

## 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

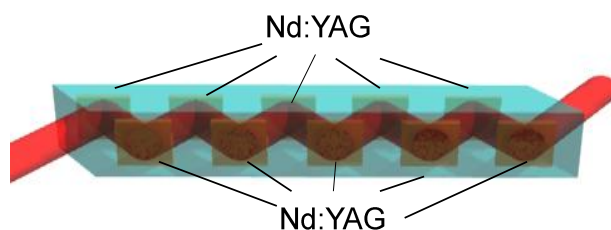
従来の市販レーザーのような長パルス（10ns 以上）の場合、平均出力を高くすることは容易であるが熱変性領域が拡大するため、短パルスが有効である。

##### 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）

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(ブ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(ブ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)

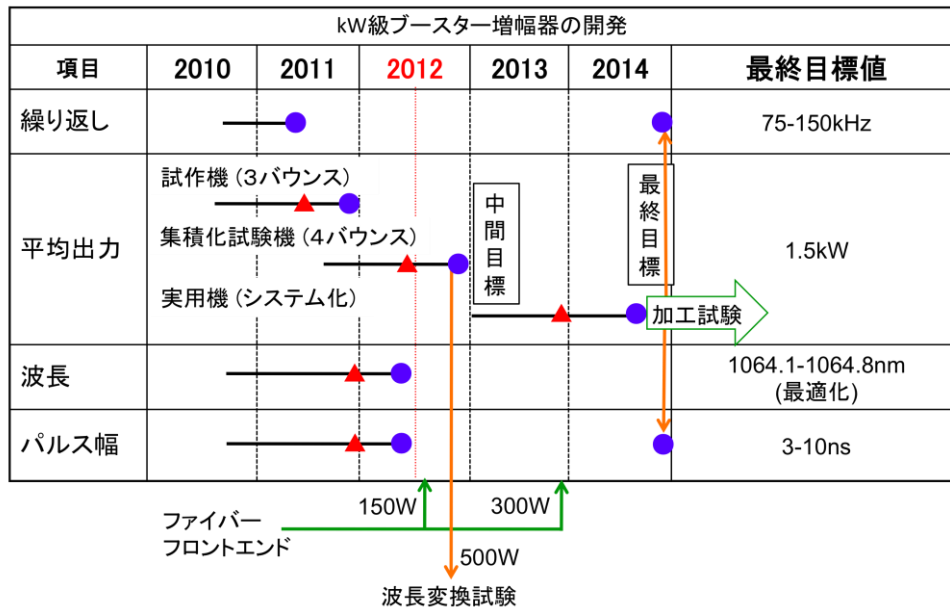
照射強度： $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> (吸収率：75%)、パルス当たりのアブレーション深さ：~20μm

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。

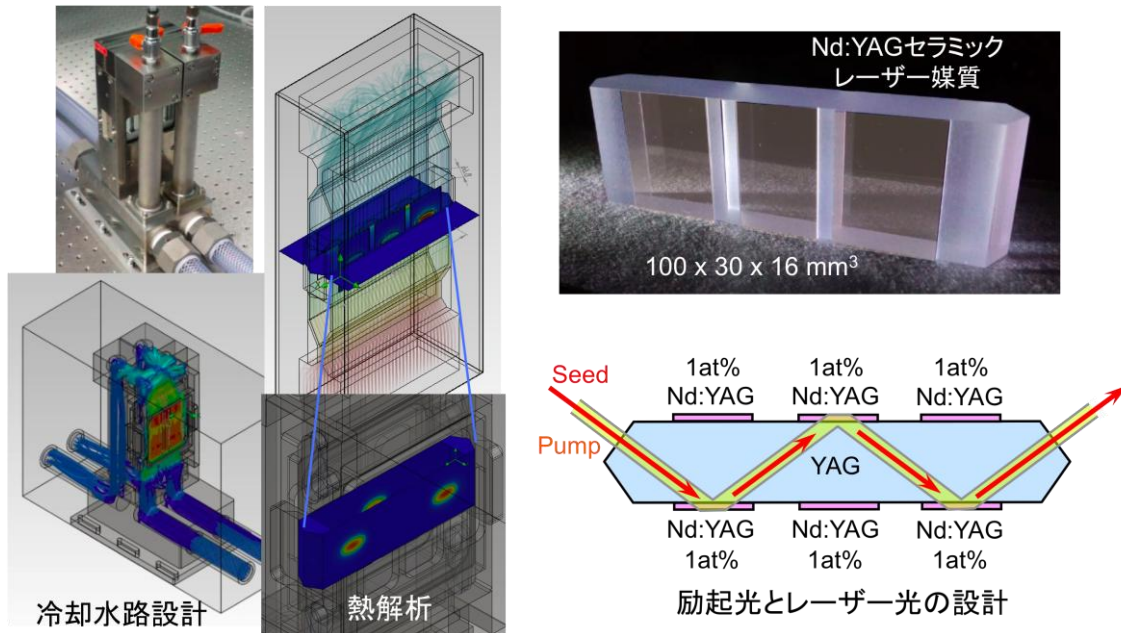
表Ⅲ-2.7.3 ブースター増幅器の達成状況

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

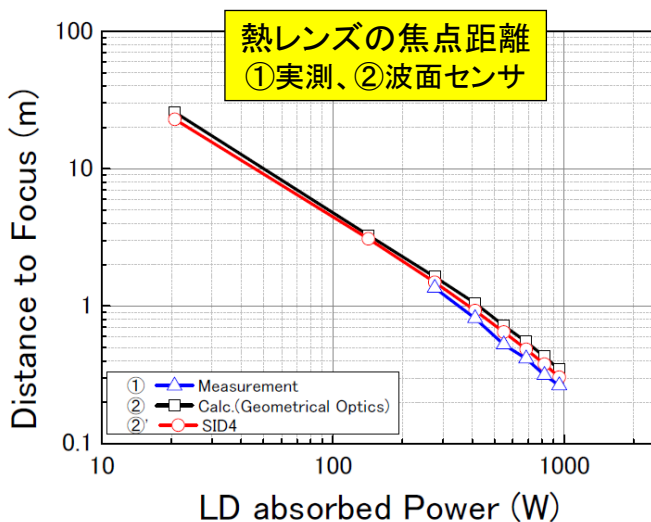
### 2.7.5 成果の詳細

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うことができる。

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。

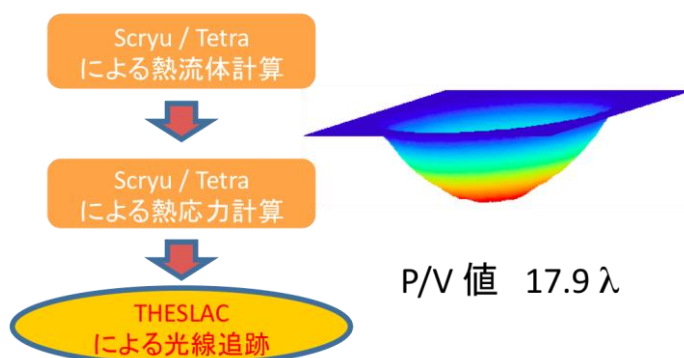


図 III-2.7.5 熱レンズ効果の計算機シミュレーション

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。

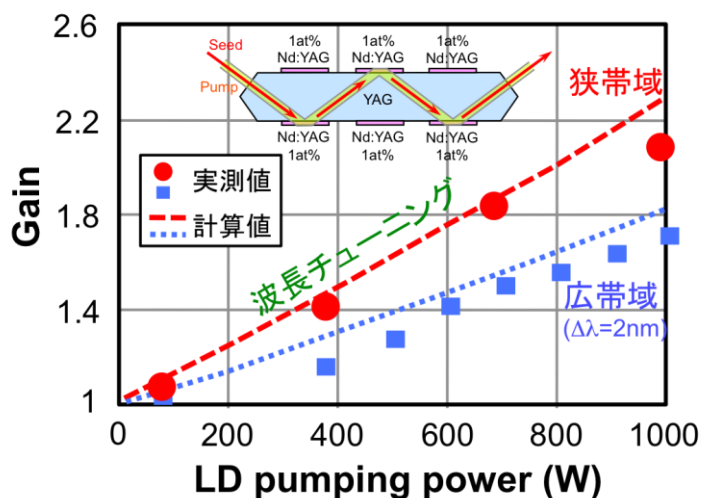
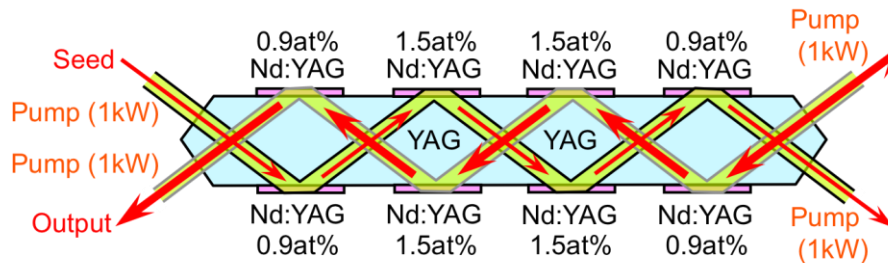


図 III-2.7.6 試作増幅器利得の LD 励起パワー依存性

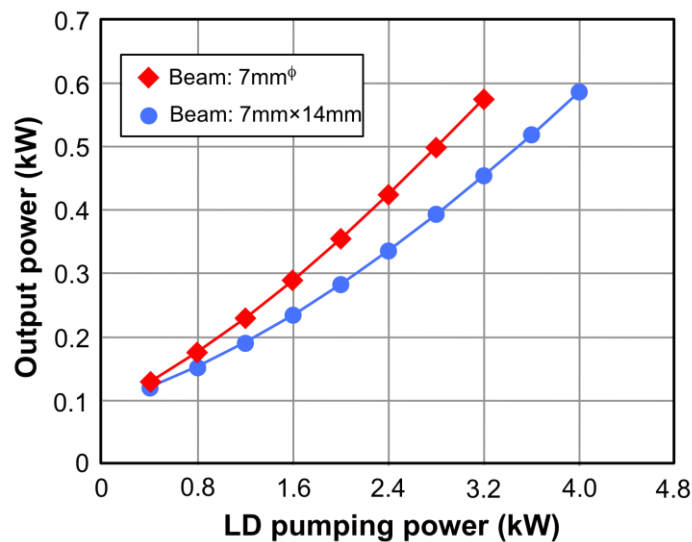
この実験結果と計算機シミュレーションによる熱解析から、1枚目と3枚目の Nd:YAG

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

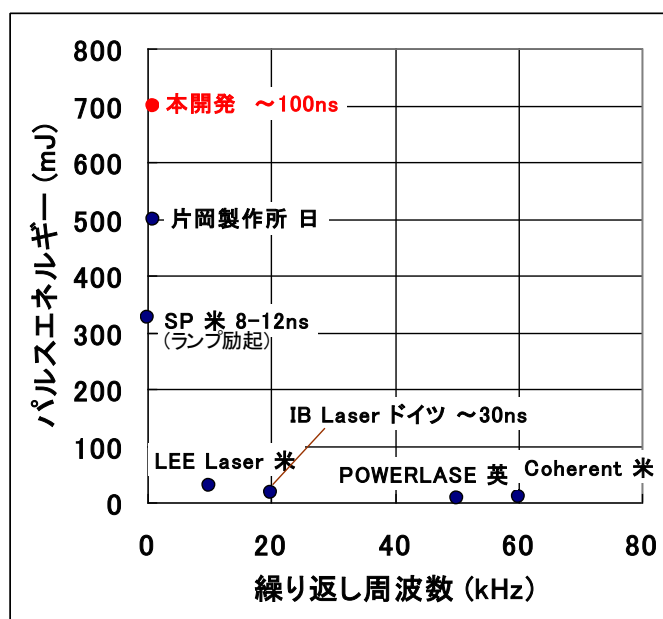


加工性能を得るためには波長  $1\mu\text{m}$  帯、平均出力 200W~700W、繰り返し周波数 1~150kHz のうち最適周波数（後に 1kHz と決定）、パルス幅 0.5ns~200ns のうち最適パルス幅（後に 70~100ns と決定）が必要であり、これを中間目標とした。研究開発目標と設定根拠を表Ⅲ-2.8.2 に示す。

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 532nm)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	200~700W	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 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		

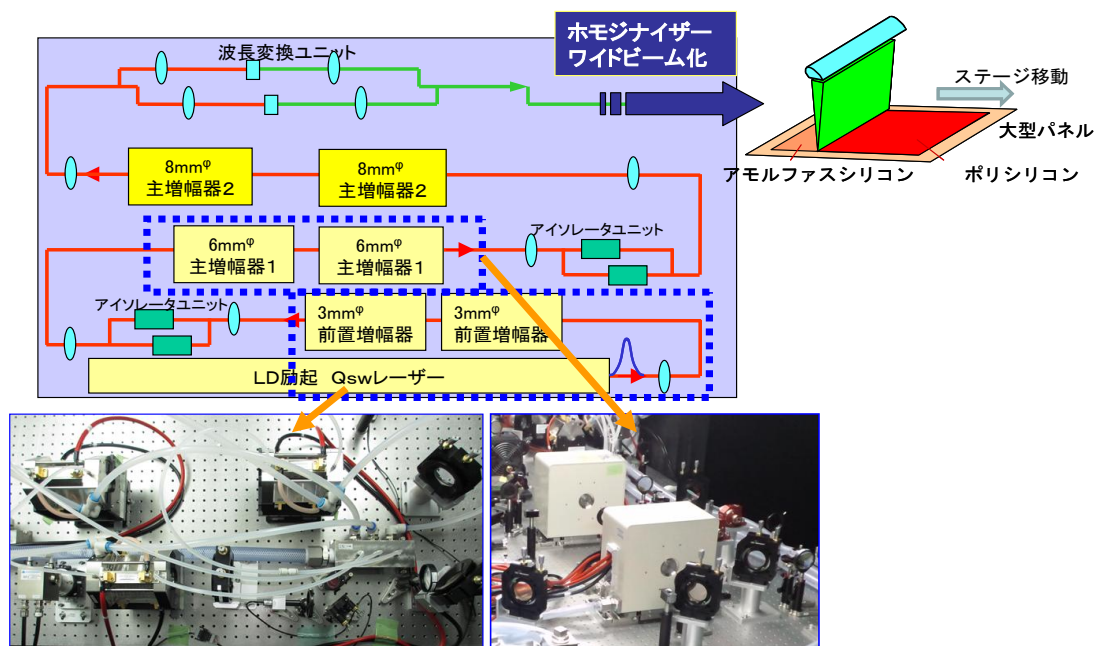
◎大幅達成、○達成、△今年度中に達成見込み、×未達

## 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。

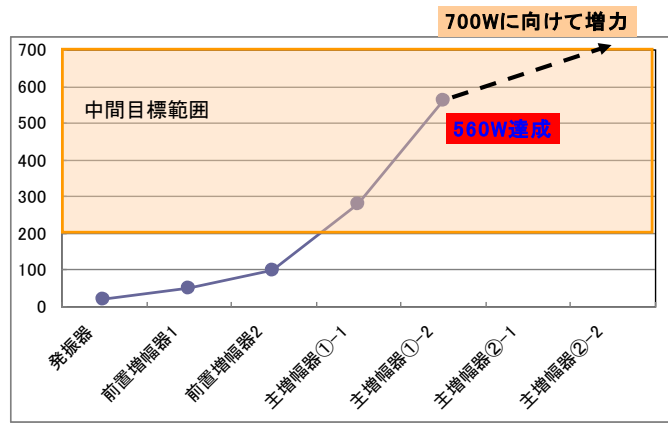
キーコンポーネントとなるレーザーヘッド（発振器、前置増幅器、主増幅器）の励起分布、熱レンズ焦点距離、小信号利得を測定し、その特性を基に多段増幅レーザーシステムを構築した。種光となる発振器ではパルス幅 100ns を得るために長共振器を構築し、出力 19W (19mJ×1kHz) でパルス幅 105ns が得られた。またビーム品質  $M^2$  値は 15 前後が得られているのを確認した。光干渉しにくくかつ加工時の集光性能を得るには十分な特性である。この種光を増幅し 2 台の前置増幅器で 90W まで増力し、次の 2 台の主増幅器 1 で 560W の出力が得られた。光学配置、伝搬ビーム径の最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

## 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 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

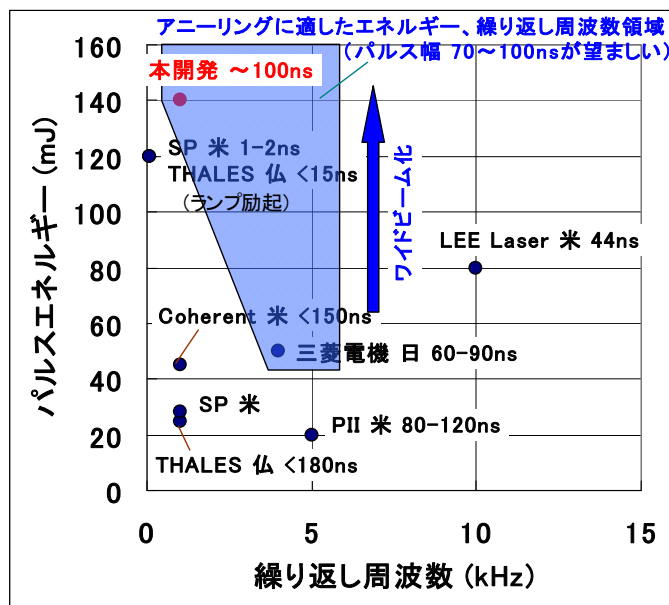
項目	中間目標	設定根拠
変換効率	$\geq 20\%$ (基本波入力 $700\text{W}$ )	$500\text{mm}$ のワイドビームによりアニーリングを達成するには $140\text{mJ}$ ( $140\text{W}/1\text{kHz}$ )のパルスエネルギーが必要であり、予備実験で得られた限界値近くの効率を基に決定

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 $\text{kHz}$ の高エネルギー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 $500\text{mm}$ 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

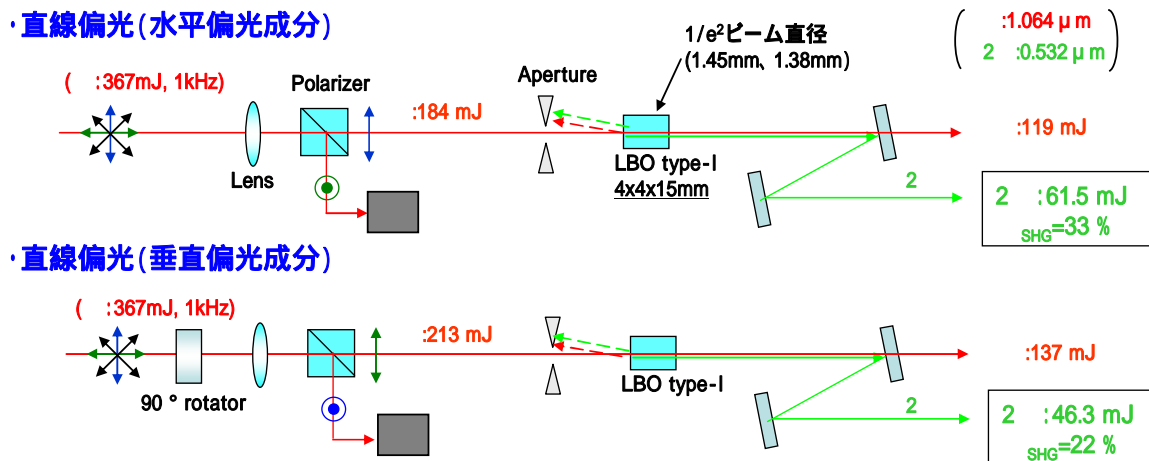
項目	目標	成果	達成度	今後の課題
変換効率	$\geq 20\%$ (700W 基本波から)	$\geq 20\%$ (360W 基本波から)	△	(平成 24 年 8 月 達成予定)

◎ 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が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ろうと、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」

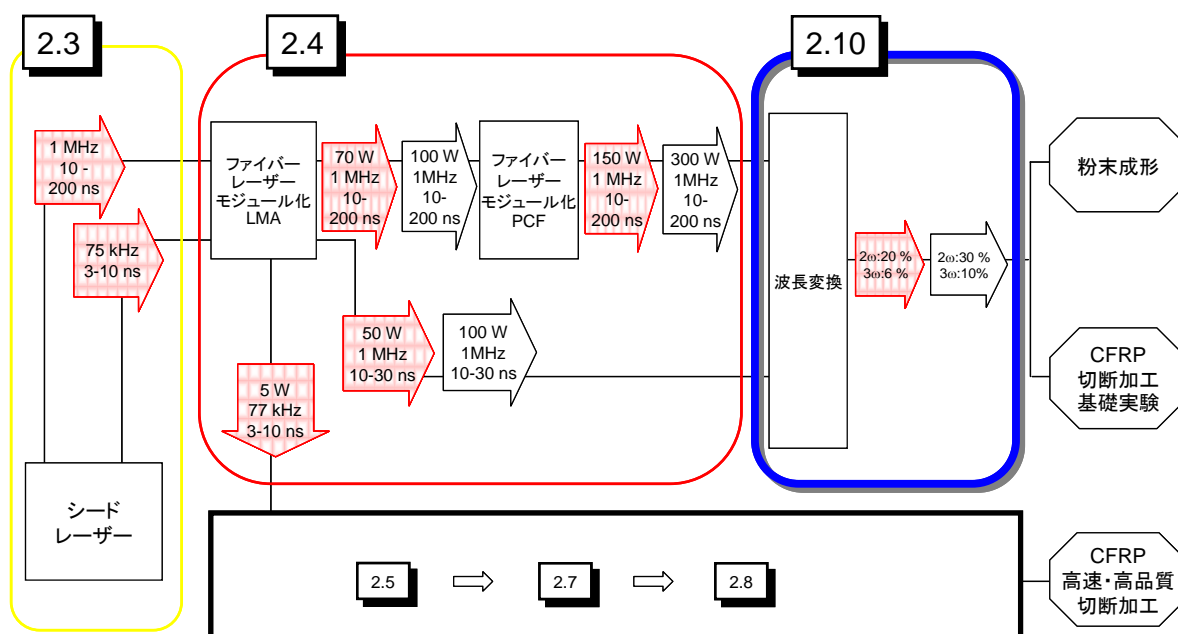
#### 「1) 波長変換モジュール化技術の開発

#### 「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）

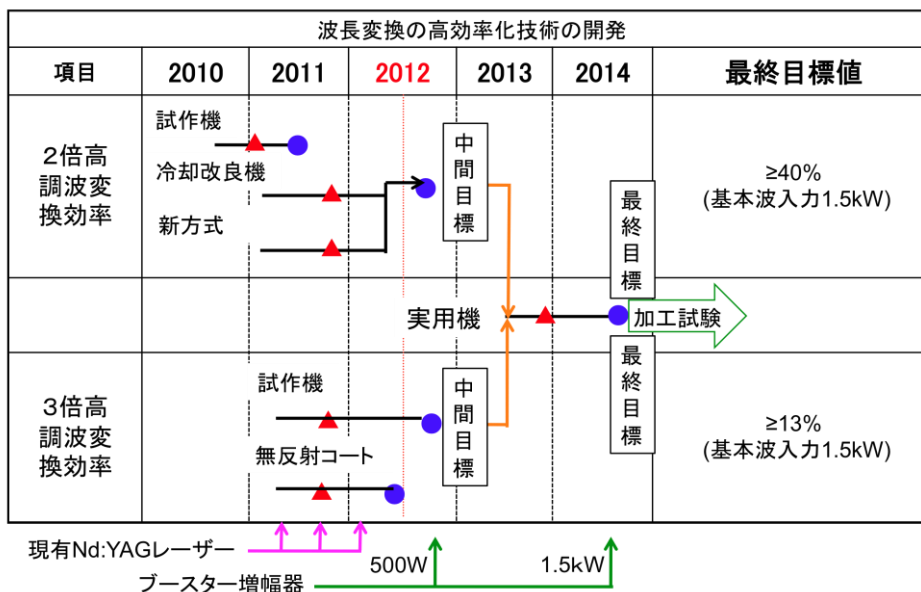
設定根拠

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

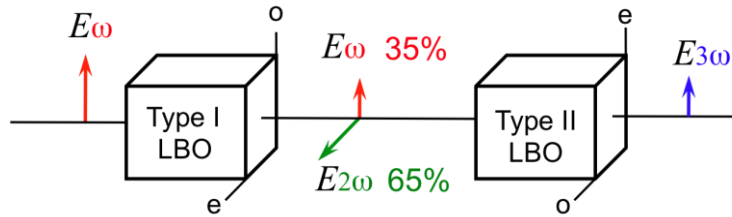
波長変換の高効率化技術の開発				
項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
1) 2倍高調波変換効率	20%以上 基本波入力 500W、75kHz	65% 基本波入力 300W、10kHz	△ (H25年3月 達成予定)	500W熱負荷 高繰返し動作
2) 3倍高調波変換効率	6%以上 基本波入力 500W、75kHz	43% 基本波入力 150W、10kHz	△ (H25年3月 達成予定)	500W熱負荷 高繰返し動作

#### 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

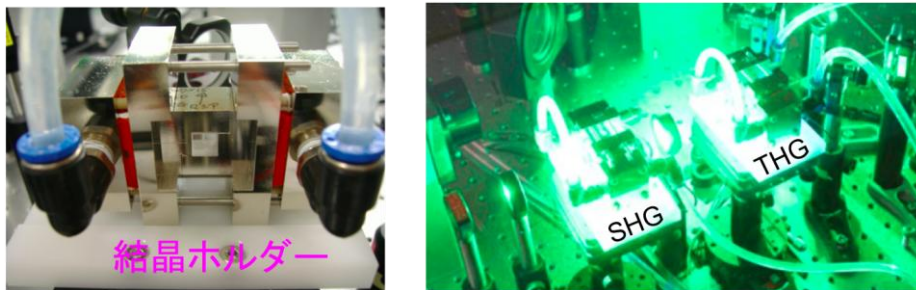
せる。3倍高調波変換では、基本波の光子1個と2倍高調波の光子1個から3倍高調波の光子1個が発生する。したがって、3倍高調波変換の効率を高くするには、基本波と2倍高調波のパワー比が1:2、すなわち2倍高調波変換効率としては約60%であることが理想的である。



図Ⅲ-2.11.1 波長変換結晶の構成と偏光の組み合わせ

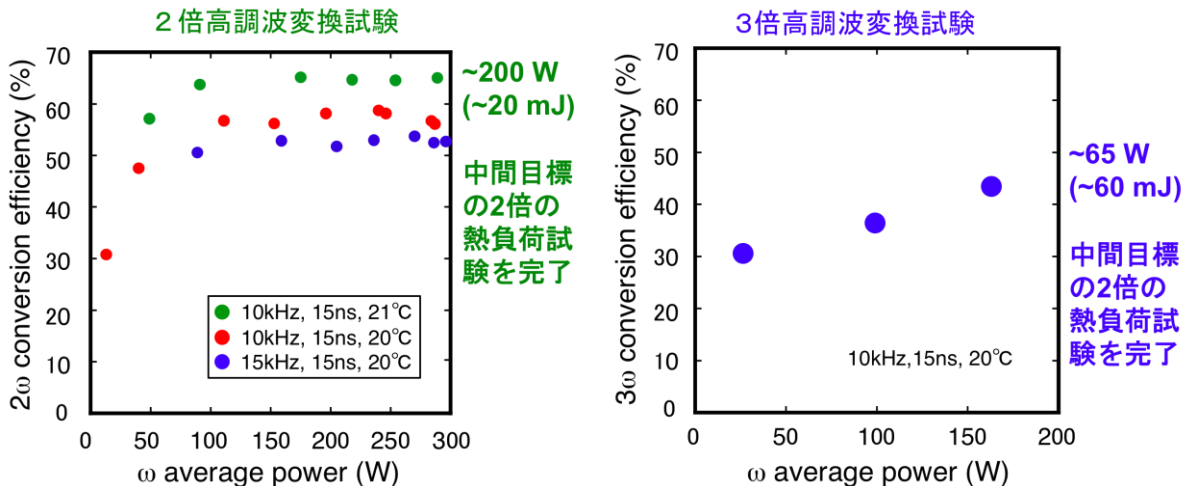
(2) 中間評価に比べて2倍の熱負荷での高効率波長変換試験

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。

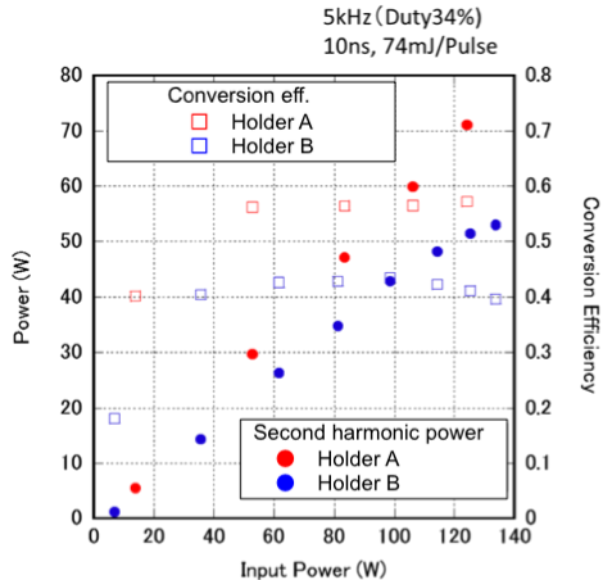


図Ⅲ-2.11.3 2倍高調波変換(左)及び3倍高調波変換(右)の試験結果

(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%台にとどまっておらず、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。

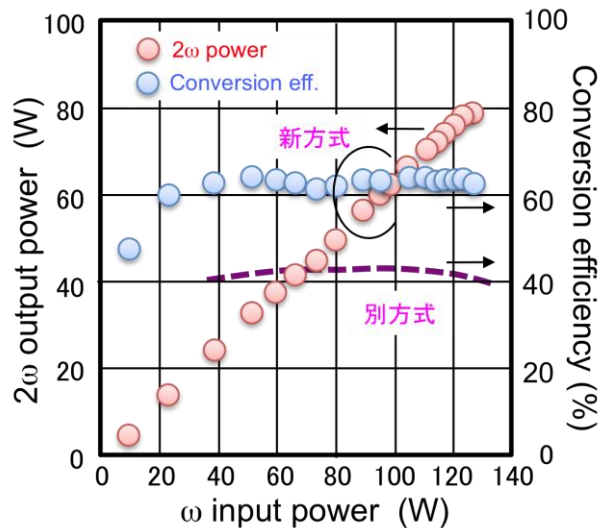
非公開

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-2.11.9 新方式での波長変換の結果

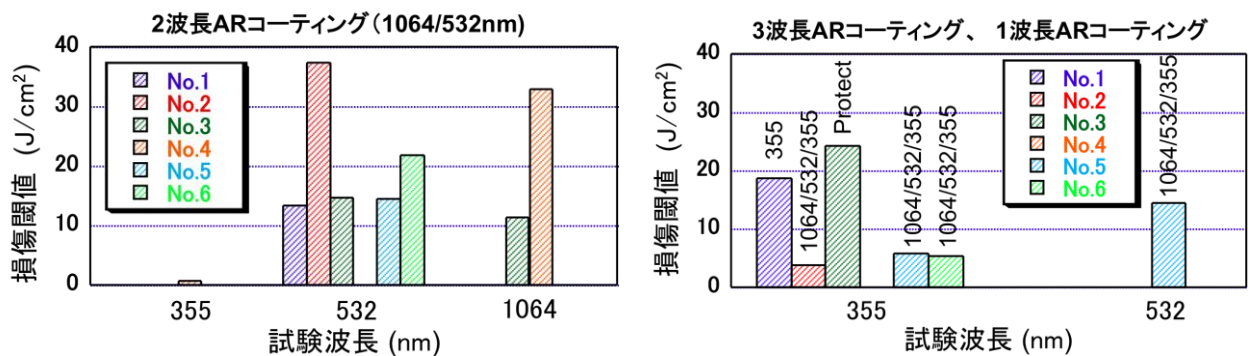
図Ⅲ-2.11.8 新方式波長変換の実験

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  $750\text{W} \times 2$  ビームとした場合の 3 倍高調波出力は  $100\text{W}$  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、 $750\text{W} \times 2$  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

スキームⅢ-2.13.1 事業の背景・意義・目的・概要

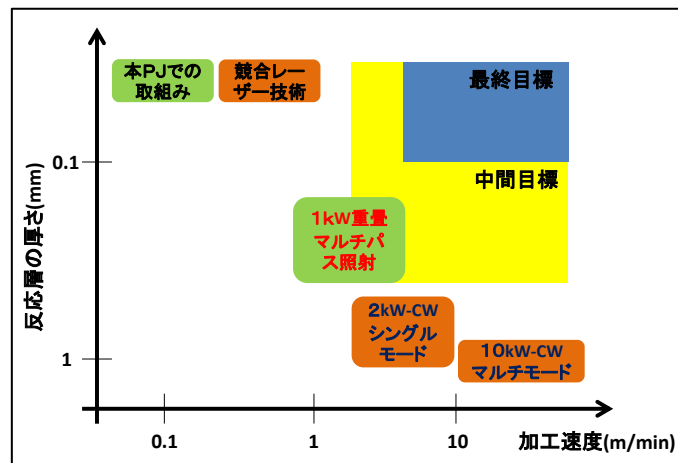
### 2.13.2 研究開発目標と根拠 (2.14.2 も含む)

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

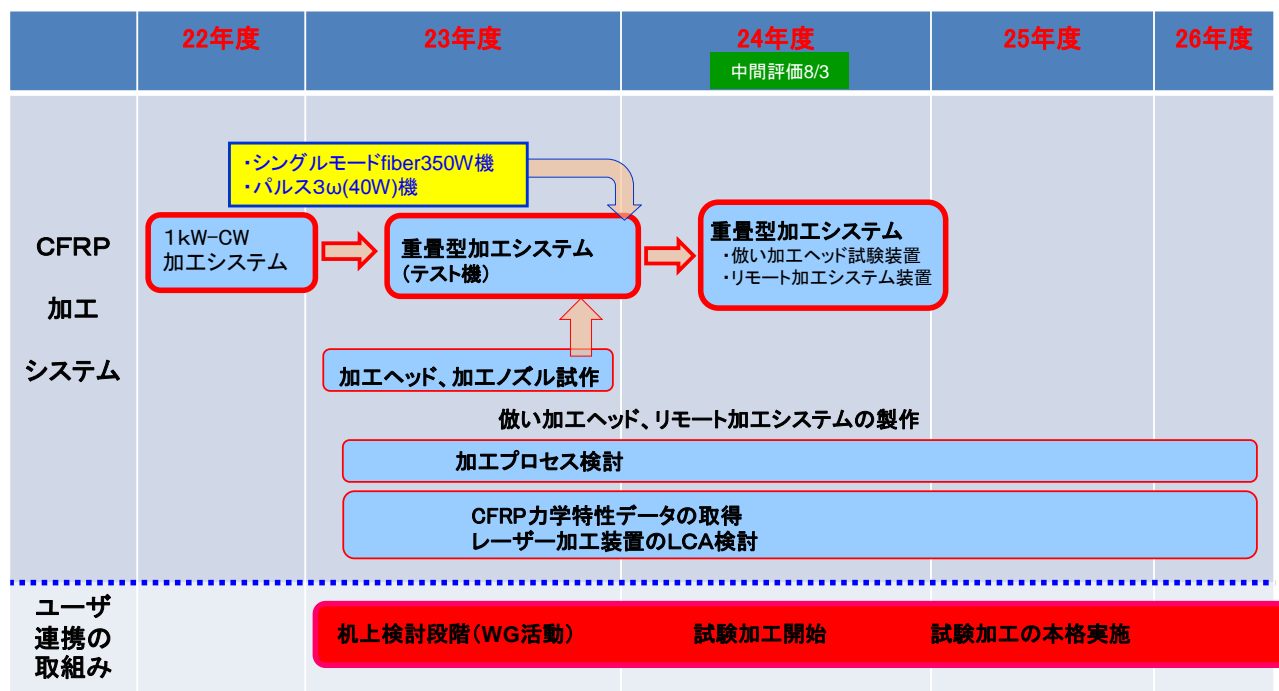
項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
加工速度	6 m/min以上	自動車製造時におけるフードやルーフ等の大型部材の加工を <b>タクトタイム1分以内</b> に完了させるため	2 m/min以上	開発するレーザー技術の適否判断材料として最終目標の1/3を設定
加工品位(切断)	反応層の厚み: 100 μm以下 引張強度: 10%未満の低減に抑制	加工時に発生する部材の熱損傷を定量的に評価するために設定、機械加工と比較した場合の加工時劣化を1割以内に抑制する(ユーザー企業からのリクエスト)	反応層の厚み: 500 μm以下 引張強度: 15%未満の低減に抑制	開発するレーザー技術の適否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)。



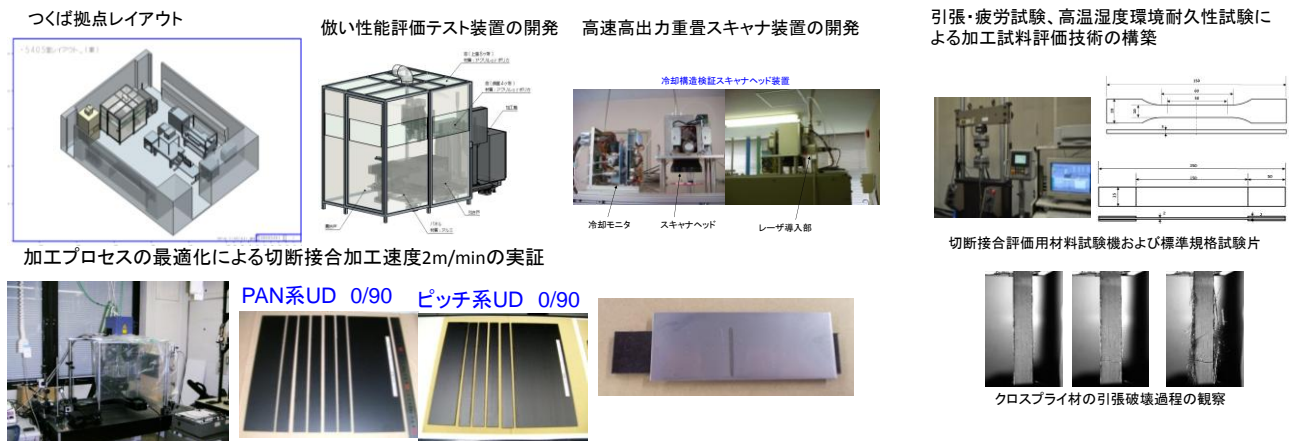
表III-2.13.2 開発スケジュール

## 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	500μ m以下	100μ m以下	350μ m以下	300μ m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)

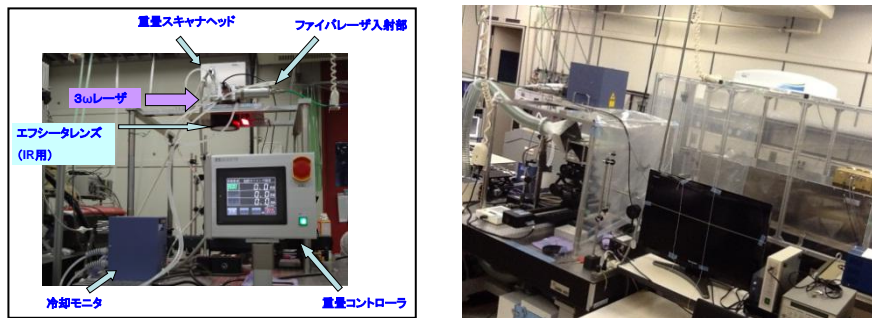


図Ⅲ-2.13.2 研究開発目標と達成状況

## 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

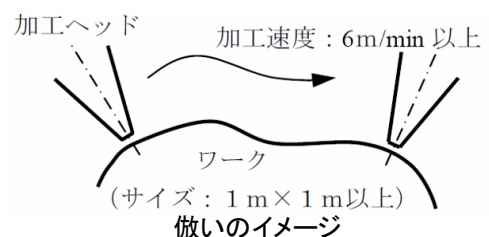
### ○高速高精度制御加工ノズルの開発（ALPROT：新日本工機株式会社）

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



ハズ数	ME-30	測定値 (mm)	MP-27	No. 1	No. 5	No. 9				
1		X=26.6 X'=45.3 Y=45.3 Y'***		X=4.8 X'=15.5 Y=2.6 Y'=20.7		X=5.9 X'=14.6 Y=15.4 Y'=27.3		X=3.8 X'=15.1 Y=3.3 Y'=33.3		X=4.4 X'=18.4 Y=3.9 Y'=32.7
5		X=14.5 X'=49.2 Y=29.3 Y'***		X=6.4 X'=11.8 Y=2.8 Y'=19.4		X=4.8 X'=12.2 Y=2.8 Y'=13.0		X=4.4 X'=10.7 Y=1.3 Y'=13.0		X=3.8 X'=8.9 Y=1.0 Y'=12.7
10		X=8.7 X'=38.3 Y=21.3 Y'***		X=6.1 X'=10.6 Y=11.0 Y'=17.9		X=4.9 X'=13.4 Y=3.7 Y'=18.4		X=3.5 X'=8.4 Y=0.6 Y'=10.3		X=3.5 X'=7.3 Y=0.9 Y'=10.7
15		X=11.4 X'=45.7 Y=22.9 Y'***		X=6.4 X'=11.3 Y=13.9 Y'=19.7		X=5.9 X'=17.6 Y=1.3 Y'=15.1		X=3.5 X'=8.6 Y=0.6 Y'=10.6		X=3.7 X'=8.3 Y=0.7 Y'=14.2
20		X=9.0 X'=42.2 Y=16.2 Y'=46.6		X=8.8 X'=11.3 Y=14.4 Y'=23.3		X=4.5 X'=12.5 Y=2.9 Y'=14.6		X=3.8 X'=8.4 Y=0.8 Y'=13.2		X=3.9 X'=11.5 Y=0.8 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=9.8 Y'=16.5		X=3.4 X'=10.3 Y=0.8 Y'=15.4		X=3.2 X'=13.2 Y=0.4 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。

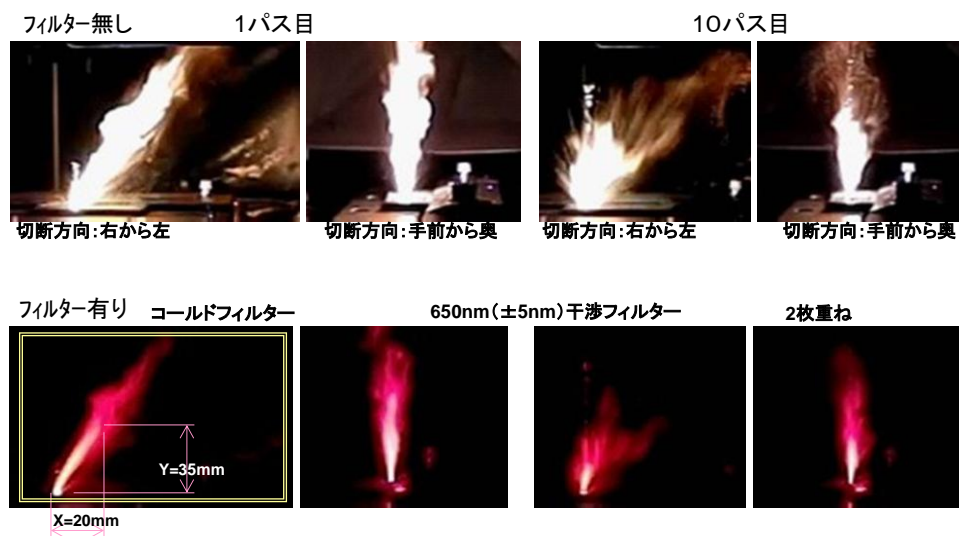
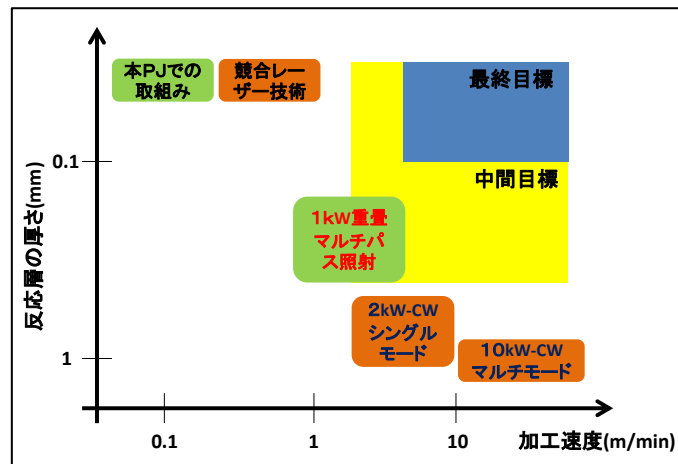
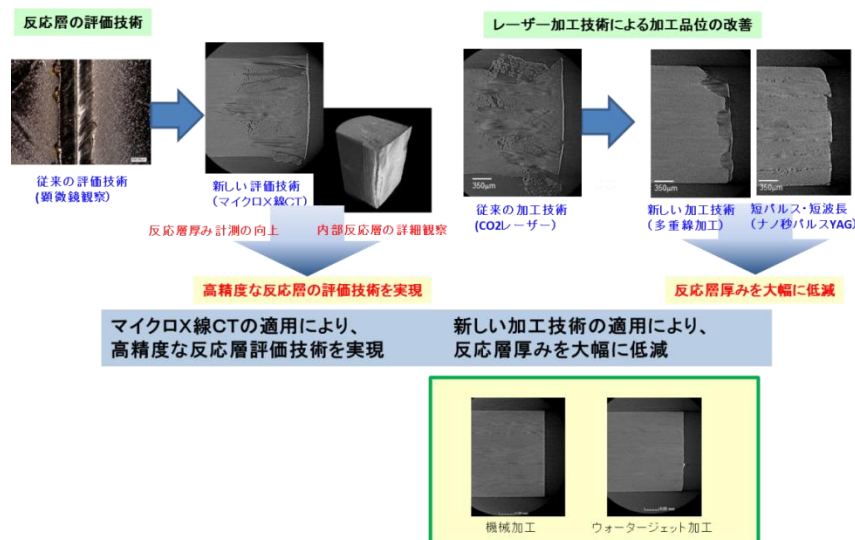


図 III-2.14.1 加工点のリアルタイム画像 (高速ビデオカメラ観測)



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°C 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°C) 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。

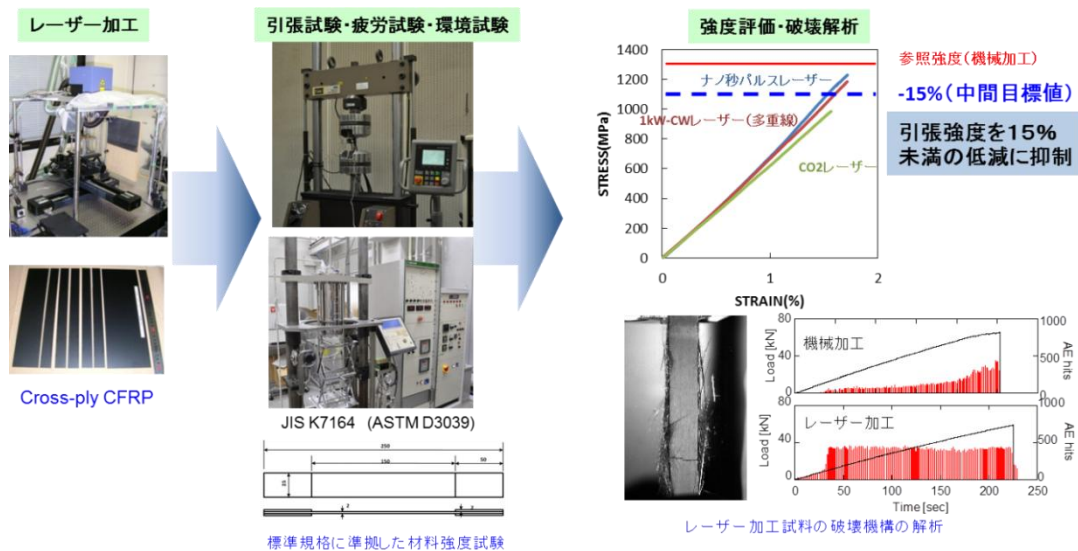
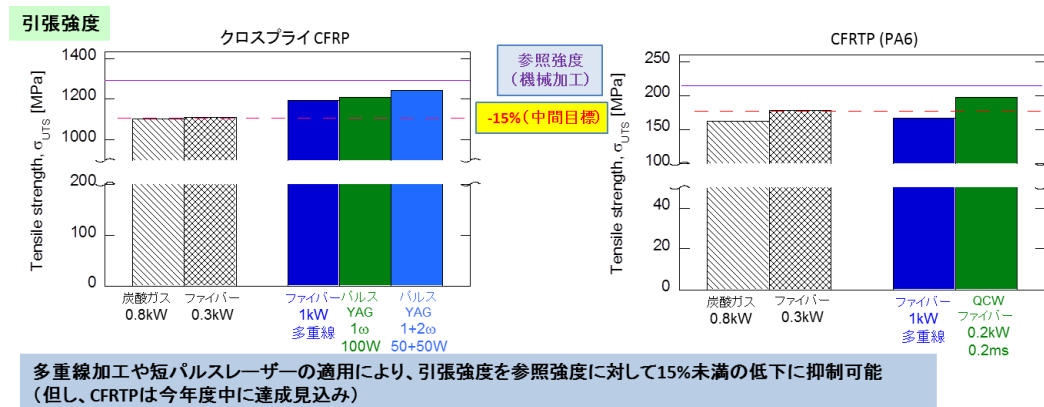
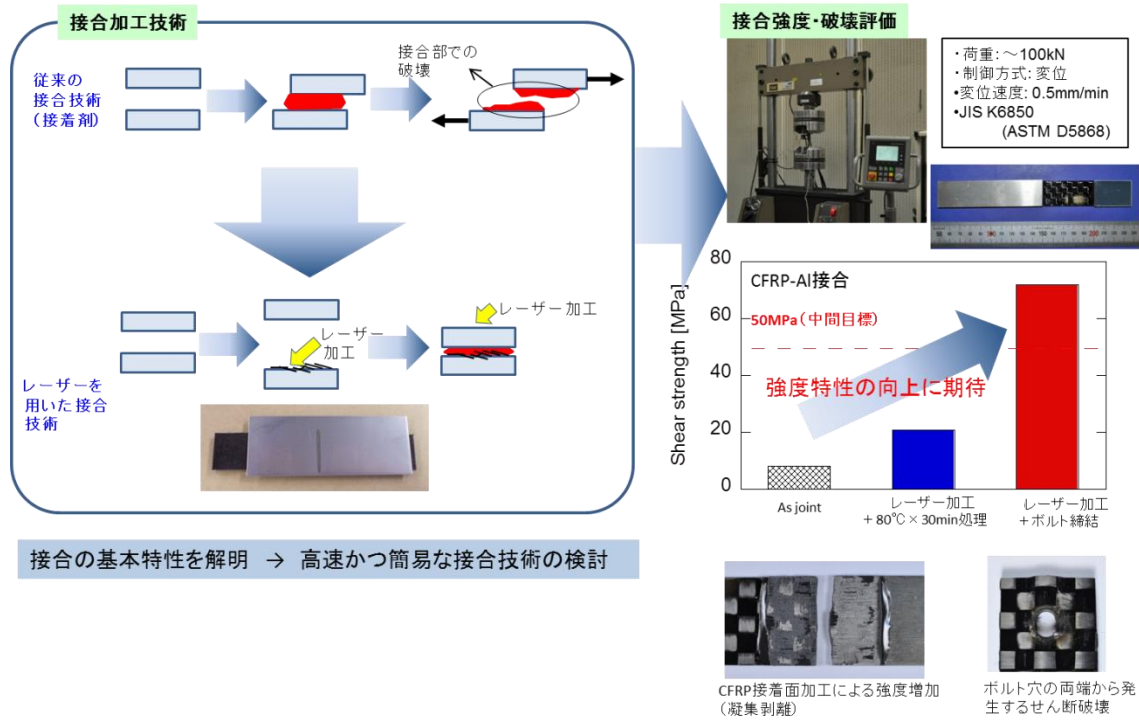


図 III-2.14.4 CFRP のレーザー切断加工試料評価技術の概要



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 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での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の商品目である。

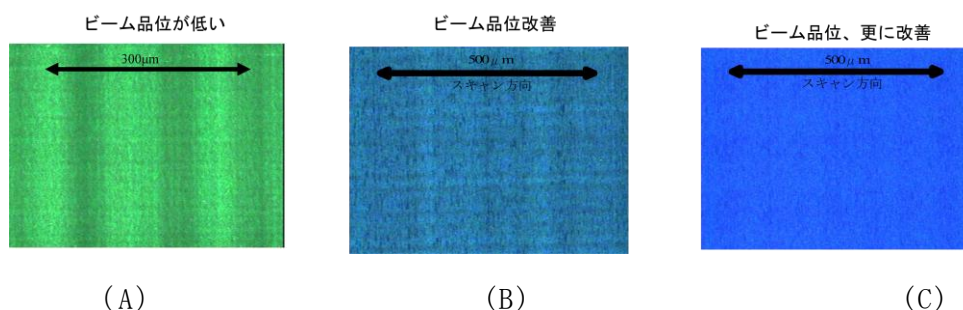
表Ⅲ-2.15-1 研究開発目標値

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 $\mu$ m 照射均一性: $\pm$ 7%	中間目標にて達成	500mm 20 $\mu$ m $\pm$ 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 $\mu$ m 照射均一性: $\pm$ 7%		500mm 20 $\mu$ m $\pm$ 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: $\pm$ 2%以内 測定分解能: 5 $\mu$ m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 $\pm$ 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)。

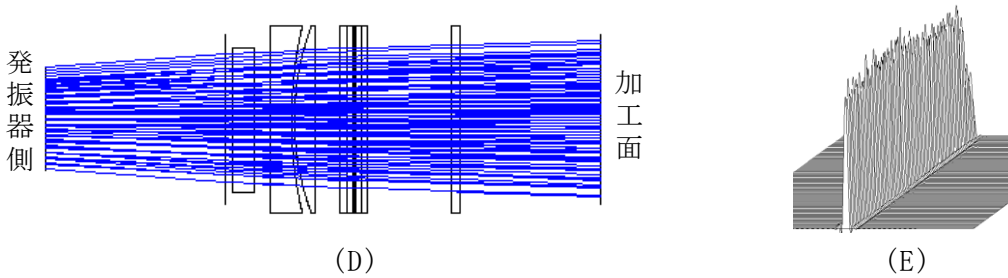


図 III-2.15-2 140 mm ワイドビームのレイトレースと照射分布図

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。

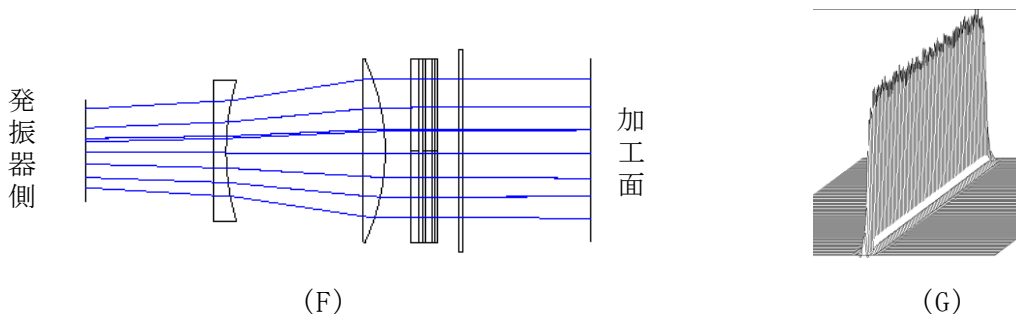
均一アニールに向けて

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

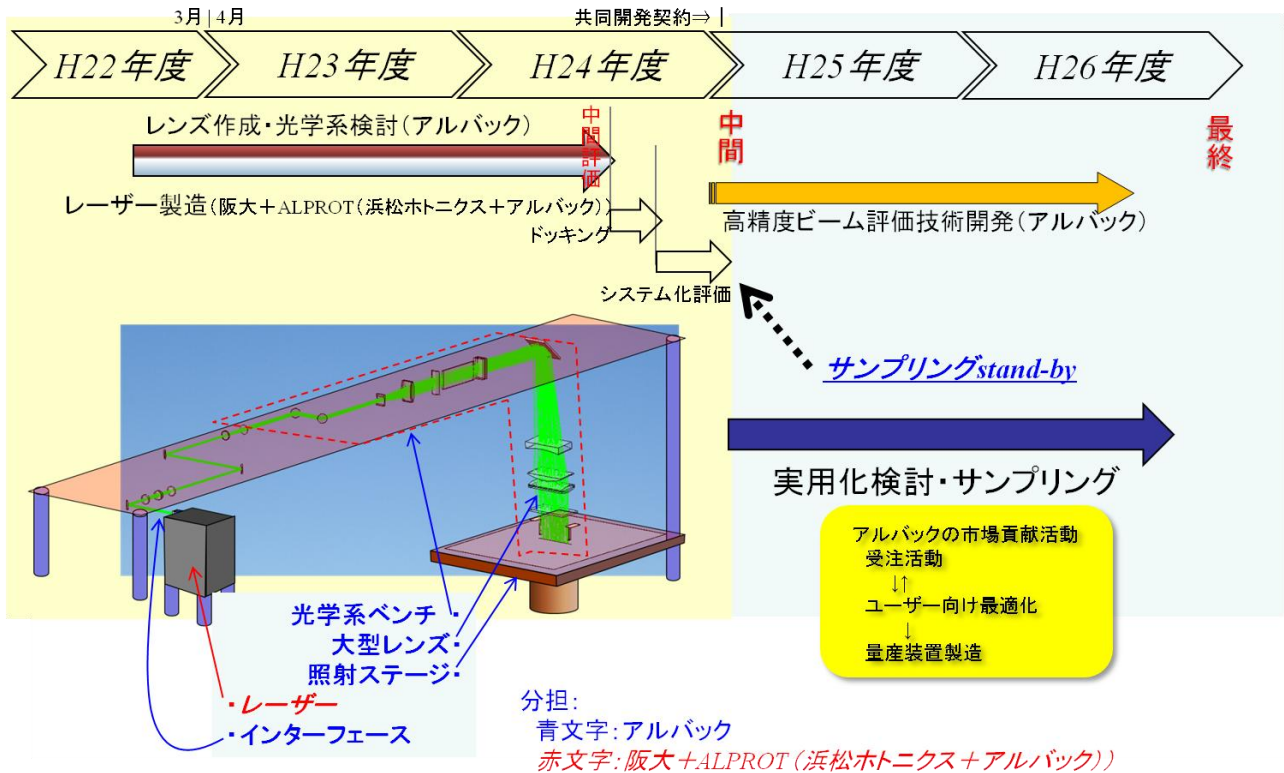
径より拡張することになるので、球面収差が大きく影響するからである。球面収差の抑制手段として、幾種類かのガラス種を用いて補正配置とすることが主流であろう。色消しなども代表的な方法のひとつである。更に近年では、非球面レンズを用いた光学系のデザインが可能な場合がある。球面収差は非球面化したレンズを用いる事で、容易に改善されることが知られている。多くは丸型レンズにおいて実用化されている。

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

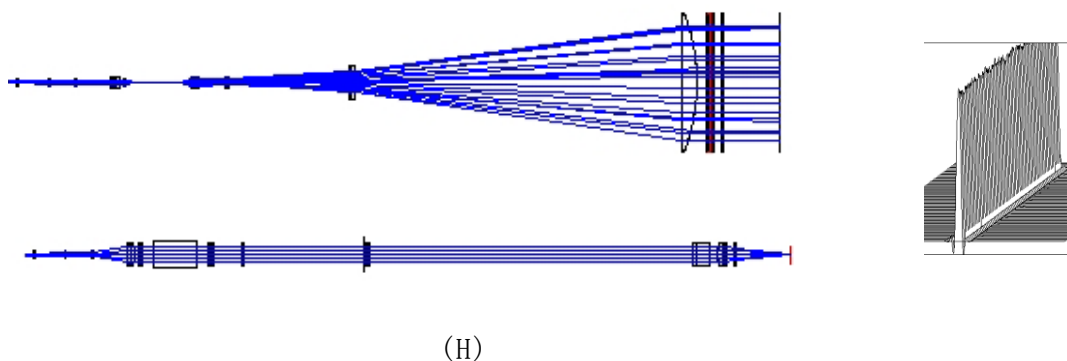


図 III-2.15-5 700 mmワイドビームのレイトレースと照射分布図

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)。

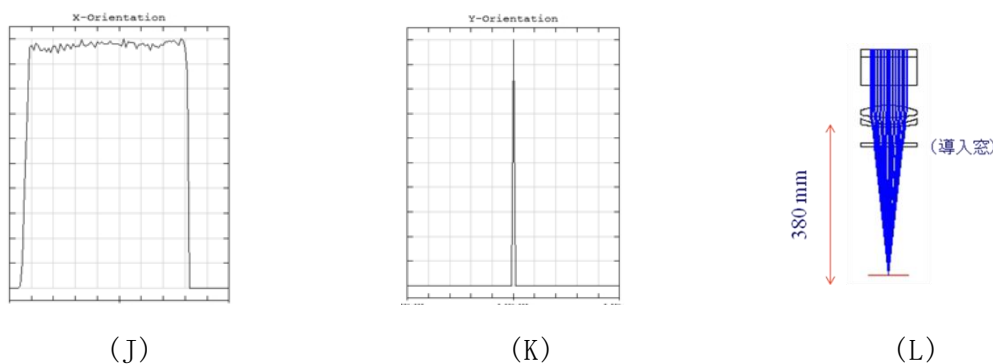
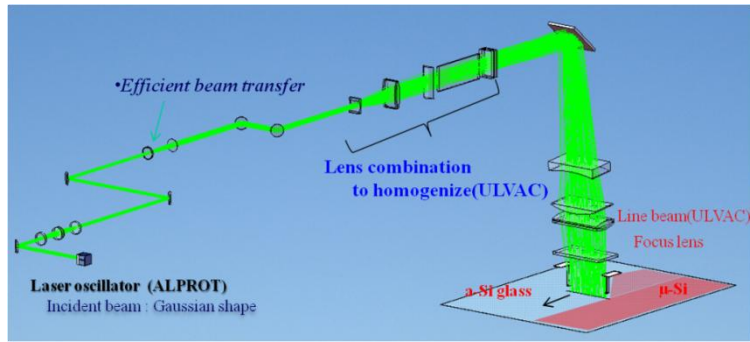


図 III-2.15-6 700 mmワイドビームの幅広方向の分布と集光方向特性

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張対応を行った。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必要があ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。

表Ⅲ-2.16-1 大型レンズの精細研磨の目標値

	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



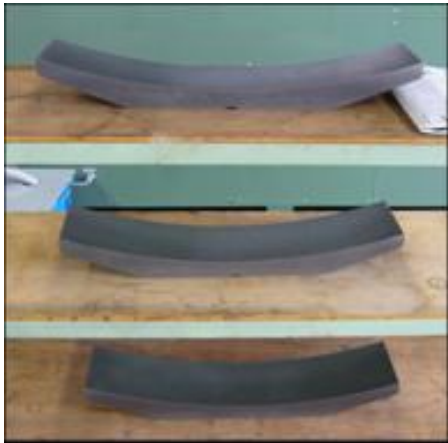
図Ⅲ-2.16-1 大型異型レンズ研磨装置の外観(粗研磨/仕上げ研磨共通タイプ)

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  $\mu$  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 mm  $\times$  900 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  $\mu$  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。



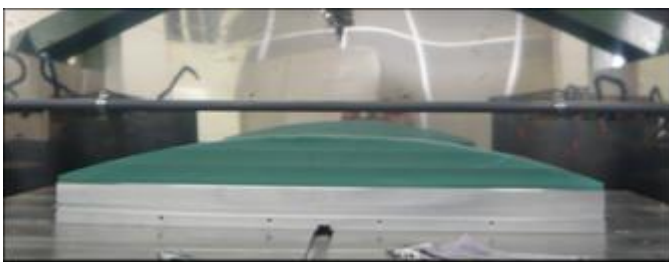
図Ⅲ-2.16-2 研磨加工ステージ部詳細

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の光学検査手法を使って行った。その後に顕在化処理を施す。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。

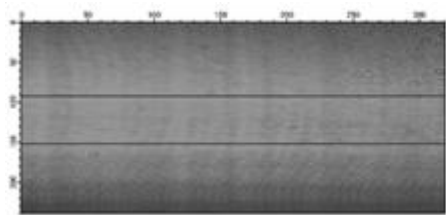


図 III-2.16-5(A)

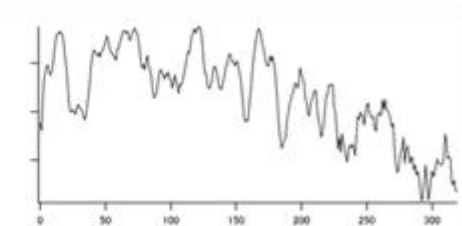


図 III-2.16-5(B)

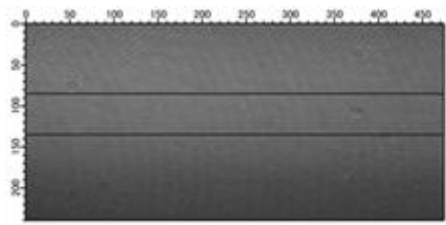


図 III-2.16-6(A)

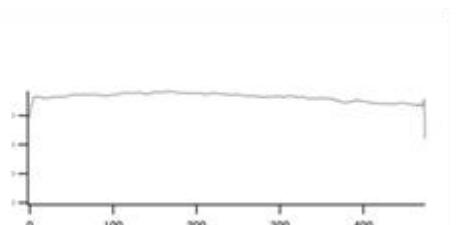


図 III-2.16-6(B)

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。

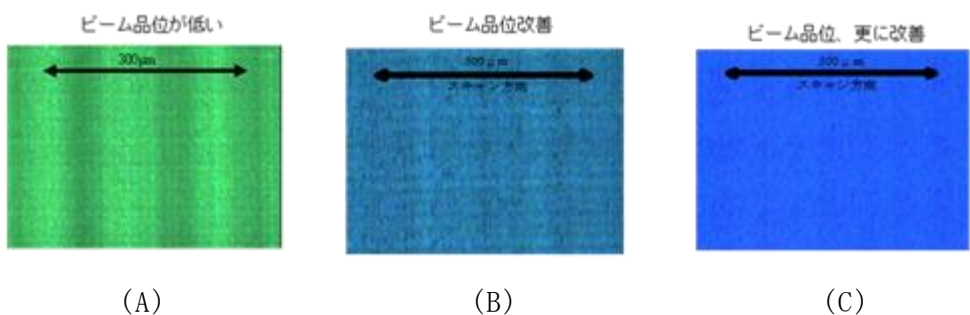
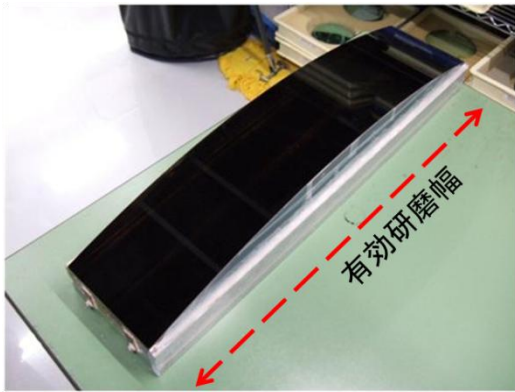


図 III-2.16-7 高精度研磨面を有するレンズを搭載したアニール実験結果

我々は、顕在化処理による観察と研磨を繰り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ド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)

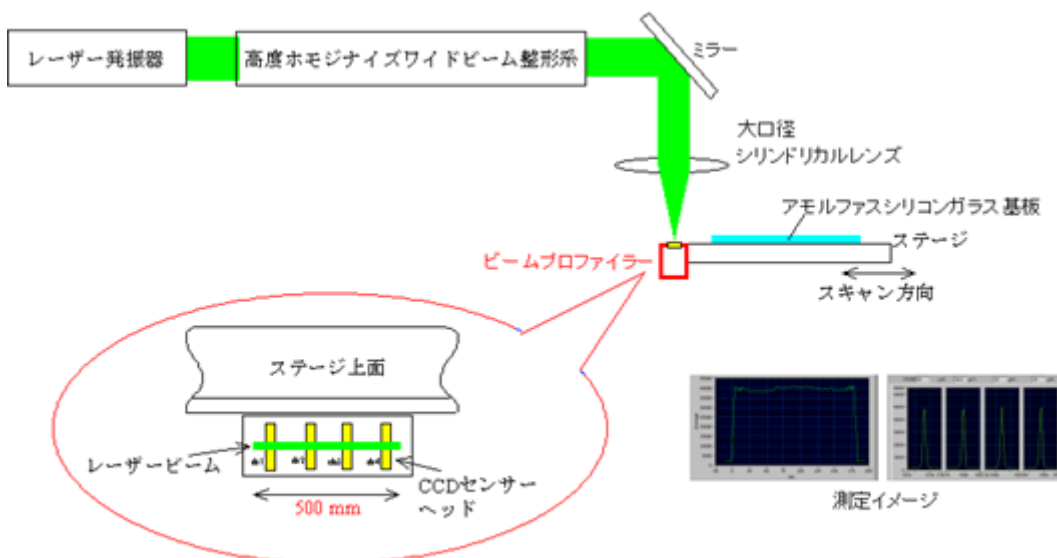
### 2.17.1 事業の背景・意義（目的・概要）

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。

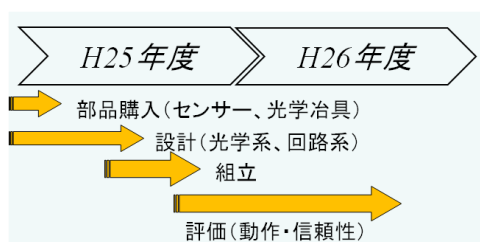
図 III-2.17-1 照射位置近傍に設けたビームプロファイラ

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。