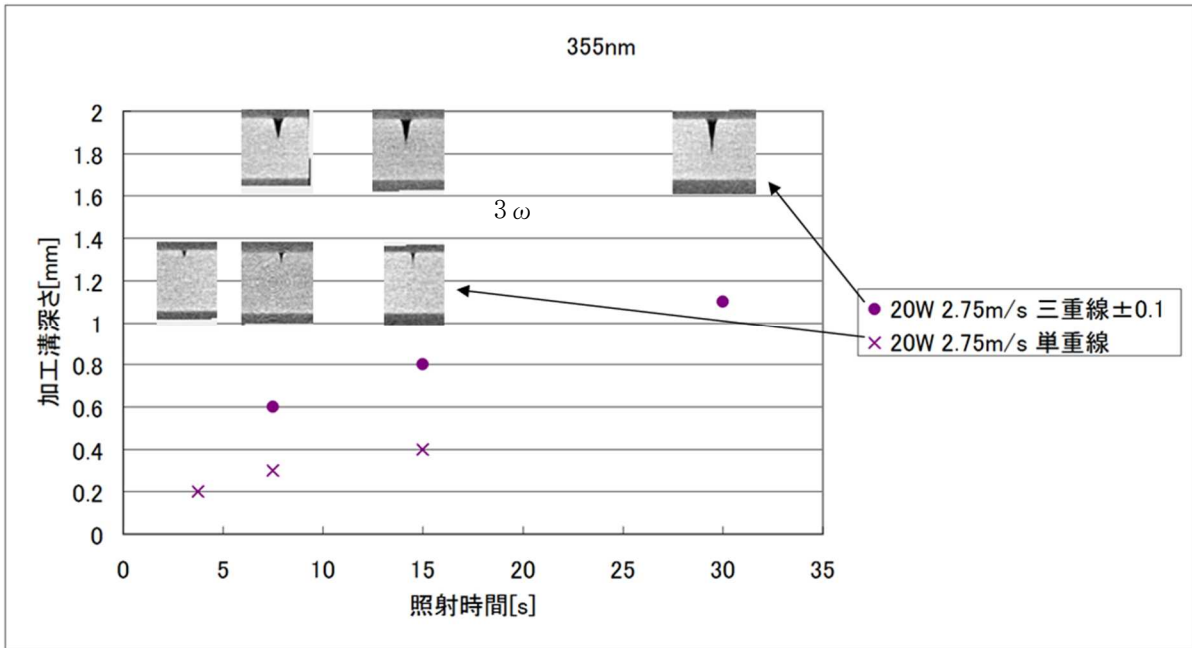
実験結果を図Ⅲ-2.6.16、図Ⅲ-2.6.17に示す。横軸に照射時間、縦軸に加工溝深さをとり、加工が進展していく状況を示している。図Ⅲ-2.6.16は基本波と2倍波の加工状況を、図Ⅲ-2.6.17は3倍波の加工状況を示している。図中の写真は、X線CTにより熱影響層を観察したものである。

単重線加工では完全切断に至らなかったが、カーフ幅を広げる多重線加工をすることで、完全切断が可能となった。

3倍波については、完全切断に至らなかった。

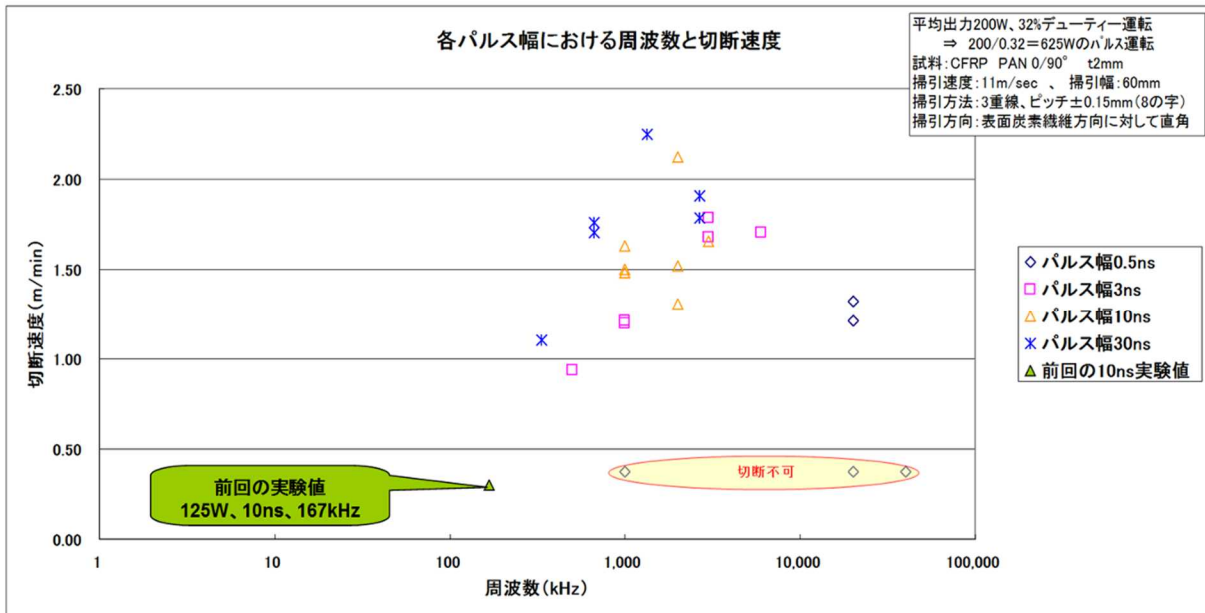


図Ⅲ-2.6.16 基本波、2倍波の加工溝進展状況

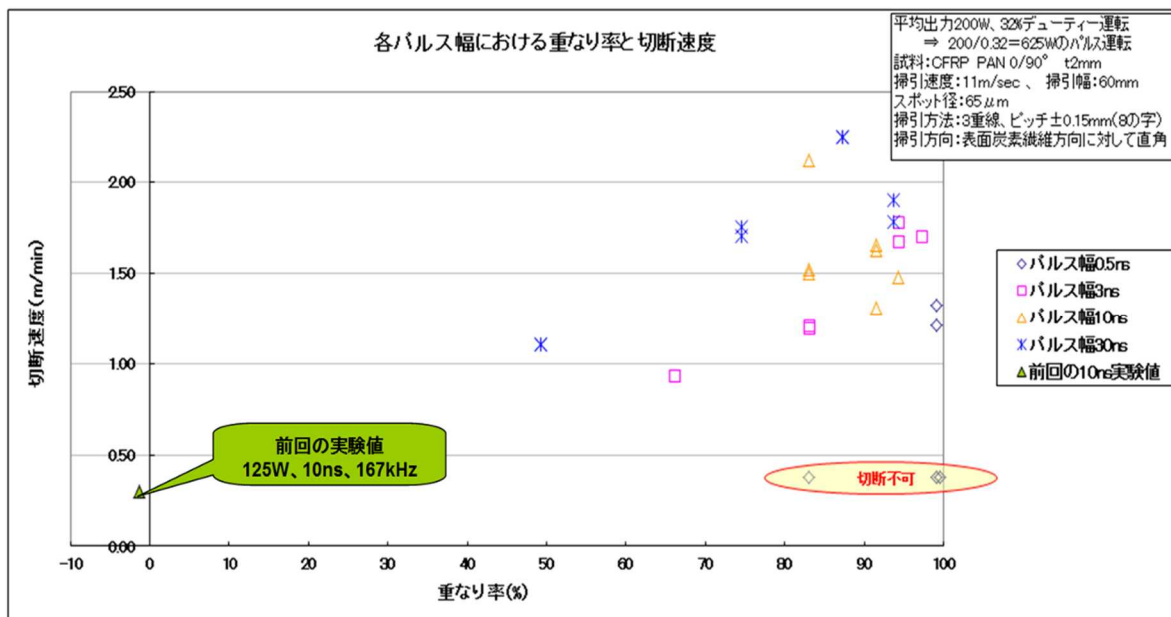


図III-2.6.17 3倍波の加工溝進展状況

平成26年度に入り、基本波平均出力200WでのCFRP加工評価実験を実施した。パルス幅を0.5ns～30ns、周波数を667kHz～20MHzに変化させて、切断速度を調査した。図III-2.6.18、図III-2.6.19にテスト結果をグラフ化した。図III-2.6.18は切断速度への周波数の影響を、図III-2.6.19は切断速度へのスポットの重なりの影響をそれぞれ示している。

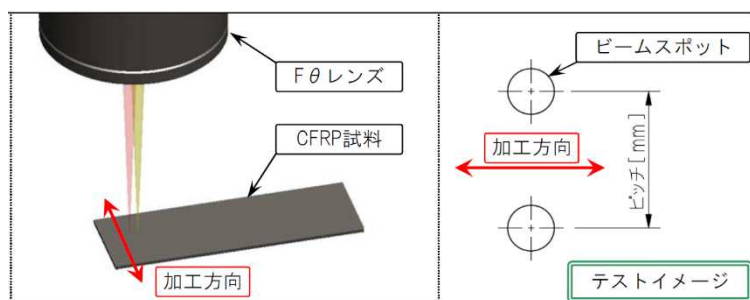


図III-2.6.18 パルス幅、周波数の加工速度への影響



図III-2.6.19 スポット重なり率の加工速度への影響

これまでの実験では、シングルのビームで多重線加工することで、より早く高品質な切断ができることが分かった。今回は、多重線をダブルのスポットで一度に加工するダブルスポット加工実験を実施した。図III-2.6.20にダブルスポット加工実験の模式図を、表III-2.6.4に実験の基本条件を示す。

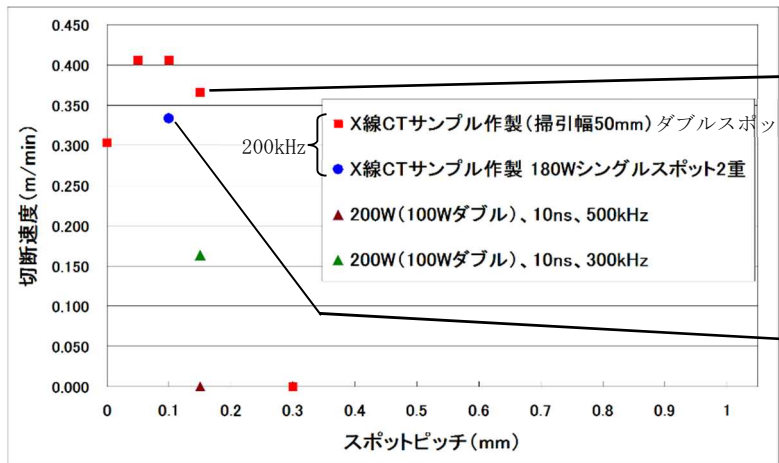


図III-2.6.20 ダブルスポット加工実験模式図

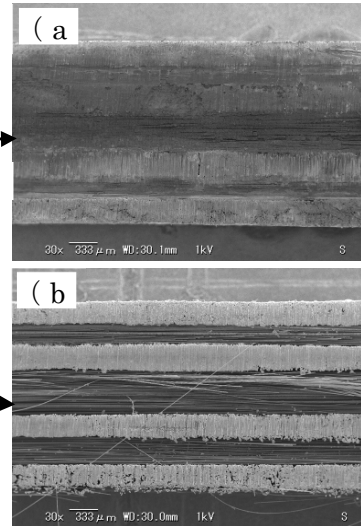
表III-2.6.4 加工実験基本条件

[基本条件]
スポット径: $\phi 60\mu\text{m}$
アシストガス圧: 0.1MPa
焦点距離: 300mm
掃引速度: 11m/s
加工長さ: 60mm
照射方向: 表面繊維に対して交差
試料: PAN 0/90(t=2.0mm)・50X150mm

ダブルスポット切断の実験結果について、切断速度とスポットピッチの関係を図III-2.6.21に、断面のSEM写真を図III-2.6.22に示す。ダブルスポット切断とシングルスポット切断を比較すると、切断速度には大きな差は無いが、切断面の品質についてはダブルスポット切断の方が良いことが分かった。



図III-2.6.21 ダブルスポットピッチの加工速度への影響



図III-2.6.22 切断面 SEM 写真

- (a) ダブルスポット切断
- (b) シングル2重線切断

さらなる高出力ナノ秒パルスレーザーにてCFRPの加工実験をするべく、基本波1.5kW対応の加工システムを平成26年11月に大阪大学に設置した。

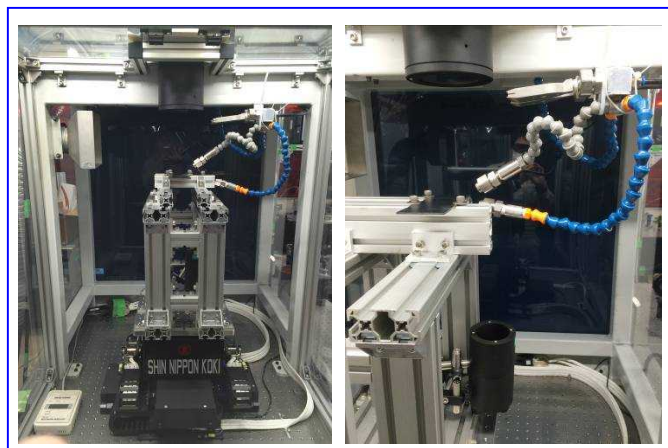
図III-2.6.23は高出力対応加工システム制御装置の外観である。図III-2.6.24は本加工システムのガルバノスキャナー本体の組み込み時外観である。高出力レーザー照射実験の情景を図III-2.6.25に示す。レーザー照射条件を表III-2.6.5に示す。



図III-2.6.23 高出力対応ガルバノ/ステージ制御装置外観



図III-2.6.24 高出力対応ガルバノシステム外観



図III-2.6.25 高出力レーザー照射実験

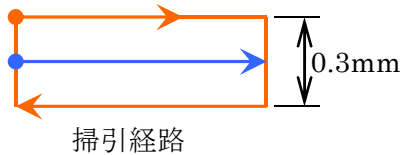


表Ⅲ-2.6.5 レーザー照射条件

波長 (nm)	1064 (1 $\omega$ )
平均出力 (W)	800
パルス幅 (ns)	5
周波数 (kHz)	600
掃引速度 (m/sec)	3.3~11

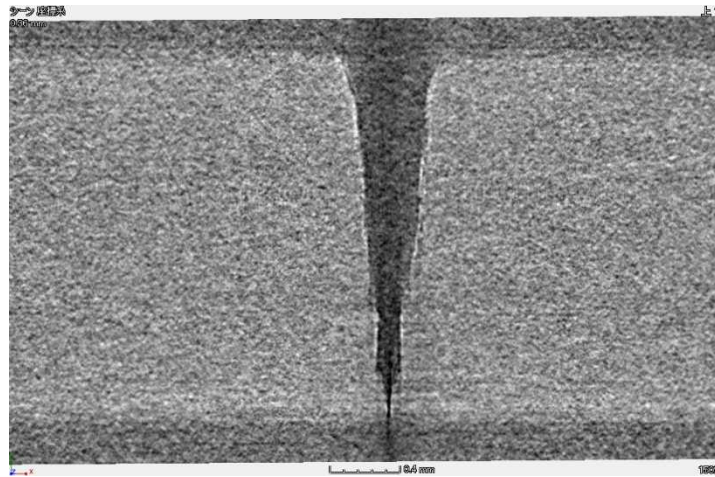
表Ⅲ-2.6.6 レーザー掃引条件

条件	パス数	換算加工速度
二重線(0.3mm ピッチ)	200	2.2m/min
単重線	100	



材料 PAN0/90、t2mm は単重線では完全切断できなかつたが、表Ⅲ-2.6.6 に示すような多重線加工により、換算加工速度 2.2m/min で完全切断することができた。

この試料を XCT 装置で評価したところ、熱損傷領域は検出できなかつた (5 ミクロン以下に相当する、図Ⅲ-2.6.26)。パルス光照射による優位性が明らかとなった。



図Ⅲ-2.6.26 換算加工速度 2.2m/min 加工試料の XCT 観察結果  
PAN(0/90)連続繊維エポキシ樹脂 CFRP (2mmt)

#### 2.6.2.1 最終型阪大実験用加工システムを用いた CFRP 試験片の加工特性評価

大阪大学で開発したナノ秒パルスの高出力レーザー発振機最終機を用いて、CFRP加工性能の

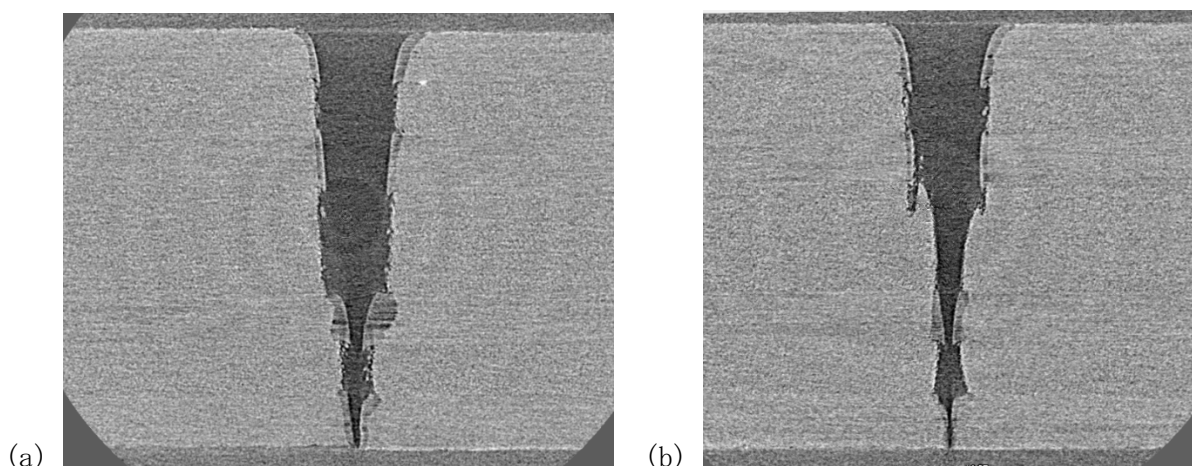
評価実験を実施した。表Ⅲ-2.6.7にCFRPおよびCFRTP各1種類の加工試験片の切断結果を示す。また、図Ⅲ-2.6.27および図Ⅲ-2.6.28に加工試料のXCT観察結果を示す。

これらの結果から、CFRP材料においては最高値として、速度4m/minおよび反応層30 $\mu$ m以下を得た。また、CFRTP材料においては、速度5m/minおよび反応層80 $\mu$ mを実証できた。熱損傷が加工部周囲に伝搬しやすい連続繊維型CFRP材料に対して、つくば拠点の加工機システムでの実験結果と比較すると、著しく小さな反応層厚みを得ていることが特筆される。本検討からキロワットの高出力を有するナノ秒パルス光が反応層厚み低減に効果大きいことが実証された。

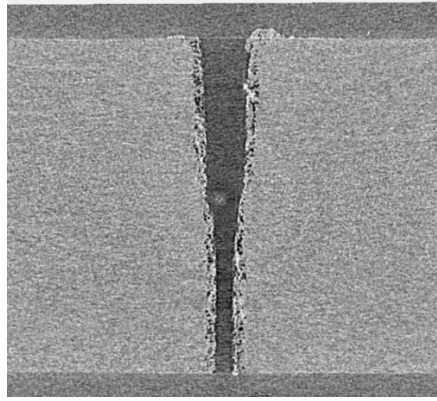
- ・加工実証試験に用いた大阪大開発機の性能スペック：
  - 1 ミクロン発振波長のキロワット平均出力ナノ秒パルス光 (1.1kW、5ns)
- ・照射パラメータ： レーザスポット径： $\Phi$ 80~100 $\mu$ m、  
 ビーム走査速度：11m/s、走査距離：53mm

表Ⅲ-2.6.7 阪大実験用加工システムを用いたCFRP試験片の加工結果

試料 No.	材質	出力 [W]	走査パターン	パス数		合計パス数	焦点位置 [mm]	換算切断速度 [m/min]	周波数 [kHz]	パルス幅 [ns]	試料
				①	②						
1	CFRP	1150	2重(0.3mm) +単重線	100	80	180	-2	3.89	4000	5	PAN 連続繊維 0/90 配向 エポキシ樹脂
2	CRRP	1100	2重(0.3mm) +単重線	100	80	180	-2	3.89	4000	5	PAN 連続繊維 0/90 配向 エポキシ樹脂
3	CFRTP	1300	単重線	160		160	-1.5	4.37	1000	5	PAN 短繊維 ナイロン樹脂
4	CFRTP	1300	2重(0.3mm) +単重線	80	60	140	-1.5	5.0	1000	5	PAN 短繊維 ナイロン樹脂



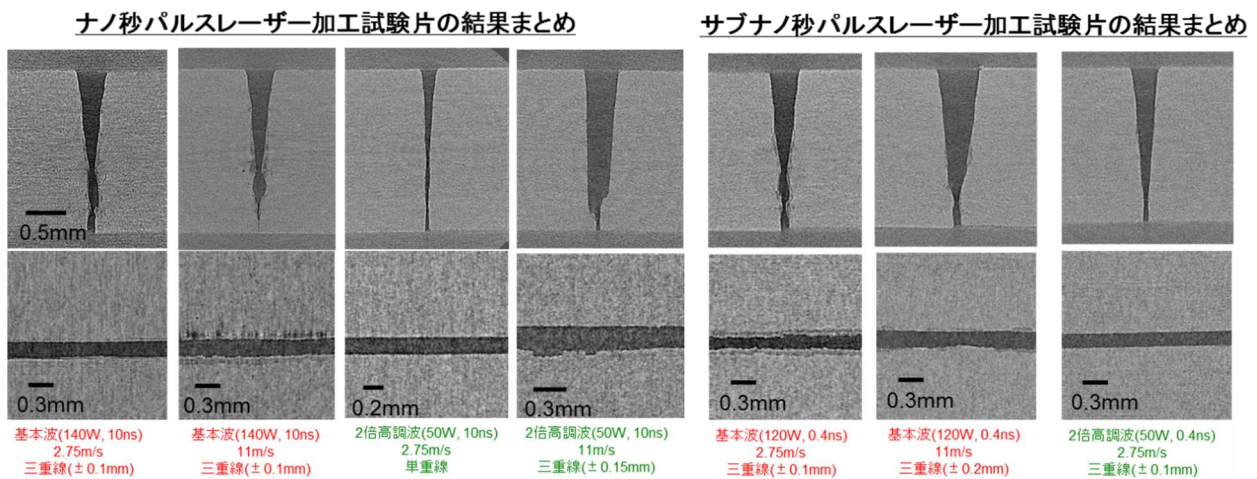
図Ⅲ-2.6.27 換算加工速度3.89m/min 加工試料のXCT 観察結果；PAN(0/90)連続繊維エポキシ樹脂CFRP、(a)試料No.1、(b)試料No.2.



図Ⅲ-2.6.28 換算加工速度5.0m/min 加工試料のXCT 観察結果；PAN短繊維ナイロン樹脂CFRTP、試料No.4.

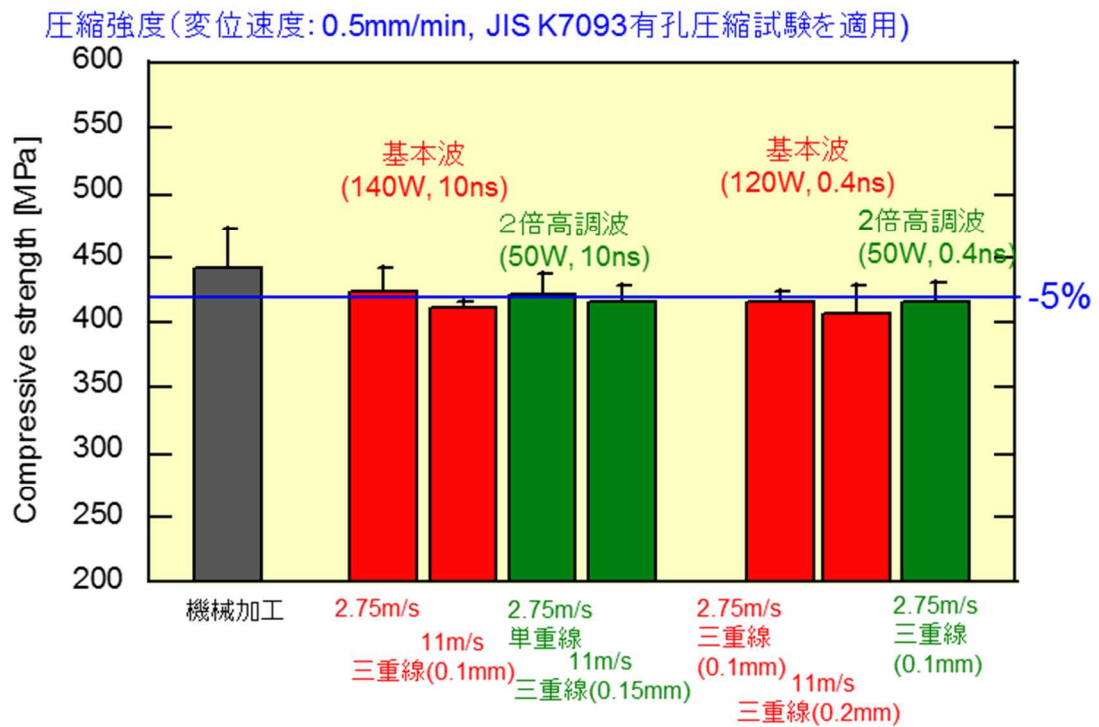
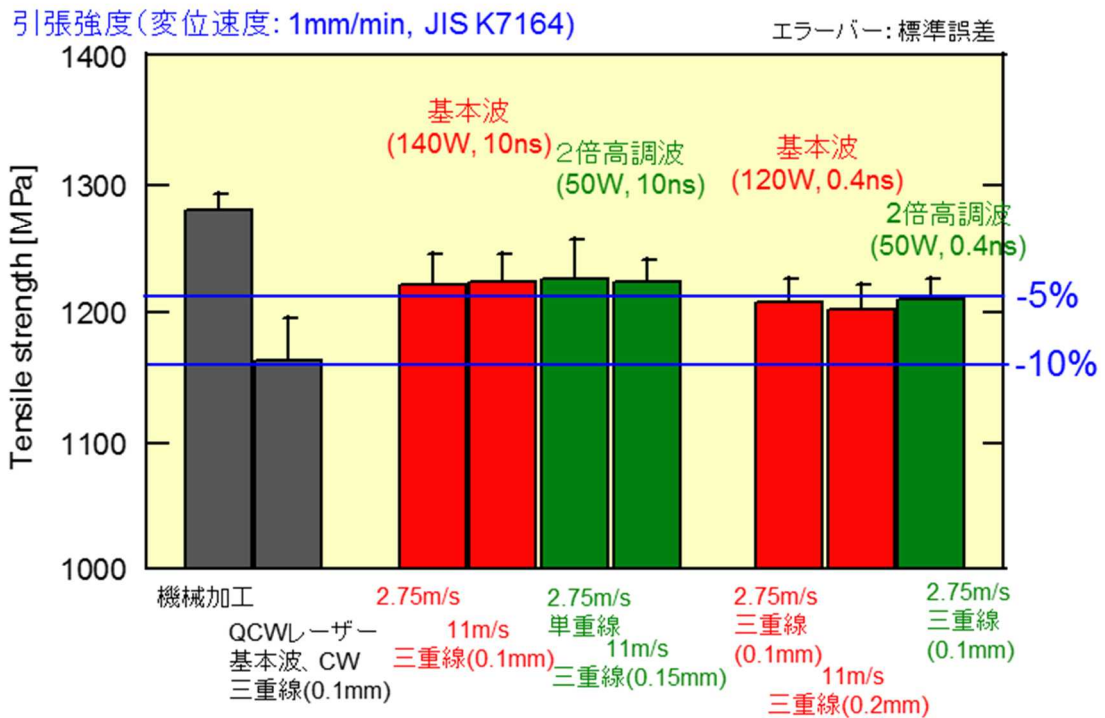
### 2.6.2.2 阪大実験用加工システムを用いて作成した試験片の強度評価

大阪大学で開発したナノ秒パルスの高出力レーザー発振器について、CFRPの加工性能の評価実験を実施するための加工システムの開発し、その強度評価を引張試験および圧縮試験にて実施した。図Ⅲ-2.6.29には本試験に用いたクロスプライ積層板(PAN0/90, 2mm厚)のマイクロX線CT画像を示す。図中にはレーザーの各加工条件を示してある。ナノ秒およびサブナノ秒パルスレーザーでは基本波においては若干熱反応層が見られるが、100 $\mu$ m前後である。一方、2倍高調波ではほぼ10 $\mu$ m程度か、あるいはほとんど観察できない。



図Ⅲ-2.6.29 阪大ナノ秒・サブナノ秒パルスレーザーを用いて加工したクロスプライ積層板(PAN0/90, 2mm厚)のマイクロX線CT画像

図Ⅲ-2.6.30にはナノ秒・サブナノ秒パルスレーザーを用いて加工した試験片の引張強度(変位速度1mm/min, JIS K7164)および圧縮強度(変位速度0.5mm/min, JIS K7093有孔圧縮試験を適用)の結果を示す。ナノ秒・サブナノ秒パルスレーザー加工では、機械加工と比較して3~5%前後に強度低下が抑制できている。特に、ナノ秒でかつ2倍高調波の加工条件が若干強度が高い傾向が見られる。なお、これらの破壊形態はほぼ機械加工試験片に等しく、熱反応層での繊維の乱れはほとんど見られなかった。



図Ⅲ-2.6.30 阪大ナノ秒・サブナノ秒パルスレーザーを用いて加工したクロスプライ積層板 (PAN0/90, 2mm厚)の引張強度および圧縮強度

### 2.6.3 まとめ

本プロジェクトで開発した技術の波及産業としては自動車産業と航空機産業を想定している。自動車産業では量産自動車に対しても CFRP 素材の導入の検討が行われており、省エネ・CO<sub>2</sub>削減効果を向上させるために CFRP 素材の導入が積極的に行われるものと考えられる。また、自動車や航空機等輸送機器製造業界の輸送機器製造プロセスに事業展開するだけでなく、以下の関連分野にも大きく波及すると考えている。

- ・ 二次電池の高速シーム溶接
- ・ 銅系高難度レーザー溶接材料
- ・ 汎用材料への高速レーザー切断
- ・ 汎用材料への高速レーザー穴あけ

プロジェクトで開発した加工装置システムは立体成型品に対しても加工が適用できるので（図 III-2.6.31）、広汎な製造業分野に応用することができる。



図III-2.6.31 立体成型 CFRP 体へのレーザー加工の例

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.7 研究開発項目2「大面積表面処理技術の開発」

##### 1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発」の成果 (株式会社アルバック 実施)

平成 22 年度～中間評価の期間においては、ワイドビームのデザインと大型異形レンズ加工環境開発を実施し、実際のアニールデモ環境の構成要素に一定の目途を立てた。これを通じてディスプレイの評価への見通しを得た。

##### 2.7.1 事業の背景・目的

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」(中間評価) 第1回分科会 資料5-1「事業原簿(公開) 2.15.1 Ⅲ-16-1 項」を参照。

##### 2.7.2 研究開発目標と根拠

同「事業原簿(公開) 2.15.2 Ⅲ-16-3 項」を参照。

##### 2.7.3 研究開発目標と達成状況

同「業原簿(公開) 2.15.4～2.15.6 (Ⅲ-16-7～Ⅲ-16-9 項)」を参照。

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	最終目標	目標		
Ⅲ-2 大画面表面処理技術の開発	大型レンズ研磨装置	・大型異形光学部品の研磨加工技術を開発すること。	研磨幅: 500mm	850mm	○
	ワイドビーム光学系のシミュレーション	・光学シミュレーション技術を確立すること。	ビーム幅: 500mm 集光幅: 20 μm 照射均一性: ±7%	750mm 20 μm ±7%	○
	ワイドビームの形成	・高精度加工された異形レンズ類を用いた高度ホモジナイズ技術とワイドビーム整形光学系技術を開発する	ビーム幅: 500mm 集光幅: 20 μm 照射均一性: ±7%	750mm 20 μm ±7%	○
	ビームモニタリング	・ワイドビームの形状及び照射均一性を評価するためのビープロファイラーを開発する。	測定精度: ±2%以内 測定分解能: 5 μm以下	±2% 2.5 μm	○

表Ⅲ-2-7-1 各種の開発目標と達成状況一覧

中間評価以降、多岐にわたる光学的要請とレーザー発振器への要求特性、市場要請を時間軸に焼き直し、開発の加速対応をした。LTPS(Low Temperature Poly-silicon)生産ラインにおいては、G4世代からG6への生産技術の生産性向上が図られ、コストダウンと、技術の進展が見られた。この様な急激な展開の中、更なるワイドビームの拡幅目標に迫られ、大幅な見直しを行った。ワイドビームの幅は500mmを最終目標として堅持しているが、市場投入の目的を明確にするため、一気に750mm幅にまで

大幅な拡幅を行った。計画当初のボリュームゾーンとして考えていた30～40型ディスプレイサイズが急激にコモディティ化し、50～55型サイズへとボリュームゾーンが移った。加えて、中

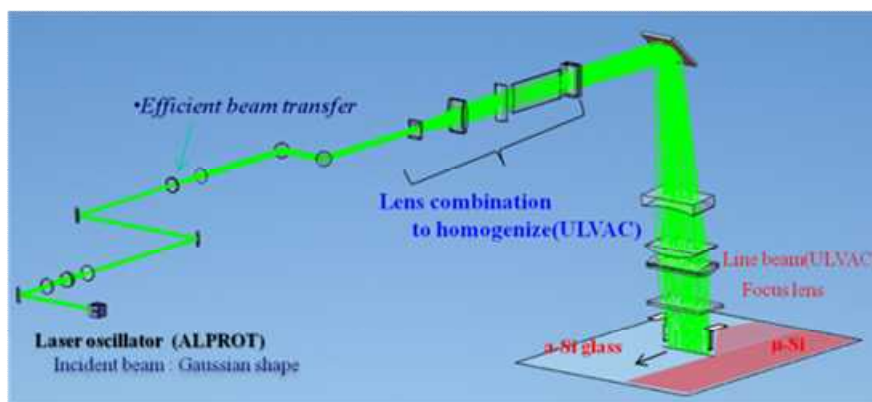
Ⅲ-2-7-(1)(事後)

小型（タブレット含む）ディスプレイ、モバイルサイズが急増へと変遷した。生産現場では、CVD装置、スパッタ装置を始め、大型化が加速し、実プロセスへの投入が図られた。

レーザーアニールシステムの開発においては、光学的要請をそのままに、大幅な拡幅設計を行った。当初、ワイドビームは 500mm を目標にしていたので、レンズ幅としては 650mm を設定していた。しかしこの市場の動きを受け、研磨加工サイズの拡幅工事を始め、最大 850mm 幅の異形レンズを加工できる環境を再構築した。同時に中間評価までに培われた研磨ムラ抑制技術の適用性を確認しつつ、大型レンズへと展開した。

ワイドビームの拡幅対応の結果を表Ⅲ-2-7-1 に示す。光学的なモデル原理そのものは変えず、拡幅したワイドビームをデザインできるとシミュレーションモデルにより解を得ていたため、その技術をそのまま踏襲した。基本的な骨格は図Ⅲ-2-7-1 に示すとおりである。

発振器からのビームを受け、ワイドビームに変形するまでの骨格を示す



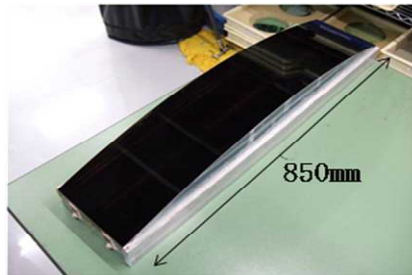
図Ⅲ-2-7-1 ワイドビームのモデリング

レーザー発振器に求めるビームには幾つかの要請をしている。最も重要なことは、アニール加工に適したパルス波形を生成する事である。アモルファスシリコン膜にレーザー光を照射して、多結晶化する瞬間的な過程では、エネルギー吸収→温度上昇→Si 溶解→温度下降→溶解 Si（過冷却状態）→多結晶出現と大まかな変遷を経る。この物理的な状態の変化を促すパルスでなければならない。また、過冷却状態から冷え固まる期間で多結晶化がすすむと理解されているが、パルスの切れ味（時間的な裾の広がり）が短くなりすぎないようにした。具体的にはパルス幅を長く設計したこと、レーザー媒質固有のテールの効果を期待した。この様にして多結晶の成長過程をできるだけ緩やかになるように工夫した。

さらに、均一なワイドビームの実現に対する技術的要請を述べる。ワイドビームでは、幅広方向には高均一性を要求する。従って、光学的ホモジナイズ(均一化)の効果が求められる。同時に、可干渉性を抑制したビーム品質を用いると、よりホモジナイズの効果が高められる。他方、ワイドビームの集光方向ではその集光性能を求めるので、ビーム品質が良いこと、大口径レンズを用いることが設計要素となる。つまり、ワイドビームでは幅広方向のビーム成分と集光ビーム成分に、それぞれ独立のパラメータを設定し、設計されている。

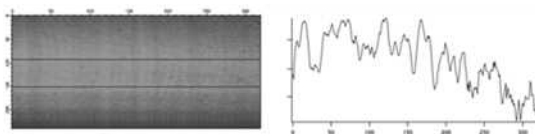
#### 2.7.4 成果の詳細

大型異形レンズの加工例を図Ⅲ-2-7-2に示す。石英を材料として、仕上げ研磨加工直後の写真である。レンズの底側には加工治工具が張り付けられている為、黒く見えている。

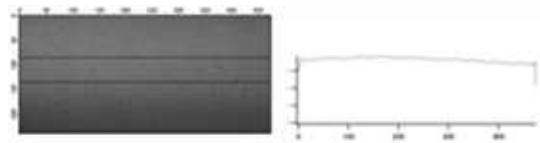


図Ⅲ-2-7-2 850mm×150 mmサイズのシリンドリカルレンズ

レンズの全面に渡って研磨ムラ等が無い研磨を、ほぼ in situ の環境を保持しながら進めることに成功した。

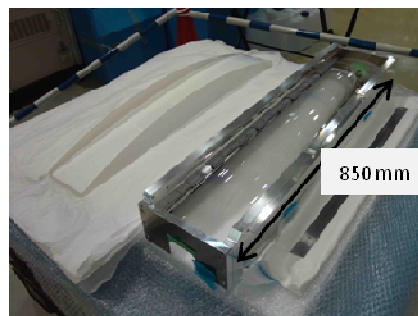


図Ⅲ-2-7-3 表面の縞が研磨ムラに相当



図Ⅲ-2-7-4 表面凹凸が抑制された表面

図Ⅲ-2-7-3では、レンズ表面に確認できた研磨ムラを可視化したものである。縞模様があることがわかる。その成分を1Dプロットしたものが右側である。触針式の段差計で測定したところ、数十 nm 程度の凹凸が確認できた。図Ⅲ-2-7-4は、研磨ムラを抑制しつつ、所望の曲率に研磨した後、表面を観察したものである。図Ⅲ-2-7-3に比べて、明らかにスムーズな表面状態であることがわかる。ガラス母材が大きい為、研磨砥粒の適切な温度環境から外れてしまう研磨部位が発生する現象が確認された。これがムラの原因の一つであった。研磨砥粒の流れや管理を方法を見直し、更には研磨面パッド材質など、非常に多くの材料を試し、適当な材料と研磨技法にたどり着く事が出来た。図Ⅲ-2-7-5には金型にセットしたワイドビーム集光レンズを示す(同図内の左側のレンズは図Ⅲ-2-7-2に同じ)。同様に研磨ムラの無い大型シリンドリカルレンズを製作することができた。



図Ⅲ-2-7-5 大型シリンドリカルレンズ(金型組み込み済みの組み合わせ集光レンズ)  
Ⅲ-2-7-(3)(事後)



## 2.7.5 知的財産、及び成果の普及

本項目のワイドビームの開発では、権利化には至らなかった。他方、複数以上の知見と共に、固有の設計値と研磨ムラ抑制技術を発展させ、確固たるものとすることができた。

波及効果としては、今後大きく展開するであろうフレキシブルディスプレイ領域での新プロセス獲得に、この大型レンズ研磨環境とワイドビーム成形・モデリング技術が活かされると期待される。

### Ⅲ 研究開発成果について

#### 2.8 研究開発項目 2 「大面積表面処理技術の開発」

##### 2) 高精度ビーム評価技術の開発」の成果 (株式会社アルバック 実施)

平成 22 年度～中間評価の期間においては、ワイドビームのデザインと大型異形レンズ加工環境開発を実施し、実際のアニールデモ環境の構成要素に一定の目途を立てた。これを通じてディスプレイの評価への見通しを得た。

#### 2.8.1 事業の背景・目的

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」(中間評価) 第 1 回分科会 資料 5-1 「事業原簿(公開) 2.17 Ⅲ-18-1 項」を参照。

#### 2.8.2 研究開発目標と根拠

同「事業原簿(公開) 2.17 Ⅲ-18-1 項」を参照。また、2.7.3 研究開発目標と達成状況の項で記したように、市場の動きが認められ、装置の大型化が図られた。この背景の中で、ビーム評価機器も仕様の見直しが求められた。750mm幅ワイドビームに適応したビームプロファイラーの仕様へと改められた。

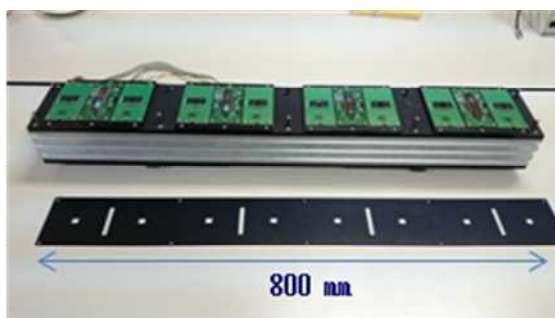
#### 2.8.3 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	最終目標	目標		
Ⅲ-2 大面積表面処理技術の開発	大型レンズ研磨装置	・大型異形光学部品の研磨加工技術を開発すること。	研磨幅: 500mm	850mm	○
	ワイドビーム光学系のシミュレーション	・光学シミュレーション技術を確立すること。	ビーム幅: 500mm 集光幅: 20 μm 照射均一性: ±7%	750mm 20 μm ±7%	○
	ワイドビームの形成	・高精度加工された異形レンズ類を用いた高度ホモジナイズ技術とワイドビーム整形光学系技術を開発する	ビーム幅: 500mm 集光幅: 20 μm 照射均一性: ±7%	750mm 20 μm ±7%	○
	ビームモニタリング	・ワイドビームの形状及び照射均一性を評価するためのビームプロファイラーを開発する。	測定精度: ±2%以内 測定分解能: 5 μm以下	±2% 2.5 μm	○

表Ⅲ-2-8-1 各種の開発目標と達成状況一覧

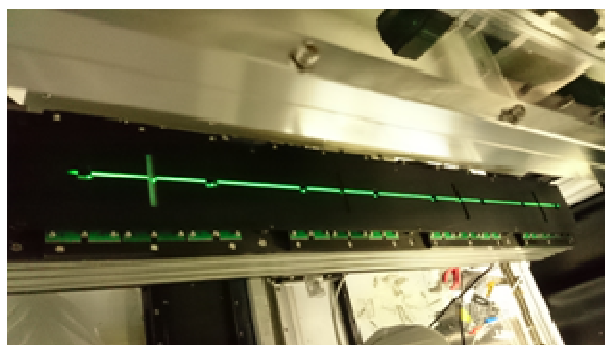
表Ⅲ-2-8-1(表Ⅲ-2-7-1に同じ)には、ビームモニタリングの拡張に伴う仕様の見直しと数値目標を示している。ワイドビームの拡張に伴い、測定機器も大型化させたビームプロファイラーの外観を図Ⅲ-2-8-1に示す。但し、測定分解能、精度等は維持した。粗調センサーと微調センサーの2種を搭載し、目的別に使い分けている。粗調センサーには1Dラインセンサーを4本用いた。黒いカバーの細長い穴に位置するところがそれにあたる。また、8個の微調センサーを搭載している。同じくカバー板の四角い穴に位置している。粗調センサーは主に、初期の光学アライメント作業時に使う。これは加工ステージの所望のワイドビームを導くための指標として用いるから

である。長手方向の平行状態や、強度分布の強弱など豊富な情報を得ながら作業者が光学アライメントをする。測定空間分解能は、センサーピクセルサイズで決まるようにし、サイズは  $5\mu\text{m}$  以下である。測定精度については、基準光源を別途準備した。それを基準にした場合のセンサー出力を用いて校正している。粗調センサーと微調センサーの受光面には、遮光フィルターを設けている。センサーはこの遮光フィルターの裏面に漏れ出た弱いビームを受光するように工夫している。従い、集光されたワイドビームの強度が最も高くなったところの近傍の情報を確実に検出できるので、焦点位置およびピーク強度情報を精度よく測定できる。

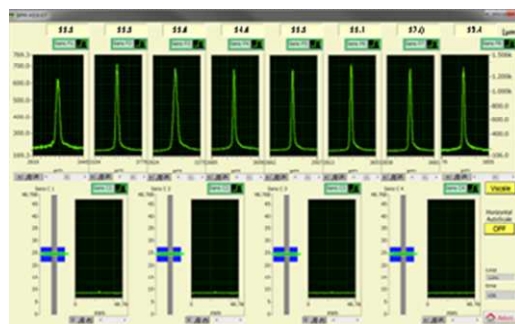


図Ⅲ-2-8-1 ビームプロファイラー外観

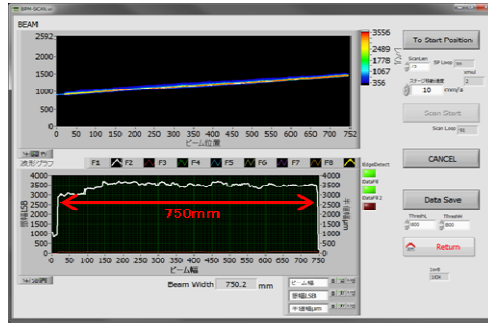
図Ⅲ-2-8-2 はビームプロファイラーのセンサー面にワイドビームが照射されている様子を示している。全幅が 800mm 程度のビーム調整を行っている例である。



図Ⅲ-2-8-2 ビームプロファイラーとワイドビーム



図Ⅲ-2-8-3 リアルタイムに観察可能なプロファイルの強度情報

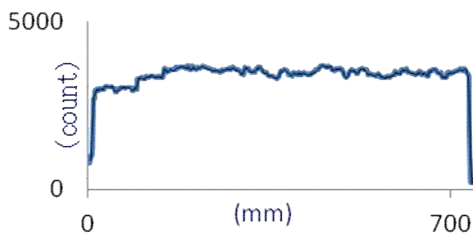


図Ⅲ-2-8-4 ワイドビームのプロファイル（長軸）

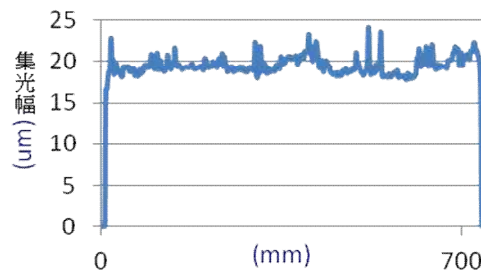
図Ⅲ-2-8-3は、8個の微調センサー位置におけるワイドビームの短軸情報をディスプレイしている。集光特性も良く、収差の少ない形状で20umまで絞れていることを確認した。また、図Ⅲ-2-8-4はその時の長軸強度分布を示している。750mm幅に渡り、均一性±7%を達成した事を確認した。

#### 2.8.4 成果の詳細

2.8.3節に記載したように、大幅に拡張対応したワイドビームの測定機器を開発した。



図Ⅲ-2-8-5 ワイドビームの長軸分布



図Ⅲ-2-8-6 ワイドビームの短軸分布

図Ⅲ-2-8-5にはワイドビームの長軸強度分布の測定結果を示し、Ⅲ-2-8-6は集光幅の測定結果を示す。750mm×20umのワイドビームが成立していることを確認した。

#### 2.8.5 知財財産、及び成果の普及

本項目のワイドビームの開発では、権利化には至らなかった。本件のような、細長いワイドビームを測定できるビームプロファイラー測定機器は一般に入手できない。また、複数のセンサー間差を実使用に耐えうるレベルで特性を一致させ、かつ、安価に作成したことが先進性を感じさせる。更にはパルスレーザー光を高繰り返しでアキュジションしながら、PCモニターに複数出力をディスプレイする仕組みもユニークである。

本技術要素は、例えば f θ レンズやポリゴンミラーを用いた走査型光学系のライン走査ビームの特性評価に応用できる。

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.9 研究開発項目2「大面積表面処理技術の開発」

##### 3) 固体レーザー利用大面積表面処理技術の開発」の成果 (株式会社アルバック 実施)

平成 22 年度～中間評価の期間においては、ワイドビームのデザインと大型異形レンズ加工環境開発を実施し、実際のアニールデモ環境の構成要素に一定の目途を立てた。これを通じてディスプレイの評価への見通しを得た。

#### 2.9.1 事業の背景・目的

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」(中間評価) 第1回分科会 資料5-1 「事業原簿(公開) 2.15 2.16 2.17 (Ⅲ16-1～Ⅲ18-1項)」を参照。

#### 2.9.2 研究開発目標と根拠

上記記載の開発を行いながら、また「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」(中間評価) 第1回分科会 資料5-1 「事業原簿(公開) 2.8 アニール用ブースター増幅技術の開発、及び、2.10 4) アニール用グリーンレーザー評価・調整」で記述されている大出力レーザー発振器を大阪大学、浜松ホトニクスとの共同研究で開発を行ってきた。これらを適宜組み合わせ、アニール加工ができる環境を整えるに至った。事実上のデモ装置を整備した事になる。G4世代のガラス基板を一括でアニール処理できる環境であった。

想定されるディスプレイメーカーとの協力を得ながら、実践的なディスプレイへの適用を実験的に明らかにした。これらの活動を通じて、目標の確からしさを証明できるに至った。具体的には、ディスプレイの画素部に作りこまれる、多結晶シリコン膜の観察、薄膜トランジスタ(TFT)の特性、ディスプレイの点灯試験を行った。

#### 2.9.3 研究開発目標と達成状況

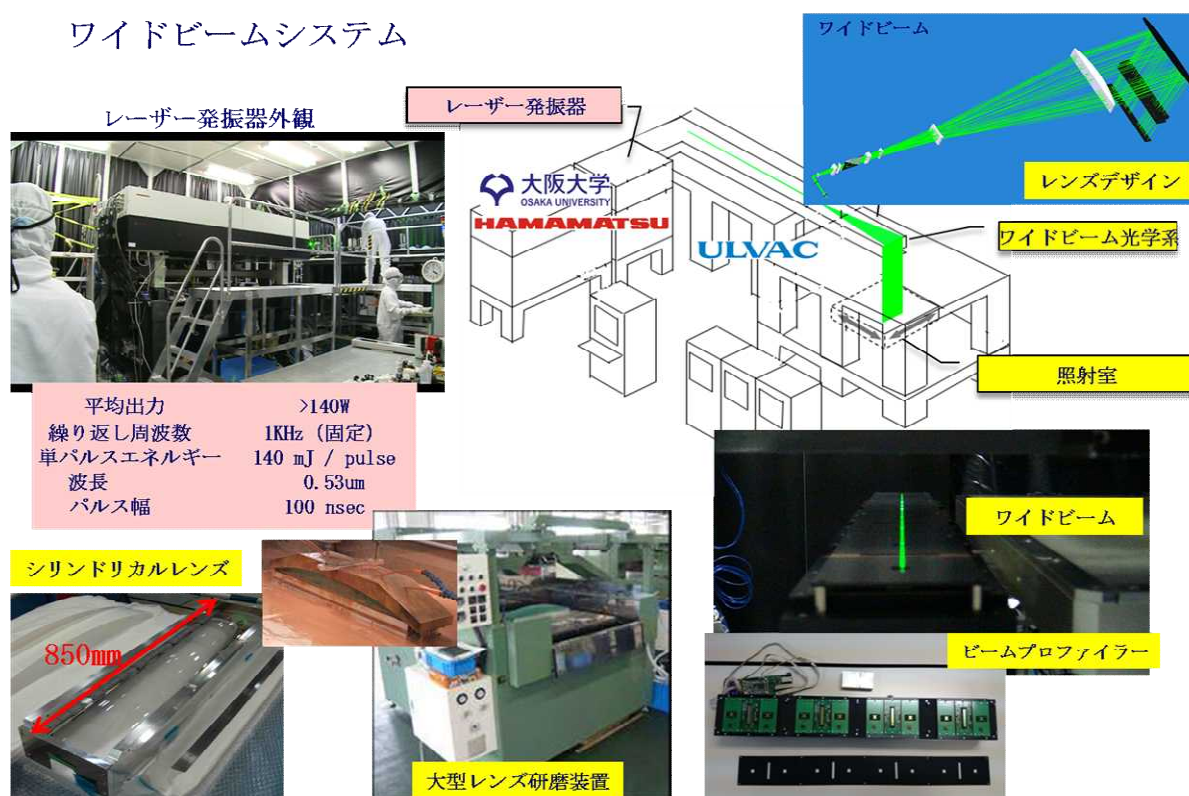
図Ⅲ-2-9-1 には、大面積表面改質を行う実験環境となっている。事実上の実践的なアニール装置を構築した。デモ装置の配置関係と、3つの研究機関(大阪大学、浜松ホトニクス、アルバック)のテーマとその成果物を示している。

レーザー発振器の開発責任を大阪大学、浜松ホトニクス株式会社に担当頂いた。プロジェクト前半では大阪大学拠点での開発を行い、出力特性等の初期目標に到達後、アルバック(茅ヶ崎)研究拠点に移設して装置化を行った。並行してアルバックを中心として開発を行った、大型異形レンズを用いたワイドビーム、およびその評価機器等と合体させ、G4世代のアニール実験環境を整えるに至った。レーザー光源に関する詳細は、中間評価及び、Ⅲ. 2.10 節を参照されたい。アルバックの責任分担テーマと達成項目については、Ⅲ2.7 節の「表Ⅲ2-7-1 各種の開発目標と達成状況一覧」に記載した。ワイドビームの大幅な拡幅をした。実践的な市場要請から、目標数値を見直し、積極的に技術チャレンジした。

開発数値目標の見直し後、Ⅲ2.7 節表Ⅲ2-7-1 に記載したように、見直し目標を達成した事を申し添えておきたい。さらに加速感を高めるために、自主的にディスプレイメーカーとの協力、支援体制を整え、ディスプレイの評価へと展開した。その上で、当該プロジェクトでの開発を技

術的側面で評価することとした。最も厳しい、論法を選択したのである。

## ワイドビームシステム



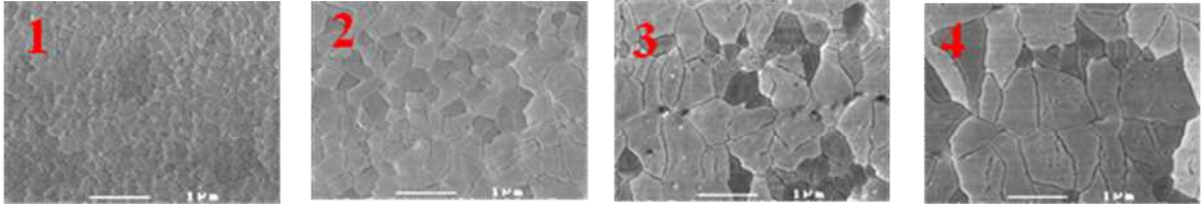
図III-2-9-1 レーザーアニール実験装置配置 (本プロジェクトにおける個別開発テーマ)

アプリケーションとしては、高精細ディスプレイに該当する。当然ながら、中小型に留まらず大型も視野に入れている。ディスプレイメーカーとの協議において、次世代液晶ディスプレイ、高精細有機ELディスプレイなどをアプリケーションとしてパネル評価を行うに至った。これは当該プロジェクトの開発成果を占う意味で重要な位置づけとなった。次節以降において、具体的な特性評価の結果を報告する。

### 2.9.4 成果の詳細

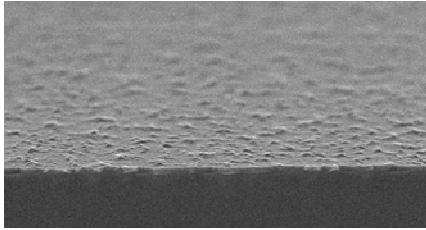
図III-2-9-2 写真1～4に、一定のサンプル膜種条件で得られた多結晶化 SEM イメージを示す。結晶サイズを判定する為に、結晶粒界を選択エッチングする Secco エッチング済みのイメージとなっている (以下、SEM イメージは同様の化学処理をしている)。写真1、写真2では良好な TFT 特性が期待できる粒径を確認することができた。レーザーフルエンスは  $550\text{mJ}/\text{cm}^2$  程度であった。更に照射エネルギーを上げて、粒径サイズの変化を見たのが写真3、及び写真4である。最大  $700\text{mJ}/\text{cm}^2$  超までを示す。データは示さないが、写真3以上の条件下では多結晶にダメージが入りつつあることを確認している。従って、写真1、写真2程度までの粒径をプロセスウィンドとして捉えている。図III-2-9-3 にはグリーンレーザーで多結晶化した場合、および図III-2-9-4 にはエキシマレーザーで多結晶化した場合の試料を斜めから観察した SEM イメージを示している。エキシマレーザーによるアニール詳細条件は開示されていないが、代表的な多結晶化処理後の表面である。

フルエンス 550mJ/cm<sup>2</sup>~700mJ/cm<sup>2</sup> 条件下での結晶変化例



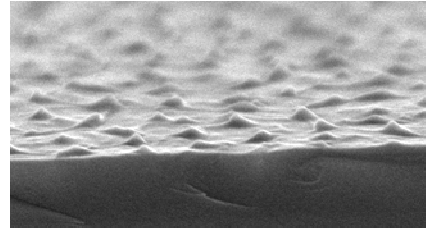
図Ⅲ-2-9-2 多結晶化イメージ (左から 1, 2, 3, 4)

グリーンレーザーによる結晶表面



図Ⅲ-2-9-3

エキシマレーザーによる結晶表面

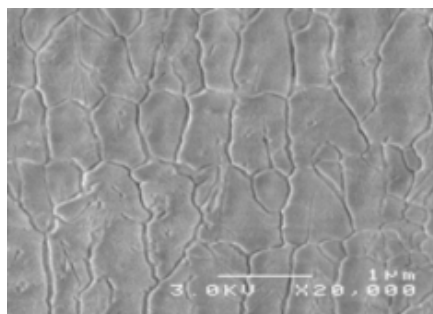


図Ⅲ-2-9-4

図Ⅲ-2-9-3 と図Ⅲ-2-9-4 を比較してわかるように、表面突起の形状に違いが認められる。エキシマレーザー処理では、突起の先がとがっている傾向にある。他方、グリーンレーザーのそれは、なだらかに見える。但し、横方向に長い (連山をイメージさせる)。一般論として、TFT 作成における多結晶化処理の次工程では、ゲート絶縁膜が CVD 装置にて成膜される。この場合、突起の影響をうけないような工夫や成膜条件になることは言うまでもない。

次に多結晶の初期評価について述べる。図Ⅲ-2-9-5 にはある条件下での結晶化処理済みのイメージを示している。粒径サイズは 1 μm 程度が見て取れる。エキシマレーザーでは得られない大きさの結晶粒をグリーンレーザーでは容易に得ることができることを示している。

TFT 特性評価に用いた同等条件の多結晶イメージ

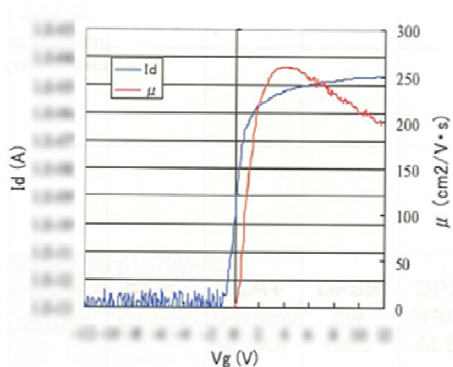


図Ⅲ-2-9-5

Ⅲ-2-9-(3) (事後)

図Ⅲ-2-9-6には、TFTの初期特性を示す。移動度の軸のみ開示している。図を見てわかるよ

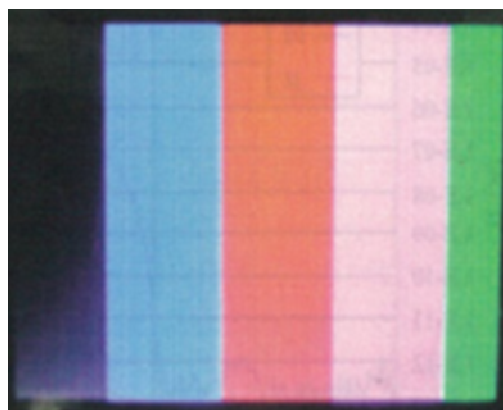
n-TFT 特性 移動度>250 を確認



図Ⅲ-2-9-6

うに、移動度 $>250$  [ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ] をマークしたことを確認した。高速スイッチング動作可能なデバイスを作ることができる認識に至った。先行するエキシマレーザーを用いたアニールではこれほどの特性は確認できていない。レーザー種による結晶性の違いが原因と思われるが、結晶の成長過程や成長方向などの他に、完全溶融と呼ばれる事象が特徴ではないかと類推されている。他に特筆するディスプレイメーカーからのコメントとして、レーザー走査方向（アニール処理の向き：ステージ移動方向）に平行なTFTと、それに垂直なTFTを作成したところ、移動度に顕著な差は確認できなかったとのことであった。これもエキシマレーザーやその他のアニール方法には見られない最大の特徴である。

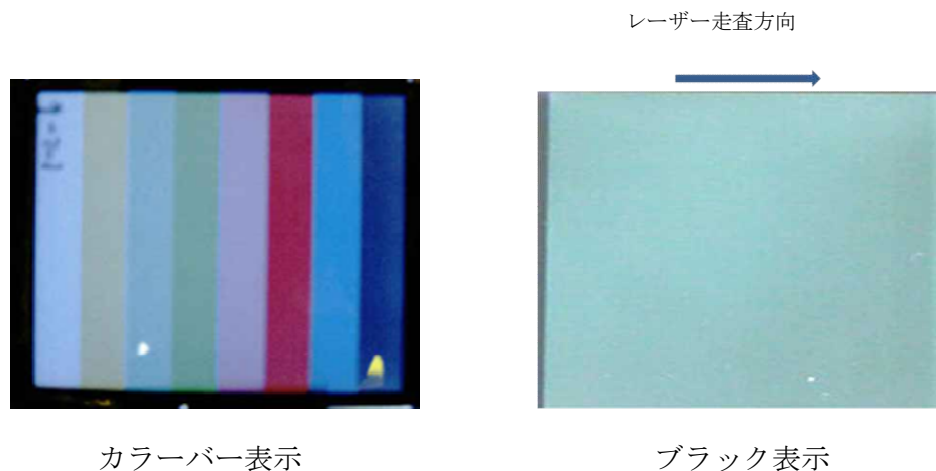
図Ⅲ-2-9-7には、この条件下で液晶ディスプレイを試作し、点灯している様子を示している。カラーバー表示させていることで、実際にグリーンレーザーを用いてアニールした多結晶を有する試作ディスプレイが駆動していることを確認した。パネル品位については、課題を含むものの、初期特性としては映ったことが大きなインパクトであった。



図Ⅲ-2-9-7 小型液晶ディスプレイの点灯イメージ



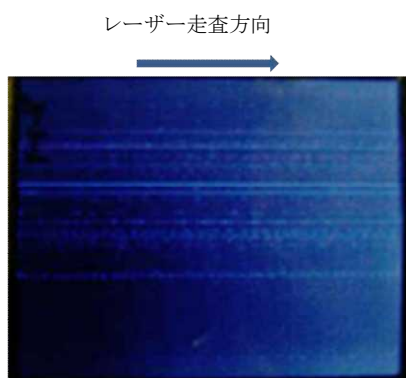
図Ⅲ-2-9-8 左写真(カラーバー表示)および右写真(ブラック表示)は小型有機ELディスプレイへの適用を確認したものである。



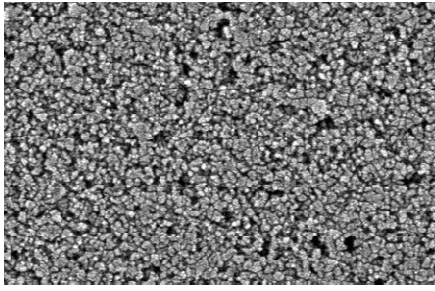
図Ⅲ-2-9-8 小型有機ELディスプレイの表示例(1)

図Ⅲ-2-9-8 で示すとおり、有機ELディスプレイにおいても遜色なく点灯することを確認した(左写真と右写真は同じパネルではない)。このパネルにおいては、レーザーアニール処理の段階で、レンズの研磨ムラが改善された条件下で行った。

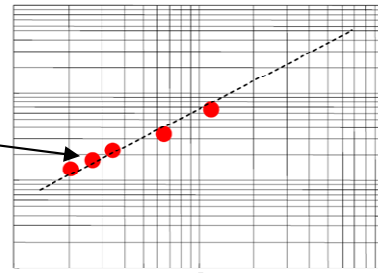
次に、図Ⅲ-2-9-9 にはアニールムラの顕著なディスプレイを試作した。同様にブラック表示させている様子を示している。標準状態の駆動条件で横筋のムラが確認できている。この筋ムラはアニール処理直後の基板にも検査確認されていた部位であることを確認している。電流駆動型のディスプレイでは、アニールムラの影響を顕著に受けてしまう。高度なホモジナイズの技術と均一性がより求められる技術領域である。量産世界においては、装置の安定稼働も求められる。従い、達成技術ハードルを高く持たなければならない。



図Ⅲ-2-9-9 小型有機ELディスプレイの表示例(2)



図Ⅲ-2-9-10 微結晶 SEM イメージ



図Ⅲ-2-9-11 移動度と結晶性の関係  
(詳細数値非公開)

50型8K（ハイビジョンの8倍の高画質）の液晶ディスプレイを意図したアニール処理加工について述べる。初期結晶評価結果を図Ⅲ-2-9-10に示す。同図は微結晶シリコンである。数十ナノメートルの粒径で比較的均一であることがわかる。図Ⅲ-2-9-11には同様にアニール処理した時のサンプルを用いて、TFT特性評価した結果を示している。8Kディスプレイに求められる狙い通りのTFTの移動度を確認するに至った。

#### 2.9.5 知財財産、及び成果の普及

実際にアニールできる環境を構築した。その環境を用いて、実際のディスプレイの評価まで対応した。アルバックでは装置開発までは行うが、ディスプレイの評価環境は有していない。したがって、社外のリソースに頼らざるを得ない。ここでは、国内大手のディスプレイメーカー数社のご支援を得てディスプレイ表示まで至ったため、その過程での技術条項の開示は困難である。また、装置特有の差別化技術としての権利化よりも、情報流出防止の観点で、囲い込み対応をしている。

普及の側面では、当該プロジェクトの期間終了を待たず、各種のチャンネルを使っての広報と技術PRおよび、技術評価支援を取り付けてきたことを記述しておきたい。グリーンレーザーを用いたワイドビームの保有技術に関して、認識が確実に広がった。他方、他の用途への波及も視野に入れて対応している。有機照明領域やその他の領域からも問い合わせ実績をあげるに至った。

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.10 研究開発項目 2「大面積表面処理技術の開発」

##### 「4) アニール用グリーンレーザー評価・調整」

(次世代レーザー加工技術研究所：(株)アルバック、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心、浜松ホトニクス(株) 実施)

#### 2.10.1 事業の背景と目的

低温ポリシリコン TFT を用いた液晶(LCD)や有機発光ダイオード (OLED) は、高精細、高画質 (優れた諧調性、高速応答性) なフラットパネルディスプレイ (FPD) の根幹をなす基盤技術として広く普及する一方、今後も大型化、低コスト化の要求が益々高まっている。これに応える製造技術として、従来のガスレーザーに代わるグリーンレーザーパルスによるアニールプロセスの実用化が期待されている。これは、グリーンレーザーアニールによる低温ポリシリコン TFT は、粒界が大きくなるため電子移動速度を高速化でき、ディスプレイの高精細化や低消費電力化に寄与できることによるものである。このグリーンアニールプロセスに必須の大出力かつ高スループットで高信頼な高出力レーザーを実現するため、大出力 LD (レーザーダイオード) 励起固体レーザー装置を開発し、均一かつワイドビームによるアニールプロセスの実証試験にレーザー装置を提供し、産業用レーザーとして要求される信頼性や実用性を評価することを目的として研究開発を行った。

#### 2.10.2 研究開発目標と根拠

本プロジェクトにおける研究開発目標と設定根拠を表Ⅲ-2.10.1 に示す。

表Ⅲ-2.10.1 研究開発目標と設定根拠

研究項目	評価目標		設定根拠
	評価項目	最終目標	
アニール用ブースター増幅技術の開発	波長	1 μm 帯 (基本波)	グリーン光 (波長 532nm) によるアニールが効果的に作用するため、高出力で発生させるために基本波を 1064nm とした
	平均出力	200~700W	グリーン光で 140W を得るために必要な基本波出力
	繰り返し周波数	1~150kHz のうち最適周波数	実用性の高い加工速度を得るために必要な繰り返し周波数
	パルス幅	0.5~200ns のうち最適パルス幅	十分なアニール効果に必要なとされるパルス幅
アニール用	変換効率	20% (700W 基本波から)	500mm のワイドビームによりア

レーザーの波長 変換モジュール の開発			ニーリングを達成するには 140mJ (140W/1kHz)のパルスエネ ルギーが必要で、予備実験で得ら れた限界値近くの効率
	パルス幅	100ns 程度	アニール用に適したパルス幅 70ns~100ns

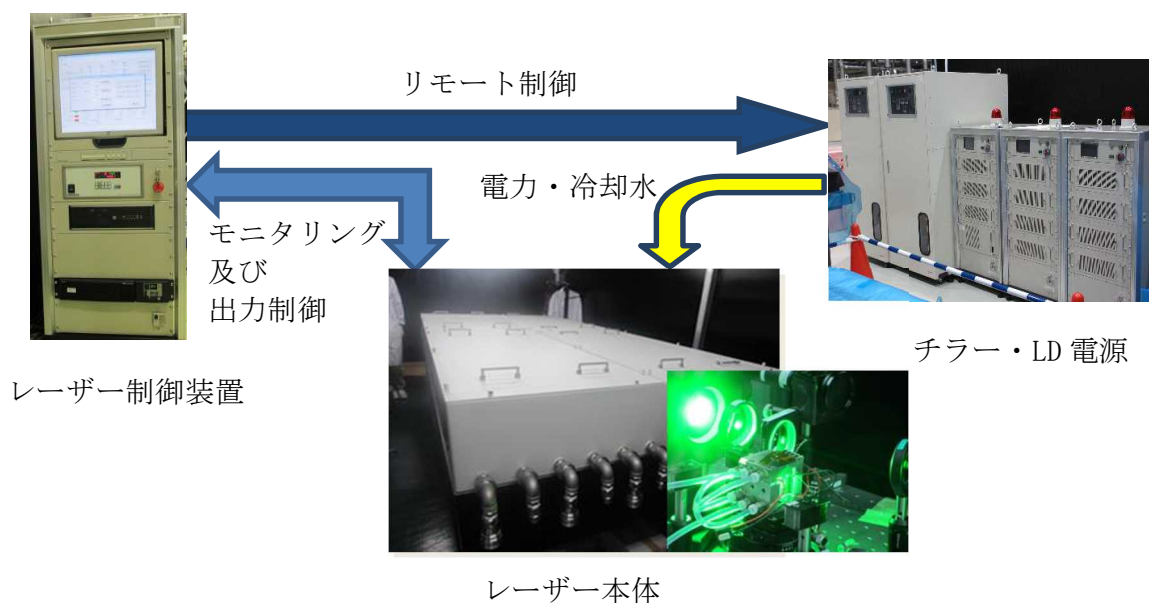
### 2.10.3 研究開発目標と達成状況

2.10.2において設定した研究開発目標とその達成状況を表Ⅲ-2.10.2に示す。全ての最終目標について中間評価の段階で既に達成されている。達成したレーザー性能は、大出力LD励起固体レーザーとして、技術的に現在でも世界最高レベルのものであり、実用性においても実際に製造プロセスに導入可能な産業用レーザー装置として類をみない。さらにプロジェクトの後半期間では、アニールプロセスの実証試験にレーザー装置を提供し、アニールプロセスの評価を進める中でレーザー装置の信頼性の確認や実用化に向けた高機能化のための開発を進めた。

表Ⅲ-2.10.2 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標		達成度
	評価項目	最終目標	
アニーリング用 ブースター増幅技 術の開発	波長	1 $\mu$ m 帯(基本波)	達成 (1.064 $\mu$ m)
	平均出力	200~700W	達成 (702W)
	繰り返し周波数	1~150kHz のうち最適 周波数	達成 (1kHz)
	パルス幅	0.5~200ns のうち最 適パルス幅	達成 (122ns)
アニーリング用 レーザーの波長変 換モジュールの開 発	変換効率	20% (700W 基本波から)	達成 ( $\geq 25\%$ , 180mJ $\times$ 1kHz)
	パルス幅	100ns 程度	達成 (100ns)

開発したレーザー装置の構成について図Ⅲ-2.10.1にその概略を示す。レーザー装置の全体システムは、レーザー本体、チラー・LD電源、レーザー制御装置から構成される。レーザー制御装置は、レーザー本体を駆動するLD電源やチラーをリモート制御により操作することができ、レーザー出力特性や運転状況等をモニタリングする機能を備え、所望のレーザー出力で運転するための制御が可能なシステムとなっている。



図Ⅲ-2.10.1 レーザー装置概略構成

表Ⅲ-2.10.3 に、プロジェクト後半に行ったアニールレーザー装置の実用化に向けた取り組みをまとめた。産業用レーザー装置として実用化するため、主に統合装置の検討、信頼性の確認、自動運転機能の検討と3つの項目について取り組んだ。

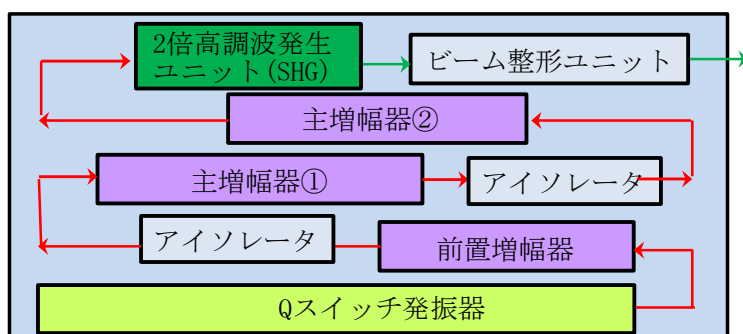
表Ⅲ-2.10.3 レーザー装置の実用化への取り組みと見通し

項目	達成状況	実用化への見通し
統合装置の検討	横 1500mm×奥行 3000mm×高さ 300mm (装置架台高さ含まず)	電源、冷却水循環装置などのレーザー装置本体との一体化により2/3サイズへの装置の小型化は可能である
信頼性の確認	25億ショット/690時間稼働	構成部材の信頼性向上により100億ショット/3000時間ノーメンテナンスでの稼働は可能である
自動運転機能の検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>電源、冷却水循環装置、レーザー装置本体の一元管理と制御</li> <li>出力/パルス幅/ビームパターンの同時モニタリング</li> </ul>	稼働状況を自己診断する機能を搭載することで可能である。

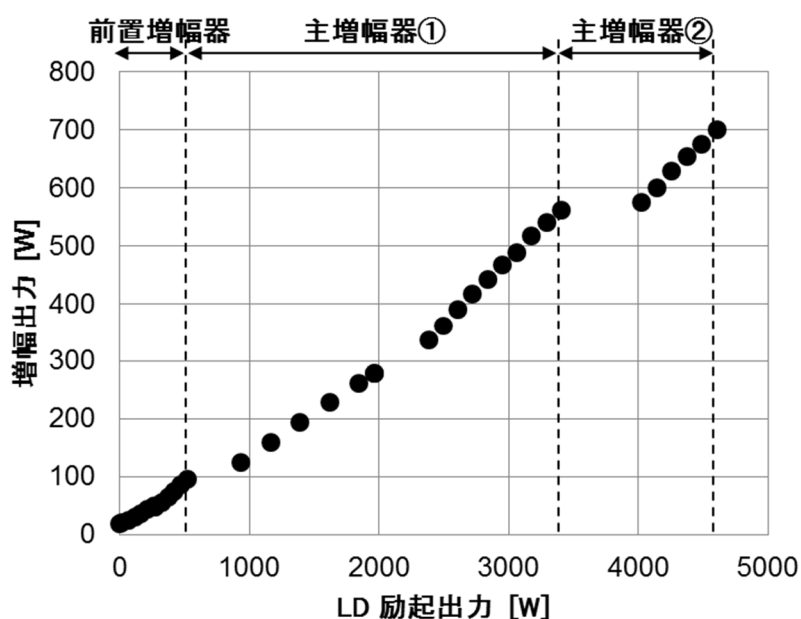
## 2.10.4 成果の詳細

本プロジェクトにて開発したアニールレーザー装置の本体は、図Ⅲ-2.10.2 に示すように、レーザー発振器とレーザー増幅器、及び波長変換部とビーム整形部から構成されている。レーザー発振器の出力光は、前置増幅器と主増幅器部で増幅され、2段階の主増幅器部の間に設置された寄生発振防止用のアイソレータ部を通過しつつ増幅伝搬される。そして、波長変換部である2倍高調波発生ユニットによりグリーン光へ波長を変換された後、ビーム整形部によりアニール加工機に導光するためのビームサイズおよび広がり角に調整され最終的にグリーンレーザー光として出力される。

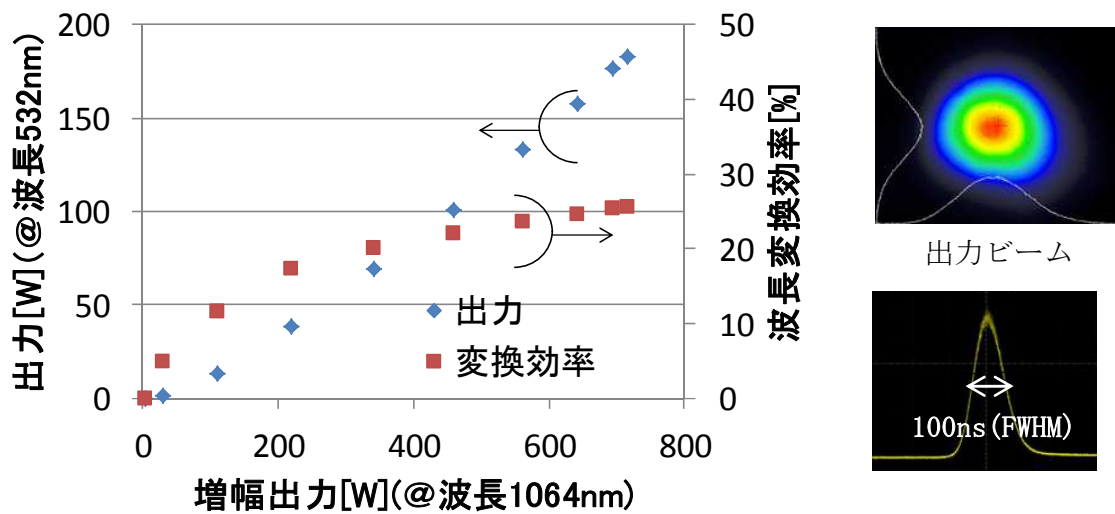
レーザー装置の光出力特性を図Ⅲ-2.10.3 に示す。横軸に励起に用いたLD出力、縦軸に基本波のレーザー出力をプロットした。最終的に繰り返し1kHz動作に置いて、平均出力702Wを基本波レーザー光として達成した。また図Ⅲ-2.10.4 に示すように、グリーンへの波長変換により平均出力180W、パルス幅100ns(FWHM)を同時に達成した。



図Ⅲ-2.10.2 アニール用グリーンレーザー装置本体概略構成

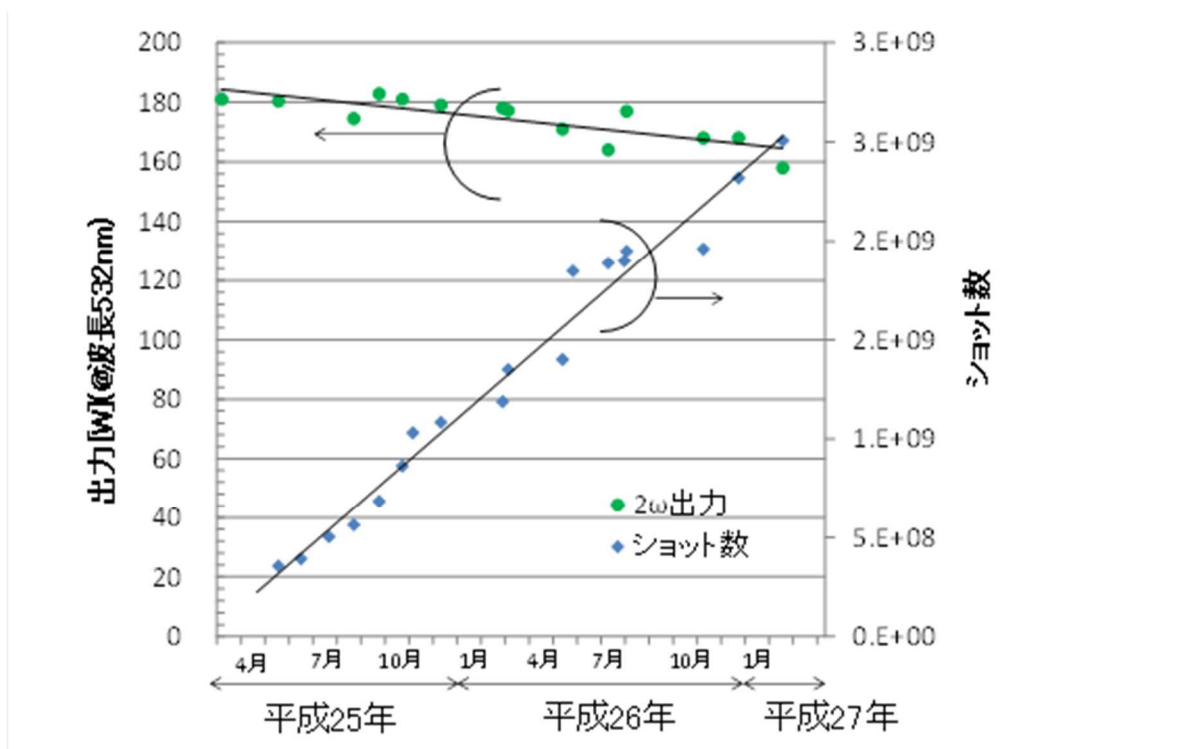


図Ⅲ-2.10.3 レーザー出力特性（基本波@1064nm）



図Ⅲ-2.10.4 波長変換出力特性

アニール実証試験の期間中における累積ショット数と出力推移を図Ⅲ-2.10.5 にプロットした。実証試験は2年に亘り実施され、その間、当初目標値であるパルスエネルギー140mJを上回る出力を継続して供給し、最終累積ショット数では25億ショット以上、通算稼働時間にして690時間以上、レーザー装置を安定的に稼働させることに成功した。このアニール実証試験により、産業用レーザーとして要求される3000時間以上をメンテナンスフリーで運転可能とする長寿命と高信頼性の実現するための見通しを得た。

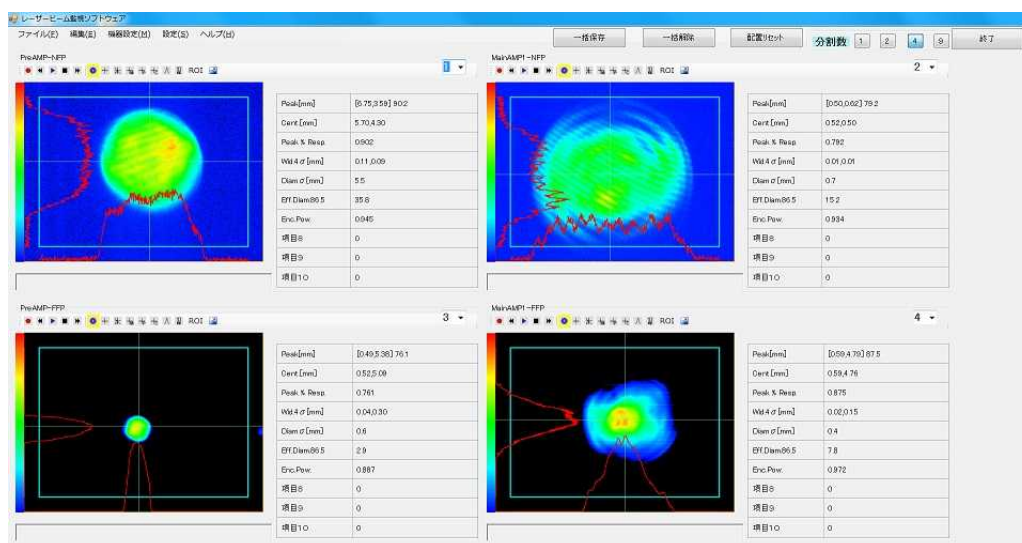


図Ⅲ-2.10.5 ショット数推移と出力推移

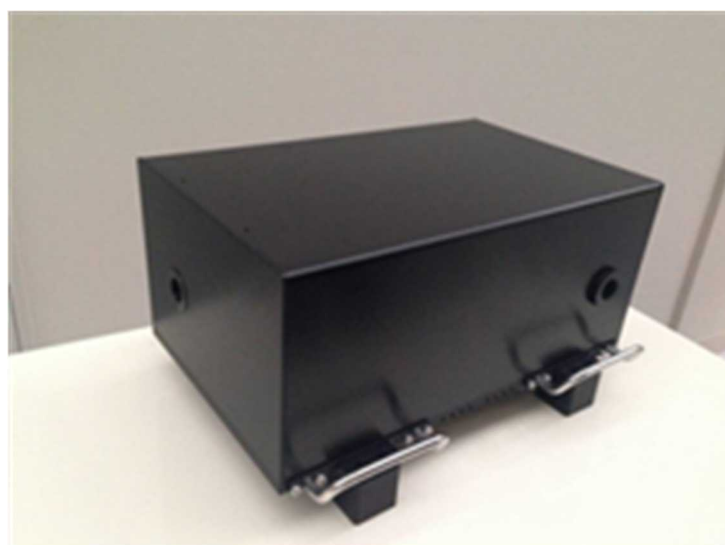
アニーリング用ブースター増幅技術の開発における評価において、レーザー光のパターン、出力及びパルス幅を自動で記録するモニタリング装置を開発した。パターンのみを取得した時のモニタリング画面を図Ⅲ-2. 10. 6 に示す。

本装置を用いてビーム位置変動率を確認したところ、約3か月にわたって継続的にモニタリングしても明確なビーム位置変動は確認できなかった。このモニタリング装置の導入により、レーザー装置の状態を随時自己診断する機能についての実用化への目途が得られた。

また、レーザー装置本体にあるアイソレータ部をモジュール化するための試作を行い、メンテナンス性の向上、低コスト化を図った。モジュール化したアイソレータユニットモジュールの外観を図Ⅲ-2. 10. 7 に示す。



図Ⅲ-2. 10. 6 レーザー光モニタリング装置データ取得時の画面



図Ⅲ-2. 10. 7 アイソレータユニットモジュール



2.10.5 知的財産、及び成果の普及

本プロジェクトにおける知的財産および成果の普及について表Ⅲ-2.10.4に示す。

表Ⅲ-2.10.4 特許・論文等発表件数一覧

区分 年度	特許出願			論文			その他外部発表	
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その他	学会発 表・講 演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H22FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H23FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H24FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H25FY	0件	0件	0件	1件	0件	2件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	2件	0件	3件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

Ⅲ. 研究開発成果について

2.11 研究開発項目③「粉末成形技術の開発」の成果  
(次世代レーザー加工研究所：アспект、産総研 実施)

2.11.1 研究開発目標と根拠

研究開発目標と根拠については、表Ⅲ-2.11.1の通りである。

表Ⅲ-2.11.1 研究開発目標と根拠

研究項目	評価目標		設定根拠
	評価項目	最終目標	
粉末成形技術の開発	成形精度	±0.1mm(50mm サイズ基準パーツ)	成形精度は粉末成形の欠点とされており、原料の粉の粗さが表面に残る点と、粉の隙間に生じる空孔を埋めるため材料の縮小、残留応力等を原因とする精度の低下がある。現在市場の他社製品では実際の成形精度が±0.2mm 程度であることから、その半分を成形目標とした。
粉末成形技術の開発	成形時間	16時間以内(50mm サイズ基準パーツ)	成形時間はナカシマメディカル(現、帝人ナカシマメディカル)社に事前ヒアリングしたところ、スウェーデンの Arcam 社製装置で高さ 100mm のものを造形するのに、現状 20 時間程度かかっているとのことなので、その能力の 2 割アップの設定とした。ただし、中間評価の結果、プロジェクト期間が縮減されたことにより、目標値を変更せざるを得なくなったため、基準パーツのサイズは 50mm に変更した。

## 2.11.2 研究開発目標と達成状況

最終目標の達成度については、表Ⅲ-2.11.2の通りである。

表Ⅲ-2.11.2 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標		達成度	課題と解決方針 ※未達の場合のみ
	評価項目	最終目標		
粉末成形技術の開発	成形精度	±0.1mm(50mm サイズ基準パーツ)	△ + 0.2mm (プロジェクト終了時)	中間評価後、プロジェクト実施期間が縮減となったこともあり、様々な形状において安定して成形できる成形条件の確立に至らなかったため、成形精度について確認ができなかった。成形精度は、各材料に見合った成形条件を確立したのち、その条件を微調整することで達成可能と考える。
粉末成形技術の開発	成形時間	16時間以内(50mm サイズ基準パーツ)	△ (プロジェクト終了時)	中間評価後、プロジェクト実施期間が縮減となったこともあり、50mm サイズ基準パーツの成形条件の確立に至らず、成形時間は未確認である。今後、成形条件を確立したのち、条件の最適化を行うことで目標を達成可能と考える。

### 2. 11. 3 成果の詳細

以下、成果の詳細について記す。

#### 2. 11. 3. 1 実用型プラットフォームの開発および重畳レーザーの開発

真空下においても動作可能な小型プラットフォームをもとに、実用サイズの成形が可能な実用型プラットフォームを開発した。図Ⅲ-2. 11. 1 に実用型プラットフォームの外観、表Ⅲ-2. 11. 3 に実用型プラットフォームの基本的な仕様を示す。



図Ⅲ-2. 11. 1 開発した実用型プラットフォームの外観

表Ⅲ-2. 11. 3 小型プラットフォーム試作機の基本的な仕様

機械本体	
有効ワークエリア	X : 300 × Y : 300 × Z : 300 mm
造形ステージサイズ	X : 340 × Y : 340mm (レーザービーム最大照射範囲 X : 300 × Y : 300mm)
最小積層ピッチ	0.05mm
造形室構造	真空構造 (真空圧 $10^{-2}$ Pa 以下) 真空ポンプは、ロータリポンプ (粗引き) とターボ分子ポンプ (本引き) の2種類を使用
材料酸化防止、真空開放機構	不活性ガス (アルゴンガス) 充填 (酸素濃度センサ付き)
造形ステージ駆動機構	AC サーボモータボールネジ駆動方式
粉末積層機構	ブレードリコータ (ローラリコータ搭載可)
粉末材料供給方式	非交換カートリッジ方式
材料加熱	真空用近赤外線クォーツヒータ
レーザー光学系	
搭載レーザー	プロジェクト新規開発品 QCW ファイバーレーザー (古河電工)

レーザービーム走査	ガルバノミラー方式 (近赤外線仕様、リニアトランスレータ付き)
<b>制御部</b>	
機械制御装置	プログラマブルコントローラ
データ処理装置	デスクトップパソコン Pentium4 3GHz 以上 17 インチ液晶モニタ Windows® XP Professional
アプリケーションソフトウェア	日本語オリジナルソフトウェア SEMware
入力データ	STL フォーマット
<b>その他</b>	
電源	AC200V 三相 20A (ヒータ) AC200V 単相 30A (QCW レーザー用) AC200V 単相 10A (レーザーチラー用) AC100V 単相 30A (制御用)
動作環境	20℃～28℃ (造形中は±2℃以内) , 湿度 70%以下
寸法および重量	本体 : 3,000 (W) × 1,500 (D) × 2,400 (H) 総重量 : 2,000kg

実用型プラットフォームには、阪大接合研および片岡製作所で開発した複合重畳レーザーを搭載し、CW レーザーのみ、パルスレーザーのみ、さらに、複合重畳レーザーにおける成形実験を行った。図Ⅲ-2. 11. 2 に実用型プラットフォームと重畳レーザーの外観を示す。



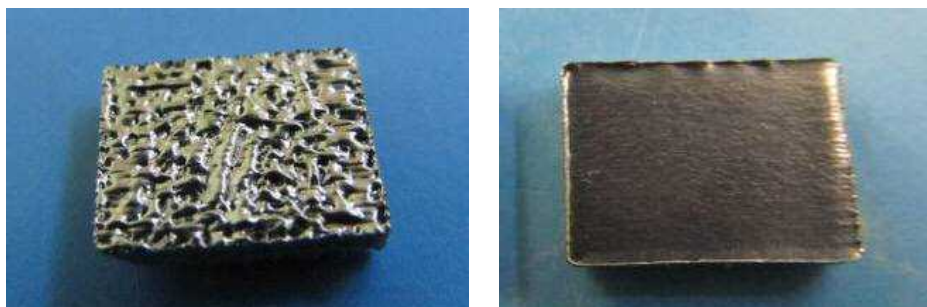
図Ⅲ-2. 11. 2 実用型プラットフォームと重畳レーザー

CW レーザーのみ、パルスレーザーのみ、複合重畳レーザーにおいて、それぞれ、レーザー出力や温度条件を変化させつつ成形実験を行った結果、成形物をレーザー照射した際の反りあがり具合などに若干の差異は見受けられたものの、実施期間が実質1か月未満と短かったこともあり、複合重畳レーザーにおける優位性までは確認できないなど十分な評価が行えないままプロジェクトが終了と

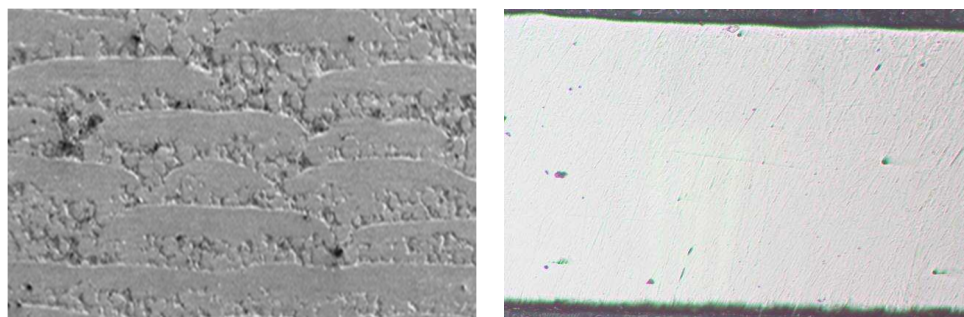
なった。なお、複合重畳レーザーは、装置が大型になる、制御も煩雑になる、また、コスト的にも不利、ということで、実用機への導入は現状では行わないこととした。

### 2. 11. 3. 2 成形物の密度と複雑な形状の作成

小型プラットフォームでは、チタン合金の成形について、QCW ファイバーレーザーを用いた最適な成形条件の検討を継続的に行った。開発当初 150 $\mu\text{m}$  以下のチタン合金粉末を用いていたものを、ふるい機で 75 $\mu\text{m}$  以下の粉末に制限するなどし、最終的には 45 $\mu\text{m}$  以下の粉末材料に変更した。また、成形条件の見直しを行った結果、開発初期では 70%程度だった成形物の相対密度が、最終的に 99%を超えるまでに至った。図Ⅲ-2. 11. 3 に実際に作成された成形物の表面の比較、図Ⅲ-2. 11. 4 に断面の比較を示す。表面および、成形物の内部まできれいに溶けていることが確認できる。

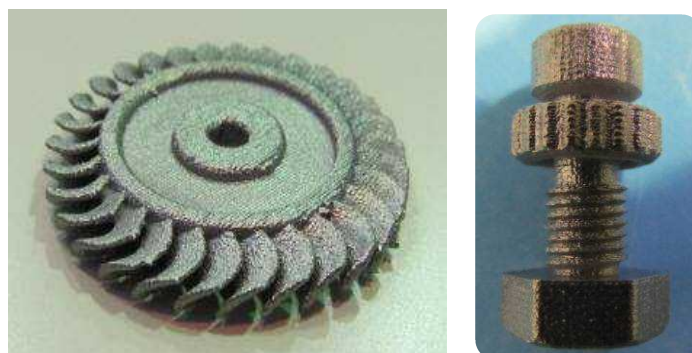


図Ⅲ-2. 11. 3 成形物の表面の比較(相対密度 70%(左)と 99%(右))



図Ⅲ-2. 11. 4 成形物の断面の比較(相対密度 70%(左)と 99%(右))

さらに、複雑な形状も作成。まだ大きさに制限はあるものの、切削などの加工法では実現が難しい複雑な形状を作成することができた。図Ⅲ-2. 11. 5 に実際に作成した成形物を示す。



図Ⅲ-2. 11. 5 複雑な形状の成形物

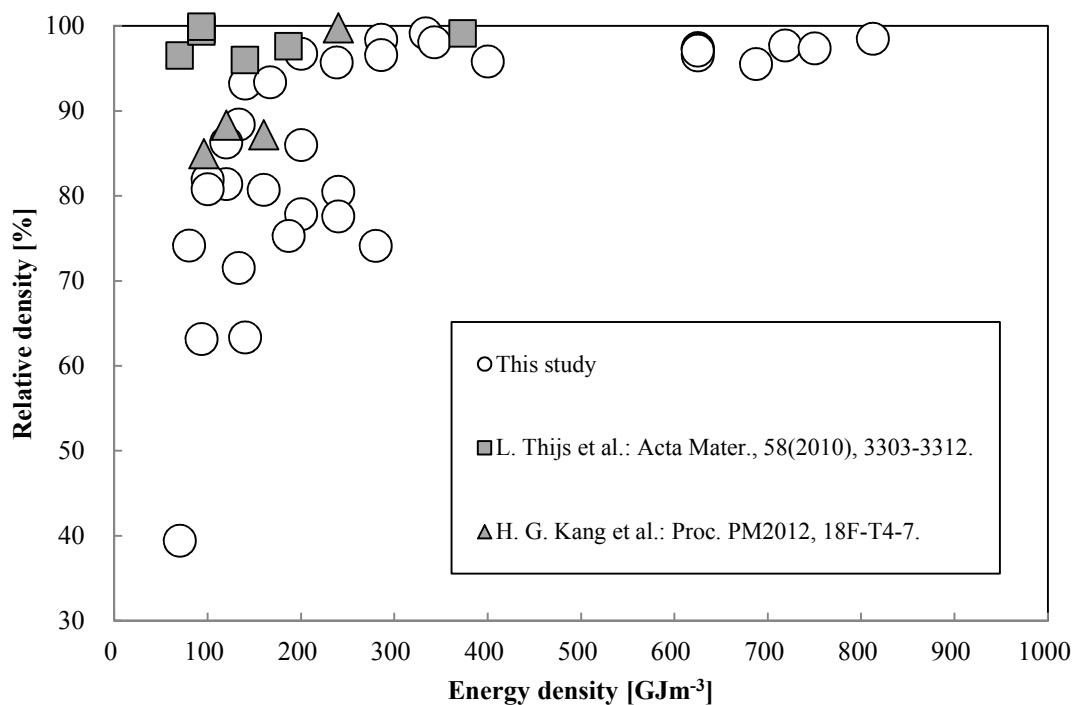
### 2. 11. 3. 3 最終目標の達成状況

50mm サイズ基準パーツにおける成形精度と成形時間については、達成できなかった。これは、中間評価後にプロジェクト実施期間が縮減となり、平成 25 年度から 26 年度にかけて目標としていた成形条件の確立および高速化に向けての研究機関が大幅に短縮されたことが大きな要因である。プロジェクト期間中には、縦横 30mm×高さ 70mm 程度の大きさの成形物が作成可能な条件を見出しているが、継続的に開発を進めることで、プロジェクトで掲げた目標値を達成できると確信している。

### 2. 11. 3. 4 造形条件と製品品質についての評価

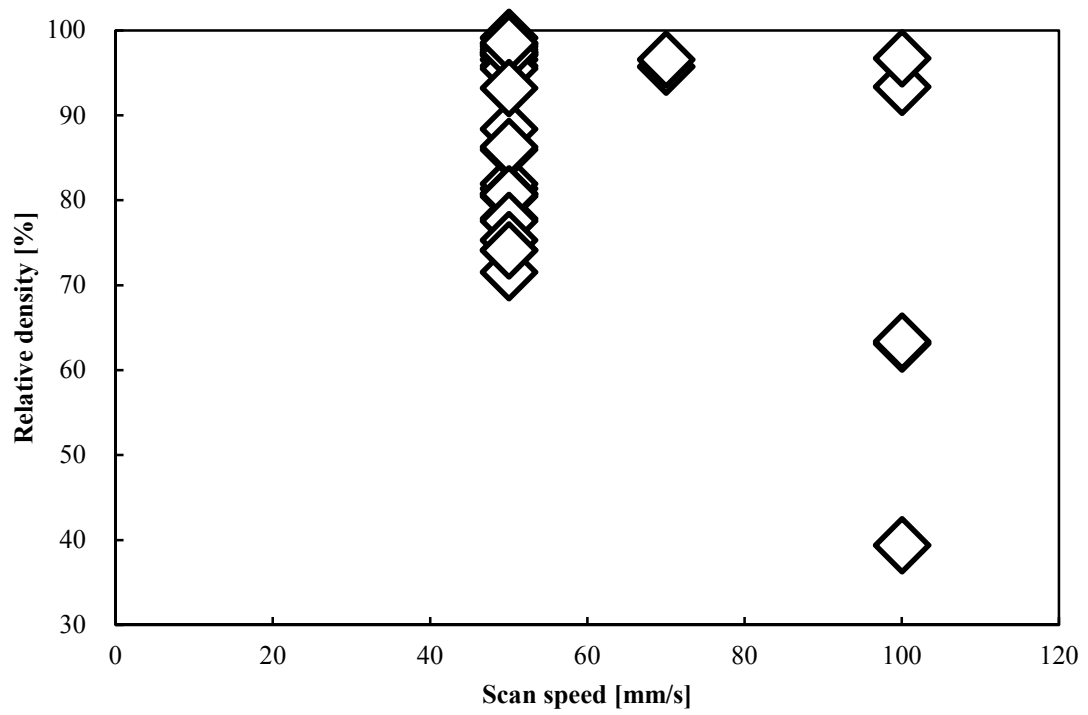
造形条件（造形パラメータ）を最適に選択し品質を向上するためにはパラメータ依存性を評価する必要がある。特に製品の密度とパラメータの影響について検討することは重要であり、これを行った。

粉末床溶融型（Powder Bed Fusion; PBF）の場合、図Ⅲ-2. 11. 6 に示すような横軸にエネルギー密度を取り、縦軸に密度を持って評価することが多い。この場合エネルギー密度は、入射エネルギーを走査速度、積層厚、走査ピッチで除算したものである。この図ではエネルギー密度が小さいと製品の密度が上がらない、エネルギー密度が高くなると製品密度も向上する事が分かるが、低エネルギー密度の場合にも製品密度が高い場合もあるし、十分な検討となっていない。

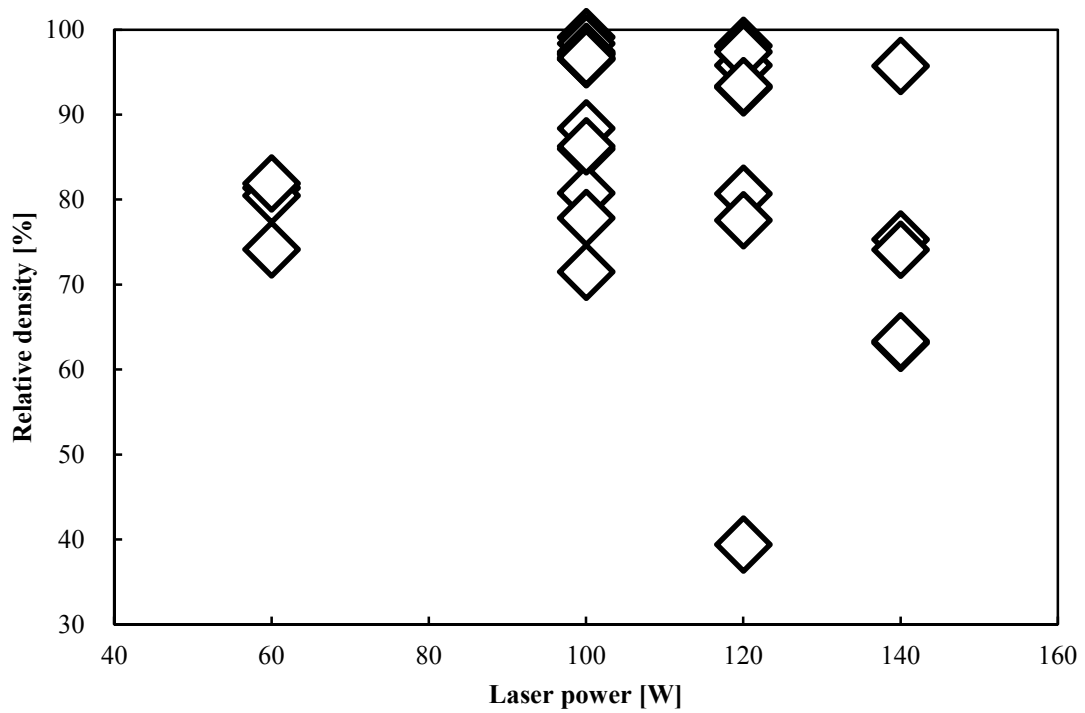


図Ⅲ-2. 11. 6 エネルギー密度と造形品の相対密度の比較

そこで、各パラメータ別にデータを整理して検討した。Ⅲ-2-11-7～10 に示す。

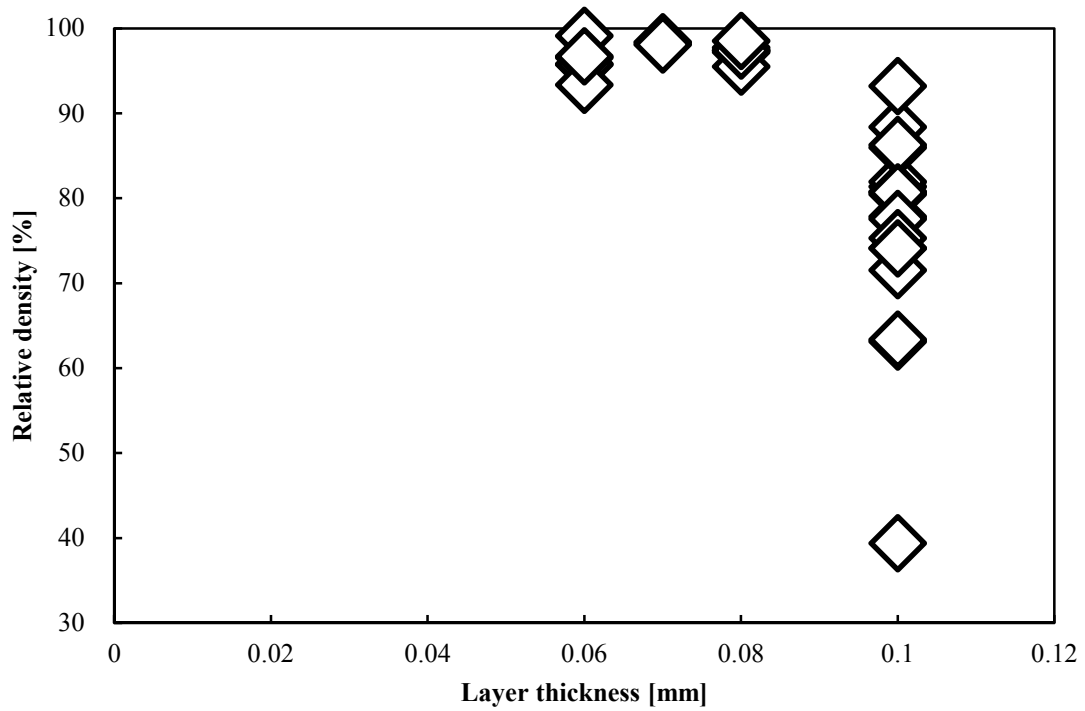


図Ⅲ-2.11.7 走査速度と造形品の相対密度の関係

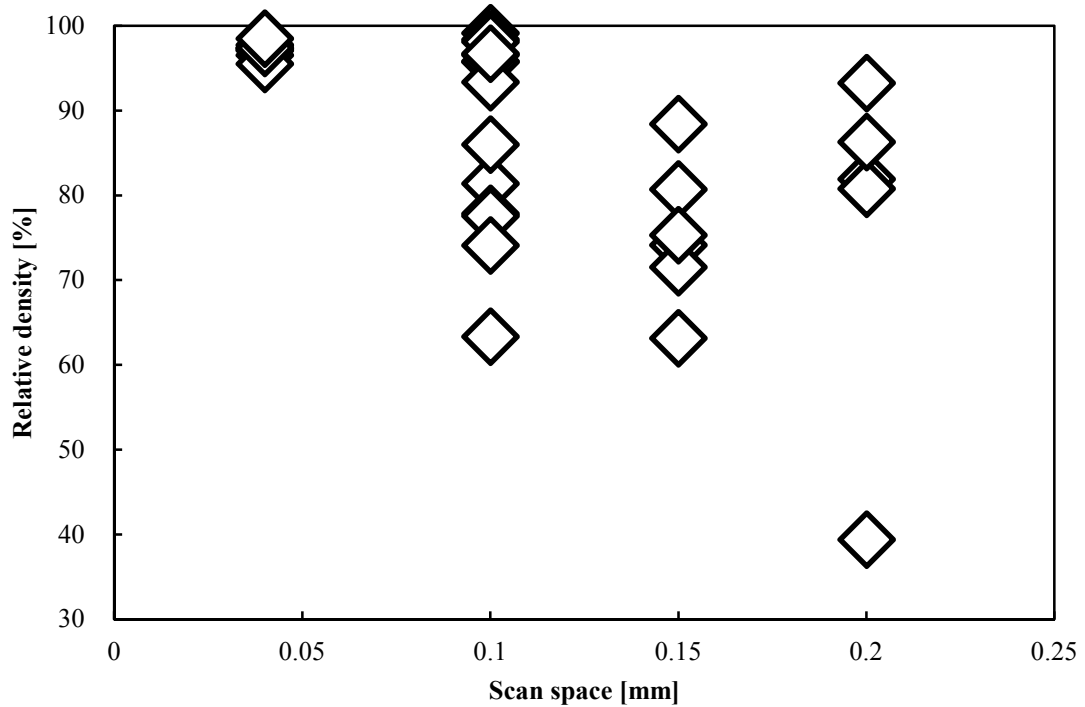


図Ⅲ-2.11.8 レーザーパワーと造形品の相対密度



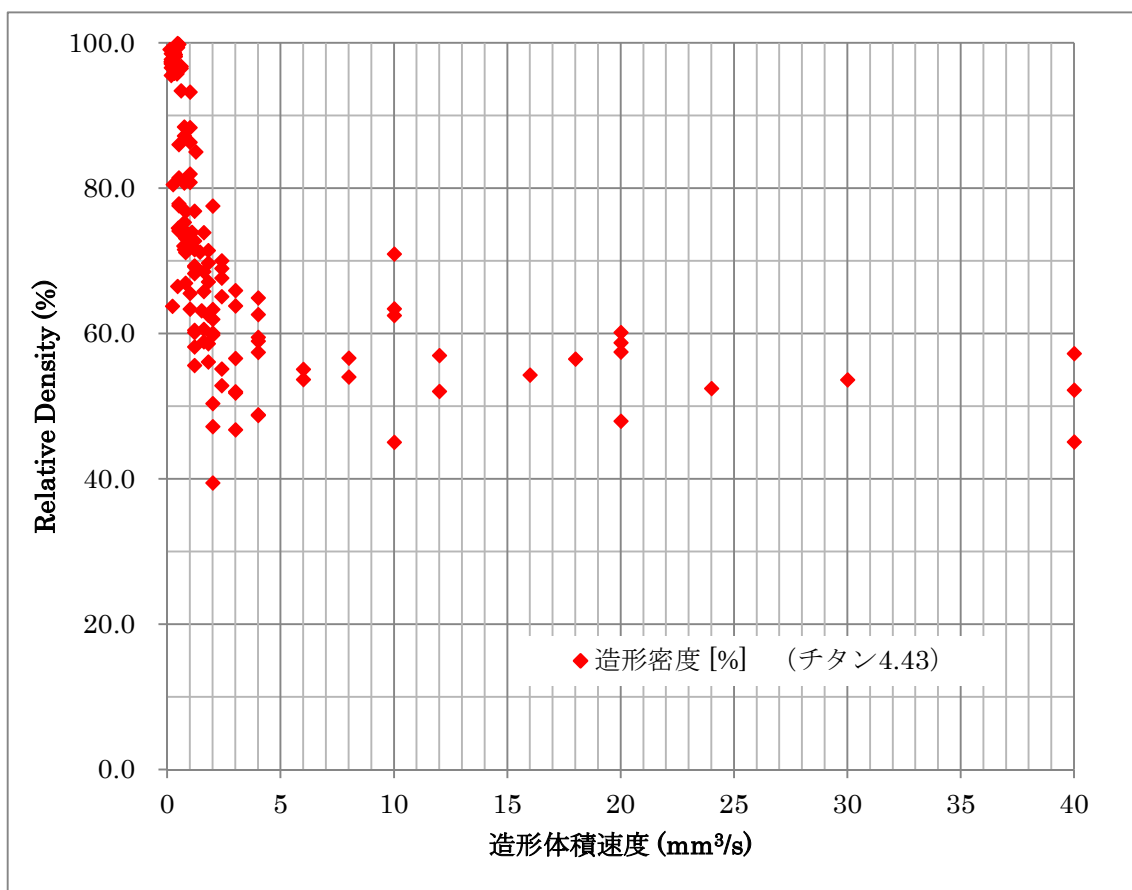


図Ⅲ-2. 11. 9 積層厚さと造形品の相対密度



図Ⅲ-2. 11. 10 走査ピッチと造形品の相対密度

各図からわかるようにそれぞれのデータで大きく相関がみられるものは無い。エネルギー密度では差があるように見えるが、単一の条件だと相関ははっきりしない。とりわけレーザーパワーは弱いと密度が高まらないが、強くても良くなる結果が見える。そこで、さきのエネルギー密度からレーザーパワーを除いたグラフを作ってみる。即ち単位時間あたりの造形体積と造形品の密度の相関である。図Ⅲ-2. 11. 11 に結果を示す。

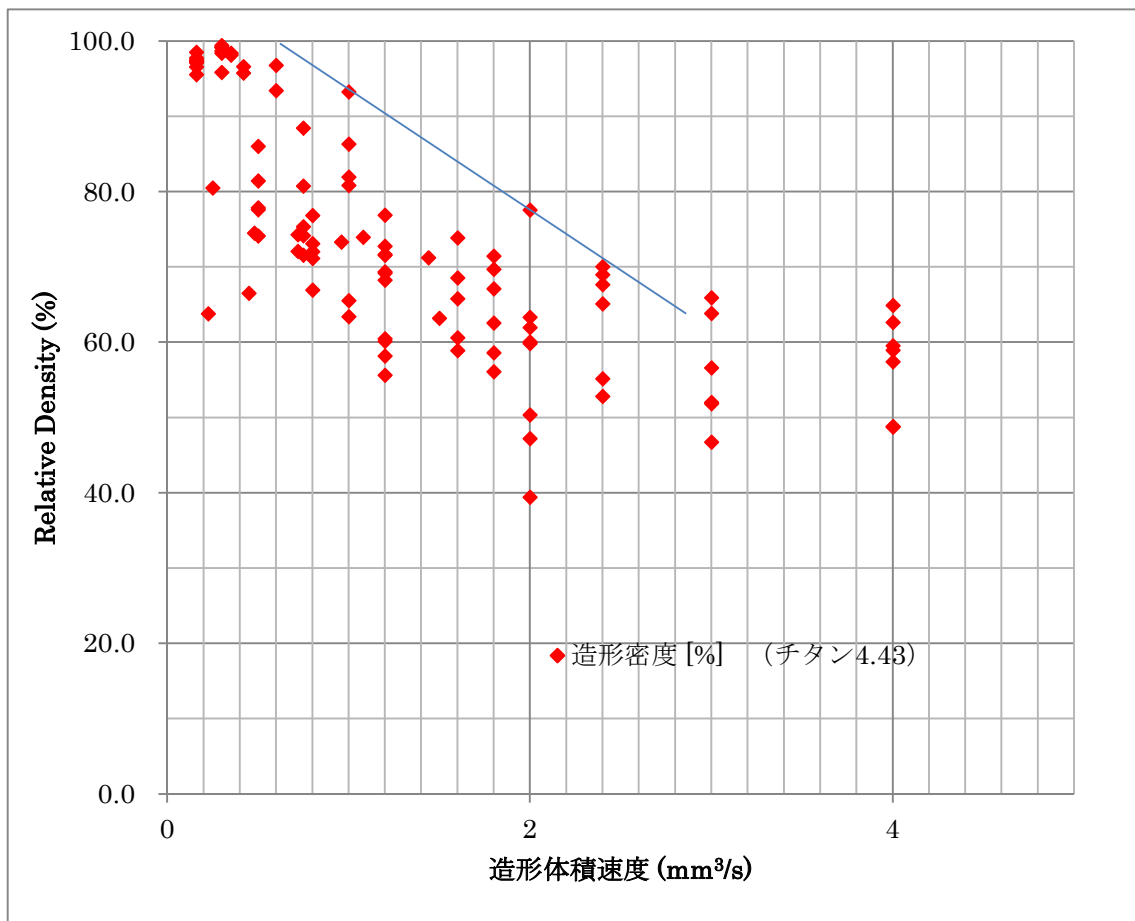


図III-2.11.11 単位時間当たりの造形体積と造形品の相対密度

この結果明らかに単位時間当たりの造形体積が大きいと密度が上がらないことが分かる。速度が遅い領域を拡大して図III-2.11.12 に示す。図中に直線で示したのは密度の限界と思われる線であり、一種のしきい値が見受けられる。この敷居が正しければ、6-4Ti 材で密度 100%を得るためには、 $0.6\text{mm}^3/\text{s}$  が一つの目安であることが分かる。図III-2.11.11 の造形ではリコート時間を除いた造形時間が、28分程度が限界と考えられる。

この限界の理由を検討すると、原料の粉に十分熱が伝わり溶融凝固するために必要な時間と考えられる。粉の熱伝導は悪く、溶融させるためには熱が伝わる時間を考慮する必要があるためと考えられる。

引き続き、造形に必要なリコート時間検討する。リコートの時間を仮に1回15秒とし、積層厚さを $0.06\text{mm}$ 、造形品の高さを $100\text{mm}$ とすると、リコートだけで約7時間必要である。 $100\text{mm}$ 角 $\sim 1\text{L}$ の造形の最短目安として7.5時間となる。造形速度以上にリコート移動に時間が掛かるため、この速度向上が造形速度の向上に有効であることが分かる。粉末床溶融型の造形技術においてはリコータの改良が有効手段であることが分かった。その一方無駄な造形は避ける、高さ方向に小さく作ることが有効であることもわかる。

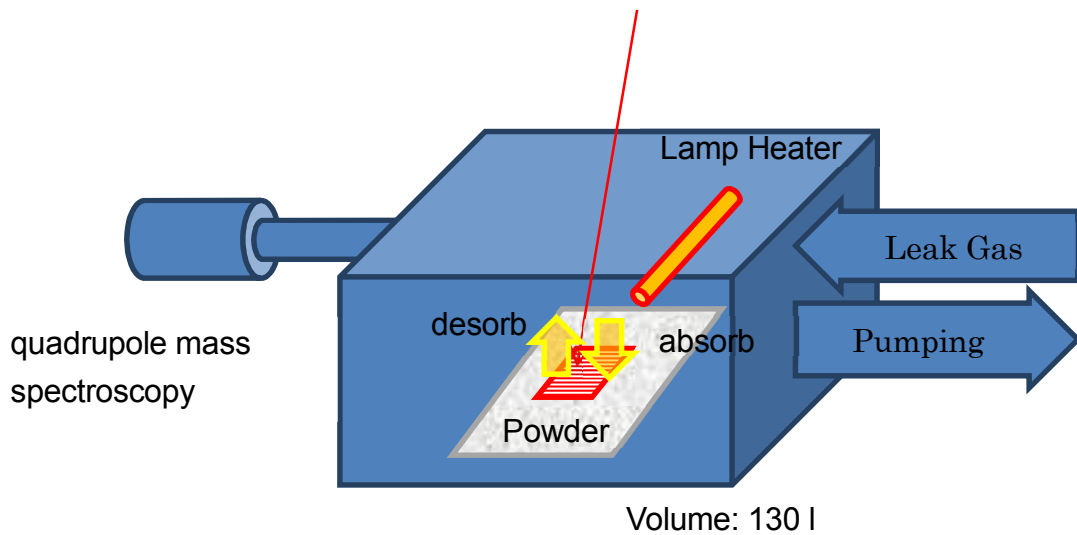


図Ⅲ-2. 11. 12 単位時間あたり積層体積と造形品の相対密度

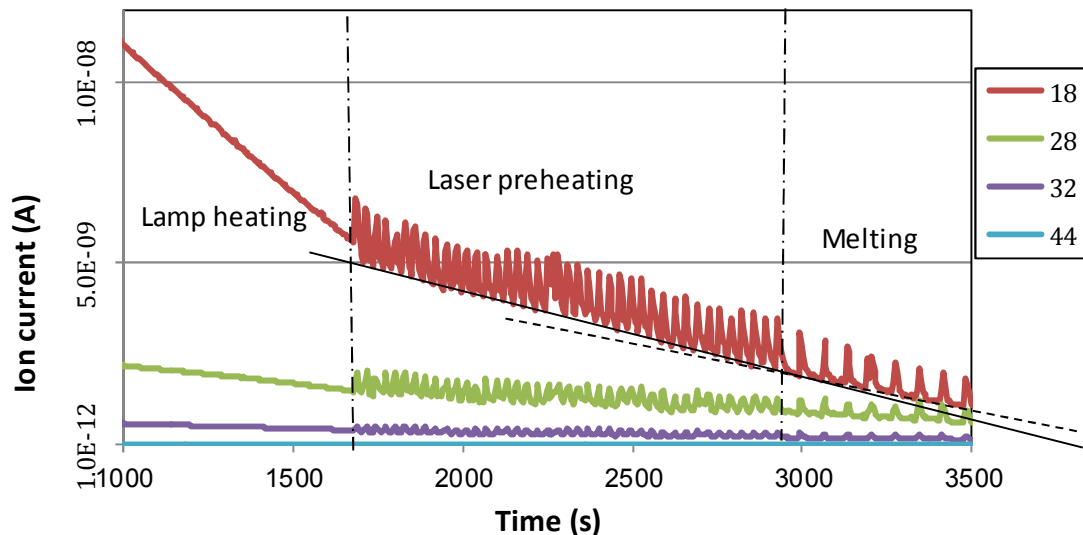
以上の結果を踏まえ、実用機の開発においては、リコート距離を短くする双方向でのリコートを可能とし、動作時間を短くするなどの機構とし、プロジェクト中に作成したプロトタイプに比べ時間の短縮を実現した。

#### 2. 11. 3. 5 真空効果について

本計画の特徴の一つである、真空の利用について検討した。真空中での放出ガス分析を行った。図Ⅲ-2. 11. 13 に装置概要を、図Ⅲ-2. 11. 14 に結果を示す。



図Ⅲ-2. 11. 13 真空中の放出ガス評価装置概要



図Ⅲ-2. 11. 14 レーザー照射時におけるガス放出結果（イオン電流量として表記）

この結果から、真空中ではランプヒートによる粉末の予備加熱を行うと、質量数 18～水分子を初めとしたガスの放出が徐々に減っている事が分かる。これは真空中に残留するガス成分が減っていることを示しており、徐々に状態が良くなっている事が分かる。真空度もあわせてゆっくりと向上する。続いてレーザー加熱を行った場合、減少速度が小さくなり、さらにレーザーが当たった時に大きく分圧が上がる状況が分かる。レーザー照射範囲は僅かに  $2\text{cm}^2$  しかないにも関わらず、ガスが多く放出されたことを示している。

粉末の表面は大気中に保管しているため大きな表面積に、水分を含んだ大気成分の吸着がある。これが真空および加熱により放出され、さらに真空のため放出したガス分子が戻らずポンプへ惹かれていくことが分かる。不活性ガス中では圧力が高いため放出が起こりにくく、起こった場合も拡散速度が小さいため溶融製品の近くに漂う。真空は品質向上の可能性が高い事が分かった。

この他、真空とガス中では断熱効果が異なる、真空度で環境の状態を管理できる、循環機構を考え

るとイニシャルコストもランニングコストも小さくできる、などの利点がある。一方、レーザーの出力が粉末材料の溶融に必要なエネルギー以上に投入された場合、金属粉末が蒸発しチャンバー内部へ蒸着してしまう。特にレーザーウィンドウやセンサーの窓が汚れた場合、加工が適切に行えなくなってしまうため、レーザー露光条件の最適化に加えて蒸着対策は解決しなければならない課題である。対策方法は現在得られていないが、いくつかの対策を検討中である。

#### 2.11.4 知的財産権、及び成果の普及

(発表等)

特許出願、論文発表の件数は、表Ⅲ-2.11.4に示す通りである。

表Ⅲ-2.11.4 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

区分 年度	特許出願			論文			その他外部発表	
	国内	外国	PCT <sup>※</sup> 出願	査読 付き	その他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H22FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H23FY	0件	0件	0件	0件	1件	0件	0件	0件
H24FY	1件	1件	0件	0件	2件	0件	0件	1件
H25FY	2件	1件	0件	0件	0件	11件	6件	3件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	12件	5件	3件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 2.12 研究開発項目 4 「技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」 (ALPROT 実施)

平成 22 年度～中間評価の期間においては、調査研究の各項目において中間目標を達成し、最終目標達成の見通しを得た。中間評価～平成 26 年度の期間においては、プロジェクト成果の普及促進を目指し、成果報告会とシンポジウム、展示会等の開催に取り組んだ。

本テーマはプロジェクトの装置開発とシステム開発とは別に、プロジェクトの運営と成果の普及促進や事業化のために設定したテーマである。レーザーとレーザー応用に関する調査研究や、有識者を交えてのシンポジウムと成果報告会等を開催することにより、プロジェクトを充実した厚みのあるものとすることができ、成果の活用や事業化を進めることができた。

##### 2.12.1 事業の背景・目的

本調査研究は、レーザー光源や加工プロセスそれぞれの拠点における研究開発の効率化や事業化を見据え、国際的なベンチマーク、最先端技術開発動向、市場化、ユーザーニーズ等を的確に捉え、プロジェクト研究開発へフィードバックをかけることを目的とした。そのため、プロジェクト関係者（実施者）、外部有識者、プロジェクト成果活用ユーザー企業メンバーから成る技術調査委員会を構成した。本研究開発の技術的な方向性や最新技術の動向把握、分析等国内外の情報をいち早く入手（例 レーザー学会、レーザー加工学会、応用物理学会、ICALEO (International Congress on Application of laser and Electro-Optics)、Photonics West、ASSP(Advanced Solid-State photonics)等) し、調査分析した結果を開発計画内に反映した。

時々刻々変わる技術動向の中でより効率的な開発推進、高信頼性製品の確立、高ロバスト性を確保するため、外部有識者やエンドユーザー、レーザー加工機メーカーに参加を求め、テーマ作業部会で議論した。

また、プロジェクトで開発された技術の交流を目的とした成果報告会とシンポジウムを開催した。成果報告会とシンポジウムを通じ、可能な範囲でプロジェクト成果をレーザー加工技術のエンドユーザー、レーザー加工機メーカーに利用してもらい、その評価を受けて研究開発にフィードバックした。そのほか、本開発技術の幅広い普及を目指した展示会を実施した。講演会も実施し、多くの参加者に本プロジェクトの成果をアピールすることができた。

##### 2.12.2 研究開発目標と達成状況

表Ⅲ-2.12.1 に研究開発目標と達成度を示す。当初の設定目標はすべて達成し、プロジェクト成果の普及促進に大きく貢献できたものとする。

表Ⅲ-2.12.1 研究開発目標と達成状況

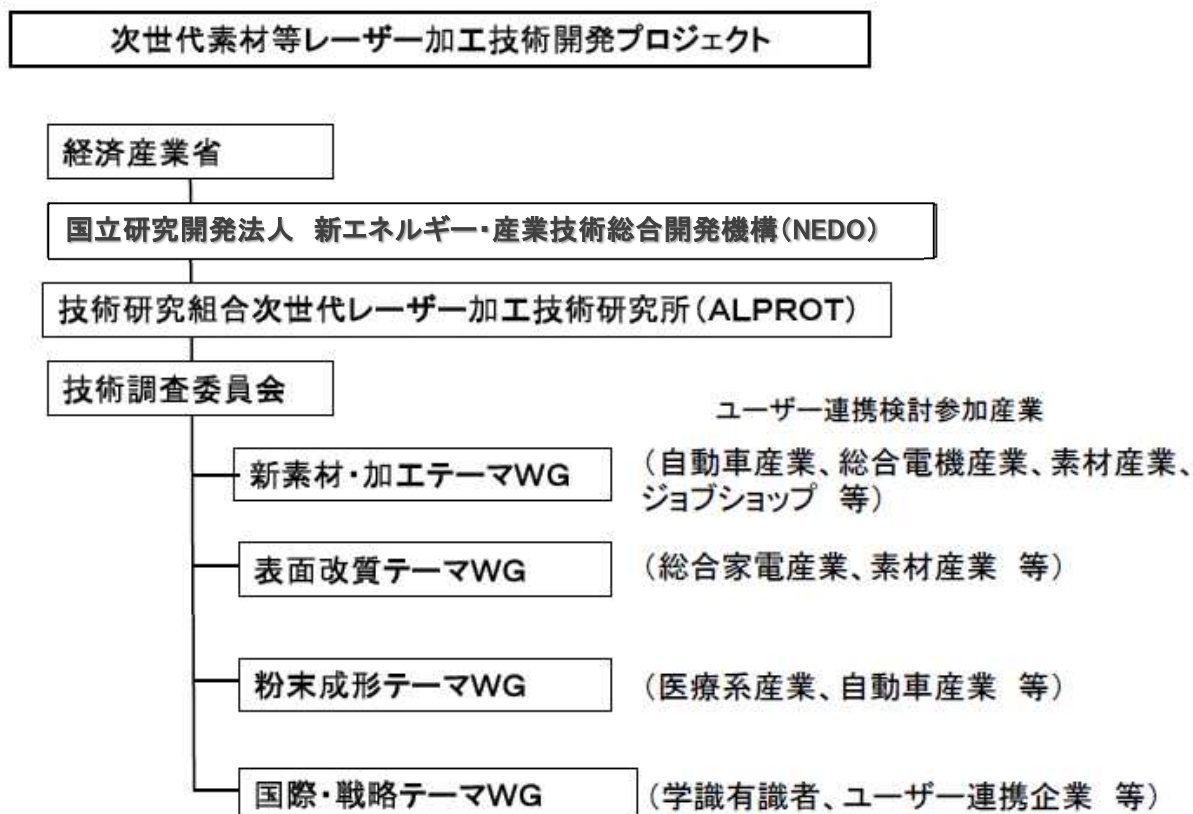
研究項目	最終目標	達成度
研究開発項目 4 技術開発推進にか	・開発光源および開発された光源を利用した加工システムのユーザーとの連携	「達成」○ 技術調査委員会とテーマ作業部会（国際・戦略、素材・加工、表面改質、粉

<p>かる調査・評価・普及促進</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 広範囲なものづくりに活用されるレーザー加工技術の実用化の可能性を明確にする</li> <li>・ 本開発の成果報告会の開催</li> <li>・ レーザー加工実証試験の開催</li> </ul>	<p>未成形) を開催し、レーザー光源等の調査を行い、ユーザーニーズについて議論した。</p> <p>成果報告会/シンポジウムや展示会を開催し、成果をアピールできた。</p>
---------------------	--	---

### 2.12.3 成果の詳細 ー体制

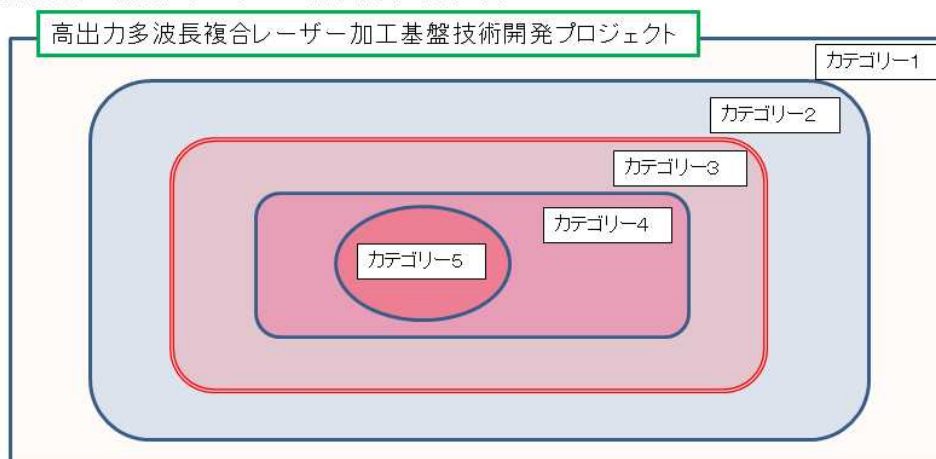
技術調査委員会は、各専門作業部会（ワーキング（WG）：国際戦略、新素材、表面改質、粉末成形）メンバーからなり、情報共有を行なうためのユーザー連携という観点での合同WGを技術調査委員会と位置づけ、年2回程度の開催を行なった。委員長は慶應大学名誉教授の小原實先生に依頼した。各テーマの内容に関して専門性が異なることから個別にWGを開催し、具体的な意見交換や話題提供、検討を行なった。研究開発実施者との情報共有を図るため、当該テーマに深く関わる研究者も同席し意見交換を行なった。

図Ⅲ-2.12.1に委員会の体制を示す。委員会の運営にあたってはプロジェクト外の有識者にも調査委員として情報提供を依頼したため、図Ⅲ-2.12.2のような知財管理の 카테고리を設定し、守秘の管理を行った。



図Ⅲ-2.12.1 委員会の体制

## 技術内容の情報カテゴリーの明確化(知財管理)



### カテゴリー種別:

カテゴリー1: 広く一般に知らせるための情報提供・主にプロジェクトの普及・促進として提供  
 カテゴリー2: ユーザー企業等本プロジェクトの成果を利用するための情報。但し、開発された原理、内容等の守秘情報と判断されたものは除く

カテゴリー3: 技術研究組合 組合員及び大阪大学(プロジェクト関係者)

カテゴリー4: 各研究テーマ毎の守秘情報(光源G、加工プロセスG)

カテゴリー5: 各組織内の守秘情報

注: カテゴリー指定は情報発信者の判断に任せるが、最終的には、技術開発会議又は発明審議会の決議による。カテゴリー3～5に関しては、参加各者間での守秘管理を遵守する(web等は、カテゴリー1)

図Ⅲ-2. 12. 2 知財管理のカテゴリー

### 2. 12. 4 技術調査委員会全体会議(合同WG)の開催

本会議において、レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向と標準化、新素材、表面改質、粉末成形テーマのニーズに関してプロジェクト実施者より報告を行い、それについて議論を行なった。海外動向では、ドイツにおけるレーザー加工関連のプロジェクトや企業と連携した人材教育の状況について委員から報告を受け、検討を行なった。中国はレーザー分野においても伸びが著しいが、この状況についても報告と議論を行った。

産業分野では自動車、航空機、素材が中心となるが、加工機メーカー等に関する情報収集や意見交換を行ない、より具体的な実用化に向けたニーズやスペック等の抽出を行なった。また、ユーザー連携実験等の考え方についても意見交換を行った。

中間評価後の会議開催内容は以下の通りである。

開催回	開催年月日 開催場所	出席者数	議事内容
第4回	平成25年2月1日 TKP虎ノ門会議室 6階カンファレンスルーム6A	43名	ドイツにおけるレーザー加工関連のプロジェクトや企業と連携した人材教育の状況の報告を受けた。また、ユーザーが中心となった連携実験の考え方を説明し、検討した。
第5回	平成25年8月8日 独立行政法人産業技術総合研究所 会議室及びALPROT実験室	25名	自動車、航空機、素材、加工機メーカー等に関する中国やヨーロッパの情報収集や意見交換を行ない、より具体的な実用化に向けたニーズやスペック等の抽出を行なった。



第6回	平成26年2月21日 真福寺ビル5階 第2,3会議室	34名	各WG（国際戦略、新素材、表面改質）の開発の進捗が報告された。粉末成形に関する技術等の動向と、委員より発表されたレーザー開発動向等についての議論を行った。
第7回	平成26年10月30日 真福寺ビル5階 第3会議室	28名	プロジェクト全体の開発体制、開発の進捗に関して報告し、レーザー加工ユーザー連携に関する自由意見交換を行った。
第8回	平成26年12月15日 真福寺ビル5階 第3会議室	33名	技術調査委員会成果報告書作成についての趣旨を説明し依頼した。また、レーザー加工ユーザー連携に関する自由討議を行った。

## 2.12.5 テーマ作業部会（WG）の開催

### (1) 国際戦略テーマ WG

本国際・戦略テーマ WG では、本開発プロジェクトが目指す製品製造産業での製造プロセスに利用できるレーザー加工実用機開発をめざし戦略立案を行う議論を行った。

国内外におけるレーザー光源及びレーザー加工の技術動向や研究開発動向を把握し、周辺技術等を含めた標準化、対環境問題、産業界のニーズについて検討した。人材教育やネットワークについても議論した。産業界からの要望としては、高出力、高品質、ロバスト性、簡易メンテナンス、低コストが重要な観点として位置づけられており、コスト重視の加工機が要望された。

また新規の開発については既存加工機をベースに製造プロセスを考えることが多いため、基礎技術のベースが失われ、新たな技術開発を進めることが難しくなっている。このような状況では産学官が連携して技術を残し、新しいチャレンジな技術開発が必要であるという意見が多く出た。

中間評価後の会議開催内容は以下の通りである。

開催回	開催年月日 開催場所	出席者数	議事内容
第5回	平成24年12月27日 オカモトヤビル	25名	中国を中心とするレーザー及びレーザー加工機の最先端技術開発や、欧米を中心とする最新レーザー開発動向等の報告を行ない、日本において取り組むべき開発内容や体制の検討を行なった。
第6回	平成25年12月16日 真福寺ビル5階第3会議室	20名	「中国におけるレーザー加工技術開発状況」 「世界のレーザー開発関連状況」 「ドイツにおける自動車産業のレーザー活用」の報告を行ない、日本において取り組むべき開発内容について検討を行なった。

### (2) 新素材・加工テーマ WG

日本の製造業が優位性を維持強化していくために不可欠なレーザー加工では、金属、樹脂、複合材等の切断・接合技術が必要となる。特に、アプリケーション側である産業ニーズから、CFRP

を中心とした複合材料の精密切断の強い要望がある。これは、自動車における重量軽減効果が CFRP の導入で最も効果的であることに由来する。本 WG では、プロジェクト成果のレーザー装置を使った加工性能評価結果を報告し、競合する CFRP 加工手法とのベンチマーキングを行った。また、産業界 WG 委員からの具体的なニーズ調査も実施するとともに、関連分野の業界動向について調査を行った。

中間評価後の会議開催内容は以下の通りである。

開催回	開催年月日 開催場所	出席者数	議事内容
第5回	平成25年1月17日 真福寺ビル 5階第2会議室	24名	産総研の実験設備の状況（倣いセンサ、重畳システム等）や国内外のCFRP加工の状況、素材開発の動向の報告を行ない、ユーザーニーズに関する検討を行なった。
第6回	平成26年5月30日 産総研 中央第5事業所 6階会議室	17名	プロジェクトの進捗（レーザー開発、レーザー加工技術開発）を説明し、ユーザー連携について検討を行なった。
第7回	平成26年11月7日 産総研 中央第5事業所 5階会議室	12名	プロジェクトの進捗（レーザー加工技術開発）を説明した。加工プロセス設備を見学し、委員と率直な意見交換を行った。

### (3) 表面改質テーマ WG

本 WG におけるひとつの成果はレーザーアニールのビーム幅を広げたことである。当初、本開発の目標は 500mm を想定していたが、WG 内の意見として 700mm 以上のビーム幅が必要とのことであった。この提言をとり入れて、本開発では 700mm 以上のビーム幅に変更して開発を進めた。更に、LTPS (Low Temperature Poly-silicon) のプロセスに必要とされるレーザーアニールの性能値などについても深く議論することが出来た。一方、各委員からは太陽電池への応用などについて提案があり、技術の出口を検討する上で大変有意義であった。太陽電池ではコスト対応が大きな課題であり、例えば、レーザーダイシング技術、レーザードーピング技術などレーザー応用技術として検討すべきテーマであるとの意見が多数出た。

中間評価後の会議開催内容は以下の通りである。

開催回	開催年月日 開催場所	出席者数	議事内容
第5回	平成24年10月1日 大阪大学 レーザー研大会議室	20名	本プロジェクトでの開発の主軸であるグリーンレーザーの開発進捗報告や、レーザーアニール開発の動向、ディスプレイ製造技術動向等の報告を行ない、ユーザー連携の取組みの検討を行なった。
第6回	平成25年1月30日 アルバック会議室	17名	アルバックに設置されたグリーンレーザー及びアニリング装置の見学を行ない、今後の開発内容の報告を行なった。また、これらの装置を活用したユーザー連携について検討を行なった。

(4) 粉末成形テーマWG（平成22年度～24年度）

技術調査委員会で各ユーザーの意見を聞くことができた。金属粉末積層成形装置に対するニーズは同じ金属材料を使用しても成形物の用途、サイズなどにより大きく異なっていることがわかった。基本的なプラットフォームに対してユーザーニーズに応じたカスタマイズや最適成形条件の導出による水平展開を行うことで、金属造形装置の市場の拡大に繋がることが判明した。

中間評価後の会議開催内容は以下の通りである。

開催回	開催年月日 開催場所	出席者数	議事内容
第5回	平成24年12月11日 大阪大学 接合科学研究所 特別会議室	15名	EuroMold2012および金属造形Conferenceの海外動向報告及び研究開発状況の報告を行った。自動車や医療関係でのユーザーニーズに関する検討を行ない、どのような連携が実用化に適しているか議論した。また、大阪大学製作のパルスレーザー装置等の見学を行なった。

2.12.6 成果の普及

プロジェクト成果の普及のため、成果報告会を開催した。同時にユーザー連携実用化推進シンポジウムを行い、有識者との意見交換を行った。プロジェクト成果の普及と実用化推進において、有意義で効果的な会議であった。

中間評価後の会議開催内容は以下の通りである。

開催回	開催年月日 開催場所	出席者数	議事内容
第2回	平成26年12月15日 虎ノ門ヒルズフォーラム（虎ノ門ヒルズ4階）	79名	<u>ユーザー連携実用化推進シンポジウム（進捗報告会）</u> 研究開発進捗の報告を行い、「日本のレーザー及びレーザー加工システム開発」についてパネルディスカッションを行った。（図Ⅲ-2.12.3）



図Ⅲ-2.12.3 第2回成果報告会/シンポジウム

## (参考)

ALPROT 自主事業として CFRP 加工の国際会議 LPCC2013 を運営し、同時に CFRP のレーザー加工に関するワークショップを主催した。

### ◆ LPCC2013 (International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials: CFRP 等複合材料のレーザー加工に関する国際シンポジウム)

平成 25 年 4 月 23 日～4 月 25 日

パシフィコ横浜・会議センター

光とレーザーに関する国際会議 OPIC2013 (Optics & Photonics International Congress) の専門会議として開催した (図 III-2. 12. 4)。ドイツのフラウンホーファー研究所やシュツットガルト大学から CFRP 加工の最新の研究発表がなされた (図 III-2. 12. 5、図 III-2. 12. 6)。国内外の CFRP 関連の報告 20 件があり、今後のプロジェクト遂行に関して有益な知見が得られた。

### ◆ CFRP 材料の産業応用研究最前線ワークショップ

平成 25 年 4 月 25 日

パシフィコ横浜・会議センター

名古屋大学・ナショナルコンポジットセンター、東レ(株)、三菱樹脂(株)、トヨタ自動車(株)、(株) I H I より講演をいただいた。国家プロジェクトでの CFRP 加工の取り組みや、CFRP 素材、自動車/航空機を中心とした CFRP の適用等について紹介された (図 III-2. 12. 7)。また、講演者からレーザー加工導入に対する課題についてのコメントもいただいた。ユーザー視点での CFRP 加工法や加工品質に関する率直な意見を聞くことができ、広く関係者間の交流も深めることができた。



図 III-2. 12. 4 OPIC2013 のポスター



図 III-2. 12. 5 LPCC2013 の会議風景

**Laser Processing for CFRP and Composite Materials 2013**

**LPCC 2013**

Tuesday, April 23

15:45-16:00 *Opening* Room 414+415

**Opening Remarks**

15:45 *H. Ogata, Conference Chair of LPCC2013  
Advanced Laser and Process Technology  
Research Association (ALPROT), Japan*

16:00-18:00 *LPCC1 :* Room 414+415

*Chair: Seiji Katayama, Steering & Program Committee  
Chair of LPCC2013, Osaka Univ., Japan*

**LPCC1-1 (Invited) Influence of process strategy and composite reinforcements on weld seam characteristics during laser welding of CF-PPS and CF-PA66**

16:00 *P. Jaeschke, U. Shute, and D. Kracht  
Laser Zentrum Hannover e.V., Germany*

**LPCC1-2 Laser direct joining of CFRP to dissimilar materials**

16:45 *Kwang-Woon Jung, Y. Kawahito, and S. Katayama  
Osaka Univ., Japan*

**LPCC1-3 In-situ inspection of thermoplastic CFRP welded zones using eddy current thermo-sensing**

17:00 *K. Mizukami, Y. Mizutani, A. Todoroki, and Y. Suzuki  
Tokyo Institute of Technology, Japan*

Thursday, April 25

10:00-11:30 *LPCC5:* Room 414+415

*Chair: Masahiro Tsukamoto, Osaka Univ., Japan*

**LPCC5-1 (Invited) Single mode fiber laser of its quasi CW operation for cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)**

10:00 *A. Fujisaki<sup>1,3)</sup>, T. Miyato<sup>1,3)</sup>, T. Kayahara<sup>1,3)</sup>, H. Niino<sup>2,3)</sup>  
<sup>1)Furukawa Electric, Japan, <sup>2)National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan, <sup>3)Advanced Laser and Process Technology Research Association (ALPROT), Japan</sup></sup></sup>*

**LPCC5-2 Development of high-speed, sweep type remote processing head**

10:30 *K. Wakabayashi<sup>1,2)</sup>, T. Nagashima<sup>1,2)</sup>, Y. Harada<sup>1,3)</sup>, and H. Niino<sup>1,3)</sup>  
<sup>1)Advanced Laser and Process Technology Research Association (ALPROT), Japan, <sup>2)Miyachi Corporation, Japan, <sup>3)The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan</sup></sup></sup>*

**LPCC5-3 Development of laser processing head for CFRP cutting**

10:45 *K. Furukawa<sup>1,2)</sup>, M. Matsushita<sup>1,2)</sup>, Y. Harada<sup>1,3)</sup>*

**CFRP 材料の産業応用研究最前線ワークショップ**

**プログラム (講演: 日本語)**

Workshop for New Frontier of CFRP in Industrial Applications  
Program (Presentation in Japanese)

**開催案内**

日時:平成25年4月25日(木) 12:30~16:45  
会場:パシフィコ横浜・会議センター 414+415  
主催:エルピーシーシー協議会(JALPC)  
後援:一般社団法人レーザー学会、一般社団法人レーザー加工学会、  
中部レーザー応用技術研究会  
技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所(ALPROT)

**プログラム**

シンポジウム趣旨説明 (片山聖二)	12:30~12:45
基調講演1	12:45~13:30
我が国におけるCFRP関連の研究開発 名古屋大学 石川隆司 動向と名古屋大学に整備中のNCC紹介	
基調講演2	13:30~14:15
東しにおけるCFRP展開状況と 東し㈱ 清水信彦 "コンセプトカー" TEEWAVE® の開発	
基調講演3	14:30~15:15
CFRPの産学連携による実用化 一般社団法人レーザー学会	



図III-2.12.6 LPCC2013のプログラムの一部

図III-2.12.7 ワークショップのプログラム (一部) と会議風景

## IV. 実用化の見通しについて

### 1. 実用化・事業化に向けた取り組みと見通し

このプロジェクトでは実用化・事業化を以下のように定義している。

「実用化」： 既存製品の性能向上や新製品の開発に活用できる段階まで、プロジェクトで開発した技術を整備する。

「事業化」： プロジェクトで開発した成果物を製品として販売し、会社の事業として展開していく。

要約すれば、実用化は技術の展開、事業化は製品の展開である。

これまでの開発より、3つの出口のCFRP切断接合、表面処理、粉末成形のどのテーマにおいても最終目標達成の見通しを得ている。最終目標を達成し、実用化と事業化への必要な基盤技術を確立し、事業化に向けた検討を進めていく方針である。

以下、実用化、事業化の詳細は各実施者の報告に譲るが、実用化、事業化の見通しについてプロジェクト全体を俯瞰して説明する。

#### 1.1 研究開発項目別の取り組みと製品イメージ

本プロジェクトは「2/3 共同研究」と「委託研究」から成り、それぞれの実用化・事業化に向けた取り組みは異なっている。事業化を計画している項目は 2/3 共同研究の

- ・高出力半導体レーザー開発（浜松ホトニクス株式会社）
- ・ファイバーレーザー開発（古河電気工業株式会社）
- ・アニール用システム開発（株式会社アルバック）

である。各社の本プロジェクト成果から派生する製品はその製品イメージと市場が明確であり、各社の販売体制の中で製品展開が適確になされるものである。事業化に対する取り組みは、問題なく行われると確信している。

大阪大学、産総研で開発を行っている参加企業は、大阪大学、産総研と共に開発成果の実用化をめざしていく。

- ・レーザー増幅技術開発と波長変換技術開発
- ・多波長複合照射加工技術開発
- ・アニール用レーザー開発
- ・粉末成形用レーザー開発
- ・粉末成形システム開発

以上のプロジェクト成果技術は想定市場での技術的優位性の検討を行い、製品展開が可能であれば事業化に結び付けることを計画している。プロジェクトの成果そのものを事業化できなくても、プロジェクトで開発した技術を取り入れて既存製品の性能向上を図り、新製品の開発に活用していくことを積極的に進めていく。産総研で実施の多波長複合照射加工技術開発では、「高速高精度制御加工ノズル」と「リモート加工ヘッド」を実用化可能な成果として考えている。

粉末成形システムは展示会にも出品し、製品展開の可能性もすでに視野に入れている。製品イメージも明確で実施企業も意欲的であり、事業化に結び付けられるものであると期待している。

大阪大学、産総研においては、それぞれの先端的な研究にも本プロジェクトの成果

は活用できるものである。

研究開発項目別の取り組みと製品イメージの詳細は各実施者の記載に譲る。

## 1.2 実用化・事業化に向けた課題と課題解決の方針

事業化に向けた課題では、技術的課題と事業実施体制の課題の2つがあるものと考えられる。技術的課題については、これまで述べたように最終目標達成に向けての課題の見極めができ、最終目標達成の見通しを得ているため、大きな問題はないと考えている。事業化に向けては低コスト化やコンパクト化等の技術的課題が想定されるが、各社に蓄積された製品化のための技術を活用することで解決できるものである。実施体制についても販売やサポート等の体制は各社で整備されているため、問題なく体制の構築ができるものと考えられる。

実用化を想定した開発項目では、製品展開の可能性を見極め、事業化できるものは製品として販売していくスキームである。実用化においても事業化と同様の技術的課題と実施体制の課題が生じるものと考えられるが、事業化の場合と同様に各社のサポート体制によって解決できると考えている。

詳細は各実施者の記載に譲る。

## 1.3 事業化までのシナリオ

事業化の3項目については事業化までのシナリオは明確に描かれている。販売体制、サポート体制を含めて、事業化までの道すじは明瞭である。

実用化を想定した開発項目においても、製品展開の可能性を見極めたうえで、事業化に対応していく計画である。

詳細は各実施者の記載に譲る。

## 1.4 波及効果

以上述べたように、本プロジェクトで開発した技術や製品は広く産業界に普及可能であると考えている。表IV-1.1にプロジェクトの3つの出口成果の波及効果を示した。

CFRP切断接合技術の波及産業としては自動車産業と航空機産業を想定している。自動車産業では現在普通車にもCFRP素材導入の検討が行われているが、省エネ、CO<sub>2</sub>削減の観点より高い確率でCFRP素材の導入が行われるものと考えられる。CFRP素材導入の場合には、生産性の高さよりレーザー加工技術が汎用的技術になるものと期待される。航空機産業においてはCFRP素材の導入はさらに加速されるものと考えられるが、加工方法の検討も重要な課題である。この分野においてレーザー加工技術がどこまで導入されるかは未定であるが、レーザー加工技術の優位性をアピールしていきたい。

表面処理技術の波及は家電産業と太陽電池産業を想定している。日本国内のテレビ産業はアジア勢の著しい進展に押されてしぼんでしまった感があるが、ITテレビやスマートフォン等への展開が期待されている。また太陽電池パネルの普及も加速されているため、表面処理技術はこれらの産業では重要な位置づけであり、本プロジェクト開発成果の波及も見込まれる。

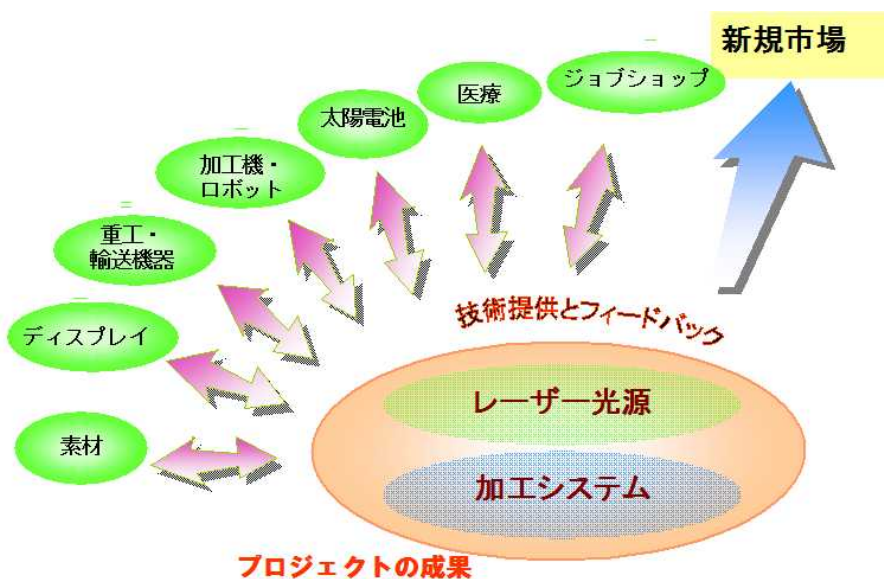
粉末成形技術の波及については多品種小量生産部品の生産を視野に入れ、医療産業

と航空・宇宙産業を想定している。医療産業では医療用パーツの実用化検討がなされている。厚生省の認可取得等の課題はあるが、人体代替部品という基本的には多品種小量部品への展開は非常に波及効果が大いものと考えられる。また、航空・宇宙分野においても、高機能で多品種小量生産部品が要求されるため、粉末成形技術は最適である。自動車産業や他産業においても切削・プレス等既存技術では製造不可能な製品が実現できるため、本プロジェクト成果の普及の可能性を秘めている。

図IV-1.1に示すように、本プロジェクトは様々な産業に対してレーザー加工手段を提供することで、産業界への波及効果は大いものと考えている。産業界との連携と情報のフィードバックにより、新規市場が生まれることにも期待している。

表IV-1.1 プロジェクト成果の波及効果

テーマ	波及産業	2010	2015	2020	2025
切断接合技術の開発	自動車	CFRP 素材導入の検討	試作、実用化試験 検証実験	実用化	
	航空機	レーザー加工技術導入の検討	試作、実用化試験 検証実験	実用化	
表面処理技術の開発	家電	IT テレビ、スマートフォン等への展開	実用化試験	実用化	
	太陽電池	太陽電池パネルへの展開	実用化試験	実用化	
粉末成形技術の開発	医療	医療用パーツの実用化検討	実用化試験 認定試験	実用化	
	自動車 航空機	多品種小量生産部品への実用化検討	実用化試験	実用化	



図IV-1.1 様々な産業への普及効果



## 2. 研究開発項目毎の実用化の見通しについて

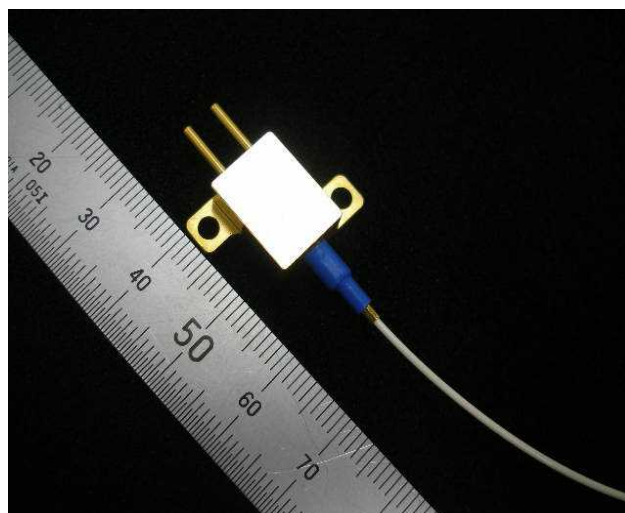
### 2.1、2.2 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」

「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」

「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発

(浜松ホトニクス株式会社)

本プロジェクトで開発した半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術及びそのファイバーカップリング技術は、例えばファイバーモジュール（図IV-2.1.1）といった形で具現化されており、ファイバーモジュールは、ファイバーレーザーの励起源、レーザー半田付、樹脂溶着などに用いられる加工用LDモジュール（図IV-2.1.2）としての適用が考えられる。



図IV-2.1.1 シングルエミッタファイバーモジュール



図IV-2.1.2 加工用レーザーモジュール例

また今回得られた技術成果は、加工用レーザー装置（図IV-2.1.3）の性能向上、環境負荷軽減に寄与するものと考えられる。平成19年度に開催された次世代レーザー技術活用調査委員会報告資料にもあるように、従来のCO<sub>2</sub>やYAGなどのレーザー光源より、半導体レーザーは他の加工用レーザーに比べエネルギー変換効率の点で優れており、省電力化（低炭素排出）、低ランニングコスト化の点で極めて導入効果が高い。今回開発された技術が適用されれば、エネルギーの効率的な利用に対してより高い効果が期待される。



図 IV-2.1.3 加工用レーザー装置の例：ダイレクトダイオードレーザー(DDL)およびファイバ出力型 DDL

例えばアレイの高出力化により、kW 級を実現するためにスタックするアレイ数を低減出来る。これによりレアアース材料の省資源化が可能となる。また電気光変換効率が向上することでエネルギー消費量が抑制され、低炭素化社会に貢献できる。さらに水冷ヒートシンクにおける腐食防止効果は半導体レーザーの長寿命化を促進し、省資源につながるものと期待される。

こうした利点および低コスト化による競争力を活かし、プロジェクト終了後、本プロジェクトで得られた成果を既存製品へ反映させることにより競争力の高い半導体レーザー応用製品への展開が可能となる。

平成 32 年における高出力半導体ファイバーレーザー及びそれを搭載したレーザー加工機の国内年間生産額としては、2,200 億円が期待されている。本プロジェクトの成果は、レーザー加工用光源およびファイバーレーザー用励起源に活かされる。レーザー加工機価格における半導体レーザーの占める割合は、おおよそ 15～25%程度である。

## 2.3 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発」

(阪大接合研、古河電工)

### 2.3.1 実用化・事業家の見通し

IV-5 (②-(1)-2)) 2.4.1、IV-8 (②-(2)-1)) 2.7.1 実用化、事業化見通しに準じる。

### 2.3.2 実用化、事業化までのシナリオ

IV-5 (②-(1)-2)) 2.4.2 実用化、事業化までのシナリオに準じる。

### 2.3.3 波及効果

IV-5 (②-(1)-2)) 2.4.3、IV-8 (②-(2)-1)) 2.7.2 波及効果に準じる。

## 2.4 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「(2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」

(阪大接合研、古河電工、片岡製作所)

### 2.4.1 実用化・事業化の見通し

表 IV-2.4.1 粉末成形シーダーと PCF 増幅器の実用化、事業化の見通し

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	~	2018
1) 粉末成形シーダー		70 W@100ns 高平均出力	100W @10ns -100ns 高出力・パルス幅可変					
		50 W@10ns 短パルス・高ピークパワー					コスト低減・信頼性評価	
2) PCF増幅器		中間目標達成のための技術開発	最終目標達成のための技術開発				実用化準備	
							実用化	

プロジェクト終了後、コスト低減と信頼性評価を行い、実用化の準備に取り組んだ後、2018年度の実用化を目指す。

### 2.4.2 実用化・事業化までのシナリオ

- ・ 粉末成形システム用レーザー
- ・ 再生可能エネルギー及び省エネルギー市場への参入
- ・ 多品種少量生産への対応

### 2.4.3 波及効果

- ・ 省エネ、CO<sub>2</sub> 削減への貢献
- ・ 国際競争力の強化
- ・ 電子機器など新技術開発へ貢献

## 2.5 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」

(阪大レーザー研、阪大接合研、ALPROT(古河電工、片岡製作所))

### 2.5.1 実用化の見通し

本プロジェクトで開発したパルスファイバーレーザーは、従来に短パルス (<10ns) でかつ世界最高のパルスエネルギーと平均出力 (>200W) を実現しているだけでなく、高光-光変換効率 (>50%)、パルス幅可変性、繰り返し周波数可変性、波長可変性の特徴を併せ持っている。

実用機のプロトタイプとしては、阪大接合研サイトにおいて ALPROT(片岡製作所)が製作するファイバーレーザーに技術集約され、加工技術開発センター(産総研)に製品納入される予定である。今後、パルス幅、繰り返し周波数、出力平均パワー、波長をカスタマイズ供給することによって、エンドユーザーの要求仕様に適したコンパクトレーザーとして実用化が期待される。

### 2.5.2 波及効果

レーザー加工分野のみならず、表IV-2.5.1のように多様な科学技術・学術用のレーザーとして実用に供することができると期待される。また、波長変換技術との組み合わせによって、応用分野はさらに拡がると考えられる。

表IV-2.5.1 応用が期待される分野

		ファイバー技術	ブースター技術	波長変換
エレクトロニクス・ 機械分野	微細加工	高ビーム品質		加工対象拡大
	アニール	横モード制御		コヒーレンス制御
原子力分野	ピーニング	衝撃波圧力の増大		
	除染	ファイバー結合		除染対象拡大
	解体		解体速度向上	
航空・運輸分野	ピーニング	衝撃波圧力の増大		
	レーザー超音波		診断速度向上	検出感度向上
宇宙分野	太陽光励起レーザー		高温動作におけるビーム品質	
	デブリ除去		デブリ除去性能	
科学技術分野	分光	広帯域光源		広帯域光源
	超短パルス	コンパクトfs光源		
	VUV~XUV	ビーム結合による高出力化		OPCPA fs光源
	THZ	コンパクトfs光源		

## 2.6 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」

(古河電気工業株式会社)

### 2.6.1 実用化・事業化の見通し

QCW ファイバーレーザーは今回の開発当初から実用化を考慮した設計を配慮している。製品化にあたってはコストと信頼性についての検証が必要になってくる。

QCW ファイバーレーザーはランプ励起固体レーザー分野での置き換えがまず期待されており、レーザーの出力としては最大でも数 100W 程度、産業分野としてはマイクロレーザー加工に分類される市場で、最も大きな需要は金属溶接で、また切断についても微細加工や高反射材料での適用が期待される。

### 2.6.1 事業化までのシナリオ

図 VII-2.6.3 事業化までのシナリオ

製品イメージ	ユーザーニーズに合致した高品質、低コスト、高信頼、使い勝手
売り上げ見込み	(市場の規模、成長性) LPSSL、DPSSL、炭酸ガスレーザーの置き換え需要
効果	(シェアアップ、コスト削減、省エネ、CO2 削減) 電気 - 光変換高効率 ⇒省エネ、CO2 削減

### 2.6.3 波及効果

マイクロ加工分野とともに、kW 出力以上のレーザーが使われるマクロ加工市場についてもファイバレーザーの用途拡大が進んでいる。レーザー加工製品市場のなかで最も大きな市場が炭酸ガスレーザーによる二次元板金切断分野である。本開発の延長としてさらに多重化を行い、マクロ市場を睨んだ製品開発も可能である。

## 2.7 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」

#### 「1) kW級ブースター増幅器の開発」

(阪大レーザー研、ALPROT(浜松ホトニクス、レーザー総研))

#### 2.7.1 実用化の見通し

本プロジェクトで開発している「kW級ブースター増幅器」は、国産のLDを励起源とし、レーザー材料としてこれも国産技術であるNd:YAGセラミックを用いている。また、増幅媒体としては、開発グループの特許に基づき、コンポジットセラミックを用いた全反射ジグザグ光路型のアクティブミラーを採用している。

一般的なアクティブミラーとジグザグスラブの利点を併せもった新しいタイプの増幅器であり、数100W～kW級の出力にフレキシブルに対応可能である。

#### 2.7.2 波及効果

レーザー加工分野のみならず、表IV-2.7.1のように多様な科学技術・学術用のレーザーとして実用に供することができると期待される。

表IV-2.7.1 応用が期待される分野

		ファイバー技術	ブースター技術	波長変換
エレクトロニクス・ 機械分野	微細加工	高ビーム品質		加工対象拡大
	アニール	横モード制御		コヒーレンス制御
原子力分野	ピーニング	衝撃波圧力の増大		
	除染	ファイバー結合		除染対象拡大
	解体		解体速度向上	
航空・運輸分野	ピーニング	衝撃波圧力の増大		
	レーザー超音波		診断速度向上	検出感度向上
宇宙分野	太陽光励起 レーザー		高温動作におけ るビーム品質	
	デブリ除去		デブリ除去性能	
科学技術分野	分光	広帯域光源		広帯域光源
	超短パルス	コンパクトfs光源		
	VUV～XUV	ビーム結合による 高出力化		OPCPA fs光源
	THZ	コンパクトfs光源		

## 2.8 研究開発項目② 「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」

### 「(2)アニーリング用ブースター増幅技術の開発」の実用化の見通し

(大阪大学レーザー研、ALPROT（浜松ホトニクス、アルバック）)

#### 2.8.1 実用化の見通し

本アニーリング用レーザー装置はフラットパネルディスプレイの大型化に伴う 500mm 幅のワイドビームによるアニール加工ができるレーザー出力を有しており実用性が高い。500mm 以上のワイドビームにも適応できる出力があり今後の FPD 市場の拡大にも寄与すると考えられる。実用化に向けたスキームを表IV-2.8.1 に示す。

表IV-2.8.1 実用化への見通し

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	～	2020
②-(2)-2)アニーリング用ブースター増幅技術の開発	中間(最終)目標試作					実用化		
②-(3)-1)波長変換モジュール技術の開発	中間(最終)目標試作							

2012 年度中にアニーリング用レーザーの出力目標を達成させ、ホモジナイズドワイドビーム光学系によりアニールプロセスに必要な均一パターンを生成し加工評価試験を行う。そこで得られたデータを基にアニーリングレーザーシステム全体の実用化への課題を抽出する。

本レーザーアニーリング加工システムは、現在実用化されている海外製エキシマレーザー（ガスレーザー）を用いたアニーリングシステムと比べて、全固体レーザー化により、高効率・長寿命であり、メンテナンス性も高いものとなっており、国産技術により実現できるメリットは大きい。



図IV-2.8.1 製品イメージ写真

製品イメージを図IV-2.8.1 に示す。

このアニーリング用レーザー装置は、発展の予想される大型テレビやスマートフォン市場で有用



であり、製造スループットの向上による製造コストの削減にも期待できる。

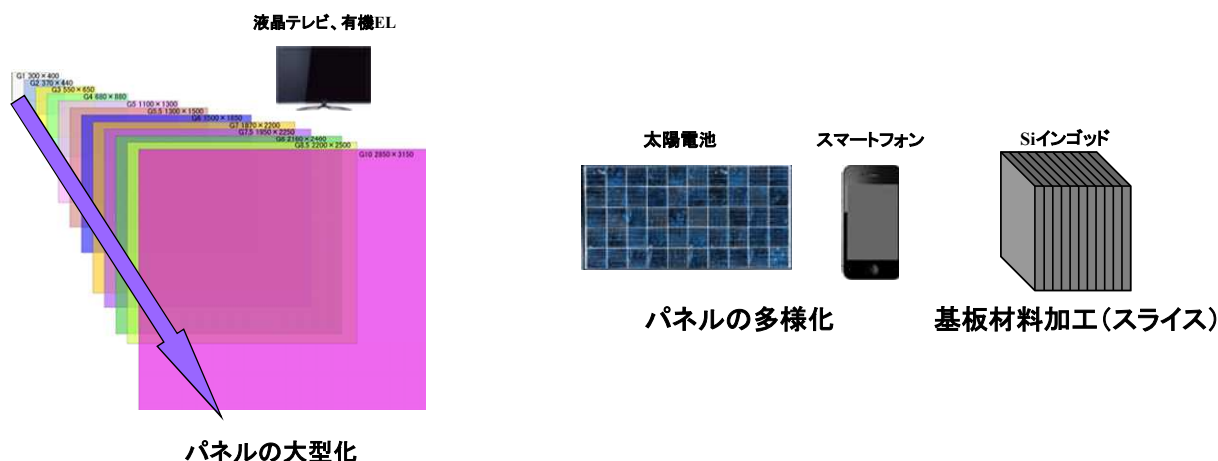
## 2.8.2 実用化に向けた技術課題

実用化にはレーザーの特性以外にレーザー装置の生産性、信頼性、メンテナンス性、低コスト化が求められる。信頼性向上、メンテナンスフリーにするには励起用半導体レーザーをCW駆動にした方が長寿命で有利となる。また、生産性やメンテナンス性を考えるとレーザーヘッドや光学素子といったコンポーネントの数を出来るだけ少なくした方が良く、これらを統合したレーザー装置の開発が重要となる。付加価値の高い高品位加工技術構築により世界をリードできると考えられる。

## 2.8.2 波及効果

FPDは40インチ市場から55インチ市場へ移行しつつある。今後さらなる大型化も考えられ、加速度的に大型化するFPD用アニールレーザー装置としてさらに進化させることが可能である。

予想される加工用途のイメージ図を図IV-2.8.2に示す。FPDや太陽電池のアニールのみならずスマートフォンなどの強化ガラスの湾曲切断や穴開け、太陽電池のP1~P4プロセスレーザー、シリコンインゴットのスライスによるカーフロス削減といったレーザー加工技術の応用が拡がり、今後要求されるレーザー加工用途の増加が予想される。また世界的にみてもトップクラスの性能を持つ加工装置であり、シリコン基板の加工における基礎データの取得や新素材の加工実証にも有望である。



図IV-2.8.2 予想される加工用途

## 2.9 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(3) 高出力波長変換技術の開発」

#### 「1) 波長変換モジュール化技術の開発」

#### 「アニーリング用レーザーの波長変換モジュール」

(大阪大学レーザー研、ALPROT (浜松ホトニクス、アルバック) )

### 2.9.1 実用化の見通し

本波長変換モジュールはアニーリング用レーザーに必要な不可欠なコンポーネントであり、多くの加工技術に重要である高エネルギーグリーン光を発生させることが可能である。

実用化に向けた見通しを表IV-2.9.1 に示す。

表IV-2.9.1 実用化への見通し

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	～	2020
②-(2)-2)アニーリング用ブースター増幅技術の開発	中間(最終)目標試作					実用化		
②-(3)-1)波長変換モジュール技術の開発	中間(最終)目標試作							

2012 年度中にアニーリング用レーザー装置内に波長変換モジュールを組み込み、グリーン出力を得る。グリーン出力を均一なワイドビームに成形し加工評価を行い、実用化へ向けた課題を抽出し実用化へと結びつけていく。

### 2.9.2 波及効果

IV-2.8 節で示した Si 基板を中心とした FPD や太陽電池のアニーリングを始め、複合ガラス材料の加工にも利用でき、期待されている。

グリーン光はサファイヤ基板加工等の他のレーザー加工への適用にも有望であり、さらに本波長変換技術は他の波長にも展開でき、幅広い表面改質分野における生産性向上に寄与することが期待できる。

## 2.10 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(3) 高出力波長変換技術の開発」

#### 「1) 波長変換モジュール化技術の開発

#### 「ファイバーレーザーの波長変換モジュール」

(阪大接合研、古河電工、片岡製作所)

### 2.10.1 実用化・事業家の見通し

IV - 5(②-(1)-2)) 2.4.1 実用化・事業化見通しに準じる。

### 2.10.2 実用化・事業化までのシナリオ

IV - 5(②-(1)-2)) 2.4.2 実用化・事業化までのシナリオに準じる。

### 2.10.3 波及効果

IV - 5(②-(1)-2)) 2.4.3 波及効果に準じる。

## 2.11 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(3) 高出力波長変換技術の開発」

「2) 波長変換の高効率化技術の開発」

(阪大レーザー研、ALPROT(レーザー総研))

### 2.11.1 実用化の見通し

本プロジェクトで開発している波長変換は、数 100 入力に対して効率 60%の 2 倍高調波変換、40%の 3 倍高調波変換を可能とするものであり、kW 級入力にも対応可能な高平均出力可視・紫外レーザー技術である。また、この波長変換素子はスタンドアロンであり、Nd:YAG 以外の波長のレーザーにも簡単な設計変更によって対応可能である。

### 2.11.2 波及効果

レーザー加工分野のみならず、表 IV-2.7.1 のように多様な科学技術・学術用のレーザーとして実用に供することができると期待される。

表 IV-2.11.1 応用が期待される分野

		ファイバー技術	ブースター技術	波長変換
エレクトロニクス・ 機械分野	微細加工	高ビーム品質		加工対象拡大
	アニール	横モード制御		コヒーレンス制御
原子力分野	ピーニング	衝撃波圧力の増大		
	除染	ファイバー結合		除染対象拡大
	解体		解体速度向上	
航空・運輸分野	ピーニング	衝撃波圧力の増大		
	レーザー超音波		診断速度向上	検出感度向上
宇宙分野	太陽光励起 レーザー		高温動作における ビーム品質	
	デブリ除去		デブリ除去性能	
科学技術分野	分光	広帯域光源		広帯域光源
	超短パルス	コンパクトfs光源		
	VUV~XUV	ビーム結合による 高出力化		OPCPA fs光源
	THZ	コンパクトfs光源		

## 2.12 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

### 「(3) 高出力波長変換技術の開発」

#### 「3) 加工試験のための整備」

(阪大レーザー研)

この課題は、ALPROT（産総研）における CFRP 切断試験を加速（Ⅲ-15）するための取り組みのために、市販レーザーよりも高出力の基本波、2倍、3倍高調波を CFRP の切断加工実験に供給し、加工速度見積もりと最適レーザー条件（パルス幅、波長等）の探索に資することができた。

なお、この整備自体が実用化を目指すものではないため、実用化の見通し等に関する記載は割愛する。

## 2.13, 2.14 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」

### 「(1) 切断接合技術の開発」

#### 「1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発」

#### 「2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発」

### 2.13.1, 2.14.1 実用化の見通し

現時点における実用化の見通しについて図 IV-2.13.1 に示す。「③-(1)切断接合技術の開発」における技術課題は高出力レーザー装置に適用可能な照射システム技術ならびに加工プロセス・評価技術を構築することにある。そのためには高速削り技術を開発するための高速高精度制御加工ノズルの開発と、複合レーザー照射によるリモート加工を可能にする高速掃引リモート加工ヘッドの開発が必要であるとともに、実用化可能な成果として考えられる。これらの技術は、加工プロセス・評価技術の開発と連携して、今後2年間での試作および実用化試験を行ったのち、検証実験を得て実用化する見通しである。また、プロジェクト終了後すぐに実用化するための施策として、ユーザー連携を実施しており、ニーズに合致した技術や製品の実用化を計画している。

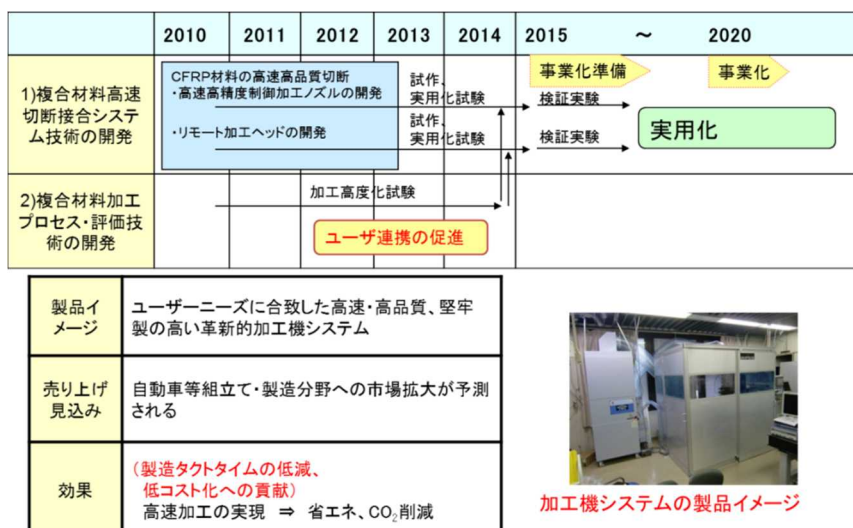


図 IV-2.13.1 実用化の見通し

### 2.13.2, 2.14.2 実用化までのシナリオ

現時点における実用化までのシナリオについて、ミヤチテクノスを中心とした高速掃引リモート加工ヘッドの開発では、開発される高出力パルスファイバーレーザーや高出力波長変換レーザー等を用いたリモート加工技術を構築し、スキャナ制御技術、スキャナ高耐力化技術、リモートロボット技術等を並行開発することによって、それぞれの技術が完成次第、同社の保有する既存分野への展開を想定している。また、市場動向により CFRP 加工分野への展開も図る。新日本工機を中心とした高速高精度制御加工ノズルの開発では、同社が自動車や航空機等輸送機器製造プロセスに展開する事業化能力を有することから、本開発終了後に事業化フェーズへの展開を進める。

### 2.13.3, 2.14.3 波及効果

本プロジェクトで開発した技術の波及産業としては自動車産業と航空機産業を想定している。自動車産業では現在量産自動車にも CFRP 素材の導入の検討が行われているが、省エネ・CO<sub>2</sub>削減の

観点より前倒しで素材の導入が行われるものと考えられる。CFRP 素材の導入の場合には生産性の高さよりレーザー加工技術が汎用的技術になると期待される。航空機産業においては CFRP 素材の導入はさらに加速されるものと想定され、生産性の高い加工技術の導入の検討は重要な課題である。また、自動車や航空機等輸送機器製造業界の輸送機器製造プロセスに事業展開するだけでなく、以下の関連分野にも大きく波及すると考えている。

- ・ 汎用材料への高速レーザー切断
- ・ 汎用材料への高速レーザー穴あけ

信頼性ならびに堅牢性に優れたレーザー加工機システムは、広汎な製造業分野から開発が期待されており、今後ユーザー連携の取組みからも技術ニーズを吸収していきたい。

## 2.15 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」

### 「(2) 表面処理技術の開発」

#### 「1) 高度ホモジナイズワイドビーム成型の開発」

(株式会社アルバック)

### 2.15.1 実用化・事業化の見通し

Ⅲ章の2.15において、開発成果について述べた。想定ユーザーとの密な情報共有と市場要求仕様等の観点で実践技術として開発レベルを高く堅持して邁進してきた。LTPSの市場において、極めて劣勢な状況下にあった工程を担う装置に対して、自国の技術を中心に加速的に引き上げた成果を報告できた。特に小規模の装置を用いた実験と他の多くの知見を基に高度なデザイン基礎を構築できたことは大いに評価したい。

### 2.15.2 実用化・事業化までのシナリオ

事業化への目処として、光学デザイン技術のみならず、実際にあわせて開発された大型異型レンズ研磨装置の開発も成功裏に終える見通しがつき、大型装置への搭載が可能な状況が構築できた。よって、早期のエンドユーザーとのパネル試作レベルでの実験的検討が行えると思われる。

事業化に向けた活動として、ユーザーに近い位置でのサンプリングを計画している。市場の最新情報を更新し、ニーズを正確に掴み、本技術を生産装置仕様にまで改良する事で本開発の目的である生産現場への貢献を果たす。(図IV-2.15-1参照)

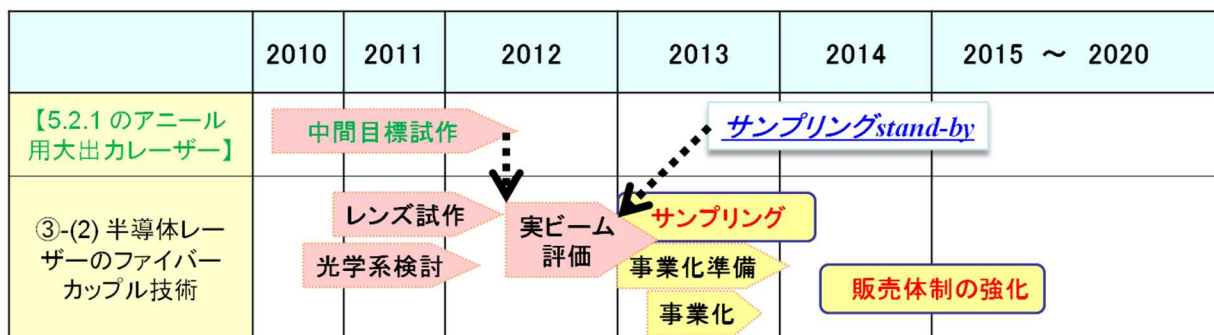


図 IV-2.15-1 事業化を目指したロードマップ

### 2.15.3 波及効果

ディスプレイ業界のみでなく、太陽電池(PV)分野での薄膜結晶化工程やその他の表面処理加工工程での応用範囲が期待できる。(図IV-2.15-2参照)



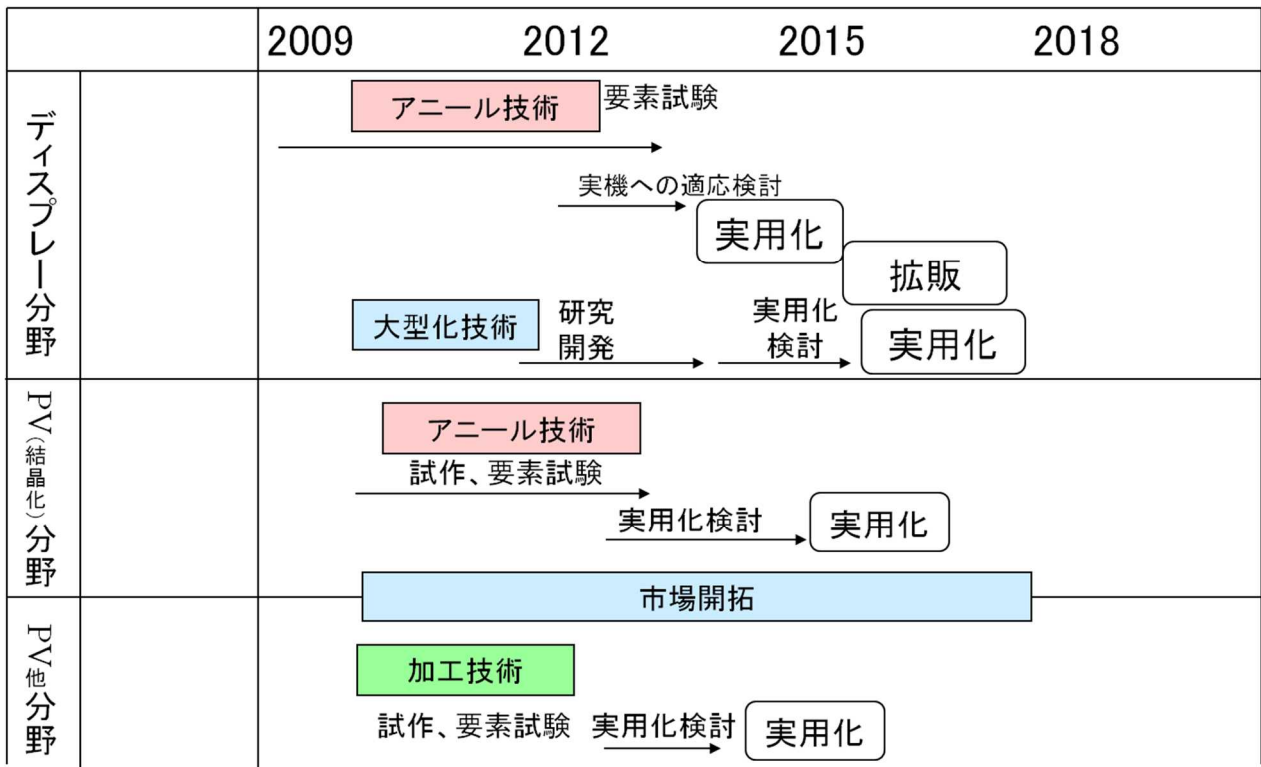


図 IV-2.15-2 多分野に向けたレーザー加工技術の開発ロードマップ

## 2.16 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」

### 「(2) 表面処理技術の開発」

#### 「1) 大型光学部品研磨技術の開発」

(株式会社アルバック)

### 2.16.1 実用化・事業化の見通し

Ⅲ章のⅢ-17 2.16において、開発成果について述べた。市場動向の情報をタイムリーにキャッチアップして、市場競争力のある装置提案が可能な開発環境を整えるに至ったと考えられる。また、この研磨機器の国内配備では、多くの応用アプリケーションへの展開が可能と思われ、国際的に技術優位の実力が示されるものと考えられる。

事業化への目処として、光学デザイン技術のみならず、実際にあわせて開発された大型異型レンズ研磨装置の開発も成功裏に終える見通しがつき、大型装置への搭載が可能な状況が構築できた。よって、早期のエンドユーザーとのパネル試作レベルでの実験的検討が行えると思われる。

### 2.16.2 実用化・事業化までのシナリオ

IV-16 2.15.2 参照。

### 2.16.3 波及効果

IV-16 2.15.3 参照。

## 2.17 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」

### 「(2) 表面処理技術の開発」

#### 「1) 高精度ビーム評価技術の開発」

(株式会社アルバック)

### 2.17.1 実用化・事業化の見通し

市場動向を鑑みて、当初の開発計画よりも到達値を大幅に上方修正して対応した。ワイドビームの設計とレンズ研磨に関する所で明らかにした様に、国内の陳腐化した、またはコモディティー化した装置群との決別を明らかにした。

本テーマでは、ワイドビームの300mm幅相当の中間目標に対して進められてきたが、急激な市場変化に伴う変化への対応を優先した。この為、周辺要素の上方修正が負荷となったことでビーム評価機器開発は本年度の後半着手へと優先順位をつけた。しかし、出口イメージを明らかにすることと、タイムリーな市場投入には間に合わせる段取りで対応中である。

### 2.17.2 実用化・事業化までのシナリオ

IV-16 2.15.2 参照。

### 2.17.3 波及効果

IV-16 2.15.3 参照。

## 2.18 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」

### 「(3) 粉末成形技術の開発」

(アспект、産総研実施)

#### 2.18.1 実用化・事業化の見通し

現在までのところ開発が順調に進んでいることもあり、早期の実用化が可能となると考えている。実用化としては、当初計画の医療用をはじめ、多様な用途向けへの波及についても後述のようにスムーズな実用化・事業化を目指す。

プロジェクト終了後、量産型造形技術の開発を完了させ、その直後から受託成形の販売活動を進めることにより、開発装置の市場評価を高め、年度末には装置も2台程度の販売を期待している。その後は年に5台から20台程度の販売を見込んでいる。さらに装置販売の台数に応じた材料販売と装置保守の販売も必然的に販売して行く。

実用化、事業化へ向けた技術的な課題と対策として、粉末積層技術に特化した形状やデザインの普及を促進する必要があると考えている。欧米では従来加工法では実現不可能で付加価値の高い形状のデザインへの適用事例などをシンポジウムで発表するなど積極的な活動が既に行われている。国内においてもシンポジウムや展示会などで適用事例を提供することにより、普及促進活動を地道に行う必要がある。並行してユーザーニーズに応じた成形品の品質の安定化を図る必要がある。特に日本のユーザーは保守的で従来加工法で得られる品質が常に保証されていないと新技術の採用にためらう傾向がある。従って、安定した品質が得られる成形条件の確立と、それを担保する評価技術の構築が必須である。さらに実用化、事業化へ非常に重要なのが材料のコストである。いくら付加価値の高い技術でもほぼ同じ形状で同じ品質の部品を作成するのに従来工法の数倍の費用がかかるようでは技術の普及が望めない。樹脂粉末の積層造形事業においても、10年前の材料価格に対して現在はほぼ半額となっているが、マーケットは4倍以上に広がっている。従って、材料メーカーに対して事業開始時期から普及促進のためにマージンを取りすぎないように交渉するとともに、当初は受託造形により普及活動に努め、生産量の拡大により、更なる材料価格の低減を推進していく必要がある。

#### 2.18.2 実用化・事業化までのシナリオ

医療分野、特に人工関節の成形の実用化については、2019年までには医療機関に対し人工関節を提供することを計画している。現在、ある医療機器メーカーが、先端医療開発特区において、「革新的な医療機器の開発」という分野の「生体融合を可能とする人工関節の患者別受注生産モデルの構築」という課題で、人工関節の事業化へ向けて研究を進めている。同社はチタン合金粉末を電子ビームにより直接焼結できる海外メーカー製のラピッドプロトタイピング装置を導入しており、その装置による薬事法の認可の準備を進めている。今回開発している装置では電子ビームではなく、近赤外線レーザーを使用しており方式が異なることから、認可を受けるためには、動物実験（前臨床試験）で有効性や安全性を十分に確認した後に、健康な人やその疾患の患者に対しての治験を実施する必要がある。しかし、同じ材料を使用して同レベル以上の真空度の成形環境で成形された部品の認可は、全く初めて実施するよりも敷居は下がっていると予測している。とは言え、プロ

ジェットの研究開発完了から最低3年は見ておく必要があると考えているが、同社の協力を得て、当該装置により製造された人工関節や人工骨に要求される仕様を実現すべく、必要とされる機能を装置の開発段階から組み込んでおり、比較的順調に進めることができるかと予測している。薬事法の認可を得られた後は同社と協力して人工関節や人工骨を供給・販売開始すると同時に装置や材料を国内外へ販売を推進していく。同社のルートと競合しないエンドユーザーへは販売代理店経由で販売する予定である。

### 2.18.3 波及効果

一般産業分野における実用化については、2016年までに金属造形の受託造形を提供することを計画している。国内のマーケットは新しい技術に保守的なユーザーが多く、いきなりの装置販売は難しいと考えている。そのため、まずはユーザーが装置を購入せずに金属積層造形による部品を利用、評価できるしくみを提供することにより、普及を促進することが重要である。したがって、AMシンポジウムや設計製造ソリューション展などの展示会において、真空環境下で成形可能な国産の積層造形装置が製品化されたことを発表することで潜在ユーザーの掘り起こしを図る。同時にアспект社の富士技術センターに今回開発した金属造形装置を設置し、ユーザーからのさまざまなデータにより、部品を造形することで徐々に利用者の裾野を拡げていく。

自動車産業ではチタンよりもアルミニウム合金の方が需要が高いと予測される。従って、自動車業界のユーザーと連携しながらアルミ材料の成形技術の確立に向け、試作、要素試験により、実用化を推進する必要がある。幸い粉末成形ワーキンググループには大手自動車メーカーの研究員の方も参画しているため、課題解決のために協力していただけると考えている。

航空宇宙分野では既に2012年から欧米ではジェットエンジンにAM技術の適用が開始されている。特にブレードの部分は高温になるために複雑な冷却構造がブレード内部に組み込まれていることからAM技術を活用したチタン合金の成形が進められている。航空宇宙産業は要求品質が厳しく、品質の安定と安全性の確認に時間がかかると予測しているが、海外では実用化が進んでいくことから、いずれ今回開発した装置と技術が必要とされることは確実であると考えている。

さまざまな一般産業分野への新しい適用事例としてスペアパーツオンデマンドが今後伸びていくと予測している。スペアパーツオンデマンドは保守部品のデータのみ管理しておき、保守部品を必要とときに必要な場所で製作し基本的には保守部品を在庫しないという展開である。国土が狭く資源の無い日本において、いつ使用するかわからない保守部品のために、その部品やその部品を作るための金型を10年以上も保管しなければならないことは非効率的である。さらに保守部品が必要な場所は、保守部品を在庫している場所とは限らないため、当然保管場所から必要とされる場所へ輸送しなければならない。AM技術により必要な部品を必要とときに必要な場所に一番近いAM装置設置で保守部品を製作すれば、金型が不要となり、製造コストの削減のみならず、輸送にかかる費用も最低限となり、省エネ効果とCO2の削減に貢献することが可能となる。

なお、アメリカではH25fyからDOD (Department of Defense)、NASA他の公募により、粉末積層造形法に関するプロジェクトが開始されようとしている。これは約3年間で30

億円相当のプロジェクトであり、医療分野のほか、航空宇宙産業などの分野向けに金属部品等の開発を進めるものである。このようなプロジェクトがドイツでも実施されている模様であり、今後新規の市場の確立が進むと考えられる。特に本積層造形法では、既存の加工技術の切削・プレス成形・鋳造などに比較し、形状の自由度が高く効率を優先した冷却流路内臓部品や軽量構造、さらに緻密体とポーラス体の混合体や傾斜機能材料といった材料構造の選択性等、他の製造技術では実現できない構造を実現できることから、空間的な制約や軽量化が期待されるような航空機、宇宙機器に始まり、自動車、発電設備、化学プラント等への大きな展開が期待できる。展示会等を通じた普及活動により、これらの製品の設計者に新しい積層造形技術を認知してもらい、粉末積層造形法を新しい加工技術の位置づけとして普及し、大きな市場の確保を目指している。

## IV. 実用化に向けての見通し及び取り組み

### 1. 事業全体の実用化・事業化の見通し

平成 22 年度～中間評価の期間においては、プロジェクトの各テーマにおいて中間目標をほぼ達成、または目標達成の見通しを得た。中間評価～平成 26 年度の期間においては、最終目標を達成しプロジェクト成果を実用化・事業化に結びつけることを目指して研究開発を実施した。

本プロジェクトでは実用化と事業化を以下のように定義している。

「実用化」： 既存製品の性能向上や新製品の開発に活用できる段階まで、プロジェクトで開発した技術を整備する。

「事業化」： プロジェクトで開発した成果物を製品として販売し、会社の事業として展開していく。

要約すれば、実用化は技術の展開、事業化は製品の展開である。

プロジェクト5年間の研究開発により、3つの出口のCFRP切断接合、表面処理、粉末成形のどのテーマにおいても最終目標を達成し、実用化、又は事業化への必要な基盤技術を確立した。

プロジェクトとしては実用化を求められているが、想定市場での技術的優位性の検討を行い、製品展開の可能性を見極めて、事業化に結び付ける努力を行った。

#### 1.1 成果の実用化・事業化の取り組み

事業化に向けての取り組みも含めて、プロジェクトリーダーとしての研究開発のマネジメントについて以下にまとめた。

項目	内容	マネジメント
予算	年度予算の策定	NEDO、実施者間の調整
実施テーマ	中間評価における見直し	NEDO、実施者との協議
技術開発会議	PL 主催 実施者の研究進捗報告	開発進捗状況、開発計画の確認、
技術調査委員会	レーザー加工の国際動向について議論	プロジェクト方針への展開
テーマ WG	業界動向、レーザー応用について検討	ユーザーニーズ等について協議
開発サイト訪問	大阪大学、産総研の現地視察	開発装置、実験状況などの現地確認
実施機関訪問	実施機関の研究所、事業所見学	開発体制等の確認、関係者との情報交換、意志疎通
連携実験	光源技術開発センター（大阪大学）における連携実験に参加	CFRP 加工実験状況の把握

予算や実施テーマの策定にあたってはNEDOと協議して検討を行った。特に中間評価後のテーマ見直しについては関係者との調整に時間を費やした。開発進捗状況については技術開発会議で実施者から報告を受け、開発計画・方針の確認を行った。技術調査委員会やテーマWG ではユーザーニーズ等について協議し、実用化・事業化に向けた検討を行った。

開発サイト訪問や実施機関訪問、また大阪大学レーザー研における連携実験では実施者間の連携を確認し、ユーザーを意識した実用化意識を高めることができた。開発目標の達成と実用化・事業化に結び付けることができたものとする。

プロジェクト実施者の実用化、事業化について、下記にまとめる。

◆【成果の展開】

大阪大学、産総研は事業化を行わないため、成果を共同研究機関に継承する。また、それぞれの機関における先端的な研究にも本プロジェクトの成果は活用できるものである。

◆【実用化：自社の製品への技術の波及】

自社の製品へ技術を展開するが、プロジェクトで開発した技術を取り入れて既存製品の性能向上を図り、新製品の開発に活用していくことを積極的に進めていく。また、製品展開が可能であれば、事業化に結び付けることも可能である。

◆【事業化：自社での製造・販売】

事業化を計画しているテーマは

- ・高出力半導体レーザー開発 (浜松ホトニクス株式会社)
- ・ファイバーレーザー開発 (古河電気工業株式会社)
- ・粉末成形システム開発 (株式会社アспект)

である。

各社の本プロジェクト成果の製品はその製品イメージと市場が明確であり、各社の販売体制の中で製品展開が適確になされ、事業化の取り組みが行われていく。粉末成形システムはすでに展示会にも積極的に出品し、製品展開がすでに行われている。製品イメージも明確で実施企業も意欲的であり、事業化に結び付いたテーマである。

【成果の展開】

	開発項目	成果の実用化・事業化
レーザー研	PCF ブースタの開発	成果の継承⇒ 古河電工、片岡製作所
接合研	パルスレーザー開発	〃
	パルスレーザー開発 メカニズム解明	国プロジェクトへ成果の継続 (戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) )
産総研	CFRP レーザー加工	成果の継承⇒ アマダミヤチ、新日本工機
	材料評価技術の確立 X線CT、寿命試験、 サーモグラフィ等	CFRP・他の複合材料の加工と評価に適用 民間企業との共同研究に活用

【実用化：自社の製品への技術の波及】

	開発項目	成果の実用化・事業化
片岡製作所	PCF レーザー	PCF レーザー増幅技術の製品への展開
アマダミヤチ	三次元スキャナシステム	高パワーレーザーを扱う水冷スキャナ技術



新日本工機	三次元 CFRP 倣い加工技術	CFRP 等の倣いセンシング、加工ヘッド技術
浜松ホトニクス	アニール用レーザー	高出力パワーパルスレーザーを展開
古河電気工業	パルスレーザー	パルスファイバーレーザーを展開
アルバック	シリコンアニール技術	業界動向を注視⇒ 自社製品への展開

### 【事業化：自社での製造・販売】

	開発項目	成果の実用化・事業化
浜松ホトニクス	半導体レーザー(LD)	LDの製造・販売、事業化
古河電気工業	ファイバーレーザー	LD、ファイバーレーザーの量産化
アспект	真空環境での粉末成形	金属の粉末成形装置の製造・販売

#### 1.2 実用化・事業化に向けた課題と課題解決の方針

実用化を想定した開発項目では、自社製品に開発した技術を取り入れて製品展開の可能性を見極めていく。実用化においては技術的課題と実施体制の課題が生じるものと考えられるが、技術的課題については、これまで述べたように最終目標を達成しているため、大きな問題はないと考えている。実施体制については各社のサポート体制によって解決できる。

事業化に向けては低コスト化やコンパクト化等の課題が想定されるが、各社に蓄積された製品化のための技術を活用することで解決できるものである。実施体制についても販売やサポート等の体制は各社で整備されているため、問題なく体制の構築ができるものと考えられる。

#### 1.3 成果の事業化に向けた取り組みと製品イメージ

事業化の3テーマについては事業化までのシナリオは明確に描かれている。販売体制、サポート体制を含めて、事業化までの道すじは明瞭である。

実用化を想定した開発項目においても、製品展開の可能性を見極めたうえで、事業化に対応していく計画である。

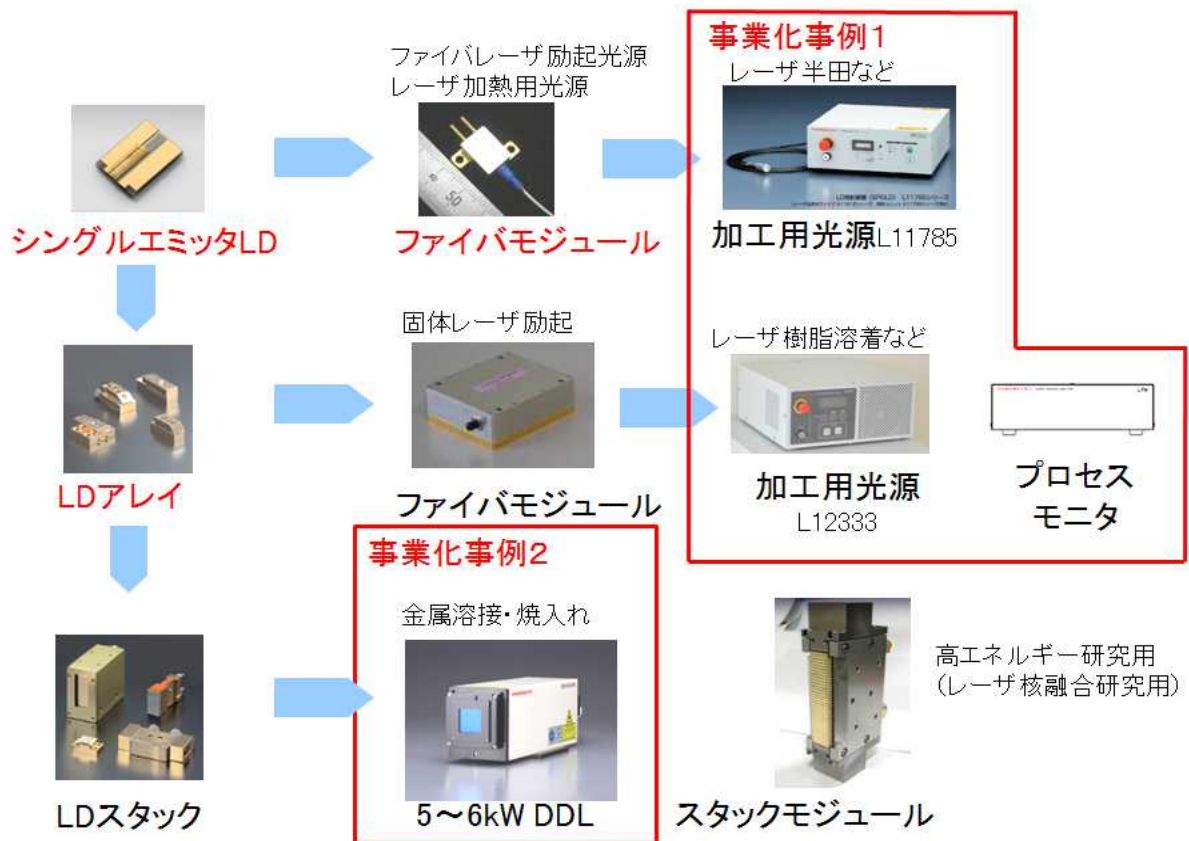
以下、事業化可能な3テーマについて紹介する。

#### ◆事業化への取り組み：高出力半導体レーザー開発（浜松ホトニクス）

浜松ホトニクスは、本プロジェクト開発の高出力シングルエミッタLDとLDアレイを事業化予定である。同社はLDの販売において、すでに実績がある。

図IV-1.1に本プロジェクト開発品の事業化への取り組みを示す。シングルエミッタLDとLDアレイ単品での販売に加えて、開発した新規レーザーデバイス技術は同社のレーザーはんだ付け装置やレーザー樹脂溶着装置等に組み込みが可能である。さらにスタック化することにより高出力のDDL（直接半導体レーザー光源）にも適用でき、応用範囲の拡大をめざすことができる。

すべての製品は、自社で一貫して製造、販売する体制が確立済みであり、本プロジェクト成果を製品として市場導入する体制について問題ないと考えている。



図IV-1.1 LD開発品の事業化への取り組み

◆事業化への取り組み：QCWファイバーレーザー開発（古河電気工業）

図IV-1.2～図IV-1.4に古河電気工業が事業化をめざす本プロジェクト開発品を示す。

QCWファイバーレーザーの製品化をすすめているが、従来の海外製のCWファイバーレーザーに比べ、QCW動作ではCFRPや金属板の切断特性が良好であるという特長がある。シングルモード発振や高繰り返しにも対応可能であるため、応用範囲の拡大が可能である。

すべての製品は、自社で一貫して製造、販売する体制が構築できるため、本プロジェクト成果を製品として市場導入する体制については問題ない。

本ファイバーレーザー開発で、国産のファイバーレーザー調達へ道を拓いたことは大きな成果であると考えている。



図IV-1.2 60W励起半導体レーザー  
(平成26年度から量産化開始)



図IV-1.3 1kWマルチモードファイバーレーザー  
(平成26年度より量産化開始)

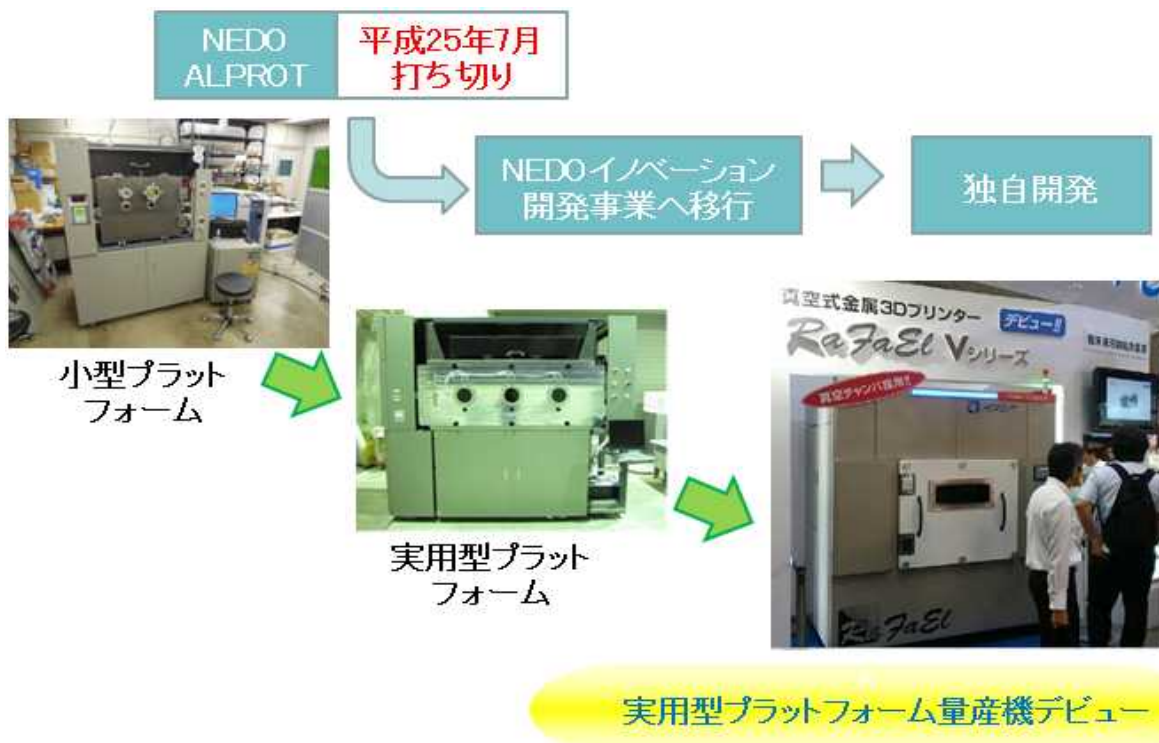


図IV-1.4 6kWマルチモードファイバーレーザー  
(平成27年度より製品リリース)

◆事業化への取り組み：粉末成形システムの開発 (アспект、産総研)

本テーマに関しては平成25年7月で終了となったが、NEDOイノベーション事業に移行し実用化に向け装置の開発をおこなった。プロジェクト終了後も自助努力を続け、製品化することができた。多くの展示会等にも出品し、真空環境での粉末成形の特長をアピールしている。図IV-1.5は、本プロジェクト開始から終了後の独自開発にわたる事業化への取り組みを示したものである。

産総研においては、企業からの粉末成形に関する技術相談や研修生受け入れ、共同研究等の実施を行っている。三次元プリンタブームの中で多数の講演などの活動も積極的に実施し、業界全体の底上げも図ることができ、大きい普及効果があったものと考えている。



図IV-1.5 粉末成形システムの事業化への取り組み

#### 1.4 波及効果

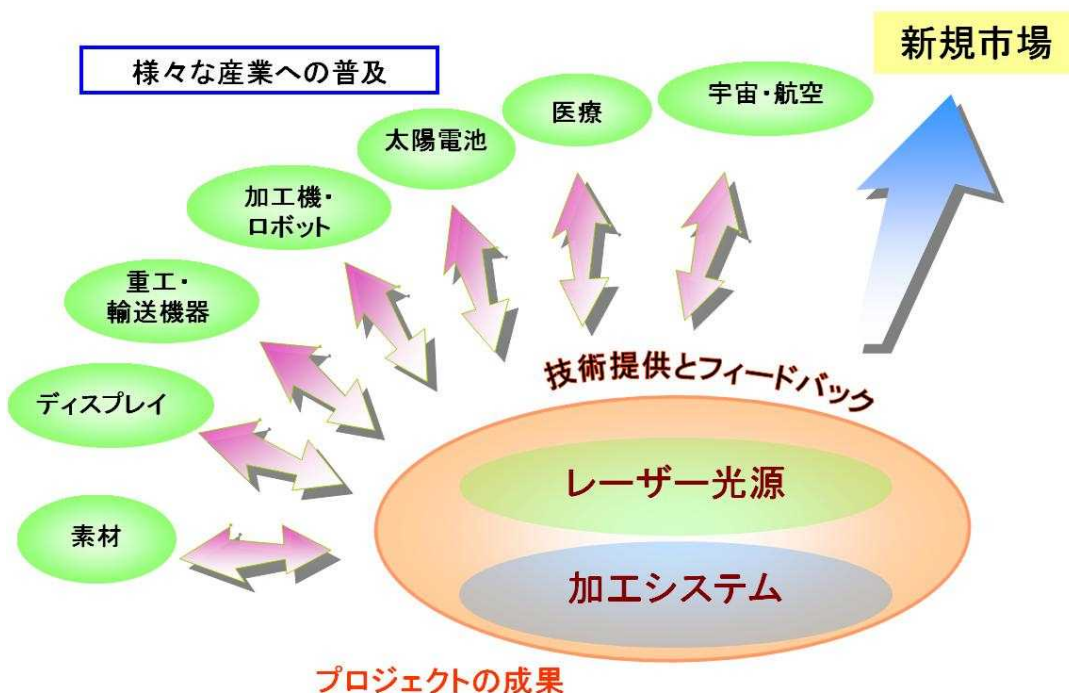
以上述べたように、本プロジェクトで開発した技術や製品は広く産業界に普及可能であると考えている。図IV-1.6にプロジェクトの出口成果の波及効果を示した。

CFRP切断接合技術の波及産業としては自動車産業と航空機産業を想定している。自動車産業では現在普通車にもCFRP素材導入の検討が行われているが、軽量化による省エネとCO<sub>2</sub>削減の観点より高い確率でCFRP素材の導入が行われていくものと考えられる。CFRP素材導入の場合には、生産性の高さからレーザー加工技術が汎用的技術になるものと期待される。航空機産業においてはCFRP素材の導入はさらに加速されるものと考えられるが、加工方法の検討も重要な課題である。この分野においてレーザー加工技術がどこまで導入されるかは未定であるが、レーザー加工技術の優位性をアピールしていきたい。

表面処理技術の波及は家電産業と太陽電池産業を想定している。日本国内のテレビ産業はアジア勢の著しい進展に押されてしぼんでしまった感があるが、高精細テレビやスマートフォン等への展開が期待されている。

粉末成形技術の波及については多品種小量生産部品の生産を視野に入れ、医療産業と航空・宇宙産業等を想定している。医療産業では医療用パーツの実用化検討がなされている。厚生省の認可取得等の課題はあるが、人体代替部品という基本的には多品種小量部品への展開は非常に波及効果が大きいものと考えられる。また、航空・宇宙分野においても、高機能で多品種小量生産部品が要求されるため、粉末成形技術は最適である。自動車産業や他産業においても切削・プレス等既存技術では製造不可能な製品が実現できるため、本プロジェクト成果の普及の可能性を秘めている。

本プロジェクトは様々な産業に対してレーザーとレーザー加工手段を提供できるため、産業界への波及効果は大きいものである(図IV-1.6)。産業界との連携と情報のフィードバックにより、新規市場が生まれることにも期待している。



図IV-1.6 プロジェクト成果の波及効果

#### IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

##### 2.3 研究開発項目1「CFRP切断加工技術の開発」

###### (1)高品位・高出力パルスレーザーの開発

###### ②励起用半導体レーザー技術開発（浜松ホトニクス株式会社 実施 1/3 実施者負担共同研究）

##### 2.3.1 成果の実用化・事業化の見通し

開発した成果を使用した実用化試作も開始しており、その技術は浜松ホトニクスにおける製品展開・製品戦略に既に組み込まれている。浜松ホトニクスでは15年以上前からレーザーを使った熱加工に取り組んでおり、特にレーザー樹脂溶着の分野では業界の先駆者である。最近ではレーザー樹脂溶着のみならず、浜松ホトニクスの技術はレーザー半田付、レーザー焼き入れ等の分野に対しても広がりを見せるとともに、展開先としては国内のみならず、中国や東南アジアも含まれる。このことから知財戦略として、特に鍵となる技術については中国への出願も行った。

本開発の成果であるレーザーの高出力化・高効率化・高信頼性化技術については、当然これらの製品に組み込まれる。特に高効率化のメリットは大きい。高効率化は単にLD（レーザーダイオード）の電気エネルギー消費が抑えられるだけでなく、冷却が容易になる。たとえば水冷方式のkW級のレーザーだと冷却水温度を従来の業界標準であった20℃から25℃に引き上げることが出来、その結果、結露が防止されることから、製品の高信頼性化とともに、この光源を使って作られる製品の工程安定化にもつながるといった大きなメリットとなる。

レーザー樹脂溶着、レーザー半田付、レーザー焼き入れについては、現在普及が始まったばかりであり、その市場については正確な予想が難しいが、半導体レーザーの市場規模が年5,000億円<sup>(1)</sup>であることから、年1,000億円程度の市場になることを期待している。

##### 2.3.2 実用化・事業化に向けた具体的取り組み

###### 2.3.2.1 シングルエミッタLDファイバーモジュールの実用化検討

シングルエミッタLDファイバーモジュールについては、実用性能を確認するため、米国光通信規格<sup>(2)</sup>に基づいた環境試験を実施した。試験前後の光出力は10%以下に収まっており、開発した調芯技術が実用的であることが確認された<sup>(3)</sup>。

また実用化の際、高光出力状態で使う場合、戻り光に対する頓死発生のリスクが高くなってしまふことが懸念される。今回開発したシングルエミッタLDファイバーモジュールの特徴である高光出力・高効率特性を活かすため、戻り光耐性を高める構造を開発し<sup>(4)</sup>、その技術を導入した新製品「L11785-61」（図Ⅲ2.3.1）をリリースした<sup>(5)</sup>。

### 2.3.2.2 古河電気工業株式会社との連携

開発した素子を研究項目(1)①に提供し、連携先にてファイバーレーザー励起モジュールを試作し、ファイバーレーザー励起モジュールとしての有用性について評価を受けた。開発素子の特徴である高い電気変換効率が本励起モジュールで確認され、ファイバーレーザーの冷却電力の抑制、高エネルギー効率化に寄与することが期待できるとの評価を受けた<sup>(6)</sup>。



図Ⅲ2.3.1 開発した戻り光抑制技術を導入した L11785-61

### 2.3.2.3 アレイ素子の実用化検討

#### 2.3.2.3-1 直接加工用レーザーの試作

本プロジェクトにて得られた LD アレイの成果を実用化するにあたり直接集光型半導体レーザー (DDL) を検討した<sup>(3)</sup>。DDL は、LD アレイを垂直方向に配列した (スタック化) kW 級の LD アレイモジュールと複数枚のレンズやプリズム等の光学系を組み合わせた直接集光型の半導体レーザー加工光源であり、金属の溶接や焼入れに使用される。

今回は、開発した技術を用いた LD アレイをスタック化し、その LD アレイモジュールを 2 つ使用した DDL を試作した。特性として、実用領域である光出力 3 kW 以上において、電気-光変換効率 50%以上が得られており、従来比で最大約 5%向上させることができた。これは結晶構造、素子構造、さらにスタック構造の最適化によるものである。結晶構造、素子構造を最適化したアレイ素子は高電流域での動作が可能になり DDL の最高出力は従来の 4 kW から 7 kW 近くまで高出力化する

ことに成功している。

また、冷却効率改善により高温動作化についても許容できるものとなる。冷却水温 25℃においても光出力の低下は小さい。冷却水温を従来の 20℃から 25℃へとすることにより、東南アジアなど高温多湿地域で多発する結露問題が回避されることが期待される。

#### 2.3.2.3-2 4 アレイ伝導水冷型ファイバーモジュールの試作

従来、アレイを用いた 200W 級のファイバーモジュールは、アレイをスタックしたものが用いられてきた。スタック構造の場合、発熱密度が非常に高く、冷却性能を高める為にマイクロ流路を LD 直下に配置する噴流方式<sup>(7)</sup>がとられることが多い。噴流式はヒートシンク構造が複雑で高価となる。またチラーも高圧力を発生させるため大型ポンプが必要であり、また腐食や詰まりを防止するための純水仕様、導電率管理が必要となる。

一方、アレイを使った数十Wクラスのファイバーモジュールでは、冷却板の上にアレイモジュールを配置した伝導水冷方式と呼ばれるシンプルな構造がとられる<sup>(8)</sup>ことが多いが、それには変換効率を向上させて発熱を抑制することと高温動作に耐えうるアレイを作る必要がある。開発した技術を取り入れたアレイを用いて、ファイバーモジュールの試作を行った。

本モジュールに使用するチラーとして、従来の噴流式用チラーと比較すると、大きさ・重量ともに約 40%となる。設備自身はもちろんのこと、輸送時やチラーのランニング時の省エネルギー化にも寄与するものと考えている。本試作品を使用した加工光源については、2015 年 4 月にレーザー加工技術展に参考出品した。

#### 2.3.3 波及効果

レーザー樹脂溶着、レーザー半田付、レーザー焼き入れについては、現在普及が始まったばかりであり、その市場については正確な予想が難しいが、半導体レーザーの市場規模が年 5,000 億円<sup>(1)</sup>であることから、年 1,000 億円程度の市場になることを期待している。

## 参考文献

- (1) Laser Focus World Japan, Vol.3 (2014)
- (2) Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunications Equipment, A Module of RQGR, FR-796, Telcordia Technologies Generic Requirements GR-468-CORE Issue 2(2004).
- (3) T. Uchiyama et al., Abstract of the 4th Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS15-2.
- (4) 特許出願 2014-051932.
- (5) 浜松ホトニクス新製品ニュース、hamahot vol.5(2014).
- (6) ALPROT、次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト平成 26 年度 第 26 回プロジェクト技術開発会議議事録、平成 26 年 11 月 18 日
- (7) H. Miyajima et al., OPTICS LETTERS 29 No.3 February 1, 2004.
- (8) U. Fornahl et al., Proc. SPIE 6876, 68760X (2008).



IV. 実用化に向けての見通し及び取り組み

2.4 研究開発項目1 「CFRP 切断加工技術の開発」

「(2) CFRP 加工技術の開発」

「①CFRP 高速切断技術の開発」

(アマダミヤチ、新日本工機 実施)

(1)2 波長重畳三次元リモート加工システムの開発 (ALPROT : 株式会社アマダミヤチ)

2.4(1).1 実用化の見通し

本研究で開発した2波長重畳3次元スキャナーは高出力IRレーザーやUVレーザーと組み合わせることにより、自動車や航空機等の各種部品のような、段差や傾斜面、湾曲面を持った中型・小型部材の切断、バリ取り、穴あけ加工への導入が想定される。また、スキャナーを介してレーザー光軸と同軸のカメラにより加工点の拡大観察が可能であるため、加工位置の確認、加工状況のモニタリング、加工後の検査に活用できる。この機能は画像処理(位置補正)技術として開発・整備していく予定である。

自動車産業や航空機産業では省エネ、CO<sub>2</sub>削減の観点より、CFRP素材の導入がさらに加速されると想定されるが、2~3mm厚のCFRP基材の加工速度は機械加工で0.1m/min、ウォータージェット加工で1m/min程度であり、高速化が求められている。レーザー加工はm/minオーダーの加工速度が実現できており、今後の更なる高出力、高輝度レーザーの開発により一層の高速化が期待できる。樹脂に生じる熱影響層を抑える方法として本研究開発でも採用した短波長レーザーを用いる方法や短パルスレーザーを用いる方法が考えられ、今後、それらのレーザーの更なる高出力化、高輝度化が期待されるとともに、量産、普及による低コスト化も期待できる。機械加工における工具の消耗などのコスト面やウォータージェット加工における加工後の排水の後処理などの環境対策の面からもトータル的に考慮した際に、レーザー加工の優位性が社会的に次第に認識されていくものと考えられる。

表 IV-2.4(1).1 実用化の取り組み

年度	2010	2011	2012	2013	2014	2015	~ 2020
2波長重畳3次元スキャナー		2次元スキャナー試作					2波長重畳3次元スキャナーの事業化
画像処理(位置補正)技術			3次元スキャナー試作			観察カメラ機能試作	実用化検討 事業化検討

#### 2.4(1).2 実用化に向けた具体的取り組み

プロジェクト開発機でも採用したレーザー光軸と同軸のカメラによる拡大観察機能を、画像処理（位置補正）技術として開発・整備し、弊社製レーザー加工機に搭載する取り組みを行っている。2015年度中には新製品としてリリースする見込みである。

さらにプロジェクト開発機については、事業化を目指し、弊社システム製品の2波長重畳3次元スキャナーとして既にホームページに掲載し、販売活動を行っている。加工用のレーザー機器はもとより、搬送用ロボットから治具、ソフトウェアまで、お客様の仕様に合わせたシステムアップをワンストップで提供している。

#### 2.4(1).3 波及効果

自動車や航空機等の各種部品のような、段差や傾斜面、湾曲面を持った中型・小型部材の切断、バリ取り、穴あけ加工にレーザー加工を導入することにより、タクトアップ、加工品質向上、製造コスト削減、省エネ効果、CO<sub>2</sub>削減が期待される。

本研究で開発した3次元CADデータインポート機能により、市販の3次元CADの強力な作図機能を利用した複雑形状の切断加工が実現できる。従来工法では技術的に困難、または、コスト的に見合わないと言われてきた加工が実現可能となった。また、3次元CADソフトは近年、シミュレーションソフトとの連携が発展してきており、構造等の加工前検証をシミュレーションソフトで行い、その際に使用したデータを基に、本研究で開発したようなレーザー加工機で実加工を行うといった、設計、検証、製造の連携が取りやすくなった。これらにより、少量多品種対応、リードタイム短縮が可能となっている。

#### (2) 1m級三次元加工機システムの開発（ALPROT：新日本工機株式会社）

IV-2-4-(3) (事後)～IV-2-4-(5) (事後) ページ参照

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組み

2.4 研究開発項目1「CFRP切断加工技術の開発」

「(2) CFRP加工技術の開発」

「①CFRP高速切断技術の開発」の成果

(アマダミヤチ、新日本工機実施)

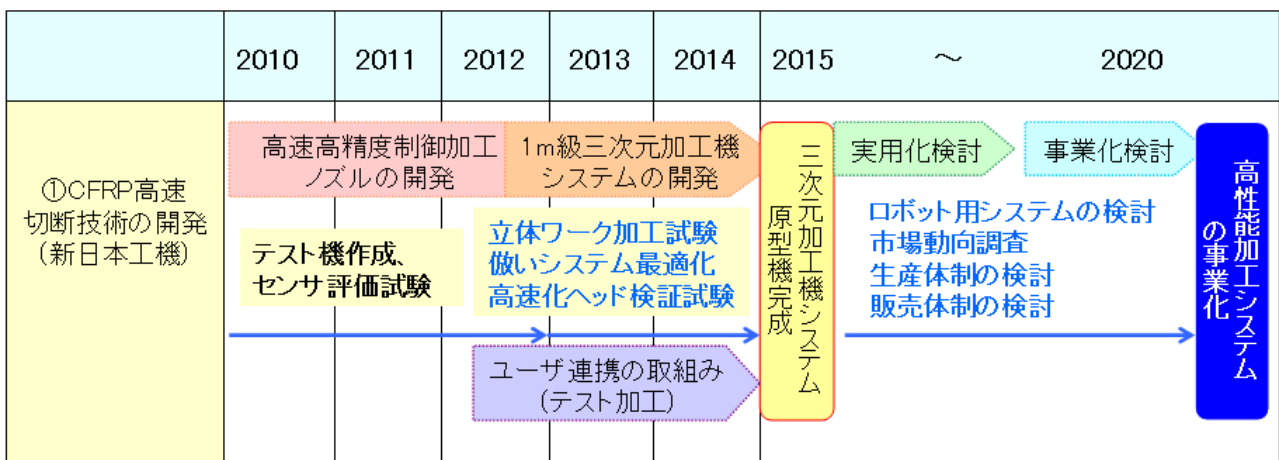
(1)2波長重畳三次元リモート加工システムの開発 (ALPROT：株式会社アマダミヤチ)

IV-2-4-(1) (事後)～IV-2-4-(2) (事後) ページ参照

(2)1m級三次元加工機システムの開発 (ALPROT：新日本工機株式会社)

2.4(2).1 実用化・事業化の見通し

実用化・事業化のシナリオについて図IV-2.4(2).1に示す。

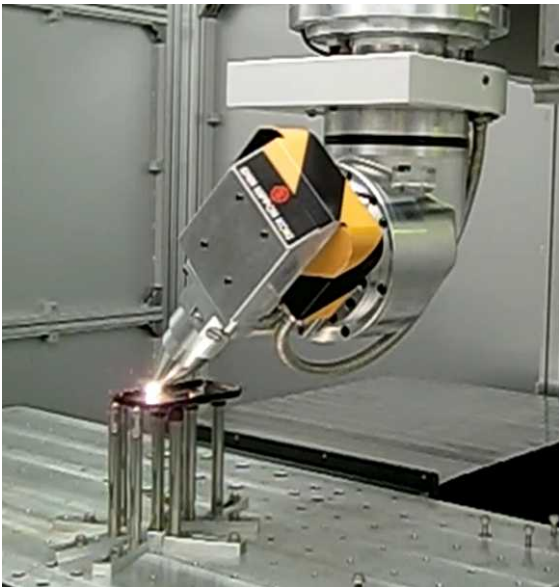


図IV-2.4(2).1 実用化・事業化のシナリオ

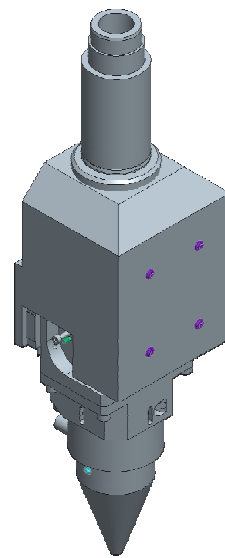
2.4(2).2 実用化・事業化に向けた具体的取り組み

実用化に向けて

本プロジェクトにて開発した5軸加工機用做い加工ヘッドをロボットシステム用にも対応可能とし、様々なユーザーニーズに応えるCFRP加工用5軸マシンシステムの構築を図る。図IV-2.4(2).2に5軸加工機用做い加工ヘッド、図IV-2.4(2).3にロボット用做い加工ヘッドを示す。



図IV-2.4(2).2 5軸加工機用倣い加工ヘッド



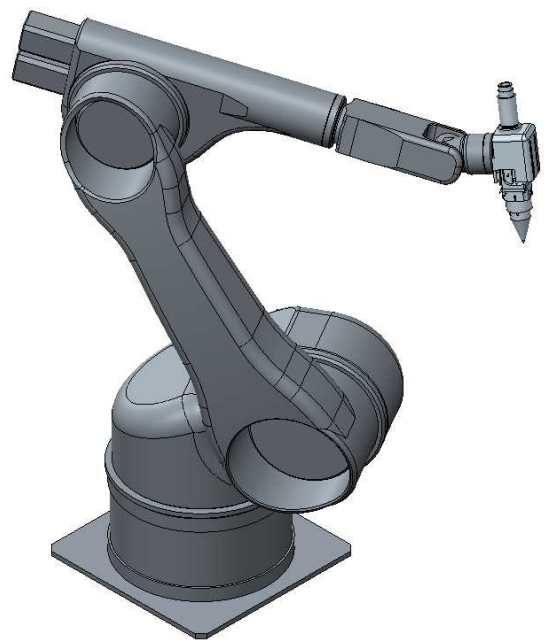
図IV-2.4(2).3 ロボット用倣い加工ヘッド

様々なユーザーニーズに応える為、倣い加工ヘッド単体を提供し、ユーザー独自の既設加工機(ロボット含む)に本倣い加工ヘッドを組み込めるようにインターフェース等を公開しユーザー独自のシステムを構築することが可能である。また、三次元加工機(ロボット)システム全体の提供も可能である。

想定される用途は、CFRP 平板パネル(プレス前、プリプレグ等)の切断及び、立体ワークのトリミング、穴あけ加工等である。具体的部品は、自動車の外装/内装パネル、航空機、車両内装パネル、携帯電話、パソコン、家電の筐体等、様々な製品に対応可能である。図IV-2.4(2).4 に三次元加工機システム、図IV-2.4(2).5 にロボットシステムを示す。



図IV-2.4(2).4 三次元レーザ加工機システム



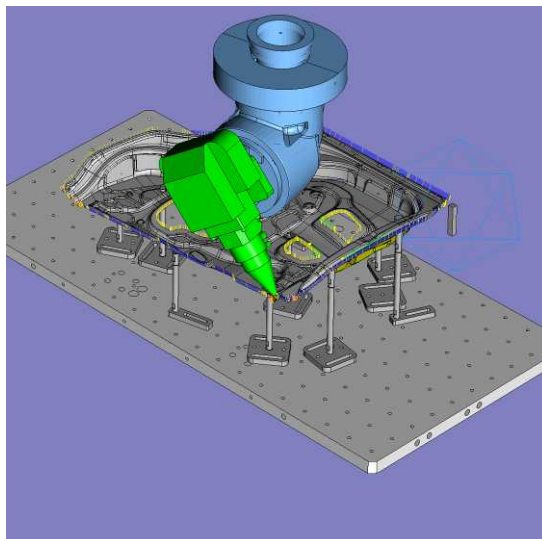
図IV-2.4(2).5 ロボットシステム

付帯設備として、三次元加工によるレーザ光拡散を防ぎ、CFRP 加工時に発生する粉塵及び煙、臭いを吸引し、安全な作業環境を維持できる安全キャビン及び集塵システムを提供する。

三次元 CAD データを読み込み、加工ラインを指示するだけで加工面に対して垂直な姿勢の NC プログラムを自動生成し、パソコン上で立体ワークとの衝突シミュレーションを行える CAD/CAM システムの提供も可能である。図IV-2.4(2).6 に安全キャビン及び集塵システム、図IV-2.4(2).7 に CAD/CAM シミュレーション画面を示す。



図IV-2.4(2).6 安全キャビン及び集塵システム



図IV-2.4(2).7 CAD/CAM シミュレーション画面

### 2.4(2).3 波及効果

本プロジェクトにて、CFRP 加工用の 5 軸加工機用倣い加工ヘッドを開発した。本装置は CFRP 加工だけでなく金属の溶接・切断加工にも対応可能であり、広く産業界に提供できるものである。これまで倣い制御は金属に対応可能であったが、本プロジェクトで CFRP 加工にも適用する技術を開発できたことは大きな成果である。この倣い技術は CFRP 加工だけでなく他の複合材料にも適用可能であり、波及効果は大きいものと思われる。

#### IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

##### 2.5 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」

##### 「(2) CFRP 加工技術の開発」

##### 「②CFRP 加工プロセス・評価技術の開発」の成果

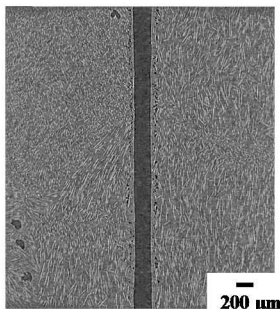
(アマダミヤチ、新日本工機、三菱化学、産総研 実施)

本プロジェクトにて確立したCFRP/CFRTP材料の加工状態評価技術、主要な評価技術として、

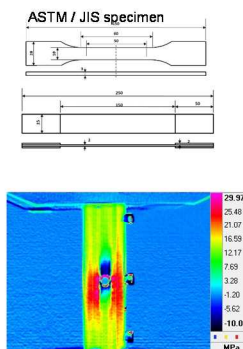
- ・非破壊型部材内部構造評価技術（マイクロX線トモグラフィ）
- ・工業規格に準拠した各種の力学特性評価技術（引張試験、寿命試験）
- ・サーモグラフィによる損傷モニタリング

の3種が挙げられる。これらの評価技術は、CFRP/CFRTP材料を利用する広汎な製造業分野に応用・展開することができると考えている。現在、産総研では各製造分野のユーザー企業に提供する取組みを開始し、先端材料部材の高度評価技術として活用し、企業ニーズの把握に努めている。

マイクロX線CT装置とCFRTP加工部の断面CT像

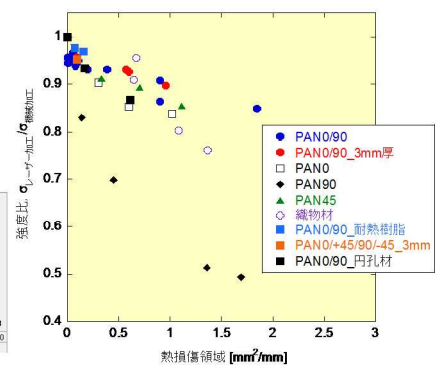


工業規格に準拠した静的引張圧縮試験、疲労試験およびサーモグラフィによる損傷モニタリング



<引張試験><疲労試験>  
荷重: ~250kN  
繰返し速度: ~10Hz  
試験環境: 室温、(~200°C)  
(湿度)  
JIS K7164(熱可塑性等)

熱損傷領域の大きさと力学強度低下との相関関係



#### IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

##### 2.6 研究開発項目1「CFRP切断加工技術の開発」

###### 「(3) パルスレーザーCFRP用加工システムの開発」の成果

(古河電工、アマダミヤチ、新日本工機、三菱化学、産総研 実施)

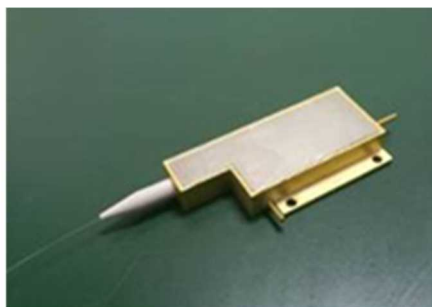
現在、製造現場において、炭酸ガスレーザー等の既存の大規模レーザーはファイバーレーザーへの置き換えが加速している。これは、ファイバーレーザーの消費電力は1/3以下であり大幅な省エネ効果が期待されるためである。さらに、レーザーまた半導体レーザーは、ファイバーレーザーの励起光源として使われるだけではなく、その性能の向上により直接加工の分野での発展も期待されている。したがって、ファイバーレーザーは今後発展が期待される3Dプリンタ等の新しい製造機械分野でも欠かせない光源であり、この分野での市場拡大も期待されている。

金属等マクロ加工用のkW超のレーザーは炭酸ガスレーザーがこれまで主流で国内でも世界シェア優位な会社が複数存在している。一方で、kW超ファイバーレーザーの性能向上は目覚ましく、低消費電力と高信頼性から実現される低メンテナンスコスト性能と、ファイバーデリバリーによる使い勝手の高さから従来炭酸ガスレーザーが使われていた多数の分野の置き換えが加速している。現時点でkW超ファイバーレーザー市場は米国、ドイツ、ロシアに拠点を持つIPG Photonics社が世界シェア70%を超える寡占状態となっている。日本国内にはレーザーによる加工システム装置を製作する多数の事業者があり、個別の製品化対応で不便を来している。

古河電工社はこの分野に参入し、量産化を進め製品のコストダウンを進める事で、海外の競合に対抗しうるレーザー発振器の事業化と、関連する国内レーザー応用産業に向けた事業展開を推進し、この分野での国際競争力の確保を進めていきたい。

##### ○ 励起半導体レーザーモジュール

60W級の製品の量産化を開始、自社製品に使用中、さらに量産の拡大を進めるべく、炭酸ガスレーザーでは世界シェア2位株式会社ファナックとJVの設立を合意。



60W励起半導体レーザー(915nm)  
26年度から量産化開始

○ 1kW シングルモードファイバーレーザー

2014年4月に製品発表、いくつかのユーザ評価を得て、2015年4月から客先本格出荷を開始、今後の量産化とコストダウンを推進中。



1kWマルチモードファイバレーザ  
26年度より量産化開始

○ 6kW マルチモードファイバーレーザー

2015年4月に製品発表、客先評価を実施中、今後の量産化とコストダウンを推進中。



6kWマルチモードファイバレーザ  
、27年度より製品リリース



## IV. 実用化に向けての見通し及び取り組み

### 2.7 研究開発項目2「大面積表面処理技術の開発」

#### 1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発」の成果 (株式会社アルバック 実施)

平成22年度～中間評価の期間においては、ワイドビームのデザインと大型異形レンズ加工環境開発を実施し、実際のアニールデモ環境の構成要素に一定の目途を立てた。これを通じてディスプレイの評価への見通しを得た。

#### 2.7.1 実用化、事業化の見通し

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」(中間評価)第1回分科会 資料5-1「事業原簿(公開) 2.15.1 IV-16-1項」を参照。

中間評価直後より、アニール環境を整え、実サンプル加工の環境構築を急いだ。これは、市場への新技術の広報と、実力の評価を兼ねたものであった。ディスプレイメーカーへの認知度は、プロジェクト終了を待たず広がっている。まだ、未評価項目も多く残してはいるが、基本的には市場の投資回復を期待したい。同時に購買欲の喚起に努める。

#### 2.7.2 実用化、事業化までのシナリオ

同「事業原簿(公開) 2.15.2 IV-16-1項」を参照。

当時の見込み線表は平成25年度の実用化を目指した。しかし市場の動きは数年範囲で投資タイミングが遅れる結果であった。またディスプレイの生産中心国が日本から、韓国・台湾そして中国へと大きくシフトした。液晶ディスプレイにおいては急激なコモディティ化が進んだ。アップル社の躍進は目を見張るものであるが、装置メーカーやセットメーカー等には、差別化を弾力的には許容しない方針が打ち出され、各社の特徴よりも共通化を求められた。この様な背景は一気に価格競争を激しくさせるに至った。なお、台頭するメーカーや、中国を中心とする市場は暫く堅牢であることも予測されている。端末の市場に留まらず、生産設備への投資も引き続き中心的な存在であろう。この機会を捉える努力をして、LTPS (Low Temperature Poly-silicon) 製造ラインの立ち上げに寄与していきたい。

現時点では、光学的な開発環境が整ったことで、実用化装置モデルの検討着手可能なレベルにある。事業化は市場の投資回復を期待し、購買喚起の営業努力を引き続き行う。

#### 2.7.3 波及効果

同「事業原簿(公開) 2.15.3 IV-16-1項」を参照。

本成果報告にも記載したように、プロジェクトの目標値達成のみならず、実際のディスプレイにおける評価まで対応したことを、再度記述しておきたい。したがって、ワイドビームを有する装置化が直ちに検討できる実力を有しているのである。

これらの実験環境構築には、大型レンズ研磨環境を国内に配備したことは極めてインパクトのある内容である。例えば近年の開発が加速されているフレキシブルディスプレイや有機照明用途への量産加工装置への用途が挙げられ、装置化の検討も進められている。また、ワイドビームに代表される広域のレーザー加工ビームの評価技術として、当該プロジェクトで開発した、ビームプロファイラーの技術も直ちに実用化の域にある。

#### IV. 実用化に向けての見通し及び取り組み

##### 2.8 研究開発項目2「大面積表面処理技術の開発」

##### 2) 高精度ビーム評価技術の開発」の成果 (株式会社アルバック 実施)

平成 22 年度～中間評価の期間においては、ワイドビームのデザインと大型異形レンズ加工環境開発を実施し、実際のアニールデモ環境の構成要素に一定の目途を立てた。これを通じてディスプレイの評価への見通しを得た。

##### 2.8.1 実用化、事業化の見通し

「IV2.7.1 実用化、事業化の見通し」及び「Ⅲ2.7.1 事業の背景・目的」参照。

##### 2.8.2 実用化、事業化までのシナリオ

「IV2.7.2 実用化、事業化までのシナリオ」及び「Ⅲ2.7.1 事業の背景・目的」参照。

##### 2.8.3 波及効果

「IV2.7.3 波及効果」及び「Ⅲ2.7.1 事業の背景・目的」参照。

#### IV. 実用化に向けての見通し及び取り組み

##### 2.9 研究開発項目2「大面積表面処理技術の開発」

##### 3) 固体レーザー利用大面積表面処理技術の開発」の成果 (株式会社アルバック 実施)

平成 22 年度～中間評価の期間においては、ワイドビームのデザインと大型異形レンズ加工環境開発を実施し、実際のアニールデモ環境の構成要素に一定の目途を立てた。これを通じてディスプレイの評価への見通しを得た。

##### 2.9.1 実用化、事業化の見通し

「IV2.7.1 実用化、事業化の見通し」及び「Ⅲ2.7.1 事業の背景・目的」参照。

##### 2.9.2 実用化、事業化までのシナリオ

「IV2.7.2 実用化、事業化までのシナリオ」及び「Ⅲ2.7.1 事業の背景・目的」参照。

##### 2.9.3 波及効果

「IV2.7.3 波及効果」及び「Ⅲ2.7.1 事業の背景・目的」参照。

#### IV. 実用化の見通し及び取り組み

##### 2.10 研究開発項目2「大面積表面処理技術の開発」

4) アニール用グリーンレーザー評価・調整」の成果 (大阪大学レーザーエネルギー学研究中心、次世代レーザー加工技術研究所：(株)アルバック、浜松ホトニクス(株) 実施)

##### 2.10.1 実用化・事業化の見通し

本プロジェクトにおいて開発した FPD (フラットパネルディスプレイ) 等の大面積表面処理技術について、現在ユーザーからの要求として、パルスグリーンレーザー装置のさらなる高出力と高スループット化という課題に応える必要がある。これについては、開発した高出力グリーンパルスレーザー装置を基本のモジュールとすることにより、例えば光ファイバーを用いて4台のモジュールからの光出力を結合することにより、現状の4倍のスループットを実現できるため、レーザー装置に対するユーザーの要求に十分応えられる見通しを持っている。

またレーザー装置の信頼性についても、プロジェクト期間中において2年にわたるアニール実証試験を経て、励起用 LD モジュールやレーザー結晶、光学素子等の長寿命が検証され、製造プロセス装置に搭載する産業用レーザーとして、十分な期待寿命や信頼性が確保できることを確認している。

さらに、実用化時のレーザー装置のコストに関しては、現在実用化されている紫外ガスレーザーによるアニール装置と比較して、初期導入コストは同等レベルであるが、スループットは約10倍、使用電力、消耗部品の交換等のランニング及びメンテナンスにかかるコストが大幅に削減できるため、トータルでは20倍以上のコストパフォーマンスが実現できる見通しである。よって実用化を加速し、いち早く上市していくことがシェアを占有していくことにつながると考えている。

ディスプレイ・太陽電池以外の用途として、次世代の航空機・自動車等の軽量化材料である CFRP の加工 (切断・穴開け) や金属部品の表面改質 (ピーニング) ・成形 (フォーミング) への適用が検討されており、軽量化による省エネルギー効果の大きな製造技術として実用化が期待されている。

これらの産業分野への展開には、本研究開発において確立した高出力パルスレーザー技術を、各種用途に適したレーザー波長、パルスエネルギー、繰り返し周波数、パルス幅等を有する産業用レーザー製品群としてラインナップし、ユーザーの要望に応じていくことができる。

このような競争力の高い高出力レーザーを産業利用分野へ実用化・事業化するためのロードマップを図 IV-2.10.1 に示す。レーザー加工機の市場規模は年率10%で成長している分野であり、これらの市場を獲得するために、ユーザーや装置メーカー等と連携して製品プロトタイプを試作・デモや量産時に向けた体制整備等の製品化のプロセスを加速し、数年後の次世代ディスプレイや高性能太陽電池等の量産立ち上げのタイミングを狙う等の戦略的な事業化に向けた取り組みが重要である。また、国内の大学・研究機関と連携して、独フラウンホーファ研究所のような機能を発揮できる日本ならではのヴァーチャルな産学官の協働体制を構築し、新規ユーザー開拓と新奇応用探索を同時に進める方策も今後重要である。

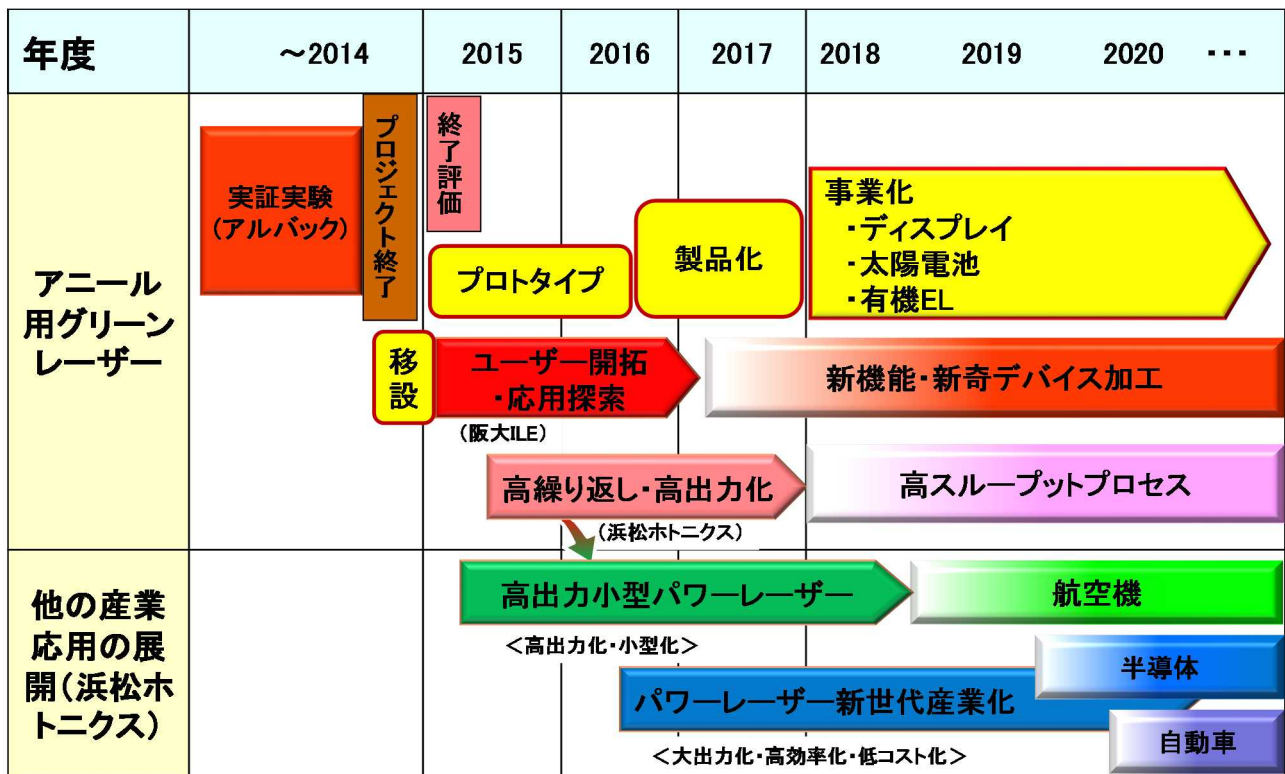


図 IV-2. 10. 1 アニールプロセス及び他の産業利用展開のロードマップ。

### 2. 10. 2 実用化・事業化に向けた具体的取り組み

産業用レーザーの実用化・事業化体制を図 IV-2. 10. 2 に示す。事業化には、高出力レーザー装置、光学機器等の光源メーカーと、半導体・電子デバイス機器等のエンドユーザーにレーザー加工機、レーザープロセス装置等の製品を供給していくために、加工機・プロセス装置・検査装置の製造メーカー群が連携して、エンドユーザーが製造する液晶ディスプレイ等の最終製品の製造ラインに入るための、メンテナンス・サービス等を含めた事業体制の構築を行うことになる。

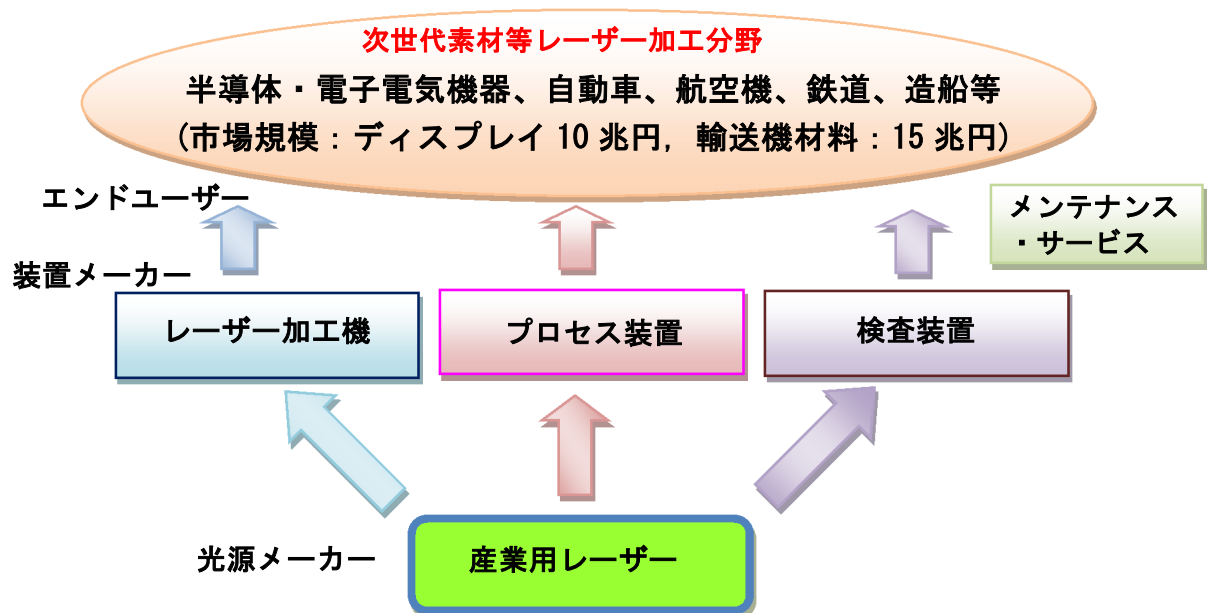


図 IV-2. 10. 2 産業用レーザーの実用化・事業化体制

現在、本プロジェクト期間中から実施してきたアウトリーチ活動（研究成果の公表、展示会等）が実を結びつつあり、FPD アニール以外の用途についても、具体的な問い合わせや商談が増えてきている。今後、高出力、高スループット、高効率といった本技術の強みを生かしたレーザー製品をユーザーに提供していく事業を推進することで、国内の製造業の産業競争力の強化に寄与できれば幸いである。

### 2.10.3 波及効果

本プロジェクトにより確立した高出力パルスレーザー技術は、産業用レーザーの高効率化、小型化、低コスト化に資するものであり、技術的・経済的・社会的な波及効果は大きい。具体例として、従来型のランプ励起固体レーザー装置やガスレーザー装置と比較して、LD（レーザーダイオード）励起大出力レーザー技術により 10 倍以上の高効率化が実現されるため、仮に出力 1kW を得るのに、従来は 100kW の電力が必要であったが、現在は 10kW の電力で賄うことができ、その省エネ効果は 1 台当り 90kW となる。よって、本レーザー技術の製造プロセスへの普及による省エネルギー・低環境負荷への貢献効果は絶大なものとなる。

(ロボット・新機械イノベーションプログラム)  
「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」基本計画

技術開発推進部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

## (1) 研究開発の目的

## ①政策的な重要性

本事業は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）において、我が国のものづくりを支えるコア技術の国際競争力強化を目的とした「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の一環として実施するものとする。我が国におけるものづくりは、高精度・高効率の加工技術と高度な材料技術等に支えられ、タクトタイムの短縮、省エネ・省資源の実現等により、製造コストを抑制し、国際競争力のある商品を生み出している。一方で、従来加工技術のブレークスルーとしてかつ先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現する技術として、レーザー加工技術が急速な進展を見せており、これまでの生産技術を革新する新しい基盤技術となりつつある。「高出力・高品位」かつ「低コスト」な半導体ファイバーレーザー技術及びそれを利用した加工技術は、低炭素社会の実現に向けた次世代製品の軽量化、高強度化、高機能化に対応した次世代加工技術として期待されている。

## ②国内外の状況

2001年度以降、我が国においてレーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では莫大な開発予算による国家支援が継続されており、こうした背景を受けて、レーザー技術の最先端領域であり市場拡大が著しい半導体ファイバーレーザーの分野を欧米に席卷されているのが現状である。低炭素社会に資する次世代製品の実現に先進的な我が国ユーザー企業は、レーザー加工装置を海外から調達して、先進材料の新しい加工技術の開発に着手しているものの、装置の導入コスト高、メンテナンスサービスの遅延やコスト高、ブラックボックス化等により、安心して開発が進められないだけでなく、その導入競争においても海外ライバル企業から遅れをとる懸念が生じている。

## ③本事業のねらい

本事業では、我が国におけるレーザー技術を集積することによって高出力・高品位半導体ファイバーレーザー技術の開発を推進し、他国に先駆けて革新的なものづくり基盤技術として、軽くて強いが加工難易度が極めて高い炭素繊維複合材料等の先進材料の加工や、次世代製品の短時間で高品質な低コスト製造を実現する加工技術の確立を目指す。

## ④本事業のアウトカム

これらの取り組みにより、高出力半導体ファイバーレーザー及びそれを搭載したレーザー加工機の普及が見込まれ、2030年にレーザー加工機の国内市場を獲得したと想定した場合、約2,200億円の市場が期待される。

## (2) 研究開発の目標

本事業では、「ユーザーニーズに適應した」かつ「国際競争力のある」をコンセプトに、高出力・高品位の半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術を開発する

とともに、次世代製品に向けたレーザー加工の基盤技術を確立する。

具体的な目標としては、プロジェクト3年経過時点において（別紙）研究開発計画の研究開発項目①から③の中間目標を、プロジェクト終了時において（別紙）研究開発計画の研究開発項目の①から③の最終目標を達成することとする。

### （3）研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について各項目間の連携にも配慮しながら、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、原則、委託事業として実施する。ただし、上記以外のもの<sup>(※1)</sup>は、共同研究事業（NEDO負担率：2/3）として実施する。

※1 民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独等、産学官連携とならないもの。  
[委託事業、（共同研究事業（NEDO負担率：2/3））]

- ① レーザー高出力化技術の開発
- ② レーザー高品位化技術の開発
- ③ 多波長複合加工技術の開発

## 2. 研究開発の実施方式

### （1）研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが単独ないし複数の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。）から公募によって研究開発実施者を選定後、必要に応じて共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託（または、共同研究）して実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体にはNEDOが委託先決定後に委嘱する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

本研究開発の実施にあたっては、NEDO機械システム部が研究開発の進捗を見ながら積極的に関与して推進する。

### （2）研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

## 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成22年度から平成26年度までの5年間とする。

## 4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成24年度、事後評価を平成27年度に実施し、中間評価結果を踏まえ、必要に応じその結



果を後年度の研究開発に反映することとする。なお、平成26年度までの各年度中に推進委員会等で各研究開発内容を評価し、必要に応じ、プロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

## 5. その他の重要事項

### (1) 成果の取扱い

#### ①成果の普及

得られた研究成果については、可能な限り、保有する特許等の活用も含め、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。

#### ②成果の産業化

- a) 実施者は、本研究開発から得られる研究開発成果の産業面での着実な活用を図るため、本研究開発の終了後に実施すべき取組のあり方や研究開発成果の産業面での活用のビジネスモデルを本研究開発の目的・目標に沿って立案するとともに、立案した取組のあり方とビジネスモデルについて、研究開発の進捗等を考慮して、本研究開発期間中に必要な見直しを行う。
- b) 実施者は、上記a)で立案した取組とビジネスモデルを本研究開発終了後、実行に移し、成果の産業面での活用に努めるものとする。

#### ③知的財産権の帰属

委託研究開発（および共同研究）の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第26条の規定等に基づき、原則として、すべて受託先に帰属させることとする。

なお、ユーザーニーズに適應し、かつ国際競争力を有する製品・サービスの構築を見据えた知財管理を適切に行うこととする。

### (2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、産業技術政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

### (3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号二に基づき実施する。

## 6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成22年3月、制定。
- (2) 平成23年3月、研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」の中間目標の変更により、改訂
- (3) 平成24年3月、需給勘定への変更に伴うプロジェクト名及び根拠法、並びに所管部署名の変更による改訂

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目① 「レーザー高出力化技術の開発」

1. 研究開発の必要性

レーザーの発明以来50年が経過してこれまで様々な方式のレーザー技術が開発されてきた。その中で光ファイバー及び半導体レーザーを用いるレーザーの発振方式は、最も高輝度、高効率であり、同等の特性を得るために必要な消費電力も最も小さい。高出力化技術開発では光ファイバーから出射される最大限の特性を持つレーザーの開発を目指す。波長、偏光、空間モード、時間制御を自在に制御できるレーザー技術を、国際的にも競争力があるコストで実現する。開発の成果を根幹に発展させたレーザー技術は、今後幅広い応用が考えられ、低炭素化社会を実現する上で非常に重要であると考えられる。ここでは、光ファイバー及び半導体レーザーを用いるレーザーの高出力化技術開発として(1)半導体レーザーの高出力化技術、高信頼化技術の開発、(2)半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発を行う。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 半導体レーザーの高出力化技術、高信頼化技術の開発

半導体レーザーは世界的に高出力化が進んでいる。高出力化には発熱の抑制と、発生した熱の排熱が2大テーマである。発熱抑制について、結晶成長技術及び作製プロセスの開発を行い、従来構造に比べ飛躍的な高出力化を図るための結晶構造、新規素子構造、作製プロセスの検討等により、高出力領域での効率と信頼性を両立した高出力半導体レーザーの実現を目指す。排熱については、これまで培った従来型の放熱技術を取り入れるとともに、最適化を図る。自動組立てが可能な高出力、低コストの半導体レーザーに資する技術開発を行う。

(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発

素子の配置設計、光ファイバー構造の検討を行い、半導体レーザーから発生させたレーザー光を無駄なく光ファイバーに伝送出来る技術を開発する。精密自動制御技術の採用と高速調心ソフト開発により、国際競争力を有する製造プロセスを確立する。

3. 達成目標

(1) 最終目標 (平成26年度)

①半導体レーザーの高出力化技術、高信頼化技術の開発

- ・波長 : 近赤外帯 (研究開発項目②のレーザー励起に適していること。)
- ・シングルエミッタ

出力	: 20 W
電気-光変換効率	: 65%
信頼性 (寿命)	: 50,000 時間以上

- ・アレイ

出力	: 300 W
電気-光変換効率	: 60%
信頼性 (寿命)	: 50,000 時間以上

※アレイにおいて自動組み立てが可能であること。

②半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発

- ・シングルエミッタ  
ファイバー結合効率（ファイバーコア径 105  $\mu$  m、NA0.15 相当）： 90%以上
- ・アレイ  
ファイバー結合効率（ファイバーコア径 105  $\mu$  m、NA0.15 相当）： 70%以上

## (2) 中間目標（平成24年度）

### ①半導体レーザーの高出力化技術、高信頼化技術の開発

- ・波長：近赤外帯（研究開発項目②のレーザー励起に適していること。）
- ・シングルエミッタ

出力	:	15 W
電気-光変換効率	:	60%
信頼性（寿命）	:	20,000 時間以上

- ・アレイ

出力	:	200 W
電気-光変換効率	:	55%
信頼性（寿命）	:	20,000 時間以上

※アレイにおいて自動組み立てが可能であること。

### ②半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発

- ・シングルエミッタ  
ファイバー結合効率（ファイバーコア径 105  $\mu$  m、NA0.15 相当）： 80%以上
- ・アレイ  
ファイバー結合効率（ファイバーコア径 105  $\mu$  m、NA0.15 相当）： 60%以上

## 4. 特記事項

- (1) 研究開発項目②、③と連携して、レーザー高出力化技術の開発を進めるものとする。
- (2) 研究開発項目③で得られた実証試験の結果をフィードバックしつつ研究開発を実施する。
- (3) 開発成果の有効性を実証できるユーザー機関を協力機関として確保し、適宜開発成果の実証試験を行い、その結果を研究開発項目②、③の開発に対してフィードバックしつつ研究開発を実施するのが望ましい。

## 研究開発項目② 「レーザー高品位化技術の開発」

### 1. 研究開発の必要性

CFRP（炭素繊維強化複合材料）に代表される複合材料の切断において、従来のウォータージェットやミリング機械加工は、素材構造の破壊や剥離等の障害が発生するため加工品質が不十分であるばかりでなく、量産に耐える生産性の達成が極めて困難である。さらに、複合材料と金属の接合においても既存技術での対応が困難とされている。このように、複合材料の高加工品質と高生産性を両立する新技術の開発が喫緊の課題となっている。機械加工に替わる手法として、金属等の切断、溶接に用いられてきた近赤外～赤外域の連続発振レーザーの適用が試みられているが、低融点材料と高融点材料が混在している複合材料では熱的変性の問題が大きく実用化は困難である。ここでは、加工品質が主にレーザーパルスの諸特性（波長、パルス幅、パルスエネルギー、集光スポットサイズ）に依存し、加工速度が平均出力（パルスエネルギー×繰り返し周波数）に依存することを利用し、複合材料の高加工品質と高生産性の両立を実現する高品位・高出力パルスファイバーレーザーの研究開発を行う。また、そのようなレーザー技術は、フラットパネルディスプレイ、太陽電池等デバイスの表面処理、チタン等の粉末成形に対しても有効である。具体的には、(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発、(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発、(3) 高出力波長変換技術の開発を行う。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

任意のパルス波形の発生が可能な光源とパルス波形整形された光をファイバー増幅し、所望のパワーまで出力を向上させるレーザー技術を開発する。本レーザー技術は、研究開発項目①で開発された半導体レーザーモジュールをファイバー増幅段で励起用光源として使用し、構成上後置されるパルスレーザー増幅技術、高出力波長変換技術と組み合わせることを想定している。任意波形制御パルスファイバーレーザー光源出力をパルスレーザー増幅器で増幅出来得る出力まで高めるための希土類元素添加レーザー用ファイバーで構成されるファイバーアンプを開発する。

#### (2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発

ファイバーレーザーからの出力を kW クラスまで増幅するための増幅器（半導体レーザー励起セラミック近赤外固体レーザー増幅器等）を開発する。増幅過程においてビーム品質を維持することにより、2 倍高調波及び 3 倍高調波への波長変換効率のさらなる効率向上を目指す。将来的に実用機に搭載するためには、高効率、コンパクト、低コストのための新たな技術開発が不可欠である。その要求に応えるには、半導体レーザーモジュールの高輝度化による強励起密度の実現、新たなセラミックレーザー技術の開発、十分な冷却性能を有する増幅器構造、及びコンパクトな多重パス増幅光路の検討を行う。また、加工条件の最適化研究に供することを想定しているので、この増幅器には、加工品質及び高生産性に重点を置いた性能が求められる。すなわち、パルス繰り返し周波数は数 kHz～数百 kHz 程度に設定し、加工特性の評価や最適条件出しに必要なパルスエネルギーを比較的小型の増幅器で達成する。パルス幅の可変制御については、ファイバーレーザーの出力パルス幅を変化させることにより対応する。さらに、パルス光源及びファイバーアンプからの出力を増幅後、ビームポインティング安定性及び出力安定性等についての評価を行う。

### (3) 高出力波長変換技術の開発

高出力のレーザー光が波長変換結晶に入射すると、波長変換結晶の光吸収による熱発生に伴い結晶内での温度分布が生じるため、2倍高調波及び3倍高調波への変換効率の低下を招く。ここでは、波長変換結晶により高出力レーザー光（基本波）を2倍高調波及び3倍高調波に高効率変換するための技術開発を行う。具体的には、変換効率向上のために、波長変換結晶のマウント技術、冷却方式の最適化技術等の温度分布制御技術の開発を行う。

## 3. 達成目標

加工目的に適した下記のような性能を達成する一つ又は複数のレーザーを開発すること。

### (1) 最終目標（平成26年度）

#### ①ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

- ・基本波長：1  $\mu\text{m}$ 帯
- ・ビーム品質：シングルモード、 $M^2 < 1.5$
- ・平均出力：10 ～ 200 W
- ・パルス幅：0.5 ～ 200 ns
- ・周波数：1～1,000 kHz

上記①の最終目標は下記条件を満たすことが必須である。ただし、ブースターを用いずに下記②の最終目標が達成できるのであればこの限りではない。

※ブースターの種光として使用できること。ただし、ブースターを用いなくても開発項目③で使用できる場合は、種光として使用できなくても良い。

※開発項目③「多波長複合加工技術の開発」で使用でき、かつパルス波形制御ができること。

#### ②パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発

- ・基本波長：1  $\mu\text{m}$ 帯
- ・平均出力：1 ～ 2 kW
- ・パルス幅：0.5 ～ 100 ns
- ・周波数：1～150 kHz

※開発項目③「多波長複合加工技術の開発」で使用できるコヒーレンス制御が可能であること。

#### ③高出力波長変換技術の開発

- ・kW級基本波パルス光に対して、基本波から2倍高調波への変換効率：30%以上
- ・kW級基本波パルス光に対して、基本波から3倍高調波への変換効率：10%以上

### (2) 中間目標（平成24年度）

#### ①ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

- ・基本波長：1  $\mu\text{m}$ 帯
- ・ビーム品質：シングルモード、 $M^2 < 1.5$
- ・平均出力：5 ～ 100 W
- ・パルス幅：0.5 ～ 200 ns
- ・周波数：1～1,000 kHz

上記①の中間目標は下記条件を満たすことが必須である。ただし、パルスレーザー増幅（ブースター）を用いずに下記②の中間目標が達成できるのであればこの限りではない。

※ブースターの種光として使用できること。ただし、ブースターを用いなくても開発

項目③で使用できる場合は、種光として使用できなくても良い。

※開発項目③「多波長複合加工技術の開発」で使用でき、かつパルス波形制御ができること。

#### ②パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発

- ・基本波長：1  $\mu$ m帯
- ・平均出力：200 ～ 700 W
- ・パルス幅：0.5 ～ 100 ns
- ・周波数：1～150 kHz

※開発項目③「多波長複合加工技術の開発」で使用できるコヒーレンス制御が可能であること。

#### ③高出力波長変換技術の開発

- ・数百W級基本波パルス光に対して、基本波から2倍高調波への変換効率：20%以上
- ・数百W級基本波パルス光に対して、基本波から3倍高調波への変換効率：6%以上

#### 4. 特記事項

- (1) 研究開発項目①、③と連携して、レーザー高品位化技術の開発を進めるものとする。
- (2) 研究開発項目③で得られた実証試験の結果をフィードバックしつつ研究開発を実施する。
- (3) 開発成果の有効性を実証できるユーザー機関を協力機関として確保し、適宜開発成果の実証試験を行い、その結果を研究開発項目①、③の開発に対してフィードバックしつつ研究開発を実施するのが望ましい。

## 研究開発項目③ 「多波長複合加工技術の開発」

### 1. 研究開発の必要性

本プロジェクトで開発するパルスファイバーレーザーの高出力化技術ならびに高品位化技術を実用的に有用なものとするためには、加工機システムとして機能を統合させて最適化するとともに、低炭素社会の実現に向けた製品の軽量化・高強度化、高機能化に大きな期待が寄せられている先進材料の利活用促進に貢献するためのレーザー加工技術を開発する必要がある。特に、先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現することによって、従来手法では困難であった精密加工のブレイクスルー技術として実用に耐える次世代レーザー加工技術を確立する。先進材料の加工技術として、(1) 切断接合技術、(2) 表面処理技術、(3) 粉末成形技術の3つの研究開発を行う。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) 切断接合技術の開発

CFRP(炭素繊維強化複合材料)等の複合材料は、自動車・航空機等の輸送機器の抜本的軽量化技術として期待されている。しかしながら、異種難削材であることから、革新的な製造技術として高精度な切断・接合技術の開発が要望されており、さらに製品製造タクトタイムの大幅短縮化が喫緊の課題である。本研究開発では、CFRPに代表される複合材料に対して自動車・航空機用途の基材を検討対象とし、高品位・高速のレーザー切断接合技術を開発する。具体的には、中型・小型部材を加工するための高速掃引リモート加工ヘッドの開発、自動車のフードやルーフ等の大型部材の加工を行う高速高精度制御加工ノズルの開発、ならびに、プロセス・評価技術の研究開発を行う。具体的には以下の通り。

#### ①複合材料高速切断接合システム技術の開発

- ・高速掃引リモート加工ヘッドの開発：複合レーザー照射によるリモート加工が可能な複合レーザー加工ヘッドの開発を行う。
- ・高速高精度制御加工ノズルの開発：可動部の軽量化と高剛性化ならびに高速微細加工技術の開発を行う（高速微細加工技術：ワークと加工ノズルのギャップを一定に保つ技術）。

#### ②複合材料加工プロセス・評価技術の開発

- ・多波長複合レーザー加工プロセスの最適化：高品位・高速加工を実現する高速走査重畳照射技術の開発、ならびにインプロセスモニタリング技術を確立する。
- ・レーザー加工に適した CFRP 材料の構造最適化及び加工試料評価技術：レーザー照射時の反応層（熱損傷層）を極力低減する材料構造の最適化、ならびに、加工後試料の特性評価手法を確立する。

#### (2) 表面処理技術の開発

有機 EL ディスプレイ、液晶ディスプレイに代表されるフラットパネルディスプレイ（以下 FPD）産業は、日本が世界に誇る産業基盤の一つである。次世代の高品位、省エネルギー、高画質 FPD の実現のために、多層膜ガラス基板におけるアモルファスシリコン膜の低温ポリシリコン（LTPS）技術が期待されている。優れた安定性、長寿命の特長を持つ大出力レーザーを用いてアモルファスシリコン膜の安定化多結晶処理を施すことにより、次世代 FPD の課題を達成できると期待されている。また、薄膜系太陽電池（以下 PV）も LTPS 技術の導入が検討されており、太陽電池の特性改善が期待されている。本研究開発では、

高品位なレーザー表面処理技術を開発する。具体的には以下のとおり。

#### ①高度ホモジナイズワイドビーム整形の開発

FPD/PV 作製工程では極めて厳しいレーザー照射均一性が必要である。レーザー照射強度分布は、主に LTPS の多結晶性とその電気特性に影響を与える。ここでは、レーザー照射の均一性向上を目的とした高度ホモジナイズ技術と、ワイドビーム整形光学系の開発を行う。高精度加工された異形レンズ類を多用して加工ワーク近傍までレーザービームをデリバリーし、光学系の最適化を図ることにより、低コストで信頼性のある整形光学系を開発する。

#### ②大型光学部品研磨技術の開発

現在、高精度で表面改質に適した大型異形レンズ加工技術は無い。ここでは、大型異形レンズの研磨加工におけるレンズ表面の粗さ低減を実現するため、研磨機器剛性の検討及び広域軸出し技術を開発し、高品位ワイドビーム整形に寄与する。

#### ③高精度ビーム評価技術の開発

整形される高度なワイドビームの品質は独自に評価しなければならない。ワイドビームの形状を評価し、照射均一性を確保するためのビームプロファイラーの開発を行う。具体的には、ワイドビーム全域に渡り、ビームの集光性、輝度分布、パターンを高速、高分解能で診断する技術を開発する。

### (3) 粉末成形技術の開発

省エネルギー・省資源の観点から、製品の軽量化・薄肉化、それに伴う高強度化が進められており、レーザー焼結積層造形法によるチタン合金等の製品の開発や少量多品種生産の需要が年々高まっている。しかしながら、軽量難加工材料であるチタン合金やアルミニウム合金のレーザー焼結積層造形は未だ実現されておらず、我が国産業界の要求仕様に応える技術の開発が急務である。特に、成形サイズ、成形精度、最小成形厚みに関して、実ユーザーの要求を反映した基本プラットフォームの開発が切望されている。本研究開発では、チタン合金等の軽量難加工材料のレーザーによる粉末成形を可能にする基本プラットフォームを開発し、粉末成形の精度向上と高速化を図るものとする。具体的には以下の通り。

#### ①基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化

チタン合金等のレーザー焼結積層造形においては、成形環境をできるだけ真空中に近い状態にする必要がある。ここでは真空中において動作可能な粉末供給システム及び積層システムを開発し、真空チャンバ型の粉末焼結積層造形技術及び基本プラットフォームの開発を行う。基本プラットフォームの開発では、パルスファイバーレーザーに適した光学系システムや効率的なレーザー照射のための予備加熱機構の検討を行うとともに、内部残留応力を軽減するレーザー照射パターンの最適化を行う。次段階として、高性能・高出力パルスファイバーレーザーの搭載による成形の高速化と成形条件の最適化、及びレーザー照射パターンの改善によりさらなる成形精度の向上を図る。

### 3. 達成目標

#### (1) 最終目標（平成26年度）



### ①切断接合技術の開発

- ・切断および接合加工速度：6 m/min 以上（大型部材として 1m 級サイズ以上、中型・小型部材として 50 cm 級サイズ以上の CFRP 基材に対して、基材厚み 3 mm 以上）
- ・加工品位
  - 切断：切断面において反応層の厚みが 100  $\mu$ m 以下
  - レーザー切断処理試料の引張り強度を 10%未満の低減に抑制
  - 接合：CFRP と金属板との接合において、凝集剥離で引張りせん断強度 100 MPa 以上（CFRP 基材厚み 3 mm、金属板厚み 2 mm）

### ②表面処理技術の開発

- ・ワイドビーム：幅 500 mm 以上、集光幅 40  $\mu$ m 程度（FWHM）@グリーンレーザー
- ・ビーム照射不均一性： $\pm$ 7%以内（平均強度分布）
- ・ビーム測定精度： $\pm$ 2%以内
- ・測定空間分解能：5  $\mu$ m 以下

### ③粉末成形技術の開発

- ・成形精度の向上と高速化
  - 成形精度： $\pm$ 0.1 mm（100 mm サイズ基準パーツ）
  - 成形時間：16 時間以内（高さ 100 mm サイズ基準パーツ）
  - 引張り強度：チタン合金 840 MPa 以上（生体部品用途）

## (2) 中間目標（平成 24 年度）

### ①切断接合技術の開発

- ・切断および接合加工速度：2 m/min 以上（CFRP 基材厚み 3mm 以上）
- ・加工品位
  - 切断：切断面において反応層の厚みが 500  $\mu$ m 以下
  - 引張り強度を 15%未満の低減に抑制
  - 接合：CFRP と金属板との接合において、凝集剥離で引張りせん断強度 50MPa 以上

### ②表面処理技術の開発

- ・高精度加工された異形レンズ類を用いた高度ホモジナイズ技術（基礎ホモジナイズ光学系技術）とワイドビーム整形光学系技術を開発するとともに、光学シミュレーション技術を確立すること。
- ・大型異形光学部品の研磨加工技術を開発すること。
- ・ワイドビームの形状の評価、及び照射均一性を確保するためのビームプロファイラーを開発すること。

### ③粉末成形技術の開発

- ・真空下においても動作可能な粉末焼結積層造形機構を開発すること。
- ・異なる発振形式のレーザーを用いた複合レーザー照射方法を確立すること。
- ・複合レーザー照射による粉末積層造形メカニズムを明確にしつつ、加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）を最適化すること。
- ・レーザー加工試料の評価技術を構築すること。

#### 4. 特記事項

- (1) 研究開発項目①、②と連携して、レーザー加工技術の開発を進めるものとする。
- (2) 開発成果の有効性を実証できるユーザー機関を協力機関として確保し、適宜開発成果の実証試験を行い、その結果を研究開発項目①、②の開発に対してフィードバックしつつ研究開発を実施するのが望ましい。
- (3) 達成目標にある材料特性値は、米国材料試験協会の ASTM 規格に準拠した試験方法で達成することが望ましい。

(ロボット・新機械イノベーションプログラム)  
「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」基本計画

ロボット・機械システム部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

### (1) 研究開発の目的

#### ①政策的な重要性

本事業は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）において、我が国のものづくりを支えるコア技術の国際競争力強化を目的とした「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の一環として実施するものとする。我が国におけるものづくりは、高精度・高効率の加工技術と高度な材料技術等に支えられ、タクトタイムの短縮、省エネ・省資源の実現等により、製造コストを抑制し、国際競争力のある商品を生み出している。一方で、従来加工技術のブレークスルーとしてかつ先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現する技術として、レーザー加工技術が急速な進展を見せており、これまでの生産技術を革新する新しい基盤技術となりつつあり、特に低炭素社会の実現に向けた次世代製品の軽量化、高強度化、高機能化に対応した次世代加工技術として期待されている。

#### ②国内外の状況

2001年度以降、我が国においてレーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では莫大な開発予算による国家支援が継続されており、こうした背景を受けて、レーザー技術の最先端領域であり市場拡大が著しいファイバーレーザーの分野を欧米に席卷されているのが現状である。低炭素社会に資する次世代製品の実現に先進的な取り組みを行う我が国企業は、レーザー装置を海外から調達して、先進材料の新しい加工技術の開発に着手しているものの、装置の導入コスト高、メンテナンスサービスの遅延やコスト高等により、安心して開発が進められないだけでなく、その導入競争においても海外ライバル企業から遅れをとる懸念が生じている。

#### ③本事業のねらい

本事業では、今後大きな市場の成長が期待されるファイバーレーザーの分野において我が国の競争力を高めることを目的に、ファイバーレーザーを用いた新たな加工領域を開拓することとし、自動車用として拡大が見込まれる炭素繊維複合材料（CFRP）を対象としたファイバーレーザー加工技術、粉末成型技術を開発する。また、今後の需要の伸びが期待させる高精細ディスプレイ等の表面処理について、当該市場での我が国の競争力確保のため、既存のレーザー技術を凌駕する新しいレーザー用いた加工技術を開発する。

#### ④本事業のアウトカム

これらの取り組みにより、例えば高出力ファイバーレーザー及びそれを搭載したレーザー加工機の普及が見込まれ、2030年にレーザー加工機の国内市場を獲得したと想定した場合、約2,200億円の市場が期待される。

### (2) 研究開発の目標

本事業では、「ユーザーニーズに適応した」かつ「国際競争力のある」次世代製品に向けたレーザー加工の基盤技術を確立する。

具体的な目標としては、プロジェクト終了時において（別紙 1）研究開発計画の研究開発項目の①から③の最終目標を達成することとする。

### （3）研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について各項目間の連携にも配慮しながら、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、原則、委託事業として実施する。ただし、上記以外のもの<sup>(※1)</sup>は、共同研究事業（NEDO負担率：2/3）として実施する。

※1 民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独等、産学官連携とならないもの。  
[委託事業、（共同研究事業（NEDO負担率：2/3））]

- 1 CFRP 切断加工技術の開発
- 2 大面積表面処理技術の開発
- 3 粉末成形技術の開発

## 2. 研究開発の実施方式

### （1）研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが単独ないし複数の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。）から公募によって研究開発実施者を選定後、必要に応じて共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託（または、共同研究）して実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体にはNEDOが委託先決定後に委嘱する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

本研究開発の実施にあたっては、NEDOが研究開発の進捗を見ながら積極的に関与して推進する。

### （2）研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

## 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成22年度から平成26年度までの5年間とする。

## 4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成24年度、事後評価を平成27年度に実施し、中間評価結果を踏まえ、必要に応じその結果を後年度の研究開発に反映することとする。なお、平成26年度までの各年度中に推進委員会等で各研究開発内容を評価し、必要に応じ、プロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状

況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

## 5. その他の重要事項

### (1) 成果の取扱い

#### ①成果の普及

得られた研究成果については、可能な限り、保有する特許等の活用も含め、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。

#### ②成果の産業化

- a) 実施者は、本研究開発から得られる研究開発成果の産業面での着実な活用を図るため、本研究開発の終了後に実施すべき取組のあり方や研究開発成果の産業面での活用のビジネスモデルを本研究開発の目的・目標に沿って立案するとともに、立案した取組のあり方とビジネスモデルについて、研究開発の進捗等を考慮して、本研究開発期間中に必要な見直しを行う。
- b) 実施者は、上記 a) で立案した取組とビジネスモデルを本研究開発終了後、実行に移し、成果の産業面での活用に努めるものとする。

#### ③知的財産権の帰属

委託研究開発（および共同研究）の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて受託先に帰属させることとする。

### (2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、産業技術政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

### (3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号ハに基づき実施する。

## 6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成22年3月、制定。
- (2) 平成23年3月、研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」の中間目標の変更により、改訂
- (3) 平成24年3月、平成24年度の勘定の一般会計から特別会計への変更に伴い、プロジェクト名称改訂
- (4) 平成25年2月、中間評価反映等に伴う、研究内容の見直しによる改訂
- (5) 平成26年4月、組織改編に伴う部署名の変更

## (別紙) 研究開発計画

### 研究開発項目 1 「CFRP 切断加工技術の開発」

#### 1. 研究開発の必要性

CFRP (炭素繊維強化複合材料) 等の複合材料は、自動車・航空機等の輸送機器の抜本的軽量化技術として期待されている。CFRP の切断において、ウォータージェットやミリング機械加工が用いられているが、素材構造の破壊や剥離等の障害が発生するため加工品質が不十分であるばかりでなく、量産に耐えうる生産性の達成が極めて困難である。

一方、現在の加工技術を代替する技術として、金属等の切断、溶接に用いられてきた近赤外～赤外域の連続発振レーザーの適用が試みられているが、低融点材料と高融点材料が混在している複合材料では熱的変性の問題が大きく実用化は困難である。

このため CFRP の本格的な導入・普及に向けて、複合材料の高加工品質と高生産性を両立する新しい加工技術の開発が喫緊の課題となっている。

そこで、CFRP の加工品質が主にレーザーパルスの諸特性 (波長、パルス幅、パルスエネルギー、集光スポットサイズ) に依存し、加工速度が平均出力 (パルスエネルギー×繰り返し周波数) に依存することに着目し、複合材料の高加工品質と高生産性の両立を実現する高品位・高出力パルスレーザーを用いた加工技術を実現する。

そのため、高品位・高出力パルスレーザーの開発、CFRP 高速切断システム技術の開発を行うとともに、これを加工システムとして統合し、将来の CFRP 加工機設計・開発に必要な、様々な CFRP 材料に対する加工条件 (パラメーター) を獲得する。

#### 2. 研究開発の具体的内容

##### (1) 高品位・高出力パルスレーザーの開発

###### ① パルスレーザー高品位・高出力化技術の開発

###### 1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

任意のパルス波形の発生が可能な光源と、パルス波形整形された光をファイバーにより増幅し所望のパワーまで出力を向上させる技術を開発する。

###### 2) パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発

ファイバーレーザーからの出力を kW クラスまで増幅するための増幅器 (半導体レーザー励起セラミック近赤外固体レーザー増幅器等) を開発する。また、波長変換結晶により高出力レーザー光 (基本波) を 2 倍高調波及び 3 倍高調波に高効率変換するための技術開発を行う。

###### ② 励起用半導体レーザー技術開発

ファイバーレーザーの更なる高性能化、低コスト化のためには、励起用半導体レーザーの高出力化、高効率化、高信頼性が不可欠である。このため、高出力領域での効率と信頼性を両立した高出力半導体レーザー及び半導体レーザーから発生させたレーザー光を無駄なく光ファイバーに伝送出来る技術を開発する。

##### (2) CFRP 加工技術の開発

###### ① CFRP 高速切断技術の開発

高品位・高速加工を実現する高速走査重畳照射技術の開発、複合レーザー照射によるリモート加工が可能な複合レーザー加工ヘッドの開発を行う。また、可動部の軽量化と高剛性化ならびに高速倣い技術の開発を行う (高速倣い技術: ワークと加工ノズルのギャップを一定に保つ技術)。

## ②CFRP 加工プロセス・評価技術の開発

CFRP 加工プロセスの最適化のため、インプロセスモニタリング技術、レーザー照射時の反応層（熱損傷層）を極力低減する材料構造の最適化及び加工後試料の特性評価手法を確立する。また、様々な CFRP 材料に対する加工条件（パラメータ）を確立する。

## (3)パルスレーザーCFRP 用加工システムの開発

高品位・高出力パルスレーザーと CFRP 加工技術を統合した加工システムを開発し、CFRP の高品位・高速加工技術を確立する。

## 3. 達成目標

### 最終目標（平成26年度）

各種 CFRP 材の切断加工の適否等について系統的な加工データを取得し、代表的な材料を対象に、以下の加工条件品位が可能な CFRP 加工(切断)装置のグランドデザインを完成させる。

- ・ 切断加工速度：6 m/min 以上
- ・ 加工品位：切断面において反応層の厚みが 100  $\mu\text{m}$  以下。  
(基材厚み 3 mm 以上)

### 【参考：高品位・高出力パルスレーザーに係る技術目標】

- ① パルスレーザー高品位・高出力化技術の開発
  - ・ ビーム品質：シングルモード、 $M^2 = 2-3$
  - ・ 平均出力：1.5kW 程度（1  $\mu\text{m}$  帯）
  - ・ 周波数：75-1000 kHz
  - ・ パルス幅：サブナノ秒 ~ 10 ns の範囲で選択
- ② 励起用半導体レーザー技術開発
  - ・ シングルエミッタ：出力 20W、電気-光変換効率 65%、素子信頼性(寿命) 20,000 時間以上、ファイバー結合効率 90%以上（ファイバーコア径 105  $\mu\text{m}$ 、NA0.15 相当）
  - ・ アレイ：出力 300 W、電気-光変換効率 60%

## 4. 特記事項

- (1) 社会情勢の変化、他国の動向等を踏まえ、必要に応じて目標の見直しを行うこととする。
- (2) 開発する加工システムによる実証研究の結果を随時フィードバックしつつ研究開発を実施する。実証研究にあっては、成果の有効性を検証できるユーザー機関を協力機関として確保する。

## 研究開発項目2 「大面積表面処理技術の開発」

### 1. 研究開発の必要性

低温ポリシリコン (LTPS) による薄膜トランジスタ (TFT) を用いた、液晶 (LCD) や有機発光ダイオード (OLED) は、高精細、高画質なフラットパネルディスプレイとして注目されており、特に中小型ディスプレイを中心に、今後その市場が大きく成長すると期待されている。この低温ポリシリコン TFT の製造を支える重要な工程が、アモルファスシリコン膜を低温ポリシリコン膜に改質するレーザーによる表面処理 (アニール) であり、現状ではエキシマレーザーを用いた装置により処理が行われている。

エキシマレーザーによるアニール装置は、レーザー発振管・光学部品の活性ガスによる損傷と活性ガス純度の劣化があり、日常的なメンテナンスが必要不可欠であり、ランニングコスト増にもなっている。このため、動作が安定で、取扱いが容易な固体レーザー装置が求められているが、産業用として求められる処理を行うためには出力が十分で無いといった課題がある。

このため、優れた安定性を持つ大出力固体レーザーと、これを用いた表面処理装置を開発し、実用化レベルで検証を行う。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) 高度均質幅広ビーム整形技術の開発

レーザー照射強度分布は LTPS の電気特性に影響を与えることから、レーザー照射の均一性向上を目的とした高度均質化技術と、幅広ビーム整形のための光学系技術を開発する。

#### (2) 高精度ビーム評価技術の開発

整形される高度なワイドビームの品質を評価するため、ビーム全域に渡り、ビームの集光性、輝度分布、パターンを高速、高分解能で診断する技術を開発する。

#### (3) 固体レーザー利用大面積表面処理装置の開発

開発した高出力固体レーザーを用いた表面処理装置を開発し、これを用いた実ビームの照射による実証研究により、低温ポリシリコン成膜のための表面処理技術を確立する。

### 3. 達成目標

#### 最終目標 (平成26年度)

開発した固体レーザー加工システムにより、幅 500mm 以上の表面処理を実現する。この際、ビームの目標は以下のとおりとし、表面処理後の LTPS の性能、処理速度については、ユーザーの要望に即したものとする。

- ・ビーム幅：幅 500 mm 以上、集光幅 20 $\mu$  以内 (グリーンレーザーによる)
- ・ビーム照射不均一性： $\pm 7\%$  以内 (平均強度分布)

### 4. 特記事項

- (1) 社会情勢の変化、他国の動向等を踏まえ、必要に応じて目標の見直しを行うこととする。
- (2) 開発する加工システムによる実証研究の結果を随時フィードバックしつつ研究開発を実施する。実証研究にあつては、成果の有効性を検証できるユーザー機関を協力機関として模索する。
- (3) 開発した高出力固体レーザーについては、実証研究を通じて、実用化に向けた信頼性確保に努める。



### 研究開発項目3 「粉末成形技術の開発」

#### 1. 研究開発の必要性

省エネルギー・省資源の観点から、少量多品種生産の需要が年々高まっているなか、従来の鋳造法に替わる技術として積層造型技術が注目されている。特に、軽量難加工材料であるチタン合金やアルミニウム合金のレーザー焼結積層造形についての我が国産業界の要求仕様に応える技術の開発が急務であり、成形サイズ、成形精度、最小成形厚みに関して、実ユーザーの要求を反映した装置の開発が切望されている。

本研究開発では、チタン合金等の軽量難加工材料について、パルスファイバーレーザーによる粉末成形を可能にする技術を開発し、粉末成形の精度向上と高速化を図る。

#### 2. 研究開発の具体的内容

平成24年度まで、任意の波形制御が可能な高品位・高出力パルスファイバーレーザー、連続光との複合照射技術、真空下において動作可能な粉末供給システム及び積層システムを開発し、真空チャンバ型の粉末焼結積層造形技術及びプロトタイプ装置の開発を行ってきた。これらの開発されたパルスファイバーレーザーと装置を組み合わせ、粉末焼結積層造形システムとしての技術を確立する。

#### 3. 達成目標

##### 最終目標（平成25年7月末まで）

開発したパルスファイバーレーザーと装置を統合し、以下の加工を達成する、真空下において動作可能な粉末成形積層造型機構を開発する。

- ・ 成形精度と速度  
成形精度：±0.1 mm（50 mm サイズ基準パーツ）  
成形時間：16 時間以内（高さ 50 mm サイズ基準パーツ）

#### 4. 特記事項

- (1) 本研究におけるパルスファイバーレーザー技術は、研究開発項目①における技術と共通の要素が含まれていることから、本研究開発項目にて開発した技術を用いて実用化を図る企業と密接な連携を図り、必要に応じて研究開発項目①にフィードバックを図る。
- (2) 開発したパルスファイバーレーザーの実用化展開を促進するため、本研究開発項目にて開発した技術の実用化を図る企業へのフォローアップを行う。

## 事前評価書（案）

		作成日	平成22年1月5日
1. 事業名称	高出力多波長複合レーザー加工基盤技術開発プロジェクト (ロボット・新機械イノベーションプログラム)		
2. 推進部署名	機械システム技術開発部		
3. 事業概要	<p>(1) 概要：</p> <p>我が国における低炭素社会の実現に向けた次世代製品の軽量化・高強度化、高機能化に対応した加工技術の確立が求められている。次世代レーザー加工技術は、従来加工技術のブレイクスルーとして、先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現する技術として期待されている。また、我が国の製造業における国際競争力の維持・強化、技術安全保障などの観点からも次世代レーザーの技術開発を国として取り組む必要性に迫られている。本事業では、「ユーザーニーズに適応した」かつ「国際競争力のある」半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術の研究開発を下記の開発項目により実施する。</p> <p>① レーザー高出力化技術の開発 ② レーザー高品位化技術の開発 ③ 多波長複合加工技術の開発</p> <p>(2) 事業規模：総事業費35億円（平成22年度事業費7億円）（予定） (3) 事業期間：平成22年度～26年度（5年間）</p>		
4. 評価の検討状況	<p>(1) 事業の位置付け・必要性</p> <p>我が国におけるものづくりは、高精度高効率の加工技術と高度な材料技術などに支えられ、タクトタイムの短縮、省エネ・省資源の実現等により、製造コストを抑制し、国際競争力のある商品を生み出している。最近では、低炭素社会の実現に向けた次世代製品の軽量化・高強度化、高機能化に対応した次世代加工技術の必要性が年々高まっている。一方で、従来加工技術のブレイクスルーとして、先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現する技術としてレーザー加工技術が急速な進展を見せており、これまでの生産技術を革新する新しい基盤技術となりつつある。日本のレーザー開発は、経済産業省の大型開発プロジェクトだけでも、1977年～2001年にかけてCO<sub>2</sub>レーザー等の継続的な開発を行ってきた。海外では、産業技術としてのみならず、軍事技術としても盛んに研究開発が進められ、産業応用される中で、このような国家プロジェクトの取り組みにより、わが国のレーザー加工技術はかろうじて先行団の一角に位置し、わが国製造業の技術競争力を下支えしてきた。しかしながら、わが国での2001年度以降レーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では国家支援が継続されてきており、こうしたことを背景として、レーザー技術の最先端領域であり、市場拡大が著しい半導体・ファイバーレーザーの分野では欧米に席卷されているのが現状である。近年、産業用レーザー市場は海外で拡大し続けているものの、我が国は、装置コスト、メンテナンスコスト、レーザー加工技術等の開発面で大きく遅れをとっている。そのため我が国に導入されている有望なレーザー発振器は、ほぼ海外製であり完全にブラックボックス化されていることから、導入してもメンテナンス等を海外企業に頼らざるを得ない。このままでは我が国のレーザー技術の空洞化が懸念され、革新的な部材の製造ができて自力で次世代製品を製造できないという事態に陥る可能性があり、我が国の製造業における国際競争力の維持・強化、技術安全保障などの観点からも次世代レーザーの技術開発を国として取り組む必要性に迫られている。</p>		

そこで本プロジェクトでは、我が国におけるレーザー技術を集積することによって半導体ファイバーレーザー技術の開発を推進し、他国にはまねができない革新的なものづくり基盤技術として、軽くて強いが加工難易度が極めて高い炭素繊維複合材料等の先進材料の加工や、次世代製品の短時間で高品質な低コスト製造を実現する加工技術の確立を目指す。これにより本プロジェクト成果を活用した半導体ファイバーレーザー及びそれを搭載したレーザー加工機の実用化・事業化が見込まれ、レーザー加工機の国内市場を獲得したと想定した場合、約2,300億円の市場が期待される。

## (2) 研究開発目標の妥当性

### <目標>

本プロジェクトでは、「ユーザーニーズに適応した」かつ「国際競争力のある」をコンセプトに、高出力・高品位の半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術を開発するとともに、次世代製品に向けたレーザー加工の基盤技術を確立する。

具体的には、以下の通り。

- ① レーザー高出力化技術の開発：半導体レーザーの高出力化技術及び高信頼化技術、半導体レーザーのファイバーカップル技術
- ② レーザー高品位化技術の開発：ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術、パルスレーザー増幅技術、高出力波長変換技術
- ③ 多波長複合加工技術の開発：切断接合技術、表面処理技術、粉末成形技術

### <妥当性>

低炭素社会の実現に向けた次世代製品の軽量化・高強度化、高機能化が進む中、短時間で高品質な低コスト製造を実現する手段として、レーザー加工技術は必要不可欠であり、高出力・高品位の半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術の開発は必須である。研究開発目標には、次世代の半導体ファイバーレーザーの産業化に向けて必要となる技術課題が抽出されている。

## (3) 研究開発マネジメント

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、公募により最適な垂直統合型研究開発体制を構築し、経済産業省及びプロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、適宜外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成24年度、事後評価を平成27年度に実施し、中間評価結果を踏まえ、必要に応じその結果を後年度の研究開発に反映することとする。なお、平成26年度までの各年度中に推進委員会等で各研究開発内容を評価し、必要に応じ、プロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

## (4) 研究開発成果

本事業により得られた研究開発成果は、自動車・航空機、環境・エネルギー、情報家電、医療・福祉等の先端基盤技術のみならず、産業全体に幅広く波及効果が期待できる。

具体的には、低コストかつ高出力・高品位な励起用半導体光源やファイバーレーザー、及びそれを搭載した加工システムが市場に投入され、革新的なレーザー加工の実現とともに、低炭素社会の実現に向けて貢献が期待される炭素繊維複合材やチタン等の先進材料の切断・接合・成形加工や、薄膜太陽電池デバイス、有機ELディスプレイ等の表面処理加工が可能となり、それらを用いた次世代製品の実現が期待できる。

(5) 実用化・事業化の見通し

プロジェクト終了5年後の2019年以降に本事業成果を活用した半導体ファイバーレーザー発振器及びそれを搭載した加工システムの実用化・事業化が見込まれる。

(6) その他特記事項

特になし。

5. 総合評価

以上、4. の評価結果により、NEDOの実施する事業として適切である。

## 特許論文等リスト (2017. 7. 31まで)

## 【特許】

## ◆浜松ホトニクス株式会社 「高出力半導体レーザー開発」

番号	出願者	出願番号	国内 国外 PCT※	出願日	状態	名 称
1	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
2	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
3	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
4	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
5	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
6	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
7	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
8	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
9	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	非公開	非公開
10	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	出願	非公開
11	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	出願	非公開
12	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	出願	非公開
13	浜松ホトニクス(株)	非公開	国内	非公開	出願	非公開
14	浜松ホトニクス(株)	準備中	国内	非公開	出願	非公開
15	浜松ホトニクス(株)	準備中	国内	非公開	出願	非公開
16	浜松ホトニクス(株)	準備中	国内	非公開	出願	非公開
17	浜松ホトニクス(株)	非公開	中国	非公開	出願	非公開

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## ◆古河電気工業株式会社 「QCW ファイバーレーザー開発」

番号	出願者	出願番号	国内 国外 PCT※	出願日	状態	名 称
1	古河電気工業(株)	非公開	米国	2011/ 5/31	非公開	レーザー装置
2	古河電気工業(株)	非公開	国内	2011/ 6/6	非公開	光ファイバレーザーおよびレーザー増幅装置
3	古河電気工業(株)	非公開	米国	2011/ 6/8	非公開	光ファイバ心線
4	古河電気工業(株)	非公開	米国	2011/ 7/8	非公開	ファイバレーザー出力光のデリバリーファイバによるビーム品質変化
5	古河電気工業(株)	非公開	国内	2011/ 7/11	非公開	光ファイバの終端構造および光ファイバ機器
6	古河電気工業(株)	非公開	国内	2011/ 7/20	非公開	反射戻り光の処理構造体およびレーザー装置
7	古河電気工業(株)	非公開	国内	2011/ 8/23	非公開	レーザー光によるセラミック基板の加工方法
8	古河電気工業(株)	非公開	国内	2011/ 8/29	非公開	レーザー加工装置

9	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2011/ 8/31	非公開	ファイバレーザ装置およびレーザ光照射位置の位置 決め方法
10	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2011/ 11/8	非公開	ファイバレーザ装置
11	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2011/ 11/9	非公開	光モジュール
12	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2011/ 11/29	非公開	ファイバレーザ装置およびファイバレーザ装置の異常 検出方法
13	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2011/ 11/29	非公開	ファイバレーザ装置およびファイバレーザ装置の異常 検出方法
14	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 1/17	非公開	ファイバレーザ装置およびレーザ光照射位置の位置 決め方法
15	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 1/23	非公開	シングルモードファイバレーザをマルチモードファイバ により伝送・出力するファイバレーザ装置
16	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 2/15	非公開	光ファイバの移動規制構造
17	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 4/9	非公開	レーザー加工機
18	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 4/9	非公開	レーザー加工機
19	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 5/28	非公開	レーザ装置および加工装置
20	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 7/18	非公開	光ファイバレーザ装置
21	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 10/16	非公開	レーザ装置
22	古河電気工業 (株)	非公開	国内	2012/ 10/26	非公開	ファイバレーザ加工機、ファイバ接続方法及びファイ バレーザ発振器

## ◆国立大学法人大阪大学 「パルスレーザー増幅技術の開発」

番号	出願者	出願 番号	国内 国外 PCT※	出願日	状態	名 称
1	大阪大学、浜 松ホトニクス	非公開	国内	2012/ 7/18	非公開	レーザー媒質ユニット、レーザー増幅器及びレーザー 発振器並びに冷却方法
2	大阪大学、浜 松ホトニクス	非公開	国内	2014/ 3/4	非公開	レーザー媒質ユニット、レーザー増幅器及びレーザー 発振器
3	大阪大学、 新日本工機	非公開	国内	2015/ 3/5	非公開	レーザー加工装置

## ◆技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所 「CFRP 切断加工技術の開発」「粉末成形技術の開発」

番号	出願者	出願 番号	国内 国外 PCT※	出願日	状態	名 称
1	アспект	非公開	国内	2012/ 7/31	非公開	粉末積層造形装置及び粉末積層造形方法
2	ミヤチ テクノス	非公開	国内	2012/ 7/30	非公開	レーザー加工システム及びレーザー加工方法

3	アспект	非公開	国外 (米国)	2012/ 12/20	非公開	Powder Rapid Prototyping apparatus and Powder Rapid Prototyping Method
4	アспект	非公開	国外 (独国)	2012/ 12/21	非公開	Pulver-Rapid-Prototyping-Vorrichtung und Pulver-Rapid-Prototyping-Verfahren
5	アспект 産総研	非公開	国内	2013/ 8/19	非公開	粉末積層造形装置及び粉末積層造形方法
6	アспект 産総研	非公開	国内	2013/ 11/21	非公開	熔融層の積層造形構造の製造装置、熔融層の積層構造の製造方法および熔融層の積層構造
7	新日本工機	非公開	国内	2014/ 2/25	非公開	複合材料のレーザー加工方法およびレーザー加工装置
8	ミヤチ テクノス	非公開	国内	2014/ 3/25	非公開	レーザー加工用集塵装置
9	産総研、新日本工機、古河電工	非公開	国内	2014/ 12/9	非公開	繊維強化複合材料の高速レーザー加工方法及びその高速レーザー加工装置

## 【論文】

## ◆浜松ホトニクス株式会社 「高出力半導体レーザー開発」

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	浜松ホトニクス株式会社・前田純也 他	ファイバレーザー励起用半導体レーザーの 開発動向	レーザー加工学会誌	有	2012/ 3/
2	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・A. Higuchi et al.	High power density vertical-cavity surface-emitting lasers with ion implanted isolated current aperture,	Optics Express	有	2012/ 2/6
3	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・N. Kageyama et al.	Newly developed high power laser diode bars	Proc. SPIE, 8241	有	2012/ 1/30
4	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・N. Kageyama et al.	Efficient and reliable high power laser diode bars with low smile implementation.	IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS	有	2012/ 5/11
5	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・H. Naito et al.	Short-Pulse Operation of a High Power-Density Proton-Implanted Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array	Applied Physics Express	有	2012/ 8/1
6	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・H. Naito et al.	Development of a High Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array with Ion-Implanted Current Apertures	Proc. SPIE, 8639	有	2013/ 3/13
7	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・T. Morita et al.	High Efficient and Reliable Broad-Area Laser Diodes with Window Structure	IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS	有	2013/ 2/5
8	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・Y. Aoki et al.	200W Operation of an Ion-implanted Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array	IEEE J. of Quantum Electronics	有	2014/ 5/12
9	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・K Torii et al.	Numerical investigation of side emission from large-area vertical-cavity surface-emitting lasers	Applied Optics	有	2015/ 5/10
10	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・H Naito et al.	Long-Term Reliability of 915-nm Broad-Area Laser Diodes under 20 W CW Operation	IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS	有	2015/ /
11	浜松ホトニクス株式会社・吉田治正 他	915nm 半導体レーザーの高出力化にお ける窓構造とその特性	電子情報通信学会技 術研究報告	無	2013/ 8/22
12	浜松ホトニクス株式会社・吉田治正 他	高出力 VCSEL	FY2012-002-1 光技術 動向調査報告書	無	2013/ 11/5
13	浜松ホトニクス株式会社・影山進人 他	900nm 帯高出力半導体レーザーの 開発	電子情報通信学会技 術研究報告	無	2014/ 8/14

## ◆国立大学法人大阪大学 「パルスレーザー増幅技術の開発」

平成 23 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	阪大接合研・塚本雅裕	「次世代レーザー加工」特集号によ せて	レーザー研究, 39, 9 (2011), 672-673.	有	2011/ 9/1
2	阪大接合研・塚本 雅裕	産学連携による次世代素材のレー ザー加工技術開発への取り組み	日本材料科学会誌 Vol.49, No.2 pp.78-pp.81	有	2012/ 4/20



## 平成 24 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	Inst. of Laser Eng. Osaka Univ, HAMAMATSU PHOTONICS Co. ALPROT・Takashi Kurita, Hidetsugu Yoshida, Toshiyuki Kawashima and Noriaki Miyanaga	Generation of sub-7-cycle optical pulses from a mode-locked ytterbium-doped single-mode fiber oscillator pumped by polarization-combined 915 nm laser diodes	Optics Letters, Vol. 37, No. 19	有	2012/ 10/1
2	阪大レーザー研、片岡製作所、阪大接 合研、ALPROT・吉田英次、山村健、石 川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲 明、塚本雅裕、酒川友一	Yb 添加大口径ホトニッククリスタル ファイバーを用いた高ピーク、高平 均出力 MOPA レーザーシステムの 開発	レーザー研究 Vol. 40, No 10	有	2012/ 10/1

## 平成 25 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	JWRI, Osaka Univ.・SATO Yuji, TSUKAMOTO Masahiro, NARIYAMA Tatsuya, NAKAI Kazuki, TAKAHASHI Kenjiro MASUNO Shinichiro	Experimental study of CFRP cutting with nanosecond lasers	Transactions of JWRI, Vol.42 No.1、p.23-26	有	2013/ 7/8
2	阪大レーザー研・吉田英次	ビーム結合技術によるレーザー出 力の高出力化	レーザー研究 Vol. 41, No. 8, p574-584	有	2013/ 8/15
3	阪大レーザー研・片岡製作所・阪大接 合研、ALPROT 吉田英次、椿本孝治、藤 田尚徳、宮永憲明、山村健、酒川友一、 塚本雅弘、藤崎晃	大口径ファイバーを用いた高出力 パルス Yb ファイバーレーザー	光学 vol. 42, No. 9, p459-465	有	2013/ 9/10
4	阪大接合研・佐藤雄二、塚本雅 裕、大久保友雅、高橋謙次郎、升 野 振一郎	ナノ秒レーザーを用いた炭素繊維強 化プラスチック CFRP のアブレーシ ョン	スマートプロセス学会 誌 Vo.3, No.1, p.54-59	有	2013/ 12/2

## 平成 26 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	JWRI, Osaka Univ.・Yuji SATO, Masahiro TSUKAMOTO, Tatsuya NARIYAMA, Kazuki NAKAI, Fumihito MATSUOKA, Kenjiro TAKAHASHI, Shinichiro MASUNO, Tomomasa OHKUBO and Hitoshi NAKANO	Effect of laser wavelength on carbon fiber reinforced plastics ablation with nanosecond laser	レーザー学会誌, Vol.42, p335-340 (2014)	有	2014/ 4/15
2	Osaka Univ.Inst.forLaser Tech , ALPROT,・K. Takahashi,*, M. Tsukamoto, S. Masuno, Y. Sato, H. Yoshid, K. Tsubakimoto,H. Fujita, N. Miyana, M. Fujita, H. Ogata	Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with apulsed fiber laser	J. of Mat. Proc. Tech, 222, (2015) 110-121	有	2015/ 3/1
3	JWRI, Osaka Univ・Masahiro TSUKAMOTO	ものづくりの未来を拓くレーザ加工 技術「ものづくりフォトニクス」	スマートプロセス学会 誌	有	2015/ 1/1
4	阪大レーザー研、レーザー総研・衣笠卓 一、椿本孝治、岩見洋輔、吉田英次、藤 田尚徳、宮永憲明、白神宏之	多ビームコヒーレント結合のための 位相差制御フィードバックアルゴ リズムの開発	レーザー研究、第 43 巻 第 3 号 (2015) pp.169-173.	有	2015/ 3/1
5	阪大レーザー研、片岡製作所、阪大接 合研、ALPROT・吉田英次、山村健、椿 本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、酒川友 一、塚本雅裕	Yb 添加大口径ホトニッククリスタル ファイバーを用いたナノ秒パルス平 均出力レーザーシステムの開発	オプトロニクス 4 月号 (2015)pp.153-159.	有	2015/ 4/1

## ◆技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所 「CFRP 切断加工技術の開発」「粉末成形技術の開発」

平成 23 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	産総研、ALPROT 新納 弘之、黒崎諒三	Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by UV pulsed laser ablation	Proc. of SPIE Vol. 7920 792019-1 (2011)	有	2011/5
2	ALPROT、産総研、ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学 新納弘之、川口喜三、佐藤正健、奈良崎愛子、黒崎諒三、原田祥久、中山伸一、加瀬純平、松下正文、古川航一、西野充晃	炭素繊維強化樹脂(CFRP)のレーザー精密加工	平成 23 年電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集、OS11-5、p.956-959(2011)	無	2011/9
3	産総研、ALPROT、筑波大学 Y.Harada, K. Kawai, T.Suzuki, T.Teramoto	Evaluation of Cutting Process on the Tensile and Fatigue strength of CFRP Composites	Materials Science Forum, 06-709 (2012), pp.649-654	有	2012/1
4	産総研、ALPROT 新納弘之	特集「レーザー精密加工の最新動向」:総論	オプトロニクス 2011 年 11 月号、p.86-89(2011)	無	2011/11
5	ALPROT、産総研、三菱化学、筑波大学 Y. Harada, K. Kawai, M. Nishino, H. Niino, T. Suzuki and T. Teramoto	Effect of Fiber Orientation on Tensile Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) using Laser Cutting Process	Proceedings of 12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE12), (2011), PMC-3.	有	2011/11

平成 24 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	産総研、ALPROT Y. Harada, T. Suzuki, M. Nishino, H. Niino	Investigation on the Tensile Strength of CFRP/CFRTP Manufacturing using High-Power Lasers	Proceedings of International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials, p.4-4 (2012).	有	2012/4
2	ALPROT、三菱化学、産総研 西野充晃、原田祥久、鈴木隆之、新納弘之	Acoustic damage detection in laser-cut CFRP composite materials	Proc. of SPIE, vol. 8243, p.82431C-1 (2012)	有	2012/5
3	ALPROT、産総研、三菱化学、筑波大学 Y. Harada, T. Ito, T. Suzuki, M. Nishino, H. Niino, T. Teramoto	Environmental Effects on Mechanical Behavior of CFRP using Laser Cutting Process	Proceedings of 15th European Conference on Composite Materials, 2012)	有	2012/6
4	ALPROT、産総研、アスペクト 中野禪、堀場欣紀、松崎邦男、佐々雅祥、清水透、萩原正	レーザー応用粉末積層造形法による金属成形装置の開発	平成 24 年度塑性加工春季講演会講演論文集	無	2012/6
5	ALPROT、AIST Osamu Matsumoto, Hiroyuki Niino, Hitoshi Ogata	High-power Pulsed Fiber Laser and Processing Technology Project	Proceedings of LPM2012 - the 13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication	無	2012/7
6	産総研、ALPROT 新納弘之	The Japanese Way of Knowledge Transfer	ICALEO2012 国際会議 (アナハイム、米国)	無	2012/9/27

7	産総研、ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学、ALPROT 新納弘之、川口喜三、佐藤正健、奈良崎愛子、黒崎 諒三、村松真由、原田 祥久、若林浩二、長嶋崇弘、加瀬 純平、松下 正文、古川 航一、西野 充晃	Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by 1kW cw fiber laser irradiation	Proc. of SPIE Vol. 8607, (2013)	有	2013
8	Institute of Laser Engineering, ALPROT, Hamamatsu Photonics K.K., Institute for Laser Technology(ILT), K. Iyama, R. Bhushan, H. Furukawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, T.Kawashima	Development of kW class Nd:YAG composite ceramic thin disc laser	PhotonicsWest2013 LASE The Moscone Center, San Francisco, California, USA 8599-82	有	2013/ 2/5

## 平成 25 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	アспект、産総研 萩原正、佐々雅弘、堀場欣紀、中野禪、清水透	ファイバーレーザーを用いた金属粉末成形技術の開発	溶接学会平成 25 年度春季全国大会シンポジウム講演概要集	無	2013/ 4
2	ALPROT 松本 修	「次世代素材レーザー加工技術開発プロジェクト」	OITDA オプトニュース Vol.8, No.1 (2013)	無	
3	古河電工、産総研 藤崎晃、宮戸泰三、茅原崇、新納弘之	Single mode fiber laser of its quasi CW operation for cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	有	2013/ 4/
4	ALPROT, Miyachi Corporation, Furukawa Electric Co., AIST Koji Wakabayashi, Takahiro Nagashima, Kenji Anzai Akira Fujisaki, Taizo Miyato, Takashi Kayahara, Yoshihisa Harada, and Hiroyuki Niino	DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED, SWEEP TYPE REMOTE PROCESSING HEAD	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	有	2013/ 4/
5	ALPROT, Shin Nippon Koki Co. Ltd., AIST, Miyachi Corporation Koichi Furukawa, Masafumi Matsushita, Yoshihisa Harada, Takahiro ,Nagashima, Hiroyuki Niino	DEVELOPMENT OF LASER PROCESSING HEAD FOR CFRP CUTTING	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	有	2013/ 4/
6	ALPROT 三菱化学 AIST ミヤチテクノス 新日本工機 Michiteru NISHINO, Yoshihasa HARADA, Hiroyuki NIINO, Takahiro NAGASHIMA, Kouichi FURUKAWA, Masafumi MATSUSHITA	Laser Machining of PAN/PITCH-based Carbon Fiber Reinforced Composite Materials	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	有	2013/ 4/
7	ALPROT, AIST M. Muramatsu, Y. Harada, T. Suzuki, Hiroyuki Niino	Evaluation of Defect in CFRP Using Infrared Thermography and Its Heat Conduction Simulation	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	有	2013/ 4/

8	AIST,ALPROT 奈良崎愛子, 佐藤正健, 川口喜三, 黒崎諒三, 新納弘之	Laser-ionization Time-of-Flight mass spectrometric studies on laser ablation of carbon fiber reinforced plastics	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	有	2013/ 4/
9	AIST,ALPROT 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 新納弘之	Laser ablation plume from graphite and CFRP under irradiation of nanosecond UV laser pulses in the air	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	有	2013/ 4/
10	産総研, ALPROT, ミヤチテクノス, 新日本工機, 三菱化学 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 村松真由, 原田祥久, 若林浩次, 長嶋崇弘, 加瀬純平, 松下正文, 古川航一, 西野充晃	Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) by Fiber Laser Irradiation	Technical Digest of 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR) 2013, ThE3-5	有	2013/ 7/
11	産総研, ALPROT, ミヤチテクノス, 新日本工機, 三菱化学 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 村松真由, 原田祥久, 若林浩次, 長嶋崇弘, 加瀬純平, 松下正文, 古川航一, 西野充晃	Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) by IR and UV Lasers Irradiation	The 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing(LAMP2013) 国際会議(セッション: 43.HPL10_Cutting and Drilling) Fr4-OH-6	有	2013/ 7/26
12	産総研, アスペクト, ALPROT Shizuka Nakano, Masashi Hagiwara, Toru Shimizu, Yoshinori Horiba, Naoko Sato, Kunio Matsuzaki and Masahiro Sassa	Novel selective laser melting solution for metal additive manufacturing using vacuum and a quasi continuous wave laser	Proceedings of The 7 <sup>th</sup> International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21 <sup>st</sup> Century(LEM21), Sendai,419-422	有	2013/ 11/7
13	産総研, ALPROT Yoshihisa Harada, Mayu Muramatsu, Takayuki Suzuki, Michiteru Nishino, Hiroyuki Niino	Influence of Laser Process on Mechanical Behavior during Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites	International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, Thermec2013, Las Vegas, P-126	有	2013/ 12/3
14	ALPROT 松本 修	「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」の進捗状況	精密工学会誌 2014年1号「大型プロジェクト特集」	有	2014/ 1/1
15	Institute of Laser Engineering, Osaka University, ALPROT, Hamamatsu Photonics K.K., Institute for Laser Technology, K. Iyama, H. Furukawa, H.Chosrowjan, T.Sakurai, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, T.Kawashima	400W Nd:YAG composite ceramic thin-disc laser in 10ns pulse at 167kHz	PhotonicsWest2014 LASE The Moscone Center, San Francisco, California, USA 8959-27	有	2014/ 2/3
16	ALPROT, Miyachi Corporation, Furukawa Electric, AIST Kenji Anzai, Mitsuaki Aoyama, Akira Fujisaki, Taizo Miyato, Takashi Kayahara, Yoshihisa Harada, and Hiroyuki Niino	Laser Trepanning of CFRP with a Scanner Head for IR and UV Lasers	PhotonicsWest2014 LASE Proc. of SPIE Vol.8967 89670K-1	有	2014/ 2/5

17	HAMAMATSU PHOTONICS K.K., ALPROT, Institute of Laser Engineering, Osaka University Yoshinori Tamaoki, Yoshinori Kato, Kohichi Iyama, Toshiyuki Kawashima, and Noriaki Miyanaga	180W At 1kHz, 532nm SHG From LBO Crystals Using Nd:YAG Laser for material processing	Photonic West 2014 LASE- ,1-6 February 2014, The Moscone Center San Fransisco, California, USA 8959-24	有	2014/ 2/3
18	産総研, ALPROT, ミヤチテクノス, 新 日本工機, 三菱化学, 古河電工 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎 愛子, 黒崎諒三, 原田祥久, 安在健治, 青山光昭, 松下正文, 古川航一, 西野充 晃, 藤崎晃, 宮戸泰三, 茅原孝	Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by single-mode fiber laser irradiation,	PhotonicsWest2014 LASE The Moscone Center, San Francisco, California, USA, 8967-18	有	2014/ 2/5
19	ALPROT, AIST Furukawa Electric Co., Ltd., Shin Nippon Koki Co. Taizo Miyato, Takashi Kayahara , Akira Fujisaki, Koichi Furukawa , Masafumi Matsushita, Mayu Muramatsu, Yoshihisa Harada, Hiroyuki Niino	High power single-mode fiber laser and its application to metal and non-metal materials	PhotonicsWest2014 LASE, The Moscone Center, San Francisco, California, USA, LA117-10	有	2014/ 2/6

## 平成 26 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	Institute for Laser Technology, Institute of Laser Engineering, ALPROT, Haik Chosrowjan, Seiji Taniguchi, Masayuki Fujita, Kouji Tsubakimoto, Hidetsugu Yoshida, Noriaki Miyanaga, and Yasukazu Izawa,	Filled-aperture, Single detector Coherent Beam Combining Technique Using Simple Algorithms	OPIC/ALPS2014, 横浜, 2014 年 4 月 22-24 日、 ALPS-p03	有	2014/ 4/22
2	HAMAMATSU PHOTONICS K.K., ALPROT, Institute of Laser Engineering, Osaka University Yoshinori Tamaoki, Yoshinori Kato, Kohichi Iyama, Toshiyuki Kawashima, and Noriaki Miyanaga	180W of High Average Power At 1kHz, 532nm From Nd:YAG Laser in long term operation	OPIC/ALPS2014, 横浜, 2014 年 4 月 22-24 日、 ALPS-p03、ALPS8-9	有	2014/ 4/24
3	ALPROT, AIST, MIYACHI CORPORATION, SHIN NIPPON KOKI CO.LTD., Mitsubishi Chemical Corporation, Furukawa Electric Co., Ltd. Hiroyuki Niino, Yoshizo Kawaguchi, Tadatake Sato, Aiko Narazaki, Ryoza Kurosaki, Yoshihisa Harada, Kenji Anzai, Mitsuaki Aoyama, Masafumi Matsushita, Kouichi Furukawa, Michiteru Nishino, Akira Fujisaki, Taizo Miyato, Takashi Kayahara	Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics (CFRTP) by IR Fiber Laser Irradiation	The 15th International Symposium on Laser Precision Micro- fabrication (LPM 2014)	有	2014/ 4/18
4	産総研, ALPROT 村松真由、原田祥久、鈴木隆之、新納弘 之	Infrared stress measurements of thermal damage to laser-processed carbon fiber reinforced plastics	Composites Part A, 68 巻、2015 年、p.242-250	有	2015/ 4/18

5	ALPROT, AIST, MIYACHI CORPORATION, SHIN NIPPON KOKI CO.LTD., Mitsubishi Chemical Corporation, Furukawa Electric Co., Ltd. Hiroyuki Niino, Yoshihisa Harada, Kenji Anzai, Mitsuaki Aoyama, Masafumi Matsushita, Kouichi Furukawa, Michiteru Nishino, Akira Fujisaki, Taizo Miyato, Takashi Kayahara	2D/3D laser cutting of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) by fiber laser irradiation	Photonics West 2015 LASE- Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XX	有	2015/2/10
6	産総研, ALPROT 村松真由、原田祥久、鈴木隆之、新納弘之	Infrared stress measurements of thermal damage to laser-processed carbon fiber reinforced plastics	Composites Part A, 68 巻、2015 年、p.242-250	有	2015/

## 平成 27 年度

番号	所属・発表者	題名	発表誌名	査読	発表年月日
1	HAMAMATSU PHOTONICS K.K., ALPROT, Institute of Laser Engineering, Osaka University Yoshinori Kato, Yoshinori Tamaoki, Takashi Sekine, Yasuki Takeuchi, Koichi Iyama, Takashi Kurita, Toshiyuki Kawashima, and Noriaki Miyanaga	Development of a 180-W, 1-kHz Pulsed Green Laser System for Industrial Applications	OPIC・ALPS' 15 ,パシフィック横浜 会議センター、2015 年 4 月 22 日 - 24 日、ALPS8-3	有	2015/4/23
2	Inst. for Laser Tech., Inst. of Laser Eng., ALPROT, T. Kitamura, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, M. Fujita, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, Y. Izawa	Coherent Combination of Four High-Power Laser Beams Using Bernoulli Discrete Probability Distribution Based Algorithm	OPIC・ALPS' 15 ,パシフィック横浜 会議センター、2015 年 4 月 22 日 - 24 日、ALPSp14-13	有	2015/4/23

## 【外部発表】

## ◆浜松ホトニクス株式会社 「高出力半導体レーザー開発」

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	浜松ホトニクス株式会社・前田純也、他	ファイバーレーザー用半導体レーザーの開発動向について	シンポジウム「パワーファイバーレーザーとその産業応用」【依頼講演】	2011/4/22
2	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・N. Kageyama, et al.	Newly developed high power laser diode bars	SPIE Photonics West 2012 【発表審査有・口頭発表】	2012/1/22
3	浜松ホトニクス株式会社・影山進人、他	900nm 帯高出力 LD バーの開発	レーザー学会学術講演会第32回 年次大会【口頭発表】	2012/1/31
4	浜松ホトニクス株式会社・樋口彰、他	高輝度面発光レーザーの開発	レーザー学会学術講演会第32回 年次大会【口頭発表】	2012/1/31
5	浜松ホトニクス株式会社・前田純也、他	ファイバ結合型ブロードエリア半導体レーザーの開発	レーザー学会学術講演会第32回 年次大会【口頭発表】	2012/1/31
6	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・J. Maeda, et al.	Investigation of High Efficiency Fiber-coupled Laser Diode Modules for Fiber Laser Pumping	The 1st Advanced Laser and Photon Sources (ALPS'12)【発表審査有・口頭発表】	2012/4/27
7	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・T. Morita, et al.	Developments of High-Power 9xx-nm Single Emitter Laser Diodes and Laser Diode Bar,	2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meetings【発表審査有・口頭発表】	2012/7/10
8	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・T. Morita, et al.	High-Power and High-Efficiency 915 nm Broad-Area Laser Diodes with Window Structure	23rd IEEE International Semiconductor Laser Conference【発表審査有・口頭発表】	2012/10/9
9	浜松ホトニクス株式会社・吉田治正、他	加工レーザー開発	次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト「ユーザー連携実用化推進シンポジウム(成果(中間)報告会)」【依頼講演・口頭発表】	2012/7/30
10	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・H. Naito, et al.	Development of a High Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array with Ion-Implanted Current Apertures	SPIE Photonics West2013【依頼講演・発表審査有・口頭発表】	2013/2/7
11	浜松ホトニクス株式会社・遠藤和幸、他	900nm 帯高出力半導体レーザーを用いたファイバモジュールの開発	レーザー学会学術講演会第33回 年次大会【口頭発表】	2013/1/29
12	浜松ホトニクス株式会社・森田剛徳、他	High-Power and High-Efficiency 915 nm Broad-Area Laser Diodes with Window Structure (ISLC2012 報告)	電子情報通信学会研究会【口頭発表】	2013/1/24
13	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・T. Nagakura, et al.	T. Nagakura, et al., High-power and Reliable Operation of Window-Structured 915 nm Laser Diodes with 90 mm Aperture	CLEO/Europe-IQEC 2013【発表審査有・口頭発表】	2013/5/16
14	浜松ホトニクス株式会社・吉田治正、他	915nm 半導体レーザーの高出力化における窓構造とその特性	電子情報通信学会研究会【依頼講演・口頭発表】	2013/8/29
15	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・T. Morita, et al.	High-power and high-efficiency 9xx-nm laser diodes for pumping applications	ALPS' 14【依頼講演・発表審査有・口頭発表】	2014/4/24
16	浜松ホトニクス株式会社・影山進人、他	900nm 帯高出力半導体レーザーバーの開発	電子情報通信学会研究会【依頼講演・口頭発表】	2014/8/21
17	浜松ホトニクス株式会社・藤原淳志、他	酸素分光用 760nmDFB 半導体レーザーの開発と応用展開	レーザーセンシングシンポジウム【依頼講演・口頭発表】	2014/9/5
18	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.・T.Uchiyama, et al.	Development of High-Power and High-Efficiency 9xx nm Laser Diodes	ALPS' 15【発表審査有・口頭発表】	2015/4/24
19	浜松ホトニクス株式会社 吉田、森田、内藤	NEDO 高出力レーザー関連プロジェクトの成果報告	レーザーEXPO 2015	2015/4/22

## ◆古河電気工業株式会社 「QCW ファイバーレーザー開発」

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	古河電気工業株式会社 藤崎晃	シングルモードファイバーレーザーの開発と加工事例	レーザー EXPO シンポジウム(横浜、神奈川)	2011/4/22
2	古河電気工業株式会社 藤崎晃	シングルモードファイバーレーザーの特性と加工事例	レーザー学会第 419 研究会(名古屋、愛知)	2011/10/17
3	古河電気工業株式会社 藤崎晃	シングルモードファイバーレーザーの開発と加工事例	レーザー学会東京支部第 13 回先進レーザー応用技術セミナー(川崎、神奈川)	2011/10/28
4	古河電気工業株式会社 柏木孝介、茅原崇、江森芳博、藤崎晃	High power single-mode fiber laser and a multi-mode delivery cable	PhotonicsWest2012 国際会議(米国サンフランシスコ、モスクーオン会議場) 8243-42	2012/1/24
5	古河電気工業株式会社 藤崎晃	シングルモードファイバーレーザーの技術と加工応用	レーザー学会学術講演会第 32 回シンポジウム TKP 仙台カンファレンスセンター	2012/2/1
6	古河電気工業株式会社 藤崎晃	シングルモードファイバーレーザーによる高反射材料加工	溶接学会平成 24 年度秋期全国大会フォーラム(奈良)	2012/9/27
7	古河電気工業株式会社 藤崎晃	kW 級ファイバーレーザー	レーザー学会ファイバーレーザー専門委員会研究会(名古屋、愛知)	2012/11/30
8	古河電気工業株式会社 藤崎晃	kW 級ファイバーレーザーと先端加工応用	レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会シンポジウム(姫路、兵庫)	2012/1/28

## ◆国立大学法人大阪大学 「パルスレーザー増幅技術の開発」

平成 23 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	阪大接合研・塚本 雅裕	産学連携による多波長複合レーザー加工技術開発への取り組み	第 75 回レーザー加工学会講演会	2011/5/11
2	阪大接合研・塚本雅裕, 阿部信行	産学連携による高出力レーザー加工基盤技術開発への取り組み	第 8 回 スマートプロセス研究センター産学連携シンポジウム - 産学連携の最新成果とスマートプロセス研究の新シーズン -	2011/6/20
3	阪大接合研・塚本 雅裕	産学連携による高出力レーザー加工技術開発への取り組み	第 10 回レーザー学会「マイクロ固体フォトニクスの新展開 - ジャイアントマイクロフォトニクスの創成 -」専門委員会 第 2 回「ジャイアントマイクロフォトニクス II」研究会	2011/7/29
4	阪大レーザー研、浜松ホトニクス、ALPROT・Ravi Bhushan、伊山 功一、古河裕之、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明	パルスレーザー増幅技術の開発 (1)	第 72 回応用物理学会学術講演会(山形大学、山形)	2011/8/30
5	阪大レーザー研、レーザー総研、浜松ホトニクス、ALPROT・伊山 功一、Ravi Bhushan、古河裕之、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明	パルスレーザー増幅技術の開発 (2)	第 72 回応用物理学会学術講演会(山形大学、山形)	2011/8/30
6	阪大接合研・塚本雅裕	産学連携による次世代レーザー加工基盤技術開発への取り組み	レーザー学会、第 419 研究会「レーザー加工」	2011/10/17



7	阪大接合研・中井一樹, 成山達也, 中野人志, 塚本雅裕, 升野振一郎, 高橋謙次郎, 阿部信行, 藤田雅之	ナノ秒レーザによる炭素繊維強化プラスチックの高品質加工	(社)高温学会 平成 23 年度秋季総合学術講演会	2011/11/21
8	阪大接合研・塚本雅裕	次世代レーザー加工技術開発大型プロジェクト	日本光学会年次学術講演会	2011/11/29
9	阪大接合研・塚本雅裕	紫外線ナノ秒レーザを用いた炭素繊維強化プラスチック基板の切断	第 76 回レーザ加工学会講演会	2011/12/5
10	阪大接合研・レーザー総研、近畿大・成山達也, 中野人志, 塚本雅裕, 升野振一郎, 高橋謙次郎, 阿部信行, 中井一樹, 藤田雅之	炭素繊維強化プラスチックの高品質加工のためのナノ秒レーザ照射	第 76 回レーザ加工学会講演会	2011/12/5
11	阪大接合研・塚本雅裕	期待される次世代加工用レーザー	先端光テクノロジー展 2011	2011/12/9
12	阪大レーザー研、片岡製作所、阪大接合研、ALPROT・吉田英次、山村健、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステム	レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会 (TKP 仙台カンファレンスセンタ、仙台)	2012/1/30
13	阪大接合研、レーザー総研・中井一樹, 成山達也, 中野人志, 塚本雅裕, 升野振一郎, 高橋謙次郎, 阿部信行, 藤田雅之	短パルスレーザーによる炭素繊維強化プラスチックの高品質加工 I - 熱硬化性樹脂により成形した炭素繊維クロス材の加工特性 -	レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会 (TKP 仙台カンファレンスセンタ、仙台)	2012/1/31
14	阪大接合研、レーザー総研・成山達也, 中野人志, 塚本雅裕, 升野振一郎, 高橋謙次郎, 阿部信行, 中井一樹, 藤田雅之	短パルスレーザーによる炭素繊維強化プラスチックの高品質加工 II - 熱可塑性樹脂により形成したチョップド材の加工特性 -	レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会 (TKP 仙台カンファレンスセンタ、仙台)	2012/1/31
15	阪大接合研・塚本雅裕	レーザー加工プロジェクト	大阪大学光科学研究企画 ワーキング/レーザー加工計測コンソーシアム	2012/2/11
16	阪大接合研・塚本雅裕	産学連携による高出力レーザー加工技術開発	2011(平成 23)年度第 4 回 光材料・応用技術研究会「レーザー非線形光学技術」	2012/3/2
17	阪大接合研・塚本雅裕	期待される次世代加工用レーザ	レーザプラットフォーム協議会 平成 23 年度第 3 回フォーラム「次世代レーザによる高品質加工」	2012/3/13
18	阪大レーザー研、浜松ホトニクス、レーザー総研、ALPROT 伊山功一, Ravi Bhushan, 古河裕之, 椿本孝治, 吉田英次, 藤田尚徳, 藤田雅之, 宮永憲明	パルスレーザー増幅技術の開発 (3)	第 59 回応用物理学関係連合講演会(早稲田大学、東京)	2012/3/15
19	片岡製作所、阪大レーザー研、阪大接合研、レーザー総研、ALPROT・山村健、吉田英次、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発	第 59 回応用物理学関係連合講演会(早稲田大学、東京)	2012/3/16
20	阪大接合研・塚本雅裕	CFRP 切断技術について「短パルスレーザーを用いた炭素繊維強化プラスチック材料加工」	レーザー学会第 10 回「次世代産業用レーザー専門委員会」(株)アマダ富士宮事業所、静岡	2012/3/30

## 平成 24 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	JWRI, Osdaka Univ.・K. Takahashi, S. Masuno, M.Tsukamoto, K. Nakai, T. Nariyama, H. Nakano, M. Hujita and N. Abe	Study in 2nd and 3rd Harmonic Generations from the Fiber Laser and the CFRP Processing with the Laser Light	LPCC2012, Yokohama, Japan	2012/4/25-27
2	Inst. Of Laser Eng., Osaka Univ., Kataoka co., JWRI Osaka Univ.・ALPROT・H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura,	High-peak and high-average-power polarization-maintained Yb-doped PCF fiber laser system	Advance Lasers and Photon Source 2012, Yokohama, Japan	2012/4/25-27

	M. Ishikawa, T. Sakagawa, M. Tsukamoto			
3	Hamamatsu Photonics Co., Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ. ALPROT・Ravi Bhushan, K. Iyama, H. Furukawa, H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga	Development of a Compact Diode Pumped High Power Nd:YAG Amplifier	Advance Lasers and Photon Source 2012, Yokohama, Japan	2012/4/25-27
4	Hamamatsu Photonics Co., Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ. ALPROT・H. Fujita, K. Iyama, R. Bhushan, H. Yoshida, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga	High-repetition and high-average-power Nd:YAG amplifier pumped by 4-kW LDs	Advance Lasers and Photon Source 2012, Yokohama, Japan	2012/4/25-27
5	Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ.・K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, N. Miyanaga, Y. Nagata, H. Kinoshita	240W, 10kHz Green Laser from Harmonic Converted Nd:YAG MOPA	Advance Lasers and Photon Source 2012, Yokohama, Japan	2012/4/25-27
6	阪大接合研・成山 達也、中井 一樹、塚本 雅裕、升野 振一郎、高橋 謙次郎、中野 人志、藤田 雅之、阿部 信行	ナノ秒レーザによる炭素繊維強化プラスチックの加工特性	第 77 回レーザ加工学会講演会 (大阪)	2012/5/24-25
7	阪大接合研、近畿大学 西井 諒介、中野 人志、塚本 雅裕、阿部 信行、篠永 東吾、伊藤 雄一郎、松下 伸広、謝 国強、永井 亜希子、塙 隆夫、藤田 雅之	フェムト秒レーザ照射による酸化チタン膜への周期構造形成	第 77 回レーザ加工学会講演会 (大阪)	2012/5/24-25
8	Inst. Of Laser Eng. ・H. Fujita, K. Iyama, R. Bhushan, H. Yoshida, K. Tsubakimoto, and N. Miyanaga	High-repetition and high-average-power Nd:YAG Active Mirror Amplifier Pumped by High Power LDs	8th Asian Pacific Laser Symposium, Huanshan, China	2012/5/27-30
9	阪大レーザー研、浜松ホトニクス、レーザー総研、ALPROT・伊山功一、Ravi Bhushan、古河裕之、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明、玉置善紀、加藤義則、川嶋利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザの開発	レーザー学会第 427 回研究会、吹田	2012/7/13
10	Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ. Kataoka Co., Ins. for Laser tech., JWRI, Osaka Univ., ALPROT・ H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, M. Ishikawa, T. Sakagawa, M. Tsukamoto	High-average-power nanosecond pulse generation in polarization-maintained Yb-doped PCF fiber laser systems	5th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, Stockholm, Sweden	2012/8/26-31
11	阪大接合研、レーザー総研・成山 達也、中井 一樹、塚本 雅裕、升野 振一郎、高橋 謙次郎、中野 人志、水田 浩平、藤田 雅之、阿部 信行	ナノ秒レーザーを用いた炭素繊維強化プラスチックの加工 -レーザ一波長依存性-	第 73 回応用物理学会学術講演会、松山	2012/9/11-14
12	阪大接合研、レーザー総研・中井 一樹、成山 達也、塚本 雅裕、升野 振一郎、高橋 謙次郎、藤田 雅之、阿部 信行	ナノ秒レーザーによる炭素繊維強化プラスチックの切断加工特性	第 73 回応用物理学会学術講演会、松山	2012/9/11-14
13	阪大接合研、レーザー総研・堀口 直人、塚本 雅裕、吉田 実、篠永 東吾、高橋 雅也、藤田 雅之、阿部 信行	フェムト秒レーザー照射による酸化チタン膜の光触媒機能変化 -レーザ一波長依存性-	第 73 回応用物理学会学術講演会、松山	2012/9/11-14
14	片岡製作所、阪大レーザー研、阪大接合研、ALPROT・山村健、吉田英次、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発(2)	第 73 回応用物理学会学術講演会、松山	2012/9/11-14
15	阪大レーザー研、浜松ホトニクス、ALPROT・伊山功一、Ravi Bhushan、古河裕之、櫻井俊光、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明、川嶋利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザの開発	第 73 回応用物理学会学術講演会、松山	2012/9/11-14

16	阪大レーザー研、浜松ホトニクス、ALPROT・Ravi Bhushan、伊山功一、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明	コンパクト高出力固体レーザーパルス増幅器の開発	第 73 回応用物理学会学術講演会、松山	2012/9/11-14
17	レーザー総研・本越伸二	Laser-Induced Damage Thresholds for 355-nm AR Coatings on LBO Crystals	Laser Damage Symposium 2012, Boulder, CO, US, 10. Sep. 2012, 8530-49	2012/9/24
18	阪大レーザー研、片岡製作所、阪大接合研、ALPROT・吉田英次、山村健、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	Yb 添加大口径ホトニッククリスタルファイバーを用いた高ピーク、高平均出力 MOPA レーザーシステムの開発	レーザー研究 Vol. 40, No 10	2012/10/1
19	阪大接合研・中井一樹、成山達也、塚本雅裕、阿部信行	雰囲気制御下における短パルスレーザーCFRP切断加工	レーザー学会第 434 回研究会「次世代レーザー加工」、安城	2012/10/17
20	阪大レーザー研、浜松ホトニクス、片岡製作所、ALPROT・椿本孝治、吉田英次、山村健、伊山功一、Ravi Bhushan、藤田尚徳、宮永憲明	「次世代素材等加工用高平均出力固体レーザー装置の開発	レーザー学会第 434 回研究会「次世代レーザー加工」、安城	2012/10/17
21	阪大接合研・成山達也、中井一樹、塚本雅裕、升野振一郎、高橋謙次郎、中野人志、阿部信行	紫外線ナノ秒パルスレーザーによる炭素繊維強化プラスチックの高品質切断加工	スマートプロセス学会秋季総合学術講演会、大阪	2012/11/14
22	JWRI Daichi Tanigawa, Masahiro Tsukamoto, Togo Shinonaga, Shinnichiro Masuno, Kenjiro Takahashi, Akiko Nagai, Takao Hanawa, Kimihiro Yamashita, Nobuyuki Abe	Formation of periodic microstructures by nanosecond fiber laser irradiation on Ti-6Al-4V alloy for improving biofunction	The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation, OSAKA	2012/11/28
23	阪大レーザー研、片岡製作所、阪大接合研、ALPROT・吉田英次、山村健、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	大口径フォトリソグラフィ用ファイバー(PCF)レーザーの高出力動作	レーザー学会「ファイバーレーザー技術専門委員会」公開研究会、名古屋	2012/11/30
24	阪大接合研・成山達也、中井一樹、塚本雅裕、升野振一郎、高橋謙次郎、中野人志、阿部信行	ナノ秒レーザーによる炭素繊維強化プラスチック加工のレーザー波長依存性	第 78 回レーザー加工学会講演会(浜松)	2012/12/13-14
25	阪大接合研・伊藤 雄一郎、塚本 雅裕、篠永 東吾、升野 振一郎、松下 俊一、山下 仁大、永井 亜希子、塙 隆夫、阿部 信行	高度生体材料創製のためのパルスレーザーを用いたチタン材の表面構造形成	レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、姫路	2013/1/28-30
26	阪大接合研・中井 一樹、成山 達也、塚本 雅裕、宮川 和也、升野 振一郎、高橋 謙次郎、阿部 信行	炭素繊維強化プラスチックへのナノ秒レーザー照射 I - 熱的影響領域の雰囲気依存性-	レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、姫路	2013/1/28-30
27	阪大接合研・成山達也、中井一樹、塚本雅裕、宮川和也、升野振一郎、高橋謙次郎、中野人志、阿部信行	炭素繊維強化プラスチックへのナノ秒レーザー照射 II - レーザーの短波長化による熱的影響領域の低減-	レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、姫路	2013/1/28-30
28	阪大接合研・宮川和也、中井一樹、成山達也、塚本雅裕、高橋謙次郎、升野振一郎、中野人志、阿部信行	高繰り返しナノ秒レーザーによる炭素繊維強化プラスチックの切断加工	レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、姫路	2013/1/28-30
29	阪大レーザー研、浜松ホトニクス、レーザー総研、ALPROT/伊山功一、Ravi Bhushan、古河裕之、櫻井俊光、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明、川嶋利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミックスシンディスクレーザーの増幅特性	レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、姫路	2013/1/28-30
30	阪大レーザー研、片岡製作所、阪大接合研、ALPROT・吉田英次、山村健、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	パルス動作大口径 Yb ファイバーレーザーの高出力化	レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、姫路	2013/1/28-30
31	Hamamatsu Photonics Co., Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ. ALPROT・K. Iyama, R. Bhushan, H. Furukawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, T. Kawashima	Development of kW class Nd:YAG composite ceramic thin disc laser	Photonics West 2013, San Francisco, USA	2013/2/2-7

32	レーザー総研・ハイク・コスロービアン	kW 級コンポジットセラミクス薄ディスクレーザー開発におけるビーム特性に関する研究	第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木	2013/ 3/27- 30
33	阪大レーザー研、浜松ホトニクス、片岡製作所、レーザー総研、ALPROT・伊山功一、Ravi Bhushan、古河裕之、Haik Chosrowjan、櫻井俊光、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明、川嶋利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザーの開発(2)	第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木	2013/ 3/27- 30
34	片岡製作所、阪大レーザー研、阪大接合研、ALPROT・山村 健、吉田英次、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発(3)	第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木	2013/ 3/27- 30
35	阪大レーザー研・衣笠卓一、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明	位相差制御によるコヒーレントビーム結合技術の開発	第 60 回応用物理学会春季学術講演会、厚木	2013/ 3/27- 30

## 平成 25 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	JWRI, Osaka Univ.・M.Tsukamoto, K. Nakai, T.Nariyama,K.Takahashi, S. Masuno, H. Nakano, and N. Abe	Cutting of CFRP plate with nanosecond laser in air and vacuum	LPCC2013, Yokohama, Japan	2013/ 4/23- 26
2	Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ. ・H. Fujita, K. Iyama, R. Bhushan, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, M. Fujita, N. Miyanagaa, and T. Kawashima	Development of a kW class Nd:YAG ceramic thin disc laser for advanced laser machining	Advance Lasers and Photon Source 2013, Yokohama, Japan	2013/ 4/23- 25
3	阪大接合研・升野振一郎、宮川和也、中井一樹、成山達也、高橋謙次郎、佐藤雄二、塚本雅裕	炭素繊維強化プラスチックの切断加工における熱的影響領域—雰囲気及び波長依存性の評価—	レーザ加工学会第 79 回、大阪	2013/ 5/7-8
4	Kataoka Co., Inst. of Laser Eng., Osaka Univ., ALPROT・T. Yamamura, H. Yoshida, K. Tsukamoto, H. Fujita, N. Miyanaga, M. Ishikawa, T. Sakagawa, M. Tsukamoto	High-average-power nanosecond pulsed Yb-doped PCF fiber laser systems	CLEO/Europe-IQEC Conference, Munich, Germany	2013/ 5/12- 16
5	Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ., Kataoka co., JWRI Osaka Univ. ・ALPROT・H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, M. Ishikawa, T. Sakagawa, M. Tsukamoto	High Repetition Rate, High Average Power Nanosecond Laser Using Two Yb-doped PCF Rod Fibers	CLEO-PR&OECC/PS 2013, Kyoto, Japan	2013/ 6/30- 7/4
6	Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ.,Hamamatsu Photonics co.,ALPROT・Y. Tamaoki, Y. Kato, K. Iyama, T. Kawashima,and N. Miyanaga	174W At 1kHz, 532nm SHG From LBO Crystals Using High Average Power Nd:YAG Laser	CLEO-PR&OECC/PS 2013, Kyoto, Japan	2013/ 6/30- 7/4
7	JWRI, Osaka Univ.・T.Nariyama, K.Nakai, M.Tsukamoto,K.Miyagawa, S.Masuno, K.Takahashi, H.Nakano, N.Abe	Ultraviolet nanosecond laser cutting of carbon fiber reinforced plastic for reduction of heat affected zone	LAMP2013, Niigata,Japan	2013/ 7/23- 25
8	JWRI, Osaka Univ.・Kazuki NAKAI, Tatsuya Nariyama, Masahiro Tsukamoto, Kazuya Miyagawa, Kenjiro Takahashi, Shinichiro Masuno, Nobuyuki Abe	Reduction of produced heat affected zone of CFRP by controlling atmospheric	LAMP2013, Niigata,Japan	2013/ 7/23- 25
9	Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ., Kataoka co. ・ALPROT H. Yoshida , K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, T. Sakagawa	High-average-power nanosecond pulse laser in rod fibers and SBS beam combination by optical fiber	8th Workshop on SBS and nonlinear optics, Daejeon, Korea	2013/ 8/20- 21

10	Inst. Of Laser Eng. , Osaka Univ., Kataoka co., JWRI Osaka Univ. ・ ALPROT・H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, T. Sakagawa, M. Tsukamoto	High-average-power nanosecond pulse laser system based on two Yb-doped rod-type PCF fiber amplifiers	IFSA 2013, Nara, Japan	2013/ 9/8-1 3
11	片岡製作所、阪大レーザー研、阪大接合研、ALPROT・山村 健、吉田英次、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発(4)	第 74 回応用物理学会学術講演会、京田辺	2013/ 9/16- 20
12	レーザー総研、浜松ホトニクス、阪大レーザー研、ALPROT・古河裕之、伊山功一、藤田尚徳、宮永憲明	LD 励起高平均出力固体レーザーの熱効果解析	第 74 回応用物理学会学術講演会、京田辺	2013/ 9/16- 20
13	浜松ホトニクス、レーザー総研、ALPROT・伊山功一、Ravi Bhushan、古河裕之、Haik Chosrowjan、櫻井俊光、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明、川嶋利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザーの開発(3)	第 74 回応用物理学会学術講演会、京田辺	2013/ 9/16- 20
14	JWRI. Osaka Univ.・K.Nakai, M.Tsukamoto, T.Nariyama, K.Takahashi, S.Masuno, N.Abe	Dependence of Atmosphere on Heat Affected Zone of CFRP Formed by Nanosecond Laser Irradiation	COLA2013, Ischia, Italy	2013/ 10/6- 11
15	JWRI. Osaka Univ.・Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto, Kazuki Nakai, Tatsuya Nariyama, Kenjiro Takahashi, Shin-Ichiro Masuno	Experimental Investigation of Cfrp Ablation with UV and N-IR Nanosecond Lasers	ICALEO2013, Miami,USA	2013/ 10/6- 10
16	JWRI. Osaka Univ.・Shin-Ichiro Masuno, Kazuya Miyagawa, Kazuki Nakai, Kenjiro Takahashi Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto, Tatsuya Nariyama "	The Dependence of Cutting Carbon Fiber Reinforced Plastics with the Laser on the Laser Wavelength and Oxygen Concentration of the Air	ICALEO2013, Miami,USA	2013/ 10/6- 10
17	JWRI. Osaka Univ.・Tatsuya Nariyama, Fumihito Matsuoka, Hitoshi Nakano, Kazuki Nakai, Masahiro Tsukamoto, Yuji Sato, Shinichiro Masuno, Kenjiro Takahashi	Observation of Cross-Section Surface After Cutting of Cfrp with UV Laser	ICALEO2013, Miami,USA	2013/ 10/6- 10
18	阪大レーザー研、片岡製作所、阪大接合研、ALPROT・吉田英次、山村健、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、酒川友一、塚本雅裕	大口径ロッド型 PCF レーザーの高出力動作	レーザー学会第2回ファイバー委員会研究会、名古屋	2013/ 11/22
19	阪大接合研・成山達也、塚本雅裕、中井一樹、松岡史浩、佐藤雄二、高橋謙次郎、升野振一郎、中野人志	UV レーザによる CFRP のアブレーション加工	レーザ加工学会第 80 回、東京	2013/ 12/4- 5
20	阪大レーザー研、片岡製作所、阪大接合研、ALPROT・吉田英次、山村健、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、酒川友一、塚本雅裕	大口径ファイバーによる高ピーク、高平均出力レーザーの開発	レーザー学会第 454 回研究会、岡山	2013/ 12/9
21	阪大接合研・佐藤雄二、塚本雅裕、大久保友雅、高橋謙次郎、升野振一郎	ナノ秒レーザーを用いた炭素繊維強化プラスチック CFRP のアブレーション	スマートプロセス学会誌, Vol.3, No.1, pp54-pp59	2014/ 1/20
22	阪大レーザー研・吉田英次、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明	大口径 Yb 添加ロッド型 PCF を用いた波長可変 Q スイッチ発振器の開発	レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会、北九州	2014/ 1/20- 22
23	浜松ホトニクス、阪大レーザー研、レーザー総研、ALPROT・伊山功一、古河裕之、Haik Chosrowjan、櫻井俊光、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明、川嶋利幸	「次世代素材等加工用高平均出力固体レーザー装置の開発	レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会、北九州	2014/ 1/20- 22

24	阪大接合研・中井 一樹, 塚本 雅裕, 成山 達也, 松岡 史浩, 佐藤 雄二, 高橋 謙次郎, 升野 振一郎	CFRP の高品質加工のためのナノ秒レーザー照射Ⅲ-熱的影響領域に対するアルゴンガスの効果-	レーザー学会学術講演会 第34 回年次大会,北九州	2014/1/20-22
25	阪大接合研・成山 達也, 塚本 雅裕, 中井 一樹, 松岡 史浩, 佐藤 雄二, 高橋 謙次郎, 升野 振一郎, 中野 人志	CFRP の高品質加工のためのナノ秒レーザー照射Ⅱ-熱的影響領域のレーザー波長依存性-	レーザー学会学術講演会 第34 回年次大会,北九州	2014/1/20-22
26	阪大接合研・松岡 史浩, 塚本 雅裕, 中井 一樹, 成山 達也, 佐藤 雄二, 高橋 謙次郎, 升野 振一郎, 中野 人志	CFRP の高品質加工のためのナノ秒レーザー照射Ⅰ-加工レートに対するレーザー強度依存性-	レーザー学会学術講演会 第34 回年次大会,北九州	2014/1/20-22
27	阪大接合研・佐藤 雄二, 塚本 雅裕	ファイバーレーザーを用いた粉末 Ti 合金の積層造形技術の開発	レーザー学会学術講演会 第34 回年次大会,北九州	2014/1/20-22
28	Hamamatsu Photonics Co. Inst. of Laser Eng., Osaka Univ, Inst. for Laser Tech. ALPROT・K. Iyama, H. Furukawa, H. Chosrowjan, T. Sakurai, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, T. Kawashima	400W Nd:YAG composite ceramic thin-disc laser in 10ns pulse at 167kHz	Photonics West 2014, San Francisco, USA	2014/2/1-6
29	Hamamatsu Photonics Co. Inst. of Laser Tech., Osaka Univ. ALPROT・Y. Tamaoki, Y. Kato, K. Iyama, T. Kawashima, N. Miyanaga	Long-term operation of 180W At 1kHz, 532nm SHG From LBO Crystals Using High Average Power Nd:YAG Laser	Photonics West 2014, San Francisco, USA	2014/2/1-6
30	JWRI, Osaka Univ., ・Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto, Kazuki Nakai, Tatsuya Nariyama, Shin-Ichiro Masuno, Tomomasa Ohkubo, Hitoshi Nakano	Analysis on laser ablation of CFRP in order to reduce heat affected zone	SPIE PhotonicsWest2014, San Francisco, CA, USA	2014/2/1-6
31	阪大レーザー研・吉田英次	PCFを用いたファイバーレーザー増幅器の研究開発状況	平成 25 年度多元技術融合光プロセス研究会、東京	2014/2/20
32	片岡製作所、阪大レーザー研、阪大接合研、ALPROT・山村 健, 吉田英次, 石川正博, 椿本孝治, 藤田尚徳, 宮永憲明, 塚本雅裕, 酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発(5)	第 61 回応用物理学会春季学術講演会、相模原	2014/3/17-20
33	レーザー総研、阪大レーザー研・ハイク コスロービアン, 谷口誠治, 藤田雅之, 椿本幸治, 吉田英次, 宮永憲明, 井澤靖和	単一検出器と SPGD アルゴリズムを用いた重ねアパーチャコヒーレントビーム結合技術	第 61 回応用物理学会春季学術講演会、相模原	2014/3/17-20

## 平成 26 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	Inst. of Laser Eng. Osaka Univ.・K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, N. Miyanaga	335W, 15kHz, 4.8ns Green Laser from Harmonic Converted Nd:YAG MOPA	The 3rd Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS' 14)、Yokohama, Japan	2014/4/18-23
2	Institute for Laser Technology, Institute of Laser Engineering, ALPROT, Haik Chosrowjan, Seiji Taniguchi, Masayuki Fujita, Kouji Tsubakimoto, Hidetsugu Yoshida, Noriaki Miyanaga, and Yasukazu Izawa,	Filled-aperture, Single detector Coherent Beam Combining Technique Using Simple Algorithms	OPIC/ALPS2014, 横浜, 2014 年 4 月 22-24 日、ALPS-p03	2014/4/22
3	JWRI, Osaka Univ. ・Yuji SATO, Masahiro TSUKAMOTO, Fumihiro MATSUOKA, Kenjiro TAKAHASHI, Shinichiro MASUNO and Tomomasa OHKUBO	Experimental study on CFRP cutting with nanosecond laser in air and Ar gas ambience	Smart Laser Processing Conference 2014(SLPC2014)	2014/4/22

4	JWRI, Osaka Univ. Inst. of Laser Eng., Kataoka Co. Furukawa electric co. ALPROT・Kenjiro TAKAHASHI, Masahiro TSUKAMOTO, Shinichiro MASUNO, Yuji SATO, Masafumi MATSUSHITA, Koichi FURUKAWA, Hidetsugu YOSHIDA, Koji TSUBAKIMOTO, Hisanori FUJITA, Noriaki MIYANAGA, Takeshi YAMAMURA, Masahiro ISHIKAWA, Akira FUJISAKI, Shunichi MATSUSHITA	Influence of Laser Scanning Condition for CFRP Processing with Pulsed Fiber Laser	Smart Laser Processing Conference 2014(SLPC2014)	2014/4/22
5	JWRI. Osaka Univ.・Fumihiro MATSUOKA, Masahiro TSUKAMOTO, Kenjiro TAKAHASHI, Shinichiro MASUNO	Material processing of CFRP with laser under control of atmosphere -Evaluation of laser ablation -	第 81 回レーザー加工学会講演会	2014/5/27
6	JWRI. Osaka Univ.・Yuji SATO, Masahiro TSUKAMOTO, Fumihiro MATSUOKA, Kenjiro TAKAHASHI, Shinichiro MASUNO, Tomomasa OHKUBO and Hitoshi NAKANO	Effect of oxygen concentration on CFRP cutting with nanosecond laser	The 15th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM 2014)	2014/6/17
7	Institute for Laser Technology, ALPROT、Institute of Laser Engineering, Osaka University G. Khosrovian, S. Taniguchi, M. Fujita, Y. Izawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga	Filled-aperture Coherent Summation Technique for Multiple High Average Power Laser Beams	16th International Conference “Laser Optics 2014”, St. Petersburg, June 30 – July 4, 2014	2014/6/30
8	阪大レーザー研 H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga	Single transverse mode and high-average-power operation used in tapered double cladding Yb-doped multimode fiber.	TuP-T1-P-15 6th Europhoton 2014(24-29 August 2014)	2014/8/24-29
9	阪大レーザー研 椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明	高平均出力 Nd:YAG パルスレーザーによる 3 倍高調波発生	第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会(北海道大学)	2014/9/17-20
10	阪大レーザー研 衣笠卓一、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明、岩見洋輔	位相差制御によるコヒーレントビーム結合技術の開発 3	第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会(北海道大学)	2014/9/17-20
11	阪大レーザー研 岩見洋輔、衣笠卓一、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、宮永憲明	コヒーレントビーム結合のための制御アルゴリズムの開発	第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会(北海道大学)	2014/9/17-20
12	阪大レーザー研 青野裕次、吉田英次、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明	高ピーク出力 Er ファイバーCPA 増幅システムの開発	第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会(北海道大学)	2014/9/17-20
13	阪大レーザー研、ALPROT、阪大接合研、片岡製作所、レーザー総研 吉田英次、山村健、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一、コスロービアン ハイク、谷口誠治、藤田雅之、井澤靖和	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発(6)	第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会(北海道大学)	2014/9/17-20
14	JWRI. Osaka Univ.・Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto, Fumihiro Matsuoka, Kenjiro Takahashi and Shinichiro Masuno	Nanosecond laser induced carbon fiber reinforced plastic processing under Ar gas ambience for suppression HAZ	第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会	2014/9/17

15	JWRI. Osaka Univ.*Inst. of Laser Eng. Osaka Univ., Inst. for Laser Tech. ALPROT*Kenjiro Takahashi,Masahiro Tsukamoto,Shin-ichiro Masuno,Yuji Sato,Hidetsugu Yoshida,Koji Tsubakimoto,Hisanori Fujita,Noriaki Miyanaga,Masayuki Fujita,Hitoshi Ogata	Effective Scanning Condition of Laser CFRP Processing with High Power Pulsed Fiber Laser	第 75 回応用物理学会秋季学術講演会	2014/9/17
16	JWRI. Osaka Univ.*Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto, Fumihiro Matsuoka, Kenjiro Takahashi, Shinichiro Masuno	Nanosecond Laser Processing of CFRP in Ar Gas Ambience for HAZ Reduction	Proc. 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics(ICALEO 2014)	2014/10/19
17	レーザー総研, ALPROT, レーザー研 ハイク コスロービアン, 谷口誠治, 藤田雅之, 樺本幸治, 吉田英次, 宮永憲明, 井澤靖和	高出力コヒーレントビーム結合新技術	レーザー学会、ファイバー委員会第3回公開研究会、名古屋大学	2014/11/28
18	阪大レーザー研, ALPROT, 阪大接合研, 片岡製作所, レーザー総研 吉田英次, 山村健, 樺本幸治, 藤田尚徳, 宮永憲明, 塚本雅裕, 酒川友一, コスロービアン ハイク, 谷口誠治, 藤田雅之, 井澤靖和	短パルス,高平均出力 1.5kW ファイバーレーザーシステムの開発	第 35 回レーザー学会学術講演会年次大会	2015/1/11
19	阪大レーザー研 樺本幸治, 衣笠卓一, 岩見洋輔, 吉田英次, 藤田尚徳, 宮永憲明	高平均出力レーザーのためのコヒーレントビーム結合技術の開発	第 35 回レーザー学会学術講演会年次大会	2015/1/11
20	JWRI. Osaka Univ.*Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto,Fumihiro Matsuoka, Kensuke Yamashita Kenjiro Takahashi, Shinichiro Masuno	Experimental study on CFRP processing with ns laser for suppression of HAZ (Ⅱ)	第 35 回レーザー学会学術講演会年次大会	2015/1/11
21	阪大接合研・山下 顕資、塚本 雅裕、佐藤 雄二、高橋謙 次郎、升野 振一郎、松岡 史浩	雰囲気制御した CFRP のナノ秒レーザー加工と HAZ の評価(Ⅰ)	第 35 回レーザー学会学術講演会年次大会	2015/1/11
22	JWRI. Osaka Univ.*Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto, Fumihiro Matsuoka, Kenjiro Takahashi Shinichiro Masuno	Experimental investigation of CFRP cutting with nanosecond laser under Air and Ar gas ambience	Photonics West 2015,SPIE	2015/2/7
23	阪大レーザー研, ALPROT, 阪大接合研, 片岡製作所, レーザー総研 H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N.Miyanaga,T. Yamamura, T. Sakagawa,M.Tsukamoto, H. Chosrowjan, T. Kitamura,M. Fujita, Y. Izawa	Nanosecond Pulsed 1.5 kW Average-Output-Power Fiber Laser System Based on Yb-doped Rod PCFs for Filled-aperture Coherent and Spectral Combinations	ALPS15-3, The 4th Advanced Lasers and Photon Sources Conference(ALPS' 15)	2015/4/22-24
24	阪大レーザー研 K. Tsubakimoto, T. Kinugasa, Y. Iwami, H. Yoshida, H. Fujita, N. Miyanaga	Development of feedback algorithm for filled aperture coherent beam combining technique with phase control	ALPS15-3, The 4th Advanced Lasers and Photon Sources Conference(ALPS' 15)	2015/4/22-24

## ◆技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所 「CFRP 切断加工技術の開発」「粉末成形技術の開発」

平成 22 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
----	--------	----	----------	--------



1	産総研 新納弘之	グリーンイノベーションを実現する レーザープロセッシング技術	第 58 回応用物理学関係連合 講演会シンポジウム	2011/ 3/24
---	-------------	-----------------------------------	------------------------------	---------------

## 平成 23 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	ALPROT 尾形仁士	次世代レーザー加工プロジェクト	レーザー EXPO 光科学フォーラムサミット(横浜、神奈川)	2011/ 4/21
2	ALPROT 神谷保	ALPROT の多波長複合レーザー加工技術開発への取り組み	レーザー EXPO シンポジウム(横浜、神奈川)	2011/ 4/22
3	ALPROT 松本 修	レーザーによる新産業創成-次世代レーザー加工技術プロジェクト	レーザー学会総会(ホテル阪急エキスポパーク、大阪)	2011/ 5/25
4	ALPROT 神谷保	1.5 kWパルスレーザーの概要(国プロレーザー開発の概要)	中部レーザー応用技術研究会第 80 回研究会(特別講演会)名古屋大学 VBL3 階 ベンチャーホール	2011/ 5/25
5	産総研,筑波大学 Y.Harada, T.Suzuki, T.Teramoto	Evaluation of Cutting Process on the Tensile and Fatigue strength of CFRP Composites	THERMEC' 2011, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, (Quebec, Canada), COMP-1-5	2011/ 8/1
6	浜松ホトニクス、ALPROT、レーザー研、レーザー総研 伊山 功一、Ravi Bhushan、古河裕之、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明	パルスレーザー増幅技術の開発(2)	第 72 回応用物理学学会学術講演会(山形大学、山形)、30p-J-8	2011/ 8/30
7	ALPROT、産総研、ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学 新納弘之、川口喜三、佐藤正健、奈良崎愛子、黒崎諒三、原田祥久、中山伸一、加瀬純平、松下正文、古川航一、西野充晃	炭素繊維強化樹脂(CFRP)のレーザー精密加工	平成 23 年電気学会 電子・情報・システム部門大会(富山大学、富山)、OS11-5	2011/ 9/9
8	産総研 新納弘之	炭素繊維強化樹脂(CFRP)のレーザー精密加工	第 5 回複合材加工技術研究部会(栃木県産業技術センター、栃木)	2011/ 10/4
9	ALPROT、産総研、三菱化学、筑波大学 原田祥久、鈴木隆之、新納弘之、川井恭平、寺本徳郎、西野充晃	PAN 系炭素繊維強化プラスチックの引張破壊特性とレーザー加工の影響	日本金属学会 2011 年秋期(第 149 回)大会(沖縄コンベンションセンター、沖縄)No.35	2011/ 11/8
10	ALPROT、産総研、三菱化学、筑波大学 Y. Harada, K. Kawai, M. Nishino, H. Niino, T. Suzuki and T. Teramoto	Effect of Fiber Orientation on Tensile Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) using Laser Cutting Process	12th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE12)、(東京ファッションタウンビル、東京)、PMC-3.	2011/ 11/9
11	ALPROT、産総研、ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学 H. Niino, Y. Kawaguchi, T. Sato, A. Narazaki, R. Kurosaki, Y. Harada, S. Nakayama, J. Kase, M. Matsushita, K. Furukawa, and M. Nishino	Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)	11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON LASER ABLATION(COLA2011), (Cancún, México), No.314	2011/ 11/14 -17

12	ALPROT、産総研、三菱化学 原田祥久、鈴木隆之、新納弘之、西野充晃	レーザー加工後の CFRP 強度特性評価	レーザー加工学会第 76 回講演会、東京大学生産技術研究所	2011/12/5
13	ALPROT、産総研、筑波大学 原田祥久、伊藤泰亮、鈴木隆之、寺本徳郎	炭素繊維複合材料のレーザー加工と高温湿度環境耐久性評価技術	TX テクノロジー・ショーケース in つくば 2012(つくば国際会議場、茨城)、P-90	2012/1/13
14	ALPROT、産総研、アスペクト 中野禪、清水透、松崎邦男、堀場欣紀、佐々 雅祥、萩原 正	真空下におけるチタン粉末レーザー積層造形	第 2 回 AM シンポジウム 東京大学生産技術研究所 コンベンションホール	2012/1/25
15	ALPROT、産総研、三菱化学 西野充晃、原田祥久、鈴木隆之、新納弘之	Acoustic damage detection in laser-cut CFRP composite materials	PhotonicsWest2012 国際会議(米国サンフランシスコ、モスクオン会議場)8243-49	2012/1/24
16	ALPROT、産総研、ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学 新納弘之、川口喜三、佐藤正健、奈良崎愛子、黒崎諒三、原田祥久、中山伸一、加瀬純平、松下正文、古川航一、西野充晃	Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)	PhotonicsWest2012 国際会議(米国サンフランシスコ、モスクオン会議場) 8243-42	2012/1/24
17	ALPROT、産総研、三菱化学 原田祥久、鈴木隆之、新納弘之、西野充晃	CFRP のレーザー加工技術とその強度特性評価に関する研究	レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会、TKP 仙台カンファレンスセンター	2012/1/30
18	ALPROT、産総研、ミヤチテクノス、新日本工機、三菱化学 新納弘之、川口喜三、佐藤正健、奈良崎愛子、黒崎諒三、原田祥久、長嶋崇弘、加瀬純平、松下正文、古川航一、西野充晃	炭素繊維強化樹脂のレーザー精密加工	レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会、TKP 仙台カンファレンスセンター、D.30pII-7	2012/1/30
19	産総研 新納弘之	炭素繊維強化樹脂のレーザー精密加工	産総研・電子光技術研究部門 第 1 回電子光技術シンポジウム(産総研・臨海副都心センター別館)	2012/2/22
20	ALPROT 神谷保	ALPROT の多波長複合レーザー加工技術開発	産総研・電子光技術研究部門 第 1 回電子光技術シンポジウム(産総研・臨海副都心センター別館)	2012/2/22
21	片岡製作所、レーザー研、接合研、レーザー総研 山村健、吉田英次、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発	第 59 回応用物理学学会学術講演会(早稲田大学)	2012/3/15-18
22	浜松ホトニクス、ALPROT、レーザー研、レーザー総研 伊山功一、Ravi Bhushan、古河裕之、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明	パルスレーザー増幅技術の開発(3)	第 59 回応用物理学関係連合講演会(早稲田大学早稲田中・高等学校 興風館) 15p-GP6-8	2012/3/15

## 平成 24 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	産総研、ALPROT Y. Harada, T. Suzuki, M. Nishino, H. Niino	Investigation on the Tensile Strength of CFRP/CFRTP Manufacturing using High-Power Lasers	International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials(パシフィコ横浜、神奈川)	2012/4/27

2	ALPROT、産総研 新納弘之	レーザー加工技術の発展とイノベーションネットワークの構築	光エレクトロニクス第 130 委員会 第 282 回研究会 (森戸記念館、飯田橋)	2012/ 5/16
3	ALPROT、産総研、アспект 清水透、中野禪、松崎邦男、堀場 欣 紀、佐々 雅祥、萩原 正	チタン製品のレーザー積層造形 (SLM)と造形雰囲気製品に与える影響	粉体粉末冶金協会平成 24 年度春季大会(京都工芸繊維大学)	2012/ 5/23
4	ALPROT、産総研、アспект 清水透、中野禪、松崎邦男、堀場欣 紀、佐々雅祥、萩原 正	レーザー応用粉末積層造形法による金属成形装置の開発	平成 24 年度塑性加工春季講演会(コマツウエイ総合研修センター/石川県こまつ芸術劇場うらら)	2012/ 6/7
5	ALPROT 松本 修	High-power Pulsed Fiber Laser and Processing Technology Project	13th International Symposium on Laser Precision Microfabrication June 12-15, 2012, The Catholic University of America, Washington, DC	2012/ 6/12
6	ALPROT、産総研、三菱化学、筑波大学 Y. Harada, T. Ito, T. Suzuki, M. Nishino, H. Niino, T. Teramoto	Environmental Effects of Mechanical Behavior of CFRP using Laser Cutting Process	15th European Conference on Composite Materials (ECCM15), (Venice, Italy)	2012/ 6/27
7	筑波大、産総研、ALPROT、三菱化学 川井恭平、原田祥久、鈴木隆之、寺本徳郎、西野充晃、新納弘之	高出力レーザー加工を用いた炭素繊維強化複合材料の劣化・損傷機構	日本保全学会・第9回学術講演会、(一橋大学一橋講堂、東京)、E3-4	2012/ 7/27
8	レーザー研、ALPROT、浜松ホトニクス、レーザー総研 伊山 功一、Ravi Bhushan、古河 裕之、椿本 孝治、吉田 英次、藤田 尚徳、藤田 雅之、宮永 憲明、玉置 善紀、加藤 義則、川嶋 利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザーの開発	レーザー学会第 427 回研究会、(ホテル阪急エキスポパーク、大阪)、発表番号 7	2012/ 7/13
9	レーザー研、ALPROT、接合研、片岡製作所 山村健、吉田英次、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発(2)	第 73 回応用物理学会学術講演会(2012 秋 愛媛大学、松山大学)	2012/ 9/11- 14
10	レーザー研、ALPROT、浜松ホトニクス、レーザー総研 伊山 功一、Ravi Bhushan、古河 裕之、櫻井 俊光、椿本 孝治、吉田 英次、藤田 尚徳、藤田 雅之、宮永 憲明、川嶋 利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザーの開発(1)	第 73 回応用物理学会学術講演会(2013 秋 愛媛大学、松山大学)	2012/ 9/11- 14
11	産総研 ALPROT 筑波大学 三菱化学 原田祥久、鈴木隆之、新納弘之、川井恭平、伊藤泰亮、寺本徳郎、西野充晃	高出力レーザー加工を用いた炭素繊維強化プラスチックの疲労特性	日本金属学会 2012 年秋期大会、愛媛	2012 年 9 月 19 日、 221
12	Institute for Laser Technology (ILT), ALPROT, Institute of Laser Engineering S.Motokoshi, K.Tsubakimoto, N.Miyanaga, M.Fujita	Laser-Induced Damage Thresholds for 355-nm AR Coatings on LBO Crystals	Laser Damage Symposium 2012 国際会議 発表番号: 8530-49	2012/ 9/10
13	ALPROT、産総研 新納弘之	The Japanese Way of Knowledge Transfer	ICALEO2012 国際会議(アナハイム、米国・加州) 発表番号: C105	2012/ 9/27
14	ALPROT、産総研、アспект 清水透、中野禪、松崎邦男、堀場 欣 紀、佐々 雅祥、萩原 正	Selective Laser Melting of Titanium Alloy Parts and Forming Atmosphere Effect for the Products	Powder Metallurgy World Congress & Exhibition 2012 (Yokohama, Japan)	2012/ 10/17

15	古河電工,阪大接合研, ALPROT 松下俊一, 宮戸泰三, 橋本博, 塚本雅裕, 藤崎晃	ファイバ型パルスレーザーの開発	レーザー学会 ファイバーレーザー技術専門委員会 第1回研究会 名古屋大学	2012/ 11/30
16	産総研 ALPROT 原田祥久, 鈴木隆之, 村松真由	レーザー加工 CFRP の損傷評価技術「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」	平成24年産総研本格研究ワークショップ in 中部、メルパルク NAGOYA	2012/ 12/10
17	ALPROT 松本 修, 尾形仁士	次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト	月刊オプトロニクス 2013年1月号特集	2013/ 1/
18	ALPROT 神谷保, 尾形仁士	次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト	レーザー学会学術講演会第33回年次大会 姫路商工会議所シンポジウム「次世代産業用レーザー加工技術開発」	2013/ 1/28
19	阪大レーザー研, ALPROT , 浜松ホトニクス, レーザー総研 伊山功一, Ravi Bhushan, 古河裕之, 櫻井俊光, 椿本孝治, 吉田英次, 藤田尚徳, 藤田雅之, 宮永憲明, 川嶋利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザーの増幅特性	レーザー学会学術講演会第33回年次大会 B.レーザー装置2 - B.高出力レーザー - 28pIX -4	2013/ 1/28
20	ALPROT, 産総研, 新日本工機, 三菱化学, ミヤチテクノス 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 原田祥久, 長嶋崇弘, 加瀬純平, 松下正文, 古川航一, 西野充晃	炭素繊維強化樹脂のレーザー精密加工	レーザー学会学術講演会第31回年次大会(姫路市、姫路商工会議所) 発表受付番号:D.28pII-7	2013/ 1/28
21	Institute of Laser Engineering, ALPROT, Hamamatsu Photonics K.K., Institute for Laser Technology(ILT), K. Iyama, R. Bhushan, H. Furukawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, T.Kawashima	Development of kW class Nd:YAG composite ceramic thin disc laser	Photonics West 2013 LASE 発表番号:8599-82	2013/ 2/5
22	ALPROT, ミヤチテクノス, 新日本工機, 三菱化学 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 原田祥久, 長嶋崇弘, 加瀬純平, 松下正文, 古川航一, 西野充晃	Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)	2013 Photonics West 国際会議(セッション:Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVIII)発表番号:8607-38	2013/ 2/7
23	レーザー研, ALPROT , 接合研, 片岡製作所 山村健, 吉田英次, 石川正博, 椿本孝治, 藤田尚徳, 宮永憲明, 塚本雅裕, 酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発(3)	第60回応用物理学会学術講演会(2013 春 神奈川工科大学) 発表番号:30a-C1-8	2013/ 3/30
24	阪大レーザー研, ALPROT , 浜松ホトニクス, レーザー総研 伊山功一, Ravi Bhushan, 古河裕之, Haik Chosrowjan, 櫻井俊光, 椿本孝治, 吉田英次, 藤田尚徳, 藤田雅之, 宮永憲明, 川嶋利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザーの開発(2)	第60回応用物理学会春季学術講演会(神奈川工科大学) 発表番号:29p-C1-19	2013/ 3/29

25	レーザー総研, ALPROT, 阪大レーザー研, 浜松ホトニクス Haik Chosrowjan, 櫻井俊光, 古瀬裕章, 伊山功一, Ravi Bhushan, 古河裕之, 椿本幸治, 吉田英次, 藤田尚徳, 宮永憲明, 川嶋利幸, 本越伸二, 藤田雅之, 井澤靖和	kW 級コンポジットセラミクス薄ディスクレーザー開発におけるビーム特性に関する研究	第 60 回応用物理学会春季学術講演会(神奈川工科大学) 発表番号:28p-PA4 -5	2013/ 3/28
----	---	---	---	---------------

## 平成 25 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	アспект、産総研、ALPROT 萩原正、佐々雅弘、堀場欣紀、中野禪、清水透	ファイバーレーザーを用いた金属粉末成形技術の開発	溶接学会平成 25 年度春季全国大会シンポジウム基調講演(学術総合センター)	2013/ 4/17
2	ALPROT, 産総研, ミヤチテクノス, 新日本工機, 三菱化学 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 村松眞由, 原田祥久, 若林浩次, 長嶋崇弘, 加瀬純平, 松下正文, 古川航一, 西野充晃	ファイバーレーザー等を用いた炭素繊維強化樹脂の加工	溶接学会平成 25 年度春季全国大会(シンポジウム:「アドホック研究会発, 国プロで世界に先駆けるレーザー加工技術への挑戦」) 発表番号:8607-38	2013/ 4/17
3	古河電工 藤崎晃、茅原崇	kW ファイバーレーザーと加工応用事例	溶接学会平成 25 年度春季全国大会(シンポジウム:「アドホック研究会発, 国プロで世界に先駆けるレーザー加工技術への挑戦」)	2013/ 4/17
4	古河電工、産総研 藤崎晃、宮戸泰三、茅原崇、新納弘之	Single mode fiber laser of its quasi CW operation for cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	2013/ 4/
5	ALPROT, Miyachi Corporation, Furukawa Electric Co., AIST Koji Wakabayashi, Takahiro Nagashima, Kenji Anzai Akira Fujisaki, Taizo Miyato, Takashi Kayahara, Yoshihisa Harada, and Hiroyuki Niino	DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED, SWEEP TYPE REMOTE PROCESSING HEAD	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	2013/ 4/
6	ALPROT, Shin Nippon Koki Co. Ltd., AIST, Miyachi Corporation Koichi Furukawa, Masafumi Matsushita, Yoshihisa Harada, Takahiro ,Nagasima, Hiroyuki Niino	DEVELOPMENT OF LASER PROCESSING HEAD FOR CFRP CUTTING	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	2013/ 4/
7	ALPROT 三菱化学 AIST ミヤチテクノス 新日本工機 Michiteru NISHINO, Yoshihasa HARADA, Hiroyuki NIINO, Takahiro NAGASHIMA, Kouichi FURUKAWA, Masafumi MATSUSHITA	Laser Machining of PAN/PITCH-based Carbon Fiber Reinforced Composite Materials	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	2013/ 4/
8	ALPROT, AIST M. Muramatsu, Y. Harada, T. Suzuki, Hiroyuki Niino	Evaluation of Defect in CFRP Using Infrared Thermography and Its Heat Conduction Simulation	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	2013/ 4/

9	AIST,ALPROT 奈良崎愛子, 佐藤正健, 川口喜三, 黒崎諒三, 新納弘之	Laser-ionization Time-of-Flight mass spectrometric studies on laser ablation of carbon fiber reinforced plastics	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	2013/ 4/
10	AIST,ALPROT 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 新納弘之	Laser ablation plume from graphite and CFRP under irradiation of nanosecond UV laser pulses in the air	The 2nd International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials (LPCC2013), Yokohama	2013/ 4/
11	HAMAMATSU PHOTONICS K.K.,ALPROT, Institute of Laser Engineering Yoshinori Tamaoki, Yoshinori Kato, Kohichi Iyama, Toshiyuki Kawashima,and Noriaki Miyanaga	174W At 1kHz, 532nm SHG From LBO Crystals Using High Average Power Nd:YAG Laser	CLEO-PR 2013 - the 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Kyoto International Conference Center Kyoto, Japan WA2-4	2013/ 7/3
12	産総研,ALPROT, ミヤチテクノス, 新日本工機, 三菱化学 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 村松真由, 原田祥久, 若林浩次, 長嶋崇弘, 加瀬純平, 松下正文, 古川航一, 西野充晃	Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) by Fiber Laser Irradiation	CLEO-PR & OECC/PS 2013 conference 国際会議(セッション: C5.Laser Processing)、発表番号: ThE3-5	2013/ 7/4
13	産総研,ALPROT, ミヤチテクノス, 新日本工機, 三菱化学 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 村松真由, 原田祥久, 若林浩次, 長嶋崇弘, 加瀬純平, 松下正文, 古川航一, 西野充晃	Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) by IR and UV Lasers Irradiation	The 6th International Congress on Laser Advanced Materials Processing(LAMP2013)国際会議(セッション: 43.HPL10_Cutting and Drilling)発表番号: Fr4-OH-6	2013/ 7/26
14	ALPROT、産総研 原田祥久	CFRP のレーザー加工技術とその強度特性評価に関する研究	光産業技術振興協会平成25年度多元技術融合光プロセス研究会、台場、	2013/ 8/26
15	AIST,ALPROT, アスペクト 萩原正、佐々雅祥、堀場欣紀、中野禪、清水透、佐藤直子、松崎邦男	AM/SLM 技術による金属積層造形の動向と開発状況	日本機械学会 2013 年度年次大会(岡山大学)	2013/ 9/11
16	レーザー総研、浜松ホトニクス、阪大レーザー研 古河裕之、伊山功一、藤田尚徳、宮永憲明	LD 励起高平均出力固体レーザーの熱効果解析	2013 年 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学京田辺キャンパス 2013 年 9 月 16 日 ~ 20 日	2013/ 9/16
17	AIST,ALPROT、筑波大、三菱化学 原田祥久、鈴木隆之、新納弘之、伊藤泰亮、仲間元、寺本徳郎、西野充晃	炭素繊維強化プラスチック(CFRP)と金属の接合強度評価	日本金属学会 2013 年秋期大会、金沢、379	2013/ 9/18
18	レーザー研, ALPROT, 接合研、片岡製作所 山村健、吉田英次、石川正博、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバーレーザーシステムの開発(4)	第 74 回応用物理学会学術講演会(2013 秋 同志社大学)、18p-P4-8	2013/ 9/18
19	阪大レーザー研, ALPROT, 浜松ホトニクス, レーザー総研 伊山功一, Ravi Bhushan, 古河裕之, Haik Chosrowjan, 櫻井俊光, 椿本孝治, 吉田英次, 藤田尚徳, 藤田雅之, 宮永憲明, 川嶋利幸	kW 級 Nd:YAG コンポジットセラミクスシンディスクレーザーの開発(3)	第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、同志社大学 京田辺キャンパス 19a-A14-7	2013/ 9/19

20	AIST,ALPROT, ミヤチテクノス, 新日本工機, 三菱化学 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 村松真由, 原田祥久, 安在建治, 若林浩次, 長嶋崇弘, 加瀬純平, 松下正文, 古川航一, 西野充晃	Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) by Fiber Laser Irradiation	The 12th International Conference on Laser Ablation (COLA 2013)国際会議(セッション:ポスター1、P1-73)	2013/ 10/7
21	産総研, アスペクト, ALPROT Shizuka Nakano, Masashi Hagiwara, Toru Shimizu, Yoshinori Horiba, Naoko Sato, Kunio Matsuzaki and Masahiro Sassa	Novel selective laser melting solution for metal additive manufacturing using vacuum and a quasi continuous wave laser	The 7 <sup>th</sup> International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21 <sup>st</sup> Century(LEM21), Sendai,	2013/ 11/8
22	ALPROT, 産総研 新納弘之	次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト～CFRP加工結果の紹介～	第13回先端材料技術展 (SAMPE JAPAN 2013)、日刊工業新聞社	2013/ 11/8
23	AIST,ALPROT, アスペクト 萩原 正、佐々雅祥、堀場欣紀、中野禪、清水透、佐藤直子、松崎邦男	高真空型金属粉末積層造形装置の開発	粉体粉末冶金協会平成25年度秋季大会講演(名古屋国際会議場)	2013/ 11/28
24	産総研 ALPROT Yoshihisa Harada, Mayu Muramatsu, Takayuki Suzuki, Michiteru Nishino, Hiroyuki Niino	Influence of Laser Process on Mechanical Behavior during Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites	International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials, Thermec2013, Las Vegas, 12/3/2013, P-126	2013/ 12/3
25	ALPROT 神谷保	「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」への取り組み	第80回レーザー加工学会 平成25年12月4-5日 東京大学 生産技術研究所 駒場リサーチキャンパス	2013/ 12/4
26	産総研, ALPROT 村松 真由, 原田 祥久, 鈴木 隆之, 新納 弘之	炭素繊維強化樹脂の熱損傷による延性-脆性破壊遷移	日本鉄鋼協会高温プロセス部 会若手フォーラム平成25年度 第1回勉強会, 秋田大学	2014/ 1/29
27	阪大レーザー研, ALPROT, 浜松ホトニクス, レーザー総研 伊山 功一, 古河裕之, Haik Chosrowjan, 櫻井俊光, 椿本孝治, 吉田英次, 藤田尚徳, 藤田雅之, 宮永憲明, 川嶋利幸	kW級Nd:YAGコンポジットセラミクスシンディスクレーザー増幅器の開発	レーザー学会学術講演会第34回年次大会 北九州国際会議場 発表番号:B.レーザー装置5-B.高出力レーザー 21pIV-5	2014/ 1/21
28	産総研, ALPROT, 筑波大 原田祥久、仲間元、鈴木隆之、寺本徳郎	CFRPのレーザー利用による高度加工技術とその耐久性	SATテクノロジー・ショーケース 2014、つくば、P-81	2014/ 1/24
29	ALPROT, Miyachi Corporation, Furukawa Electric, AIST Kenji Anzai, Mitsuki Aoyama, Akira Fujisaki, Taizo Miyato, Takashi Kayahara, Yoshihisa Harada, and Hiroyuki Niino	Laser Trepanning of CFRP with a Scanner Head for IR and UV Lasers	PhotonicsWest2014 LASE The Moscone Center, San Francisco, California, USA 発表番号:LA110-17	2014/ 2/4
30	Institute of Laser Engineering, Osaka University, ALPROT, Hamamatsu Photonics K.K., Institute for Laser Technology, K. Iyama, H. Furukawa, H.Chosrowjan, T.Sakurai, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, T.Kawashima	400W Nd:YAG composite ceramic thin-disc laser in 10ns pulse at 167kHz	PhotonicsWest2014 LASE The Moscone Center, San Francisco, California, USA 発表番号:8959-27	2014/ 2/3
31	ALPROT, AIST Furukawa Electric Co., Ltd., Shin Nippon Koki Co. Taizo Miyato, Takashi Kayahara, Akira Fujisaki, Koichi Furukawa, Masafumi Matsushita, Mayu Muramatsu, Yoshihisa Harada, Hiroyuki Niino	High power single-mode fiber laser and its application to metal and non-metal materials	PhotonicsWest2014 LASE The Moscone Center, San Francisco, California, USA 、LA117-10	2014/ 2/6

32	産総研, ALPROT, ミヤチテクノス, 新日本工機, 三菱化学, 古河電工 新納弘之, 川口喜三, 佐藤正健, 奈良崎愛子, 黒崎諒三, 原田祥久, 安在建治, 青山光明, 松下正文, 古川航一, 西野充晃, 藤崎晃, 宮戸泰三, 茅原孝	Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by single-mode fiber laser irradiation,	PhotonicsWest2014 LASE The Moscone Center, San Francisco, California, USA 、8967-18	2014/ 2/5
33	HAMAMATSU PHOTONICS K.K., ALPROT, Institute of Laser Engineering, Osaka University Yoshinori Tamaoki, Yoshinori Kato, Kohichi Iyama, Toshiyuki Kawashima, and Noriaki Miyanaga	180W At 1kHz, 532nm SHG From LBO Crystals Using High Average Power Nd:YAG Laser	Photonic West 2014 LASE- ,1-6 February 2014, The Moscone Center San Fransisco, California, USA 8959-24	2014/ 2/3
34	レーザー総研, ALPROT, レーザー研 ハイク コスロービアン, 谷口誠治, 藤田雅之, 椿本幸治, 吉田英次, 宮永憲明, 井澤靖和	単一検出器とSPGD アルゴリズムを用いた重ねアパーチャコヒーレントビーム結合技術	2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、 17p-E18-12	2014/ 3/17
35	レーザー研, ALPROT , 接合研、片岡製作所 山村 健、吉田英次、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、石川正博、酒川友一	高出力パルス動作 Yb ファイバレーザースステムの開発(5)	第 61 回応用物理学会学術講演会(2014 春 青山学院大学)、17p-E18-13	2014/ 3/17
36	産総研, ALPROT 奈良崎愛子, 川口喜三, 黒崎諒三, 佐藤正健, 新納弘之	CFRP の紫外レーザースレーション ブルーム分析	第 8 回真空紫外光源およびレーザースレーションに関するワークショップ、宮崎県婦人会館(宮崎市)	2014/ 3/26
37	古河電工 藤崎晃	ファイバレーザースの開発と加工応用	平成 25 年度多元技術融合光プロセス研究会第 5 回研究交流会 産総研 臨界副都心センター別館	2014/ 2/20
38	古河電工 藤崎晃	ファイバレーザースの開発と加工応用	LMP シンポジウム 2014 「レーザース加工技術に関する基礎と最新動向」 神戸 ダイヘン 六甲事業所	2014/ 2/24

## 平成 26 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・講演日
1	古河電工 藤崎晃	kW ファイバレーザースと加工応用	一般社団法人溶接学会平成 25 年度春期全国大会シンポジウム「アドホック研究会発、国プロで世界に先駆けるレーザース加工技術への挑戦」	2014/ 4/17
2	産総研, ALPROT 新納弘之	CFRP 材料のレーザース加工結果の紹介 ～次世代素材等レーザース加工技術開発プロジェクト～	第 7 回レーザース加工技術展 専門技術セミナー	2014/ 4/17
3	Institute for Laser Technology, Institute of Laser Engineering, ALPROT, Haik Chosrowjan, Seiji Taniguchi, Masayuki Fujita, Kouji Tsubakimoto, Hidetsugu Yoshida, Noriaki Miyanaga, and Yasukazu Izawa,	Filled-aperture, Single detector Coherent Beam Combining Technique Using Simple Algorithms	OPIC/ALPS2014, 横浜, 2014 年 4 月 22-24 日、ALPS-p03	2014/ 4/22



4	HAMAMATSU PHOTONICS K.K., ALPROT, Institute of Laser Engineering, Osaka University Yoshinori Tamaoki, Yoshinori Kato, Kohichi Iyama, Toshiyuki Kawashima, and Noriaki Miyanaga	180W of High Average Power At 1kHz, 532nm From Nd:YAG Laser in long term operation	OPIC・ALPS' 14 ,パシフィコ横 浜 会議センター、2014 年 4 月 22 日-25 日、ALPS8-9	2014/ 4/23
5	ALPROT, AIST, MIYACHI CORPORATION, SHIN NIPPON KOKI CO.LTD., Mitsubishi Chemical Corporation, Furukawa Electric Co., Ltd. Hiroyuki Niino, Yoshizo Kawaguchi, Tadatake Sato, Aiko Narazaki, Ryoza Kurosaki, Yoshihisa Harada, Kenji Anzai, Mitsuaki Aoyama, Masafumi Matsushita, Kouichi Furukawa, Michiteru Nishino, Akira Fujisaki, Taizo Miyato, Takashi Kayahara	Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics (CFRTP) by IR Fiber Laser Irradiation	The 15th International Symposium on Laser Precision Micro- fabrication (LPM 2014)	2014/ 4/18
6	Institute for Laser Technology, ALPROT, Institute of Laser Engineering, Osaka University G. Khosrovian, S. Taniguchi, M. Fujita, Y. Izawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga	Filled-aperture Coherent Summation Technique for Multiple High Average Power Laser Beams	16th International Conference "Laser Optics 2014", St. Petersburg, June 30 - July 4, 2014	2014/ 6/30
7	産総研, ALPROT、筑波大 仲間元 原田祥久、鈴木隆之、新納弘 之、寺本徳郎	炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合 材料の先進レーザー加工における 熱弾性応力解析	日本機械学会 M&M2014 材料 力学カンファレンス、福島、 OS1409	2014/ 7/20
8	産総研, ALPROT、筑波大 仲間元 原田祥久、鈴木隆之、新納弘 之、寺本徳郎	炭素繊維強化複合材料のレーザ ー加工による力学特性評価	日本機械学会 2014 年茨城講 演会、日立、32	2014/ 9/5
9	産総研, ALPROT、筑波大、三菱化 学 原田祥久、鈴木隆之、新納弘之、仲間 元、寺本徳郎、西野充晃	炭素繊維強化プラスチック(CFRP) の熱弾性応力解析	日本金属学会 2014 年秋期大 会、名古屋、259	2014/ 9/25
10	レーザー総研、ALPROT、阪大レーザ ー研 ハイク コスロービアン、谷口誠治、藤 田雅之、椿本幸治、吉田英次、宮永憲 明、井澤靖和	ナノ秒パルスレーザーの重ねアパ ーチャコヒーレントビーム結合	第 75 回応用物理学会秋季学 術講演会 講演番号: 18p-PA3-12	2014/ 9/18
11	産総研, ALPROT 新納弘之	CFRP 材料のレーザーによる加工	第 133 回微小光学研究会「自 動車を進化させる微小光学」 応用物理学会分科会日本光学 会 微小光学研究グループ	2014/ 10/9
12	ALPROT, 古河電工 宮戸 泰三	高出力 QCW ファイバーレーザーに よる CFRP の切断加工	ファイバーレーザー技術専門 委員会第3回公開研究会、名 古屋	2014/ 11/28
13	古河電工, 阪大接合研, ALPROT 山村 隆介, 松下俊一, 橋本博, 大 谷栄介, 塚本雅裕, 藤崎晃	サブナノ秒ファイバー型パルスレー ザーの開発	ファイバーレーザー技術専門 委員会第3回公開研究会、名 古屋	2014/ 11/28
14	レーザー総研, ALPROT, レーザー研 ハイク コスロービアン, 谷口誠治, 藤 田雅之, 椿本幸治, 吉田英次, 宮永憲 明, 井澤靖和	高出力コヒーレントビーム結合新 技術	レーザー学会第 471 回研究 会、ホテルラフォーレ琵琶湖、 18p-PA3-12	2014/ 12/11
15	ALPROT 尾形仁士	次世代素材等レーザー加工技術 開発プロジェクトの概要	ユーザー連携実用化推進シン ポジウム(虎ノ門ヒルズ4階) HALLB-1+2	2014/ 12/15

16	産総研, ALPROT 新納弘之	新素材・加工テーマ発表 「加工プロセス開発加工評価」	ユーザー連携実用化推進シン ポジウム (虎ノ門ヒルズ4階) HALLB-1+2	2014/ 12/15
17	浜松ホトニクス、ALPROT 川嶋利幸	表面改質テーマ発表 「アニール用レーザー開発」	ユーザー連携実用化推進シン ポジウム (虎ノ門ヒルズ4階) HALLB-1+2	2014/ 12/15
18	古河電工 藤崎晃	高出力ファイバレーザー技術と加 工応用	レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会 東海大学高輪校 舎	2015/ 1/11
19	古河電工 田中完二	高ビーム品質・高反射耐久ファイ バレーザーによる加工検討	第 82 回 レーザー加工学会講 演会 産総研 臨海副都心セ ンター別館 11F	2015/ 1/14
20	ALPROT, AIST, MIYACHI CORPORATION, SHIN NIPPON KOKI CO.LTD., Mitsubishi Chemical Corporation, Furukawa Electric Co., Ltd. Hiroyuki Niino, Yoshihisa Harada, Kenji Anzai, Mitsuaki Aoyama, Masafumi Matsushita, Kouichi Furukawa, Michiteru Nishino, Akira Fujisaki, Taizo Miyato, Takashi Kayahara	2D/3D laser cutting of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) by fiber laser irradiation	Photonics West 2015 LASE- Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XX	2015/ 2/10
21	産総研, ALPROT 新納弘之	炭素繊維複合材料のレーザー精 密加工	21 世紀の化学反応とプロセス ー原料転換から材料評価技術 までー (平成 26 年度 産総研 環境・エネルギーシンポジウム シリーズ)	2015/ 2/12
22	産総研, ALPROT 新納弘之	CFRP 材料のレーザー加工～ 技 術研究組合 A LPROT の成果～	産総研第4回電子光技術シン ポジウム (超短パルスレーザーの応用と ポータブルセンサの未来)	2015/ 2/18
23	産総研, ALPROT, アマダミヤチ, 新 日本工機, 三菱化学, 古河電工 新納弘之, 原田祥久, 安在建治, 松下正 文, 古川航一, 西野充晃, 藤崎晃, 宮戸泰 三, 茅原崇	CFRP 材料のレーザー加工	学会発表: 電気学会: 光・量子 デバイス研究会 弘前大学	2015/ 3/6
24	古河電工 平尾昌弘、茅原崇、田中完二、藤崎晃	高出力ファイバレーザー技術と加工 応用	Optronics 4 月号	2015/ 3/28

## 平成 27 年度

番号	所属・発表者	題名	発表会・講演会名	発表・ 講演日
1	HAMAMATSU PHOTONICS K.K., ALPROT, Institute of Laser Engineering, Osaka University Yoshinori Kato, Yoshinori Tamaoki, Takashi Sekine, Yasuki Takeuchi, Koichi Iyama, Takashi Kurita, Toshiyuki Kawashima, and Noriaki Miyanaga	Development of a 180-W, 1-kHz Pulsed Green Laser System for Industrial Applications	OPIC・ALPS' 15, パシフィック横 浜 会議センター, 2015 年 4 月 22 日ー24 日, ALPS8-3	2015/ 4/23

2	Inst. for Laser Tech.,Inst. of Laser Eng., ALPROT, T. Kitamura1, H. Chosrowjan, S.Taniguchi, M. Fujita, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, Y. Izawa	Coherent Combination of Four High-Power Laser Beams Using Bernoulli Discrete Probability Distribution Based Algorithm	OPIIC・ALPS' 15 ,パシフィコ横浜 会議センター、2015 年 4 月 22 日ー24 日、ALPSp14-13	2015/ 4/23
3	古河電気工業株式会社 藤崎晃	高出力ファイバレーザ技術と加工 応用	Photonix 2015 セミナー Laser-6	2015/ 4/9
4	Furukawa Electric Co., Ltd., Shin Nippon Koki Co., Ltd., AIST, ALPROT Taizo Miyato, Akira Fujisaki, Koichi Furukawa, Masafumi Matsushita, Yoshihisa Harada, Hiroyuki Niino	CFRP Cutting with High Power Fiber Laser	OPIIC・ALPS' 15 ,パシフィコ横浜 会議センター、2015 年 4 月 22 日ー24 日、ALPSp15-4	2015/ 4/24
5	浜松ホトニクス 加藤義則、玉置善紀、伊山功一、栗田 隆史、関根尊史、竹内康樹、川嶋利幸	産業用大出力高繰り返し全固体レ ーザの開発	レーザー学会第 476 回研究会 「高機能固体レーザーとその応 用」大阪吹田市 ホテル阪急 エキスポパーク	2015/ 7/17

## 【展示会】

## ◆プロジェクト全体

番号	所属	展示会名	出展日
1	プロジェクト全体 (NEDO 主催)	NEDO フォーラム	2015/2/12～2/13
2	プロジェクト全体 (NEDO 主催)	レーザーEXPO2015	2015/4/22～2/24

## ◆浜松ホトニクス株式会社 「高出力半導体レーザー開発」

番号	所属	展示会名	発表日
1	浜松ホトニクス(株)	浜松ホトニクス株式会社 Private show, 創立 60 周年記念 浜松ホトニクス総合展示会 Photon Fair 2013	2013/11/6～2013/11/9
2	浜松ホトニクス(株)	レーザーEXPO2014(レーザー技術展示会)	2014/4/23～2014/4/25
3	浜松ホトニクス(株)	Phonix2015 第 8 回レーザー加工技術展	2015/4/08～2015/4/10
4	浜松ホトニクス(株)	レーザーEXPO2015(レーザー技術展示会) 浜松ホトニクスブース	2015/4/22～2015/4/24

## ◆国立大学法人大阪大学 「パルスレーザー増幅技術の開発」

番号	所属	展示会名	出展日
1	大阪大学接合科学研究所	OPIIC 2013	2013/4/23～4/26

## ◆技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所 「CFRP 切断加工技術の開発」「粉末成形技術の開発」

番号	所属	展示会名	出展日
1	産業技術総合研究所	産総研オープンラボ	2011/10/13～10/14
2	アспект	第 23 回設計・製造ソリューション展	2012/6/20～6/22
3	産業技術総合研究所	産総研オープンラボ	2012/10/25～10/26
4	アспект	第 15 回産業交流展 2012	2012/11/20～11/22
5	アспект	メカデザイナーズサミット	2012/12/15
6	アспект	日産自動車第 6 回試作サプライヤー展示会	2012/11/15
7	古河電気工業	Photonix2013 第 6 回レーザー加工技術展	2013/4/10～4/12
8	アспект	第 24 回設計・製造ソリューション展	2013/6/19～6/21
9	産業技術総合研究所	産総研オープンラボ	2013/10/31～11/1

10	古河電気工業	Photonix2014 第7回レーザー加工技術展	2014/4/16~4/18
11	古河電気工業	古河電工グループ新技術総合展示会	2014/10/22~10/23
12	産業技術総合研究所	産総研テクノブリッジフェア	2014/10/23~10/24
13	古河電気工業	Photonix2015 第8回レーザー加工技術展	2015/4/8~4/10
14	アспект	第26回設計・製造ソリューション展	2015/6/24~6/26

## 【その他】

## ◆浜松ホトニクス株式会社 「高出力半導体レーザー開発」

## 《プレス発表》

番号	所属	発表内容	発行	発表日
1	浜松ホトニクス(株)	APEX Download Top20-Short-Pulse Operation of a High Power-Density Proton-Implanted Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array	APEX	2012/8
2	浜松ホトニクス(株)	Hamamatsu reports record-power-density VCSEL	Semiconductor TODAY Magazine	2012/9
3	浜松ホトニクス(株)	新製品紹介 L11785-61	浜松ホトニクス株式会社	2014/12

## ◆国立大学法人大阪大学 「パルスレーザー増幅技術の開発」

## 《受賞》

受賞者	受賞名	受賞件名	受賞日
Yuji Sato	Smart laser processing conference 2014	Experimental study on CFRP cutting with nanosecond laser in air and Ar gas ambience	2014/4/23

## 《プレス発表》

所属	新聞	内容	掲載日
大阪大学接合科学研究所	日刊工業新聞	ものづくりの「光る礎」レーザー加工技術	2012/1/12
大阪大学接合科学研究所	溶接ニュース	進化する微細加工④ 今後のレーザー研究のあり方	2013/10/22
大阪大学接合科学研究所	レーザー新報	最先端開発テーマの下地域及び産学官金との連携を一層強化する！ —東成エレクトロビーム(株)代表取締役会長 上野 保氏に聞く—	2015/3/23

## ◆技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所 「CFRP 切断加工技術の開発」「粉末成形技術の開発」

## 《受賞》

受賞者	受賞名	受賞件名	受賞日
川井恭平(筑波大、産総研)、原田祥久(産総研)、鈴木隆之(産総研)、寺本徳郎(筑波大、産総研)、西野充晃(三菱化学)、新納弘之(産総研)	日本保全学会第9回 学術講演会奨励賞	高出力レーザー加工を用いた炭素繊維強化複合材料の劣化・損傷機構	2012/ 7/27

《テレビ放送》

所属	番組名	放送内容	放送日
アспект 産総研	NHK Eテレ サイエンス ZERO 23:30～24:00 「3D プリンター 魔法の箱の真骨頂！」	本プロジェクトの粉末成形機が紹介された。	2013/ 4/14

## 2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進部署・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

# 「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」 (2010年度～2014年度, 5年間) 事後評価

## プロジェクト概要 I - II

- I - 事業の位置付け・必要性について
- II - 研究開発マネジメントについて

NEDO  
ロボット・機械システム部  
2015年8月20日

1/25

### 1. 事業の位置付け・必要性について (1) NEDOの事業としての妥当性

#### 社会的背景と事業の目的

##### 社会的背景

地球温暖化対策としての低炭素社会の実現



自動車・航空機等の輸送機器の抜本的軽量化技術を開発する必要性

##### 事業の目的

難切削素材の利活用促進に貢献するための革新的な切断・接合技術の開発および製品製造タクトタイムの大幅短縮化



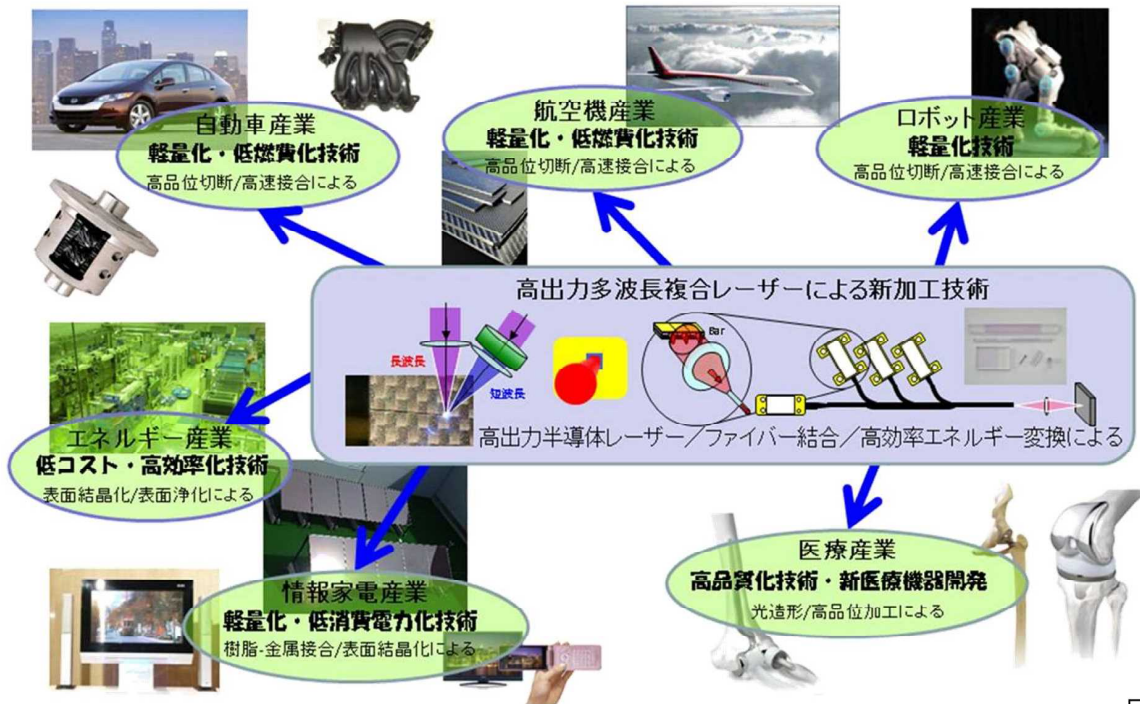
自動車・航空機等の輸送機器の抜本的軽量化技術として期待されているCFRP(炭素繊維強化複合材料)等に対して、高品位・高速・省エネルギーなレーザー切断・接合技術を開発

2/25



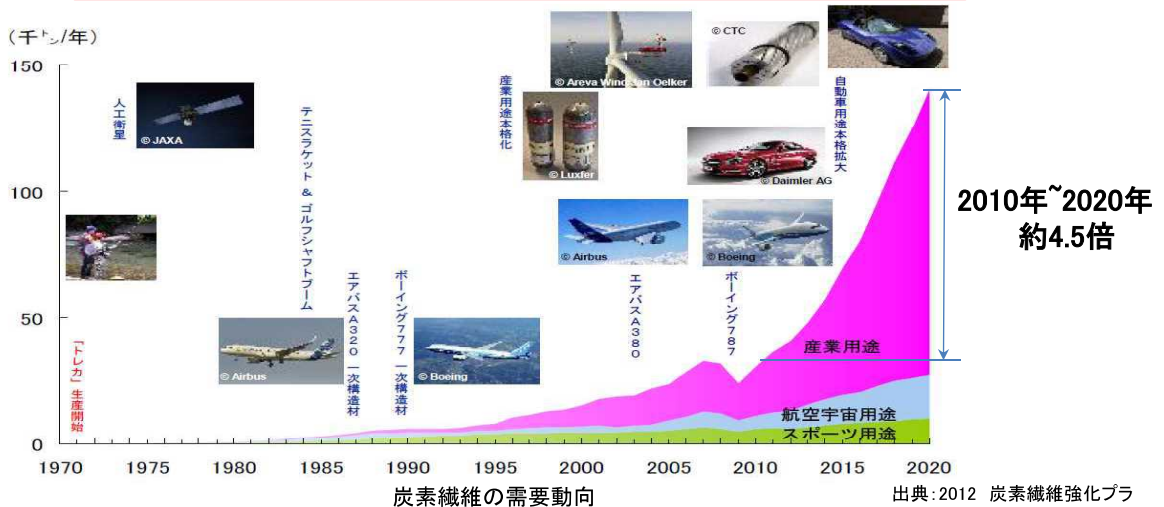
**事業の目的**

**軽量・高強度な次世代素材の活用が期待される分野**



**CFRP切断接合**

- CFRP普及拡大のためには、CFRP加工機が不可欠
- 主なユーザ候補:自動車・航空機メーカー



出典:2012 炭素繊維強化プラスチック市場の現状と将来展望 (富士キメラ総研)

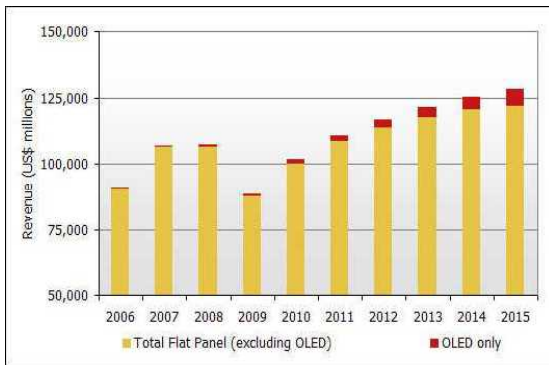
**CFRPの自動車適用へ向けた動きが本格化**

- 東レ/ダイムラーの合併会社設立 (2011年)
- 帝人、GM向けに量産開始 (2012年)
- CFRP 100kg搭載のBMW3販売発表 (2013年)

表面処理

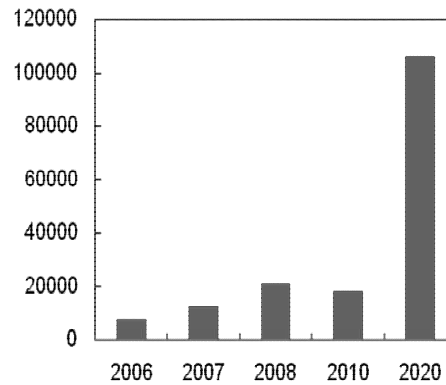
- フラットパネルディスプレイ市場は、2015年に1250億ドルまで成長と予測
- 太陽電池の世界市場は、2020年には10兆円まで成長と予測

フラットパネルディスプレイの世界市場



出典: Display Search 2010

(億円) 太陽電池の世界市場



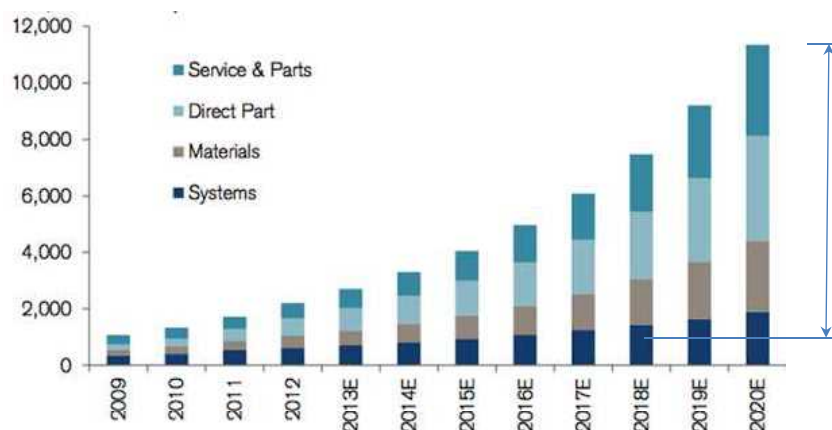
出典: 富士経済

粉末成形

- 粉末成形によるカスタム品・試作サービス, 素材等で大きな伸びが期待
- 2020年のAM\*世界市場規模: 120億ドル

\* Additive Manufacturing

(US\$ millions)



2010年～2020年  
約10倍

出典: Wohlers Report 2013 およびNEDO独自調査をもとに作成

既存技術との比較 (CFRPの切断加工)

**現行加工法 <工具による機械加工>**

NCルータ  
穴空け加工  
剥離  
切断加工  
バリや剥離

- 油・砥粒等の表面汚染の弊害発生
- 切断面にバリやチップが発生
- 工具が摩耗 (ウォータージェット加工ではノズル内部が摩耗)
- 加工時間がかかる(0.3~1m/分)

**<現行レーザー(高出力CO<sub>2</sub>)による加工**

樹脂の溶解  
穴空け加工

- 切断面から1mm程度まで焼けが発生
- 切断面には剥離も発生
- 有害な煙、臭いが発生

**多波長複合レーザーによる切断加工イメージ**

高出力赤外  
高出力紫外

穴空け加工  
切断面側壁

- 表面汚染なし
- きれいな切断面
- 非接触 (工具が不要)
- 高速切断可能 (5~10m/分)

ブレークスル

**アウトカム: 炭素繊維材料の適用による自動車・航空機の軽量化**

重量: ▲20%	重量: ▲30%
例えば、B767→B787 60トン→48トン	例えば、1380kg→970kg

既存技術との比較 (表面処理)

**現行加工法 <ガスレーザー方式>**

- ガス寿命が短い
- 制御された結晶成長が困難
- 放電磨耗品が多い
- 周期メンテナンスの頻度が多い

**アニーリングレーザーによる表面改質加工(イメージ)**

- 全固体レーザー(長寿命)
- 微結晶成長が可能
- エネルギー安定性が向上
- 高品質・高速動画再生性能の改善等

ブレークスル

**タンデム型薄膜シリコン系**

吸収波長域の異なる層を積層させたもの

- ・ 変換効率(10~14%)
- ・ 原料が少なくて済む
- ・ 市場規模が急激に増加

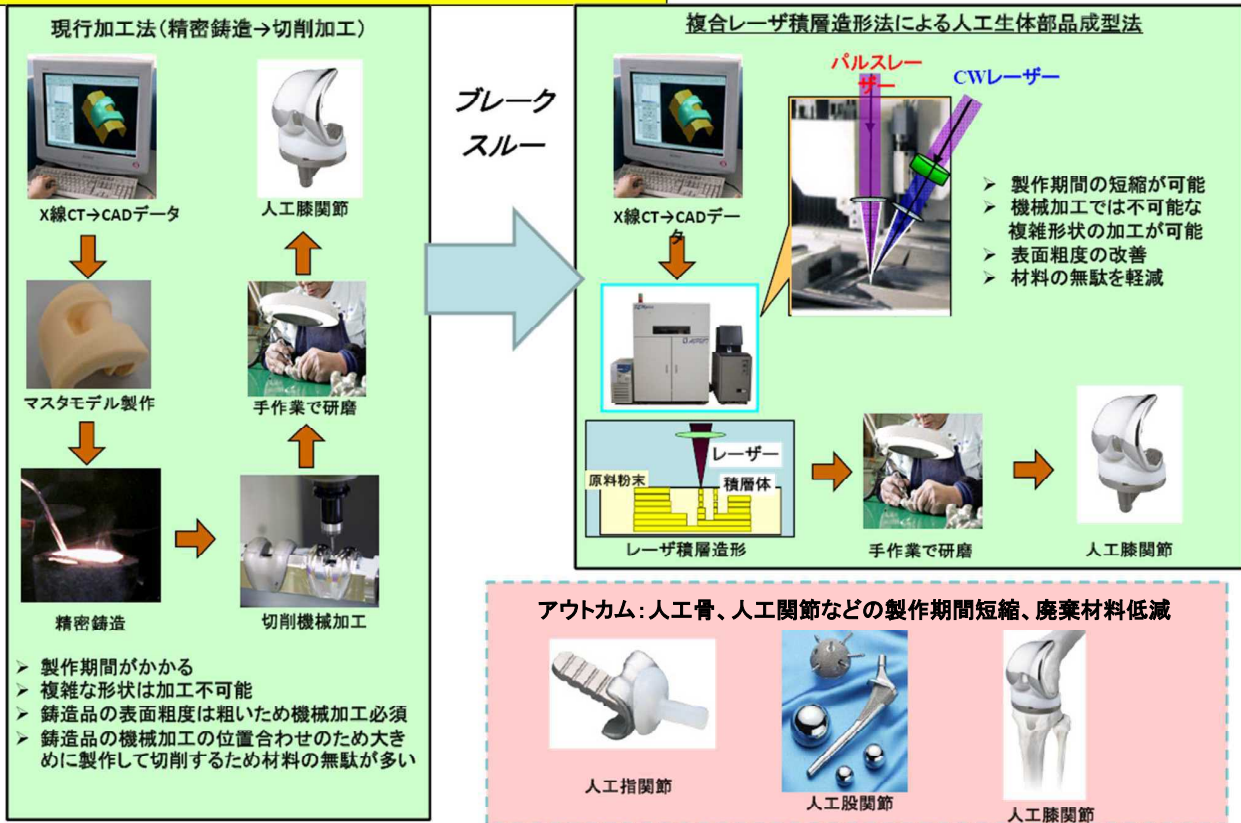
↓

**低コスト化 高効率化**

多接合型(タンデム型)

**アウトカム: 太陽電池、フラットパネルディスプレイなど**

## 既存技術との比較 (粉末成形)



## ユーザーの意見

### CFRP切断接合

- CFRPはBoeing787の機体に50%以上、MRJでは尾翼等に使われようとしており**今後も増える**見込み。しかし、**切削性が非常に悪く、工具の摩耗や切断面の品質劣化が本格的な普及への課題**。レーザー加工のような非接触で切断面の劣化の少ない加工機が必要。(重工業メーカー)
- レーザー加工は**固定治具が不要で、条件設定で出力等が変更でき、効率的に行える**ツールとして有用。製造ラインに入れることができれば、普通車でも適用は拡大する。(自動車メーカー A社、B社)

### 表面処理

- 表面処理工程への導入には**低コストかつ製品性能の向上が可能で、メンテナンス性にも優れた**加工装置必要。(液晶パネルメーカー)
- レーザー照射による**結晶制御に期待**。国内メーカーの国際競争力強化に役立つ。(太陽電池パネルメーカー)

### 粉末成形

- 患者毎に異なる**複雑な形状の人工生体部品を高速カスタム製造**できることに期待。(医療器具メーカー)

➡ **レーザーの高出力化、高繰り返しパルス発振動作への期待大**

## 政策的位置付け

新成長戦略(平成22年6月18日閣議決定)

### グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略

- ✓ 次世代自動車(エコカー)の普及促進

第4回産業構造審議会産業競争力部会(平成22年4月23日)

### 次世代環境航空機の世界的拠点として、我が国航空機産業を高付加価値化

- ✓ 環境航空機向けの部品・素材ソリューションを提供
- ✓ 高い技術力で世界のトップランナーとして次世代旅客機等の開発を主導

平成23年度科学・技術重要施策アクション・プラン(平成22年7月8日総合科学技術会議)

### エネルギー利用の省エネ化

- ✓ 次世代自動車等の普及による交通運輸分野の低炭素化

### 総合科学技術会議(第87回:2009年12月) S判定:優先的に取り組むべき課題

○今回開発しようとしているレーザーは長波長と短波長を組み合わせ、加工の精度、速度を高めたレーザーであり、難加工である炭素繊維複合材料や太陽電池などの機能性材料を高品位・高品質で加工することができるものであり、非常に重要である。

○レーザーの光源に近い企業とその応用に強い企業との連携として集中研究拠点体制で取り組む予定であり、効果の期待できる優れた施策である。

○我が国製造業の国際競争力の維持・強化、技術安全保障の観点からも国産の次世代レーザー技術を国として取り組む意味は大きく、海外の動向を踏まえつつ、コストパフォーマンスに留意しつつ明確な商品化イメージを持って、積極的に実施すべきである。

11/25

## NEDOが関与する意義

### 次世代素材に適したレーザー加工技術の開発

#### ■ 社会的必要性

- ・省エネに寄与する軽量・高強度な先端新素材に適した加工法開発が急務

#### ■ 効果

- ・CFRPの利用促進 ⇒ 軽量化による燃料削減、温室効果ガス排出抑制
- ・我が国の自動車 / 航空機産業の競争力強化に貢献

#### ■ 研究開発の難易度

- ・分野を超えた技術体系の構築が必要(レーザー、ロボット、素材等)

#### ■ 投資規模

- ・レーザー加工機の開発には数億円規模の投資が必要 ⇒ 開発リスク

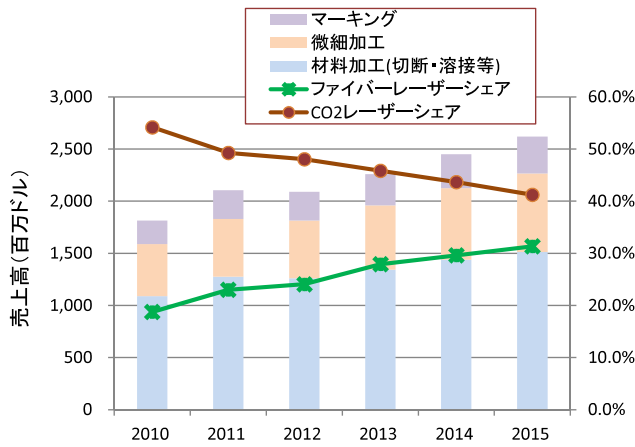
我が国の企業・大学・研究機関が有するレーザー加工技術を結集して高加工品質と高生産性を両立する加工システムの技術開発すべき



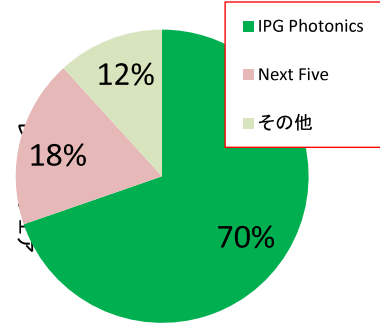
NEDOが関与して推進すべき事業

12/25

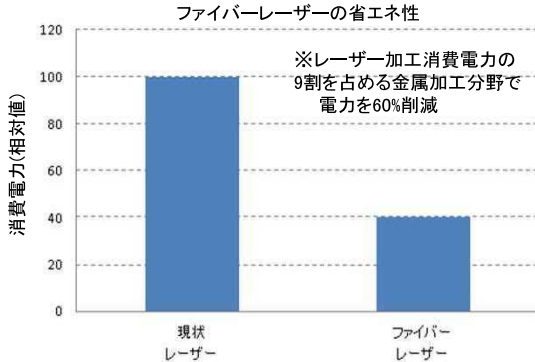
1. 事業の位置付け・必要性について (1) NEDOの事業としての妥当性



ファイバーレーザーの企業シェア (2011年:総額 637百万ドル)



NEXT Five:  
Coherent(USA), GSI Group(USA), JDS Uniphase(USA),  
Rofin-Sinar(Switzerland), TRUMPF(Germany)

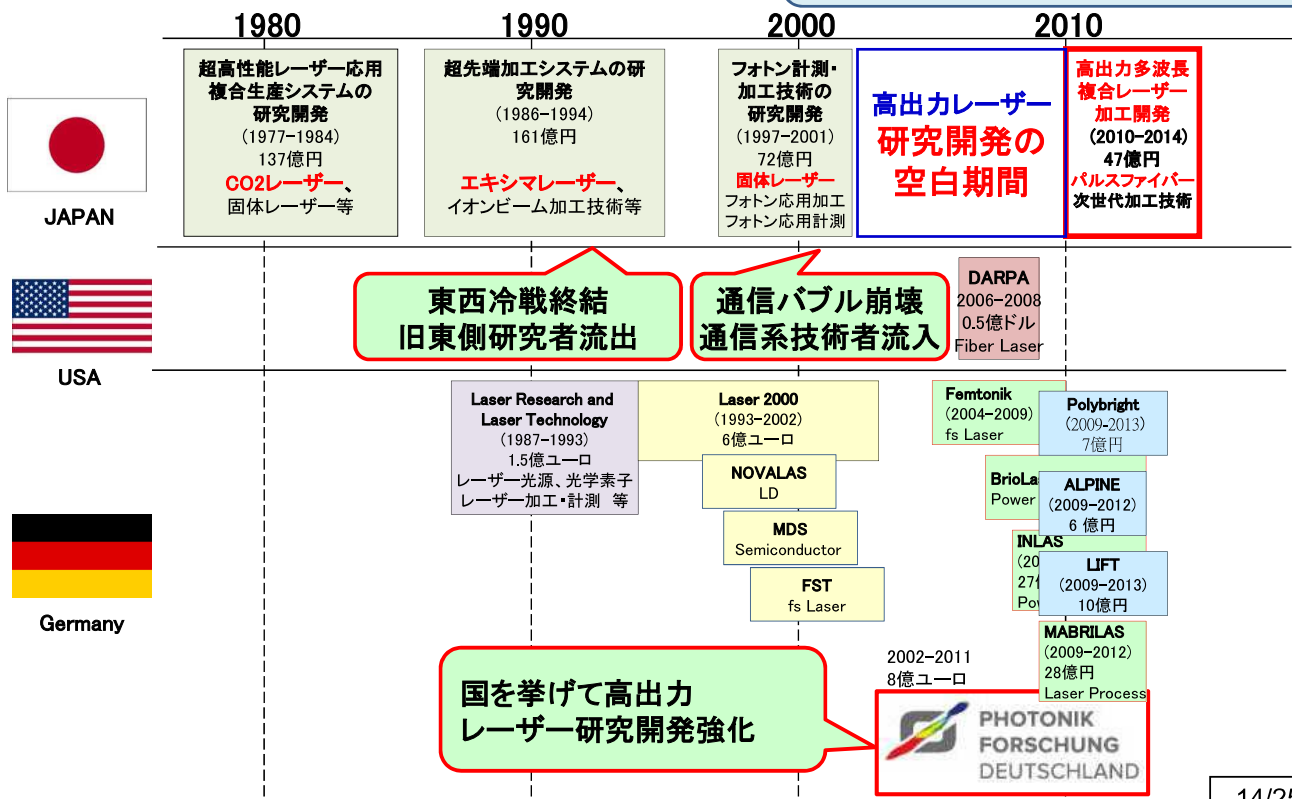


出典: The Worldwide Market for Lasers / Market Review and Forecast 2012 (Strategies Unlimited)

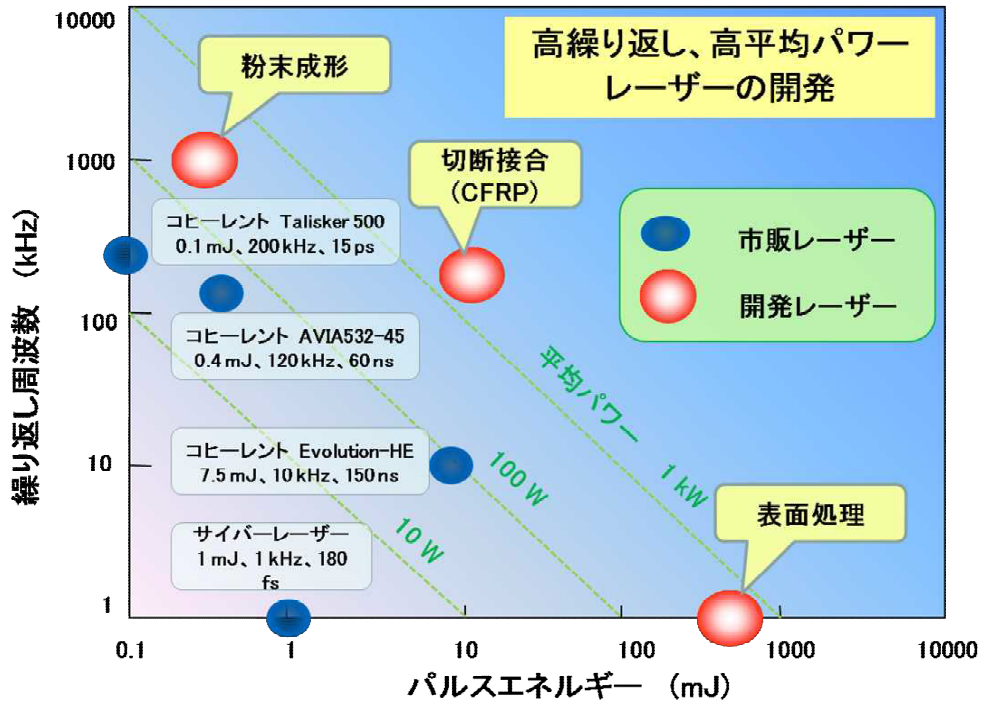
1. 事業の位置付け・必要性について (2) 事業目的の妥当性

国内外の研究開発の動向

CFRPの自動車適用の動き  
 ・東レ/ダイムラーの合併会社設立 (2011年)  
 ・帝人、GM向けに量産開始 (2012年)  
 ・CFRP100kg使用のBMW i3販売発表 (2013年)



## 研究開発の世界比較



15/25

### 研究目的

本事業では、ファイバーレーザーの分野において我が国の競争力を高めることを目的に、**ファイバーレーザーを用いた新たな加工領域を開拓することとし、炭素繊維複合材料(CFRP)を対象とした加工技術、粉末成形技術を開発する。また、高精細ディスプレイ等の表面処理について、既存のレーザー技術を凌駕する新しいレーザー用いた加工技術を開発する。**

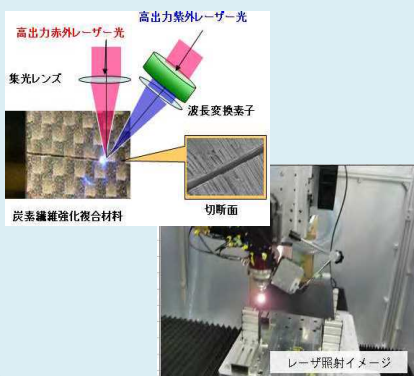
### プロジェクトの規模

**研究開発期間 5年**  
**【委託及び共同研究(2/3 NEDO負担)】**  
 (平成22年度～平成26年度 47億円)

### 研究内容概略

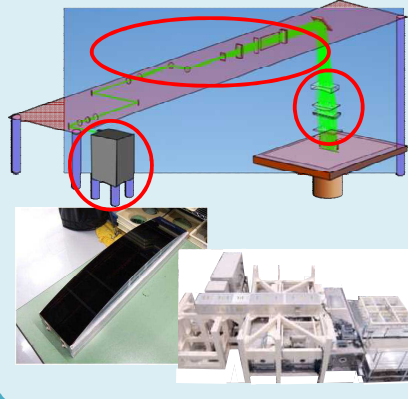
#### CFRP切断加工技術の開発

CFRPへ熱影響が無く、かつ高速な切断を実現するため、パルス・ファイバーレーザー+多波長変換(赤外光～紫外光)+多波長複合レーザーの開発および、そのレーザーに対応した加工ヘッドの開発を一体となって実施。



#### 大面積表面処理技術の開発

固体レーザーは、メンテナンス性、製品性能の点において優位。大面積化のためのレーザー高出力化、ビーム広幅のための光学系の確立などの技術課題を克服して実用化を目指す。



#### 粉末成形技術の開発(～H25.7)

新たな製造技術: 3Dプリンティング  
 パルスレーザー+CWLレーザー(重畳複合照射レーザー)、高真空チャンバ型粉末焼結積層成形技術を用いた軽金属(Ti合金)加工の実用化を目指す。

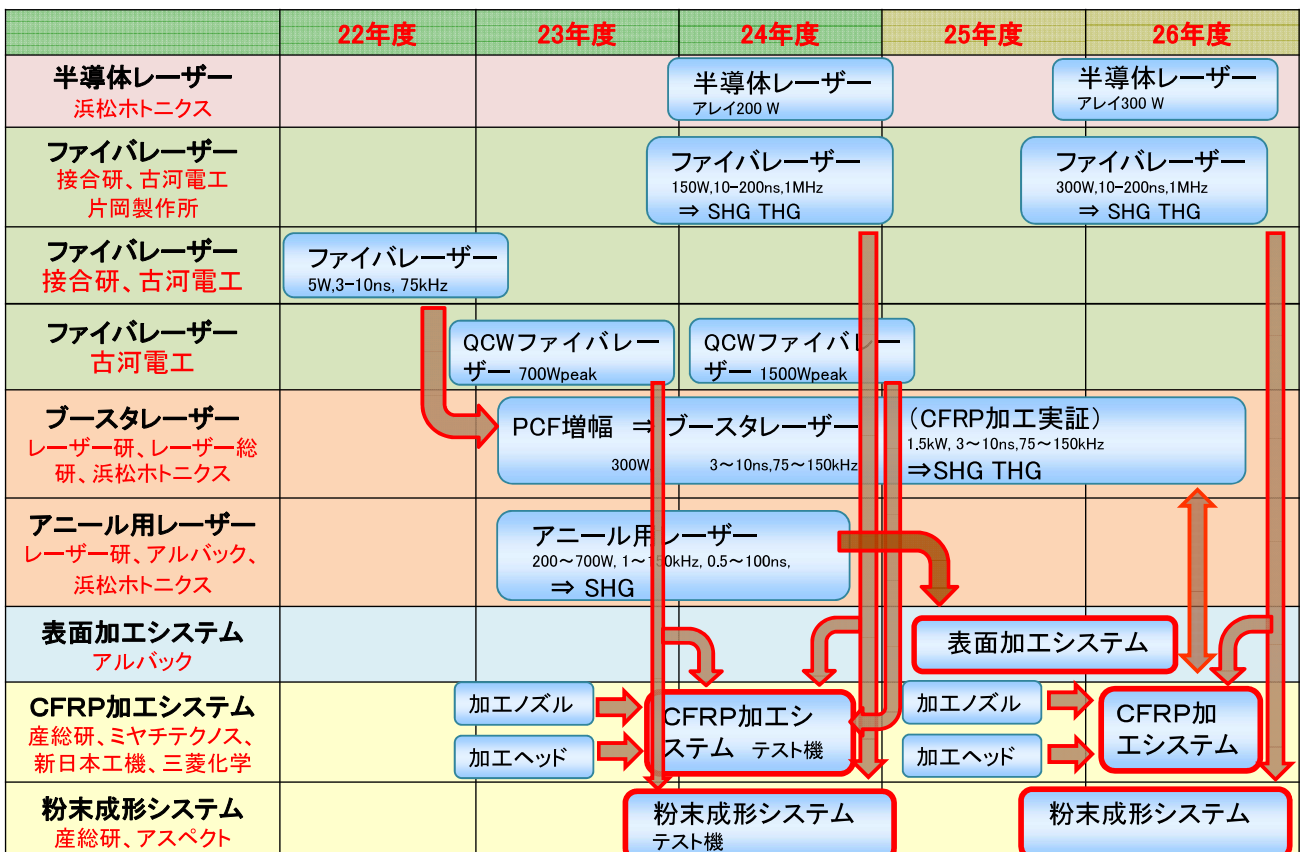


16/25

**研究開発目標と根拠**

項目	現行性能	開発ターゲット	根拠		
切断接合技術	レーザー照射	-	高出力と二波長重量等の多波長複合照射	-	
	加工速度	切削加工: 0.1m/分 W/J加工: 1m/分	6m/分:	自動車の部材加工のタクトタイム	
	切断	反応層の厚み	機械加工、W/Jは熱損傷を発生しない	反応層の厚み: 100 μm以下	ユーザー企業からのリクエスト
		引張り強度	-	機械加工による引っ張り強度を基準に10%未満の低下に抑制	ユーザー企業からのリクエスト
	接合	せん断強度	接着剤 30MPa	100MPa	当該部材の実用的に求められる接合強度の最高値を設定
表面処理技術	照射レーザー	エキシマレーザー	グリーンレーザー	-	
	ビーム幅	400mm	500mm以上	40inchTVクラスの基板加工が可能なサイズ以上	
粉末成形技術	レーザー照射	CW	CWとパルスの複合レーザー照射	-	
	成形精度	±0.2mm	±0.1mm	欧州製焼結積層成形装置の能力の50%向上。	
	成形時間	20時間 (高さ100mmサイズの基準パーツ)	16時間以内	欧州製焼結積層成形装置の能力の20%アップ。	
	引っ張り強度	-	Ti 840Mpa以上	Ti-6Al-4Vの機械強度に関するASTM-F136とISO5832-3のいずれの規定値も満足する値を設定。	

プロジェクト ロードマップ (プロジェクト開始時)





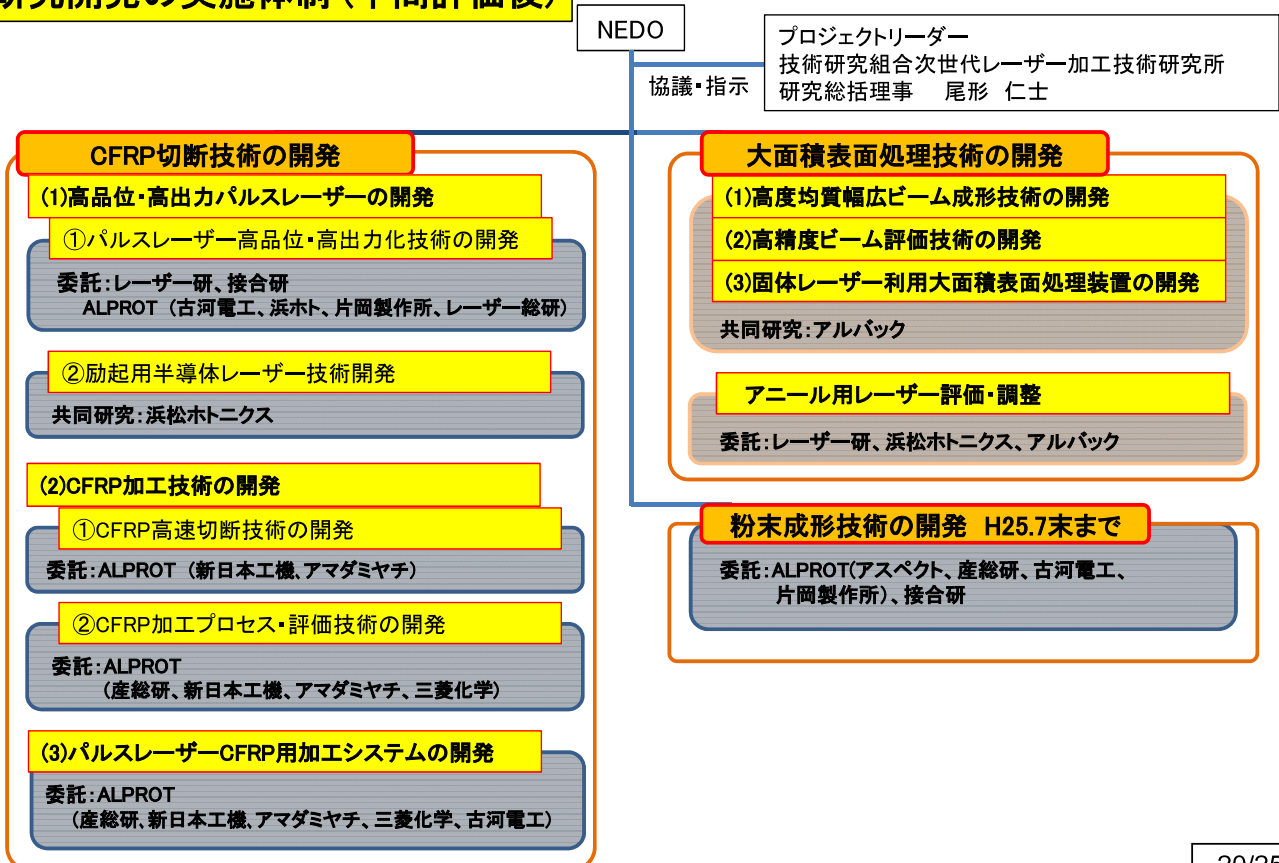
開発予算

単位:百万円

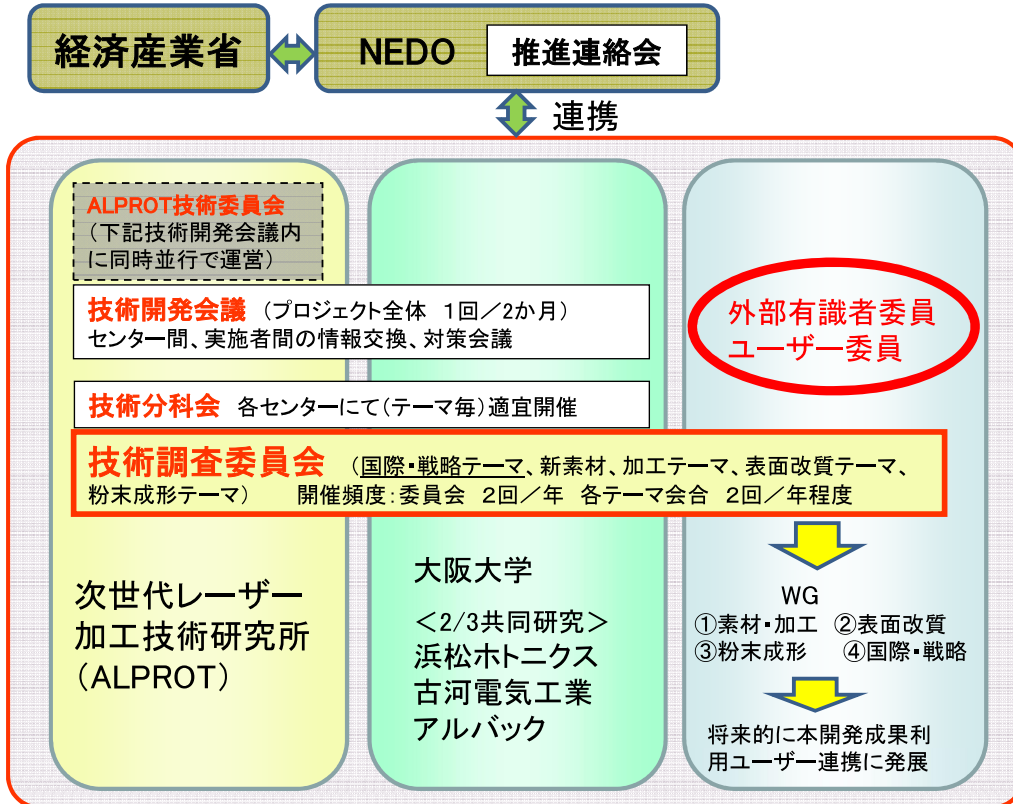
		H22	H23	H24	H25	H26	通算
開発実績 (事業費合計)	一般会計	598	948	95	0	0	1,641
	特別会計	0	0	890	876	696	2,542
	(加速)	0	450	0	80	72	522
	合計	598	1,398	985	956	768	4,705

	H22	H23	H24	H25	H26	通算
CFRP+粉末成形	442	1,019	878	870	705	3,914
表面処理	156	379	107	86	63	791
合計	598	1,398	985	956	768	4,705

研究開発の実施体制 (中間評価後)

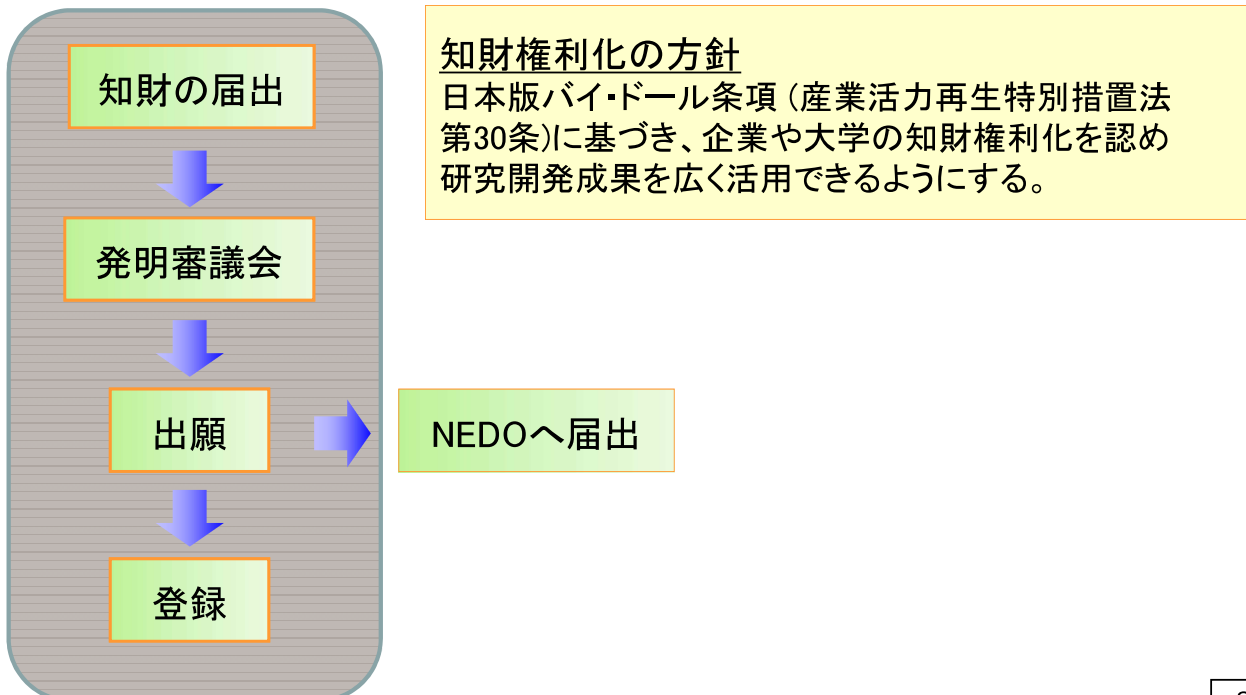


実用化・事業化に向けたマネジメント



知財マネジメント

ALPROT知財管理



## 中間評価への対応

### 中間評価時の主な指摘

- ✓ 開発項目のいくつかがキャッチアップであるため、**独自性打ち出しが必要**
- ✓ **プロジェクト内および最終ユーザーとの連携体制の強化が必要**
- ✓ 総花的に目標を達成して良しとせず、**光るものをアピールすべき。集約化を期待**



### 見直しの方向性

- ✓ レーザーのブースターを**固体からPCFへ変更**、QCWレーザーの**高繰返し化と高出力化**に注力。
- ✓ **阪大一産総研の連携実験強化**、ユーザーと連携した加工実験を実施。
- ✓ 出口イメージを重視して**開発項目を再編成**。粉末成形については早期実用化を目指すべく、**本PJから切り離してNEDOイノベーション開発事業へ移行**

23/25

## 基本計画変更に伴う、研究開発項目新旧対照

### 旧研究開発項目(平成22年度～平成24年度)

#### 研究開発項目①「レーザー高出力化技術の開発」

- (1)半導体レーザーの高出力化技術、高信頼化技術の開発
- (2)半導体レーザーのファイバーカップル(F/C)技術の開発

#### 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発」

- (1)パルス制御・高性能化技術の開発
- (2)パルスレーザー増幅技術の開発
- (3)高出力波長変換技術の開発

#### 研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」

- (1)切断接合技術の開発
- (2)表面処理技術の開発
- (3)粉末成形技術の開発

- 表面処理技術及び粉末成形技術に用いるレーザーについては、平成24年度までの開発において初期の目標性能を達成したため、終了。
- 但し、平成25年度以降の開発において必要となる調整、メンテナンスについては実施。

### 新研究開発項目(平成25年度～平成26年度)

#### 研究開発項目①「CFRP切断加工技術の開発」

- (1)高品位・高出力パルスレーザーの開発
  - (2)CFRP加工技術の開発
  - (3)パルスレーザーCFRP用加工システムの開発  
※(3)はレーザー及び加工技術の統合を明確化
- 【目標】
- 切断加工速度: > 6 m/min以上
  - 加工品位: 切断面において反応層厚 < 100 μm (t > 3 mm) 達成する加工技術の確立

#### 研究開発項目②「大面積表面処理技術の開発」

- (1)高度均質幅広ビーム整形技術の開発
  - (2)高精度ビーム評価技術の開発
  - (3)固体レーザー利用大面積表面処理装置の開発  
※テーマにて実施していた内容を細分化
- 【目標】
- 幅500mm以上の表面処理技術の確立

#### 研究開発項目③「粉末成形技術の開発」(H25.7まで)

- ※H25.3まで開発したレーザー及び加工機を統合し、以下の目標を達成し終了
- 【目標】
- 成形精度: ±0.1 mm (50 mmサイズ基準パーツ)
  - 成形時間: 16 時間以内 (高さ50 mmサイズ基準パーツ)

24/25

## 研究開発マネジメントの充実

### ■ 研究進捗管理シートの運用見直し

- ・実施者が四半期毎の進捗報告。
- ・尾形PLと推進部長が進捗状況を**ダブルチェック**
- ・両者がコメントを記入して**実施者へフィードバック**  
⇒ 計画をタイムリーに見直し、**PDCAサイクルを回す**

### ■ サイトビジット

- ・進捗、予算活用、設備利用状況を**現地でチェック**し、対策を計画へ反映

### ■ 大型成果創出に向けた加速資金の獲得 (1.5億円)

- ・平成25年度 (80百万円):  
CFRP熱的影響分析装置(40)、3次元倣い加工制御(20)、集塵装置等(20)
- ・平成26年度 (72百万円):  
パルスFLモジュール化(20)、QCWレーザー高出力化(30)、評価設備(22)

### ■ 研究開発成果の普及に向けた広報

- ・NEDOフォーラムへの展示 (2015/2)
- ・LaserEXPO2015 ブース出展, シンポジウム開催, 成果報告会 (2015/4)
- ・プレスリリース 6件、TV取材 1件、受賞 2件

# 「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」 (2010年度～2014年度 5年間)

## プロジェクト概要 Ⅲ-Ⅳ

Ⅲ 研究開発成果について (全体概要)

Ⅳ 実用化の見通しについて(全体概要)

プロジェクトリーダー 尾形仁士

2015年8月20日

スライド 1

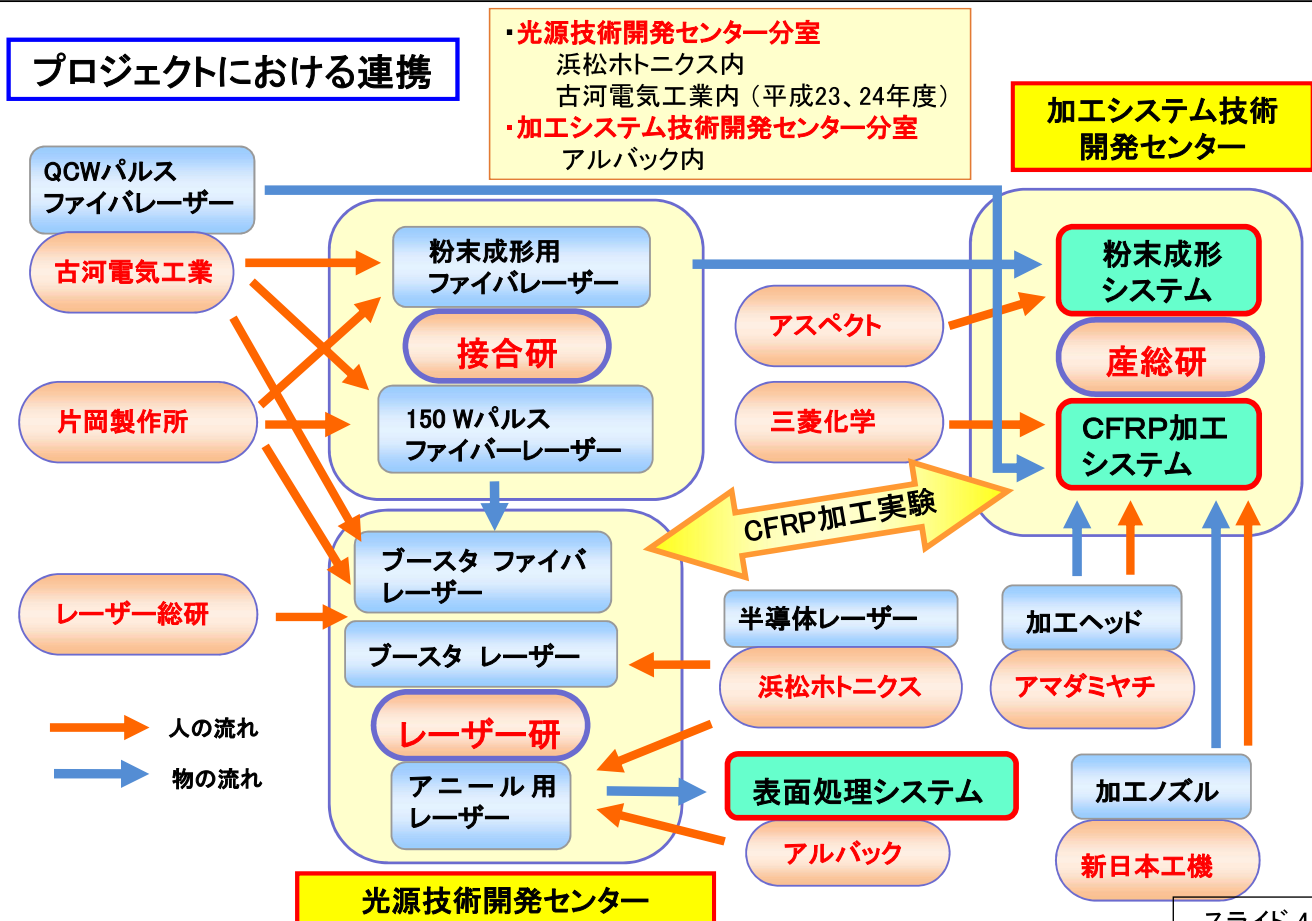
### 3. 研究開発成果について

平成22年度～中間評価(平成24年8月)の期間においては、プロジェクトの各テーマの中間目標(平成25年3月)をほぼ達成、または目標達成の見通しを得た。

中間評価～平成26年度の期間においては、最終目標を達成し、プロジェクト成果を実用化・事業化に結びつけることを目指して研究開発を実施した。

スライド 2

- 3つの出口を明確にしたプロジェクトの運営
- 産学官が連携したプロジェクト体制



プロジェクトテーマ： 3つの出口と技術調査

※1/3実施者負担テーマ

テーマ1： CFRP切断加工技術の開発  
 (大阪大学、ALPROT、浜松ホトニクス、古河電気工業)  
 高出力半導体レーザー開発 ※  
 QCWファイバーレーザー開発 ※ **CFRP加工システム**  
 パルスレーザー増幅技術の開発  
 CFRPレーザー加工・評価技術の開発  
 パルスレーザー開発とCFRP切断機構の解明

テーマ2： 表面処理技術の開発 (大阪大学、ALPROT、アルバック)  
 Si アニール用レーザー開発 **表面処理システム**  
 アニール用システム開発 ※

テーマ3： 粉末成形技術の開発 (大阪大学、ALPROT)  
 粉末成形用レーザー開発 **粉末成形システム**  
 粉末成形システム開発

テーマ4： 調査・普及促進 (ALPROT)

実用化  
事業化

スライド 5

プロジェクト期間中の情勢変化

	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H26FY
		H23.3.11 東日本大震災	中間 評価	安倍内閣 発足	
テーマ1： CFRP切断加工 技術の開発		半導体レーザー 15W, 60% ファイバーレーザー 平均出力250W 固体ブースタレーザー CFRP加工テスト 倣い加工テスト 既存レーザー 加工共同実験		半導体レーザーシングル 20W, 65% ファイバーレーザー 平均出力6kW PCFブースタレーザー 三次元スキャナ加工機 三次元倣い加工機 開発レーザー 加工共同実験	
		H23 9月 ボーイング 787 羽田空港に到着		H25 7月 BMW i3 CFRPを車体に採用	
テーマ2： 表面処理 技術の開発		アニール用レーザー		表面加工システム	
		H24 4月ジャパン・デ ィスプレイ事業開始	シャープ 経営危機	H25 12月パナソニック プラ ズマ・ディスプレイ生産終了	
テーマ3： 粉末成形 技術の開発		パルスレーザー	粉末成形システム	終了	
				3Dプリンタ 爆発的ブーム	

3. 研究開発成果について (1) 研究開発目標の達成度

開発テーマと開発内容 (テーマ4調査研究を除く)

最終目標はすべて達成

テーマ	サブテーマ	開発内容	開発主担当⇒出口	達成度
テーマ1: CFRP切断加工技術の開発	高出力半導体レーザー開発	半導体レーザー開発 ※	浜松ホトニクス	○
	QCWファイバーレーザー開発	ファイバーレーザー開発 ※	古河電気工業	◎
	パルスレーザー増幅技術の開発	固体/PCFブースタ設計・開発 プリアンプ開発 PCFブースタ製作	レーザー研・浜ホト 古河電気工業 片岡製作所	○
	CFRPLレーザー加工・評価技術の開発	三次元スキャナ加工装置開発 三次元微い加工装置開発 加工・評価、材料準備	アマダミヤチ 新日本工機 産総研・古河電工 三菱化学	○
	パルスレーザー開発とCFRP切断機構の解明	プリアンプ開発 150W/300W PCFLレーザー開発 加工実験	古河電気工業 片岡製作所 接合研	◎
テーマ2: 表面処理技術の開発	Si アニール用レーザー開発	グリーンレーザー開発	レーザー研、浜松ホトニクス、アルバック	○
	アニール用システム開発	アニール用システム開発・評価※	アルバック	○
テーマ3: 粉末成形技術の開発	粉末成形用レーザー開発	プリアンプ開発 150W PCFLレーザー開発 加工実験	古河電気工業 片岡製作所 接合研	○
	粉末成形システム開発	粉末成形装置開発 成形実験・評価	アスペクト 産総研	△

※1/3実施者負担テーマ

目標の達成度: ◎大幅達成、○達成、△部分達成、×未達成

スライド 7

3. 研究開発成果について (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

中間目標	最終目標
<p>シングルエミッタ 波長:近赤外帯 出力:15 W 効率:60% 寿命:20,000時間以上</p> <p>アレイ 波長:近赤外帯 出力:200 W 効率:55% 寿命:20,000時間以上 自動組立が可能なこと ファイバー結合効率※ シングルエミッタ:80%以上 アレイ:60%以上</p> <p style="border: 2px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"><b>達成! 世界最高位</b></p>	<p>【参考】</p> <p>シングルエミッタ 出力:20 W 効率:65% ファイバー結合効率※:90%以上</p> <p>アレイ 出力:300 W 効率:60%</p> <p>事業化の検討の実施</p> <p style="border: 2px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"><b>達成! 世界最高位</b></p> <p>※ファイバーコア径105 μm、NA0.15相当</p>

課題	解決策
<p>発熱の低減と熱の除去 高出力と高信頼性の両立 ファイバ結合効率向上(シングルエミッタ) 実用化・事業化の検討</p>	<p>素子構造の最適化、ヒートシンク改良 端面劣化抑制構造の最適化 素子特性・レンズ特性の最適化 試作した素子を使った光源試作で有用性を確認</p>



3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

CFRP切断加工技術の開発 QCWファイバレーザ開発 (古河電気工業)

研究項目	評価目標			コメント	達成度
	評価項目	目標	成果		
研究開発項目1 ②-(1)-4 シングルモードQCWファイバレーザの作製	ピーク出力 平均出力 M <sup>2</sup> 高速変調	1.6kW 0.5kW 1.1以下 ≥100kHz	2kW 1 kW 1.1以下 ≥100kHz	ピーク2kWについては26年度加速予算 平均出力1kWについては製品化	◎
大出力マルチモードQCWファイバレーザの作製	ピーク出力 平均出力	6.4kW 2kW	6kW 6kW	マルチモード装置 平均出力6kWまでの製品化	◎

目標の達成度：◎大幅達成、○達成、×未達成

課題	解決策
半導体レーザの輝度向上とファイバ非線形の低減	60W励起LDモジュールの実現と量産化 低非線形Ybファイバの製作

装置化を行い、産総研に設置 ⇒ 事業化



SM2kW-QCW機



MM5kW-QCW機

開発したファイバレーザ

スライド 9

1/3実施者負担テーマ (平成23、24年度)

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

CFRP切断加工技術の開発 パルスレーザ増幅技術の開発 (レーザー研、浜ホト、古河電工、片岡製作所)

研究項目	評価目標		成果	達成度
	評価項目	目標		
研究開発項目1 (1) 高品位・高出力パルスレーザの開発	ビーム品質 M <sup>2</sup>	2~3	≤ 1.3	◎
	平均出力	1.5kW程度	1.52kW	○
	波長	1μm帯	1035,1040,1045 nm	○
	繰り返し周波数	75kHz~1,000kHz	150kHz~4MHz可変	◎
	パルス幅1	サブナノ秒~10nsの範囲で選択	400ps~70ns可変	◎
	パルス幅2	ピコ秒~ナノ秒可変(1ビーム、加速案件)	0.7ps~920ps可変	○
	ビーム結合技術 ファイバ全出力 12ビーム結合効率	自主目標 1.8kW 84%	1.79kW 82%(1.42kW)	○ △
	第2高調波変換出力 第2高調波変換効率 第3高調波変換出力 第3高調波変換効率	600W (200W×3ビーム) 40% 200W (70W×3ビーム) 13%	210W (1ビーム) ≥56% (基本波377W) 80W (1ビーム) ≥32% (基本波250W)	△ ○ △ ○
	加工試験	現有YAGレーザを改造してパルス供給。 1.5kWファイバレーザによる加工実験。 実験エリアの整備。加工システム技術開発センターと連携してCFRP加工試験を実施。	加工システム技術開発センターと連携して、全40日間のCFRP加工試験を実施し、多様な条件のレーザを供給した。	○

目標の達成度：◎大幅達成、○達成、△部分達成、×未達成

課題	解決策
増幅器コンセプト	高出力ファイバの冷却対策による高ビーム品質化
高出力化のスケラビリティ	高効率ビーム結合技術：コヒーレント結合、インコヒーレント結合
高機能性	パルス幅・繰り返し周波数可変技術

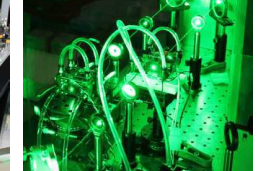
ビーム結合出力1.5kW達成!



ファイバ増幅器



ビーム結合



波長変換

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

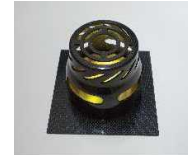
**CFRP切断加工技術の開発 CFRPLレーザー加工・評価技術の開発**  
**(産総研、アマダミヤチ、新日本工機、三菱化学、古河電工)**

研究項目	最終目標	達成度
研究開発項目1 (2)CFRP加工技術の開発 (3)パルスレーザーCFRP用加工システムの開発	1. 各種CFRP材の系統的な切断加工データ取得 ・連続繊維型熱硬化性樹脂(CFRP) ・短繊維型熱可塑性樹脂(CFRTP) 2. CFRP加工装置のグランドデザインを完成 3. 切断加工速度: 6 m/min以上 (基材厚み3 mm以上) 4. 加工品位: 切断面において反応層の厚み(HAZ)が100 μm以下(基材厚み3 mm以上) 引張強度 10%未満の低減(参照強度※に対して) ※ 参照強度: 機械加工試験片の引張強度	「達成」○ (2)つくば拠点設置機を用いて、 1. 全12種のCFRP/CFRTP材料に対して切断加工データを取得 2. 平板基板だけでなく、自動車用部材を模擬した立体成形品への精密加工を実証 3. 4. 加工特性の最高値として、 CFRP材料(6m/min、HAZ100 μm以下、引張強度-4%)、CFRTP材料(10m/min、70 μm以下、-5%) (3)大阪大開発機を用いて、 1. CFRPおよびCFRTP各1種の平板基板 2. キロワット出力のナノ秒パルス光(1.1kW、5ns)による高品位加工を実証 3. 4. 加工特性の最高値として CFRP(4m/min、HAZ30 μm以下)、CFRTP(5m/min、80 μm)を達成

CFRP: 熱硬化性樹脂、CFRTP: 熱可塑性樹脂、

目標の達成度: ◎大幅達成、○達成、×未達成

**加工特性を検討した全12種のCFRP/CFRTP材料に対して、10種において最終目標値を達成**



CFRP加工サンプルの例(立体成形品)

スライド 11

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

**パルスレーザー開発とCFRP切断機構の解明 (接合研、古河電工、片岡製作所)**

研究項目	評価目標		達成度
	評価項目	最終目標	
研究開発項目1 (1)高品位・高出力パルスレーザーの開発 ①ファイバーレーザーの高出力化技術の開発 1)ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発	150 W、10 ns、75kHzファイバーレーザーによる評価実験	・150 W、10 ns、75kHzのファイバーレーザーを用いたCFRP切断基礎実験の推進 ・CFRP切断加工システム開発のための基礎データの取得	○
	150 Wパルスファイバーレーザー開発、モジュール化技術開発および評価実験	・サブナノ秒ファイバーレーザー用のシード光源(パルス幅: 400 ps、繰返し: 1MHz)の開発 ・平均出力150WのPCF増幅器の開発 ・2ビーム結合のための結合ユニットの開発	◎
	150 Wサブナノ秒ファイバーレーザーアブレーション評価実験	・アブレーションプルームの挙動解析 ・CFRP加工の切断機構解析 ・短パルス化と短波長化の効果を明らかにする	○

目標の達成度: ◎大幅達成、○達成、×未達成

スライド 12

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

表面処理技術の開発 アニーリング用レーザー開発 (レーザー研、浜松ホトニクス、アルバック)

研究項目	評価目標と成果		成果	達成度
	評価項目	最終目標		
研究開発項目2 アニーリング用ブースター増幅技術の開発	平均出力	200~700W (1μm帯:基本波)	702W (波長1.064μm:基本波)	○
	繰り返し周波数 (実用性の高い加工速度を得るために必要)	1~150kHzのうち最適周波数	1kHz	○
	パルス幅	0.5~200nsのうち最適パルス幅	122ns	○
アニーリング用レーザーの波長変換モジュール開発	変換効率 (十分なアニーリングには532nmで140Wが必要)	20% (700W基本波から)	≥25% (700W基本波から)	◎
	パルス幅 (十分なアニーリング効果に必要)	100ns程度	100ns	○

◎ 大幅達成、○達成、×未達成

スライド 13

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

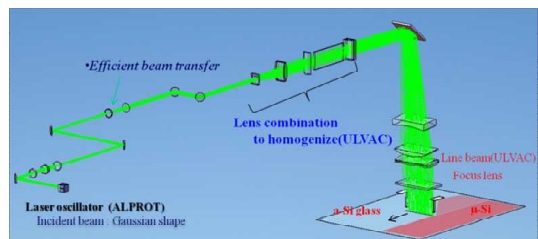
表面処理技術の開発 アニール用システムの開発 (アルバック)

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	最終目標	目標		
③-(2) 表面処理技術の開発	大型レンズ研磨装置	・大型異形光学部品の研磨加工技術を開発すること。	研磨幅: 500mm	850mm	○
	ワイドビーム光学系のシミュレーション	・光学シミュレーション技術を確立すること。	ビーム幅: 500mm 集光幅: 20μm 照射均一性: ±7%	750mm 20μm ±7%	○
	ワイドビームの形成	・高精度加工された異形レンズ類を用いた高度ホモジナイズ技術とワイドビーム整形光学系技術を開発する	ビーム幅: 500mm 集光幅: 20μm 照射均一性: ±7%	750mm 20μm ±7%	○
	ビームモニタリング	・ワイドビームの形状及び照射均一性を評価するためのビープロファイラーを開発する。	測定精度: ±2%以内 測定分解能: 5μm以下	±2% 2.5μm	○

最終目標の達成度: ◎大幅達成、○達成、×未達成

課題	解決策
実アニールでの信頼性 (事業化レベル)	実際にTFTでの評価をする。ユーザーとの連携。

構成部品の各仕様は達成。  
組合せ評価で成果確認済み。



スライド 14

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

粉末成形技術の開発 粉末成形システム開発 (産総研、アспект)

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	最終目標(基本計画)	最終目標		
研究開発項目3 基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化	①粉末焼結積層成形機構開発 ②複合レーザー照射方法 ③加エプロセス ④評価技術構築	・真空下においても動作可能な粉末焼結積層造形機構を開発すること。 ・異なる発振形式のレーザーを用いた複合レーザー照射方法を確立すること。 ・複合レーザー照射による粉末積層造形メカニズムを明確にしつつ、加工プロセス(照射条件、予備加熱条件)を最適化する。 ・レーザー加工試料の評価技術を構築すること。	真空下においても動作可能 照射方法の確立  造形メカニズムの明確化 最適条件の確立  試料の評価技術を構築  成形時間: 16時間(高さ50 mm) 精度: ±0.1 mm	・パルスレーザーとCWレーザーの重量実験実施 ・プロセス条件確立 ・強度のみならず組織評価が重要であることがわかった	△

目標の達成度: ◎大幅達成、○達成、△部分達成、×未達成

課題	実用化
真空下で動作する金属積層造形装置の実現とその効果の確認	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; background-color: yellow;">平成25年7月終了</div> NEDOイノベーション事業に移行し、実用化に向け装置を開発



3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

調査・普及促進 (ALPROT)

研究項目	最終目標	達成度
研究開発項目4 技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進	・開発光源および開発された光源を利用した加工システムのユーザーとの連携 ・広範囲なものづくりに活用されるレーザー加工技術の実用化の可能性を明確にする ・本開発の成果報告会の開催 ・レーザー加工実証試験の開催	「達成」○ 技術調査委員会とテーマ作業部会(国際・戦略・素材・加工、表面改質、粉末成形)を開催した。 ・レーザー光源等の調査 ・ユーザーニーズについて議論 成果報告会/シンポジウムや展示会を開催し、成果をアピールできた。

目標の達成度: ◎大幅達成、○達成、×未達成

技術調査委員会

(委員長: 慶應大学名誉教授 小原實 先生)

有識者の貴重な意見を聞くことができ、プロジェクトを充実させることができた。

第2回ユーザー連携実用化推進シンポジウム  
平成26年12月15日、虎ノ門ヒルズフォーラム

・研究開発進捗の報告  
・パネルディスカッション: 「日本のレーザー及びレーザー加工システム開発」  
多くの参加者があり、成果の普及に有効であった。



第2回ユーザー連携実用化推進シンポジウム

◆プロジェクト全体の目標、および達成状況

	目標	達成状況
CFRP切断加工技術の開発	CFRP等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。	各種レーザーを用いてCFRP素材の加工実験と評価を行い、高品位のCFRP加工の見通しがついた。
表面処理技術の開発	高精細フラットパネルディスプレイやフレキシブルディスプレイ製造に適用できるレーザーアニール技術を開発する。	アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現し、アニール実験が順調に進んだ。
粉末成形技術の開発	チタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。	真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。開発した装置を展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。
調査・普及促進	プロジェクトの成果の普及のため、有識者を含めてレーザーとレーザー応用について議論する。	調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。展示会・シンポジウム等を開催し、成果の普及促進に努めた。

事業化可能な成果を出せたことは、大きな収穫

スライド 17

◆知的財産権、成果の普及

	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H26FY	計
特許出願(外国出願)	1	18 (3)	17 (2)	6	9 (1)	51 (6) 件
論文(査読付き)	0	15 (8)	17 (11)	25 (20)	17 (16)	74 (55) 件
研究発表・講演	1	47	67	73	58	246 件
受賞実績	0	0	1	0	1	2 件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	3	1	2	6 件
展示会への出展	0	1	2	4	9	16 件

※平成27年7月31日現在  
プロジェクト終了後の件数はH26FYを含む

スライド 18

◆ALPROTにおける知財マネジメント

ALPROT知的財産権取扱規程を  
定めて、管理



調査・普及促進 (ALPROT)

技術調査委員会とWG(回数はプロジェクト全期間)

出席者は委員とプロジェクト開発実施者、NEDO、経産省、ALPROT事務局

委員会、WG	委員数	回数	議事内容
技術調査委員会	25名	8回	実用化促進のため、ユーザーニーズの検討を行なった。レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向と標準化、新素材・加工、表面改質、粉末成形の各WGテーマの実施者からの報告、検討を行なった。
国際・戦略テーマWG	10名	6回	現状のレーザー及びレーザー加工技術の動向と、今後どのようなレーザーとレーザー加工技術が必要とされるかの検討を行なった。ドイツの自動車産業におけるレーザー加工や世界的技術動向の現状を把握した。アジア地区の動向や日本の標準化戦略やニーズにマッチしたレーザー及びレーザー加工について検討した。
新素材・加工テーマWG	6名	7回	開発内容を確認し、ニーズ面からどのようなレーザーが必要か検討を行なった。CFRP素材の各種仕様とその加工や評価等についての報告が行なわれた。ユーザー側のニーズや加工スペック等が提示され、それらの加工が可能なレーザーや加工法に関して検討した。
表面改質テーマWG	7名	6回	本WGでは、ディスプレイや太陽電池の製作に最適なレーザー加工のあり方を検討した。ディスプレイ用途のレーザーアニールの開発目標値とその背景が報告された。ディスプレイ領域の市場動向、フラットパネルメーカーの技術ニーズ、太陽電池製造におけるレーザー加工のニーズ検討を行なった。
粉末成形テーマWG	2名	5回	粉末成形の医療関連活用に関する技術情報を検討した。レーザーを活用した造形技術の現状を報告した。ニーズとしてチタン粉末を活用した医療用部品の仕様等に関して検討を行なった。開発した小型プラットフォームの見学を行ない、開発目標の確認を行なった。

3. 研究開発成果について (3) 成果の普及

**NEDOフォーラム NEDO主催**  
・東京国際フォーラム 2015/2/12～2/13

本プロジェクトの成果(半導体レーザー、QCWLレーザー、CFRP加工サンプル)の展示を行った。

レーザー関係者だけでなく、医療やバイオ等幅広い分野の来場者があったが、レーザーとレーザー加工について興味を持っていただいた。



レーザーEXPOの展示風景

**レーザーEXPO NEDO主催**  
・パシフィコ横浜 2015/4/22～4/24

加工サンプルや開発レーザー等のプロジェクトの成果物展示を行った。多くの来場者にプロジェクトとその成果をアピールすることができた。

併設する会場で、シンポジウム/成果報告会を開催した。100人以上の参加があり、盛況であった。レーザー加工に関する要望が強いことがわかった。



レーザーEXPOのシンポジウム/成果報告会

スライド 21

3. 研究開発成果について (3) 成果の普及

**CFRP加工の国際会議LPGC2013を運営 (ALPROT自主事業として)**  
**同時にCFRPのレーザー加工に関するワークショップを主催**  
平成 25年4月23日～4月25日 パシフィコ横浜・会議センター

**LPGC2013 (International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composite Materials)**  
**CFRP等複合材料のレーザー加工に関する国際シンポジウム)**

光とレーザーに関する国際会議 OPIC2013 (Optics & Photonics International Congress) の専門会議として開催 ⇒海外研究者との交流



国際会議LPGC2013の会議風景

**CFRP材料の産業応用研究最前線ワークショップ**

講演者: 名古屋大学・ナショナルコンポジットセンター、東レ(株)、三菱樹脂(株)、トヨタ自動車(株)、(株)IHI

国家プロジェクトでのCFRP加工の取り組みや、自動車/航空機を中心としたCFRP適用の講演 ⇒ユーザー連携につながる取り組み



CFRP材料ワークショップの会議風景

スライド 22

**「実用化」の定義**： 既存製品の性能向上や新製品の開発に活用できる段階まで、プロジェクトで開発した技術を整備する。

本プロジェクトでは「実用化」を求められているが、さらに市場での技術的優位性の検討を行い、製品展開の可能性を見極めて、事業化に結び付けるよう努力した

⇒ 実際の実用化・事業化の詳細は各実施者の報告で

スライド 23

◆研究開発のマネジメント(PL) 事業化に向けての取り組みも含めて

項目	内容	マネジメント
予算	年度予算の策定	NEDO、実施者間の調整
実施テーマ	中間評価における見直し	NEDO、実施者との協議
技術開発会議	PL主催 実施者の研究進捗報告	開発進捗状況、開発計画の確認、
技術調査委員会	レーザー加工の国際動向について議論	プロジェクト方針への展開
テーマWG	業界動向、レーザー応用について検討	ユーザーニーズ等について協議
開発サイト訪問	大阪大学、産総研の現地視察	開発装置、実験状況などの現地確認
実施機関訪問	実施機関の研究所、事業所見学	開発体制等の確認、関係者との情報交換、実用化に向けた取り組み確認
連携実験	光源技術開発センター(大阪大学)における連携実験に参加	CFRP加工実験状況の把握



実施者間の連携強化、ユーザーを意識した実用化意識を高めることができ、開発目標の達成と実用化・事業化に結び付けることができた

スライド 24



4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて (1)成果の実用化・事業化の見通し

◆成果の展開

担当機関	開発項目	成果の継承
レーザー研	PCFブースタの開発	成果の継承⇒ 古河電工、片岡製作所
接合研	パルスレーザー開発	〃
	パルスレーザー開発 メカニズム解明	国プロジェクトへの成果の継続 (戦略的イノベーション創造プログラム(SIP))
産総研	CFRPLレーザー加工	成果の継承⇒ アマダミヤチ、新日本工機
	材料評価技術の確立 X線CT、寿命試験、サーモグラフィ等	CFRP・他のレーザー加工材料の評価に適用 民間企業との共同研究に活用

◆実用化：自社の製品への技術の波及

担当機関	開発項目	成果の実用化
片岡製作所	PCF レーザー	PCF レーザー増幅技術の製品への展開
アマダミヤチ	三次元スキャナシステム	高パワーレーザーを扱う水冷スキャナ技術
新日本工機	三次元CFRP倣い加工技術	CFRP等の倣いセンシング、加工ヘッド技術
浜松ホトニクス	アニール用レーザー	高出力パワーパルスレーザーを展開
古河電気工業	パルスレーザー	パルスファイバレーザーを展開
アルバック	シリコンアニール技術	業界動向を注視⇒ 自社製品への展開

◆事業化：自社での製造・販売

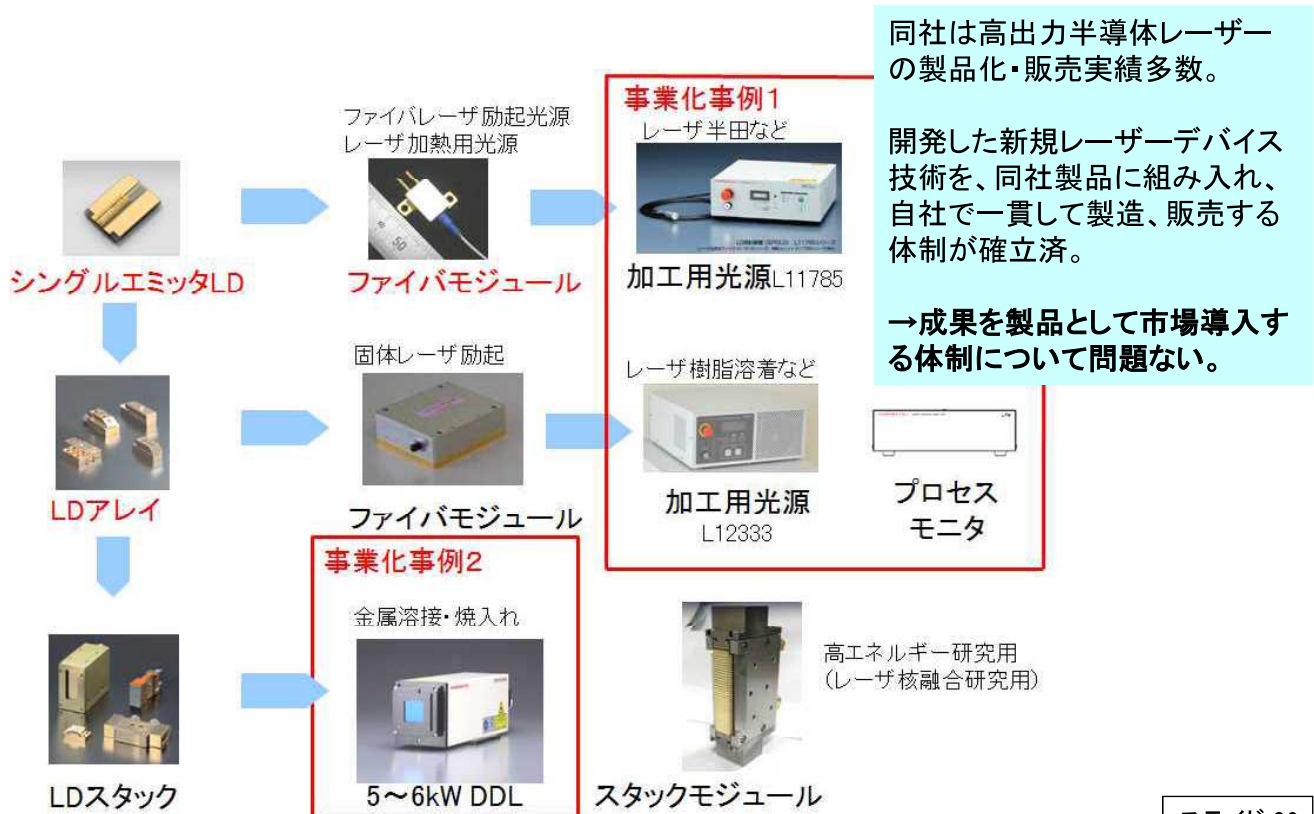
担当機関	開発項目	成果の事業化
浜松ホトニクス	半導体レーザー	LDの製造・販売、事業化
古河電気工業	ファイバレーザー	LD、ファイバレーザーの量産化
アспект	真空環境での粉末成形	金属の粉末成形装置の製造・販売

スライド 25

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて (1)成果の実用化・事業化の見通し

事業化への取り組み： 高出力半導体レーザー開発 (浜松ホトニクス)

1/3実施者負担テーマ



スライド 26

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて (1)成果の実用化・事業化の見通し

事業化への取り組み: **QCWファイバレーザ開発 (古河電気工業)**



60W励起半導体レーザー(915nm)  
平成26年度から量産化開始



1kWマルチモードファイバレーザ  
平成26年度より量産化開始

国産のファイバレーザ調達へ道が拓けた！



6kWマルチモードファイバレーザ  
平成27年度より製品リリース

スライド 27

4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて (1)成果の実用化・事業化の見通し

事業化への取り組み: **粉末成形システムの開発 (アспект、産総研)**

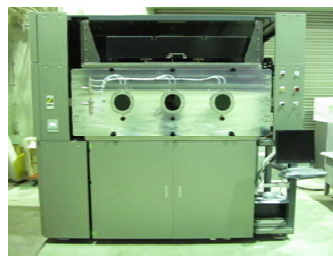
NEDO  
ALPROT

平成25年7月  
打ち切り

NEDO事業終了後も普及活動実施  
展示会・講演会等多数実施



小型プラット  
フォーム



実用型プラット  
フォーム

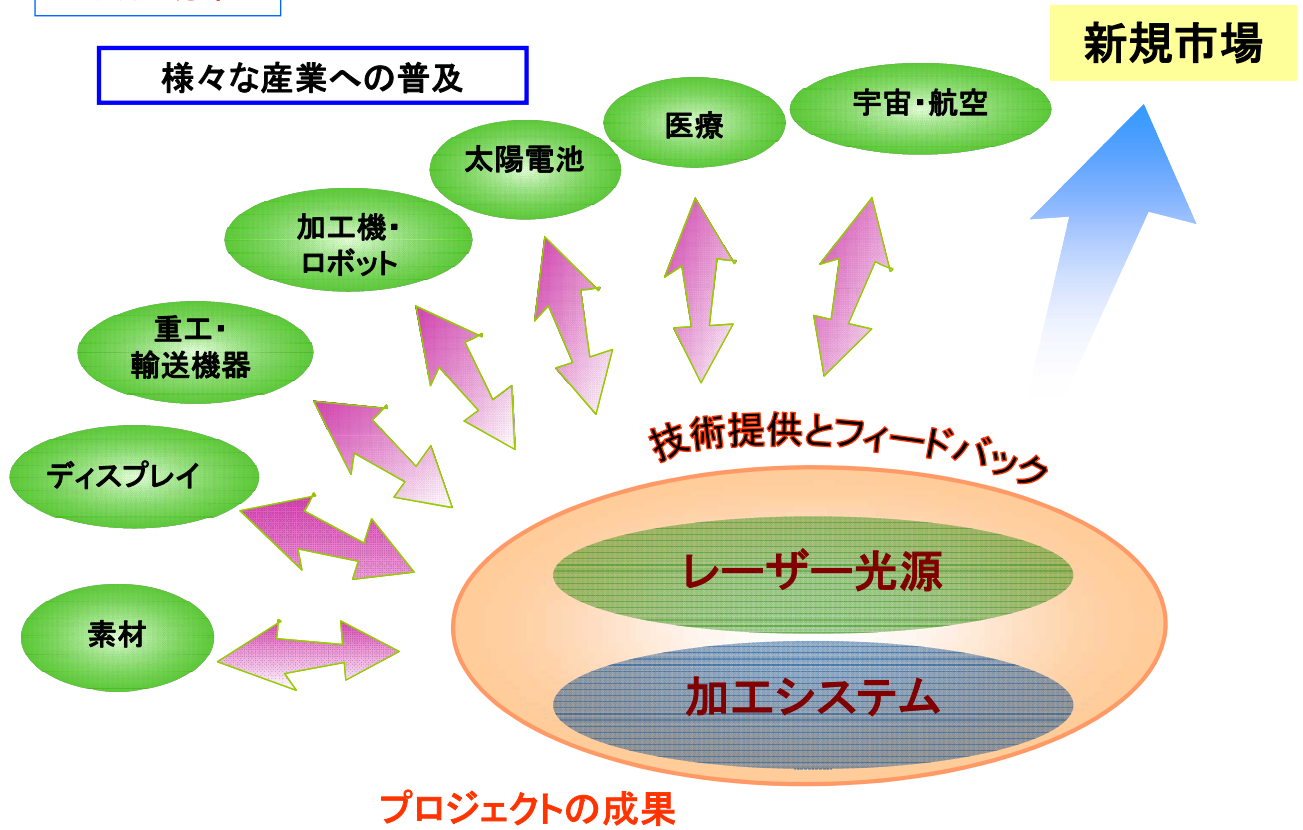


産総研においては、企業からの技術  
相談や研修生受け入れ、共同研究  
等の実施 ⇒成果の普及

実用型プラットフォーム量産機デビュー

スライド 28

◆波及効果



## 参考資料 1 分科会議事録

研究評価委員会  
「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」(事後評価)分科会  
議事録

日 時：平成27年8月20日(木) 10:10～17:25

場 所：WTC コンファレンスセンター Room A

出席者(敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長 戸倉 和 東京工業大学 名誉教授  
分科会長代理 前川 克廣 茨城大学 大学院理工学研究科 特任教授  
委員 沖野 圭司 オムロンレーザーフロント株式会社 品質環境部 取締役 部長  
委員 神成 文彦 慶應義塾大学 理工学部 電子工学科 教授  
委員 緑川 克美 国立研究開発法人 理化学研究所 光量子工学研究領域 領域長  
委員 山口 滋 東海大学 理学部 物理学科 教授  
委員 吉田 実 近畿大学 大学院総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻 教授

<推進部署>

弓取 修二 NEDO ロボット・機械システム部 部長  
照沼 勝彦 NEDO ロボット・機械システム部 主幹  
加藤 友章 NEDO ロボット・機械システム部 主査  
菅野 智行 NEDO ロボット・機械システム部 主任

<実施者※メインテーブル着席者及び発表者>

尾形 仁士 次世代レーザー加工技術研究所 研究総括理事(PL)  
神谷 保 次世代レーザー加工技術研究所 専務  
松本 修 次世代レーザー加工技術研究所 研究部長  
間野 隆久 次世代レーザー加工技術研究所 研究部長代理  
吉田 治正 浜松ホトニクス 開発本部 グループ長代理  
松下 俊一 古河電気工業 情報通信・エネルギー研究所 マネージャー  
宮永 憲明 大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター 教授  
新納 弘之 産業技術総合研究所 首席研究員  
安在 建治 アマダミヤチ チームリーダー  
古川 航一 新日本工機  
塚本 雅裕 大阪大学 准教授  
大勝 敏秀 アルバック FPD/PV 第3技術部 室長  
加藤 義則 浜松ホトニクス 部員  
萩原 正 アスペクト 取締役 LS 事業部長

<評価事務局等>

中谷 充良 NEDO 技術戦略研究センター 主任研究員  
佐藤 嘉晃 NEDO 評価部 部長

徳岡 麻比古 NEDO 評価部 統括主幹  
内田 裕 NEDO 評価部 主査

## 議事次第

### (公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法
5. プロジェクトの概要説明
  - 5.1 「事業の位置付け・必要性」及び「研究開発マネジメント」
  - 5.2 「研究開発成果」及び「実用化に向けての見通し及び取り組み」
  - 5.3 質疑

### (非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
  - 6.1 CFRP 切断加工技術の開発
    - 6.1.1 高出力半導体レーザー開発
    - 6.1.2 QCW ファイバーレーザー開発
    - 6.1.3 パルスレーザー増幅 (ブースター) 技術の開発
    - 6.1.4 CFRP レーザー加工技術と評価技術の開発
    - 6.1.5 パルスレーザー開発と CFRP 切断機構の解明
  - 6.2 大面積表面処理技術の開発
    - 6.2.1 アニール用グリーンレーザー開発
    - 6.2.2 大面積表面処理システム開発
  - 6.3 粉末成形技術の開発
    - 6.3.1 粉末成形システム開発
7. 全体を通しての質疑

### (公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他
10. 閉会

## 議事内容

(公開セッション)

### 1. 開会、資料の確認

- ・戸倉分科会長挨拶
- ・出席者の紹介（評価事務局、推進部署）
- ・配布資料確認（評価事務局）

### 2. 分科会の設置について

研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき評価事務局より説明。

### 3. 分科会の公開について

評価事務局より資料2及び3に基づき説明し、議題6.「プロジェクトの詳細説明」および議題7.「全体を通しての質疑」を非公開とした。

### 4. 評価の実施方法

評価の手順を評価事務局より資料4-1～4-5に基づき説明した。

### 5. プロジェクトの概要説明

#### (1) 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント

推進部署より資料6-1に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

#### (2) 研究開発成果及び実用化、事業化の見通し

実施者より資料6-1に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【戸倉分科会長】 どうもありがとうございました。

これから委員の先生方からご質問、ご意見を頂戴することになりますが、個々の技術につきましては議題6で詳細の説明がありますので、ここでは事業の位置付け・必要性、マネジメントについて、忌憚のないご意見、あるいはご質問を頂戴できればと思います。委員の先生方、何かございましたら手を挙げていただいて、ご発言いただければと思います。よろしくお願いします。

【沖野委員】 最終ユーザーといろいろな交流を行ってシンポジウムなどを開かれたという説明がありましたが、たとえば最終ユーザーの要求仕様が変わるようなことはなかったのですか。この5年間、いろいろな社会的な状況、技術的な進歩などがあったと思います。たとえばCFRPの加工で、HAZ (Heat Affected Zone : 熱影響部) の領域が100 $\mu$ mという要求でそれを目標にして進められて、それは達成されたと思うのですが、実際にはその100 $\mu$ mよりももっと小さい値でないと航空業界とか使えないとか、そういう最終ユーザーの要求の仕様が変わるようなことはなかったのかどうか、お聞きしたい。

【神谷専務】 全体を運営した組合（次世代レーザー加工技術研究所）からご説明いたします。いくつか細かい議論があって、その一つ一つ非常に得がたい意見もありました。変更はなかったかということでは、たとえば表面改質では、当初500mm幅、50cmで実施しようということでしたが、この分科会をつくったら、もういまはそれではだめだ、700mmぐらいほしいということでしたので、開発はスタートしていましたが、急遽700mmまで対応するような開発をしようという変更をしました。CFRPについては、それぞれ何社かユーザーに見ていただいて、100 $\mu$ mぐらいの劣化であれば十分使える場所があるというご意見と、いまあったように強度を非常に問題にする部分では、やはり損傷はゼロに限りなく近づけなければだめだということで、用途によってそのスペックが違うということが具体的に個々のユーザーからご指示がありました。

【神成委員】 まず、素晴らしい成果が出ていますので、それに敬意を持って伺ったことをベースにしての質問ということでお聞きしたい。最初のほうの説明で、当初、すでにIPG社のシェアが70%あり、ドイツ等



では非常に大きなプロジェクトが進んでいる中でのスタートだったというところで、スライドの 15 ページに横軸がパルスエネルギーで縦軸が繰り返し周波数という表があります。残念ながらここに書いているのはコヒーレント社のような完全に製品化しているものが対象としてプロットしてあるわけで、でもそこには席卷している IPG 社のパワーレーザーもないし、ドイツのプロジェクトの成果もないというところから、あたかも何か最先端の、いままで達成されていないところを目標に置いたようなグラフになっている。そのスタート時におけるベンチマークの図としては、少しふさわしくないのではないかと思います。

また 5 年間を通じて当然社会的動向や、世界的なレーザー製品の推移、各国のプロジェクトにおけるアウトプットも変わっているわけですから、それらに対応するかたちでのエネルギー対繰り返しパルス周波数というところでのレーザー光源についてのベンチマークが、最後に比較のかたちであるべきではないかと思えます。

そのところがまったくなくて、基本的には目標値に対して達成というかたちで、プロジェクトとしてはいいのですが、ご説明の中でも 5 年間の中でいろいろな状況が変わってきており、当然世界のレーザー開発の状況も変わってきているということでしたので、そのベンチマークということを念頭に置くと、結果的にはターゲットが 5 年間の世界の流れに対してもうちょっと厳しいところをねらってもよかったのではないかと。あるいは、もう十分にその目標は 5 年間の世界の流れの中においても意義のある、トップを走っていたようなデータであったのだということを見せるような評価の図があってもよろしいのではないかと思います。それはこれから各実施者の説明の中で出てくるようなご計画なのでしょうか。

**【尾形 PL】** 特に kW 級のパルスファイバーレーザーの開発については、後ほどの具体的な説明の中でされると思えます。表面处理等については、これに類するレーザーは、これは平成 21 年ごろの話ですので、その当時は存在しなかったということで、ベンチマークとしては、たとえばこの 15 ページのグラフでほぼ正しいのではないかと思います。粉末成形についても、切断と違って適当に溶けて蒸発しないといったところのスペックということで、こういったところをベンチマーク、目標として掲げたと私は考えております。少なくとも一番興味を中心は、kW 級の CFRP 切断用のレーザーだと思えますので、それはあとで宮永先生から説明があると思えます。

**【戸倉分科会長】** いまのご質問に対して個々のご説明の中でそういうことも織り込んでお話しただけかと思えます。皆さんもそういうところは感じていて、目標を達成するというのはいくつ大事なことでもありますし、けれどももう少し攻める姿勢がどこかに出ていてもいいのではないかとのご意見かと思えます。

**【緑川委員】** それに近い意見ですが、お話を聞いた中では中間評価から少し方向を変えられて、最終的には事業化可能な成果がいくつも出て、それは収穫だということを、私も大変高く評価します。

ただ一つ希望を言えば、このプロジェクトの中で何かキャッチアップ的ではなくて、これができたので世界の流れが今度変わるのだというものが一つでも出ればいいなと思っていました。それはもちろん個々の技術としてはこれから発表されると思うのですが、本当にこの技術でレーザー加工、あるいはファイバーレーザーの流れが何か変わりそうだというものがありますか。

**【尾形 PL】** たぶんアドバンス的に上げられるというのはなかなか難しいと思えますので、その点もそれぞれ担当された技術開発の中で誇れるところを説明していただけるものと思っております。

**【緑川委員】** それからこれは産学の連携の加工のプロジェクトですが、加工で私が一番感じているのは、どうしてもただ当ててみてどうなったと、現象を見ただけなので、違う場所でやるとまた一からパラメーターを振らなければいけないような加工の体制から、このプロジェクトで少し理論とかシミュレーションのようなものにおいて、もうこういうパラメーター、材料だったら、こういうスケールができるという、産学の学の中に加工の理論、あるいは専門家のようなものを入れれば少しよかったのかと感じていますが、その点はいかがでしょう。

**【尾形 PL】** 特に CFRP に関しては、スタートの時点で、たとえばどういう波長、パルス幅、パルスエネルギー

一で、繰り返し周波数はどれくらいで照射すればいいかというデータがほとんどないままに、CO2 レーザーとの類推等から目標値が設定されているわけです。

実際に、特に CFRP の加工に関しては kW 級の最終の目標のレーザーが、最終年度の後半に完成するというスケジュールになっていましたので、それではいろいろな見通しがなかなか得られにくいということで、私から NEDO のほうにもいろいろお願いしました。

また実施者の皆さんにそこまでの出力がでなくてもいいからアベイラブルなレーザーを調達して、少なくとも 2 年度目ぐらいからは CFRP の加工実験をしようということで、数十 W とか 100W クラスのパルスレーザーを調達したり、あるいは一部大阪大学に設置されているものをお借りしたりしながら、いまおっしゃったようなことに対する見通しをできるだけ得ながらやりたいということで進めました。

全部読んでいただくのは大変ですが、この事業原簿の中には、特に CFRP の加工に関しては系統的ではないのですが、いくつかいまおっしゃったようなことを見通せるような、たとえばいま申し上げたいいくつかのパラメーターに対して、波長は基本波がいいのか、2 倍波がいいのか、3 倍波がいいのかといったようなことに対する定量的な結果まではなかなか得られなかったのですが、そういったことが結果としてかなり出てきています。この中かなり記載されておりますので、ぜひご参考にしていただければと思います。

**【弓取部長】** いろいろ実施者の皆さんといい成果を出させていただいているとは思いますが、その中でも先ほど来、出ています CFRP のところは、従来ウォータージェットのようなもので加工していたところがレーザーで加工できることは、大きな変革で、特にウォータージェットの場合は複合材料ですとその界面に水が入るとどうしても界面剥離が起こってしまって、圧倒的に性能も耐久性も悪くなってしまふところが、レーザー加工だとそれがない。

もちろん熱だれの問題はあるのですが、その領域を限りなく小さくする方向さえ見つかれば、その加工方法としては圧倒的に強いものができる。従来とはまったく違う領域に、しかも加工速度がかなり速く実用性を見通せるところまで持ってこられたことは、従来と比べて大きくジャンプアップできた成果ではないかと思っています。

**【戸倉分科会長】** いまの緑川委員のご質問は、材料が違った、場所が違った、道具が変わったとすると、また一から条件出しをしなければいけないようなことがあるだろう。それに対して普遍的な得られるものが何かあったかというご質問ではなかったかと私は理解しているのですが。

**【弓取部長】** 私のお答えしたのは、冒頭緑川委員がおっしゃったことに対してです。

**【戸倉分科会長】** そうですか。わかりました。

**【山口委員】** いまの緑川委員のご質問にかかわることですが、このプロジェクトが世界をリードするようなところは何か。前半部でロボット部の加藤さんがご説明なされた中で、スライド 16/25 のところに初期的には CFRP 切断加工の技術として多波長でやるというすばらしい計画がされています。PCF (Photonic Crystal Fiber : フォトニック結晶構造ファイバー) などを用いたブースターを入れて、3 波長にされて、さらにそれを変換し、これがまた加工へ返ってくるのかどうかというところがあったと思いますが、これは結構重要なところでして、今後この波長変換のところは進めるご予定があるのかどうか。技術的にはすごく大事なところではないかと思いますが、どこへ、どう使うというのはまだ出口が明確でないから途中で少しスローダウンというのか、最後の尾形 PL のほうでご説明されたスライド 25 に行くと、ちょっと波長変換のところは一つもないのかというかたちに見えるところがあるので、どのようにされるのかをお聞きしたい。

もう一つ、古河電工の説明で、QCW (Quasi-Continuous Wave oscillation : 準連続発振) から始まって 6kW ぐらいまで、なかなかこれだけのレーザーをつくるのは簡単ではない。CFRP のところへ絞って出口をとるところをやったから 6kW なのかもしれませんが、6kW あるともっといろいろなことができるのではないかと。このところの展望について、ただ単に商品化ということで CFRP とか、どうもそのあた

りしかないのではないかという雰囲気には「こじんまり」と収まってしまっていますが、今後 6kW あるファイバーレーザーはたぶん IPG 社などに比べても性能はよいのではないかと思います。このへんをどうお考えになっているのかお聞きしたいところです。

**【尾形 PL】** 最初の 2 倍波、3 倍波のお話ですが、これは私の説明の仕方が悪かったのかもしれませんが。このプロジェクトは今年の 2 月までで終了ということでした。先ほど申しましたように大阪大学で開発していた kW 級のパルスレーザーが 1 $\omega$ のところ完成したのがほぼその終了時点の間際でしたので、それを用いて 2 倍波、3 倍波を目標どおり 3 ビーム束ねて実証するということができなかったということで、スローダウンしたということではありませんでした。申し訳ないのですが、時間切れでそこまで実証できなかったということです。

おっしゃいますように、やはり 2 $\omega$ で 600W とか 3 $\omega$ で 200W は、たぶんまだ世の中では製品として出ていないレベルですので、有効活用は非常にいろいろなところでできるのではないかと思います。CFRP の切断に関してもまだ定量的なデータは示せておりませんが、1 $\omega$ に比べて 2 $\omega$ 、3 $\omega$ は加工面が非常にスムーズで、しかも HAZ が非常に少ないといった定性的なデータは得られていますので、今後こういった精密な加工等にも使えるのではないかと思います。

私は目標が CFRP でしたので、それしか申し上げなかったのですが、QCW については事業化の計画等について、古河電工のほうから説明していただけませんか。

**【塚本准教授】** 公開できるところで私がお話いたします。まず一つ目の質問の波長変換について、午後から説明いたしますが、150W 級のを片岡製作所と最終的にやりました。おっしゃるとおり波長変換を続けていかないといけないと思っていますので、実は片岡製作所と接合研のほうで共同研究契約を締結して以後進めていくことになっています。

もう一つ付け加えますと、内閣府の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）の革新的設計生産技術のほうに私どものグループが採択されており、そこに片岡製作所も技術協力ということで入っています。古河電工に関しては、私がまず採択されたものは金属の 3D プリンターの基板技術となるレーザーコーティング技術ですが、そこに古河電工も参画していただいております。そこで今回開発された技術をまた活用していくことになっています。

**【戸取部長】** NEDO から、ご質問にピタッと答えられるかどうかわかりませんが、レーザー加工というと、いままでどちらかというとパワーでガンガン切っていくということだったかと思うのですが、今回 CFRP でもそうでしたように、新素材になるとパワーだけではなくて波長、パルス幅などを考慮してうまく切っていく方法を考えていかないといけないと思います。

特に日本は新素材が非常に強いので、さまざまな素材が出てきたときにパワーだけでガンガン切るという方法がいいとは思っていません。そういうところを今回のプロジェクトからもヒントを得ており、将来的に、次に何か一手を打つとするならば、やはりそういう観点で、そもそもレーザーで切るということはどういうことなのか、材料物性まで遡った素材に適した切り方とはどういうものなのかということまで踏み込んだレーザー加工技術開発を実施していかなければいけないと思っています。これは今回のプロジェクトの中で十分できてはいないのですが、プロジェクトでそういうヒントを得て、次の一手としてはそのようなところに踏み込んでいこうかと少し野心的には考えています。

**【戸倉分科会長】** このあたりのお話につきましては、午後少し熱い議論ができるかと思っています。

**【吉田委員】** 二つあります。一つ目は先ほど塚本先生がずいぶん答えてくださった内容になってしまうのですが、約 10 年間のブランクがありました。正直なところ外から見ていると、レーザーをやってはいけない何かがあったのかというぐらいブランクがあったわけですが、それに対してレーザーのプロジェクトを改めて始められた。ちょっと俗な言い方をしますと、みそぎをされたようなかたちになって、それ自体がすごく意味のあることだと思います。

中間評価ではキャッチアップ的だという評価もあったかと思いますが、ただ10年間のブランクがあってキャッチアップに近いところから始めるのは、ある意味致し方ないところかと思いますが。方法などを変えて、いままで海外が達成している数値をよりよい方法、たとえばバルクのレーザーからファイバーレーザーに変わっていくような方法で達成していくこと自体も悪くないと思います。ただ大事なものはこれからだと思います。

ここからが一つ目の質問になります。せっかくキャッチアップから、先ほど尾形 PL からもお話がありましたように、世界を凌駕するようなデータ、性能が出ているところに、次はキャッチアップされる立場になりますので、今後どうやって逃げ続けていくのか。これは今回のプロジェクトが終わったあとの話になってしまいますので、なかなか難しいことかと思いますが、お聞かせいただけるとうれしいです。

もう一つ、成果の実用化の位置付けとでも言いましょうか、たとえば報告書を拝見していて、私の読み方が悪かったのかもしれないかもしれませんが、日本国内でこの NEDO のプロジェクトで開発された技術を適用するのは日本の産業競争力の強化が目的だと理解をしていますが、その考え方で間違っていないでしょうか。この2点を教えていただきたいと思います。

**【弓取部長】** 先ほどの話とちょっとかぶるのですが、新しい素材をどういうふうにもうまく切っていくか、その波長やパルス、物性にまで踏み込んで学理に基づいた研究を体系的にやっていく。これは欧米でもまだできていない部分ではないかとわれわれは認識しています。ですからそこから踏み込んで牙城を切り崩していくための事業を考えていておりますし、それは実際に実現するのではないかと考えています。

旗を振ってそれを推進していくのがわれわれの役割だと思っていますし、ブランクがあって、この5年間プロジェクトを実施して、またここで終わりですと、これはまったくこのプロジェクトの価値を一つ下げてしまうことにもなりかねません。実用化で出た価値、プラスさらに示唆に富んだ成果が出ていますので、それをいかに次につなげていくかというところも成果の一部として先生方には今後ともご指導いただきながら、ウォッチングしていただきたいと思います。ご期待いただければと思います。

**【神谷専務】** 二つ目のご質問ですが、これは国のプロジェクトなので、国費を使って研究させていただいている。税金を使わせていただいていますので、狭い意味ではこの成果は税金を使わせていただいた企業が、税金としてフィードバックする。要は利益を上げて、その利益に見合った納税をすればいいわけです。そういう意味ではこのプロジェクトでお金を使った人たちは、頑張る事業を立ち上げて、それを利益のかたちに一部税金で戻すことが狭義の目標です。

ただこれだけマーケットも研究・製造体制もグローバル化していると、シンプルにそれができるかどうかという議論はあろうかと思いますが、一応組合としてはそういう建前で成果を上げましょと、事業化を強く意識して進めてきた経緯があります。

**【前川分科会長代理】** まずプロジェクトマネジメントとして私はかなり評価したいと思います。中間評価で三つの出口を明確にされて、特に高出力、高品位レーザーの開発に特化して CFRP の切断の加工技術を高めているところはかなり成果が出ていると私は思います。ただ、いまもこれからどうするのだという話もありましたが、これを担当されている NEDO のロボット・機械システム部の強みとして、やはりロボット技術があるように思います。

ほかの加工全般を見ても、いま加工現場ではロボットが導入されており、ある意味では日本の強みであるロボット技術をこのレーザーを使った加工のほうに応用するような検討はなかったのでしょうか。これは事後評価としてはちょっと不適切な質問かもしれませんが、今後の方針として、特にロボット技術の強みを活用する方向は考えられないのでしょうか。

**【戸倉分科会長】** 大変示唆に富んだご意見だと思います。

**【弓取部長】** ご指摘のとおりで、やはりロボット技術とレーザー技術、そして最近盛んに言われている IoT (Internet of Things : モノのインターネット) やインダストリー4.0 等、コンセプトも出ています。ロボ

ットという概念をどういうふうにとらえるかですが、IoT やインダストリー4.0 も広義で言うと産業のロボット化と言いますか、工場のロボット化、生産システムのロボット化、その中でレーザーの果たす役割は大きいですし、親和性が非常にいいと思います。

ですからご指摘のようにこれからわれわれロボットと生産システム、生産技術開発、両方を見ていますので、ぜひそこはうまくコンバインして、融合させていきたいと思います。次のプロジェクトでは、いただいたご示唆を実現できるように検討させていただきたいと思います。

【戸倉分科会長】 本日は事後評価ですから済んだことを評価するわけですが、先ほどもご意見がありましたように、一歩先んじてやるものを探していくうえの一つのサジェスチョンかなという気もしなくもないように思っています。

【弓取部長】 今回のプロジェクトは、確かに実用化という観点で、ものができたというのもあるのですが、次につなぐ示唆がいろいろ出てきているという点でも非常にやる価値があったプロジェクトではなかったかと推進部署としては思っております。

【戸倉分科会長】 皆様、長い間、これだけのチームで仕事を進められたことは敬意を表させていただきます。ご苦労も大変あったと思うのですが、どういう企業や団体が入っているかというのを見ると、これは本当にやる気があるのかな、やる気がないのかなとちょっと思いたくもなったりする場合があります。

たとえばCFRPが出てきますと、これは航空機や自動車などが当然出てくるわけですが、どこかのところでユーザーサイドの意見を聞いたこともあるようですが、中に入っているのと入っていないのでは、また全然違うと思います。たとえばCFRPのチームの中に自動車会社を入れることについて、やっておけばよかったとか、いや、やっぱりそれは難しいのだとか、そんなことをしなくても十分できるのだとか、そのあたりについてご意見を頂戴できればと思います。

【尾形PL】 たとえば自動車会社ですが、プロジェクト・フォーメーションのときに、プロジェクトが始まるからということでもかなりお声はかけております。私はエレクトロニクスメーカー出身ですので非常にオープンというか、知っていることはみんな言うてしまうという体質の企業におりましたので、自動車会社のことを私は理解できないのですが、そういう意味では非常に対極にある企業群で、情報は入手するけれど一切出さないという体質を感じました。プロジェクトには参加されずに、先ほどご説明した調査委員会にはかなり無理を言って出てきていただいたというのが実情です。

その中で、たとえば先ほども申し上げましたようにこれぐらいのスピードで切れないと話にならないとか、あるいは変性層はこれぐらいでないといけないとか、そういったことは一般論としては意見をかなり出してもらってございましたし、CFRPの自動車業界におけるいまの位置付けがどうなっているかといった情報も調査委員会の中で適宜いただくような努力はしてまいりました。しかし残念ながらこのプロジェクトの中には参加していただけなかったというのが実情です。

【戸倉分科会長】 ご苦労はよくわかります。せっかくですからもう一つ、尾形PLにご説明いただいたスライドの6番ですが、これは時代とともにこんなイベントがあったと。たとえば東日本大震災があったとか、ボーイング787が羽田に来たとか。震災は予定されていなくて出たものですが、ボーイングが羽田に来るかどうかわかりませんが、ボーイング787ができるのはわかっている、ファイバーを使うのはもうわかりきっていることですから、ここにはあまりふさわしくないのではないかと。それから3Dプリンターの爆発的ブームとありますが、これは巷のブームであって、実際にやっている人たちは相当前からブームになっているところでもありますので、この表の中にかえてこういうのは書かないほうが、品位が高くなるのではないかと私は感じたりしています。別にそうしてくださいという意味ではなくて、そんなふうにも感じました。

【尾形PL】 おっしゃるとおりで、情勢変化にはそぐわない表現だったと思います。

【緑川委員】 このプロジェクトは材料メーカーが入っていますが、材料メーカーからのフィードバック、た

例えばCFRPでしたらレーザーに適した吸収材とか吸収しないものを少し混ぜるとか、あるいはファイバーの径をちょっと変えてみるとか、そういうインタラクションはあったのでしょうか、

**【尾形 PL】** CFRPには、ご存じのように非常にたくさんの種類があります。たとえば三菱化学にこのプロジェクトに入ってもらっていますので、特にCFRPをつくっている業界、加工している会社などからいろいろなリクエストを集めてきて、かなりたくさんの種類のCFRPのサンプルを入手して、それぞれいろいろな加工実験をしております。一部はあとで加工の具体的なご説明の中で紹介させていただけると思います。

**【緑川委員】** むしろ加工してフィードバックをかけたら、材料のほうを少し変えてみる。ここで12種類は評価されたことは書かれています、せつかくこういう共同の組合でやっているの、すべて材料があるからそれをレーザーで切ってくれではなくて、今度レーザーがあるから、逆に切りやすいような工夫もあってもいいのではないかと思ったのですが、それは難しい話でしょうか。

**【神谷専務】** CFRPは仕様上からいろいろ特性を求められています。加工は付随的なところで、まずメーカーはお客さんが期待する特性を持つCFRPに特化している。はっきりメーカーはおっしゃいませんが、われわれの理解ではCFRPはまだ研究開発途上のものがたくさんあって、たとえばいまは自動車用に使うCFRP材は研究開発途上にあります。これは加工を意識するより先に、まず実用的なところをいま意図している段階だと思います。そのあと加工法がついてくると思います。レーザーも一つの候補ではありますが、いまは機械加工かアブレイシブウォータージェットですから、そんなもの意識したものになっていると思います。レーザーはこれから普及してくると、いまおっしゃったようなことも少し出てくると思います。

先ほど尾形PLがおっしゃったように、一言でCFRPと言っても、たとえばCFRPもPAN系とピッチ系とあるし、樹脂も一般的な熱硬化性樹脂から熱可塑性のもの、あるいは最近では耐熱性に優れたものもたくさん出ています。それぞれレーザーで切ってみると、共通の特性を出すものと、それぞれ全然違ったものを出すものがあって、やはり違いがあったり同じだったりします。

5年間で素材メーカーさんが入ってくれたのでかなり多様な材料が自由に手に入りましたので、私どもなりにいろいろな知識がたまっている。そういうものが自動車に向けたCFRP材の実用化とか、それに必要な加工技術の向上への展開など、そういうフェーズでは次のようなテーマが起こってくるのではないかとわれわれは期待しています。

**【弓取部長】** 先ほどの分科会長のお話とも関連するのですが、自動車メーカー、あるいは素材メーカーについてももっと積極的にこの体制に入ったり、情報提供したり、絡んだりしてよかったのではなかったのではないかと、ご意見はごもっともだと思います。それはブランクもあって、レーザー技術は勝負があったのではないかと、もしかしたらユーザーは思っていたらよかったのかもしれませんが。ユーザーとしては、別に優れたレーザー加工技術が提供されればいいわけで、それが日本メーカーか海外メーカーかは関係ないというポジションです。

ですから今回プロジェクトで実施していい成果を出して、今後とも自動車メーカーや材料メーカーが興味を持ってくださらないのだとしたら、このプロジェクトはそういう成果だったのだらうと思います。ただ決してそうではないとは思っております。

このプロジェクトについてはブランクがあって、立ち上げて、どこまでできるのだらうかと懐疑的に見られていたのではないかと思います。ですから体制にそれを組み込めなかったことは本当に残念なところで、そこは反省いたしますが、これから体制再構築に向けて頑張っていきたいと思っています。

**【戸倉分科会長】** あまり反省いただく必要はありません。将来に向かってそういうことが実現できるといいだろうということです。

盛り上がってくるとどんどんいろいろな意見、質問が出るのですが、時間の都合もあります。午後にな

りますと個別のご説明がありますので、またそこで質疑をさせていただければと思います。

**【前川分科会長代理】** プロジェクトリーダーが説明された波及効果に関する最後の資料ですが、これはプロジェクト当初のアピールに関しては最後の資料、概要図としては問題ないと思うのですが、事後の波及効果としてあまりにも漠然としすぎて、もう少し工夫があっべきではないかと私は感じました。どうでしょうか。

もう少し具体的な、特徴的な成果があつて、それをさらに伸ばしていくと、具体的にこういう波及効果があるということならいいのですが、これはプロジェクトを開始するときであればこういう夢も語ることができたのですが、いまはある程度具体的な成果が出ていて、それをさらに伸ばしていこうという段階ですから、やはりこれはちょっとまずいのではないかと思います。

**【尾形PL】** こういう図にした意図は、冒頭申し上げたように三つの出口を絞ってレーザーを開発し、加工システムを検討しましたという目標にしましたので、それ以外に非常に大ざっぱですが、もっと出口は広くていろいろなところに使えますよというつもりだけで示したものです。ここはそのように受け取っていただいて、具体的にこの成果がどのように活用されていくかは、また個別の発表のところでぜひご議論いただければと思います。

**【戸倉分科会長】** 貴重なご意見としてお留めいただければと思います。それでは先ほど申しましたように時間になりましたので、質疑応答はこれまでにさせていただきます。

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明

7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

8. まとめ・講評

**【戸倉分科会長】** 議題8に進みたいと思います。まとめ・講評です。これからは公開になりますので、ご理解いただければと思います。これから先の皆様のご発言は公開内容として議事録にも記載しますので、ご留意ください。

一通りのクローズの審議も終了しましたので、各委員の皆様から本日の講評をお願いしたいと存じます。吉田先生からこちらに戻ってくるかたちで、お一人2分をめどに、講評をお願いできればと思います。

**【吉田委員】** 本日はどうもありがとうございます。大変貴重なお話を聴かせていただきました。

最初にもお話したように、よくレーザーのプロジェクトを立ち上げていただけたと思います。キャッチアップと言われる点もあったかもしれないですが、まずはそこからスタートしていかないと物事は始まらないと思います。

非常に新しい技術や従来にない、たとえば 1.5kW のレーザーをコヒーレント加算という新しい技術で達成されているところは、とても価値があると思います。さらに複数企業の方々を束ねて、複数の方向づけできちんとすべてのプロジェクトをコントロールされた。単に数値を達成するだけではなくて、これから市場展開としてどういうふうに考えていけばいいかまで、まさにこれからだと思いますが、その辺りのところまで進められたことは大変意義があると思います。

21世紀は光の時代とおっしゃる方がいます。私もそのとおりでと思いますが、その中でもレーザーは新しいマザーマシンというか、加工ツールや品質を改善するためのツールになります。そういったところで、不可欠になる大事な道具です。

道具なしにはものをつくれないので、今後とも、このようなプロジェクトが続くいい橋頭堡になったか  
と思います。これから成果がビジネスにつながるように、発展していただければと思います。

【山口委員】 今日長い時間、ありがとうございます。すばらしい成果が出ていました。中間評価以降、三つに絞られたところのものも、研究目標はきっちりクリアされていると見られます。私も、中間でだいぶ厳しいことを言ったように思います。厳しいことを言ったからではなくて、5年の短い間になるべくしてこうなったのだろうと理解しています。

ただ、少し惜しいと思うのは、次世代素材等レーザー加工という加工技術で三つ大きく立てたところがある。素材はCFRPを例に取ってということでしょうか、かなり限られたところに集約された部分がある。どのレーザーを使っても、CFRPの加工での結果は少し出ているので、もう少し幅広く素材を選び試験をするべきか。

浜松ホトニクスと古河電工のところではほかの委員の方から質問が出ましたが、並行して進んでいるからということで、ある部分が個別に壁をつくって進んでしまっているところがあったかなと少し残念です。コンカレントで、並行と言ってもお互いに交流しながら進められなかったか。

あとは、パルスファイバーレーザーにこだわっている部分が少しある。海外品に頼らざるを得なかったところが、もう少し日本国内にうまくフィードバックができればという感触を持ちました。

ただ、先ほど申しましたように、短い5年の間に研究目標をよくクリアされているところは変わりません。今後いかなる展開をするか、もう一步踏み込んでお考えいただけたらと思います。

【緑川委員】 今日は皆さん、ありがとうございました。私としては、大変おもしろい話を聞いたなという印象です。

尾形プロジェクトリーダーのリーダーシップも非常に感じましたし、中間評価のときより断然進んで、ほぼ当初のキャッチアップのところはクリアして、テーマによってはそれをさらに上回る成果が出た。さらにそのレーザーの成果を使って、材料自体はCFRPに限られています、そういうものに対していろいろな知見を得られたことは高く評価できると思います。

ただ、次のプロジェクトのことを考えると、山口委員が言ったように、わが国の強みは新材料、素材です。それと加工を組み合わせるのは非常に重要なことで、たぶん次のプロジェクトはもっとバラエティを広げ、いろいろな材料に発展させることが重要になると思います。

そういう意味で言うと、最初のタイトル、キーワードを安売りしすぎたのか。「次世代素材」よりも「CFRP等レーザー加工」程度にしておいて、次のときに「次世代」と大きく言うとプロジェクトとしてつながるのかなと。私もそういうことを期待しています。

何度も言いますが、強い産業と強い産業を二つ組み合わせて最先端に行くことが理想だと思います。わが国は、素材は強い。次に、ここまでレーザーが来たのでレーザーも強くして、それを複合することによって、諸外国に対してダントツに強い産業をつくり上げていただきたいと思います。

【神成委員】 本日はありがとうございました。私は中間評価にはかかわっていませんが、このプロジェクトを立ち上げるときに議論に少し参加させていただいた経緯があります。その間、ずっと遠目でプロジェクトを眺めていましたが、最終的に成果達成にこぎつけられて、おめでとうございますというべき中身ではないかと思います。特にレーザー屋の立場から述べると、宮永先生のところが最終的なブースターアンプもファイバーでやり遂げたところを非常に賞賛したいと思います。

3点の側面から、お話しいたします。先ほどからあるように、時間的にぎりぎり、出口のところでデバイス等が完成したかたちのプロジェクトの進捗になっています。もう少し余裕があって、できあがった要素技術を並べて、最後の出口までにこれをどう重ね合わせて、協調して、結論的なものごとをつくっていくかを皆さんで客観的に眺める。最後のフェーズをつくり上げる余裕というか、そこがあれば、いろいろな要素技術を重ねて結論的なものに持っていくまとめ方ができたのではないかと思います。現状では今日



お話しされたようなことがばらばらに要素技術としてでき上がってきて、その融合的なところはこれからというところが少し残念だったと思うのが一つです。

2 番目、CFRP の加工については当初の目的を達成し、明らかにウォータージェットよりもいい加工ができる結論まで達成していますが、これからいろいろなところで爆発的に使っていくというかたちではない。何となく閉塞感が感じられるのは、世界一の自動車メーカーや、これからは炭素繊維だと言われている割にはユーザーがかかわっていない。ユーザーがすぐ飛びつく状況になっていないので、これからユーザーを探さなくてはいけないという雰囲気がどうも閉塞感の原因ではないか。そこはぜひとも頑張りたいと思う一方で、それに関して言うなら、皆さんもご承知の、ドイツでは州政府がバックアップして産業、学術、デバイスメーカーがくっついて、一大レーザー加工コミュニティができ上がっています。その核になるフラウンホーファー研究所が、レーザーメーカーとユーザーとの接点となって絶対的なデータベース、ノウハウを持ち、接着剤となって産業を活性化している。

次のプロジェクトでまた新しいレーザーをつくったところで、光源と応用の接点を司る機関がないとユーザーにとっては敷居が高い。ワークショップがあってレーザーを使ってみたところで、こういう結果になるという現象的な知見だけで、ノウハウがどこかに蓄積されたり、指導的に広く展開できる体制にはならない。

私の希望は、もし次のプロジェクトがあるなら「次の大きなレーザーをつくります」ではなく、日本版フラウンホーファー研究所みたいな機構をつくる仕組みをつくり上げるためのプロジェクトにシフトしていかないと、いくらこういうプロジェクトを重ねてもドイツにはかなわないのではないかと思います。ぜひともそういう努力をしていただければ、喜んで協力したいと思います。

【沖野委員】 今日はどうもありがとうございました。いろいろお話を聴けてよかったと思います。

私は中間評価にも参加させていただきました。そのとき委員の方からたくさんのお話が出ましたが、きちんとマネジメントが修正されて、目的とする成果が得られたことに対して、お話を聴けてよかったと思います。

当初からの目的の中にはレーザーの要素技術を開発する話があって、最終的な製品としての出口は、今日の発表の中では古河電工のファイバーレーザーや浜松ホトニクス LD の発表がありました。

プロジェクト開始前は、日本のマーケットの中でも IPG 社が大きくシェアを占めている中で、ここ数年、古河電工、フジクラがファイバーレーザーを製品化しています。私の会社はレーザー加工機のメーカーですが、いろいろ選択肢が出たところで各社に競合していただいて、このプロジェクトが、いいレーザー光が世の中に出てそれぞれ市場の成長に貢献するきっかけになったのではないかと思います。

CRFP や新しい材料に対する知見も得られましたが、われわれが最初、対象にした海外、特にドイツやアメリカのメーカーの技術も止まっているわけではありません。特にドイツは非常に大きな国家プロジェクトとして国が投資を行い、プロジェクトが続いています。そこでそれぞれが開発した要素技術が次のプロジェクトにつながって、大きく成長しています。

あるいは、人材面です。前から日本のレーザーの学会の中でも言われていましたが、レーザーの研究を大学、あるいはどこかの研究機関でやっても、就職したときに必ずしもレーザー関係に就くわけではない。

ドイツは、レーザー関係を仕事にしている人たちがたくさんいる。そういう面でも継続して若い人たちを育て、この成果を拡大してさらに発展していただきたいと考えています。今日はどうもありがとうございました。

【前川分科会長代理】 今回はこのような場に出席させていただき、私自身も非常に勉強になりました。特に ALPROT (次世代レーザー加工技術研究所) と NEDO のマネジメントを高く評価したいと思います。このプロジェクトの最初の段階で意見を求められたと記憶しているのですが、一つだけ接合、特に 3 次元造形技術に関して目標値が低いのではないかと発言しました。その懸念がクリアできずに終わったように思

います。

この研究プロジェクト名が大出力高品位レーザーの開発と CFRP 加工技術、特に切断技術開発プロジェクトであれば、満点をつけたいと思います。ただ、事業目的のところのように、革新的な切断・接合技術の開発となっています。

切断では、特に CFRP でかなりの成果が得られていると思います。接合は応用範囲も広いし、切断以上に応用範囲があると思います。もちろん 3 次元造形もそうですし、コーティングもそうです。そういうところにもこれから生かされていくと思うので、接合の技術をもう少し高めていく応用研究が必要かと感じました。

実用化・事業化に関しては、研究開発なのでいきなりそこに結びつくことは大変だと思います。これから裾野を広げていく上でも、別な形を取るかもしれませんが事業の継続性、フォローアップをしながら、特に若い人材を学生のうちから育てていく。大学も努力が必要ですが、環境をつくっていただくことも必要かと思っています。今後とも、できる限りレーザー開発と技術の応用に関して支援を続けていただければと思います。

**【戸倉分科会長】** どうもありがとうございます。最後に私が一言言うことになっています。私まで来ると、皆さん、いろいろなことを発言されているのでほとんど同じようなことになってしまっていますが、少し表現だけ変えさせていただきます。

一つは、この 5 年間、皆さん、緊張の中で重い荷物を背負いながらかもしれません。あるいは、夢を持ちながらやってこられたことに敬意を表させていただきます。今日は真摯にご説明いただき、心より感謝申し上げます。

世の中はくせもので、最初に設定してもどんどん動きます。地震もそうでしたが、コンペティターもどんどん成長する。こちらも成長するけれども、相手も成長していくという世の中の難しいところもあります。皆さん、それなりにご対応いただけたのではないかと思います。

はじめの方がよりトーンが高くて組織もうまくいっている感じがしました。これからやればまだまだいい成果が得られる種は、たくさん出たのではないかと思います。

私はレーザーに関与したのはそんなに長くなく、磨く、切る、CVD、PVD や放電加工もやってきました。世の中は、加工方法を取り上げるといろいろな競争相手が出てきます。「レーザーでなければいけない」としてしまうと、非常に難しいところがあります。敵も必ずやり返してきます。そのへんを楽しみに思いながら、敵が来ても負けないぞと腹をくくって、これからも進んでいただければありがたいと思います。

これまでやった財産を、これからも何らかの方法でいい方向へ持って行っていただきたく思います。皆さんの財産、あるいは国民の財産になるでしょうから、そういうものに引き上げていただけるとありがたいと思います。今日は朝早くから、いろいろありがとうございました。委員の皆さん、同じように思っていると思うので、感謝申し上げます。

最後に、推進統括あるいはプロジェクトリーダーから何か一言、よろしく願います。

**【尾形 PL】** 今日一日、われわれの話を聞いていただき、本当にありがとうございました。貴重なコメント、サジェスチョンをいただき、本当にありがとうございます。

プロジェクトは終わってしまいましたが、これからの実施者、今後のいろいろな活動、それから今後、打ち立てられるであろう新しいプロジェクトに対して、いろいろなサジェスチョンをいただけたのではないかと思います。本当にありがとうございました。

いまいただいたコメントで、今後評価をしていただく上で、2 点だけコメントさせていただきたいことがあります。まず 1 点目、「次世代素材とレーザー加工技術開発プロジェクト」という名前になっていますが、実はスタートしたときは、NEDO の冒頭の資料の 14 ページにあります名前が違いました。「高出力多波長複合レーザー加工開発」という名前でスタートしました。

なぜ名前が変わったかという、途中でお金の出所が変わり、特別会計から出るということで3年目からこの名前に変わっています。そのへんをお含みおきいただきたいと思います。

前川分科会長代理がおっしゃった切断・接合という名前がずっとついています、「重点指向思考をなささい」というセサジェスチョンもあり、中間評価でCFRPに関する接合のテーマは扱わないということで進めてきました。そのへんをお含みおきいただければと思います。最後にコメントさせていただきました。どうもありがとうございました。

**【戸倉分科会長】** ありがとうございます。それでは、推進部長からもありましたら一言お願いします。

**【弓取部長】** 本日は先生方、大変ありがとうございました。今日、事後評価ということでいろいろと成果を披露させていただきましたが、実施者の皆さんに頑張ってくださいました。途中、折に触れて関与くださった有識者の先生方、厳しい言葉も励ましの言葉もいただきながら何とかやってこられたのは、皆様方の「それでも前に進もう」という気持ちがあったからではないかと思います。このプロジェクトがあって、27年度はレーザーの動きはないのですが、次のレーザー事業に向けていろいろと準備を考えています。今日、最後の講評でも、示唆に富んだことをいただきました。やはりそちらの方向でいいのかなと思ったところもありますし、なるほどと思ったことも大変多いです。

今日いただいたいろいろなコメント、サジェスチョンをわれわれの中でも共有させていただき、次の一手に向かって大いに頑張らせていただきたいと思います。今回のプロジェクトの事後評価ではありますが、次に向かってのコメントがわれわれの次に向かうモチベーションにもなり、ドライビングフォースにもなります。ぜひご支援のほど、よろしくお願いします。今日はどうもありがとうございました。

## 9. 今後の予定、その他

## 10. 閉会

## 配布資料

資料 1	研究評価委員会分科会の設置について
資料 2	研究評価委員会分科会の公開について
資料 3	研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
資料 4-1	NEDO における研究評価について
資料 4-2	評価項目・評価基準
資料 4-3	評点法の実施について
資料 4-4	評価コメント及び評点票
資料 4-5	評価報告書の構成について
資料 5-1	事業原簿（公開）
資料 5-2	事業原簿（非公開）
資料 6-1	プロジェクトの概要説明資料（公開）
資料 6-2	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
資料 7	今後の予定
参考資料 1	NEDO 技術委員・技術委員会等規程
参考資料 2	技術評価実施規程

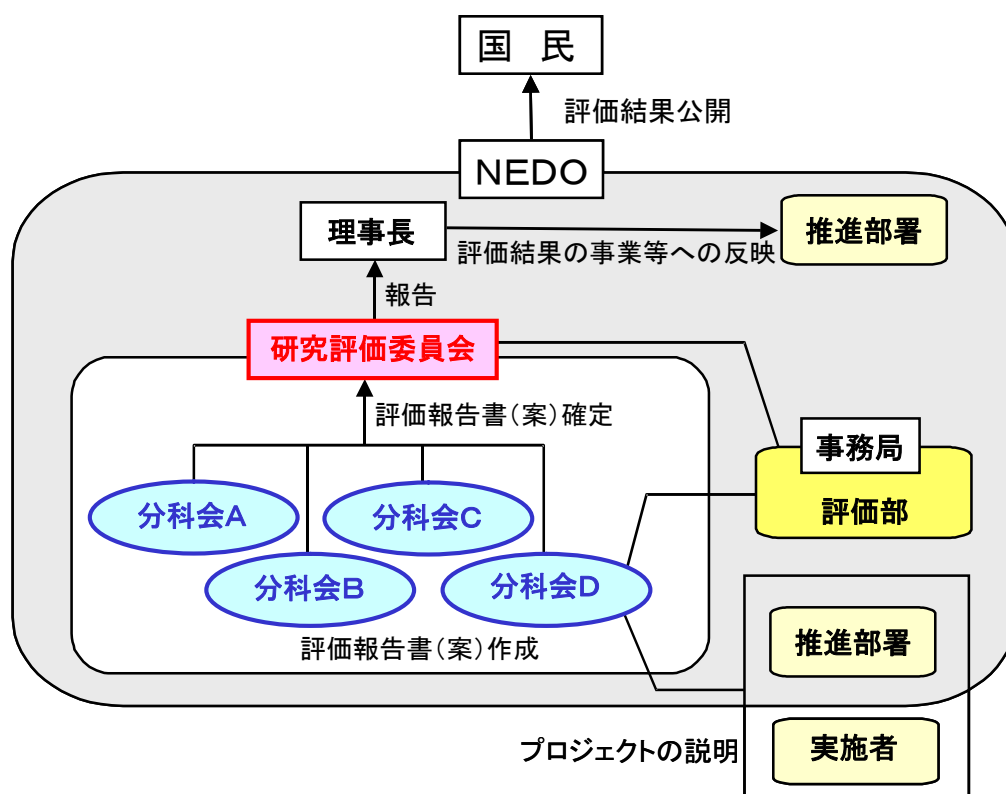
以上

## 参考資料 2 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて実施する。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



## 1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
  - 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む
  - 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する
- としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

## 2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、委員を分科会委員名簿の通り選任した。

なお、本分科会の事務局については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

## 3. 評価対象

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」を評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

#### 4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

#### 5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、NEDOが定める「標準的評価項目・評価基準」をもとに、当該事業の特性を踏まえ、評価事務局がカスタマイズしたものである。

評価対象プロジェクトについて、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義、実用化に向けての取り組みや見通し等を評価した。



「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」  
に係る評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（健康安心イノベーションプログラム）の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、市場動向、政策動向等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財戦略(オープン/クローズ戦略等) が明確になっており、かつ妥当なものか。

#### (5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

### 3. 研究開発成果について

#### (1) 目標の達成度と成果の意義

- ・ 成果は目標を達成しているか。
- ・ 成果は将来的に市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
- ・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、または汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が挙げられている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 大学または公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

#### (2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

#### (3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

#### 4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

##### 本事業における「実用化」の考え方

- ・プロジェクトで開発した技術が、既存製品の性能向上や新製品の開発に活用できる段階まで整備されることをいう。

##### (1)成果の実用化の見通し

- ・ 実用化イメージに基づき、課題及びマイルストーンが明確になっているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

##### (2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発に取り組むのか明確になっているか。

## はじめに

本「標準的評価項目・評価基準」は、「技術評価実施規程」に定める技術評価の目的<sup>\*</sup>を踏まえ、NEDOとして評価を行う上での標準的な評価項目及び評価基準として用いる。

本文中の「実用化・事業化」に係る考え方及び評価の視点に関しては、対象となるプロジェクトの特性を踏まえ必要に応じ評価事務局がカスタマイズする。

※「技術評価実施規程」第5条(技術評価の目的) ①業務の高度化等自己改革の促進、②社会への説明責任、経済・社会ニーズの取り込み、③評価結果の資源配分反映による、資源の重点化及び業務の効率化促進

なお「評価項目」、「評価基準」、「評価の視点」は、以下のとおり。

- ◆評価項目：「1. . . .」
- ◆評価基準：上記、各項目中の「(1) . . .」
- ◆評価の視点：上記、各基準中の「・」

## 評価項目・基準・視点

### 1. 事業の位置付け・必要性について

#### (1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

#### (2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

## 2. 研究開発マネジメントについて

### (1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

### (2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマごとの配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

### (3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

### (4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

（基礎的・基盤的研究開発及び知的基盤・標準整備等研究開発の場合は、「事業化」を除く）

- ・ 成果の実用化・事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化・事業化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化・事業化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
- ・ 成果の実用化・事業化につなげる知財戦略(オープン/クローズ戦略等) や標準化戦略が明確になっており、かつ妥当なものか。

### (5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

### 3. 研究開発成果について

#### (1) 目標の達成度と成果の意義

- ・ 成果は目標を達成しているか。
- ・ 成果は将来的に市場の拡大あるいは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
- ・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、又は汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が上がっている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 大学又は公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

#### (2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、又は実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

#### (3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

#### (4) 成果の最終目標の達成可能性(中間評価のみ設定)

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。

#### 4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

##### 本項目における「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを言う。

なお、評価の対象となるプロジェクトは、その意図する効果の範囲や時間軸に多様性を有することから、上記「実用化・事業化」の考え方はこうした各プロジェクトの性格を踏まえ必要に応じカスタマイズして用いる。

##### (1)成果の実用化・事業化の見通し

- ・ 産業技術としての見極め(適用可能性の明確化)ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
- ・ 実用化に向けて、競合技術と比較し性能面、コスト面を含み優位性は確保される見通しはあるか。
- ・ 量産化技術が確立される見通しはあるか。
- ・ 事業化した場合に対象となる市場規模や成長性等により経済効果等が見込めるものとなっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

##### (2)実用化・事業化に向けた具体的取り組み

- ・ プロジェクト終了後において実用化・事業化に向けて取り組む者が明確になっているか。また、取り組み計画、事業化までのマイルストーン、事業化する製品・サービス等の具体的な見通し等は立っているか。

#### ◆プロジェクトの性格が「基礎的・基盤的研究開発」である場合は以下を適用

#### 4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

##### (1)成果の実用化の見通し

- ・ 実用化イメージに基づき、課題及びマイルストーンが明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発に取り組むのか明確になっているか。

◆プロジェクトの性格が「知的基盤・標準整備等の研究開発」である場合は以下を適用

4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

(1) 成果の実用化の見通し

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S 化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注) 国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発に取り組むのか明確になっているか。



本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部  
部長 徳岡 麻比古  
統括主幹 保坂 尚子  
担当 内田 裕

\* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

([http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu\\_index.html](http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html))

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地  
ミューザ川崎セントラルタワー20F  
TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162