

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」
プロジェクト

事業原簿【公開】

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 I o T 推進部
-----	--------------------------------------------

—目次—

概 要	i-1
プロジェクト用語集	i-6
I. 事業の位置付け・必要性について	I-1
1. 事業の背景・目的・位置づけ	I-1
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-4
2.1 NEDO が関与することの意義	I-4
2.2 実施の効果（費用対効果）	I-5
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目標	II-1
2. 事業の計画内容	II-4
2.1 研究開発の内容	II-4
2.2 研究開発の実施体制	II-6
2.3 研究開発の運営管理	II-7
2.4 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	II-9
3. 情勢変化への対応	II-10
4. 評価に関する事項	II-10
III. 研究開発成果について	III-1
1. 事業全体の成果	III-1
2. 研究開発項目毎の成果	III-3
IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	IV-1
1. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	IV-1
2. 研究開発項目毎の実用化の見通しについて	IV-2

（添付資料）

・特許論文等リスト

概要

		最終更新日	平成30年 6月1日
プロジェクト名	高輝度・高効率次世代レーザー技術開発	プロジェクト番号	P16011
担当推進部/ PMまたは担当者	IoT推進部 須永 吉彦（平成28年4月～平成30年6月現在） IoT推進部 服部 一成（平成28年4月～平成30年6月現在） IoT推進部 加藤 友章（平成28年4月～平成28年8月）		
0. 事業の概要	<p>将来のものづくり現場では、あらゆるモノがインターネットでつながる IoT（Internet of Things）や人工知能のさらなる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携と、人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。レーザー加工は、こうした将来のものづくりにおける最重要ツールの一つとして期待されているが、現行のレーザー加工技術は、消費電力や加工処理能力、加工精度や品位の観点において課題を有している。</p> <p>日本のものづくり競争力を将来にわたって維持していくため、これまでにない高輝度（高出力・高ビーム品質）かつ高効率なレーザー技術、及びそれをを用いたレーザー加工技術を開発し、社会実装を進めることで、消費エネルギーの削減と、わが国ものづくり産業の競争力強化を図る。</p> <p>本事業では、各項目間の連携にも配慮しながら、以下の研究開発項目について実施する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ①：高品位レーザー加工技術の開発 ②：高出力レーザーによる加工技術の開発 ③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発 ④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発 		
1. 事業の位置 付け・必要性 について	<p>天然資源の乏しい日本にとって、ものづくり産業は生命線である。しかしながら、将来的に人口減少が進むと予想されており、社会構造の変革に対応した技術革新を取り入れることで従来のものづくり産業構造から脱却し、新産業革命を推進していくことが求められている。</p> <p>近年の技術革新を鑑みるに、将来のものづくり産業では、あらゆる「もの」がインターネットでつながる IoT（Internet of Things）や人工知能の更なる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携や人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。</p> <p>その中で、照射強度や照射時間などをデジタル制御し易いレーザー加工は、将来のものづくり産業における最重要ツールの一つとして期待されている。</p> <p>我が国の政策としては、科学技術イノベーション総合戦略 2017（2017年6月閣議決定）では、「新たな産業や技術基盤の創出の核となる先端レーザー等の量子ビーム利用技術の高度化」を「Society 5.0」（超スマート社会）の実現に向けて重きを置くべき取組の一つとして位置付けている。また、第5期科学技術基本計画（平成28年1月22日閣議決定）では、「超スマート社会」の実現に向けた新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つとして、「革新的な計測技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながる「光・量子技術」」の強化を図るとしている。</p> <p>世界に目を向ければ、レーザー技術先進国である米国と、国主導のプロジェクトを通じて絶え間なくレーザー関連分野の研究開発に投資をしてきたドイツが世界をリードしているという現状がある。また、世界の工場として急速に成長した中国もレーザー関連分野において先進国を追い上げている。日本のものづくり産業が将来にわたって競争力を維持していくためには、高付加価値製品の製造に適した高精度・高品位加工に対応する次世代レーザー加工システムを世界に先立って開発し、早期実用化を進め、ものづくり業界へ広く普及させることが必要となる。</p>		

2. 研究開発マネジメントについて

事業の目標

○アウトプット目標（2020年）

本事業では、レーザー加工の高品位化・高スループット化および省エネルギー化を進めるため、従来になく高輝度（高出力・高ビーム品質）かつ高効率なレーザー装置、およびそれらを用いた実用的なレーザー加工技術を開発する。レーザーとしては、市場ニーズが顕在化しているにも関わらず実用化できていない青～深紫外域の短波長レーザーや超短パルスレーザー、高パルスエネルギーレーザーを開発する。また、高機能化・低コスト化に対する市場からの継続的な要求に応えるため、革新的な次々世代レーザー基盤技術を開発する。

具体的な目標としては、事業終了時において研究開発計画の研究開発項目①～④の最終目標を達成することとする。

- ①：平均光パワー50W以上の深紫外ピコ秒パルスレーザー開発（現行比8～16倍）
- ②：パルスエネルギー500J級の高出力パルスレーザー開発（計画策定時：現行比25～50倍）
- ③：6つのテーマ毎にそれぞれで設定
- ④：最適加工パラメータの探索が可能なレーザー加工プラットフォーム構築
加工条件と加工結果とを対応付けるデータベース構築

③は革新的なレーザー光源に関して採択された6つのテーマにおいて、高輝度化・高出力化・省電力化・短波長化・小型化等に資する独創的な新規レーザー光源の構造に関する設計論を確立し、これに基づいて実現可能な諸性能を定量的に明らかにする。また、要素技術を開発し、光源試作を通じてその実現可能性を明らかにするものとし、2018年度にステージゲートを行う。

○アウトカム目標（2030年）

本事業により開発されたレーザー装置、これを組み込んだレーザー加工機、およびこれらを活用して加工された製品などの普及により、CO₂削減および加工市場のシェア確保をアウトカム目標とする。本事業がもたらす省エネ効果は、CO₂換算で2030年に655万t/年の削減を見込んでいる。見積りに当たっては、本研究成果（機器、応用製品）が既存技術を置き換える形で順次社会実装され、波及効果が起きるものと仮定している。市場に関しては、2030年のレーザー加工システムの予想約200億ドルのシェア35%を目指す。

事業の計画内容

主な実施事項	2016fy (H28)	2017fy (H29)	2018fy (H30)	2019fy	2020fy
① 高品位レーザー加工技術の開発	設計／要素技術 試作・動作実証		高出力化 加工応用実証		
② 高出力レーザーによる加工技術の開発	設計／要素技術 試作・動作実証		高出力化 加工応用実証		
③ 次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	要素技術開発 試作・動作実証		ステージ ゲート	絞り込み 高出力化・評価	
④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	加工PF構築、調査研究、計測技術・標準		データベース構築 加工原理解明		

事業費推移
(会計・勘定別にNEDOが負担した実績額(評価実施年度については予算額)を記載)
(単位:百万円)

会計・勘定	2016fy	2017fy	2018fy	2019fy	2020fy	総額
一般会計	0	0	0	-	-	
特別会計 (電源・需給の別)	2,000	2,000	2,550	-	-	6,550
開発成果促進財源	0	0	0	-	-	0
総NEDO負担額	2,000	2,000	2,550	-	-	6,550
(委託)						

開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局 研究開発課
	プロジェクトリーダー	プロジェクトリーダー 国立大学法人東京大学 物性研究所 教授 小林洋平 サブプロジェクトリーダー 国立大学法人東京大学 大学院 理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構 特任准教授 田丸博晴 国立研究開発法人産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 主任研究員 黒田隆之助
	プロジェクトマネージャー	I o T推進部 須永吉彦
	委託先	<ul style="list-style-type: none"> ・ 東京大学、再委託：東北大学、(株)Q Dレーザ ・ (国研) 産業技術総合研究所、再委託 早稲田大学 ・ 大阪大学、共同実施：ヤマザキマザック(株) ・ 三菱電機(株) ・ スペクトロニクス(株) ・ 浜松ホトニクス(株) ・ ギガフォトン(株) ・ (株)島津製作所 ・ 京都大学 ・ スタンレー電気(株) ・ (国研) 理化学研究所 ・ 山口大学 ・ パナソニック(株) ・ パナソニック スマートファクトリーソリューションズ(株) ・ 東京工業大学 ・ 富士ゼロックス(株) ・ 千葉工業大学 ・ (株)金門光波 ・ (公財) レーザー技術総合研究所
情勢変化への対応	高出力の青色半導体レーザー光源開発では、海外メーカーとの開発競争が激化しており、早期の市場参入による顧客獲得のため、技術の切り出しにより製品化を推進する方針とした。このため担当する島津製作所を大阪大学の共同実施先から直接の委託先へと変更した。	
3. 研究開発成果について	項目①：高品位レーザー加工技術の開発	
	最終目標	平均光パワー50W以上の深紫外ピコ秒パルスレーザーを開発する。
	中間目標	平均光パワー20Wの深紫外ピコ秒パルスレーザーを開発する。 レーザー加工評価システムの構築。
	達成状況	新型組成比による大型CLBO結晶育成技術を開発した。大型CLBO結晶を組み込んだ深紫外ピコ秒パルスレーザーを開発し、波長 266nm、パルス幅 13psにおいて平均出力26Wを達成した。また、10W級の深紫外ピコ秒パルスレーザーを搭載した加工評価システムを製作し、難加工材等の加工評価を開始した。
	項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発	
	最終目標	パルスエネルギー500J級の高出力パルスレーザー開発する。
	中間目標	パルスエネルギー100J級の高出力パルスレーザー開発する。
達成状況	パルスエネルギー100J級の高出力パルスレーザー装置と加工システムを構築した。並行して高出力パルスレーザーによる新規加工技術の実証に着手し、大面積加工、深層加工について知見を得られた。	

項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発

最終目標	平成30年度に研究開発成果や当該技術分野の動向を考慮して設定する。
中間目標	6つのテーマ毎にそれぞれで設定する。 革新的なレーザー光源に関して採択された6つのテーマにおいて、高輝度化・高出力化・省電力化・短波長化・小型化等に資する独創的な新規レーザー光源の構造に関する設計論を確立し、これに基づいて実現可能な諸性能を定量的に明らかにする。また、要素技術を開発し、光源試作を通じてその実現可能性を明らかにする。
達成状況	6つのテーマで光源開発を進め、半導体レーザーの高出力化開発などの要素技術開発を進め、各々試作を通じて実現可能な特性値が得られ、実証に向け良好な結果が得られてきている。 ① フォトニック結晶レーザー：100psのパルス発振に成功、GaN系材料では新規製法を開発した。 ② 深紫外半導体レーザーダイオード：AlN系材料で50%超の内部量子効率を達成するなどレーザー発振に向けて特性向上した。 ③ 高出力 GaN系レーザーアレイ：ワンチップアレイで80W以上の出力となるレーザーモジュールを開発した。 ④ 面発光レーザーの高出力化：新しいモノシリック構造のレーザー増幅器を開発し長尺化により高出力化が可能であることを実証した。 ⑤ 量子ドットレーザー：超高密度量子ドットの形成技術を開発し1W級の高出力化とアレイ出力で10Wを達成した。 ⑥ 可視光励起による深紫外光源：基本波(640nm)で1W出力、2倍波の紫外光(320nm)で58mWの出力を達成した。

項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発

最終目標	最適加工パラメータの探索が可能なレーザー加工プラットフォーム構築 加工条件と加工結果とを対応付けるデータベースを構築する。
中間目標	レーザー加工プラットフォームを構築する。 加工部を非破壊非接触でその場観察する手法を提案する。
達成状況	レーザー加工プラットフォームの構築として、加工条件出しできるレーザー加工機システムと、その場計測手法では、材料の光学特性を測定する真空紫外域エリプソメトリーを開発、データベース構築を開始した。 青色半導体レーザー光源の開発では、世界最高クラスの100W級レーザー光源を開発するとともに、青色半導体レーザーを搭載した溶接機、3Dプリンターの試験装置を開発した。

投稿論文	「査読付き」12件、「その他」3件
特 許	「出願済」27件
その他の外部発表 (プレス発表等)	「研究発表・講演」160件、 「新聞・雑誌等への掲載」32件(内、NEDO広報誌特集1件)、 「展示会出展」7件(内、NEDOによる出展1件)

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

高出力青色半導体レーザー光源の技術開発では開発の完了した100W級光源技術の切り出しにより製品化を実施した。また、これまでの開発により、①「高品位レーザー加工技術の開発」、②「高出力レーザーによる加工技術の開発」、③「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」、④「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」のいずれ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とともに、技術の切り出しにより実用化、事業化可能なテーマについては積極的な製品化を推進していく方針である。
実用化、事業化の詳細は各実施者の報告による。

5. 基本計画に関する事項	作成時期	平成29年8月 作成
	変更履歴	<ul style="list-style-type: none"> (1) 平成28年4月 制定 (2) 平成29年2月 非連続ナショナルプロジェクトに認定されたことに伴い改訂 (3) 平成29年8月 基盤技術の確立と成果普及に向けて設立するコンソーシアムの位置づけを明確化するため改訂

プロジェクト用語集

用語	意味
1次元・2次元結合係数	フォトリソグラフィによる光の回折の強さを表す指標。1次元結合係数は、180°方向（逆方向）に伝搬する光への回折の強さを、2次元結合係数は、90°方向（逆方向）に伝搬する光への回折の強さを表す。
AlGaIn	深紫外で発光し、深紫外LED（Light emitting diode 発光ダイオード）やLD（Laser diode レーザーダイオード）などの発光素子の発光層、活性層として用いられる窒化物半導体材料。アルミニウム（Al）組成を変化させることによって、バンドギャップは3.4eV（GaIn）から6.2eV（AlN）まで変化させることができ、波長210～360nmで発光が得られる直接遷移半導体である。発光波長は、UVA（400-315nm）、UVB（315-280nm）、UVC（280-200nm）をするため、AlGaInを用いて実現される深紫外発光素子は、殺菌、浄水、空気浄化、皮膚治療、加工用レーザー、樹脂硬化用光源、など様々な用途への応用が期待されている。
AlN	窒化物半導体のうちで最もバンドギャップが大きい材料。バンドギャップは6.2eVであり現在利用できる半導体の中で最もバンドギャップが大きい。210nm程度の深紫外で発光する直接遷移半導体で、半導体の中で最も高いエネルギーで発光する半導体材料である。深紫外LEDやLD（レーザーダイオード）の基板材料として重要である他、高耐圧、高出力電子デバイス用基板としても注目されている。
ASE	増幅自然放出光
BPP	Beam Parameter Product の略。広がり半角とスポット半径の積。小さいほど、ビーム品質が高い。
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics の略。炭素繊維強化プラスチック。樹脂を炭素繊維で強化したもの。
CLBO	深紫外光波長変換に用いられるホウ酸系非線形光学結晶 CsLiB ₆ O ₁₀ 。
DFB レーザー	Distributed feed-back レーザーの略。半導体レーザーの活性領域に回折格子を形成し、スペクトル線幅の狭いレーザー発振を実現したレーザー
COD	Catastrophic Optical Damage レーザー光出射端面の損傷。
DUV	Deep Ultra-Violet（深紫外）の略。波長300nm以下の短波長紫外線。
EV	Electric Vehicle 電気自動車
FOPLP	Fan Out Panel Level Packaging の略。パネルサイズレベルで一括製造する次世代パッケージ工法
FOWLP	Fan Out Wafer Level Packaging の略、ウェハサイズレベルで一括製造する次世代パッケージ工法
GaAs系	砒化ガリウム（Gallium Arsenide）を主とする半導体の総称。GaInその他、AlGaAsなどが含まれる。禁制帯が小さく、長波長（近赤外）の発光が可能。
GaN系	窒化ガリウム（Gallium Nitride）を主とする半導体の総称。GaNその他、InGaN、AlGaInなどが含まれる。禁制帯が大きく、短波長（紫外～緑）の発光が可能。
g線	縮小投影露光装置、いわゆるステッパが1980年代に登場した当時は、超高压水銀ランプのスペクトルのうち、可視光域のg線（波長436nm）が用いられた。これにより、ウェハ上には0.8μm幅程度のパターンの形成が可能になり、4M-DRAMの生産に適用された。
Hänsch-Couillaud (HC) 法	HC法は共振器内の偏光により実質的な共振器長にわずかな差がでる。これを利用し、共振器のレーザー反射光をPBSにより偏光ごとに分け、その差分を取ることで誤差信号を得ることが出来る。この誤差信号を共振器ミラーのPZTに返すことにより共振器長をロックし、出力安定化を行うことが出来る。
HAZ	Heat Affected Zone（熱影響領域）：レーザー加工において熱影響の度合いを評価するための指標で、一般的に熱影響層の大きさを言う。
i線	1990年代初頭には、同じ光源である超高压水銀ランプのスペクトルのうち紫外域のi線（波長365nm）が用いられた。紫外光に対応できる透過率の高い投影レンズの硝材

	開発と合わせて実用化された。短波長化により最小解像線幅は $0.5\mu\text{m}$ を下回り、16M-DRAM の生産に用いられた。
LD、LD バー、LD スタック	Laser diode 半導体レーザーの略。一般に LD チップが 1cm に並べられた素子を LD バーと呼び、LD バーを積層したデバイスを LD スタックと呼ぶ。
MOCVD	半導体の結晶成長を行う手法の一つ。有機金属気相成長法 (Metal Organic Chemical Vapor Epitaxy) の略語。窒化物半導体、その他の半導体材料の生産用結晶成長に幅広く用いられており、窒化物・青色、紫外 LED の生産に用いられる。
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier の略。主発振器から得られるレーザー光を増幅することで高出力を得る増幅方式。
PHV	Plug-in Hybrid Vehicle 外部から充電できるハイブリッド車
Pr ドープフッ化物ファイバ	フッ化物であるプラセオジウムをファイバにドープしたファイバ。青色レーザーで励起することで赤、オレンジ、緑、青のスペクトルを発光する。
SOA	Semiconductor Optical Amplifier : 半導体光増幅器
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser 垂直共振器面発光レーザー
アッテネータ	レーザー出力の減衰装置。レーザー装置では装置内部に搭載され、適切な加工が行なえるようレーザー出力を調整するために用いられる
位相整合条件	CLBO を含む非線形光学結晶において波長変換が実現される条件。この条件から外れると変換効率が低下する。
ウォールプラグ効率	入力電力に対するレーザー出力の比率。
エッチピット	結晶表面の転位欠陥部が他よりも早く溶けることを利用し、転位が観察できるように化学処理により表出した窪み (ピット)。
ガルバノスキャナ	モータを用いて反射ミラーの角度を変化させてビーム照射位置をスキャンする装置
クーロン爆発	クーロン反発による多価分子イオンや多価クラスターイオンの解離過程。強いレーザー場により分子やクラスターから複数の電子がはぎとられ生成した多価分子イオンや多価クラスターイオンは、分子やクラスター内の強いクーロン反発力によって速やかに解離し、大きな運動エネルギーをもつフラグメントイオンを生成する。
スローライト	群速度の遅い光の波
ダブルクラッドファイバ	クラッドが二重構造になっており、励起光のレーザー光が第一クラッドの内側を伝搬することで励起効率を高くできる。ファイバレーザーのファイバに採用されている。
チャープパルス増幅 (CPA)	パルスレーザーにおいて、パルス幅を上げたチャープパルスの状態にして増幅し、出力を再び圧縮する方式。高い瞬時強度による素子損傷や光パルスの性質劣化を防ぎつつ、高尖頭の出力を得ることができる。
フェムト秒	1fs (フェムト秒) = 10^{-15} 秒
フォトニックバンド構造	フォトニック結晶中における光の波数と周波数の関係を示したものの。バンドの傾きがゼロとなる点では、光の群速度が零となるため、大面積コヒーレント共振作用が得られる。フォトニック結晶レーザーは、この共振モードをレーザー共振器として利用した半導体レーザーである。
フォトニック結晶	光の波長程度の周期的屈折率分布をもつ光材料。様々な光制御が可能な新しい材料として注目されている。
フラグメントイオン	イオン化によって生成したイオンのうち、解離過程を経て生成したイオンのこと。
プラズマ	気体を構成する原子や分子が電離し、陽イオンと電子に分かれて運動している状態。
フラックス	結晶を融点以下で溶解させるために加える溶剤、CLBO の場合は化学式の比率から成分を変えると余剰成分が溶剤として働く (セルフフラックス)。
モスアイ構造	蛾の眼と同じ構造を人工的に作る。モスアイ構造では光の屈折及び反射が原理的になくなるため、テラヘルツミラー等の無反射コーティングの代替として期待されている。
ラマン分光	試料にレーザーを照射し放出されるラマン光を分光することによって分子の結合状態などを調べる手法。

レーザークリーニング	レーザーを対象部へ照射することで、汚れやサビなどの不要物をアブレーションにより除去するレーザー加工法の一つ。
レーザーピーニング	レーザー照射によって発生した衝撃波が材料内部を伝搬することで、材料表面付近に圧縮の残留応力を付与するレーザー加工法の一つ。
外部量子効率	外部量子効率 (External Quantum Efficiency : EQE) は、発光領域への投入電力 (波長で換算される電圧×電流) に対する外部に放射される光出力で定義され、LED 効率の一つの指標として用いられる。外部量子効率は、内部量子効率 (IQE : internal quantum efficiency)、電子注入効率 (EIE : electron injection efficiency)、光取り出し効率 (LEE : light extraction efficiency) の積で決定される。内部量子効率は、発光領域に注入される電子数のうち発光に寄与する電子数の割合で定義され、発光層の純粋な発光効率である。電子注入効率は、全注入電子に対する発光層に注入される電子の割合で定義される。また、光取り出し効率は、発光領域から放射された光のうち外部に取り出せる光の割合である。
貫通転移密度	結晶格子間隔の異なる基板上に半導体を結晶成長する際に生じる、原子の位置のずれ。特に、結晶成長とともに消えることなく表面まで達するものを貫通転位と呼ぶ。貫通転位の周辺では、発光強度が著しく減少するため、光デバイス作製において貫通転位密度を下げる必要がある。
残留応力	材料に外部から加えられた力を除去した後も材料に残る内部応力。
紫外レーザー損傷	結晶内部に誘電破壊が生じるバルク損傷と、局所的な屈折率変化を誘起してビームパターン変形や変換効率低下を生じさせるものがある。
時間依存密度汎関数理論	電子の多体効果を密度汎関数理論で扱い、さらに電子の実時間ダイナミクスを扱うことで近似的に励起状態を扱える理論、摂動理論では表現できない強い光による励起が引き起こす、非平衡な電子運動を近似的に扱うことができる。
自己加熱	CLBO が発生した紫外光の一部を、結晶が吸収して発熱する問題。光学素子内に温度不均一性を与え、波長変換に必要な位相整合が高温部で満たされなくなり、変換効率の低下や、出力不安定性を与える。
深紫外 LD	深紫外波長 (200-350nm) で動作する半導体レーザー。
深紫外線	概ね 300nm 以下の波長の紫外線。Deep Ultraviolet (DUV)。
多重量子障壁	LED や LD (レーザーダイオード) 素子において、電子注入効率を向上させるために用いられる電子ブロック層として用いられる。深紫外発光素子では、p 型層のホール濃度が低いために、p 側層への電子リークが大きくなり、電子注入効率が低下することが大きな問題である。そのため、通常の深紫外 LED では、バンドギャップの大きい材料で電子ブロック層を挿入し、注入効率を向上させている。電子ブロック層を、通常用いられるシングルブロック層から、多重量子障壁 (MQB : Multi-Quantum Barrier) とすることで、実効的な電子ブロック高さを向上させることができ、深紫外 LED や LD の電子注入効率の向上で極めて有効である。
導波モード	光が全反射しながら伝搬するモード
内部量子効率	内部量子効率 (IQE : internal quantum efficiency) は、LED や LD (レーザーダイオード) などの半導体発光素子において、発光領域に注入される電子数と放射された光子の数の比で定義される。発光に寄与する電子数の割合であり、発光層の純粋な発光効率である。
熱レンズ (効果)	光学素子がレーザー光を吸収して生じる温度分布に起因する光学歪。代表的には温度分布が 2 次分布に近い場合、レンズ作用となる。
波長ビーム結合	回折格子などの波長分散素子を用いて、各々波長の異なる複数のビームを単一の光軸に重畳する技術。
分子線エピタキシー	分子線エピタキシーは、超高真空環境下で単結晶の薄膜成長する方法である。高品質の半導体結晶を 1 原子層オーダーの高い膜厚制御性で作製できるため、量子ドットを含んだナノ構造を形成するための基本的なツールとして位置づけられている。
無アルカリガラス	ナトリウム等を含まないガラス。電子部品、半導体産業において多く用いられる。
量子ドット	量子ドットは直径数十ナノメートルオーダーの半導体立体ナノ構造である。電子や正孔の 3 次元量子閉じ込めにより、高効率の発光などが期待でき、次世代の発光材料として注目されている。特に、レーザーへの応用が期待されている。

量子ドットレーザー	量子ドットレーザーは量子ドット構造を利得媒質として利用するレーザーである。量子ドットに閉じ込められた電子や正孔の特徴的な振る舞いにより、既存の半導体レーザーに比べ高効率動作、低閾値動作、高温動作、温度安定動作などが期待できる。
励起	レーザー媒質内の活性イオンが、光を吸収し励起状態となること。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

天然資源の乏しい日本にとって、ものづくり産業は生命線である。しかしながら、将来的に人口減少が進むと予想されており、社会構造の変革に対応した技術革新を取り入れることで従来のものづくり産業構造から脱却し、新産業革命の流れの中で、省エネ化と産業競争力の強化を推進していくことが求められている。

近年の技術革新を鑑みるに、将来のものづくり産業では、あらゆる「もの」がインターネットでつながるIoT（Internet of Things）や人工知能の更なる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携や人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。その中で、照射強度や照射時間などをデジタル制御し易いレーザー加工は、将来のものづくり産業における最重要ツールの一つとして期待されている。

世界に目を向ければ、レーザー技術先進国である米国と、国主導のプロジェクトを通じて絶え間なくレーザー関連分野の研究開発に投資をしてきたドイツが世界をリードしているという現状がある。また、世界の工場として急速に成長した中国もレーザー関連分野において先進国を追い上げている。日本のものづくり産業が将来にわたって競争力を維持していくためには、高付加価値製品の製造に適した高精度・高品位加工に対応する効率的な次世代レーザー加工システム（エコシステム）を世界に先立って開発し、早期実用化を進め、ものづくり業界へ広く普及させることが必要となる。

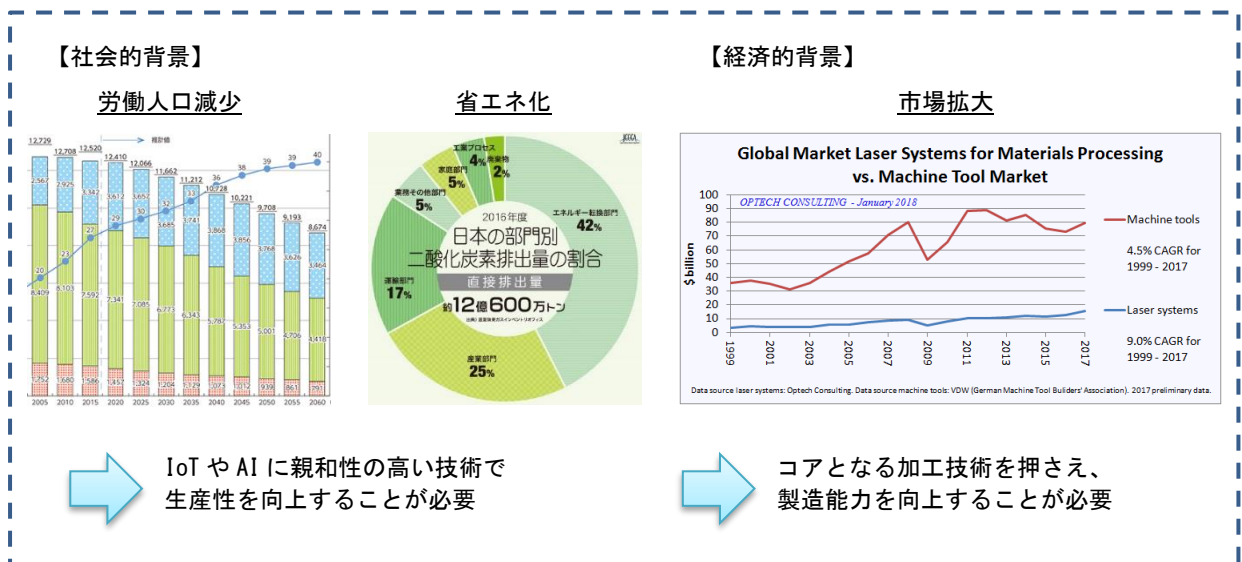


図 I 1-1-1 プロジェクトの背景

NEDOは、近年レーザー技術に関するプロジェクトを行ってきているが、欧米での国家プロジェクトの支援は継続しており、レーザー技術の先端技術開発は競争が激化していると言える。

わが国のユーザー企業がレーザー装置を海外から調達をしなければならない事情は、装置のメンテナンス遅延やノウハウのブラックボックス化の面で懸念を有しており、国内におけるレーザー技術を向上し実用化、事業化を支援する事業を実施することへの期待は高いと言える。

NEDOは、2015年11月にパワーレーザー分野の技術戦略策定に向けたパワーレーザー技術の置かれた状況と技術課題についての分析を発表しており（技術戦略センターレポート TSC Foresight「パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて」）、わが国は固体レーザーのレーザー媒質や、通信用レーザーで培ったLD技術など、レーザーの個々の構成部品の技術力は高く、競争力がある。一方、海外ではパワーレーザーを今後の生産技術革新の重要な要素に据え、国家プロジェクトで開発を進めているなど、現状のままでは我が国の製造業の弱体化を招きかねない状況となっており、新たな取組が急務と考えられ、これまでのレーザーユニットで実現されていなかった波長、パルス幅、出力などを達成するための技術開発によって、加工技術の高度化を図ることが必要であるとしている。

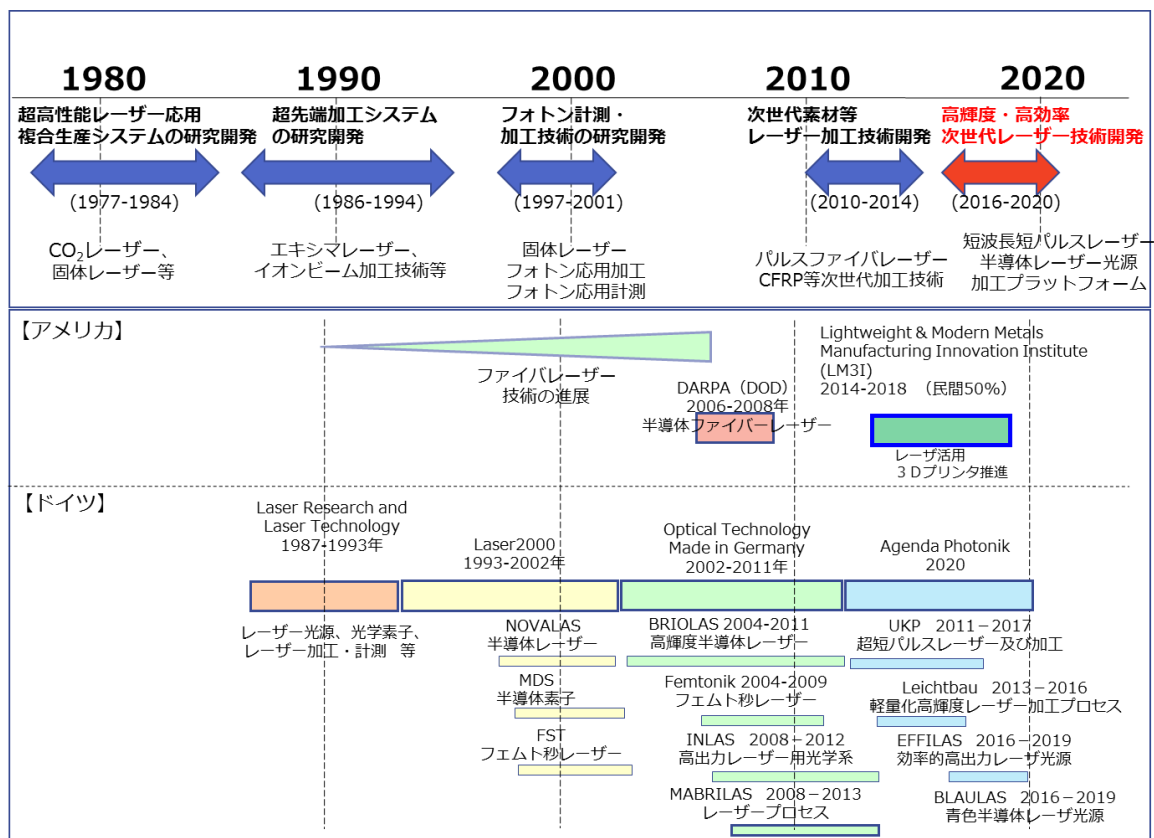


図 I 1-1-2 レーザー開発の状況

現状は、近赤外域の高出力連続波による加工（いわゆる切断や溶接等のマクロ加工）がショートヘッド市場といわれ、ファイバレーザー技術の進展で出力増に伴い、炭酸ガスレーザーからの置き換わりが進んでいるが、この領域では海外メーカーが極めて優位となっている。一方で、ロングテール市場といわれる種々の加工品質を求める加工については、高品位・高効率加工へのニーズが高まる中、難加工材の扱いや加工効率に関して、海外勢も対応には課題を抱えていると言える。

今後を見据えると、高品位・高効率加工技術を磨くことが鍵となると考えられ、本プロジェクトでは、以下の3点を軸に加工技術を磨くことを打ち出している。

- ・短波長域での高いエネルギー吸収率を利用する加工
- ・短パルス波による熱影響の少ない加工
- ・高エネルギー効率な光源を用いた加工

これによって、これまでになかった高輝度（高出力・高ビーム品質）かつ高効率なレーザー技術、及びそれを用いたレーザー加工技術を開発し、社会実装を進めることで、わが国の消費エネルギーの削減と、ものづくり産業の競争力強化を図るものであり、技術戦略的にも合致する内容となっている。

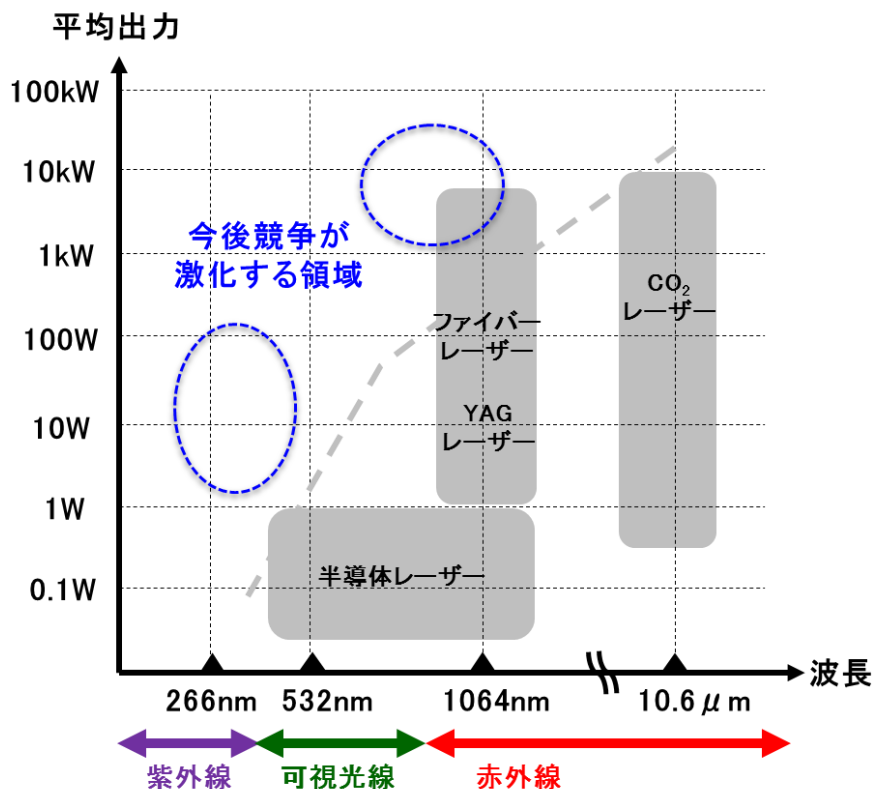


図 I 1-1-3 レーザー出力と波長にみる技術的方向性

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

わが国では、先進国でいち早く高齢化社会を迎えるため、将来の労働人口の減少に伴い生産力の低下が危惧される。このため、省人化・無人化する将来のものづくり現場でも生き残る技術の開発が必要であるとされる。レーザー加工技術は、将来のものづくりツールとして有用であるものの、拡大するレーザー加工機市場でシェアを獲得できないと、製造業全体の競争力を失う恐れがある。よって、わが国のものづくり産業の競争力強化を図るためには、産学官の英知を集結し、高輝度で高効率な実用性の高いレーザー装置、これを組み込んだレーザー加工機、これらを活用するレーザー加工技術の開発を行い、早期に社会実装を進めることが必要である。これを推進する為、産学官が一体となって協調しハイリスクな研究開発を完遂すること、早々に共通基盤を確立し、その先の競争フェーズに入ることが必要である。

表 I 2-1-1 NEDO 関与の必要性

観点	適切性
社会的必要性	◎労働人口の減少に伴い省人化・無人化する将来のものづくり現場でも生き残る技術の開発が必要。
経済的必要性	◎拡大するレーザー加工機市場でシェアを獲得できないと、製造業全体の競争力を失う恐れがあり、早期に社会実装を進めることが必要。
国のプロジェクトとして実施する必要性	◎現状では、個社毎に技術やノウハウが蓄積しており、重複する研究は不効率である。業界全体の底上げには、産学官が協調して早々に共通基盤を確立し、その先の競争フェーズに入ることが必要。 ◎また、民間単独ではハイリスクである研究開発を完遂することが必要。

●政策的位置づけ

わが国の政策面においては、科学技術イノベーション総合戦略2016（平成28年5月閣議決定）では、「新たな産業や技術基盤の創出の核となる先端レーザー等の量子ビーム利用技術の高度化」を「Society5.0」（超スマート社会）の実現に向けて重きを置くべき取組の一つとして位置づけ、これは科学技術イノベーション総合戦略2017（平成29年6月閣議決定）に引き継がれている。また、第5期科学技術基本計画（平成28年1月閣議決定）では、「超スマート社会」の実現に向けた新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つとして、「革新的な計測技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながる「光・量子技術」」の強化を図るとしている。

本プロジェクトは、わが国の施策達成に不可欠な技術開発を担っているものである。

2.2 実施の効果（費用対効果）

高出力レーザー及びそれを搭載したレーザー加工機の製品普及が見込まれ、効果として2030年に1,000億円の市場売上が期待できる。また、高効率な半導体レーザーをベースとした光源に順次置き換わることから、本事業がもたらす省エネルギー効果は、2030年にCO₂換算で約655万トン/年が期待される。省エネルギー効果の算出にあたっては、炭酸ガスレーザー等の既存レーザーが次世代型の直接加工半導体レーザーや半導体励起の固体レーザー等に置き換わることで、2030年に50%のレーザーが高効率型に置き換わるとしている。レーザーシステム、冷却システムをあわせた消費エネルギーの削減効果、及び加工時間の削減等の効果を加味している。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

●アウトプット目標（2020年）

本事業では、レーザー加工の高品位化・高スループット化および省エネルギー化を進めるため、従来にない高輝度（高出力・高ビーム品質）かつ高効率なレーザー装置、およびそれらを用いた実用的なレーザー加工技術を開発する。レーザーとしては、市場ニーズが顕在化しているにも関わらず実用化できていない青～深紫外域の短波長レーザーや超短パルスレーザー、高パルスエネルギーレーザーを開発する。また、高機能化・低コスト化に対する市場からの継続的な要求に応えるため、革新的な次々世代レーザー基盤技術を開発する。

具体的な目標としては、事業終了時において研究開発計画の研究開発項目①～④の最終目標を達成することとする。

表 II 1-1 本プロジェクトのアウトプット目標

研究開発項目	最終アウトプット目標（2020年）
項目①：高品位レーザー加工技術の開発	◎平均光パワー50W以上の深紫外ピコ秒パルスレーザー開発（現行比8～16倍）
項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発	◎パルスエネルギー500J級の高出力パルスレーザー開発（プロジェクト開始時：現行比25～50倍）
項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	◎テーマ公募で採択された6つのテーマ毎にそれぞれで設定
項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	◎最適加工パラメータの探索が可能なレーザー加工プラットフォーム構築 ◎加工条件と加工結果とを対応付けるデータベース構築

項目③については、革新的なレーザー光源に関する先導的研究開発として採択された6つのテーマにおいて、高輝度化・高出力化・省電力化・短波長化・小型化等に資する独創的な新規レーザー光源の構造に関する設計論を確立し、これに基づいて実現可能な諸性能を定量的に明らかにする。また、要素技術を開発し、光源試作を通じてその実現可能性を明らかにするものとし、2018年度にステージゲートを行うものとする。

各項目における中間目標と、設定根拠は下表に記載する。

表Ⅱ1-2 目標と設定根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	設定根拠
項目①：高品位レーザー加工技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・平均光出力 20W の深紫外ピコ秒パルスレーザー開発 ・20W 深紫外ピコ秒パルスレーザーを搭載したレーザー加工機システム開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・平均光出力 50W の深紫外ピコ秒パルスレーザー開発 ・50W 深紫外ピコ秒パルスレーザーを搭載したレーザー加工機システム開発 	電子機器部品や自動車用電池部品の実製造ラインに必要な性能
項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・パルスエネルギー100J 級の高出力パルスレーザー開発 ・100J 級高出力パルスレーザーを搭載したレーザー加工機システムの開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・パルスエネルギー500J 級の高出力パルスレーザー開発 ・高出力パルスレーザーを用いた加工基盤技術開発 	海外の高出力レーザープロジェクトにおける同様装置の数年後の到達点を上回る性能
項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・新規レーザー光源の要素技術を確立する。 ・新規レーザー光源のデモ機を構築し、実現可能性を明らかにする。 	※先導的研究要素が強い ため、中間評価後に当該技術分野の動向を考慮して設定する。	非連続的な成果創出を促すことを考慮
項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・多様なパラメータでのテスト加工を可能にするレーザー加工機システム開発とレーザー加工プラットフォームの構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・最適加工パラメータの探索が可能なレーザー加工プラットフォームの構築と運用 ・加工条件と結果とを対応付けるデータベース構築 	・共通基盤として確実に産業界へフィードバックされるアウトプット

●アウトカム目標（2030年）

本事業により開発されたレーザー装置、これを組み込んだレーザー加工機、およびこれらを活用して加工された製品などの普及により、CO₂削減および加工市場のシェア確保をアウトカム目標とする。市場に関しては、関連した製品の売上によって、2025年時点で約100億円、2030年に約1000億円を想定する。更に波及効果として2030年のレーザー加工システムの予想約200億ドルのシェア35%（約7000億円）を目指すとしている。

本事業がもたらす省エネ効果は、CO₂換算で2030年に655万t/年の削減を見込んでいる。見積りに当たっては、本研究結果（機器、応用製品）が既存技術を置き換える形で順次社会実装され、波及効果が起きるものと仮定している。

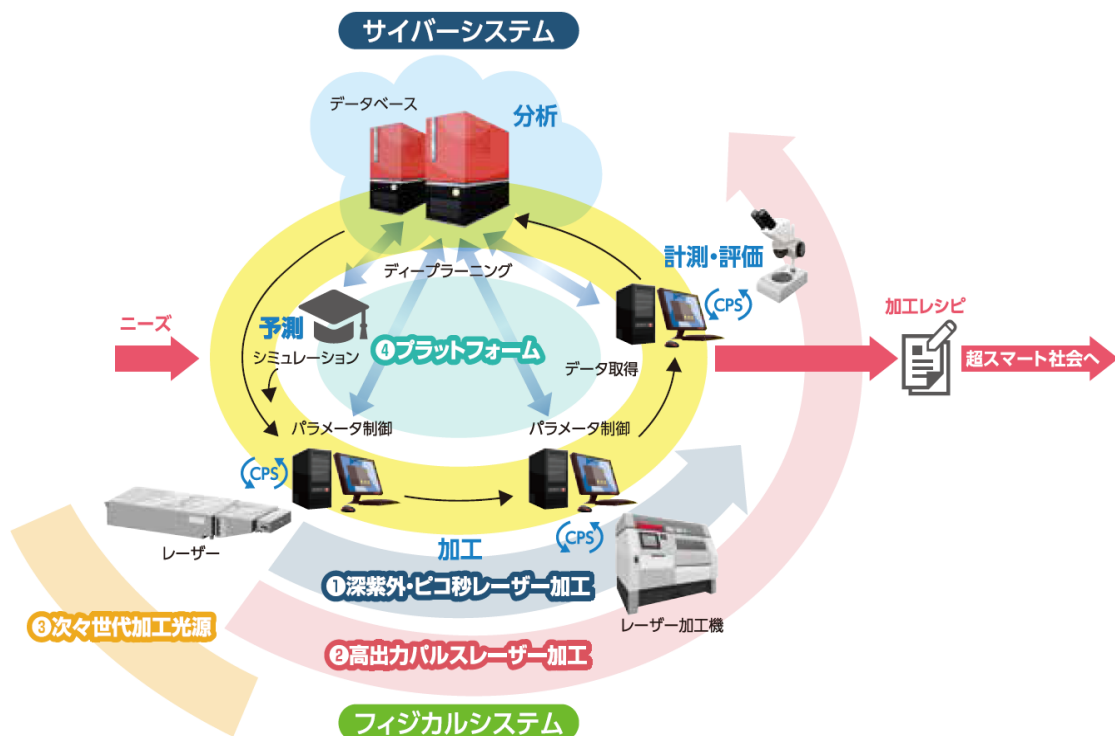
2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

将来のものづくり現場では、あらゆるモノがインターネットでつながる IoT (Internet of Things) や人工知能のさらなる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携と、人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。レーザー加工は、こうした将来のものづくりにおける最重要ツールの一つとして期待されているが、現行のレーザー加工技術は、消費電力や加工処理能力、加工精度や品位の観点において課題を有している。

本事業では、短波長／短パルス／高エネルギー効率を軸に加工技術を磨くことを目指す方針として、各項目間の連携にも配慮しながら、以下の研究開発項目について実施する。図Ⅱ2-1-1、図Ⅱ2-1-2 に概念を示した概要図を示す。

- 項目①：高品位レーザー加工技術の開発（深紫外・ピコ秒レーザー加工）
- 項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発（高出力パルスレーザー加工）
- 項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発（次々世代加工光源）
- 項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発（プラットフォーム）



図Ⅱ2-1-1 プロジェクト概要図

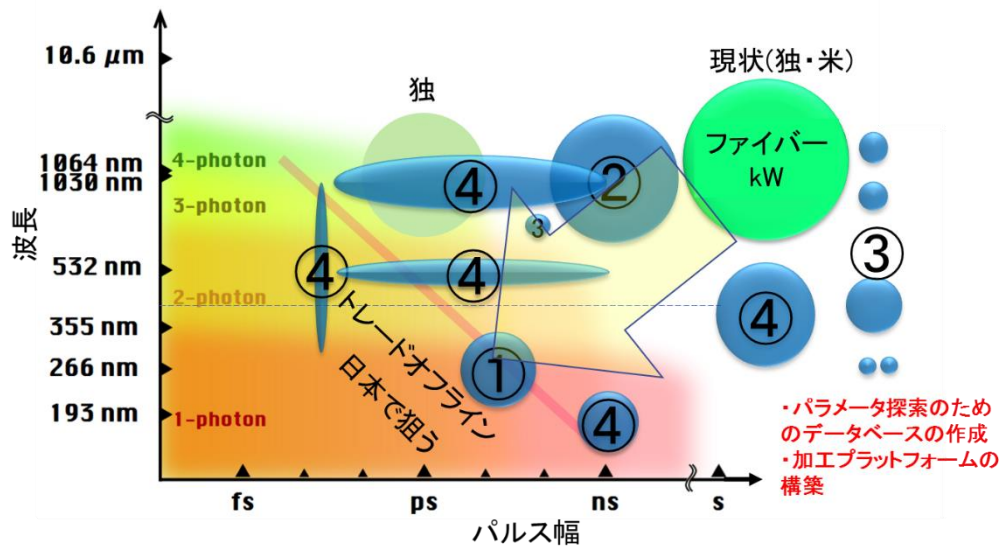


図 II 2-1-2 プロジェクト概要（波長 vs パルス幅、番号は項目番号を示す）

●研究開発の計画

スケジュールと費用を下表に示す。

表 II 2-1-1 研究開発スケジュール、費用

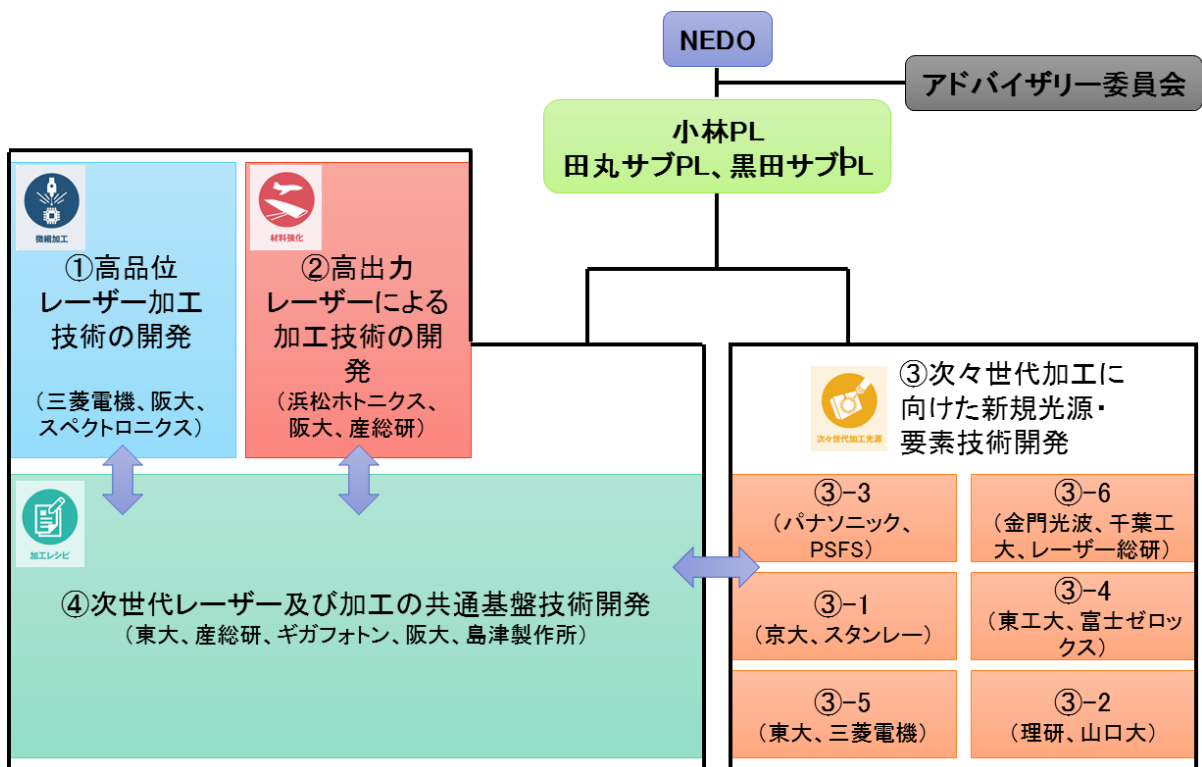
研究開発項目	2016 年度	2017 年度	2018 年度 中間評価	2019 年度	2020 年度	2021 年度 事後評価
項目①：高品位レーザー加工技術の開発	設計／要素技術試作・動作実証			高出力化加工応用実証		
	2.2 億円	4.6 億円				
項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発	設計／要素技術試作・動作実証			高出力化加工応用実証		
	5.4 億円	4.0 億円				
項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	要素技術開発試作・動作実証			絞り込み高出力化・評価		
	4.5 億円	4.4 億円	ステージゲート			

項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	加工プラットフォーム構築 計測評価基盤技術開発		データベース構築 加工原理解明	
	5.8億円	8.1億円		
費用総額	17.9億円	21.1億円		

2.2 研究開発の実施体制

研究開発の実施体制を下図Ⅱ2-2-1に示す。NEDOがプロジェクト全体の進行を企画・管理するとともに、プロジェクトリーダー（PL）として国立大学法人東京大学 物性研究所 教授 小林洋平氏、サブプロジェクトリーダーとして、国立大学法人東京大学 大学院理学系研究科附属フotonサイエンス研究機構 特任准教授 田丸博晴氏、及び、国立研究開発法人産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 主任研究員 黒田隆之助氏が就任し、全メンバーの協調活動をリードする体制である。

また、外部有識者によるアドバイザリー委員会を設定して、NEDO、PL、実施者へプロジェクトの方向性や研究開発内容への助言を提示する。



図Ⅱ2-2-1 「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」研究体制

2.3 研究開発の運営管理

NEDOは、プロジェクト執行に責任を負い、全体の進行を企画、管理している。研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握、必要な措置を講じている。プロジェクトリーダー（PL）はサブプロジェクトリーダー（sPL）と協力して、プロジェクト全メンバーの協調活動をリードしている。

① 研究開発の進捗把握・管理

研究開発の進捗把握、管理においては、毎月の進捗報告レポートによってNEDO、PLと実施者間で双方向のコミュニケーションをとり、研究開発の進捗状況把握と意見交換によって目標達成の見通しを常に把握することに努めている。また、目的に応じて階層分けした会合を実施しており、外部有識者で構成するアドバイザリーボードを組織し、アドバイザリー委員会を開催するほか、全実施者間の交流によって協調、連携活動を促進する推進会議を開催している。

その他現地へ訪問するサイトビジット方式の打ち合わせを行い研究開発の進捗状況の確認に努めている。

表Ⅱ2-3-1 研究開発の進捗管理

●進捗報告レポート

	作成単位	目的	頻度（実施状況）
進捗報告レポート	個別テーマ	毎月の主な研究開発状況をスライド1枚にまとめ、成果と課題の整理を行う	毎月 (2016/10～ 毎月実施)

●委員会、会合

	対象	目的	頻度（実施状況）
アドバイザリー委員会	外部有識者 全テーマ実施者 PL・サブPL NEDO	研究開発成果の社会への実装に向け、プロジェクト全体の方向性、妥当性を議論する	年2回程度 (2017/5、 2017/10 の2回実施)
推進会議	全テーマ実施者 PL・サブPL NEDO	全体での成果創出に向け、全関係者で進捗を共有し、テーマ間連携を図る	年2回程度 (2017/1、 2017/7、2018/1 の3回実施)
個別テーマ打ち合わせ	個別テーマ実施者 PL・サブPL NEDO	個別テーマの進捗状況を確認する（サイトビジット形式）	年1～2回程度 (計14回実施)

アドバイザー委員会は、外部有識者からなる下記のメンバーにて構成し、プロジェクト全体の方向性、妥当性について議論を行っている。2017年度は2回の委員会開催を行い、頂いた助言をプロジェクトへ反映をさせるべく対応を行った。

表Ⅱ2-3-2 アドバイザー委員リスト (五十音順)

氏名(敬称略)	所属
足立 博成	トヨタ自動車株式会社 生技開発部 接合・レーザ加工グループ長
岡本 康寛	岡山大学 大学院 自然科学研究科 産業創成工学専攻 准教授
佐野 雄二	科学技術振興機構 (JST) 内閣府 ImpACT プログラムマネージャー
西澤 典彦	名古屋大学 大学院 工学研究科 量子工学専攻 教授
松尾 慎治	日本電信電話株式会社 NTT先端集積デバイス研究所 上席特別研究員
吉岡 健一	東レ株式会社 複合材料研究所 所長

② 技術分野における動向の把握・分析

本プロジェクトで取り組む技術分野について、下表のように動向把握に努めている。

表Ⅱ2-3-3 技術分野の動向把握

把握方法	内容
NEDOにおける情報収集	<ul style="list-style-type: none"> ・ 政策動向 ・ 市場動向 ・ 最新の研究開発動向
展示会へのNEDOブースの出席	<ul style="list-style-type: none"> ・ ユーザーのニーズ動向
研究開発項目④における調査研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ ユーザーのニーズ動向 ・ 市場動向 ・ 標準化動向
個別テーマによる学会や展示会への参加	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最新の研究開発動向

2.4 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

2.4.1 ユーザーとのコミュニケーション

本プロジェクトでは、成果を発信しユーザーとのコミュニケーションを図るため、2018年4月25日～28日にパシフィコ横浜にて開かれたOPIE '18へNEDOとして出展した。OPIEは光学、フォトン技術を扱う展示会であり、国際会議であるOPICと併設されることから、多くの研究者、技術者が足を運んだ。来場者約16,000人の1/3にあたる約5,000人がNEDOブースに来場し、三日間でのべ1,000人からのヒアリングを行うことができた。ガラス、セラミック等の加工に関して紫外光への関心が高いことが裏付けられ、プロジェクトで目指す製品とユーザーのニーズは合致していることを確認できた。



図 II 2-4-1 OPIE '18 出展の様子

2.4.2 知的財産等に関する戦略

本プロジェクト関連産業の知財に関する構造的特徴は、素材、素子、モジュール、光源、加工機、アプリケーションなど、レイヤーごとに開発・知財が比較的独立しており、強みを持った技術は製品としてサプライチェーンで受け渡される。本プロジェクトでは、知財をクロスライセンスし、各社がそれぞれ統合し商品を作るビジネスモデルを考慮している。

競争領域と協調領域の共存と、必要とされる知財戦略

競争すべき領域

個別の要素技術に関する成果は、
開発者による成果の迅速な公表・製品化を阻害しない
▶ 知財の画一的な共有の回避、一定期間の秘匿化、等

協調すべき領域

マーケット状況、全体の研究開発戦略や成果情報は、共有し波及を加速する
▶ 技術達成レベル・共通ボトルネック・成果活用戦略の議論等の共有、
公的機関成果を中心とする知財集約等の促進、等

図 II 2-4-2 知財戦略モデル

2.4.3 コンソーシアムの設立

プロジェクトと社会との接点として、実施者によって2017年10月にTACMIコンソーシアム（代表は本プロジェクトのPLである小林洋平教授）が設立された。これはプロジェクトで開発するレーザー加工装置を外部ユーザーに利用を提供し、ユーザーテストによって装置のフィードバックを受ける仕組みの受け皿となることができる。コンソーシアムでは、加工プラットフォームの利用を促進し、レーザー加工のデータベース構築と利用、標準化の制定などを通し、協調・競争の最適な共存を模索することができる。

プロジェクト外も巻き込んだ産学の議論が活発化、人材育成にも貢献できることに期待している。

3. 情勢変化への対応

高出力の青色半導体レーザー光源開発では、本プロジェクトが海外メーカーに認知されたことによって開発競争がプロジェクト開始時より激化している。早期の市場参入による顧客獲得のため、技術の切り出しにより製品化を推進する方針とした。製品化に向けて機動的な対応が可能となるように、担当する島津製作所を大阪大学の共同実施先（再委託先相当）から直接の委託先へと変更する対応を取った。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は、中間評価を平成30年度（2018年度）、事後評価を平成33年度（2021年度）とし、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等に応じて、前倒しする等、適宜見直しを行う。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行うものとする。

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

研究開発の中間目標達成度について、下表に示す。全体として研究開発の進捗は順調とみられ、各項目の成果は将来的な市場につながっていくことが期待できる。早期の事業化と前倒しでのデータベース構築には手応えが得られている。成果の最終目標の達成見通しについては、特に大きな遅延はなく、最終目標も達成の見込みである。

表Ⅲ1-1 中間目標達成度

	中間目標	達成状況	達成度
項目①：高品位レーザー加工技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 平均光出力 20W の深紫外ピコ秒パルスレーザー開発 20W 深紫外ピコ秒パルスレーザーを搭載したレーザー加工機システム開発 	<ul style="list-style-type: none"> 深紫外ピコ秒パルスレーザーを開発し波長 266nm、パルス幅 13ps において前倒しで平均出力 26W を達成した。 10W 級の加工評価システムを製作し稼働中、難加工材等の加工評価を開始した。 	<ul style="list-style-type: none"> ◎ 前倒しで達成 ○ ほぼ達成
項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> パルスエネルギー 100J 級の高出力パルスレーザー開発 100J 級高出力パルスレーザーを搭載したレーザー加工機システムの開発 	<ul style="list-style-type: none"> レーザー装置と加工システムを構築し順調に各構成機器を開発中。 10J 級レーザー加工機システムを開発新規加工技術の実証に着手し、知見を得られつつある。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ ほぼ達成 ○ ほぼ達成
項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発	<p>6 つのテーマ毎にそれぞれで設定する。革新的なレーザー光源に関して採択された 6 つのテーマにおいて、高輝度化・高出力化・省電力化・短波長化・小型化等に資する独創的な新規レーザー光源の構造に関する設計論を確立し、これに基づいて実現可能な諸性能を定量的に明らかにする。また、要素技術を開発し、光源試作を通じてその実現可能性を明らかにする。</p>	<p>6 つのテーマで光源開発を進め、半導体レーザーの高出力化開発などの要素技術開発を進め、各々試作を通じて実現可能な特性値が得られ、実証に向け良好な結果が得られてきている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① フォトニック結晶レーザー：100ps のパルス発振に成功、GaN 系材料では新規製法を開発した。 ② 深紫外半導体レーザーダイオード：AlN 系材料で 50%超の内部量子効率を達成するなどレーザー発振に向けて特性向上した。 ③ 高出力 GaN 系レーザーアレイ：ワンチップアレイで 80W 以上の出力となるレーザーモジュールを開発した。 ④ 面発光レーザーの高出力化：新しいモノシリック構造のレーザー増幅器を開発し長尺化により高出力化が可能であることを実証した。 ⑤ 量子ドットレーザー：超高密度量子ドットの形成技術を開発し 1W 級の高出力化とアレイ出力で 10W を達成した。 ⑥ 可視光励起による深紫外光源：基本波 (640nm) で 1W 出力、2 倍波の紫外光 	<ul style="list-style-type: none"> ○ (年度中達成の見込み)

		(320nm) で 58mW の出力を達成した。	
項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発	レーザー加工プラットフォームを構築する。 加工部を非破壊非接触でその場観察する手法を提案する	<ul style="list-style-type: none"> ・加工機システムの一部は前倒しで開発完了。プラットフォームは内部運用を開始。データベース構築を開始した。 ・青色半導体レーザー光源の開発では世界最高クラスの 100W 級レーザー光源を開発。 	◎ 前倒しで達成

知的財産権の確保や成果の普及として論文、学会発表などのほか、積極的な広報活動も行われており、下表に実績数を示す。詳細は巻末に付属資料として添付している。

表Ⅲ1-2 特許出願、成果の発表、普及活動

	2016 年度	2017 年度	2018 年度 (5 月末時)	合計
特許出願	2	23	2	27
論文	3	12	0	15
学会発表・講演	51	96	11	160
新聞・雑誌	1	26	5	32
展示会等	0	5	1	7

2. 研究開発項目毎の成果

2-1. 研究開発項目①「高品位レーザー加工技術の開発」

2-1-1. 「高品質・大口径波長変換素子の開発」（実施先：大阪大学）

（１）事業の背景・意義（目的・概要）

短波長深紫外レーザーの光源開発において、波長変換により紫外光を発生する非線形光学結晶が光源出力や装置寿命を決める主要光学素子の1つとなっている。数多くの非線形光学結晶の中で大阪大学が発見したCsLiB₆O₁₀（以下CLBO）が唯一の候補結晶となっているが、加工産業で求められる高出力紫外光に対してはレーザー損傷の発生が避けられず、開発のボトルネックとなっている。本テーマの実施者はCLBO内部の点欠陥に課題が顕在化する以前から着目し、独自の欠陥低減技術の開発や紫外レーザーに対する損傷耐性の向上効果などを実証してきた〔レーザー研究2013、Opt. Mater. Express 2014など〕。本事業では極めて出力の高い深紫外ピコ秒レーザー光源の実現が求められており、当該実施者が培った結晶化技術を基盤に更に高度な品質制御、欠陥低減に関する新技術開発が不可欠な状況となっている。また、紫外光強度がレーザー損傷閾値以下となるようにビーム径を拡大しながら高出力化を進める必要があるため、高品質な大口径素子を提供することが求められている。以上を踏まえ、本開発テーマにおいては（a）高レーザー損傷耐性結晶の開発、（b）大型結晶作製技術の開発の2つをサブテーマとして設定した。

（２）研究開発目標と根拠

「高品質・大口径波長変換素子の開発」の技術については、光源、加工機グループへの開発用の紫外光発生用素子供給を担いながら、紫外光出力50Wの最終目標達成に向けたCLBO結晶の（a）高品質化と（b）大型化が必要となる。目標設定にあたって、スペクトロニクス社で製品化している現行機での光学素子の仕様を元に、表Ⅲ2-1-1-1の目標を設定した。

表Ⅲ2-1-1-1. 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
（a）高レーザー損傷耐性結晶の開発	要素技術の（b）への導入、高度化	基本要素技術の開発を終了するため	（1）紫外レーザー損傷耐性1.5倍、 （2）素子化率2倍 向上	結晶欠陥制御に対する過去の実績より設定
（b）大型結晶作製技術の開発	結晶重量1.5kg超 50Wの安定発生 （SPXでの実証）	30mm角口径素子を量産する結晶積の見積もりより	結晶重量1kg 30mm角口径素子	大型装置での通過目標重量として50W発生に向けた光学素子の検証

大型化の指針として、本事業開始時に出力2Wの266nmレーザー機の製品実績情報を考慮し、同じ紫外光ビーム強度を維持するために25mm角が必要と算出し、安全係数を加えて30mm角を目標

値とした。高品質化によるレーザー損傷耐性向上ファクターは除いており、損傷耐性の向上により必要となる素子口径は小さくなるが、その場合は素子化率向上、低価格化に貢献する。

結晶重量は、本事業開始時に重量約 400g の結晶ブールが工業製品として量産化している状況を考慮し、大口径素子（ここでは 25mm 角素子を想定）を量産するために重量 3.8kg の結晶が単純計算で必要とされる。素子中央部の未使用領域（転位欠陥の密集領域）を解消して素子化率を 2 倍以上改善し、さらにレーザー損傷耐性向上ファクターを期待して約 4 倍となる 1.5kg 超を目標値として設定した。

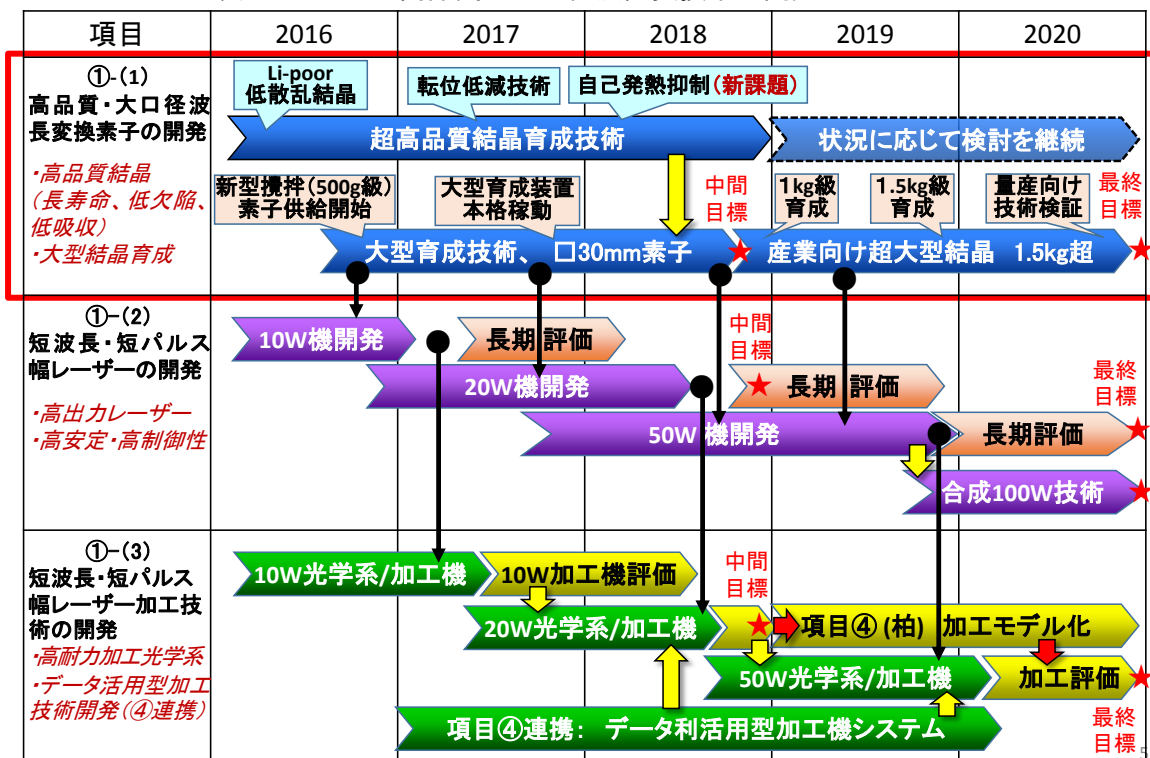
紫外レーザー損傷耐性の目標値は、本事業開始前に市販結晶の 1.6 倍の閾値向上が得られていたが[Opt. Mater. Express 2014 など]、新組成での更なる高品質化、転位欠陥等の低減の効果をこれまでの経験から予測し、1.5 倍を目標値に掲げた。

大型結晶の作製は育成装置内の容器サイズに依存し、過去にも大阪大学から重量 1kg サイズ（APL 1995）、中国で 1.8kg（JCG 2006）の報告がある。結晶内部の点欠陥（光散乱として観察される）や転位欠陥を制御した高品質結晶の開発技術では世界トップ品質を有しており、独自の溶液攪拌育成技術と合わせて世界初の高品質と大型化の両立を狙う。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-1-1-2 には共同して実施する研究開発項目①全体のスケジュールを示す。表中の太赤枠の部分为本テーマのスケジュールである。

表Ⅲ2-1-1-2. 高品質・大口径波長変換素子開発スケジュール



(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-1-1-3 に示す。大型結晶作製技術の開発については、大型装置の導入が 2017 年度末までかかることを想定し、計画作成時に 2018 年度末での中間目標値を設定した。現時点で目標到達はしていないが、当初の計画に沿って開発が進む見通しが立っている。

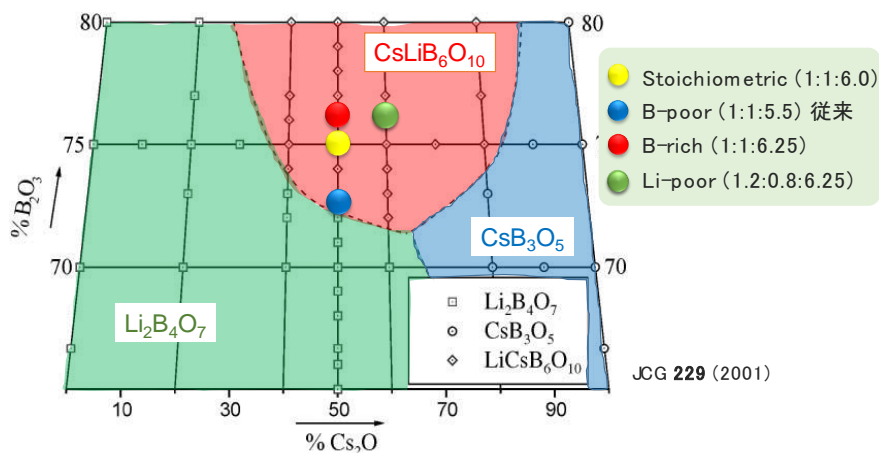
表Ⅲ2-1-1-3. 研究開発項目と達成状況

項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
(a)高レーザー損傷耐性結晶の開発	紫外レーザー損傷耐性 1.5 倍	Li-poor 組成結晶で高品質化を実現	◎	再現性検証、自己加熱の新規課題対策
(a)高レーザー損傷耐性結晶の開発	素子化率 2 倍向上	転位密度 10^2cm^{-2} 以下を実現	◎	再現性検証、残留転位欠陥の抑制
(b)大型結晶作製技術の開発	結晶重量 1kg (2018 年度末目標)	現有装置の限界サイズ 600g 超を育成	△	導入した大型育成装置を使用して育成
(b)大型結晶作製技術の開発	30mm 角口径素子 (2018 年度末目標)	600g 級結晶からの作製予定	△	

(5) 成果の詳細

(a) 高レーザー損傷耐性結晶の開発 (1)

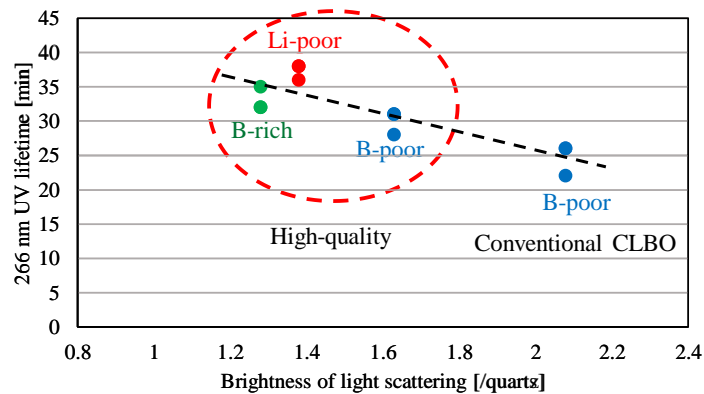
従来、CLB0 は粘性を下げる目的でホウ素成分を減らした B-poor フラックスを用いて結晶成長が行われてきた。図Ⅲ 2-1-1-1 に示すように B-poor フラックスは $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ との初相境界領域に位置し、このことが結晶内部の輝点、光路状散乱として観察される内部欠陥の原因になっていると考えた。そこで、高品質化と大型化が期待できる新しい育成組成比として Li-poor フラックスによる結晶成長を試みた。



図Ⅲ2-1-1-1. CLB0 組成近傍の擬三元系組成図

育成した各種組成から光学素子を作製し、光路状散乱の輝度（水晶を基準として比較）と 266nm 光に対する加速劣化試験での寿命の関係を調査したところ、図Ⅲ2-1-1-2 の結果が得られた。Li-poor 組成から育成した CLB0 結晶は散乱光強度が弱い（高品質）で、素子寿命も比較的長いこ

とが明らかになった。従来品質の結晶に比べ、Li-poor 組成から育成した CLBO の寿命は約 1.5 倍となっている。



図Ⅲ2-1-1-2. CLBO の内部散乱光路明度と紫外光経時劣化寿命

(a) 高レーザー損傷耐性結晶の開発 (2)

従来、CLBO 結晶の中央部には欠陥が多く存在し、経験的にレーザー損傷が生じやすいこの領域を避けるようにして素子加工が行われてきた。大阪大学の高品質結晶化技術によって結晶全体の光散乱欠陥が低減し、これまで観測されてこなかった、図Ⅲ2-1-1-3 (a) に示すように種子結晶から中央領域に伝搬する高散乱領域が観測されるようになった。

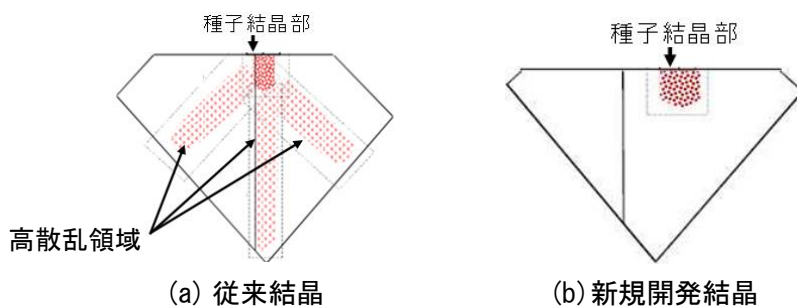
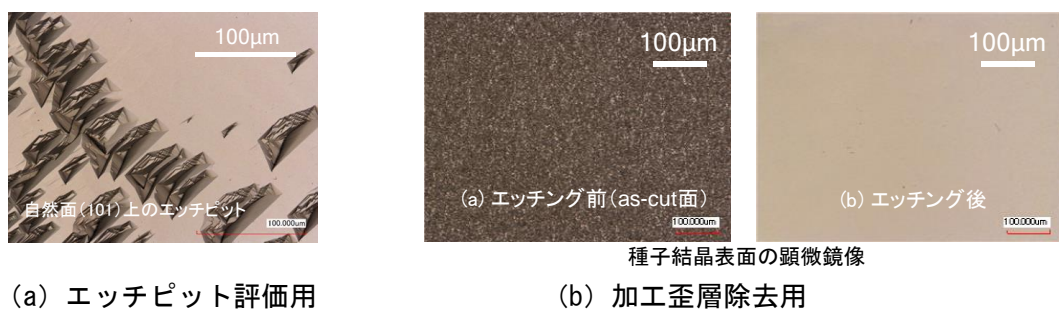


図 Ⅲ2-1-1-3. 可視光レーザーで確認される CLBO 内の高散乱領域

そこで、本研究では種子結晶から伝搬する転位欠陥の低減を目的に、種子結晶表面の機械加工歪層を除く化学エッチングを検討した。図 Ⅲ2-1-1-4 の(a)は転位評価をするためにエッチピットを露出させた表面で、(b)は加工歪層を除き、平坦面を作製した表面である。



図Ⅲ2-1-1-4. CLBO 結晶のケミカルエッチング処理表面

本技術が確立したことで、転位（ピット）フリーで加工歪のない高品質種子結晶から CLB0 の成長が行えるようになった。本技術により得られた結晶は図Ⅲ2-1-1-3 (b) に示すように高散乱領域の形成が抑制できることが明らかになり、結晶中央部の欠陥抑制に成功し、素子化率は少なくとも 2 倍以上見込める見通しが得られた。

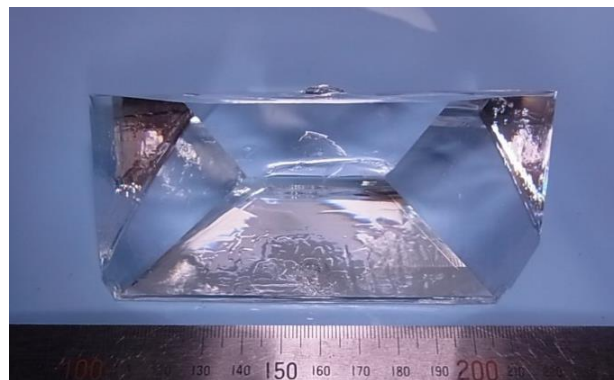
(b) 大型結晶作製技術の開発

大型化に効果的な溶液攪拌を可能にする特殊攪拌翼（大容量溶液仕様）を、流動解析シミュレーションに基づいて製作した。また、大型結晶を保持するための種子結晶保持ホルダーの仕様を検討した他、現時点での結晶から取得可能な図Ⅲ2-1-1-4 の大型素子（13mm 角、15mm 長）を製作し、レーザー装置用光源開発へ提供した。



図Ⅲ2-1-1-4. 大口径 CLB0 結晶(左：13mm 角、右：5mm 角（市販サイズ）)

現有の溶液攪拌育成装置を用いて、Li-poor フラックスと新型攪拌翼を組み合わせ高品質結晶の大型化検証試験を行った。現有装置（直径 15cm 坩堝）の装置限界は重量で約 600 g 級となるが、現在までに図Ⅲ2-1-1-5 の重量 531 g で低欠陥密度の高品質結晶の作製に成功した（低品質のものでは重量 621g も作製）。これらの検討結果を踏まえ、大型化に適した特殊攪拌翼の詳細仕様を確定し、重量 1.5kg 級の超大型結晶の作製が見込める大型育成装置の設備導入を行った。



図Ⅲ2-1-1-5 Li-poor フラックスから作製した高品質結晶

($a \times c \times a = 126\text{mm} \times 75\text{mm} \times 55\text{mm}$ 、重量 531g)

(6) 最終目標の達成の見通し

大型装置の稼働によって当初設定した項目(b)の中間目標については、今年度末に達成する見込みである。その後、最終目標に向かって開発が進む見込みである。項目(a)については転位欠陥抑

制技術に関して、当初の見込み以上の効果が得られている。新しく顕在化した課題（顕著な自己発熱）に対して、最終年度までに高品質化の効果がどこまで有効化を検証したい。

（7）知的財産権及び成果の普及

CLB0 の製造、品質評価技術はノウハウとして蓄積し、プロジェクト終了後に大阪大学発のベンチャー企業、株式会社創晶超光（高品質 CLB0 結晶の製造販売を手掛ける）に技術移管して、速やかに事業展開につなげる。

2-1-2. 「短波長・短パルスレーザー装置の開発」(実施先:スペクトロニクス株式会社)

(1) 事業の背景・意義(目的・概要)

天然資源の乏しい日本にとってのものづくり産業は生命線であり、輸出競争力を将来にわたって保持するためにはIoT技術を駆使し生産効率を最適化したものづくりが必要である。将来のものづくりの現場では、デジタル制御と親和性が高いレーザー加工の重要性が一層増すと同時に、ものづくり機器のクラウド連携や知能化が進むと考えられ、これらを融合したレーザー加工システムは我が国のものづくりにおける最重要ツールの一つとして期待されている。

1977年から1994年まで日本はレーザー技術分野において国主導の大型研究開発プロジェクトを世界に先駆けて推し進め、CO₂レーザーに代表されるガスレーザーやエキシマレーザーの開発では文字通り世界を先導し、レーザー加工機システムでも圧倒的な世界市場シェアを占めていた。しかし、1990年代に従来光源に比べて高輝度なファイバレーザーが開発され2000年代初頭にかけて北米で進展した高出力化なども決め手となり海外製の高出力ファイバレーザーが急速に世界に浸透した。現在、こうしたファイバレーザーに代表される高出力固体レーザー技術やそれを応用した加工システムにおいて、日本は海外勢の後塵を拝し、世界市場へ食い込めていないのが実情である。

研究開発項目①ではレーザー加工の高品位化・高生産性を進めるため、従来にない高輝度(高出力・高ビーム品質)かつ高効率なレーザー装置、およびそれらを用いた実用的なレーザー加工技術を開発する。本テーマ「短波長・短パルスレーザー装置の開発」では、市場ニーズが顕在化しているにも関わらず実用化できていない深紫外域の波長266nm・パルス幅100ps以下のレーザー装置を開発する。

高品位なレーザー加工の実現には、波長300nm以下の深紫外(DUV)領域でかつピコ秒オーダーの短パルスレーザーが効果的であり、波長266nmピコ秒レーザーでは従来のナノ秒レーザーや波長355nmレーザーではユーザー要求を満たすことのできなかつた材料に対して良好な加工結果が得られることが確認されている。しかしながら、生産性(タクト、コスト)の課題から実生産への適応が見送られる状況となっている。

以上を踏まえ、本開発項目において(a)ピコ秒高出力深紫外光源の開発、(b)ビームコンパニング技術によるレーザーの高出力化をサブテーマとして設定した。

(2) 研究開発目標と根拠

短波長短パルスレーザーを用いたレーザー加工では高品位な加工結果が確認されているが、産業用途における実生産で利用可能な生産性を実現するためには光源出力を事業前比で10倍から25倍に増加することが求められる。よって本テーマの開発目標を以下に定めた。

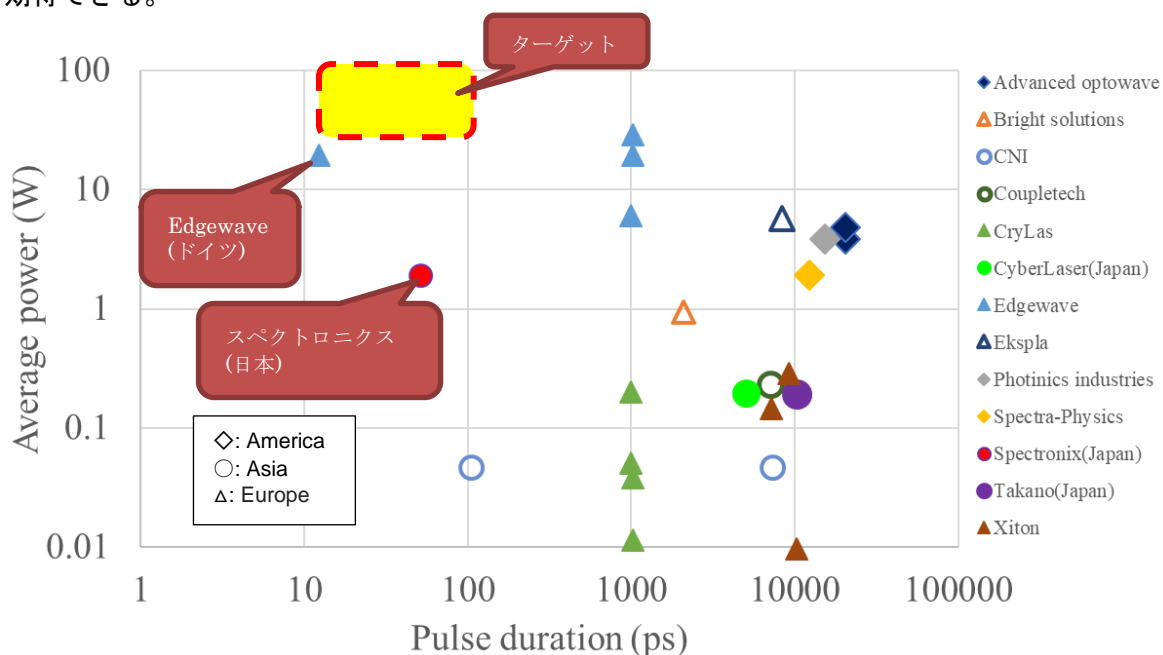
表Ⅲ2-1-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
ピコ秒高出力深紫外光源の開発	波長:266nm帯 平均出力:50W超	高品位加工適用分野を金属、構造材加工に拡大	波長:266nm帯 平均出力:20W超	半導体・電子機器の微細加工分野に適用

ビームコンバイニング技術によるレーザーの高出力化	波長：266nm 帯 2 台同期平均 出力：100W超	高品位加工適用分野を金属、構造材加工に拡大	2019 年度より実施のため、設定なし	2019 年度より実施のため、設定なし
--------------------------	-----------------------------------	-----------------------	---------------------	---------------------

現在、半導体や電子機器の製造現場においては、波長 355nm、ナノ秒パルスのレーザー加工機が導入されており、平均出力は 20W で用いられている。355nm で加工性の悪い透明材料の加工が重要となる一方で、生産性(タクト)は平均出力と相関があるため、波長 266nm においても 20W が求められる。このため、中間目標として 20W を掲げた。また、電気自動車等に搭載される 2 次電池の電極切断に用いられるスリッターの速度は 150m/min 程度である。機械加工に替わる工法としてシングルモードファイバレーザーの適用が検討されており出力は 200W、カーフ幅 40 μ m である。いずれの方法でも切断後に厚みの 1/2 程度のバリが切断面に発生することが報告されており、これを除去するための後処理工程を必要としている。波長 266nm ピコ秒レーザーではこの加工品質の課題を解決できる可能性がある。そして、波長 266nm では 10 μ m 程度のカーフ幅での切断が見込まれることから 50W で同等の速度が実現可能である。一方、さらなる高出力化要求を見据えたスケラビリティを確立するため深紫外域におけるビーム結合技術を開発する。このため、最終目標として平均出力 50W、合成出力 100W を掲げた。

深紫外パルスレーザー光源の製品状況は図Ⅲ2-1-2-1 の通りである。(抽出条件：波長 300nm 以下、繰り返し周波数 1kHz~10MHz、ビーム品質： $M^2=2$ 以下) 主に、パルス幅が 1000ps から 30000ps に分布しており、高品位加工が期待される 100ps 以下では世界的にも Edgewave 社(ドイツ)、CNI 社(中国)とスペクトロニクス社(日本)のみである。しかし、結晶寿命の信頼性や生産性につながる出力においてはまだ課題があるといえる。そのため、スペクトロニクス社の現 2W 光源の持つ高品位加工性能と信頼性を、実生産可能な出力帯へ高出力化することで世界シェアの獲得が期待できる。

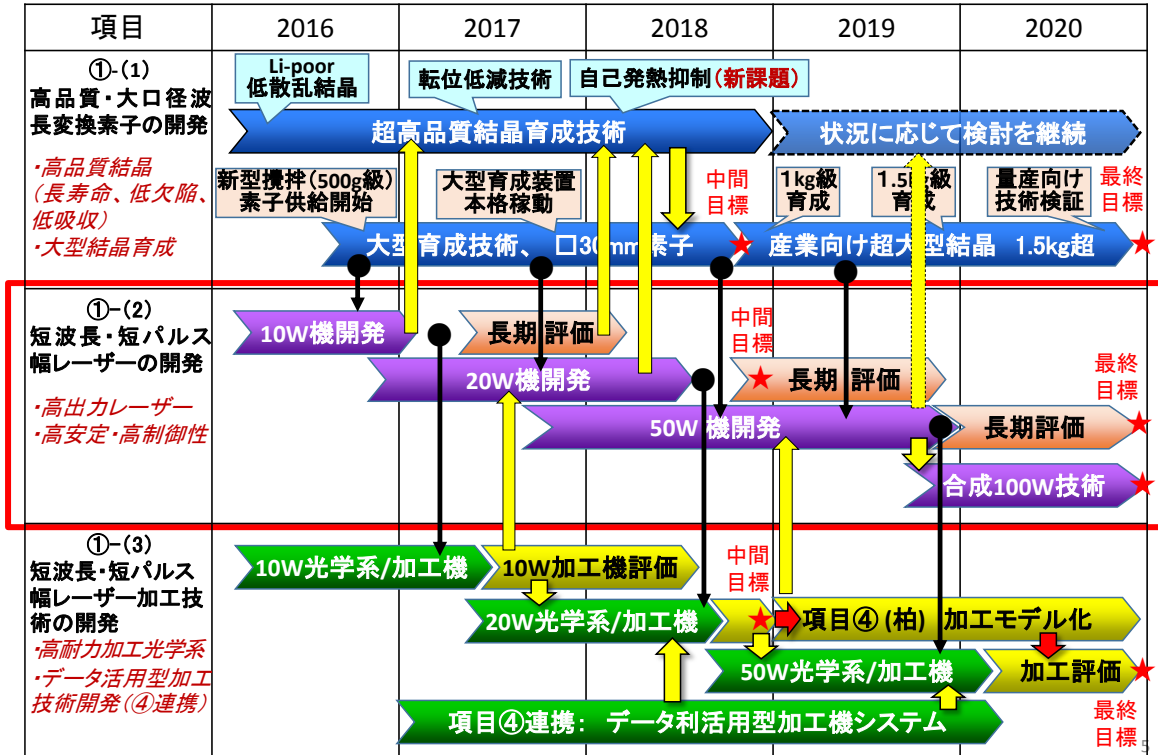


図Ⅲ2-1-2-1 プロジェクト開始前の光源ベンチマーク

(3) 研究開発スケジュール

目標を達成するために以下のスケジュールを策定した。下表は共同して実施する研究開発項目
 ①全体のスケジュールを示し、赤太枠の部分为本テーマのスケジュールである。

表Ⅲ2-1-2-2 短波長短パルス幅レーザー開発スケジュール



最終目標の50Wを達成するため、基本波増幅部と深紫外波長変換部で生じる物理現象と課題を明らかにし、対策技術を開発することを目的に、出力を段階的に10W、20W、そして50Wと増大していく計画である。

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-1-2-3に示す。ピコ秒高出力深紫外光源の開発については、H29年度(2017年度)までに10W級プロトタイプ機を2台製作し1台を10W加工検証のため加工装置に搭載、1台をCLB0結晶の長期評価を目的に連続発生試験に投入した。また、20W級試作機を製作し評価の結果、平均出力26Wを達成した。H30年度(2018年度)は10Wにおける3000時間の連続動作を実証し、平均出力20Wの加工検証を実施するためのプロトタイプ機を開発する。

表Ⅲ2-1-2-3 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
ピコ秒高出力深紫外光源の開発	波長 266nm 帯、平均出力 10W における連続 3000 時間の実証	・ 10W 級プロトタイプ機を制作。2000 時間超の連続動作に問題なし、継続評価中。	△ (年度内達成見込み)	評価を継続し 3000 時間の動作を実証する。長期運用時の課題を抽出し、20W プロトタイプ機にフィードバックする。
ピコ秒高出力深紫外光源の開発	波長 266nm 帯、平均出力 20W 超	20W 検証機を製作評価した結果 26W を確認	○	加工検証を目的とした 20W プロトタイプ機を開発する。あわせて、20W における CLB0 結晶の評価を行い結晶育成にフィードバックする

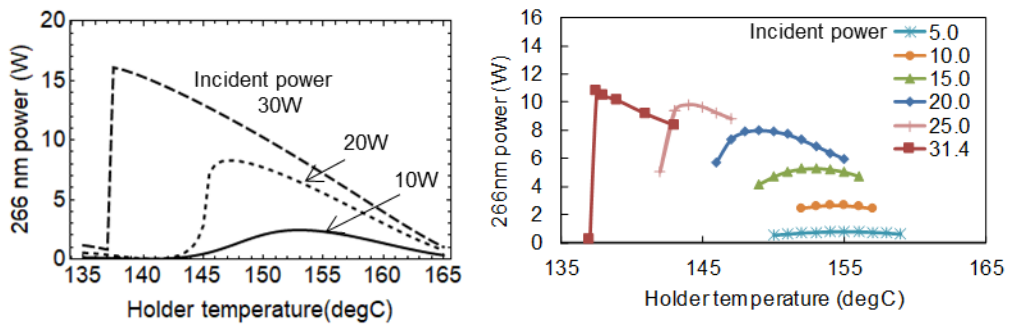
(5) 成果の詳細

高品位で高速なレーザー加工を実現するためにはレーザーパルスを生成する光源とそのレーザーパルスを高速に掃引するスキャナが同期する必要がある。加えて、パルス ON 指令直後から指定されたパワーのパルスを発生可能な特性（以下 ON/OFF 特性）が求められる。本事業以前に CLB0 結晶の基礎特性に着目した独自の基本波光源を開発することで 532nm から 266nm への同一強度における変換効率を市販光源の倍以上に向上した。この結果、波長変換素子の CLB0 結晶に与える負荷低減に成功し、低出力ながら良好な ON/OFF 特性と寿命を有する平均出力 2W の深紫外ピコ秒レーザーを実現している。

高出力な 266nm を実現するためには基となる波長 1064nm の基本波レーザーの高出力化、266nm を発生する非線形光学結晶の紫外レーザー損傷抑制、自己加熱に起因する ON/OFF 特性の劣化抑制が必要である。紫外レーザー損傷と ON/OFF 特性劣化の抑制については 2-1-1 で実施する結晶自身の紫外レーザー損傷耐性の向上に加えて、本テーマ内で実施する使用技術が必要である。特に入射ビーム径を拡大してこれらの閾値以下となるようにパワー密度を低下させる技術が必要である。このため、高効率波長変換が可能な現基本波の特性を維持しつつ高出力化する増幅技術開発に加えて、大口径 CLB0 結晶を用いた波長変換技術の開発を進めている。

初めに 10W 級動作における課題抽出を行なった結果、図Ⅲ2-1-2-3 に示すような ON/OFF 特性の劣化が確認されたが、課題対策の結果レーザー加工に適応可能な ON/OFF 特性を実現した（レーザー研究、第 45 巻、第 9 号）。

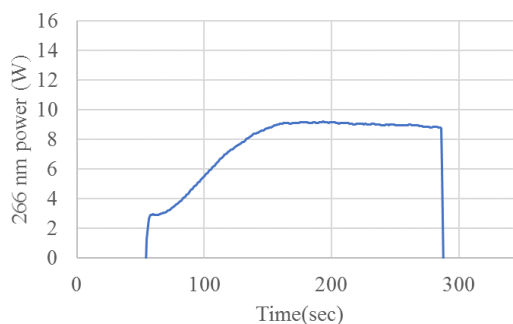
図Ⅲ2-1-2-2 は 266nm 吸収による CLB0 結晶の自己加熱特性評価を目的に CLB0 結晶内部の自己加熱を考慮した波長 532nm から 266nm への波長変換モデルによるシミュレーションと実験結果を示す。



図Ⅲ2-1-2-2 CLBO 結晶による波長変換のシミュレーション結果(左図)と実験結果(右図)

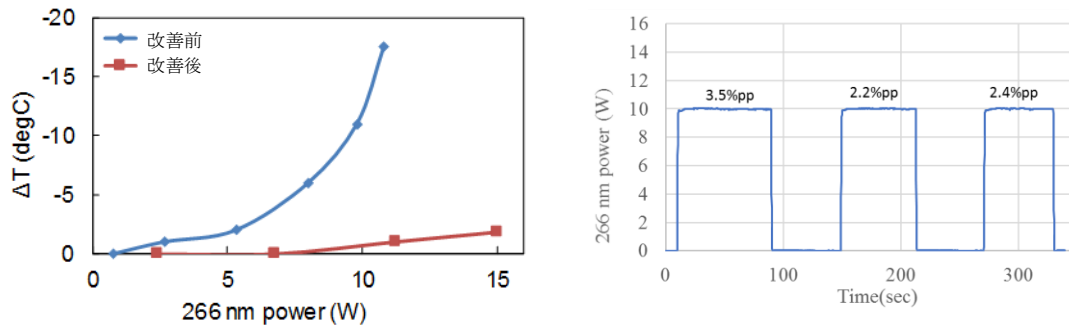
ここで、266nm 出力は CLBO 結晶内で位相整合条件を満たした際に最も出力が高くなる。そして、位相整合条件は温度に強く依存し、特定の温度で極大点を取る。また、自己加熱は CLBO 結晶内の 266nm 強度に依存する。

図Ⅲ2-1-2-2 は入力する 532nm 平均出力を一定とし、ヒーターによって温度制御される CLBO 結晶ホルダーの温度を変化させながら 266nm 平均出力をプロットした図である。発生する 266nm 出力が低く自己加熱の影響が少ない場合には出力が最大になるホルダー温度を中心に低温側と高温側で対称な特性となる。しかし、266nm 平均出力が大きくなり自己加熱の影響が現れると非対称性が現れるとともに、極大点が低温側へシフトする。この温度シフトは 266nm による自己加熱によって結晶自身が発熱するためヒーターから供給する熱量を低減しなければ位相整合しないことに起因する。レーザー加工用途の高出力深紫外レーザーが存在しない課題の 1 つはこの自己加熱による ON/OFF 特性の劣化にある。ここで、10W 出力にてレーザーパルスの ON/OFF を考える。図Ⅲ2-1-2-2(右)の場合、10W を得るためには結晶ホルダー温度を 137 度に設定する必要がある。しかし、パルス発生直後は自己加熱による熱源が存在しないため位相整合条件を十分満たせず、その出力は低い。266nm 発生の経過とともに徐々に自己加熱量が増加し、やがて位相整合条件が満たされる。そのため、図Ⅲ2-1-2-3 に示すようなパルス ON から出力が徐々に増加する特性となる。



図Ⅲ2-1-2-3 自己加熱の影響が強い場合の ON/OFF 特性

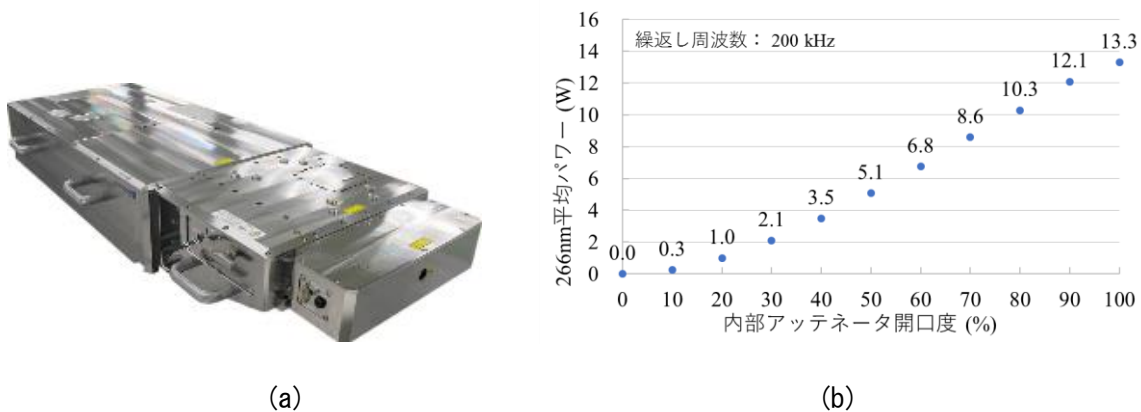
この特性は長時間レーザーを ON して使用し続ける用途では許容されているが、レーザー加工用途ではスキャナ等と同期して高速なビーム掃引と ON/OFF を繰り返すため許容されない。この課題を解決するため、基本波レーザーと波長変換器を製作、評価した結果 10W における動作条件を見出した。図Ⅲ2-1-2-4 に CLBO 結晶の自己加熱の改善効果と ON/OFF 特性を示す。



図Ⅲ2-1-2-4 自己加熱の改善効果(左図)と改善後の ON/OFF 特性

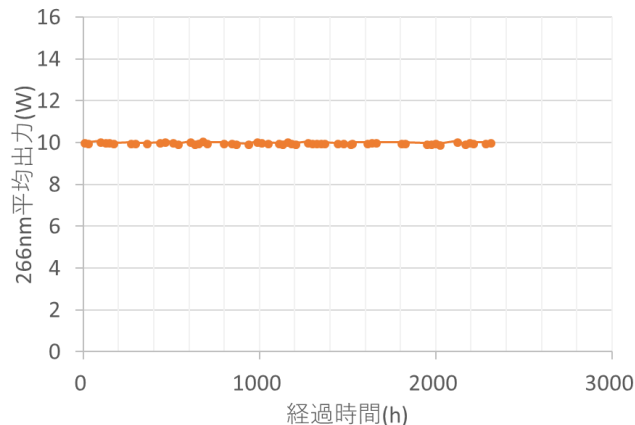
図Ⅲ2-1-2-4(左図)より、改善した動作条件では 266nm10W における自己加熱における結晶ホルダー温度変化は 11℃から 1.5℃に改善していることがわかる。また、図Ⅲ2-1-2-4(右図)より 10W にて良好な ON/OFF 特性を実現していることが確認できる。

これらの結果をもとに 10W 級プロトタイプ機を 2 台製作した。1 台は加工技術の開発用として提供し、1 台は CLBO 結晶の連続発生試験に投入した。提供した 10W 級プロトタイプ機の外観と平均出力特性を図Ⅲ2-1-2-5 に示す。



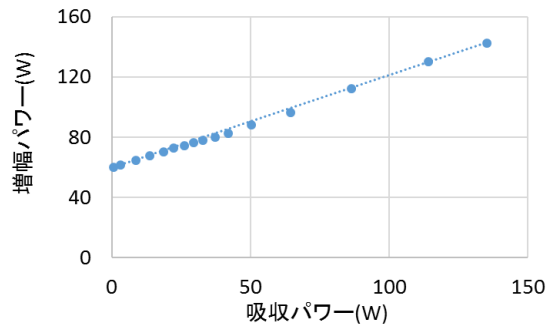
図Ⅲ2-1-2-5 10W 級光源の外観と出力特性 外観(a)と内部アッテネータを操作した際の出力特性(b)

また、図Ⅲ2-1-2-6 に連続発生試験の経過を示す。2000 時間超の連続動作に問題がなく、継続中である。今年度内に中間目標の 3000 時間を達成する見込みである。

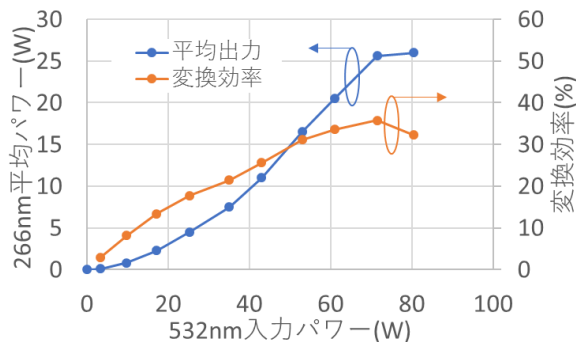


図Ⅲ2-1-2-6 266nm10W の連続発生試験の経過

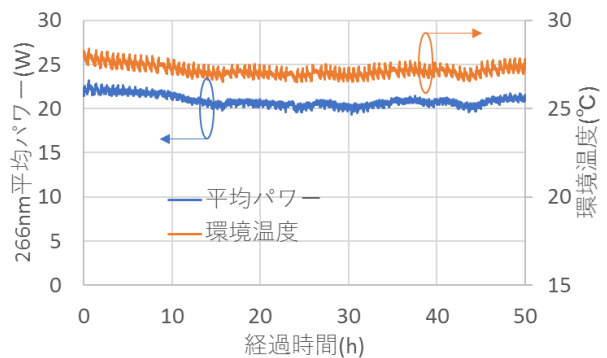
平均出力 20W への高出力化には基本波出力を増強するMOPA基本波部、及び紫外レーザー損傷耐性の向上を含めた波長変換部の最適化設計と構成段毎の動作確認の後、光源の試作を行った。図Ⅲ2-1-2-7、図Ⅲ2-1-2-8、図Ⅲ2-1-2-9に増幅器の特性、大口径CLBO結晶を波長変換素子として用いた際の入出力特性、連続発生動作結果をそれぞれ示す。



図Ⅲ2-1-2-7 増幅器の増幅特性



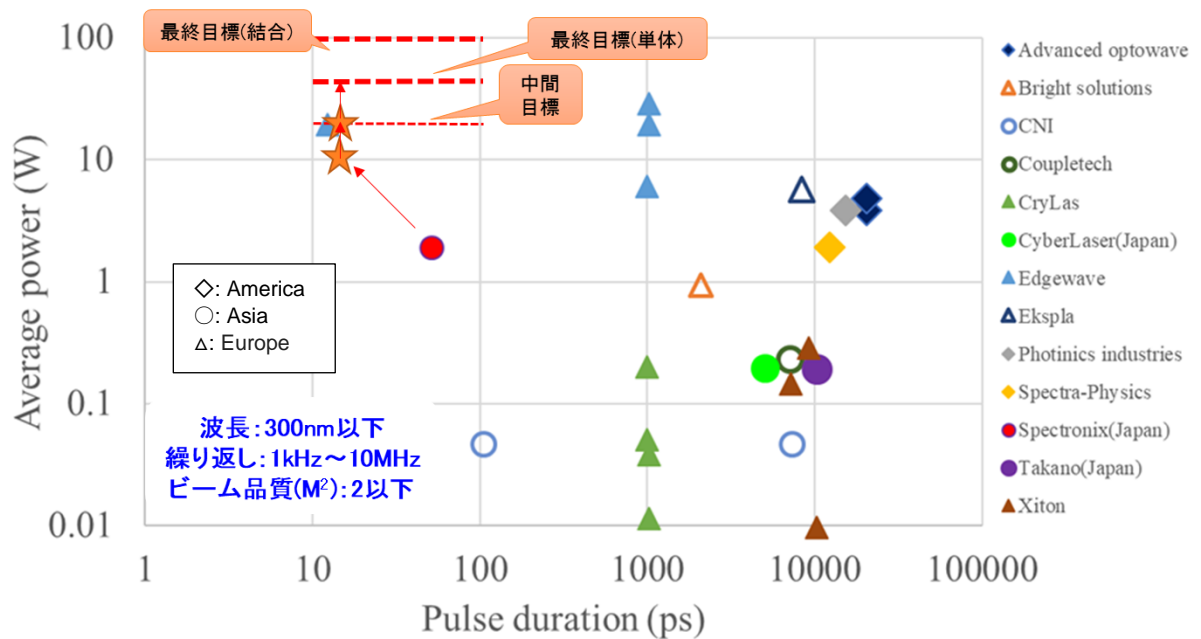
図Ⅲ2-1-2-8 CLBO結晶の入出力特性



図Ⅲ2-1-2-9 連続発生動作結果

安定な 20W の 266nm を発生させるためには 1064nm 基本波の増幅出力として 108W が必要である。図Ⅲ2-1-2-7 より、最大で 140W と十分な出力が得られることを確認した。また、本基本波を LB0 結晶により 532nm に変換し、さらに大口径 CLBO を用いて 266nm を発生させた。その結果、中間目標の 20W を上回る 26W の発生を確認し、また、20W において 50 時間の連続動作を確認した。

図Ⅲ2-1-2-1 で示した光源のベンチマークは本年度終了時には 10W、20W が追加され図Ⅲ2-1-2-10 の通りとなる。また、最終目標を達成時には世界最高出力を提供できるようになる。



図Ⅲ2-1-2-10 2018 年度終了後の光源ベンチマーク

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように中間目標の 266nm 平均出力 20W について達成した。また、10W における CLBO 結晶の連続発生試験について今年度内に達成する見込みである。今後は、MOPA 基本波部の更なる増強を実施する。また、2-1-1 から提供を受ける高品質 CLBO 結晶の評価と合わせて、レーザー加工に適応可能な ON/OFF 特性を実現する光源開発を行う。そして、2W から 10W、20W へ高出力化を実現してきた手法を応用するとともに、2-1-1 と 2-1-3 と連携することで最終目標は達成の見通しである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-1-3. 「短波長・短パルスレーザー加工技術の開発」 (実施先：三菱電機株式会社)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

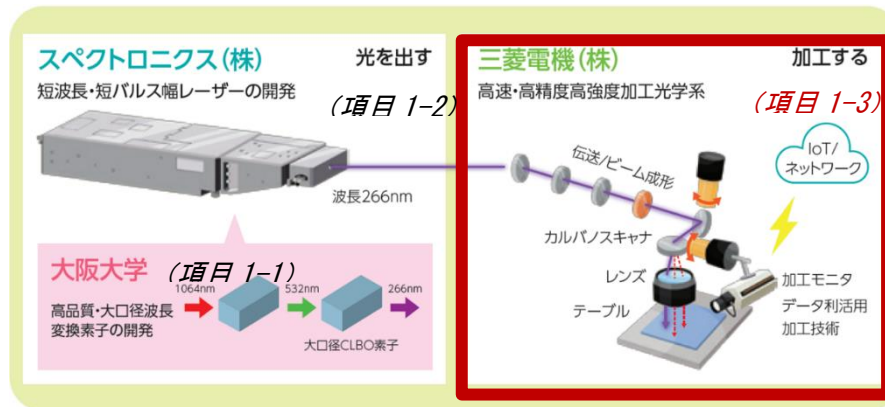
IoT や AI 技術を用いて、よりスマートな社会の構築を目指す世界的な動きの活発化に伴って、スマート化の頭脳に相当する半導体や電子機器ならびに感覚器に相当するセンサーデバイスのさらなる小型化や高機能化が求められており、レーザー加工の適用によって各種製造プロセスを高度化する試みが進められている。ここにおいて特に、半導体チップ自体の小型・高密度化の進展に比較して半導体を電子機器に組み上げる実装技術の進展が遅れ、両者の間のミスマッチ (テクノロジーギャップ) がスマート社会の実現に向けた製造技術上の課題となっている。このギャップを埋める次世代の革新的工法として、ウエハーレベルやパネルレベルのファンアウト・パッケージ技術 (FOWLP/FOPLP) 等の開発が進められているが、決定的な工法の確立には至っていない。本研究開発では、半導体・電子機器製造における上記課題に対する解決手段を提供することを目的の一つとする。

さらにスマート社会を構成するモビリティシステムに目を転じると、自動運転などによる知能化と合わせて、電気自動車 (EV) への切り替えが急速に進んでいる。電気自動車は従来の車と抜本的に異なる構成となるため、2次電池などの新しいキーパーツの製造技術の最適化が課題となっている。本研究開発では、レーザー加工を用いることによって、急速な EV シフトに対応するための新規部品製造に資する手段を提供することを目的の一つとする。

上記目的のためには、いずれも特徴サイズが $10\mu\text{m}$ 以下となるシングルマイクロメータ領域の高品位微細加工が必要となることから、本プロジェクトにおいてシングルマイクロメータ領域の加工における有用性が予見されている DUV (波長 266nm) ・ピコ秒レーザーを選択する。

高品位微細加工実現のためには、短波長、短パルスレーザーが有用であることは一般的に認識されているが、目的達成のためには実際の生産現場において使用可能な生産性を併せ持つ必要がある。現在の DUV ・ピコ秒レーザーの出力は $\sim 2\text{W}$ であるために生産性不足であり、高品位加工、且つ、実用的な生産性を併せ持つ装置が存在しないことが目的の実現に向けたボトルネックとなっている。

上記の認識の下、生産性を向上するために DUV ・ピコ秒レーザー加工の高出力化を第一の技術課題として設定し、高出力深紫外光を発生させる光学結晶技術 (項目 1-1) 、高出力ピコ秒パルスレーザー技術 (項目 1-2) と密接に連携して、高品位微細加工性能と実用的な生産性を併せ持つ高出力の DUV ・ピコ秒レーザー加工技術を開発する。



図Ⅲ2-1-3-1 研究開発の概要

(2) 研究開発目標と根拠

研究開発目標と根拠を下表に示す。

技術課題に設定した DUV・ピコ秒レーザー加工の高出力化に対応する数値は、以下である。

中間目標：20W (半導体・電子機器製造等)

最終目標：50W (EV 部品加工等)

表Ⅲ2-1-3-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発	波長：266nm 帯 出力 50W 超 高品位加工実証	高品位加工適用分野を金属、構造材加工に拡大	波長：266nm 帯 出力 20W 高品位加工実証	半導体・電子機器の微細加工分野に適用

以下には、目標設定根拠の詳細を記載する。

現在、半導体や電子機器の製造現場においては、波長 355nm、ナノ秒パルスレーザーの導入が開始している。微細な加工では処理する物質の体積が少ないために比較的小出力で実生産に適用され、代表的な出力として 20W で実生産導入に求められる生産性を実現している。後述するベンチマークに示すように DUV・ピコ秒レーザー加工で 355nm では実現困難な加工品質の壁を越えることによって、20W (プロジェクト前比 10 倍) の出力で半導体・電子機器の製造現場への導入が可能になると考える。

電気自動車等に搭載される 2 次電池には厚さ～10 μ m の金属箔電極が積層して用いられる。電氣的に問題なく高密度積層のためにバリのない金属箔が必要であるが、スリッターなどの機械加工では箔厚の 1/2 程度のバリ発生のために後処理が必要となり、刃先の消耗も問題となる。出力 200W 程度のシングルモードファイバレーザーを用いた非接触加工が試みられているが、同じく箔厚の 1/2 程度のバリが報告されている。この加工品質の壁を DUV・ピコ秒レーザーを用いた加工で突破できる可能性がある。求められる生産性 (加工速度) は 150-200m/min である。同速度で処理する物質量は加工カーフ幅に比例するため、DUV・ピコ秒レーザーではファイバレーザーの 1/4 の出力、即ち出力 50W で実生産適用可能な生産性が得られると考える。

(2) 研究開発スケジュール

目標達成に向けた研究開発スケジュールを以下の表に示す。

表Ⅲ2-1-3-2 開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発	10W光学系/加工機	10W加工機評価 20W光学系/加工機	50W光学系/加工機 項目④(柏) 加工モデル化	加工評価	項目④連携: データ利活用型加工機システム	波長: 266nm 帯 出力 50W 超 高品位加工実証

参考として、密接に連携して開発を進める波長変換結晶開発ならびに光源開発と並べて相互のスケジュールの関連を示す。

項目	2016	2017	2018	2019	2020
①-(1) 高品質・大口径波長変換素子の開発 ・高品質結晶(長寿命、低欠陥、低吸収) ・大型結晶育成	Li-poor 低散乱結晶	転位低減技術	自己発熱抑制(新課題)	超高品質結晶育成技術	状況に応じて検討を継続
①-(2) 短波長・短パルス幅レーザーの開発 ・高出力レーザー ・高安定・高制御性	10W機開発	長期評価	20W機開発	50W機開発	長期評価
①-(3) 短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発 ・高耐力加工光学系 ・データ活用型加工技術開発(④連携)	10W光学系/加工機	10W加工機評価	20W光学系/加工機	50W光学系/加工機	加工評価
	新型攪拌(500g級)素子供給開始	大型育成装置本格稼働	中間目標	1kg級育成	1.5kg級育成
		大型育成技術、□30mm素子	産業向け超大型結晶	1.5kg超	量産向け技術検証
			中間目標	長期評価	最終目標
			最終目標	合成100W技術	
			最終目標		

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発テーマの中間目標達成状況を下表に示す。

表Ⅲ2-1-3-3 研究開発項目と達成状況 (5月15日時点)

項目(テーマ)	中間目標	成果	達成度	今後の課題
短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発	波長：266nm帯 出力20W 高品位加工実証	・加工システム稼働 ・出力10Wで無アルカリガラス高品位加工実証	△ (年度内達成見込み)	20W加工の実証

◎ 大きく上回って達成、○達成、△年度末までに達成見込み、×未達

個別の実施項目毎の達成状況を下表に示す。

テーマ	中間目標	個別実施項目	成果	達成度
短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発	波長：266nm帯 出力20W 高品位加工実証	10W級加工技術開発	10W級加工システム構築	○
			10W級高品位加工実証	○
		20W級加工技術開発	20W対応加工光学系設計完	○
			20W光源と結合し加工実証予定	△
		データ活用系開発	データ通信動作確認	○

◎ 大きく上回って達成、○達成、△年度末までに達成見込み、×未達

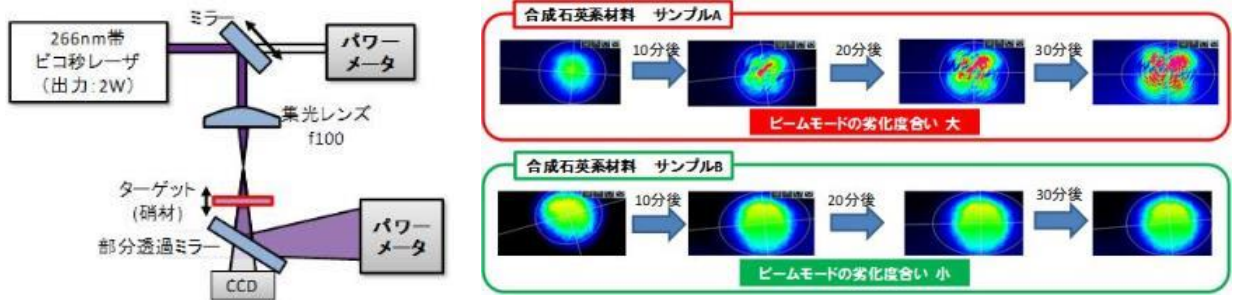
短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発については10W級レーザー光源を搭載した加工システムを構築し、加工評価を開始した。2018年5月時点で無アルカリガラス等に対する高品位微細加工を実証している。加工システムの光学系については6ヶ月の10W級加工において光学系のダメージは観測されておらず、加工光学系に関する初期のスケーリング設計の妥当性を確認している。さらにバックアップ構成として加工機導入部の反射型光学系を検討し、シミュレーションベースで光学歪が透過型光学系の1/15に低減できる結果を得ている。以上の状況から、中間目標である20W級の加工については達成を見込む。

(5) 成果の詳細

10W級加工技術開発

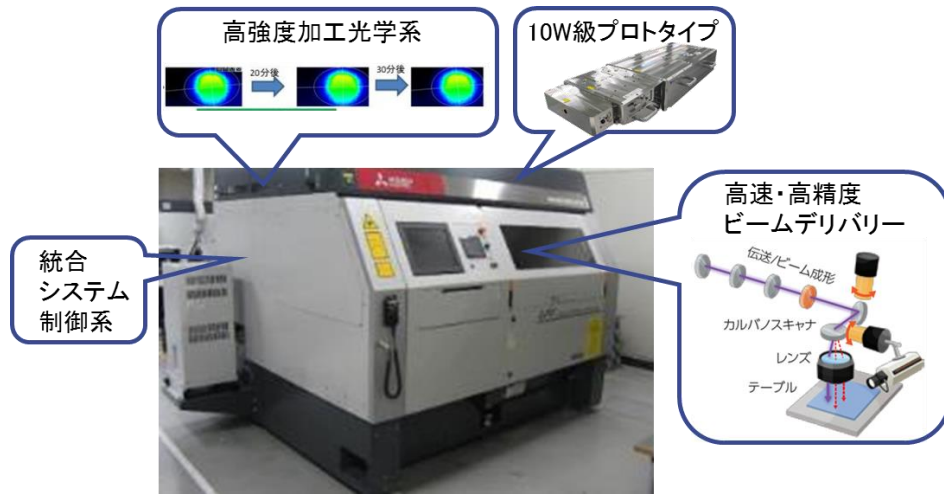
10W級加工システム構築

高出力のDUV・ピコ秒レーザーでは光学素子のビーム吸収によるビーム歪や光学素子の損傷、劣化を生じやすく、高出力のDUV・ピコ秒レーザーをハンドリングする光学系の開発が必要である。プロジェクト開始時点で利用可能であった出力2W級のレーザーを用いて市販の各種UV用光学材料の評価試験を実施し、照射強度と各種光学材料で発生する光学歪の関係を把握した。上記のデータベースに基づいて光学材料を選定して加工光学系を設計、試作した。



図Ⅲ2-1-3-2 UV用光学材料の評価試験

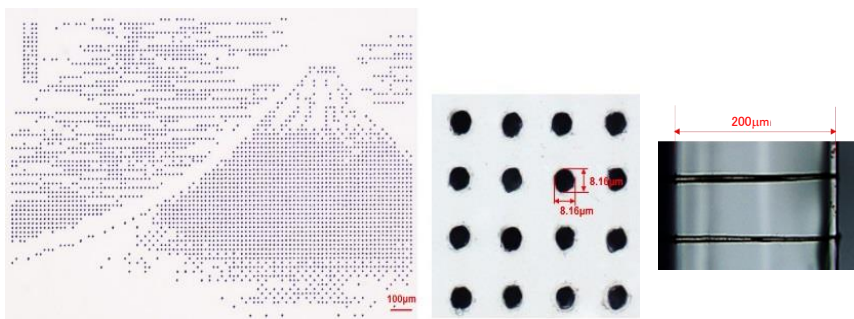
開発した高強度加工光学系と項目 1-2 で開発された 10W 級のプロトタイプ光源ならびに新規開発のシステム制御系を搭載して 10W 級の加工システムを構築した。



図Ⅲ2-1-3-3 10W 級加工システム外観

10W 級高品位加工実証

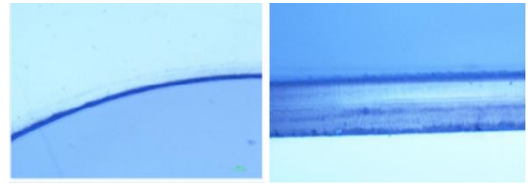
10W 級加工システムを用いて、半導体・電子機器製造において多用される無アルカリガラスを中心に加工評価を実施した。以下に加工結果のサンプル写真を示す。



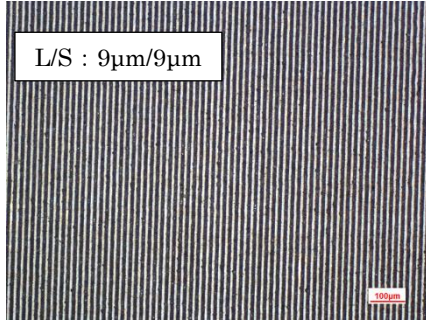
無アルカリガラス穴あけ加工サンプル



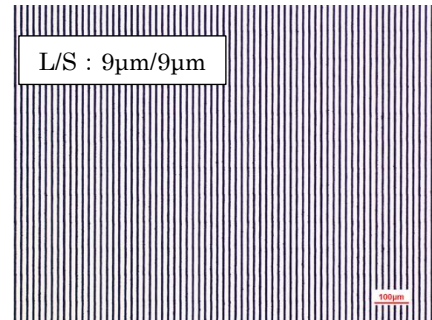
無アルカリガラス切断サンプル



ホウケイ酸ガラス切断サンプル

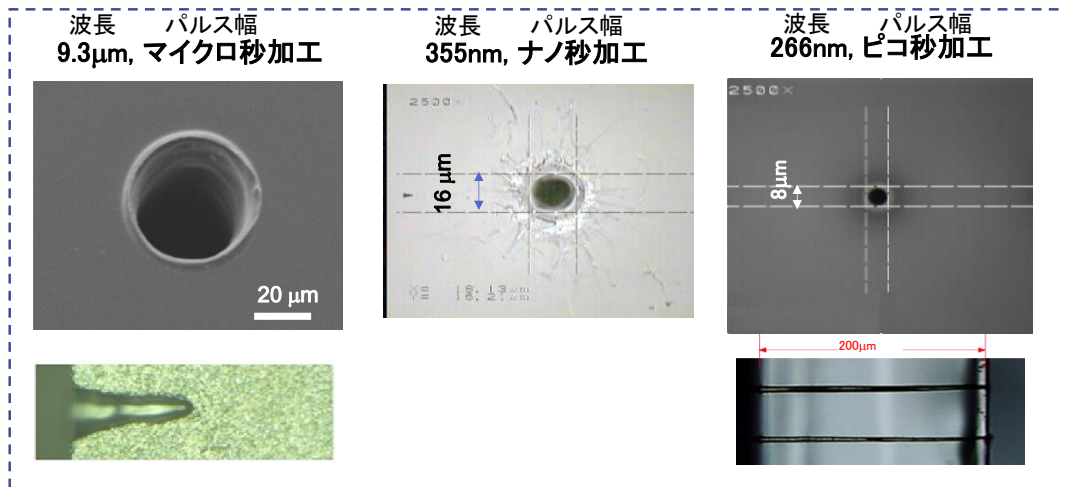


無アルカリガラス溝彫り加工サンプル



ダイヤモンド溝彫り加工サンプル

図Ⅲ2-1-3-4には、DUV・ピコ秒レーザーを用いた加工と現在実生産に使用されているレーザーを用いた加工との比較を示す。開発したDUV・ピコ秒レーザー加工によって、既存のレーザーでは困難なシングルマイクロメータ領域の高品位微細加工の可能性を実証した。



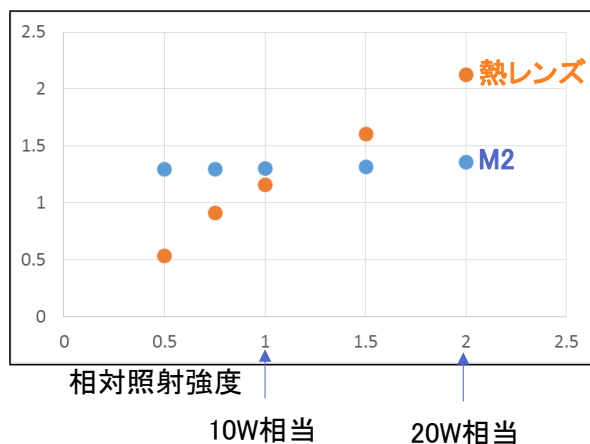
図Ⅲ2-1-3-4 既存レーザー加工との高品位微細加工性能比較（ベンチマーク）

20W級加工技術開発

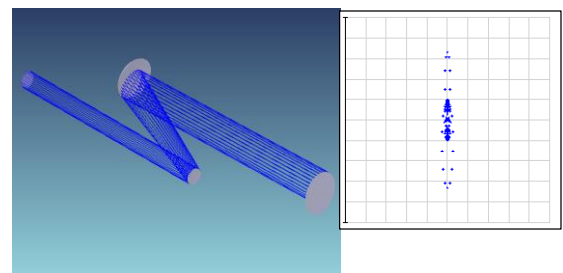
20W級加工システム(加工光学系)開発

10W 級加工システムを用いて、20W 以降の高出力加工実証に向けた開発を行った。図Ⅲ2-1-3-5 には 10W ビームを用いた光学系歪の評価を示す。出力 2W のビームを用いた評価から予測した特性と整合しており、初期のスケーリング則の妥当性を確認するとともに、データの拡充によって 20W 以降のスケーリング設計の確度を向上する結果を得た。また、加工評価の期間中、光学系に検知できる劣化、損傷のないことを確認した。

上記により、20W の加工光学系は現行 10W 光学系のスケーリング拡張によって実現可能と考えるが、バックアップ策として反射型光学系のシミュレーション検討を実施し、反射型光学系によって光学歪を透過型光学系の 1/15 に低減できる可能性を示す検討結果を得た。



図Ⅲ2-1-3-5 10W レーザーを用いた光学素子歪評価



同一発熱条件において
反射型熱歪は透過型合成石英の1/15

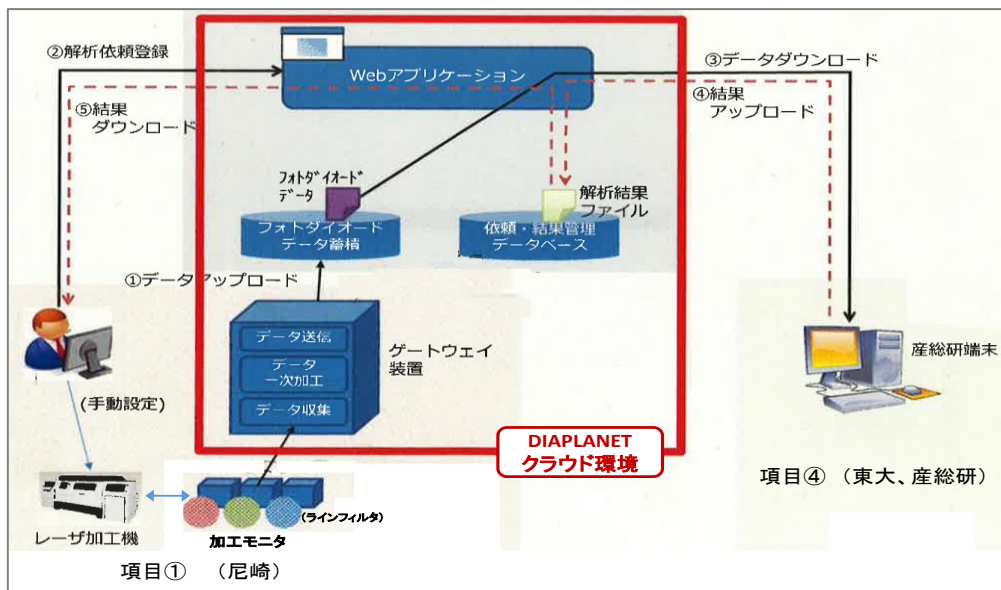
図Ⅲ2-1-3-6 反射型光学系のシミュレーション検討

20W級高品位加工実証

20W 級高品位加工については、上記の光学系と項目①-2 で開発する 20W 級のプロトタイプ光源を結合して、年度末までに実証予定である。

データ活用系開発

次世代のレーザー加工機では、データ活用のためのネットワーク通信機能を備えた構成になるものと考えられる。本テーマでは、特に項目 4 で行う共通基盤技術開発との連携強化によって効率化に加工技術開発を推進することをワークケースに想定して、加工データ活用のための通信基盤を整えた。デジタルデータロガーを用いて加工の状況をモニタリングし、クラウドサービスを介して取得データをネットワークで共有する。図Ⅲ2-1-3-7 の構成のネットワーク基盤を構成し、異なる端末間でのデータ通信動作を確認した。



図Ⅲ2-1-3-7 加工データを活用した開発推進に向けたネットワーク基盤の構成

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように中間目標である出力 20W 級の高品位加工については達成する見通しを得ている。加工システムの構築に必要な高強度光学系の開発については、20W までは現行の透過型光学系のスケールングで対応可能と予測しており、さらにバックアップとして1桁高い耐光強度が期待できる反射型光学系のシミュレーション設計を行っている。最終目標に必要な 50W ビームのハンドリングについては、20W での評価を実施し、必要に応じて反射型光学系を投入することによって対応できるものとする。また、扱い易さの面で優れる透過型材料に関して共同実施者である大阪大学にシーズがあり、新材料の評価も行ってみたいと考える。加工条件最適化などの開発については、従来の試行錯誤的な探索に加えて、項目 4 で進める共通基盤技術開発の成果を取り込むことによって、より高度なレベルに短期間で達するように開発を進める。

以上、今後実施すべき課題はあるものの、アプローチ方法についての方針を立てており、十分に最終目標に到達できる可能性があるものとする。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-2. 研究開発項目②「高出力レーザーによる加工技術の開発」

2-2-1. 「高輝度・高効率レーザー装置の開発」（実施先：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学）

（1）事業の背景・意義（目的・概要）

高輝度・高効率レーザー装置の開発については、浜松ホトニクスと大阪大学がキロジュール級パルスレーザーへのスケールアップが可能な小型で高効率な産業用高出力パルスレーザー技術確立を目指す。開発した高出力パルスレーザー装置を加工システムと連結することでレーザー加工システムを構成し、ユーザーと連携した加工技術の開発に活用することで新たな金属材料の加工市場の開拓を目指す。

パルス動作のレーザーによる加工応用は、ファイバレーザーに代表される CW 動作によるレーザー応用とは異なり、パルス波形やパルスエネルギーなど多くのパラメータがあり、今後高機能加工などの分野の開拓が期待される。航空機・自動車等の輸送機器の軽量化の流れの中で、金属材料の表面硬化や高強度化技術に高出力パルスレーザープロセス（ピーニング・フォーミング）が有望視されているが、高スループット加工機に求められる高繰り返しレーザーがなく、産業化が進んでいないのが現状である。

表Ⅲ2-2-1-1 に本テーマで開発する 100J 級レーザー装置と、海外で進められている 100J 級のレーザー装置との比較を示す。米国および英国の研究機関では、科学研究用光源として開発が行われているのに対し、本プロジェクトではレーザー加工基盤技術の開発を目的とした産業用の高出力パルスレーザーとして開発を行う。先行する世界の高出力パルスレーザーを凌駕するキロジュール級レーザーへの出力スケールアップを見据えた小型・低コストで高効率なレーザー装置の開発を行い、それを搭載したレーザー加工システムを構築し新たなレーザー加工の基盤技術の確立を行う。

表Ⅲ2-2-1-1 100J 級レーザー装置のベンチマーク

	米国研究機関	英国研究機関	本プロジェクト	優位性
材料	ガラス(Nd)	セラミック(Yb)	セラミック(Yb)	高熱伝導・低発熱
LD	800nm帯	900nm帯	900nm帯	高輝度・小型・低コスト
冷却方式	ヘリウム(室温)	ヘリウム(低温)	ヘリウム(低温)	高冷却能力
用途	科学研究	科学研究	レーザー加工	産業応用

(2) 研究開発目標と根拠

高出力レーザーによる加工技術の確立およびキロジュール級レーザーの実現可能性の評価の 2 つの目的を実現するためのレーザー技術の開発として、開発目標を以下に定めた。本テーマでは、サブテーマとして以下の(a)、(b)を実施する。表Ⅲ2-2-1-2 に目標値と設定根拠を示す。

(a) 高出力パルスレーザー装置の開発（浜松ホトニクス）

(b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発（大阪大学）

表Ⅲ2-2-1-2 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
(a) 高出力パルスレーザー装置の開発	500J 級出力の達成	キロジュール級レーザーの実現可能性を実証	高出力 LD モジュールによる 1kJ、10Hz の達成	キロジュール級レーザーの基本設計の要素技術の確立
			高出力パルスレーザー装置による 100J 出力の確認	新たなレーザー加工の基盤技術確立に向けた光源 世界水準に追い付く
(b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発	キロジュール級レーザーの実現可能性を確認	世界を凌駕するキロジュール級レーザーの基盤技術の確立	キロジュール級レーザーの基本設計技術の確立	100J 級レーザー装置の開発を通し基本設計技術を確認 世界水準に追い付く

目標の設定根拠として、(a)については現在市場で販売されているレーザーピーニング用のレーザー装置の出力 10-20J の 5-10 倍に相当するレーザー出力 100J を中間目標とし、最終目標をキロジュール級パルスレーザーの実現を見据えたレーザー出力 500J 級とした。キロジュール級レーザーの要素技術である LD モジュールについては、1kJ、10Hz を中間目標として設定した。

(b)については、(a)にて達成する 500J 級レーザー出力の特性を検証することにより、世界を凌駕するキロジュール級レーザーの実現可能性を世界に先駆けて確認することを最終目標とした。

(3) 研究開発スケジュール

本研究開発テーマの研究開発スケジュールを表Ⅲ2-2-1-3 に示す。

表Ⅲ2-2-1-3 高輝度・高効率レーザー装置の開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
(a) 高出力パルスレーザー装置の開発	基本設計の作成	100J 級レーザー増幅器の試作	100J レーザー装置構築	500J 級レーザー増幅器の試作	500J 級レーザー装置の構築	高出力パルスレーザー装置により 500J 級出力を確認
(b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発	基本設計の検証	シミュレーション解析 開発へフィードバック	レーザー特性改善の検討	キロジュール級出力へスケーラブルな設計	500J 級レーザー特性の評価	キロジュール級レーザー装置の実現可能性を確認

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-2-1-4 に示す。(a)における高出力LDモジュールに関する技術開発については、高出力LDモジュールを構成するLDユニットの試作を完了し、100J以上で10Hzの動作を確認した。これにより10台で構成される高出力LDモジュールにて1kJ、10Hzの出力を達成できる目処を得た。このLDユニットの開発で確立した技術をベースにすることで、実用化・事業化後も競争力を確保できる見通しである。(a)における高出力パルスレーザーに関する技術開発については、先行して開発した前置増幅器で得られた増幅パラメータを元に行った100J級レーザー増幅器の出力シミュレーションにより、10J級のレーザー入力の際に100J以上のレーザー出力を得る見通しが立った。

(b)におけるキロジュール級レーザーの基本設計技術の開発については、高出力用の大型光学材料の光学特性の評価を行い、その結果を100J級レーザー装置の設計にフィードバックした。今年度中に100J級高出力パルスレーザー装置による100J出力の確認と出力特性の評価・検証を行い、キロジュール級レーザーの基本設計技術を確立する予定である。

表Ⅲ2-2-1-4 研究開発項目と達成状況

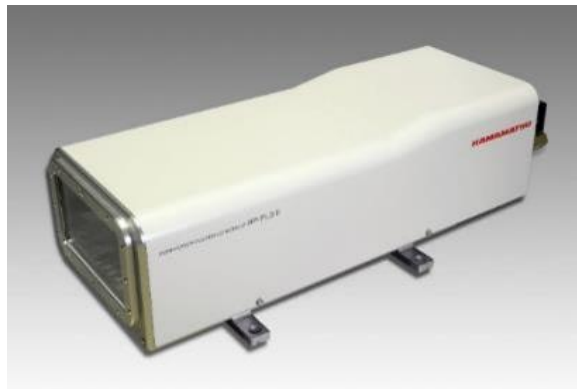
項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
(a) 高出力パルスレーザー装置の開発	高出力 LD モジュールによる 1kJ、10Hz の達成	100J×10Hz の LD ユニット 4 台の試作が完了	○	10 台の LD ユニートを組み合わせた高出力 LD モジュールの構築
	高出力パルスレーザー装置による 100J 出力の確認	前置増幅器の評価結果を反映した 100J 級レーザー増幅器のシミュレーションにより、100J 出力の見通しが立った	△ (年度内に達成見込み)	100J 級レーザー増幅器の構築と増幅試験の実施
(b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発	キロジュール級レーザーの基本設計技術の確立	高出力用光学材料の光学特性の評価結果等をフィードバックし 100J 級レーザー装置の設計を固めた。	△ (年度内に達成見込み)	100J 級レーザー装置の出力特性の評価・検証による基本設計技術の確立

(5) 成果の詳細

(a) 高出力パルスレーザー装置の開発

【高出力 LD モジュール技術の開発】

1kJ×10Hz で出力可能な高出力 LD モジュールの開発を行っている。この高出力 LD モジュールは、100J を出力する LD ユニット 10 台から構成される。試作した LD ユニットの外觀写真を図Ⅲ2-2-1-1 に示す。試験の結果、平均出力 1kW 以上を得た。開発した LD ユニットの仕様を表Ⅲ2-2-1-5 に示す。これにより本 LD ユニートを 10 台構成することにより、1kJ×10Hz の出力を達成できる見通しを得た。また海外メーカーの製品と比較した結果、体積で規格化したピークパワーが約 2 倍と小型・高出力であることを確認した。



図Ⅲ2-2-1-1 LD ユニットの外觀写真。

表Ⅲ2-2-1-5 LDユニットの仕様

項目	値
ピーク出力	>100 kW
パルス幅	1 ms
波長	900nm 帯
パルスエネルギー	>100 J
繰り返し数	10 Hz
外形寸法	27 × 80 × 25 cm ³

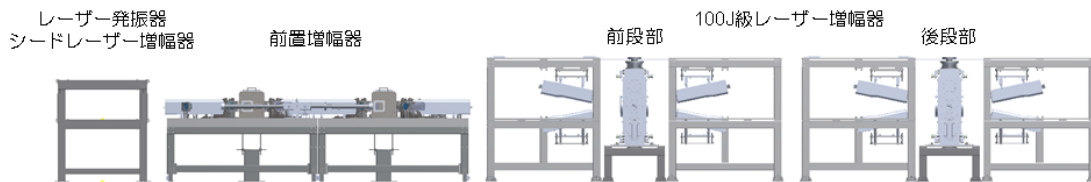
【高出力パルスレーザー技術の開発】

キロジュール級レーザーの基本設計技術の確立に向け、100J 級高出力レーザー装置の基本設計を行った。100J 級高出力レーザー装置には、キロジュール級レーザー出力へのスケールアップを備えつつレーザー加工システムとして実用化することが求められる。スケールアップと実用性を検証するためにレーザー媒質の比較を行った。表Ⅲ2-2-1-6 にレーザー媒質の比較の結果を示す。レーザー材料としてネオジウム (Nd) ガラスとイッテルビウム (Yb) セラミクスを比較した。大型化が可能かつ産業用として高い繰り返し動作においても高い熱特性を有するセラミクスが有望であることが分かる。更に、蛍光寿命の長い Yb を活性化イオンとする Yb セラミクスを選択することで、励起用 LD の数量を 1/3 に削減することができ小型で低コストなレーザー装置を開発できる。Yb セラミクスのデメリットとして低い誘導放出断面積が挙げられるが、大阪大学が提唱した低温化による誘導放出断面積の増加効果により適切なレーザー利得を得ることができる。

表Ⅲ2-2-1-6 キロジュール用レーザー材料の比較

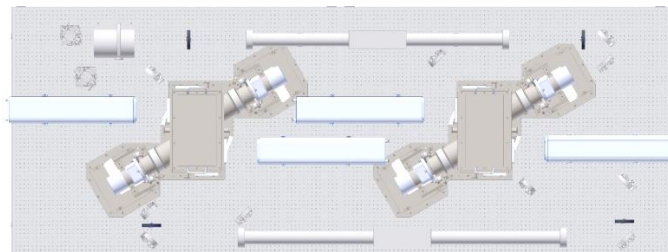
	Ndガラス	Ybセラミクス
大型化	◎	○
熱伝導率	低い	高い
蛍光寿命	短い	長い
必要なLD数	1	1/3

100J 級高出力レーザー装置の基本設計を図Ⅲ2-2-1-2 に示す。システムは、主に波形整形機能を有したレーザー発振器、シードレーザー増幅器、前置増幅器および 100J 級レーザー増幅器から構成される。レーザー媒質には Yb:YAG セラミクスを用い、前置増幅器と 100J 級レーザー増幅器は Yb:YAG を低温に冷却する設計とした。100J 級レーザー増幅器は、低温・高圧のヘリウムガスを冷媒としてレーザー媒質を冷却する方式を採用することで、レーザーの高エネルギー化に伴うレーザー媒質の大型化においてもスケールアップ可能な構成とした。



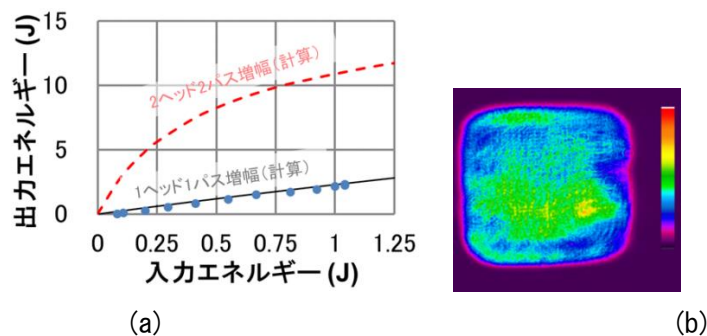
図Ⅲ2-2-1-2 100J級レーザー装置の基本設計

レーザー発振器からの出力光は、シードレーザー増幅器により 1J 級にまで増幅された、アクティブミラー型の前置増幅器にて 10J 級まで増幅される。前置増幅器では、高効率にレーザー増幅を行うために、Yb:YAG レーザー媒質を 100K 程度の低温に冷却する技術を適用した。低温冷却型のレーザー増幅器の構成として、電動式クライオスタットにより Yb:YAG セラミックを低温に冷却するパッシブ冷却アクティブミラー型増幅器を採用した。この方式は、低温の冷媒を直接レーザー媒質に接触させるアクティブ冷却型と比較し、冷媒の管理が不要で電源インフラのみで構成することが可能であり産業展開が期待できる。前置増幅器のシステム構成を図Ⅲ2-2-1-3 に示す。入射されたシードパルスは 2 式のアクティブミラー型増幅器により増幅される構成である。



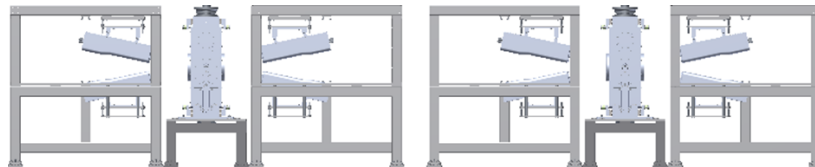
図Ⅲ2-2-1-3 前置増幅器のシステム構成図

アクティブミラー型レーザー増幅器 1 台が構築された前置増幅器の 1 パスの増幅試験結果を図Ⅲ2-2-1-4(a)に示す。実線は計算を示しプロットは実験結果を示す。実験により、入力 1J のときに出力エネルギーとして 2.3J を得た。実験結果は計算結果と一致しており、同様のアクティブミラー型レーザー増幅器 2 台目を実装した 2 パス増幅を行うことで、10J 超のレーザー増幅が達成できる見通しを得た。出力パターンを図Ⅲ2-2-1-4(b)に示す。回折等に起因した急激な強度変化のない、良好なパターンが得られ、10J 級の出力においても光学ダメージのリスクが少ないことが確認された。



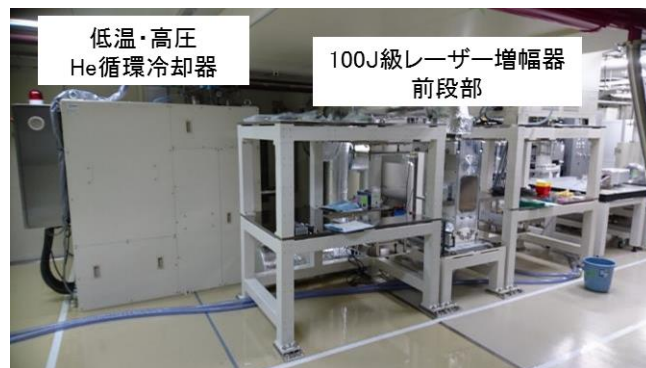
図Ⅲ2-2-1-4 前置増幅器の特性. 増幅試験結果 (a) および近視野像特性 (b)

100J 級レーザー増幅器の構成図を図Ⅲ2-2-1-5 に示す。100J 級レーザー増幅器は、前段および後段の 2 つの増幅器を備えており、それぞれ低温・高圧のヘリウムガスで冷却される板状の複数のレーザー媒質（アクティブ冷却マルチディスク型増幅器）を 4 方向から高出力 LD モジュールにより励起する構成である。このレーザー増幅器の構成は、冷媒である低温・高圧のヘリウムガスが直接レーザー媒質と接触し冷却することから高い冷却能力を得ることができるが、低温・高圧のヘリウムガスの気密性を保ちつつ循環させる技術が重要となる。特に 4 方向から照射される励起光とシードパルス光を入射するための大口径の光学窓には、低温・高圧に耐える強度と気密性を備えつつ、シードパルスのビーム品質を劣化させない高い光学性能が求められる。



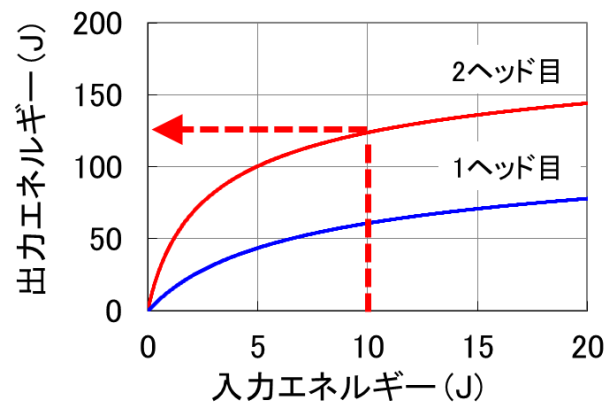
図Ⅲ2-2-1-5 100J 級レーザー増幅器の構成図

図Ⅲ2-2-1-6 に低温・高圧ヘリウムガス循環冷却装置を備えた 100J 級レーザー増幅器の外観写真を示す。今後、高出力 LD モジュールや Yb:YAG セラミックスの取り付けを行い、増幅試験を開始する。2018 年秋に 100J 級レーザー増幅器の後段部の構築を完了し、年内に増幅試験を実施する計画である。



図Ⅲ2-2-1-6 100J 級レーザー増幅器（前段部）の外観写真

図Ⅲ2-2-1-7 に 100J 級レーザー増幅器の増幅計算の結果を示す。増幅計算により、前置増幅器から出力された 10J を入力することで 120J の出力エネルギーが得られることを確認した。この計算結果から、100J 超級の出力を得る見通しが立った。



図Ⅲ2-2-1-7 100J級レーザー増幅器の増幅計算.

(b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発

キロジュール級パルスレーザーの基本設計で重要な高出力用の大口径光学材料の光学特性の評価を大阪大学が行い、その結果を100J級レーザー装置の設計にフィードバックした。今年度中に、大阪大学からのフィードバックを元に設計の最適化を行った100J級高出力レーザー装置の出力特性を評価し、構成する主要コンポーネントの出力スケールリングを検証することで、キロジュール級レーザーの基本設計技術を確立する予定である。

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように中間目標は全て達成する見通しを得ている。今後は、スケールリングが可能な100J級レーザー増幅器や励起用LDモジュール等の技術をベースに、更なる高出力化、小型化および高効率化を図った500J級レーザー増幅器を開発し、100J級のレーザー出力を500Jまで増幅する試験を実施する。その増幅特性を評価・検証することでキロジュール級レーザー装置の実現可能性を確認することで最終目標を達成の見込みである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

本テーマにて開発したLDユニットについて、2件の国際会議にて技術報告、2018年4月19日にプレスリリースを行い展示会(OPIE2018)にて実機展示を行った。展示会では多くの反響があり、応用展開への手応えを得た。そこでLDユニットについては実用化の計画を前倒しし、プロジェクト後半も引き続きアウトリーチ活動によりニーズ探索を継続して行うのと並行して実用化開発を行う。

2-2-2. 「高出力レーザーによる加工基盤技術の開発」（実施先：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学、産業技術総合研究所）

（1）事業の背景・意義（目的・概要）

高出力レーザーによる加工基盤技術の開発については、金属材料等の強化技術やその二次加工へ高出力レーザーを適用することで高付加価値化や従来にはない新しい加工技術を確立することで省エネ社会の実現に資する。現在、地球温暖化への対策としてCO₂ガス排出量を削減する取り組みが世界的規模で進められている。産業界においても、環境に配慮したものづくりとして低CO₂ガス排出化の取り組みがなされている。自動車業界や航空産業においてはアルミ合金や炭素繊維樹脂（CFRP）を用いることで車両・機体重量の軽量化を図り燃費の向上が図られている。また産業部門においても種々の金属材料が用いられているが、これらの金属材料を強化し耐久性を向上させることが必要不可欠である。部品寿命が長期化することによって、結果として産業分野の省エネにつながることを期待される。そこで既存の金属材料の強化手法（ショットピーニング等）との比較試験により高出力レーザーによる加工基盤技術の指針を得ていく。その他、産業界では金属材料の加工として、フォーミングなどの応用が期待されている。しかし、これらの技術においては、まだその加工原理の解明が十分進んでおらず、これらの技術を使いこなしてものづくり現場での要求に応える高い制御性や安定性を確立するには、高出力レーザーによる系統的な加工基盤技術の開発が不可欠である。そこでこれらを開発していくことで新しい産業応用分野を開拓して、省エネ社会の実現を目指している。

（2）研究開発目標と根拠

高出力レーザーの新たな産業応用を開拓するとともに、高出力レーザー照射加工の非接触な計測・分析評価技術を開発することを目的として本テーマの開発目標を以下に定めた。

- (a) 高出力レーザー加工システムの開発（浜松ホトニクス株式会社）
- (b) 高出力レーザーの加工技術の開発（大阪大学）
- (c) 計測分析評価技術の開発（産業技術総合研究所）

表Ⅲ2-2-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
(a) 高出力レーザー加工システムの開発	ユーザー機関と連携して、高パルスエネルギーレーザーの新しい産業	実用化につなげるためにユーザー機関と連携した加工試験が必要	10～100GW/cm ² の強度で繰り返し照射可能な100J級出力に対応したレーザー加工システムの構築	レーザーピーニング加工強度を含み、サンプル加工の際にパラメータ可変とするため
(b) 高出力レーザーの加工技術の開発	応用分野の開拓			

(c) 計測分析評価技術の開発	非接触な計測・分析技術の実証	実用化した場合を想定して、非接触な評価手法の実証が必要	高パルスエネルギーを照射された試料の状態変化を非接触で分析・観察するのに必要な計測技術の仕様策定	既存レーザー等を用いたレーザー加工試験を通じて、必要な計測技術の仕様が明らかになるため
-----------------	----------------	-----------------------------	--------------------------------------------------	---------------------------------------------

上記の設定根拠について、(a)高出力レーザー加工システムの開発および(b)高出力レーザーの加工技術の開発については、途中でサンプル加工の際にパラメータ可変するための加工システムが必要になり、最終では実用化につなげるためにユーザー機関と連携した加工試験が必要であるため、それぞれを目標として設定した。

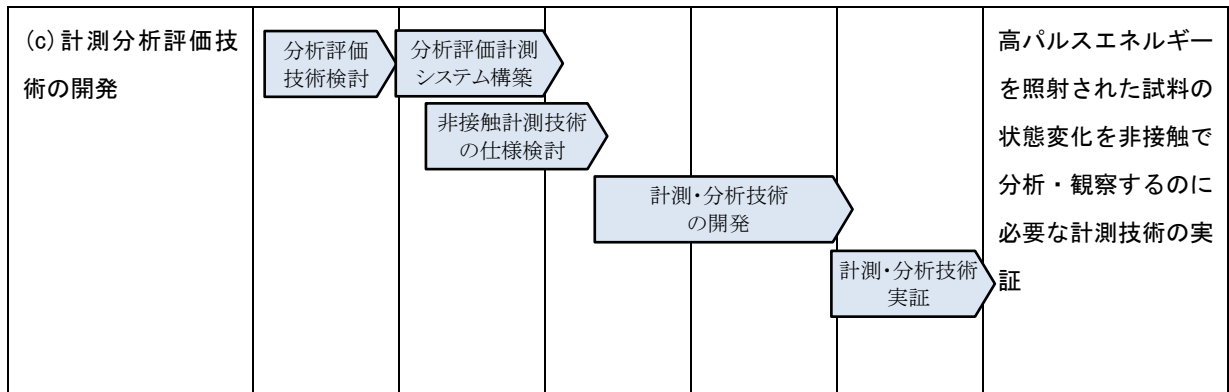
(c)計測分析評価技術の開発については、途中で必要な計測技術の仕様が明らかにした上で、最終では実用化した場合を想定すると非接触な評価手法の実証が必要となるため、それぞれを目標として設定した。

(3) 研究開発スケジュール

本研究開発テーマの研究開発スケジュールを表Ⅲ2-2-2-2に示す。

表Ⅲ2-2-2-2 高出力レーザーによる加工基盤技術開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
(a) 高出力レーザー加工システムの開発	基礎的加工検証試験	加工システム基本仕様決定	100J級加工システムの構築	ユーザー連携レーザー加工試験	新奇応用・500J加工実証	10～100GW/cm ² の強度で繰り返し照射可能な100J級出力に対応したレーザー加工システムを活用して高パルスエネルギーレーザーの新しい産業応用分野を開拓
(b) 高出力レーザーの加工技術の開発	高出力レーザー加工検証	加工検証シミュレーション解析	加工システムへフィードバック	シミュレーション予測と加工検証	新奇加工技術・実用化へフィードバック	



(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。高出力レーザー加工システムの開発については、高出力レーザーの加工技術の開発と連携して進め、計画を前倒して実施しており 100J 級出力に対応したレーザー加工システムの構築が完了しており、中間目標を達成している。また、計測分析評価技術についても、高パルスエネルギーを照射された試料の状態変化を非接触で分析・観察するのに必要な計測技術の仕様策定を開始しており、中間目標をほぼ達成している。

表Ⅲ2-2-2-3 研究開発項目と達成状況

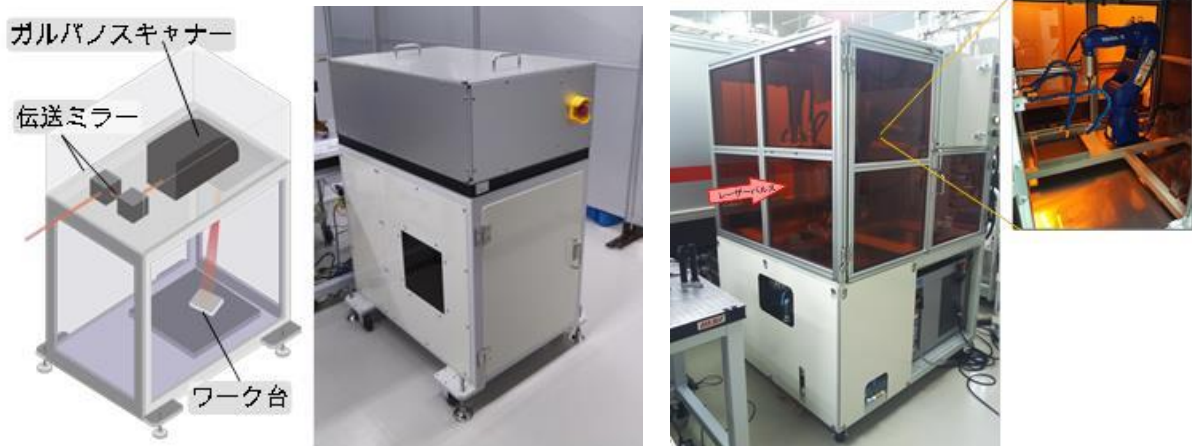
項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
(a) 高出力レーザー加工システムの開発	10～100GW/cm ² の強度で繰り返し照射可能な 100 J 級出力に対応したレーザー加工システムの構築	レーザー加工システムを構築しレーザー加工応用試験を前倒しして開始した	○	100J 級レーザー装置の完成後にレーザー加工システムと連結し評価を実施する
(b) 高出力レーザーの加工技術の開発				
(c) 計測分析評価技術の開発	高パルスエネルギーを照射された試料の状態変化を非接触で分析・観察するのに必要な計測技術の仕様策定	非接触計測技術の仕様を策定した	○	策定した計測技術を用いて加工サンプルの評価を行う

(5) 成果の詳細

(a) 高出力レーザー加工システムの開発

高出力レーザー加工システムの構築に先立ち、まず既存レーザー装置（パルスエネルギー1～10J）を用いて基礎的な加工検証試験を行うために伝送ミラーやスキャンユニットを備えたレーザー加工検証試験機を構築した。図Ⅲ2-2-2-1 に外観写真を示す。レーザー加工検証試験機による加工検証試験を実施することで高出力レーザー加工システムの基本設計を固めた。高出力レー

レーザー加工システムで用いる 100J 級のパルスレーザーの場合、レーザーによる光学素子の損傷を避けるためにビーム直径が 100mm 程度となる。したがって、レーザー側を光学ミラー等で加工エリ



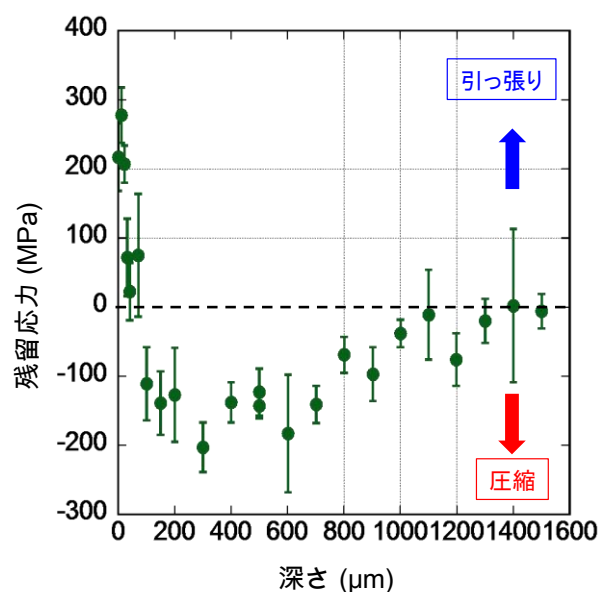
図Ⅲ2-2-2-1 レーザー加工検証試験機の外観

図Ⅲ2-2-2-2 レーザー加工システムの外観

アまで導光し、6 軸制御のマニピュレーターで加工対象となる試料を保持して、レーザー照射位置まで移動させて加工する方式とした。図Ⅲ2-2-2-2 に構築したレーザー加工システムの外観写真を示す。以上により、10~100GW/cm² の強度で繰り返し照射可能な 100 J 級出力に対応したレーザー加工システムの構築を完了し中間目標を達成した。さらに、本システムを用いてレーザー加工検証試験を開始した。

(b) 高出力レーザー加工技術の開発

開発を進めている 100J 級レーザー装置による加工検証試験に先立って、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光 XII 号レーザーを用いたレーザー加工試験を行った。パルスエネルギーは 100~340J の範囲で調整され、波長 1053nm の基本波は、波長変換素子 (KDP 結晶) により



図Ⅲ2-2-2-3 激光 XII 号レーザー照射サンプル (SUS304) の残留応力分布

2倍高調波の波長527nmに変換されて厚さ5mmのSUS304へ照射された。レーザーの波形は矩形パルス形状、パルス幅は2.5ns、照射強度は262GW/cm²とした。残留応力分布の結果を図Ⅲ2-2-2-3に示す。特筆すべき点は、圧縮応力層が深さ1.4mmに渡って形成されていた点である。本試験では単一パルスによる照射にもかかわらず1.0mmを超える深層領域まで加工領域が及んでいることから、繰り返してレーザーを照射することで、さらに深層領域にわたって圧縮応力層を形成できる見通しを得た。

さらに高出力レーザーによる新しい加工技術を探索するために、レーザー誘起の衝撃波のシミュレーションコードを開発した。開発したコードを用いることで、レーザーの空間分布や時間分布を制御することで従来とは異なる加工結果が予測できるようになった。

(c) 計測分析評価技術の開発

高パルスエネルギーを照射された資料の状態変化について、主にX線による残留応力分布の評価を実施した。非接触な分析・観測としてその場で計測できることも実用化に向けては重要な要素となる。表Ⅲ2-2-2-6に高出力レーザー加工における計測パラメータおよび計測手法を示す。これらの計測パラメータを用途に応じて組み合わせることで、非接触で加工対象の状態変化の計測を実証していく予定である。

表Ⅲ2-2-2-4 非接触な分析・観測に必要な計測技術

計測パラメータ	計測手法	計測
レーザーエネルギー	焦電素子	その場
レーザーパルス波形	フォトダイオード	その場
加工品質	マイクロスコープ	その場
形状評価	CCDカメラ	その場
表面応力	X線、放射光	オフライン
発光スペクトル	分光器	その場

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように中間目標のレーザー加工システムの開発については達成した。さらにH30年度から前倒してユーザー機関を取り込んでおり、さらにユーザー機関を呼び込むための加工サンプルの作製と評価試験を実施することで、最終目標である新しい産業応用分野を開拓できる見込みである。また、非接触な分析・観測に必要な計測技術開発についても、同様に前倒して評価試験を実施しており、加工対象の状態変化を非接触で計測する技術を実証できる見通しである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-3. 研究開発項目③「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」

2-3-1. 「フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化」

(実施先：京都大学、スタンレー電気株式会社)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

レーザー加工分野においては、熱の影響が少ない精密加工を可能とする短パルス光源や、金属材料の高効率な加工を可能とする短波長光源の開発が極めて重要となっている。これらにより、自動車や航空機等の軽量化・低燃費化に向けて注目を集めている軽量・高強度・高剛性の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 等の先端素材の加工や、今後ますますその重要性が増すセンサーデバイスやスマートフォン等の電子機器製造における銅やセラミックス材料の高効率な加工などが可能となり、レーザー加工のマーケットの大幅な拡大が期待されている。開発項目① (および開発項目④) グループにおいては、これらの背景を見据え、短パルス・短波長光源の開発が進められている。ここでの開発では、既存の比較的大がかりなレーザー技術をベースとして、直近の次世代光源として提供可能な状態へと展開することを目指している。本研究開発課題 (項目③-1) では、このような短パルス光源、短波長光源を、小型でコンパクトな半導体レーザーワンチップにより実現すべく、我が国発の独自の半導体レーザー技術である「フォトニック結晶レーザー」の(A)短パルス化、および(B)短波長化を目指した技術開発を行い、その次の世代の光源、つまり次々世代光源として提供可能とするための基盤技術開発を目指している。

ここで、フォトニック結晶レーザーとは、活性層の近傍に、光の波長と同程度の周期的屈折率分布をもつフォトニック結晶を内蔵した半導体レーザーであり、世界的にも極めてユニークなレーザーである。周期性に起因して形成されるフォトニックバンド構造において、光の群速度がゼロとなるバンド端では、大面積でコヒーレントな共振状態が形成され、これにより、大面積での単一縦横モード動作が可能となり、高いビーム品質かつ、高出力の発振が可能となるところに最大の特長がある。このようなフォトニック結晶レーザーを、短パルス化、短波長化することで、以下のような展望が期待される。すなわち、近赤外波長域 (940~980nm 帯) フォトニック結晶レーザーの短パルス・高出力動作の実現により、上述の熱の影響の極めて少ない、微細で精密な加工が可能な超小型半導体レーザーとして活用可能となることが期待される。さらに、レーザーの出射面上部に、非線形結晶を配置するだけの簡単な構成で、小型・レンズフリーで、高効率に波長変換 ($2\omega\sim4\omega$) を行うことで、青色・紫外域短パルスで高平均出力動作が得られると期待される。また、フォトニック結晶レーザーを青~紫色波長域へと短波長化しつつ高出力化することにより、高いビーム品質で、直接、フォトンエネルギーの大きなレーザー光出射が可能となり、よりシャープで高効率な加工の実現が可能になるものと期待される。さらなる短波長化も、 2ω の波長変換のみで可能となる。本研究では、このような次々世代技術としての展望を見据えつつ、その基本概念実証 (POC) として、

- (A) 近赤外波長域のフォトニック結晶レーザーにおいて、高ビーム品質を保ったまま、高平均出力・短パルス動作 (パルス幅：サブナノ秒、平均出力：数ワット以上) 可能なことを実証する
- (B) 青紫色波長域のフォトニック結晶レーザーの、高ビーム品質かつワット級動作の可能性を実証する

の2つの目標を設定した。この5年間のプロジェクトでこれらのPOCを実証することで、上述の展望へ向けた開発への大きな弾みになるものと期待される。

(2) 研究開発目標と根拠

フォトリック結晶レーザー技術は、我が国発の独自技術であり、これまでに世界に先駆けて、波長940～980nm帯において、高ビーム品質 ($M^2 < 2$) ワット級連続 (CW) 動作を実現するとともに、青～紫色波長領域での電流注入発振をも世界で初めて実現することに成功している。

本プロジェクトにおいては、この独自のフォトリック結晶レーザーを短パルス化・短波長化することで、小型・コンパクト・安価な半導体レーザーの特長を最大限生かす次々世代光源としての基盤技術開発を行うことを目標としている。前項でも述べたように、将来的には、自動車や航空機の軽量化に向けて期待されるCFRP等の先端素材の加工や、電子デバイスにおける銅などの加工の困難な金属材料の高効率加工などを可能とする、小型でコンパクトな加工システムの提供に資するものと考えられ、レーザー加工市場のさらなる拡大に寄与することが期待される。また、この技術は、加工応用以外にも、車のヘッドライト用の高輝度光源や、レーザーメスなどの医療用光源などとしても、その市場の視野に入るものと期待される。

このような魅力的な応用を見据えて、すでに前項でも記載のとおり、その展開の概念実証 (POC) としての最終目標および中間目標を次表のように設定した。

表Ⅲ2-3-1-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
(A) フォトリック結晶レーザーの短パルス化	高ビーム品質を保ったままでの、高平均出力・短パルス動作 (パルス幅: サブナノ秒、平均出力: 数ワット以上) の実現可能性を実証する。	次々世代の加工システム等への応用を見据え、本格検討開始の端緒となりうる水準を考慮し、その概念実証 (POC) として設定した。	短パルス動作の実現可能性を明らかにする。具体的には、短パルス動作を可能とする設計法の確立、評価系構築、デバイス試作と評価、高出力動作に向けた検討。	フォトリック結晶レーザーの短パルス化は、全く新しい技術開発となるため、中間時点までに、短パルス動作のための設計と基本動作実証を行うことを目標とした。
(B) フォトリック結晶レーザーの短波長化	GaN系フォトリック結晶レーザーの高度化を進め、高ビーム品質かつワット級の発振の可能性を実証する。	次々世代の加工システム等への応用を見据え、本格検討開始の端緒となりうる水準を考慮し、その概念実証 (POC) として設定した。	GaN系フォトリック結晶レーザーの低閾値電流密度動作の可能性を実証する。具体的には、GaN系フォトリック結晶レーザーの閾値電流密度低減のための設計、その実現に向けた結晶成長技術の確立、デバイスの試作と評価。	従来のGaN系フォトリック結晶レーザーの閾値電流密度が極めて高いという課題を踏まえて、中間時点で、低閾値電流密度化のための基礎を構築し、その可能性を示すことを目標とした。

短パルス動作については、これまで、フォトリック結晶レーザーでサブナノ秒かつ高出力動作の事例がなく、全く新しい技術開発となるため、中間時点までに、短パルス動作の実現を可能と

するフォトニック結晶レーザーの設計法を確立するとともに、評価系の構築およびデバイス試作を行い、短パルス動作の実現可能性を明らかにすることを目標とした。なお、最終目標としては、デバイス設計の深化により、加工応用への適用の端緒となりうる動作特性（高ビーム品質で、パルス幅がサブナノ秒、平均出力が数ワット以上）の実現可能性を実証することを目標としている。

短波長化においては、これまでに、電流注入による GaN 系 PCSEL の初期実証には成功しているが、閾値電流密度が極めて高く（ $\sim 70\text{kA}/\text{cm}^2$ ）、出力が小さい（ $< 1\text{mW}$ ）という状況であった。そこで、中間時点までに、まずは、閾値電流密度を低減出来るように、フォトニック結晶共振効果を強めることが可能な構造設計を行うとともに、その実現法を確立し、短波長フォトニック結晶レーザーの低閾値電流密度動作の可能性を示すことを目標に設定した。その後、引き続き、スロープ効率が増大可能なフォトニック結晶構造の設計、導入を行い、最終目標としては、加工応用展開が視野に入る水準である、高ビーム品質でワット級の発振可能性を実証することを目標としている。

フォトニック結晶レーザーは、既に述べたように、大面積コヒーレント発振により、高いビーム品質を維持しながら高出力を実現する可能性をもった、世界で唯一の半導体レーザーであり、既存の半導体レーザーの限界（ $100\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ）を超える輝度（＝単位面積、単位立体角あたりの光出力）の実現が期待される。本研究開発では、このような優れた特長を有するフォトニック結晶レーザーにおいて、これまで世界的にも例のない短パルス化・短波長化を実現し、加工応用への適用の端緒となりうる POC の実証を目指している点は、まさに挑戦的と言える。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-3-1-2 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化の開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
(A) フォトニック結晶レーザーの短パルス化	<ul style="list-style-type: none"> 理論解析手法の開発開始 作製手法の開発に着手 	<ul style="list-style-type: none"> 電極構造等の設計 フォトニック結晶共振器の設計 分割電極構造デバイスの試作・評価 	<ul style="list-style-type: none"> 設計法の確立 短パルス動作の評価系構築 試作と評価、および出力増大に向けた検討 	<ul style="list-style-type: none"> 短パルス高出力動作実現のための設計の深化 試作と評価を通じた高度化 	<ul style="list-style-type: none"> 高ビーム品質、高平均出力の短パルス動作実現可能性を実証 	高ビーム品質を保ったままでの、高平均出力・短パルス動作（パルス幅：サブナノ秒、平均出力：数ワット以上）の実現の可能性を実証
(B) フォトニック結晶レーザーの短波長化	<ul style="list-style-type: none"> GaN 系材料フォトニック結晶レーザーの設計を開始 フォトニック結晶の形成法の検討を開始 	<ul style="list-style-type: none"> フォトニック結晶形成法の構築 初期評価（バンド測定等） 京都大学への成長装置導入 	<ul style="list-style-type: none"> 設計深化 結晶成長技術の基礎確立 試作、評価により短波長フォトニック結晶レーザーの可能性を探索 	<ul style="list-style-type: none"> 高出力実現に向けた高度化 実験結果のフィードバックによる、設計向上 	<ul style="list-style-type: none"> 解析および試作、評価を継続し、高度化を進め、GaN 系フォトニック結晶レーザーのワット級動作の可能性を実証 	GaN 系フォトニック結晶レーザーの高度化を進め、高ビーム品質かつワット級の発振の可能性を実証

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を、下表に示す。(A) フォトニック結晶レーザーの短パルス化においては、サブナノ秒レベルの短パルス化は全く新しい技術開発であるため、短パルス動作の実現可能性を明らかにすることを中間目標として、研究開発を推進した。まず、フォトニック結晶レーザーの時間応答の解析を可能とする独自の解析手法を開発するとともに、この解析法を用いて、可飽和吸収領域を有する分割電極構造の形成により、サブナノ秒レベルの短パルス動作が実現可能であることを理論的に示すことに成功した。ここで、可飽和吸収領域に広く光を分布させるために、ダブルホールフォトニック結晶という独自のフォトニック結晶構造が有効であることを見出した。以上の短パルス化に向けた指針に従って、実際にデバイスを作製し、100ps という短パルス動作を世界で初めて実現することに成功した。また、平均パワー1W を実現可能なデバイス構造の設計にも成功し、中間目標を前倒しで達成することが出来たと言える。

また、(B) フォトニック結晶レーザーの短波長化においては、従来の GaN 系フォトニック結晶レーザーの課題（高い閾値電流密度、低い光出力）についての分析に基づき、特に、低閾値電流密度化のための基礎技術を構築し、その可能性を示すことを中間目標として研究開発を推進した。閾値電流密度の低減に向けて、独自の GaN 系フォトニック結晶レーザーの解析技術を開発し、フォトニック結晶の共振効果を増強し、従来の 1/10 以下へと共振器損失を抑制できるデバイス構造の設計に成功した。また、この設計に従って、均一で不純物混入のない空孔埋め込み成長法を構築するとともに、設計指針を満足する、活性層-フォトニック結晶距離を十分に近づけることが可能なデバイス作製法を確立し、バンド構造測定等により共振効果を解析通りに高めることが可能なことを実験的に示すことに成功した。以上により、低閾値電流密度の短波長化 PCSEL の可能性を示し、中間目標をほぼ達成することが出来たと考えている。

表Ⅲ2-3-1-3 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
(A) フォトニック結晶レーザーの短パルス化	短パルス動作の実現可能性を明らかにする。具体的には、短パルス動作を可能とする設計法の確立、評価系構築、デバイス試作と評価、高出力動作に向けた検討。	<ul style="list-style-type: none"> 短パルス動作可能なデバイスの設計法を確立。 大面積動作の核となるダブルホールフォトニック結晶の有効性を実証。 短パルスデバイスの評価系を構築。 デバイス試作を行い、100ps 程度の短パルス動作を初めて実現。 	◎	
(B) フォトニック結晶レーザーの短波長化	短波長 GaN 系フォトニック結晶レーザーの低閾値電流密度動作の可能性を示す。具体的には、GaN系フォトニック結晶レー	<ul style="list-style-type: none"> GaN 系 PCSEL の設計法を構築し、低閾値電流密度化への指針を確立。 マストラנסポートによる横方向成長を促進した埋め込み成長技術等を構築し、設計と対 	○	<ul style="list-style-type: none"> 本研究で実現した強いフォトニック結晶共振器作用を最大限活かすように、活性層近傍の結晶成長条件をさらに詰めること。

	<p>ザーの閾値電流密度低減のための設計、デバイス実現に向けた結晶成長技術の確立、デバイスの試作と評価。</p>	<p>応する、フォトニック結晶-活性層距離を十分近づけた構造の形成に成功。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・デバイス試作を行い、150～200μm デバイスで、従来の 1/10 以下の共振器損失へと抑制できることを実験的に実証。 		
--	----------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

(5) 成果の詳細

(A) フォトニック結晶レーザー (PCSEL) の短パルス化

本サブテーマの狙いは、波長 940-980nm 帯の PCSEL において、高ビーム品質を保ったままで、その短パルス化（パルス幅：サブナノ秒以下、平均出力：数ワット以上）実現のための基礎技術を確認していくことにある。このような性能の実現により、半導体レーザー単体で、熱の影響の極めて少ない直接加工が可能となることが期待される。また、非線形結晶を PCSEL の上部に置くだけで、小型・高効率・レンズフリーで、直接、2 倍、4 倍などの高次波を生成し、青色から紫外域の短パルス光を出射することも可能となると期待できる。以下では、フォトニック結晶レーザーの短パルス化に向けた研究開発の詳細について述べる。

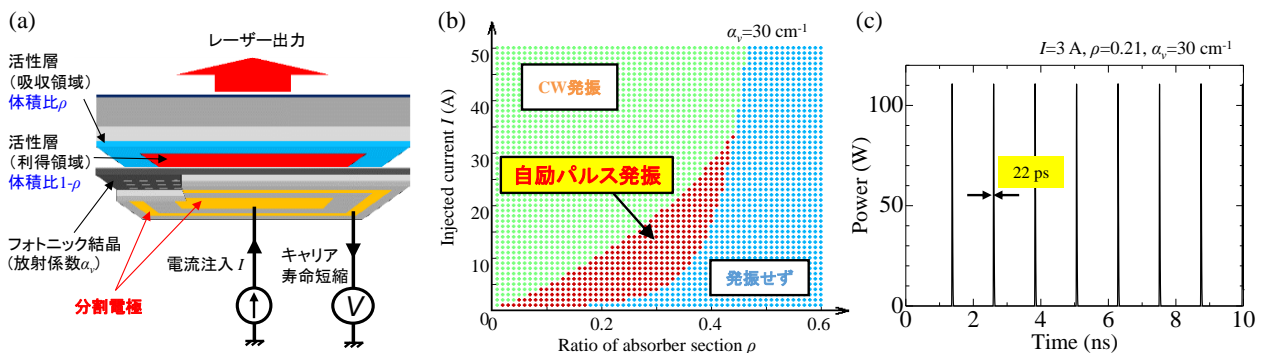
(A-1) 短パルス発振実現のための方針の検討

本サブテーマにおいては、まず、これまで連続動作（ならびにパルス幅 100-200nsec 程度の幅広いパルス動作）に限られていたフォトニック結晶レーザーについて、サブナノ秒という短パルス発振を実現する手法についての検討を行った。本研究では、PCSEL の電極を分割し、フォトニック結晶共振器を複数の領域に分割した上で、それぞれの領域に印加する電圧（あるいは注入する電流）を制御することで、共振器の一部を吸収状態から利得状態（あるいは透明状態）へと急激に変化させて、短パルス動作を得ることを検討した。

具体的な構造の一例として、図Ⅲ2-3-1-1(a)に示すように、フォトニック結晶共振器の中央部と周辺部の注入電流量を独立に制御可能とする分割電極を有するレーザー構造を提案した。本構造において、中央部のみに直流電流を注入し、利得を与え、発振直前の状況としておく（利得領域）。この状態で、周辺部では逆バイアス電圧の印加等によりキャリア寿命を短縮し、吸収領域として機能させる。このような構造において、吸収領域を、共振器内の光子数の増加に伴って吸収が飽和する可飽和吸収領域として活用することで、吸収領域が透明化した瞬間に光の急激な増幅が生じて、高ピークパワーの短パルス発振を、自励的に得ることが可能となると期待される。また、周辺部のバイアスを、逆バイアスから順バイアスへと切り替え、吸収状態から利得状態（あるいは透明状態）へと変化させ、能動的に共振器損失を急激に低下させることで、高ピークパワーの短パルスを発生させることも可能となると期待される。

上記のような、分割電極を有するフォトニック結晶レーザーにおいて、自励パルス発振が原理的に可能かどうか調べるために、まず、レート方程式を用いた基礎的な解析を行った。ここでの解析では、利得領域と吸収領域において、キャリアは一様に分布すると仮定し、共振器内の光は

単一モードでかつ共振器内に一様に分布すると仮定した（なお、フォトニック結晶共振器内のキャリアおよび光の面内分布をも考慮した解析へと発展させており、これについては(A-2)節で詳述する）。利得領域の大きさを $200\mu\text{m}$ 角、フォトニック結晶の面垂直方向への放射係数を 30cm^{-1} 、可飽和吸収領域のキャリア寿命を 10ps と仮定し、電流注入量 I と吸収領域に存在する光の割合 ρ を変化させて自励パルス発振が生じる条件を調べた結果、図Ⅲ2-3-1-1(b)に示すように吸収領域に存在する光の割合 ρ をある程度大きくすることで、上記で述べた原理により、自励的なパルス発振が得られることが判明した。 なお、吸収領域に存在する光の割合が大きすぎる場合には発振に至らず、注入電流が大きい場合には、初期はパルスの動作するものの、次第に連続動作に近づいていくことも明らかとなった。自励パルス発振の例として、具体的に $I=3\text{A}$ 、 $\rho=0.21$ とした場合のパルス波形を図Ⅲ2-3-1-1(c)に示す。同図より、基礎的な解析ではあるが、数 A 程度の小さな注入電流量で、パルス幅数 10ps 、ピーク出力 100W 級（平均出力 1W 級）の短パルス発振が実現しうることが判明した。



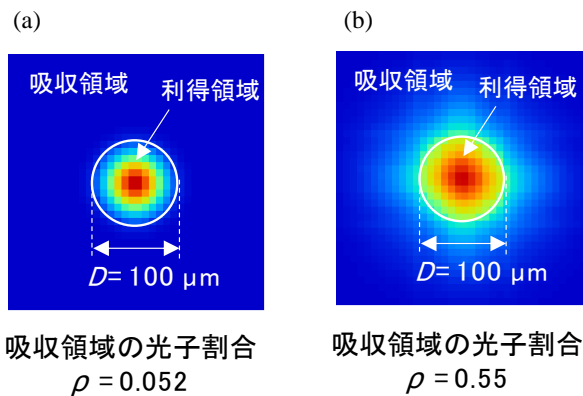
図Ⅲ2-3-1-1. (a) 分割電極 PCSEL 構造の模式図 (b) 自励パルス発振の発生条件 (c) レート方程式による基礎解析結果

(A-2) 面内における光子およびキャリアの空間分布を考慮したパルス発振特性の詳細解析

前節では、短パルス動作を得るための基本方針を示し、フォトニック結晶レーザーの面内で一様なキャリア分布や光分布が存在するとした単純化したモデルで、自励パルス発振の可能性を示した。しかしながら、フォトニック結晶面内の光分布やキャリア分布は考慮されておらず、具体的なデバイス構造における解析を可能とする必要があった。そこで、短パルス動作が期待される、フォトニック結晶レーザー構造を探索し、その解析および定量的な評価を行うために、フォトニック結晶における光結合や光子・キャリアの空間分布をも正確に考慮したパルス発振の解析手法を構築した。 具体的に、フォトニック結晶共振器内の光の状態を記述する 3 次元結合波理論と、キャリア密度の時間変化を表すレート方程式とを融合することを検討した。まず、結合波理論において、PCSEL 内を面内方向に伝搬する基本波の振幅が空間的・時間的に緩やかに変化すると仮定することで、過渡応答の解析をも可能とする時間依存結合波方程式を導出した。 この式と、レート方程式とを連立することで、基本波振幅の空間分布の時間発展が得られ、これにより、フォトニック結晶レーザーの時間軸上での応答が解析可能となり、パルス波形の定量予測が可能となった。

続いて、上記で確立した新たな理論解析手法を利用して、図Ⅲ2-3-1-1(a)に示すフォトニック結晶レーザーの実デバイス構造を考慮しつつ、パルス幅サブナノ秒以下の自励パルス発振を実現

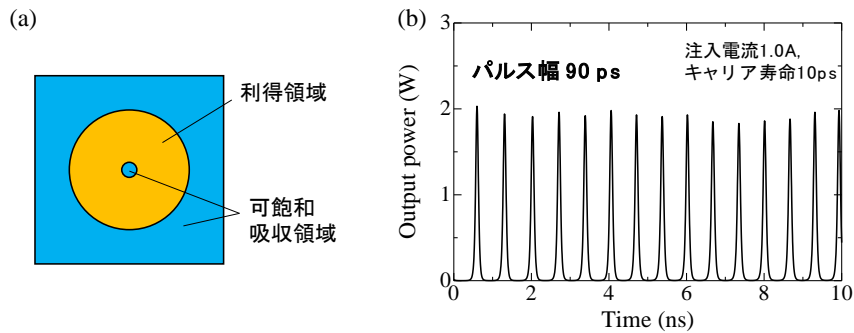
するための具体的なフォトニック結晶構造および電極構造の設計を行った。まず、従来のフォトニック結晶レーザー、すなわち連続動作あるいは 100-200ns 程度のパルス動作を実現していたデバイスにおけるフォトニック結晶構造を用いることを検討した。従来のデバイスにおいては、二等辺三角形形状の空孔が基本格子内に 1 つ配置されたシングルホールフォトニック結晶を用いていた。この構造において、フォトニック結晶共振器内の光の空間分布を計算したところ、フォトニック結晶の回折効果が強すぎるために、図Ⅲ2-3-1-2(a)のように、フォトニック結晶共振器内の光が周辺部の可飽和吸収領域に広がって分布する割合が非常に小さく、そのために、自励的なパルス発振の実現は困難である可能性が見出された。そこで、可飽和吸収領域へと光の分布を広げ、可飽和吸収効果を適切に活用できるように、新たなフォトニック結晶構造の検討を行った。具体的なフォトニック結晶の形状として、単位格子内に 2 つの空孔を 1/4 周期だけ離して配置したダブルホール構造を導入することを検討した。本構造においては、2 つの空孔のそれぞれで 180° 方向に回折される波の位相差が $\lambda/2$ となり、消失性の干渉が引き起こされる。そのため、空間的に面内に光をフィードバックする効果を意図的に抑制することが可能となる。これにより、図Ⅲ2-3-1-2(b)に示すように、光をより大面積に広げることが可能となることを見いだされた。以上により、利得領域で発生した光子を可飽和吸収領域まで分布させて、自励パルス発振を実現するための鍵となるフォトニック結晶構造を得ることに成功した。



図Ⅲ2-3-1-2. 短パルス動作を実現するためのフォトニック結晶構造の検討

(a) 従来のシングルホールフォトニック結晶、(b) ダブルホールフォトニック結晶における共振器面内の光強度分布

このようなダブルホールフォトニック結晶構造を用い、さらに、可飽和吸収効果をより増大させるため、可飽和吸収領域に多くの光子を分布させられる電極構造として、利得領域の中央にも可飽和吸収領域を配置した、図Ⅲ2-3-1-3(a)のようなドーナツ電極構造を採用することを検討した。本電極構造において、可飽和吸収領域のキャリア寿命を 10ps と仮定し、利得領域に電流 1A を注入した際の時間応答を、新たに開発した理論解析法により計算した結果を、図Ⅲ2-3-1-3(b)に示す。同図より、パルス幅 100ps 未満、ピーク出力 2W 程度の自励パルス発振が可能となることが、解析により明らかとなった。以上により、フォトニック結晶における光結合やその空間分布を正確に考慮した解析法を構築するとともに、ダブルホールフォトニック結晶を導入することで、サブナノ秒のパルス幅（100ps 未満）の短パルス発振が実現可能な PCSEL の設計に成功したといえる。



図Ⅲ2-3-1-3. (a)短パルス化のための電極構造の概念図 (b)3次元結合波理論によるパルス波形の計算結果の例

(A-3) デバイス試作、評価系の構築およびサブナノ秒パルス発振の実現

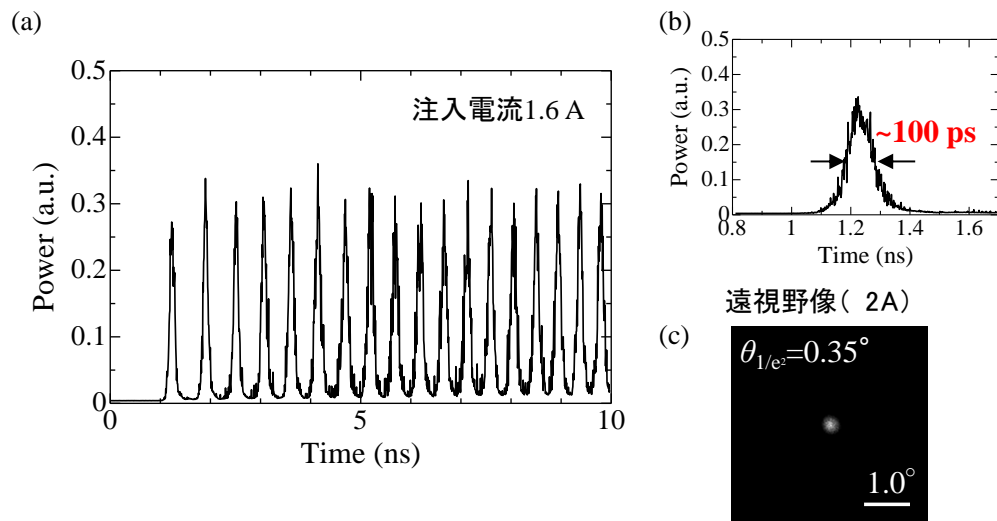
前項で設計を行った短パルス PCSEL の実現に向けて、ダブルホールフォトリック結晶技術を構築し、その有効性を評価するとともに、短パルスデバイスの形成法の検討・試作を行い、駆動・評価系の構築を通じて、短パルス動作の実験評価を行った。

はじめに、面内に光分布を広げることが可能とする、短パルス発振の鍵となるフォトリック結晶構造であるダブルホールフォトリック結晶を有するデバイス技術の開発を行った。電子ビーム露光およびドライエッチングにより、GaAs 系材料にダブルホール構造を形成し、MOCVD 法による埋め込み再成長法を用いて空孔を埋め込み、ダブルホール構造を活性層の近傍に形成する作製法を構築し、大面積コヒーレント動作の実証に成功した。これは、可飽和吸収領域に広く光を分布させる上で、ダブルホールフォトリック結晶が有用であることを示している。

続いて、PCSEL からのサブナノ秒パルス発振の実現を目指し、可飽和吸収領域の形成プロセスの確立と短パルス PCSEL の試作を行い、短パルス駆動・評価系の構築並びに評価を行った。可飽和吸収領域を形成する手法として、電流注入のための p 側の電極（ドーナツ電極）を形成した後に、電極以外の領域に、p クラッド層および活性層まで水素イオンを注入する方法を検討した。ここで、水素イオンを注入した領域では、注入により結晶性が低下するためにキャリア寿命が短くなるとともに、キャリア p 型のドーパントが不活性化して電氣的に絶縁状態となることから、可飽和吸収領域かつ電流のアイソレーションの領域として機能させることができる。評価系としては、PCSEL からの発光をシングルモードファイバに結合させ、その時間応答を、立ち上がり時間 12ps の InGaAs フォトディテクタおよび帯域幅 40GHz のサンプリングオシロスコープにより測定することで、高い時間分解能でパルス動作を測定することが可能な系を構築した。

作製したデバイスに、1.6A の電流を注入し、測定を行った結果を、図Ⅲ2-3-1-4(a), (b)に示す。測定結果より、パルス幅~100ps、繰り返し周波数 2.3GHz の、自励パルス発振動作が実現できている様子が見て取れる。また、上記の測定結果は、可飽和吸収領域のキャリア寿命を 10ps と仮定した計算結果と定性的によく一致することも確認された。さらに、上記デバイスの平均出力から、ピーク出力として~0.5W 以上が得られていると見積もられる。加えて、作製したデバイスにおいて遠視野像を評価した結果、図Ⅲ2-3-1-4(c)に示すように、単峰状のビームが得られており、かつビーム拡がり角が 0.35° 程度と極めて小さいことが明らかとなった。このことから、ビーム品

質 $M^2 < 2$ の、極めて高ビーム品質な状態を維持した動作が実現できたといえる。以上のように、PCSEL から直接的に、高ビーム品質のサブナノ秒パルス発振を得ることに世界で初めて成功した。



図Ⅲ2-3-1-4. 短パルス動作の実現 (a)時間応答波形 (b) 波形の拡大図 (c) 遠視野像

(A-4) 高平均出力・短パルス動作を実現するためのデバイス構造の深化

前節 (A-3) に述べた、サブナノ秒パルス発振の実現により、可飽和吸収効果を用いたフォトニック結晶レーザーの短パルス化指針の有用性が明快なものとなった。そこで、上記の評価結果を受けて、高平均出力の短パルス動作の実現に向けた、デバイス構造の深化についても検討を行った。高い出力を得るためには、可飽和吸収領域への光の分布割合を増加させ、より多数のキャリアを利得領域に蓄積させた後に発振させることが必要となる。そこで、図Ⅲ2-3-1-3(a)のドーナツ電極形状を発展させ、可飽和吸収領域をさらに付加した電極

形状を検討した。様々な形状について探索した結果、可飽和吸収領域のキャリア寿命を実験結果から推定された 10ps を考慮した状態で、4.7A の大電流注入時に、ピーク出力 25W、パルス幅 48ps、平均出力 1W 超の短パルス・高平均出力発振が実現可能なデバイス設計を得ることに成功した。

(A-5) PCSEL の短パルス化のまとめ (中間目標の達成度)

以上、(A-1)の基本指針に基づき、(A-2)から(A-4)に記載した通り、当初の中間目標であった

- ・高平均出力・短パルス動作を実現するための PCSEL 設計法の確立 (A-1、A-2)
- ・短パルス PCSEL の駆動・評価のシステム構築 (A-3)
- ・デバイスの試作・評価 (A-3) および、短パルス PCSEL 実現のための最適なデバイス構造の検討 (A-4)

の全ての項目に関して、2018年5月時点で、前倒しして達成することができた。

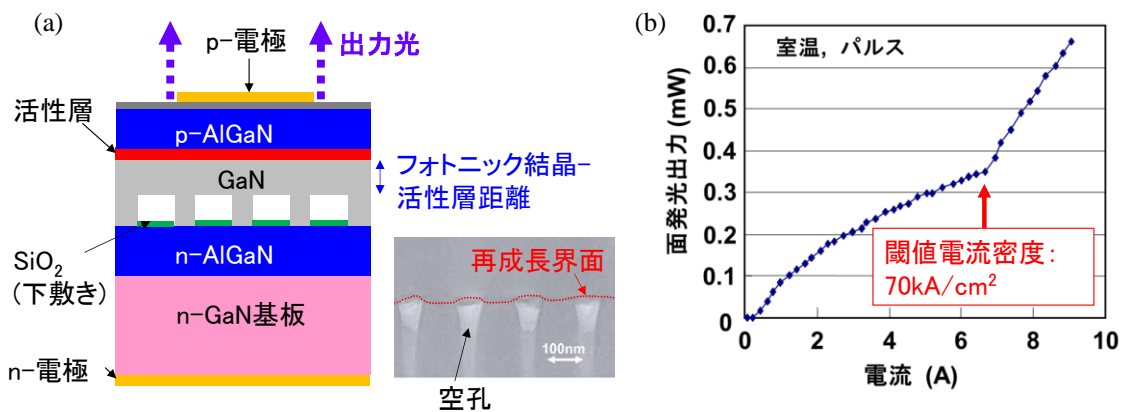
(B) フォトニック結晶レーザー (PCSEL) の短波長化

前項のサブテーマ(A)のPCSELの短パルス化に加えて、青～紫色波長域の高ビーム品質・高出力PCSELが実現すれば、短波長光の直接出射が可能となるため、これまでの加工システムを一新す

る可能性を有している。また、その他にも、照明をはじめとする各種応用にも、新たな道を拓くと期待される。本項目では、本研究の実施者が 2008 年に初期実証に成功していた GaN 系フォトニック結晶レーザー技術（図Ⅲ2-3-1-5）を発展させ、デバイス設計および作製の基礎を築くとともに、これまでの 940~980nm 帯デバイスの知見を適用しつつ進化させ、高ビーム品質でワット級の青~紫色フォトニック結晶レーザー動作を世界に先駆けて実現していくことを目標としている。以下に、これまでの研究開発の成果についてまとめる。

(B-1) 初期 GaN 系フォトニック結晶レーザーの分析、低閾値電流密度・高出力動作に向けた課題の抽出

本研究開発開始前に実現していた初期の GaN 系フォトニック結晶レーザーにおいては、図Ⅲ2-3-1-5 のように、閾値電流密度が $70\text{kA}/\text{cm}^2$ 以上と高く、また、光出力も 1mW 以下と低い状況であり、これらの改善が課題であった。そこで、閾値電流密度ならびに光出力に関して分析を行い、高出力動作に向けた具体的な課題を抽出し、解決指針を構築することから検討を行った。



図Ⅲ2-3-1-5. 本研究開発開始以前に電流注入発振を実証した GaN 系フォトニック結晶レーザーの概要 (a) 全体構造およびフォトニック結晶部分の断面 TEM 像 (b) 電流-光出力特性

まず、閾値電流密度が高い原因について、検討を行った。閾値電流密度が高い一因として、フォトニック結晶共振器の損失が大きいことが考えられる。そこで、GaN 系 PCSEL に対する 3 次元結合波理論を独自に開発し、共振器損失の解析を行った。この結果、1 次元的、2 次元結合係数が、それぞれ、 170cm^{-1} 、 360cm^{-1} (60 度方向) および 500cm^{-1} (120 度方向) であり、この結合係数が不充分であるために、面内漏れ損失が大きく、初期実証デバイス ($100\mu\text{m}$ 角) では面内損失が $\sim 100\text{cm}^{-1}$ と見積もられることが分かった。これに加えて、図Ⅲ2-3-1-5(a) の挿入図に示すように、初期デバイスは、 SiO_2 層を下敷きにして、空孔が埋まらないように成長を行っていたが、このとき、不均一性が大きくなっており、散乱損失の要因となっていたことが予想される。また、再成長界面やその上部の活性層へと Si の不純物が混入したり、界面の乱れにより欠陥が形成したりすることで、吸収損失を増大させる一因となっていたことも考えられる。これらが、共振器損失に加わるため、より大きな損失が生じていた可能性が考えられる。

さらに、出力に関しても検討を行った。初期のデバイスでは、GaN 系材料での PCSEL 動作を実証できる基本構造として、図Ⅲ2-3-1-5(a) のように、n 側には全面に電極を形成し、p 側の電極を部分的に形成することでその部分のみに電流を注入する構造となっていた。しかしながら、この構

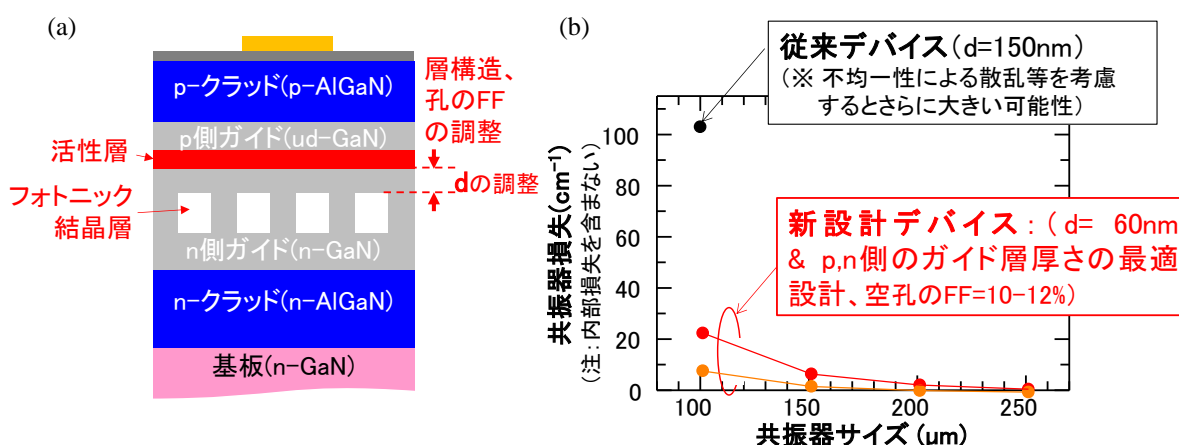
造では、出射光が遮られ、共振器内の光のごく一部のみしか外部に取り出すことができない。このことに加えて、対称性の高い円形の格子点形状であったために、面垂直方向への回折において消失性の干渉を生じ、その結果として回折効果が弱いことも、光出力を制限する要因であった。

以上を踏まえて、(i) 低閾値電流密度化に向けて、(i-a) フォトニック結晶による1次元・2次元回折効果を十分に高めて共振効果を確保し、かつ回折効果に応じたデバイスサイズとすることで共振器損失（面内漏れ損失）を抑制すること、(i-b) SiO₂ 下敷き無しで空孔を形成し、フォトニック結晶の均一性や活性層近傍の品質を向上し、不要な散乱・吸収損失を低減することを検討した。また、(ii) 高出力化に向けては、(ii-a) 出射光を遮らない窓状電極の採用、および (ii-b) 面垂直方向への放射係数の増大のために格子点形状に非対称性を導入すること、を検討した。

以下では、特に、中間時点までの目標である、(i) の低閾値電流密度化に向けた取り組みに関して、詳述する。なお、窓状電極の形成の検討など、高出力化に向けた一部の検討も並行して推進している。

(B-2) 低閾値電流密度化に向けたデバイス設計

本節では、GaN系PCSELのために、940-980nm波長域のフォトニック結晶レーザーで培った解析技術をもとに、独自の3次元結合波理論を開発し、共振器損失を抑制可能なデバイス構造の探索を行った。初期実証のデバイスにおいては、SiO₂下敷きを用いた空孔埋め込み等のプロセス技術に起因して、活性層とフォトニック結晶層の距離（図Ⅲ2-3-1-6(a)）が150nmと大きかったことが、フォトニック結晶効果を低下させ、結果として面内漏れ損失を増加させてしまった一因と考えられる。そこで、フォトニック結晶-活性層間距離の調整を行うとともに、活性層およびフォトニック結晶の両側のガイド層（GaN）の厚さ、さらにはフォトニック結晶空孔の充填率（FF）も併せて調整することで、フォトニック結晶層への光の分布割合を増大させ、それらを総合して、よりフォトニック結晶効果を強めることを検討した。



図Ⅲ2-3-1-6. GaN系PCSELの共振器損失を低減するためのデバイス層構造の設計 (a) 層構造の概要 (b) 共振器損失の解析結果

図Ⅲ2-3-1-6(b)には、フォトニック結晶-活性層間の距離を、初期デバイスの150nmから60nm程度まで近づけ、かつ、ガイド層の厚さをp側、n側ともに微調整した際の、共振器損失（面内漏れ損失）の解析結果を示している。また、その共振器サイズ依存性も併せて示した。なお本解析

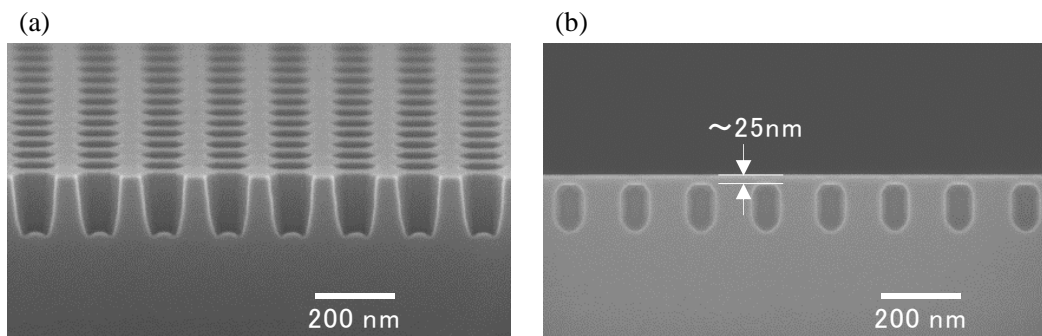
において、フォトニック結晶層の屈折率として、2通りの場合を考慮した。同図の赤線は、フォトニック結晶層が GaN と空気の体積割合から求めた平均的な屈折率の媒質とみなした場合を示している。一方、同図の橙線は、フォトニック結晶層における共振モードの電界分布を考慮して、電界の大きさに重みづけした屈折率を用いた場合である。発振が期待される共振モードにおいては、屈折率の高い GaN に電界が集中するため、平均屈折率よりも、電界で重みづけした屈折率の方が、より大きな値となる。そのため、より強いフォトニック結晶効果が得られ、共振器損失が小さくなる。よって、前者が、損失を多く見積もった場合、後者が損失を小さく見積もった場合に対応することになる。この結果は、GaN 系材料においては、クラッド層 (AlGaIn) と活性層 (InGaIn/GaN 多重量子井戸) の屈折率差が小さいため、フォトニック結晶層の屈折率の若干の変化でも、共振器の面内閉じ込め性能に影響を与えることを示唆しており、今後、実験結果との比較により、どのようなモデルでの解析が妥当か、詳細に検証していく必要があるといえるが、図Ⅲ2-3-1-6(b)の解析結果より、いずれの場合でも、新設計デバイスにおいては共振器損失が、初期のデバイスと比べて大幅に低減できている様子が見て取れる。具体的に、共振器サイズを $\sim 150\mu\text{m}$ 以上としていくことで、従来デバイスと比較して、共振器損失が 1/10 の $\sim 10\text{cm}^{-1}$ 程度以下にまで抑制できる様子が見て取れ、十分に強いフォトニック結晶効果により共振器損失を低減するための、明快的な指針が得られた。

(B-3) フォトニック結晶形成技術・デバイス構造作製法の構築

前項において述べたように、フォトニック結晶と活性層の距離を $\sim 60\text{nm}$ 程度まで近接させることなど、十分なフォトニック結晶効果を得るための重要な指針が得られた。そこで、このようなフォトニック結晶の形成技術の開発を行った。ここで、(B-1)項で述べたように、空孔を MOCVD 成長により形成する際に、従来は、 SiO_2 を空孔の下敷きにしていたが、このことが、構造の不均一や、不純物の混入の要因となっていた。この点を考慮して、本研究開発では、 SiO_2 下敷き無しで、適切な空孔を埋め込む手法について、詳細に検討を行った。

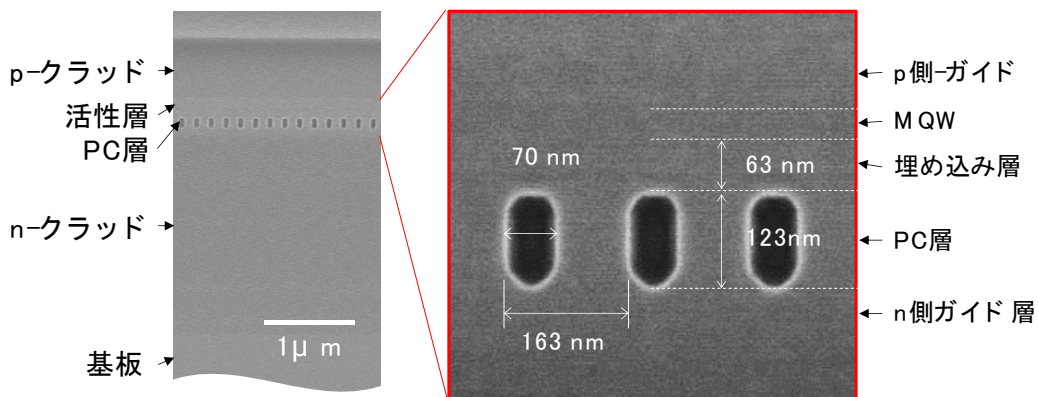
まず、フォトニック結晶構造を、電子ビーム描画およびドライエッチングにより形成する手法について検討を行った。ドライエッチング法としては、誘導結合プラズマを用いた反応性イオンエッチングを用い、ガス種 (Cl_2 , BCl_3) と混合比率、圧力、およびプラズマ生成電力 (ICP 電力) とイオン加速電力 (BIAS 電力) 等のエッチングパラメータを調整することで、図Ⅲ2-3-1-7(a)に示すように、良好な垂直性をもつエッチングを、GaN 系材料に対して大面積で均一に行うことを可能とした。次に、このような構造に対して、空孔を埋め込む手法について、詳細に検討した。この結果、GaN 系材料に特有の横方向へのマスランスポートが生じやすいという特長を活用することで、原料供給 (=結晶成長) を行わずとも、MOCVD 炉内で N_2 雰囲気でのマスランスポートを生じさせるのみで、図Ⅲ2-3-1-7(b)のような空孔の埋め込みを実現することに成功した。これにより、 SiO_2 下敷き無しでフォトニック結晶空孔を形成することが可能となった。この時、空孔の均一性は、非常に良好であった。なお、マスランスポートによる空孔埋め込みにおいて、温度を比較的高温に設定し、横方向へのマスランスポートを優位に生じさせることが、空孔充填率 10 \sim 12%程度の適切なサイズの空孔を形成するためのポイントとなることなど、フォトニック結晶構造形成のための重要な知見をも見出した。さらに、本埋め込み手法において、孔上部に

形成される GaN 層の膜厚は、上述の設計構造を実現するのに十分な薄さにできることも明らかとなった。



図Ⅲ2-3-1-7. SiO₂下敷き無しでのフォトニック結晶空孔埋め込み技術の開発

以上のように、フォトニック結晶空孔の形成法が構築出来たため、引き続いて、空孔上への、フォトニック結晶-活性層間の距離の微調整層 (n-GaN)、活性層 (InGaN/GaN 量子井戸)、p 側のガイド層 (ud-GaN)・電子ブロック層および p-クラッド層 (AlGaIn) の成長について検討を行った。図Ⅲ2-3-1-8 は、図Ⅲ2-3-1-6 の設計と対応するように、フォトニック結晶上に~60nm の GaN 層を成長し、この上に活性層等を成長した結果を示している。マストランスポート後に、H₂ 雰囲気エッチングと成長をバランスさせながら、低成長レートで成長する条件を構築した結果、均一なフォトニック結晶上に狙い通りの膜厚の GaN 層を成長することができ、活性層成長直前の表面において、Ra0.15nm 程度の高い平坦性を得ることに成功した。さらに、この上部に活性層を成長し、フォトルミネッセンス測定を行った結果、フォトニック結晶上の活性層においても、フォトニック結晶を形成しない場合と同等の発光強度および半値幅が得られていることから、フォトニック結晶上であっても良好な活性層が形成できていることが示唆された。



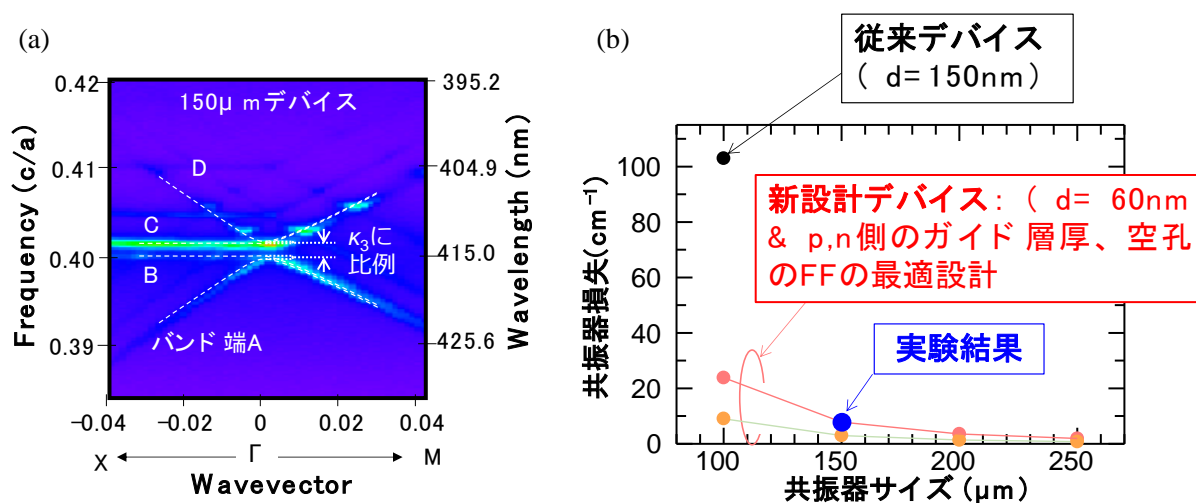
図Ⅲ2-3-1-8. GaN 系 PCSEL の一連のデバイス構造成長後の断面 SEM 像

(B-4) フォトニック結晶効果の評価

以上のように形成したフォトニック結晶の効果を評価するために、フォトニックバンド構造の測定を行った。測定においては、活性層へと電流を注入した状態で、発光 (EL) スペクトルを、角度を変化させながら測定し、角度-波長の対応を、波数-周波数の対応へと変換した。図Ⅲ2-3-1-9(a) は、150 μ m デバイスにおいてバンド構造を測定した結果を示している。同図において、4 つ

のバンド（バンド A, B, C, D）が形成されている様子が見て取れる。ここで、結合波理論より、1次元な結合係数（180度方向の回折効果： κ_3 ）は、バンド端 A, B と C, D の周波数差に比例し、2次元な結合係数（90度方向の回折効果： κ_{2D} ）は、バンド端 A と B の周波数差に比例することが導出できる。これに基づき、実験的な結合係数を評価した結果、1次元結合係数が $\sim 800\text{cm}^{-1}$ 、2次元結合係数が $\sim 100\text{cm}^{-1}$ と見積もられ、図Ⅲ2-3-1-9(b)において、共振器損失は、 10cm^{-1} 以下であると見積もられた。以上より、設計通りに、共振器損失を従来の1/10以下に抑制することに、実験的に成功したといえる。このように、短波長 PCSEL の低閾値電流密度動作の可能性を実証することができた。

今後、本構造を基本として、活性層近傍の成長条件の詰めを並行して実施することで、本研究で実現した強い共振器効果をもつフォトニック結晶を最大限活かすことが可能になると期待される。



図Ⅲ2-3-1-9. フォトニック結晶効果の実験評価 (a) 測定したフォトニックバンド図 (b) 実験的な共振器損失の評価

(B-5) PCSEL の短波長化のまとめ（中間目標の達成度）

以上、(B-1)で述べた初期デバイスにおける課題に対して、特に、低閾値電流密度動作の実現の観点から、(B-2)から(B-4)に記載した通り、研究開発を推進した。これにより、中間目標であった。

- ・ GaN 系 PCSEL の設計及びその深化 (B-2)
- ・ GaN 系 PCSEL の作製のための結晶成長技術の基礎技術を確立 (B-3)
- ・ GaN 系 PCSEL の試作・評価を行い、短波長 PCSEL の可能性を探索 (B-4)

の各項目に関して、ほぼ達成することができた。

(6) 最終目標の達成の見通し

(A) フォトニック結晶レーザーの短パルス化

本サブテーマにおいては、これまで、短パルス動作の実現可能性を明らかにすることを中間目標として研究開発を行い、独自の解析手法を開発して短パルス化実現のための指針を構築すると

ともに、可飽和吸収領域へと広く光強度分布を広げることが可能とするダブルホールフォトリック結晶の有効性を示し、これらにより、100ps 程度の短パルス動作の世界で初めての実現に成功するなど、中間目標を前倒して達成することができた。

今後は、既に得られている、出力増大のための設計に基づき、①デバイス試作と測定結果のフィードバックを行い、分割電極構造を実験的に最適化していくとともに、②高出力動作時の放熱のための実装技術の確立等を推進していく。これにより、最終目標である、「高ビーム品質で、高平均出力・短パルス動作（パルス幅：サブナノ秒、平均出力：数ワット以上）の実現の可能性の実証」が達成できる見通しである。

(B) フォトリック結晶レーザーの短波長化

本サブテーマにおいては、これまで、GaN 系フォトリック結晶レーザーの低閾値電流密度化の可能性を示すことを中間目標として研究開発を推進し、独自の GaN 系フォトリック結晶レーザーの解析技術を開発し、閾値電流密度の低減の核となる共振効果の増大指針を示すとともに、横方向のマストランスポートを活用した SiO₂ 下敷き無しでの空孔埋め込み成長法を構築して、設計指針を満足するように活性層-フォトリック結晶距離を 60nm 程度まで近づけることに成功し、従来と比べて共振器損失を 1/10 以下に抑制し、フォトリック結晶共振効果を最大限に増大することに成功した。これにより、短波長化 PCSEL の低閾値電流密度化の可能性を示し、中間目標をほぼ達成している。

今後は、① 活性層並びにその近傍のガイド層等の品質向上により、得られたフォトリック結晶共振器効果を最大限活かして、低閾値電流密度動作を実現するとともに、②高出力化のために、面垂直方向への取り出し効果を高める格子点設計の深化およびデバイス試作を行うことで、最終目標である、「理論解析・試作・評価により、GaN 系フォトリック結晶レーザーの高度化を進め、高ビーム品質かつワット級の発振の可能性の実証」が達成可能になる見通しである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財権活動の実績および、講演等の成果普及活動については、添付資料の表に記載している。また、フォトリック結晶レーザー技術のより一層の普及のため、2018 年 OPIE にて、フォトリック結晶レーザーの展示およびデモンストレーションを行い、フォトリック結晶レーザーが、小型・コンパクトで、非常に高いビーム品質（レンズ無しでも、ビーム拡がりほとんどない）であり、サブワット級でも物質の燃焼などへの展開が可能であること等を発信し、230 名以上のブース来場者の関心を集めた。オプトロニクス社からもその成果の報道がなされた。

2-3-2. 「高品質 AlN 結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外 LD の研究開発」 (実施先：理化学研究所、山口大学)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

我が国のものづくりにおける最重要ツールであるレーザー加工において、先端素材を用いた高付加価値製品の多品種生産を目指すものづくり業界から、次世代の加工システム用レーザー光源としてレーザーの高出力化、短波長化、短パルス化、ビームの高密度化、小型軽量化、低消費電力化、低コスト化が要望されている。特にレーザー加工の本質を考えた場合、従来と異なる原理に基づいた次世代のレーザー加工技術、すなわち、高い光子エネルギーによるレーザー加工（深紫外・短波長レーザー加工）が重要視されている。次世代レーザー加工システムのコンパクト化・低消費電力化・低コスト化を実現するためには、小型で、高効率、高出力短パルス動作が可能な半導体レーザーダイオード (LD) で現行レーザー光源を置き換えることが要となる。

本研究開発は、直接遷移型半導体の中でバンドギャップが最も大きい窒化アルミニウム (AlN) 半導体を基板材料として用い、その上に窒化アルミニウムガリウム (AlGaIn) 系材料を用いた深紫外高出力 LD を開発することにより、次世代レーザー加工用の高出力 LD 光源を創出することを目的とする。

レーザー加工用・深紫外 LD が開発されれば、レーザー加工以外にも、殺菌・浄水、医療・バイオ産業、高密度光記録、照明、樹脂硬化・形成、印刷・塗装など非常に幅広い応用分野への波及が同時に期待でき、広域な市場開拓により我が国の経済再生への多大な貢献が期待できる。

理化学研究所は、青色 LD が実現された早期から、次世代の AlN 結晶を用いた深紫外発光デバイスの研究に着手し、これまでその開発に於いて長期間にわたり世界をリードしてきた。また、山口大学では、高品質な窒化物結晶基板の作製技術の開拓を先行して行ってきた。両機関でこれまで開拓し培ってきた深紫外デバイス技術を融合して有効に利用しさらに発展させることで、本研究開発で目的とする最短波長領域・深紫外高出力 LD の開発を行う。

AlN 結晶上に AlGaIn 系深紫 LD を作製し、最短波長 (UVB~UVC 波長帯の 260~320nm) の深紫外 LD を実現する。深紫外 LD を実現するために、高品質 AlN 結晶の開発、高い発光効率の実現、高濃度 p 型 AlGaIn クラッド層の開発、電子注入効率の高効率化などの技術開発を行う。また、実用型の長寿命・高出力深紫外 LD を実現するために、AlN 単結晶基板上の深紫外 LD を開発する。

本研究開発期間では、高品質 AlN 結晶基板上で深紫外 LD 素子を開発し未踏の UVB-UVC 深紫外 LD の動作実証を行うと共に、単結晶 AlN 基板を導入し単一素子で 1W 程度の高出力 LD 動作の実証を行う。

(2) 研究開発目標と根拠

AlGaIn 深紫外 LD を実現するためには、高品質 AlN 結晶基板の開発、高い発光効率の実現、高濃度 p 型 AlGaIn の各開発が必要である。本研究では、下記に示す各要素技術開発を行うとともに、UVB~UVC LD の動作を実現し、さらに高出力化を目指した AlN 単結晶基板上の深紫外 LD を開発する。

① サファイア基板上高品質AlN結晶の開発（理研）

深紫外LD開発では、活性層の高い内部量子効率、高濃度p型クラッド層、ならびに素子寿命の向上を実現するために、低い貫通転位密度のAlN結晶テンプレートが要求される。本研究では、これまで用いてきた「アンモニアパルス供給成長法」に加え「高温アニール法」を併用することにより、サファイア基板上の高品質なAlNテンプレートを実現する。これまで理研では、 $1 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ 程度の貫通転位密度を実現している。それに加え「高温アニール法」を併用することで1/5程度の低減が期待できる。したがって、最終的には $2 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度の貫通転位密度の実現を目標とする。

② 加工基板上・高品質AlN結晶の実現（山口大）

山口大学はこれまでの研究で、加工サファイア基板（PSS）上の高品質GaN結晶の開発を行い、青色LEDの高効率化で実績を上げている。さらに、PSS上に高品質な無極性・半極性面GaN基板を作製することに成功している。その技術を用いて、「ストライプ状低転位密度AlN結晶」、「非極性AlN結晶」の開発を行い、深紫外LDの高性能化を試みる。加工基板上のELO（横方向埋め込み成長）を用いることにより、貫通転位密度をストライプに沿って1/10程度に低減することが可能である。低転位化されたストライプ上に共振器を形成することで、素子の高性能化が期待できる。また、非極性基板を用いると、活性層内部のピエゾ電界の低減により、高い発光効率が実現できる。本研究では、ストライプ状低転位密度AlN、ならびに、非極性AlN結晶を実現により、深紫外LDの高性能化の指針を得る。

③ 深紫外の高い内部量子効率の実現（理研）

高品質AlNテンプレートを用いることで深紫外発光層の内部量子効率（IQE）の向上を実現する。これまでの開発において、深紫外量子井戸発光層のIQEは、40%程度が観測された。本研究では、低貫通転移密度AlNテンプレートを用いることで最終的に70%以上のIQEを実現する目標である。また、これまでの深紫外LED開発において、In混入効果による高いIQEが観測されている。InAlGaIn量子井戸の利用で深紫外LDの光利得の向上も期待されるため、その実証を加えて行う。

④ 高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現（理研）

p型AlGaInのホール濃度が低いため、深紫外LDにおいて、レーザー発振にいたるまでの電流注入が困難となる。そのため、p型AlGaInの高ホール濃度化が必要である。本研究では、短周期超格子（SPSL）、縮退ドーピング効果を利用することにより、p型AlGaInの高ホール濃度化を検討する。SPSLを用いることで、見かけ上のアクセプター準位が浅くなり、縦方向のホール伝導特性が改善する。また、アクセプターの原子間隔を近接させた縮退ドーピング効果では、アクセプターの活性化エネルギーの低減により高ホール濃度化が可能と考えられる。さらに、本研究では、MQB（多重量子障壁）を用いて、深紫外LDの電子注入効率（EIE）の向上を行う。EIEは、p型層のホール濃度が低く、さらに高電流注入を行った場合、低下は顕著であるため、より高いバリア高さを持つ電子ブロック層の導入が必要となる。MQBの利用はEIEの向上に大きな効果があると考えられる。p型層の低抵抗化とMQBの導入を行うことで、実際の深紫外LDで必要とされる 5KA/cm^2 程度の電流注入密度と60%程度のEIEを実現する。

⑤ UVB～UVC領域深紫外LDの実現（理研）

上記で開発したエピウェファァーを用い、LDデバイス加工、ならびに、ステルスダイシングを用いたレーザー共振器作製により深紫外LDを試作し、その動作実証を行う。現在報告されている深

紫外LDの最短波長は326nmであり、GaNテンプレート上に作製されたものである。本研究課題では、AIN基板上に開発を行っているため、より短波長の実現が期待できる。はじめに、UVA～UVB領域の動作実証を行い、続いて、UVC領域の波長260～280nmの深紫外LDの実現を目指す。UVB～UVC領域の深紫外LDで200mW程度の出力動作を目標とする。

⑥AIN単結晶基板上高出力深紫外LDの実現（理研）

AINテンプレート上での深紫外LD動作実証により得られた知見を基に、単結晶AIN基板上に深紫外LDを試作し、高出力動作の実証を行う。単結晶AIN基板を用いることで、光利得の改善とホール濃度の高濃度化による注入効率の改善、動作電圧の低減、及び、素子加熱抑制による高出力、低閾値動作が期待される。最終年度までにUVA～UVCの各LD素子で高出力化を行い1W程度の高出力動作の実証を目指す。

表Ⅲ2-3-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
高品質 AIN 結晶の実現（理研）	貫通転移密度 $2 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$	高温アニール効果で 1/5 程度に低減可能	貫通転移密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$	効果の最適化に時間を要するため
加工基板上高品質 AIN（山口大）	ストライプ状低転位 AIN（貫通転移密度 $7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ ） 加工基板上非極性 AIN 結晶の実現	ELO 成長で 1 桁程度の転位低減が可能	ストライプ状低転位 AIN 結晶の実現	加工基板を用いた非極性 AIN 結晶は新規内容で開発に時間を要するため
高 IQE の実現（理研）	IQE70-80%	貫通転位密度 $2 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ で IQE 75%程度が可能	IQE60%程度	貫通転位密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ で IQE 60%程度が可能
高濃度 p 型 AlGaIn と高 EIE の実現（理研）	注入電流密度 5KA/cm^2 、EIE 60%程度の実現	LD 発振に向け必要である。p 型高濃度化と MQB 利用で可能と推察	注入電流密度 2KA/cm^2 程度の実現	MQB の構造最適化に要する時間を考慮
UVB-UVC 領域 LD の実現（理研）	UVB-UVC LD の動作実証とピーク出力 200mW 程度 単結晶基板上 LD でピーク出力 1W 程度の実現	後半 2 年での短波長化と高出力化を考慮	UVA-UVB LD の動作実証	IQE、高濃度 p 型 AlGaIn、単結晶 AIN 上 LD 開発の時間を考慮

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-3-2-2 深紫外 LD 開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
高品質 AlN 結晶の実現（理研）	成長装置建設と AlN 成長条件の最適化	高温アニール効果の実証	貫通転移密度 5×10 ⁸ cm ⁻²		貫通転移密度 2×10 ⁸ cm ⁻²	貫通転移密度 2×10 ⁸ cm ⁻²
加工基板上高品質 AlN（山口大）	加工構造形状等の検討	平坦性製膜条件の検討	ストライプ状低転位 AlN 結晶の実現	加工基板上非極性 AlN 結晶の検討	加工基板上非極性 AlN 結晶の実現	ストライプ状低転位 AlN（貫通転移密度 7×10 ⁷ cm ⁻² ） 加工基板上非極性 AlN 結晶の実現
高 IQE の実現（理研）	活性層製膜条件の検討	IQE 測定方法の確立	IQE60%程度	IQE70%程度	IQE80%程度	IQE70-80%
高濃度 p 型 AlGaIn と高 EIE の実現（理研）	p 型成長条件の検討	超格子効果の発現	注入電流密度 2KA/cm ² 程度の実現	縮退ドーピング効果の発現と MQB による EIE 向上の実現	注入電流密度 5KA/cm ² 、 EIE 60%程度の実現	注入電流密度 5KA/cm ² 、 EIE 60%程度の実現
UVB-UVC 領域 LD の実現（理研）	LD 作製方法の確立と測定器の立ち上げ	レーザー共振器形成と LD 試作	UVA-UVB LD の動作実証	UVB-UVC LD の動作実証 単結晶基板上 LD の試作	UVB-UVC LD で出力 200mW の実現、単結晶基板上 LD でピーク出力 1W 程度の実現	UVB-UVC LD の動作実証とピーク出力 200mW 程度 単結晶基板上 LD でピーク出力 1W 程度の実現

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。以下、各項目について説明する。

① サファイア基板上高品質 AlN 結晶の開発

高品質 AlN 結晶成長用の MOCVD を構築し、AlN 結晶成長条件の最適化を行い、サファイア基板

上高品質AIN製膜を行った。高温アニール装置も導入し、アニール条件の最適化によるAIN高品質化を行った。その結果、貫通転移密度の低減を観測し、 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度のAINを実現しており、ほぼ中間目標を達成した。

②加工基板上・高品質AIN結晶の実現

加工基板の形状の検討、ならびに、ストライプ加工基板上AIN結晶の製膜を行い、平坦埋め込み条件を確定し、その製膜に成功した。したがって、中間目標を達成した。

③深紫外の高い内部量子効率の実現

フォトルミネッセンス（PL）の励起強度依存性と温度依存性からIQEを厳密に測定する手法を用いIQE測定を行った。IQEは、当初39%が得られ、その後AINテンプレートと量子井戸の成長条件の最適化を行うことにより51%が観測された。今後、高温アニール法を用いたAINの高品質化によりAINの貫通転移密度を低減することにより、中間目標のIQE60%を達成の見通しである。

④高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現

深紫外LD構造を作製し、注入電流密度 1.5KA/cm^2 を実現した。しかし、電子注入効率（EIE）の大幅な低下が見られた。深紫外LDのp型クラッドを、短周期超格子（SPSL）を用いて作製し、注入がある程度の高効率で行えることを実証した。SPSLを用いて 0.8KA/cm^2 程度の注入を実現した。今後、SPSL、MQB構造のさらなる最適化と縮退ドーピング効果の適用により、最終目標である、 5KA/cm^2 程度の電流注入と60%程度のEIEを、達成の見通しである。

⑤⑥UVB～UVC領域深紫外LDの実現

LDデバイス加工、ならびに、ステルスダイシングを用いたレーザー共振器作製により深紫外LDの試作を現在行っている。p型AlGaInクラッド層の製膜条件と膜厚、MQBの最適化を行う事により、中間目標であるUVA-UVB LDの動作実証を2018年10月ころに達成の見込みである。研究ではさらに、AIN単結晶基板上へのAINならびにAlGaInバッファの製膜を開始した。

表Ⅲ2-3-2-3 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
高品質 AIN 結晶の実現（理研）	貫通転移密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$	貫通転移密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度を実現	○	貫通転移密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度を実現する
加工基板上高品質 AIN（山口大）	ストライプ状低転位 AIN 結晶の実現	ストライプ状低転位 AIN 結晶の実現	○	ストライプ状 AIN で貫通転移密度 $7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ を実現、加工基板上非極性 AIN 結晶の実現
高 IQE の実現（理研）	IQE60%程度	IQE の厳密測定の実施、IQE51%を観測	△	AIN 貫通転移の低減による IQE の 70% 以上への向上
高濃度 p 型 AlGaIn と高 EIE の実現（理研）	注入電流密度 2KA/cm^2 程度の実現	超格子による p 型低抵抗化を観測、電流密度	△	超格子効果と MQB の最適化で注入電流密度 5KA/cm^2 、EIE

		1.5KA/cm ² 程度の 実現		60%程度を実現する
UVB-UVC 領域 LD の実現（理研）	UVA-UVB LD の動 作実証	UVB-UVC LD の作 製プロセスを確立 し試作を行った。 発振動作は 2018 年 10 月ごろ達成の見 込みである	△	IQE 向上と p 型の低 抵抗化、及び UVB- UVC LD の試作によ る動作実証 単結晶基板上 LD の 試作

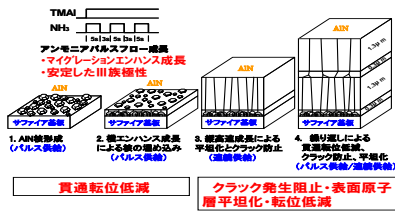
（５）成果の詳細

①サファイア基板上高品質 AlN 結晶の開発

2016-2017年度に、高品質AlN結晶成長用のMOCVDを構築し、その後、AlN結晶成長条件の最適化を行い、サファイア基板上高品質AlN製膜を行った。さらに、高温アニール装置を導入し、アニール条件の最適化によるAlN高品質化を行った。図Ⅲ2-3-2-1に、「アンモニアパルス成長法」と「高温アニール法」を併用して用いた、サファイア基板上AlNの高品質化の概念を示す。サファイア基板上に「アンモニアパルス成長法」を用いて厚さ300nmのAlNを製膜後、1740℃で3時間アニールを行い、その後さらにMOCVD法を用いて厚さ2μmのAlNを製膜した。図Ⅲ2-3-2-2に、はじめに製膜した300nm厚AlN結晶のX線回折の結果を、アニール前後において比較する。X線半値幅は、(002) 反射で296から64arcsecへ、(102) 反射で1840から703arcsecへ低減しており、結晶の明らかな改善が見られた。高温アニールを行った後さらに2μm厚のAlNを成長した結果、(102) の半値幅は308arcsecが得られ、従来法の1回成長のバッファー（380arcsec）よりも低い値が得られた。X線回折の半値幅から、刃状転位密度は従来の $1 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ よりも低減し $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度が得られた。

図Ⅲ2-3-2-3に、従来の1回成長AlNと、高温アニール法AlN結晶バッファー上に作製したUVC-LEDの動作特性の比較を示す。通常バッファーではAlNをサファイア基板上に4μm製膜している。UVC-LEDの比較を行った結果、ほぼ同じ値の外部量子効率（EQE）が得られた。高温アニール法ではトータル膜厚が2.3μmと薄いにも関わらず、同等の効率で発光が観測されたことから、薄膜で高品質AlNが得られることが分かった。今後は、アニール条件と再成長条件をさらに最適化することにより、より低い貫通転移密度が得られると考えられ、IQEのさらなる改善が期待される。

●アンモニアバルス供給多段成長法



●高温アニール
+ 1750°C、3h
(結晶再配列)

●AlN再成長
+ 2~4 μm
1280°C

サファイア上高品質AlN

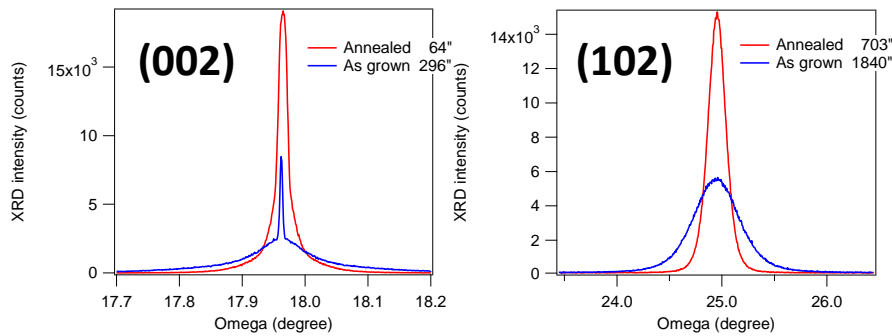


貫通転位密度 $1 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$

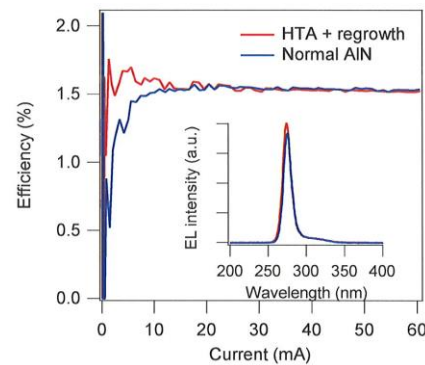
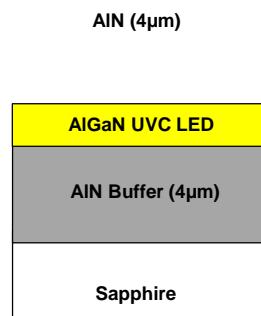
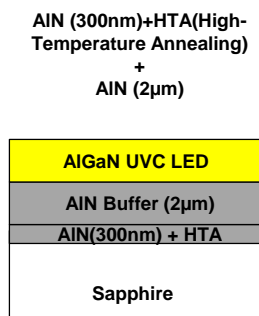
⇒ 転移低減

転位密度(目標) $2 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$

図Ⅲ2-3-2-1 「高温アニール法」を用いたサファイア基板上AlNの高品質結晶製膜の概念



図Ⅲ2-3-2-2 1段階成長AlN結晶のアニール前とアニール後のX線回折半値幅の比較

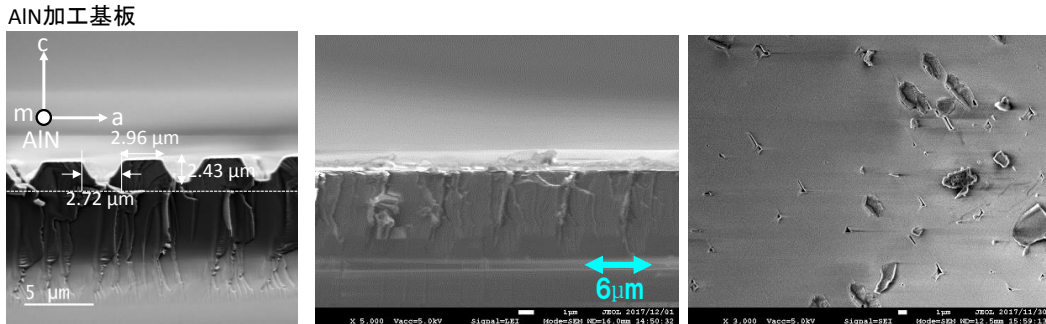


図Ⅲ2-3-2-3 従来の1回成長AlNと、高温アニール法AlN結晶上に作製したUVC-LEDの動作特性の比較

② 加工基板上・高品質AlN結晶の実現

深紫外LD用に低貫通転移密度バッファを供給するために、「ストライプ状低転位密度AlN結晶」の開発を行った。サファイア基板、もしくは、サファイア/AlNテンプレートに、ドライエッチングを用いて幅6μmのストライプ加工を施し、その上にAlNを再成長した。ELO (Epitaxial Lateral Over-growth: 横方向埋め込み成長) を用いて平坦なAlNバッファを形成した。図Ⅲ2-3-2-4に、ストライプ加工を行ったサファイア/AlNテンプレート、AlN埋め込み成長後の断面、及び表面電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。AlNテンプレート上に深さ2μm程度のV字状のストライプが形成され、その上に厚さ15μmのAlNを製膜することにより、平坦に埋め込まれていることが分かる。今回は、ストライプのエッチング深さが足りなかったため、埋め込み成長の際にポイドが形

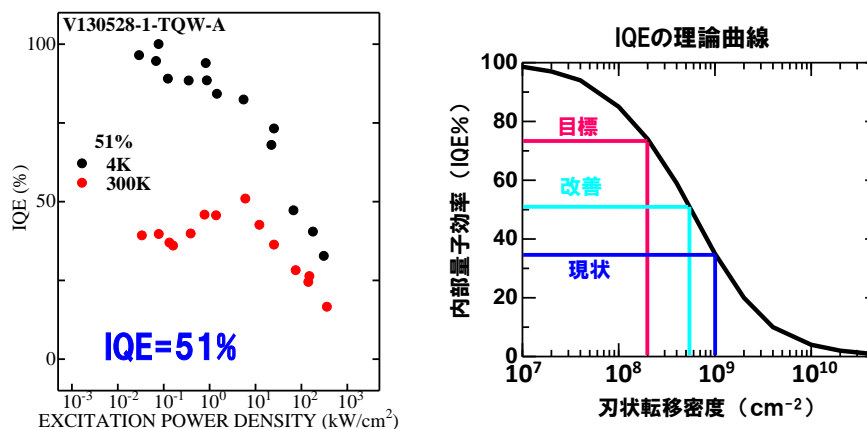
成されなかった。本来は、深溝を掘りその上に再成長することにより、ボイドが形成され、ELO成長によって貫通転移密度の顕著な低減が期待できる。今後は、深紫外LDの共振器幅（ $10\mu\text{m}$ ）を考え、周期が $15\mu\text{m}$ 以上の幅広ストライプを用いた埋め込み成長を行う予定である。



図Ⅲ2-3-2-4 加工基板上再成長AIN：ストライプ加工後、AIN埋込み成長後の断面、及び表面SEM写真

③ 深紫外の高い内部量子効率の実現

フォトルミネッセンス（PL）の励起強度依存性と温度依存性を用いて、UVC（280nm）発光AlGaIn量子井戸のIQE測定を厳密に行った。PL測定の励起強度を $1\sim 10^6\text{W}/\text{cm}^2$ まで6桁変化させ、低温（4K）と室温（300K）においてその強度を比較した。低温で比較的弱励起の時に得られた発光効率を1と仮定し、室温における発光効率を求め、IQEを算定した。IQEは、当初60%程度と予測していたが、上記の厳密測定法では意外に低く、はじめの測定では39%が観測された。その後、AINテンプレートとAlGaIn量子井戸の成長条件の最適化を行うことにより、IQE51%が観測された。貫通転移密度とIQEの関係予測から得られる値（ $5\times 10^8\text{cm}^{-2}$ で約50%）とほぼ一致したことから、測定は信頼性が高く、今後、貫通転移密度を $2\times 10^8\text{cm}^{-2}$ に低減すれば、70%以上の高IQEが得られると考えられる。高温アニール法を用いたAINの高品質化により、貫通転移の低減が可能となれば高いIQEの実現が可能と考えられる。



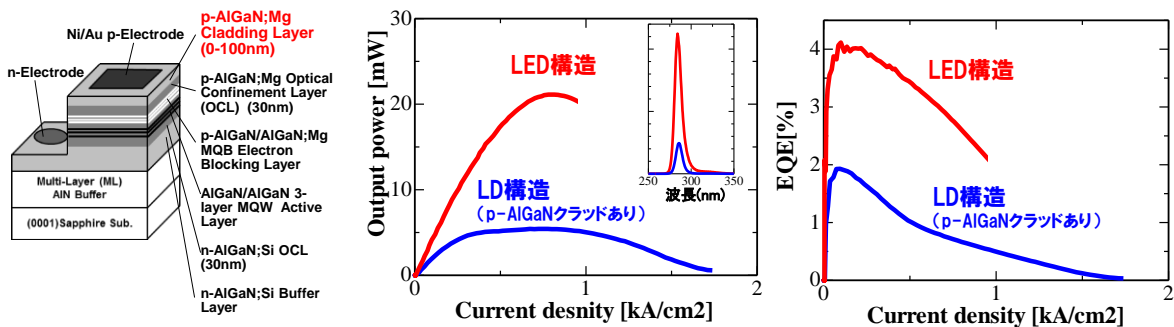
図Ⅲ2-3-2-5、AlGaIn量子井戸のPL強度の励起強度および温度依存性、及び、IQEと貫通転移密度の関係

(C) 高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現

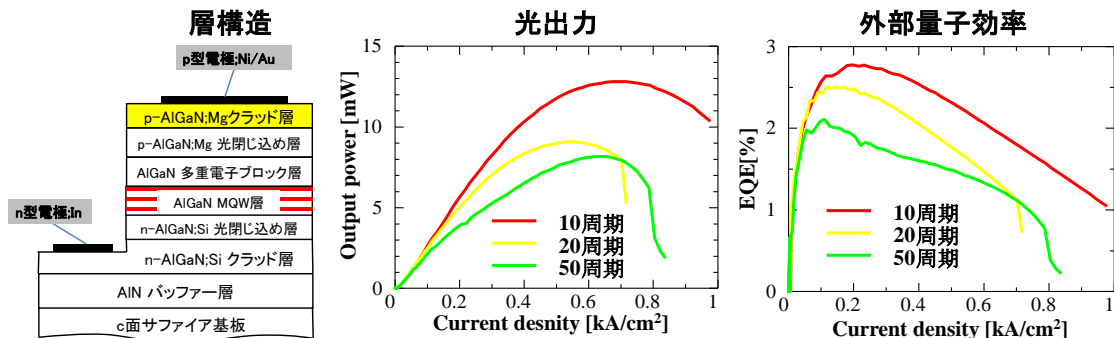
p型AlGaInクラッドを通したキャリア注入効果を観測するために、深紫外LD構造で共振器を形

成する前の段階で、LEDとしての電流-光出力（I-L）特性を評価した。図Ⅲ2-3-2-6に、p-AlGaInクラッド層の評価に用いた深紫外LED構造と、観測されたI-Lおよび、電流-外部量子効率（I-EQE）特性を示す。p型クラッド層が無い通常の深紫外LEDでは、EQEが4%なのに対し、p型クラッドを有するLD構造では効率が1/3程度に低減していることが分かる。これは、高抵抗のp型AlGaInクラッドを挿入することにより電子注入効率（EIE）が低下しているためである。クラッドがある場合でも、p型のMgドープ量などを最適化することにより、 1.5KAcm^{-2} 程度の電流注入が実現できることが分かった。

図Ⅲ2-3-2-7に、p型クラッドにAlGaIn短周期超格子（SPSL）を用いた時の、同様の測定結果を示す。SPSLとして2nm/4nmのp型AlGaIn超格子層を用いた。SPSLを用いることにより、注入効率は改善し、LD発振に必要な膜厚300nm（50周期）のクラッドを挿入した場合は、 0.8KAcm^{-2} 程度の電流注入が可能であることが分かった。今後は、MQBの最適化を行い、 5KAcm^{-2} 程度の電流注入とEIEの向上を実現する予定である。



図Ⅲ2-3-2-6 p-AlGaInクラッド層の評価に用いた深紫外LED構造とI-L、及びI-EQE特性



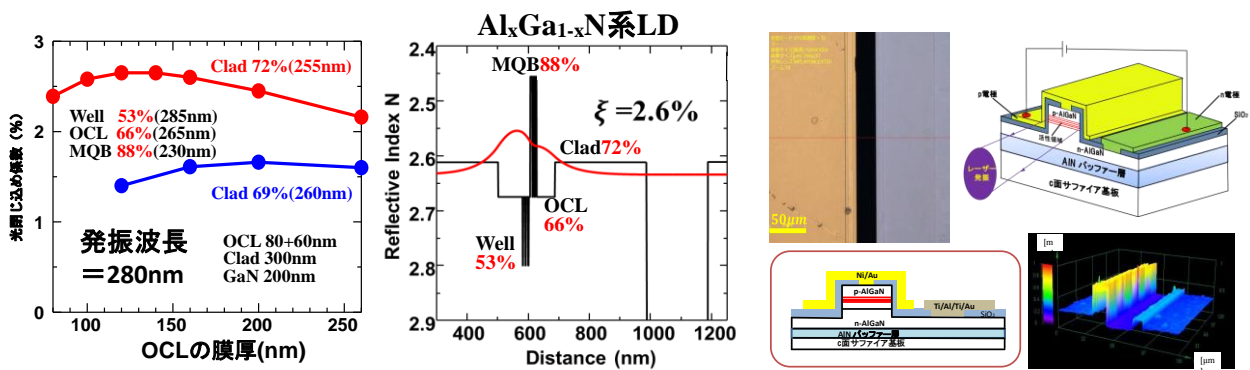
図Ⅲ2-3-2-7 p型クラッドにAlGaIn SPSLを用いた深紫外LED構造のI-L、及びI-EQE特性

(D) ⑥UVB～UVC領域深紫外LDの実現

深紫外LDの導波路に関する最適構造設計を行った。p型AlGaInクラッド層のホール濃度が低いために、高い電流注入を行うためには、クラッド層をできるだけ薄く設計する必要がある。一方、クラッド層を薄くすると、光閉じ込めが弱くなり、フィールド漏れによる金属層への光吸収の効果で、導波路ロスが急激に上昇する。この2つの効果はトレードオフの関係にあり、p型クラッド層厚を最適に設計する必要がある。解析の結果フィールドの漏れが生じないためには、クラッド

膜厚は300nmが必要であることが分かった。クラッド膜厚を300nmに固定し、光閉じ込め係数が最高値になる光閉じ込め層の層厚は、150~200nmであることが分かった。

設計に基づいて深紫外LD構造を製膜し、さらに、LDデバイス加工、ステルスダイシングを用いたレーザー共振器の作製を行い、深紫外LDの試作を行った。現在、UVB発光層の高IQEの実現、p型AlGaInの高ホール濃度化とMQBの最適化によるEIEの向上を行うことにより、複数の深紫外LDを試作し、レーザー発振を試みている状況である。



図Ⅲ2-3-2-8 AlGaIn量子井戸深紫外LDの導波路設計例と作製例

(6) 最終目標の達成の見通し

① サファイア基板上高品質AlN結晶の開発

中間目標値である、 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度のAlN結晶はすでに達成した。今後、高温アニール法の最適化により、 $2 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 程度の最終目標は達成の見通しである。

② 加工基板上・高品質AlN結晶の実現

中間目標のストライプ加工基板上AlN結晶の平坦成長は達成した。今後、ストライプ構造を適切に設計することで、最終目標の $7 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 程度の貫通転移密度は達成の見通しである。また、加工非極性基板上にAlNを製膜し、結晶を平坦に結合させる手法を用いて、非極性AlN結晶テンプレートの実現も達成の見通しである。

③ 深紫外の高い内部量子効率の実現

中間目標であるIQE60%程度は、高温アニール法による低転位AlNバッファを後いることで、達成する見通しを得ている。最終目標であるIQE80%程度の実現は、高温アニール法の最適化とストライプ状低転位AlNバッファを用いることで達成の見通しである。

④ 高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現

中間目標である注入電流密度 2KA/cm^2 の実現はSPSLの構造最適化により、達成する見通しを得ている。最終目標である 5KA/cm^2 程度の注入と60%程度のEIEの実現は、縮退ドーピング効果の発現とMQB電子ブロック層の最適化を行うことにより、達成の見通しである。

⑤⑥ UVB~UVC領域深紫外LDの実現

中間目標である、UVA-UVB LDの動作実証は、UVB発光層の高IQE化、p型AlGaInの高ホール濃度化とMQBの最適化を行う事により、達成の見通しである。最終目標である、UVB-UVC LDの

200mW出力動作の実現は、さらなる高IQE化、縮退ドープ効果の適用とMQBの最適化によるEIEの向上により、達成の見通しである。また、それらの技術を用いてAlN単結晶基板上に深紫外LDを作製することで、最終目標である1W程度ピーク出力の実現を、達成の見通しである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-3-3. 「高効率加工用 GaN 系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」(実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社)

(1) 事業の背景・意義(目的・概要)

GaN 系高出力・高ビーム品質半導体レーザー技術の開発については、多くの被加工物で光吸収が高くなる短波長領域での発振が可能な GaN 系半導体を用い、レーザー加工に使用可能な高出力性と高ビーム品質性を兼ね備えた発振器を実現することを目指す。

近年、プラグインハイブリッドカー(PHV)の開発が盛んに行われ、一部のメーカーからは市場投入が始まっている。EV、PHV が市場拡大する上でポイントとなることは、ガソリン車並みの長距離走行である。そのキーとなる技術は、リチウムイオン電池と車体材料である。リチウムイオン電池は、長距離走行を可能にする大容量性を確保するため、数百～数千も搭載される。また、長距離走行のためには、車の軽量化が必要であり、軽量性と強靱性を両立する炭素繊維材が注目されている。リチウムイオン電池を大量に用いることに対応するためには、高い生産性を有する工程が重要である。現在の主流は金型を用いた切断であるが、金型の磨耗を気にすることなく、また、リチウムイオン電池の多品種化に対応するためには、レーザー加工が望まれている。また、炭素繊維材の代表である CFRP は炭素繊維と樹脂を入れ込むことで構成されている。炭素繊維と樹脂は融点が大きく異なるため、適切な切断面や加工速度を有するレーザー加工技術は確立されていない。このため、炭素繊維や樹脂を同時に切断できる新手法が求められている。

一方、レーザー加工用光源として、効率などの点から DDL(Direct Diode Laser)が注目を浴びており、既に GaAs 系半導体レーザーを用いた赤外 DDL が市販されている。しかし、ほとんどの金属や CFRP は波長が短いほど光吸収が大きくなるので、高効率加工には短波長レーザー光が望ましい。このため、一般式 $Ga_{1-x-y}Al_xIn_yN$ ($0 \leq x, y \leq 1$) で示される GaN 系半導体を用いる必要がある。一方、切断等の応用において、レーザービームの品質が加工品質に直結することが知られている。しかし、半導体レーザーの共振器は他のレーザー装置に比べて数桁も小さく、単一の素子で加工に必要な出力を得ることは困難である。このため、従来の加工用半導体レーザーは、レーザービームの品質を犠牲にし、更に、多数の素子からのレーザービームを合成する手法によって、光出力の増大を図ってきた。このため、一般には DDL はビーム品質が悪いという常識があった。

以上を背景に、本研究開発項目では、短波長帯で加工に使用可能な高光出力性と高ビーム品質性を有する GaN 系 DDL を実現することを目的とする。これにより、省エネルギーな方法で、高品質な EV/PHV を製造可能とし、次々世代ものづくり技術の構築に貢献する。

(2) 研究開発目標と根拠

我々は、これまで単一のエミッタから 7W出力の GaN 系半導体レーザーを実現したことを報告している。これをレーザー加工に用いるためには、キロワット (kW) 級の出力であること、並びに、ビーム合成時に高ビーム品質であることが求められる。よって本テーマの開発目標を以下に定めた。

表Ⅲ2-3-3-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
GaN レーザー アレイ素子	出力 \geq 80W (高ビーム品質化 機構を内蔵)	発振器の最終性能 から逆算して目標 を設定。	・出力 \geq 80W ・高ビーム品質化 機構の設計完了	左記最終目標とな る性能を、出力に 関わる内容と、 ビーム品質に関わ る内容に分離して 設定。
ビームツイスター ユニット (BTU)	GaN アレイ素子の 高ビーム品質化機 構に対応。	同上	GaN 発振波長帯に 対応	GaN レーザービー ム合成時のビーム 品質劣化を抑制。
モジュール	GaN アレイ素子の 高ビーム品質化機 構に対応。	同上	GaN レーザーアレ イモジュールの完 成	発振器に含まれる 光源の技術確立。
発振器	出力 \sim kW 級 (横 モード制御機能を 内蔵)	レーザー加工に必 要な性能を得る。	—	—
加工応用	潜在応用の明確 化。	本発振器の応用展 開性を示す。	—	—

上記の目標設定根拠は、以下の目論見によって求めることができる。

■発振器構成

発振器の内部には、光ビーム合成時におけるビーム品質低下を抑制する波長合成方式を有する単体発振器が多数存在する。各単体発振器内には、GaN レーザーアレイで構成されたモジュールが複数ある。モジュールからのレーザー光は波長合成法により 1 本のレーザービームとして、単体発振器から出力される。各単体発振器からのレーザービームは空間合成法により 1 本のレーザービームになる。その偏光方向が直交する二系統 (s 波、p 波) を用意し、偏波合成法により 1 本の最終出力にさせる。

■出力に関わる目標値について

金属の吸収が短波長帯で 10 倍程度大きくなるため、本発振器では 1kW の出力で加工応用が可能と考えられる。従って、波長/空間/偏波合成の効率を β_w 、 β_s 、 β_p 、波長/空間合成を N_w 、 N_s とした時、レーザーアレイ出力 P_a 、BTU の結合効率 η 、単体発振器出力 P_t とすれば、

$$P_t \times (\text{空間合成 } N_s \times \beta_s) \times (\text{偏波合成数 } 2 \times \beta_p) \geq 1\text{kW}$$

が必要である。ここで

$$P_t = P_a \times \eta \times (\text{波長合成 } N_w \times \beta_w)$$

である。この関係において、各パラメータの数値を適切な値に設定することで、目標値としてレーザーアレイ出力 $P_a \geq 80\text{W}$ を設定した。

(3) 研究開発スケジュール

2016～2018 年度は、各要素技術の検討を行う。2019～2020 年度は各要素技術を統合し、発振器として完成させる。またその応用評価を行い、GaN 系レーザー加工の潜在力を明確化させる。そのスケジュールを下記に示す。

表Ⅲ2-3-3-2 研究開発項目③-3 開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
GaN 系レーザーアレイ素子	エミッタアレイ技術			アレイ構造に一体化	目標性能確認	出力 $\geq 80\text{W}$ (高ビーム品質化機構を内蔵)
	基本設計	動作確認	80W 動作			
	高ビーム品質化 要素技術					
	—	設計パラメータ抽出	設計検証			
BTU	—	GaN 用高精度 BTU 技術		素子要素技術対応		GaN アレイ素子の高ビーム品質化機構に対応
		設計	試作実証	設計	試作実証	
モジュール	GaN 用金属両面放熱技術			低熱抵抗化		
	基本設計	動作確認	BTU 集積	設計	試作実証	
発振器	—	—	—	光波合成基盤技術		出力 $\sim \text{kW}$ 級 (高ビーム品質化機構を内蔵)
				基本設計	目標性能確認	
加工応用	—	—	—	モジュール評価	応用評価	潜在応用の明確化

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を下表に示す。GaN 系レーザーアレイ素子は 100W を超える出力が得られており、中間目標を達成している。一方、GaN 系レーザーアレイ素子の高ビーム品質化技術については、設計パラメータを抽出し、目標性能を得るための構造因子を明らかにした段階で、試作

による実証が今後の課題である。BTUについては、GaN 発振波長帯での設計を完了し、設計上は所望の性能が得られた。その設計に基づく BTU 試作を進めており、BTU 単体およびモジュール結合後の特性評価が課題である。

表Ⅲ2-3-3-3 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
GaN 系レーザー アレイ素子	出力 \geq 80W	出力 \geq 100W	◎	高ビーム品質化 機構の集積
	高ビーム品質化の 設計手法を確立	設計パラメータ 抽出を完了	△	試作による実証
BTU	GaN 発振波長帯 に対応	設計完了	△	試作による実証
モジュール	GaN レーザーアレイ 素子に対応	設計完了	△	試作による実証

達成度

◎：目標を大きく上回って達成している、または、前倒しで達成できている

○：達成している、または、ほぼ達成している

△：部分達成している、または、主要な部分で進展があったため、達成見込みがある、

×：未達である、または、不十分である

(5) 成果の詳細

(a) GaN 系レーザーアレイ素子

a-1) 出力 \geq 80Wの取り組み

今回の加工用レーザーでは、400nm 帯 GaN 系レーザーエミッタを多数同一基板に集積したアレイ素子を用いる。エミッタ幅（リッジ幅）は高次モードが許容される値になっている。このように幅が広いエミッタの最大出力は、端面破壊ではなく、エミッタ内発熱が起因の接合温度上昇による熱飽和で律速される。この熱飽和は、投入電力 \rightarrow 光出力/無効電力発生 \rightarrow 熱抵抗による発熱 \rightarrow 利得減少 \rightarrow 光出力低下/無効電力増加なる正帰還に起因する。この帰還において、下記3つの構造パラメータが影響する。

- ①共振器長・・・光出力（レーザー閾値、発光効率）、熱抵抗に影響
- ②エミッタ間隔・・・各エミッタ間の熱干渉に影響
- ③エミッタ幅・・・光出力（光密度）、熱抵抗に影響

そこで、光出力の上記構造パラメータ依存性を調べ、80W 動に必要な設計を完了させた。この設計に基づく GaN 系レーザー素子の試作を行った結果、発振波長約 405nm、温度 25°C、連続動作において、目標性能 80W を大きく上回る最大光出力 101W が得られた（特性の詳細は「(c) GaN 系レーザーモジュール」で示す）。

a-2) 高ビーム品質化の取り組み

横モード制御および発光点位置湾曲（通称スマイル）の抑制に関わる設計を行った。

平成 30 年度に試作検証を行い、設計を完成させる。

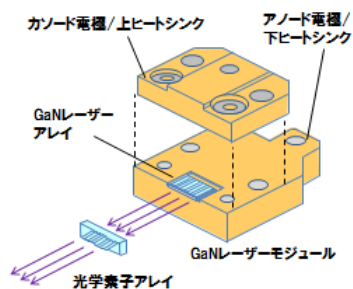
(b) GaN 系レーザーアレイ用ビームツイスターユニット

GaN 系発振波長帯に適用するビームツイスターユニット (BTU) の設計に着手した。BTU は Fast 軸コリメートレンズとビームツイスターレンズで構成される。アレイからのビームの合成は、通常、ビーム品質が悪い Slow 軸でなされるが、BTU を用いることで、ビーム品質が良好な Fast 軸で行うことが可能になる。この結果、合成時のビーム品質劣化を抑制することができる。この GaN 発振波長帯用 BTU の設計は完了した。現在、BTU 試作に向け、面形状、厚さ、各種調整誤差等の公差解析ならびに硝材検討に着手しており、平成 30 年度内に中間目標達成を実証する予定である。

(c) GaN 系レーザーモジュール

本モジュールは、サブマウントに取り付けたレーザーアレイ素子の上下両面を金属（電極ブロック）で挟み込み、出射面に BTU を取り付けたものである。両面を金属で挟み込むことで、レーザー素子で発生した熱を上下から放熱させる構造である（図Ⅲ2-3-3-1）。

熱が効率よく放熱されるためには、隙間無く、上下の金属とアレイ素子が密着していることが重要である。一方、本テーマの研究開発を行っているパナソニックはこれまで近赤外 GaAs 系レーザーアレイ素子で金属両面放熱を実装した実績を有している。材料物性で比較した場合、GaAs に比べて、GaN の熱伝導率が大きく熱が逃げやすい。このため、同じ条件では接着状態が異なる。そこで GaN レーザーアレイ素子に適した金属両面放熱構造のプロセス設計を行った。なお、現段階では BTU は設計完了までで現物がない為、以下は BTU なしのモジュールを示す。図Ⅲ2-3-3-2 に外観の写真を示す。熱抵抗は 0.53K/W である。

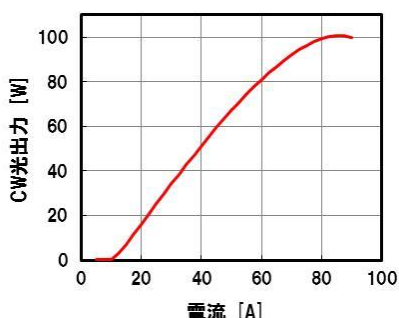


図Ⅲ2-3-3-1 モジュール構成図



図Ⅲ2-3-3-2 モジュールの外観写真 (BTU なし)

このモジュールの電流光出力特性を図Ⅲ2-3-3-3 に示す。波長 405nm での発振である。設計どおり、目標 (80W) まで直線性の高い電流光出力特性が得られていることが判る。最大光出力は 100W を超えており、GaN 1 チップからの出力としては、世界最高レベルである。



図Ⅲ2-3-3-3 光出力特性 (BTU なし)

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように中間目標のモジュール出力および高ビーム品質化技術については達成する見通しを得ている。今後は、①高ビーム品質化技術のアレイ素子導入、②発振器の開発、③発振器を用いた加工実験を行う。これらによって最終目標は達成の見通しである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料に記載している。

2-3-4. 「高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発」（実施先：東京工業大学、富士ゼロックス株式会社—再委託先 産業技術総合研究所）

(1) 事業の背景・意義（目的・概要）

次世代のレーザー加工システムにおいては、加工時の材料へのダメージを最小限にとどめると、加工システムそのものが低消費電力となり、地球環境への影響が少ないことが求められている。また、安価な小型・可搬型加工機への要望も強い。老朽化が進みメンテナンスが必要となった構造物に対して、あるいは、解体が決まった構造物の分解のために、工場で使用するような大型機を用意することは容易ではない。トンネルや橋梁などの老朽化は人命に影響する可能性も高く、修復への迅速な対応が求められる。

このような場合、加工用光源には、なにより持ち運びできる可搬性が重要となる。また駆動電力部もなるべくコンパクトに構成することが望ましく、低消費電力であることも必須となる。表1は、各種レーザーの特性をまとめたものである。小型・可搬性・低消費電力を満足する、機動性に優れた機械加工システムを想定した場合、半導体レーザーの直接利用が有望である。半導体レーザーは、電力の光への変換効率に優れ70%程度の高い変換効率を得られている。しかし、出力増大には、ビーム品質の劣化が伴う。一般的に単一モードのビーム品質の優れた狭ストライプレーザーでは、1W程度のCW出力が限界であり、多モード動作となるワイドストライプの半導体レーザーをアレイに配置したLaser Barでは、数百Wの出力が可能でも、ビーム品質ファイバレーザーには対抗できない。そのアレイをスタックにしたモジュールでは、kW出力のものも製品化されているが、ビーム品質はさらに悪く、高輝度を必要としない熱処理や固体レーザーの励起光源などの用途に限られる。外部共振器や波長合波の構成を取ることで、ビーム品質を大幅に改善された方式も実用化されているが、実装コストやモジュールサイズに課題が残されている。

表Ⅲ2-3-4-1 本研究レーザーと各種レーザーの比較

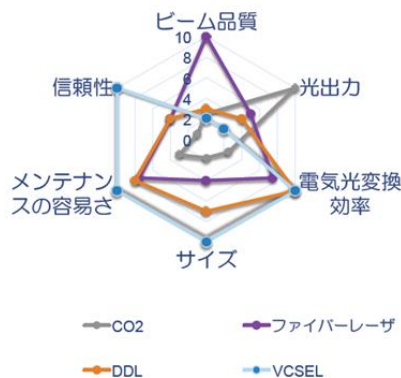
※ WBC = Wavelength Beam Combining

	SOA VCSEL (本研究開発)	VCSEL array	EEL array (WBC※)	EEL array	Fiberレーザー	Diskレーザー	CO ₂ レーザー
材料系	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs	SiO ₂ (Ybドープ)	Nd :YAG	CO ₂
代表的な波長	850nm (本研究) ※他の波長域も可	800 - 980nm	970nm	920 - 1020 nm	1070 nm	1030 nm	10.6um
光出力 (kW)	0.1 (目標値)	~9.6	0.5 - 8	0.15 - 6	1.5 (S.M.) - 100 (M.M.)	1-12	1-20
WPE (%)	40 - 60	40 - (60)	>40	40 - 50	30 - 40	>30	10
占有面積 (m ²)	0.1 (光源部)	0.1 (光源部)	0.89 - 1.13	0.25 - 0.65	0.3 (S.M.) - 2.8 (M.M.)	0.8 - 2.4	0.53(ヘッド) - 4.16
M ²	<10 (目標値)	-	(12.3)	(100)	<1.1 : S.M. >10 : M.M.	(6.1)	(2.3)
BPP (mm・mrad)	<3 (目標値)	>1000	2.5 - 16	8 - 50	< 0.37 (S.M.) >4 (M.M.)	>2	5 - 8
コスト (Price ratio/W)	1	1	⁹ 450万/1K	8	¹⁰ 500万/1K	²⁰ 1000万/1K	⁶ 300万/1K

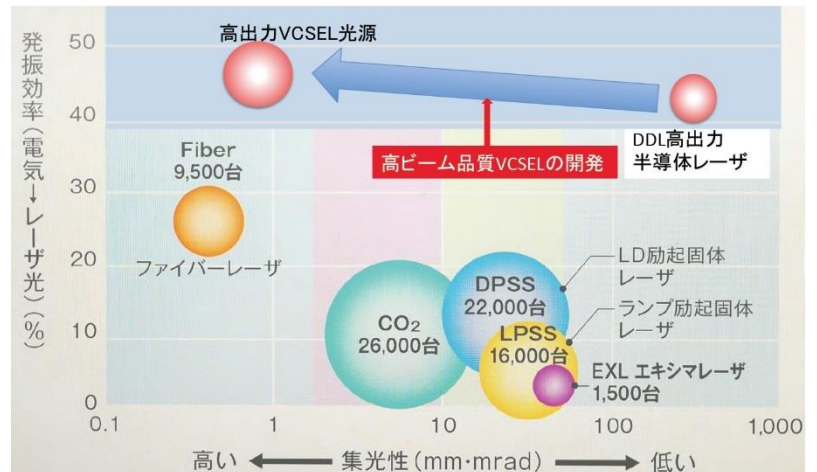
一方、安価で電気光変換効率が高く2次元アレイが可能な半導体レーザーとして、面発光レーザーが広く普及している。面発光レーザーは日本発の半導体レーザー光源であり、半導体基板の垂直方向にレーザー発振するために、二次元アレイ化が容易・低消費電力という優れた特長を持つ。しかしレーザー出力を決定する活性層体積が端面発光型半導体レーザーに比べて小さいため、端面型半導体レーザーが1素子でワット級の光出力を発光するのに比べ、特に単一モード素子では数mWの光出力に留まっている。発光面の大口径化（多モード素子）、あるいは二次元アレイ化によって、数百Wクラスの高出力動作も報告されているが、それぞれの発光面の位相がランダムであるため、端面発光型レーザーと同様に、高出力化と高ビーム品質化は両立しない。本研究開発の目的は、我が国発の面発光レーザー構造を用いて、高出力と高ビーム品質を両立できる新しい半導体レーザーを開発し、次世代のレーザー加工機への革新技術をもたらすことである。

図Ⅲ2-3-4-1は、レーザー加工への応用の観点から、各種レーザーの性能をまとめたものである。先に述べたように、短距離光通信やマウスなどの光センサ応用で発展してきた面発光レーザーは、電気光変換効率、サイズ、信頼性、実装コストの点で他のレーザーを凌駕するが、高出力と高ビーム品質を両立させることができない。図Ⅲ2-3-4-2は各種加工用レーザーのビーム品質と出力を示している。高出力と高ビーム品質を両立させる新型面発光レーザーの実現によって、現在の加工用レーザーにない、発振効率とビーム品質を獲得できる。その他にも面発光レーザーは、結晶表面から光を放射するため本質的に端面の光損傷(COD)が存在しない。また、端面発光型レーザーでは、2次元アレイを構成して高出力化しているが、この場合スタック状に実装するなどの必要があり、実装コストが増大するが、面発光レーザーはモノリシックな2次元アレイを容易に構成できるといった利点がある。高い変換効率に加えて、様々な優位性があるため、もし高出力化と高ビーム品質動作を両立させることができれば、ファイバレーザーに対しても大きな優位性が期待でき、通信・センサ応用からレーザー加工への新たな展開が期待できる。レーザー加工への応用の観点から、面発光レーザーの特徴は以下に集約される。

- 1) 高い電気光変換効率(>60%)
- 2) 精密な2次元レーザーレイ実装が可
- 3) 量産性・低コスト（ウェハスケールのモジュール化）
- 4) COD (Catastrophic Optical Damage) Free
- 5) 単一波長動作かつウェハ内での波長制御が可能（波長合波も可能）
- 6) 小型・軽量の実装
- 7) 短パルス生成も容易



図Ⅲ2-3-4-1 各種レーザーの性能比較

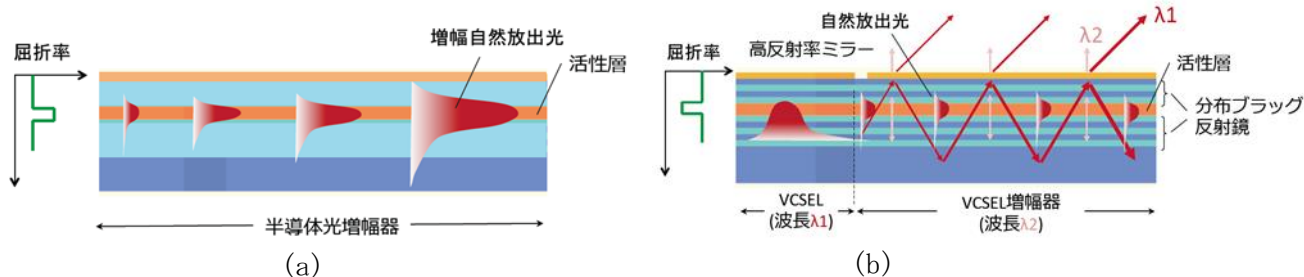


* 既存技術については、「省エネルギーレーザー加工のための高効率ファイバ結合型レーザー光源の研究開発」(NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2011) から引用

図Ⅲ2-3-4-2 各種加工レーザーにおける集光性とエネルギー効率の関係

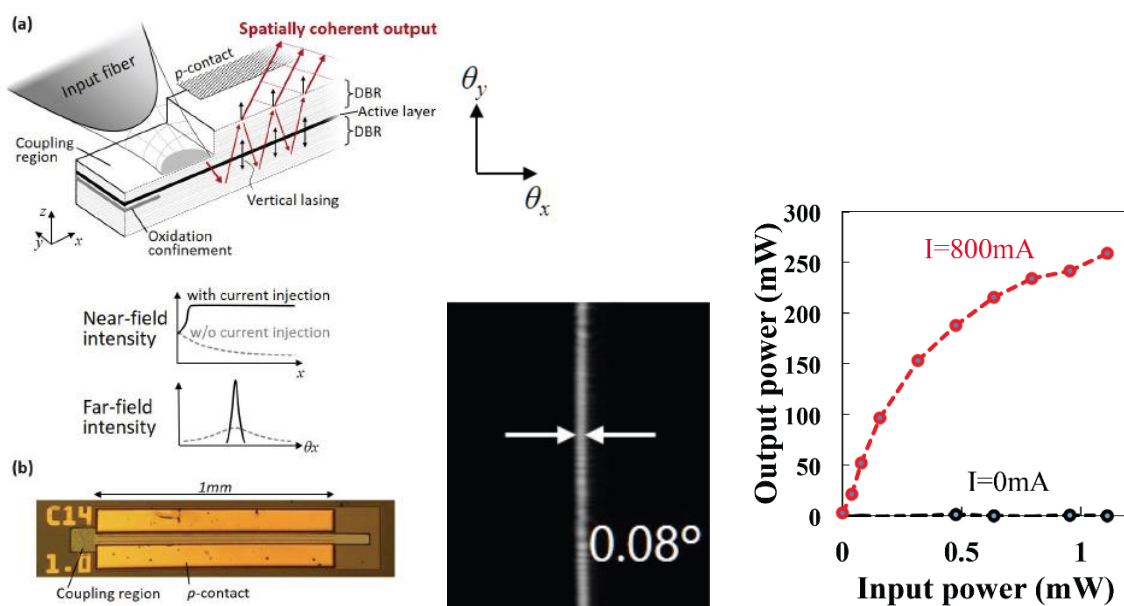
(2) 研究開発目標と根拠

面発光レーザーをレーザー加工に応用する場合の課題、すなわち高出力化と高ビーム品質化を両立する問題を解決する新規構造として、面発光レーザー素子と光増幅器を同一基板に集積化させることにより、活性領域を拡大させて、ワットクラスの光出力を得る新方式が本研究の研究者より考案されている(特許出願済)。図Ⅲ2-3-4-3は原理を示す概念図と概観図を示している。横方向集積の考え方は、2009年に本テーマの研究者から提案されている(IEEE IPS 2007)。本来の垂直方向の放射を遮蔽することで、横方向波数成分により、スローライト(群速度が遅い波)が横方向に励振されるものだが、これまで、光変調器や光検出器などの集積化が実証されてきた(OL2012、APL2013)。ここでは右側の増幅器VCSELでも電流注入することでレーザーとして動作させる。ここに種光源であるVCSELからのコヒーレントなスローライトが伝搬することで、その伝搬光は減衰することなく伝搬し続ける。レーザーを2つ連結しているが、不安定な注入同期現象ではなく、波長についての精密な条件は不要である。ここでは、左から右への一方向性の結合を実現するためには、図Ⅲ2-3-4-3で、 $\lambda_1 < \lambda_2$ の条件だけが満足すれば良い。この方式を用いることで、後述するように約1mm長の光増幅器から1W以上のレーザー出力を得ることが可能となる。また、種光源(左端のVCSEL)によって、右端のVCSEL増幅器のモードが完全に制御されるため、理想的には回折限界の狭い放射角が得られる。すなわち、高出力化と高ビーム品質化の両立が可能になる。この場合、光出力の上限はVCSEL増幅器の長さで決まる。通常の半導体光増幅器は、図Ⅲ2-3-4-3(a)に示すように、増幅自然放射光(ASE)が増大するため、素子長を数mm程度の長さまでしか長尺化できない。それに対して、本研究の構造では、用いるのはスローライトモードで、導波モードでは無いため、活性領域近傍の屈折率を下げることで、ASEの成長を抑圧できることが判明した。すなわち、理想的には無限に長尺化できる可能性がある。すなわち、素子長に比例して高出力化が期待できる。本研究では、この新しいコンセプトに立脚し、光増幅器集積型面発光レーザーの技術開発を行い、高出力化と高ビーム品質化の両立にチャレンジし、キロワット級出力でファイバレーザーに比肩する新型半導体レーザーの実現を目指す。



図Ⅲ2-3-4-3 (a)通常の半導体光増幅器と(b)スローライトVCSEL増幅器

実際にこの予見された優れた特性は、実験的に検証されつつあり、図Ⅲ2-3-4-4はVCSEL増幅器の初期実験の結果を示している(CLEO 2016)。素子長は1mmであるが、外部光源(1mW入力)を使ってスローライトを励振し遠視野像を観測すると、ほぼ回折限界に近い 0.08° の広がり角が観測された。直交方向は5μm幅程度の導波路幅のため、 10° 程度の広がり角だが、これも回折限界で決まっている。また放熱のためのボンディングや大電流仕様の電極構成にしていなかったため出力は十分ではないが、CWで30mW、パルス駆動で250mW以上が得られている。外部光源を用いているが、横モード抑圧比30dB以上の単一モード動作である。これは、通常の単一モード面発光レーザーの約100倍の出力である。また入力波長の範囲も20nm以上あり、注入同期のような精密な波長制御が不要であることを示唆している。



図Ⅲ2-3-4-4 VCSEL増幅器で外部光源を用いた遠視野像と高出力動作。ほぼ回折限界の射出ビームと単一モードで250mW以上の出力が得られている。(通常の単一モードVCSELの約100倍)(CLEO 2016/OCC 2016)。

高出力化と高ビーム品質化を両立する問題を解決する新型面発光レーザー開発に向けて、大学と企業が役割分担を行って効率よく研究開発を進める。主な役割分担の考え方は以下の通りである。

【東京工業大学】：理論と新しい原理に基づく構造の動作実証と長尺化・高出力化の限界究明

【富士ゼロックス】：高出力化のための電気抵抗・熱抵抗低減、均一性向上による性能向上、放熱などの周辺技術による高出力化実証

上記のように、大学で新規構造を試作し検証結果を経て、企業側の量産技術に展開する役割分担の考えに基づき、表Ⅲ2-3-4-2に示す開発目標を達成すべく、以下の研究項目を行う。

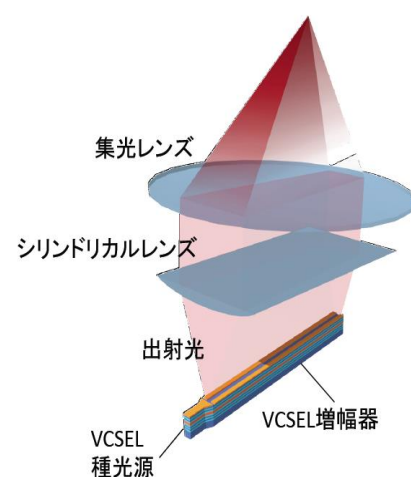
表Ⅲ2-3-4-2 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
高出力面発光レーザーの研究開発 (大学)	長尺化の限界究明 2次元レイアウト 構造の集積光源実現 [光出力 > 1kW (パルス)、 $M^2 < 2$]	ファイバレーザーの代替を可能とする小型加工レーザー光源の可能性検証になる。	・高ビーム品質動作の理論的検証 ・増幅器集積光源の実現 光出力 > 1W (パルス)、 $M^2 < 2$	本研究の根幹である「高出力・高ビーム品質動作」及び「VCSELとVCSEL増幅器との一方向性結合を可能にする構造」を理論的に明確化し、具現化へ備える。
VCSEL-VCSEL増幅器集積光源の実現 (富士ゼロックス)	・集積素子のアレイ化実現と高出力・高ビーム品質動作の実現 [光出力 > 0.1kW、 $M^2 < 10$]	複合材料・金属加工に必要なエネルギー密度を、約 32MW/cm ² と見積もった場合、0.1kW(CW)を20um径に集光することで達成できる。	・VCSEL増幅器の高出力化実現 [①SMSR30dB以上の単一波長動作 ②光出力 > 5W、 $M^2 < 2$]	VCSEL増幅器の構造設計を行い、増幅器性能を高めおくことで、将来の集積化と高出力化に備える

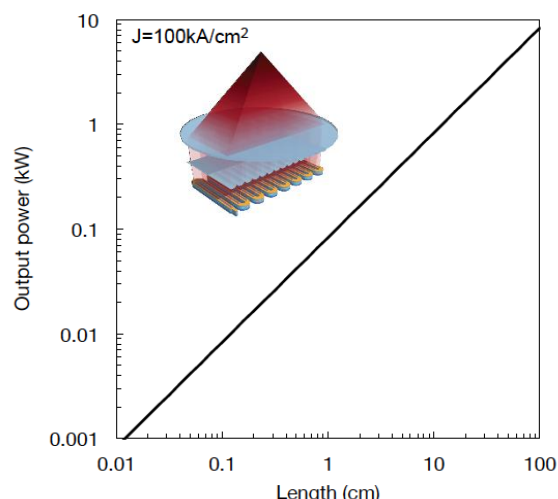
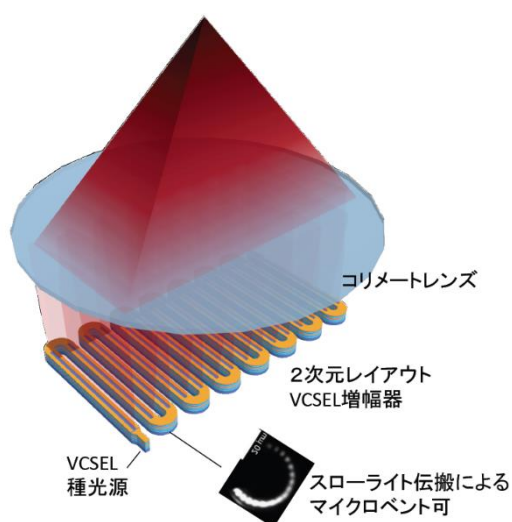
東京工業大学では、「長期的視点に基く高出力面発光レーザーの研究開発」のために具体的には下記研究項目を実施する。

- ・ スローライトと増幅自然放出光を取り入れた進行波レート方程式による提案構造の動作解析を行い、提案構造の理論的妥当性の検証と、高出力化・高ビーム品質化を実現するためのデバイスの設計を行う。

- ・ 上部反射鏡の一部を変えることで（成膜、あるいは酸化）、種光源であるVCSELの波長と増幅器であるVCSELの波長を変えて、2つのVCSEL間の一方向性結合を実現し、増幅器集積面発光レーザーの安定動作を実証する。また、量産に適合した上記波長の制御方法を開拓し、効果を検証する。ビーム品質の評価を実施して、図Ⅲ2-3-4-5に示すように既存の光学系を用いたときの集光特性について検証する。
- ・ 増幅自然放出光を抑圧する新しい層構造を導入して、増幅器の長尺化の限界を明らかにする。実際には、面発光レーザーと面発光レーザー増幅器増の横方向集積素子を製作し、モード安定性、出力向上、ビーム品質などの諸特性を明らかにする。
- ・ 最後に、図Ⅲ2-3-4-6、図Ⅲ2-3-4-7に示すように、2次元レイアウト構造を導入して、1cm角のチップ内に増幅器導波路を引き回して長尺化の限界究明を進める。初期的な計算では、総長1cmの長さまで拡張することで、50Wクラスの出力が期待できる。



図Ⅲ2-3-4-5 既存レンズを用いた集光光学系



図Ⅲ2-3-4-6 2次元レイアウト構造を導入した増幅器集積面発光レーザーの構造とシミュレーション

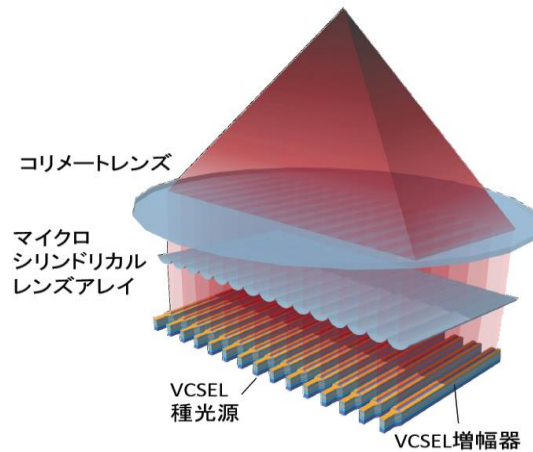
富士ゼロックスでは、「高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発」のために具体的には下記を実施する。

- ・ まず、VCSEL増幅器単体の高出力化を目指して、増幅器の性能改善を行う。具体的には、電気抵抗低減、ウェハ層構造の最適化による熱抵抗低減を進め、増幅器単体での高出力化を進める。
- ・ また、東京工業大学との連携を図りながら、東京工業大学で先行して進めた結果をフィードバックかけつつ、面発光レーザーと増幅器の集積化を図り、光源と増幅器の一体型光デバイスの試作を行う。このとき、素子実装上の課題（電流注入の経路や温度制御方式など）にも対応していく。試作品の作製や性能評価を通じて、最大出力を得るための最適化設計、ビーム強度プロファイルなどの改良や測定を行う。

・ これらデータを取得後、レーザー加工などの実用化に向けた光学系設計の検討を実施する。光増幅器集積型面発光レーザーは、一素子で端面型と同等以上の光出力が得られる見込みであることに加え、二次元アレイ化も容易である。図Ⅲ2-3-4-7に示すように、増幅器集積面発光レーザーのアレイ化とマイクロシリンドリカルレンズのアレイ化設計を行い実装などの周辺技術を開拓していく。

・ 実際に、増幅器集積光源のアレイ集積化を進め、kW級高出力動作の可能性を探る。

・ kW級高出力動作には、素子の熱抵抗のみならず、ヒートシンクでの放熱設計も重要である。チップのみならずキロワット出力を目指した放熱設計を進める。



図Ⅲ2-3-4-7 増幅器集積光源のアレイ化による高出力化

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-3-4-3-1 長期的視点に基く高出力面発光レーザーの研究開発 スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
高出力パルス動作 特性評価装置導入						導入完了
VCSEL 増幅器の動作解析と原因究明						増幅器の高出力化設計および一方向性結合集積素子の設計とモード安定化
VCSEL-VCSEL 増幅器集積光源の構造設計						高ビーム品質動作の理論的検証
VCSEL-VCSEL 増幅器集積光源の試作と評価						光出力>1W (パルス)、 $M^2<2$
2次元レイアウト化/長尺化とビーム品質評価						長尺化限界把握 2次元レイアウト構造の集積光源実現 光出力 1kW (パルス)、 $M^2<2$
高出力化とビーム品質改善						品質改善のための設計指針を得る

表Ⅲ2-3-4-3-2 高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発 スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
高出力 VCSEL 評価 用装置導入		改造				導入完了
VCSEL 増幅器試作 と評価	増幅器構造 検討	1 次試作と評価	2 次試作と評価			長尺化に向けた設 計値の把握
VCSEL 増幅器長尺 化（高出力化）	長尺化構造設計 電流注入均一化検討 放熱構造設計 試作用ウエハ・マスク設計		3 次試作と評価	4 次試作と評価		VCSEL 増幅器の実 現：光出力 5W (CW)、 $M^2 < 2$
VCSEL-VCSEL 増幅 器との集積化検討 と試作・評価	種光源 VCSEL との集積化検討	集積型 1 次試作と評価	集積型 2 次試作と評価	集積型 3 次試作と評価		集積型での増幅効 果確認
インコヒーレント での集積光学系検 討	VCSEL-VCSEL 増幅器集積 光源（単体）の集光光学 系の設計		集光光学系試作・組み込み			VCSEL と VCSEL 増 幅器集積光源の集 光光学系設計
アレイ化検討		アレイ状 VCSEL 増幅器の設計検討	アレイ化 1 次試作と評価	アレイ化 2 次試作と評価	アレイ化 3 次試作と評価	VCSEL と VCSEL 増 幅器集積光源： 光出力 0.1kW (CW)、 $M^2 < 10$
アレイ状 VCSEL 増 幅器放熱構造設計		アレイ状 VCSEL 増幅器の放熱構造設計				
ビーム品質測定評 価（再委託）		試作品のビーム品質評価・加工用レーザー光源への適用性評価				

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表Ⅲ2-3-4-4に示す。大学における高出力面発光レーザーの研究開発に関しては、多モードレート方程式により、面発光レーザー増幅器の高出力特性の解析を行い、数mWの低パワーの種光源からの光を入射させることで、素子長10cm級の長尺素子で100ワット級高出力単一モード動作が可能であることを明らかにした。さらにパルス動作では、CW出力の10倍以上の高出力化が可能であり、パルス出力1kWの可能性検証を示した。また、素子長の異なる面発光レーザー増幅器の評価を行い、素子長の長さに比例して出力が増大できるスケーリング則を明らかにした。また、単一モード面発光レーザーと面発光レーザー増幅器の集積光源を初めて実現して、単一モード出力0.01Wを得た。面発光レーザー増幅器同様に、3mm以上の長尺化と増幅器からの逆方向結合を除去する新しい構造により、中間目標である単一モード出力1W（パルス動作）実現の見通しを得ている。

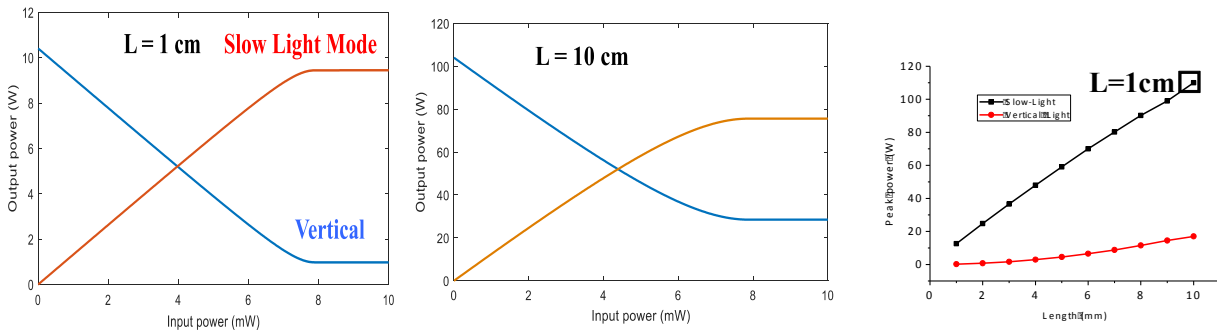
富士ゼロックスにおける中間目標であった、VCSEL増幅器の高出力化の実現については、スケールアップによる増幅光出力の増加を確認しており、VCSEL増幅器長2mmの増幅光出力0.47Wが10mmで2.3Wの増幅光出力となることを確認した。また、この時、単一波長動作についてもサイドモード抑圧比(SMSR)30dBを達成している。長さに比例して光出力が増加することが明らかとなり、中間目標である増幅光出力5Wは、増幅長20mmにすることで達成できる見込みである。また、素子長6mmまでに対しては、 M^2 値2以下に対応するビーム拡がり角 0.024° を達成した。

表Ⅲ2-3-4-4 研究開発項目と達成状況

研究開発項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題と解決方針
高ビーム品質動作の理論的検証	単一モード 100W級動作検証	単一モード 100W級動作検証とスケール則実証	○	短パルス生成のモデリング
高出力VCSEL増幅器実現	光出力> 5W(CW)、 $M^2 < 2$	光出力 2.3W(CW)、 8W(Pulse) $M^2 < 2$	△(2018年 12月達成予定)	長尺化(L>2cm) 放熱マネジメント
増幅器集積光源の実現	光出力> 1W(パルス)、 $M^2 < 2$	光出力 0.01W(CW) $M^2 < 2$	△(2019年 3月達成予定)	非可逆結合集積 長尺化(L>1cm)

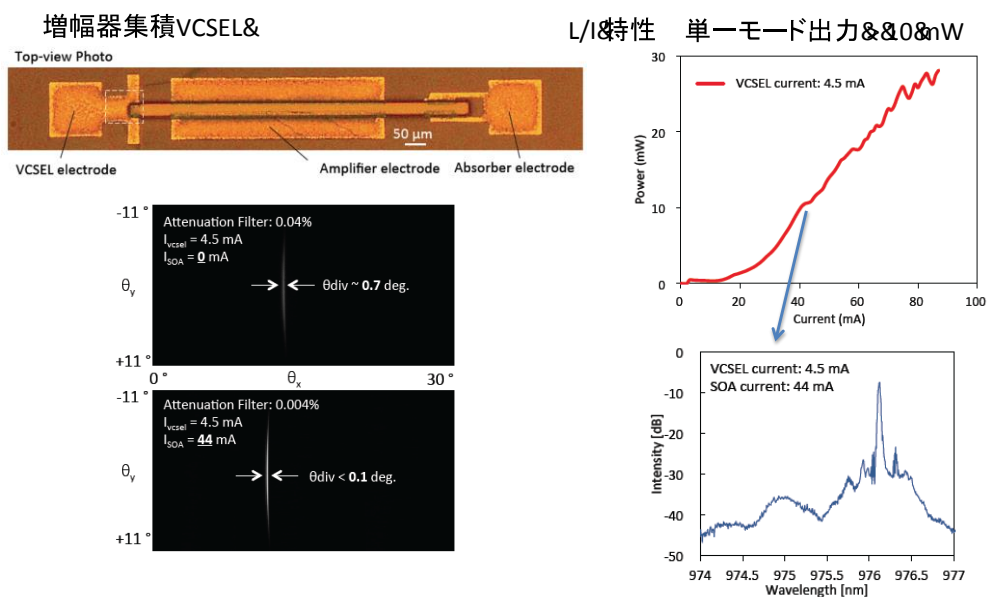
(5) 成果の詳細

「高出力面発光レーザーの研究開発」では、2016年に、スローライトと増幅自然放光を取り入れた進行波レイト方程式による面発光レーザー増幅器の動作解析手法を確立し、ワット級高出力動作の可能性を示すとともに、実験的にその有効性を明らかにした。さらに面発光レーザー・増幅器集積素子を製作し、ビーム広がり角 0.1° 以下の高品質ビームを実現した。2017年は、引き続き面発光レーザー増幅器の動作解析とモデルの検証を行い、図Ⅲ2-3-4-8に示すように、10cm超で100ワット級の高出力、パルス動作でCWでの約10倍、すなわち1kWの高出力動作の可能性を示した。

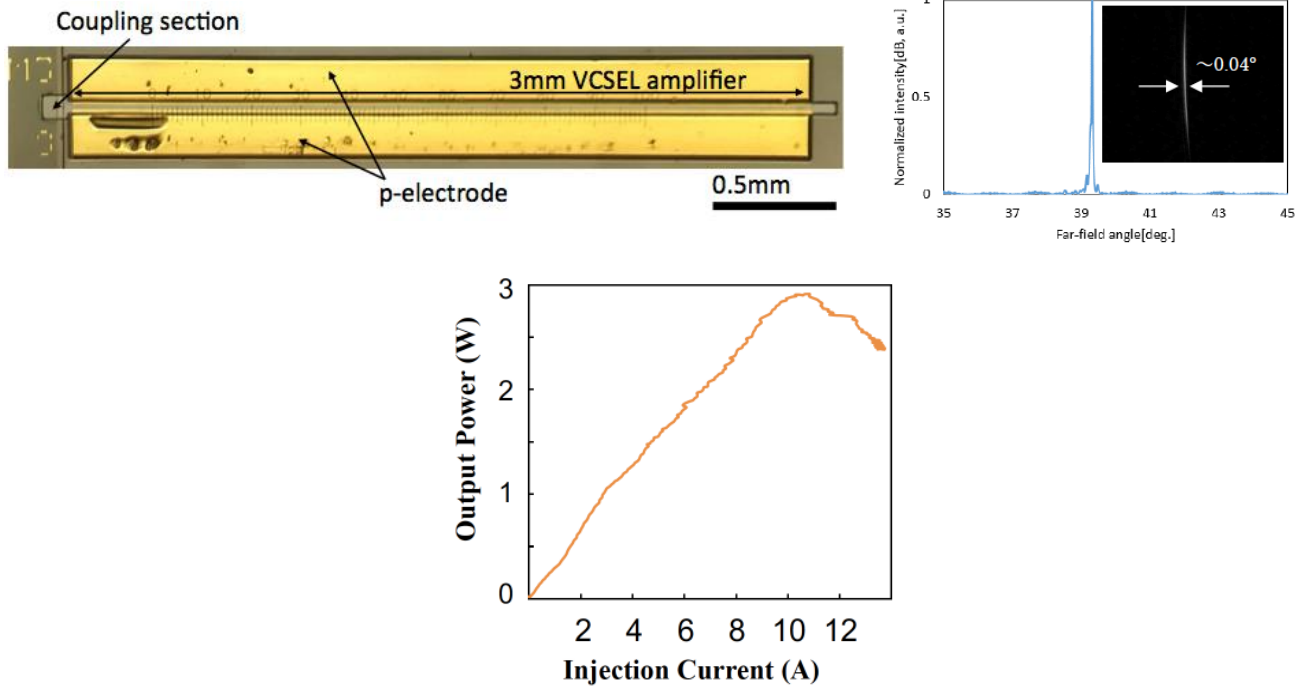


図Ⅲ2-3-4-8 面発光レーザー増幅器の高出力特性 (a)、(b)CW、(c)パルス動作

さらに、一方向性結合を可能とする単一波長面発光レーザーと増幅器の集積構造の試作を行い、初めて単一モード面発光レーザーと面発光レーザー増幅器の横方向集積を実現して、図Ⅲ2-3-4-9に示すように、出力0.01Wの単一モード出力を得るとともに、 $M^2 \sim 2$ に相当する狭いビーム広がり角の出射パターンを実現した。面発光レーザー増幅器については、図Ⅲ2-3-4-10に示すように、ビーム広がり角 0.04° 以下、パルス動作で出力2.9Wを実現した。また、図Ⅲ2-3-4-10に示すように、2次元レイアウト構造で1mm角以下のチップサイズで実効的に4mm長となる増幅器を製作し、0.5mm角チップで出力0.35Wのコヒーレントビームを実現した。チップ面積で規格化したパワー密度として $140\text{W}/\text{cm}^2$ を得るとともに、その放射パターン特性を明らかにした。

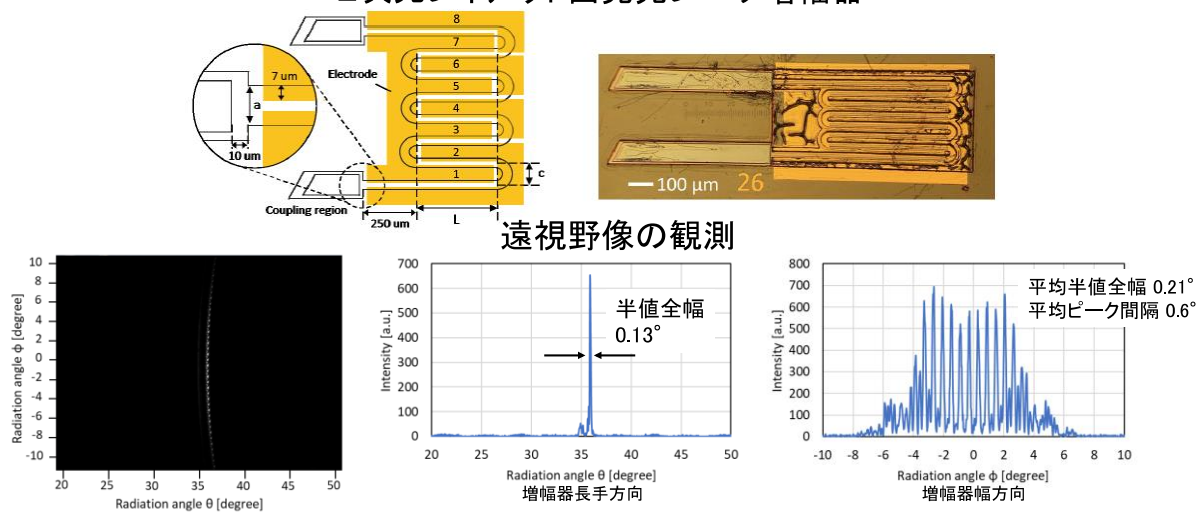


図Ⅲ2-3-4-9 単一モード面発光レーザーと面発光レーザー増幅器の集積光源の特性



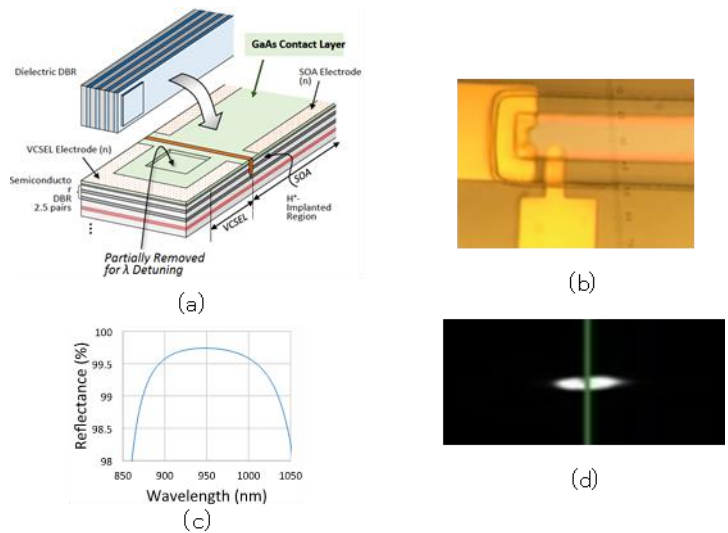
図Ⅲ2-3-4-10 製作した面発光レーザー増幅器とその発光遠視野像とパルス出力特性

2次元レイアウト面発光レーザー増幅器



図Ⅲ2-3-4-11 長尺化を可能とする2次元レイアウト構造

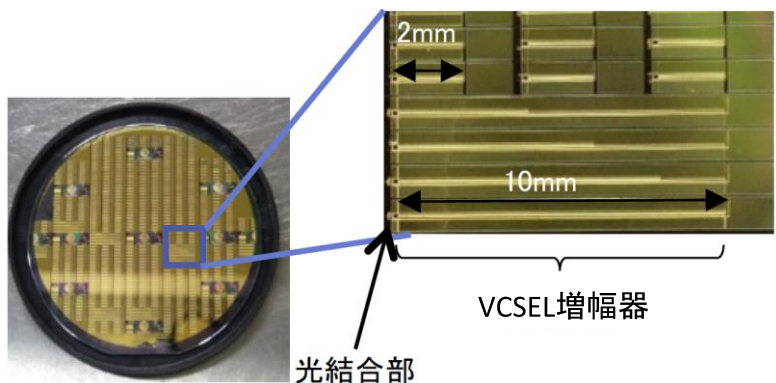
また、図Ⅲ2-3-4-12に示すように、面発光レーザー増幅器から種光源への戻り光抑圧を可能にする新しい集積構造の2次試作を実施し、99.6%以上の誘電体ミラー反射特性を確認した。種光源VCSELの発振しきい値約1.2mA（開口径5μm角）となり、増幅器領域を非励起の場合に、安定な横方向結合も確認している。今後発振スペクトル、増幅特性、結合効率などの詳細特性を測定予定である。



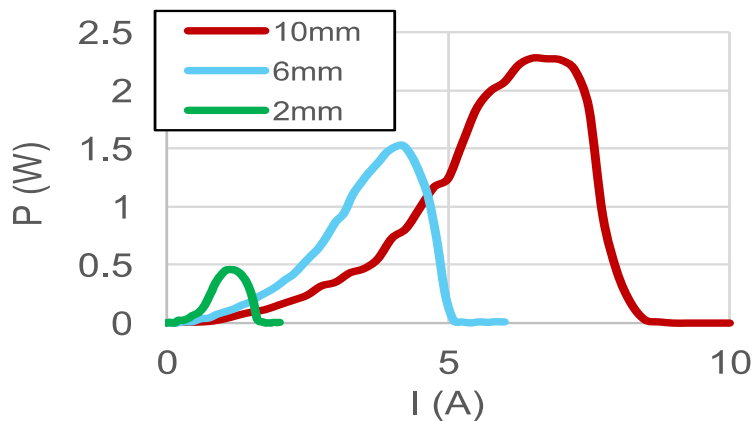
図Ⅲ2-3-4-12 面発光レーザー増幅器集積光源の試作：(a) 構造図、(b) 顕微鏡写真、(c) 誘電体ミラー反射スペクトル、(d) 近視野像

「高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発」では、高出力面発光レーザーの評価装置を設計、導入するとともに、図Ⅲ2-3-4-13に示すように、3インチウエハプロセスにより長尺面発光レーザー増幅器の試作を行った。素子長が2mmにおいてCWで0.47Wの出力を実現した。さらに、素子長6、10mmにおいては、図Ⅲ2-3-4-14に示すように、CWでそれぞれ1.5W、2.3Wの出力を得て、スケールアップによる高出力化ができることを確認した。さらに、基本スローライトモードの制御性向上を狙った改善エピ基板（波長オフセット延長、p側反射率低減）を試作した。10mm長までの長尺化による出力スケールアップを確認できた。VCSEL増幅器と同一のチップ構造を作製し、エピ構造変更によるさらなる改善効果の確認を行っている。

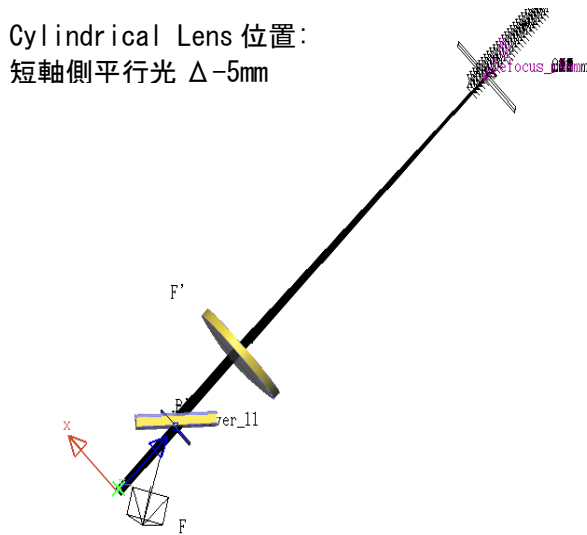
また、集光光学系設計に着手し、VCSEL増幅器からの増幅光ビームのM²（Mスクエア）を導出するシミュレーションを開始した。初期評価に用いた光学系を図Ⅲ2-3-4-16に示す。ここでは、市販のシリンドリカルレンズと球面レンズを用いた。この時のフォーカス位置でのビーム径のふるまいを図Ⅲ2-3-4-17に示す。集光光学系によって、長手方向1.3、短手方向1.6のM²値を得た。ビーム径は今回の計算では最少でX方向：42μm(@14mm) Y方向：57μm(@2mm)が得られた。図Ⅲ2-3-4-16で長手方向と短手方向の集光位置が異なっているが、これはシリンドリカルレンズの設計によって解消できる。



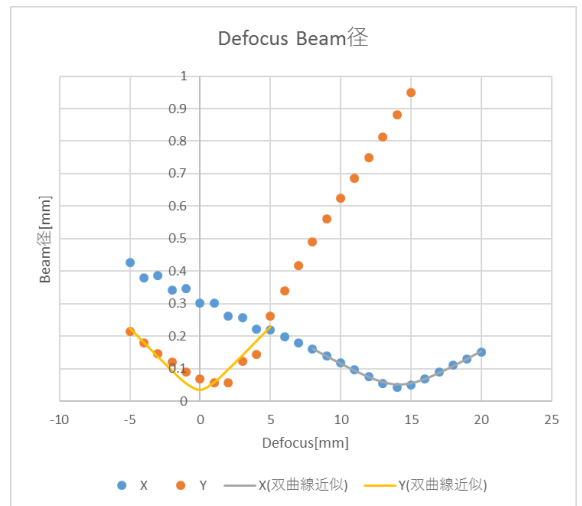
図Ⅲ2-3-4-13 3インチウエハプロセスによる長尺面発光レーザー増幅器



図Ⅲ2-3-4-14 長尺面発光レーザー増幅器の単一波長CW高出力動作



図Ⅲ2-3-4-15 VCSEL 増幅器集積光源での集光光学系検討案



図Ⅲ2-3-4-16 光軸上の集光ビーム径のふるまい

大学・企業の連携研究で得られた面発光レーザーの出力、ビーム広がり角に関する長さに対するスケージング則についてのまとめを図Ⅲ2-3-4-17に示す。出力については、ほぼ長さに比例して出力が増大し、ビーム広がり角については、素子長6mm程度までは、 $M^2 \sim 2$ に対応する狭いビーム広がり角が得られることがわかる。長尺化による M^2 値の悪化は、素子長手方向の温度分布に伴う波面の傾斜が原因の一つであることが分かっている。これは、素子の放熱マネージメントにより改善可能と考えている。

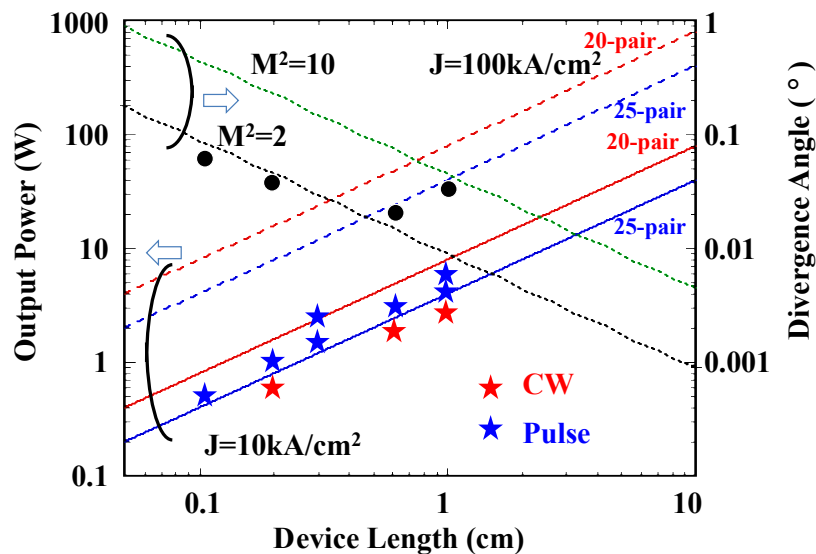
これらの結果から、以下のスケージングにより、中間目標、最終目標が達成見込みである。

素子長 > 2cm → 中間目標 : VCSEL 増幅器 出力 (CW) >5W ($M^2 \sim 2$)

素子長 > 10cm → 最終目標 : VCSEL 増幅器 出力 (CW) >100W ($M^2 \sim 10$)

【ベンチマーク】

表Ⅲ2-3-4-1の他の高出力レーザーとのベンチマークに関しては、特に直接半導体レーザーとの比較では、現時点ではCW出力2.3Wであり、出力レベルでは1/100以下であるが、ビーム品質(M^2 値)に関しては50倍程度の優位性がある。また、量産・低コスト化が可能な単一モード面発光レーザーとの比較では、単一モード面発光レーザーの最高出力は10mW程度に留まっており、既に100倍以上の高出力化に成功している。最終目標である100W級高出力動作を実現することで、既存の高出力直接半導体レーザーに比べて、ビーム品質、小型化、コストの面から強い競争力が期待できる。



図Ⅲ2-3-4-17 長尺面発光レーザーのスケーリング則

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように中間目標である【高ビーム品質動作の理論的検証】【増幅器集積光源の実現：光出力 $>1\text{W}$ （パルス）、 $M^2<2$ 】【VCSEL増幅器の高出力化実現〔①SMSR30dB以上の単一波長動作 ②光出力 $>5\text{W}$ 、 $M^2<2$ 〕】について、それぞれ達成する見通しを得た。

今後、東京工業大学では、高出力化・高ビーム品質を良質する設計指針の確立と長尺化限界究明に取り組み、最終目標である2次元レイアウト構造の集積光源を実現していく。

富士ゼロックスは、大学での結果を3インチウェハプロセスに展開し、まず、単体でのVCSEL-VCSEL増幅器集積光源の具現化を行う。さらにアレイ光源の設計と集光光学系の検討を光学シミュレーションを用いて実施し、最終目標である、光出力0.1kW（CW）/ $M^2<10$ を実現させていく。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-3-5. 「高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発」（実施先：東京大学—再委託先 株式会社 QDレーザー、三菱電機株式会社）

（1）事業の背景・意義（目的・概要）

レーザーを用いた生産装置市場は年率 8% で成長しており、産業装置としてのレーザーの重要度が増している。2030 年以降もレーザー装置の利用は伸長すると予測され、産業用エネルギー削減の観点からもレーザー装置の消費エネルギー低減が求められている。このトレンドの一つの現われとして、効率 10% 程度の CO₂ レーザーから効率 30% 程度のファイバレーザーへの切り替えが進行している状況にある。2030 年以降の次世代産業用高出力レーザーは、圧倒的に高い効率を有していることから、半導体レーザーが主役になる可能性が高いものと考えられる。特に、量子ドットレーザーは現存の半導体レーザーの効率をさらに抜本的に向上させる可能性を有しており、次世代のレーザー加工光源の中核を担う素子として期待できる。

本研究開発の目的は、量子ドットレーザーを「次々世代加工に向けた究極的新規光源」と位置付け、従来の適用領域とは大きく異なる高出力・高注入電流領域において高効率動作を実現することにより、レーザー加工の分野の光源に革新をもたらすことである。

本研究開発においては、高品質・高密度・高均一量子ドットを形成する結晶成長技術の開発を行うとともに、レーザーの高出力化を実現する量子ドットレーザー基板の結晶成長技術の確立を図る。さらに、高出力レーザーに適した活性層及び光共振器の設計等にもとづき、高出力量子ドットレーザーを作製し、量子ドットレーザーの大出力化の可能性を実証する。さらに、高出力量子ドットレーザーの加工応用に向けた周辺要素技術として、発振ビームを加工に適した状態に制御する外部光学系を考案するとともに、高出力化に伴って必要となる高出力量子ドットレーザーに適した水冷パッケージを開発する。これらの成果を集約することにより、高出力可能な集積量子ドットレーザーを実現する。

（2）研究開発目標と根拠

本研究開発においては、高出力量子ドットレーザーの実現可能性の実証を目的としているため、開発目標を以下に定めた。

◎中間目標（2018年度）

量子ドットレーザー出力密度 1 W/mm² 可能性実証

◎最終目標（2020年度）

量子ドットレーザー出力密度 10 W/mm² 可能性実証、集積出力 10 W 可能性検証

表Ⅲ2-3-5-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
レーザー出力密度	10 W/mm ² 可能性実証	現状の高出力半導体レーザーの出力密度が 10 W/mm ² 程度であるため。	1 W/mm ² 可能性実証	最終目標に向けた目標として妥当と考える

レーザー集積出力	10 W 可能性検証	目標値と同等レベルもしくはそれ以上を実現できれば、近い将来量子井戸レーザーを凌駕し、加工技術に革新をもたらす可能性があるため。	該当なし	
----------	------------	-----------------------------------------------------------------	------	--

上記の目標設定根拠は以下のとおりである。現状の高出力半導体レーザーの出力密度は 10 W/mm² 程度であり、量子ドットレーザーにおいてこれと同等以上の性能が実現できれば、レーザー加工技術に革新をもたらすことが可能であるため。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-3-5-2 量子ドットレーザー開発スケジュール

Projects & Tasks ▼	H28 (2016)	H29 (2017)	H30(2018)	H31 (2019)	H32 (2020)
(1) 高密度量子ドット形成技術基盤の開発	・高密度化 ・多層化 (10層)			・高均一化 ・多層化 (20層)	
(2) 高出力量子ドットレーザーの設計と実現可能性実証	・光共振器設計		・素子構造最適化 ・性能限界の検討		
	・大出力用量子ドットレーザー試作開発 ・出力：1 W/mm ² 可能性実証			・出力：10 W/mm ² 可能性実証 ・集積出力 10W 可能性検証	
(3) 高出力量子ドットレーザー加工応用に向けた周辺要素技術開発	・大出力量子ドットレーザー用パッケージ開発 ・加工適用ビーム操作方式の試作検証			・実用化開発に向けた応用形態の試作検証	

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。中間目標である量子ドットレーザー出力密度 1W/mm² 可能性実証については、出力密度 10 W/mm² および集積出力 23 W を実現することにより、中間目標を大幅に上回る成果を達成した。

表Ⅲ2-3-5-3 研究開発項目と達成状況

中間目標	成果	達成度	今後の課題
量子ドットレーザー出力密度 1 W/mm ² 可能性実証	量子ドットレーザー出力密度 10 W/mm ² (パルス動作) と集積レーザー出力 23 W を実現することにより、中間目標を上回る成果を達成した。	◎	量子ドットレーザー出力密度 10 W/mm ² (CW 動作) を実現するとともに、CW 集積レーザー出力と効率をさらに高めることが課題。

(5) 成果の詳細

1. 高密度量子ドット形成技術基盤の開発（東京大学、QDレーザー株式会社）

高密度量子ドット形成技術基盤の開発は、中間目標である量子ドットレーザー出力密度 1 W/mm^2 可能性実証のために従来に比して面内で高い密度を有する InAs/GaAs 量子ドットの形成することに取り組んだ。InGaAs/GaAs 量子ドットの形成は、Stranski-Krastanow 成長モードに基づき自己組織化結晶成長の手法を用いた。高出力化のためには、量子ドット層からの利得を増加が必要であり、それを実現するためには、量子ドットの総面密度（一層当たりの面密度×層数）を増大することが不可欠である。このために、本開発では、面内密度の高密度化及び、量子ドット層の多層化を主眼にして、結晶成長技術の研究を行った。

GaAs 基板上への InGaAs 系の量子ドットは、その組成や構造に応じて、近赤外領域から光通信波長帯をカバーする波長域での発光が得られることから、広く利用されてきた。特に、Ga の組成を高くした InGaAs 量子ドットは、InAs 量子ドットに比べて、基板材料の GaAs との格子不整合が小さく、高い面内密度を確保する技術として知られている。まず、我々は従来から報告している手法を結晶成長に適用し、条件を最適化することで、 $1.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ の面内密度を有する InGaAs/GaAs 量子ドットを形成することに成功した。この結果は高密度ではあるが、 $1.14 \mu\text{m}$ 前後の基底準位発光波長を有することから、加工用半導体レーザーとしては比較的長波長領域に位置していた。

この問題を解決するために、以下のような量子ドット及び障壁層の条件の最適化を行った。まず、InGaAs 量子ドットの実効的な原料堆積量を最適化することで形成される InGaAs/GaAs 量子ドットの面内密度を $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ まで増加させることができた。その上で、量子ドット層の上に形成される障壁層に部分キャップおよび In Flush 手法を導入することで、量子ドットサイズの均一化を得る同時に、量子ドット層からの基底準位発光波長を $1.05 \mu\text{m}$ 帯まで短波化することができた。この波長帯は現在の汎用加工用レーザーの波長域であり、既存の付帯技術の適用が可能であるため、最も望ましい波長帯として考えられている。それに加え、形成されたサンプルはその発光強度が既存量子ドット層の約 1.6 倍であり、報告された $1.05 \mu\text{m}$ 帯の量子ドットとしては世界最高密度を記録している。

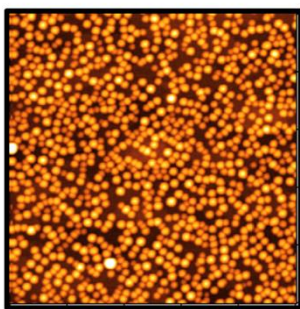
一方、多層積層化による量子ドットの高密度化の取り組みも進行されている。多層積層化においても量子ドットの体積密度を増やす一方、積み重ねによる上部量子ドット層の品質劣化の問題を解決しなければならない。今回、我々は、上記で作製された $1.05 \mu\text{m}$ 帯 InGaAs 量子ドット層を用いて 8 層積層の量子ドット構造を作製し、層数に比例する光強度の増加を確認した。これは、比較的小さいサイズの量子ドットの表面上に平坦な障壁層が形成されたためだと考えている。今年度中に 10 層積層の量子ドット構造の形成を行う。

これまでの高密度量子ドット形成技術基盤の開発で、我々は量子ドット層の新しい形成技術を導入し、最適化することにより、従来の量子ドットの約 1.5 倍の面内密度 ($1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) を有し、汎用加工用レーザーへの応用に適した $1.05 \mu\text{m}$ 帯で約 1.6 倍の発光強度を示す量子ドット層の形成に成功した。この量子ドット密度は報告されている $1.05 \mu\text{m}$ 帯の量子ドットとしては世界最高密度である。

今後はさらなる量子ドットの発光強度および効率の向上をはかるために、面内高密度化技術を適用した多層化技術に取り組むとともに、量子ドット構造周辺の結晶品質を高めることで、量子ドットあたりの発光強度の増加をはかる。さらに、量子ドット積層層間を薄くすることで積層数の高密度化を進め、高効率・高強度半導体レーザーのための量子ドット活性層作製に挑む。

量子ドット成長条件の最適化

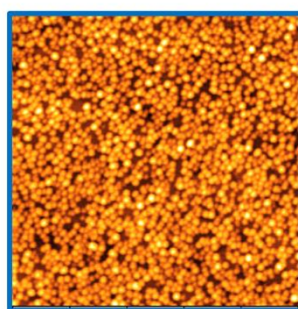
$1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$



$N = 1.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

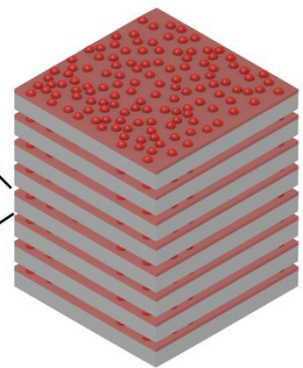
量子ドット・障壁層成長条件を最適化

$1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$



$N = 1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

8層積層化



図Ⅲ2-3-5-1 InGaAs/GaAs 量子ドットの高密度化および多層積層化

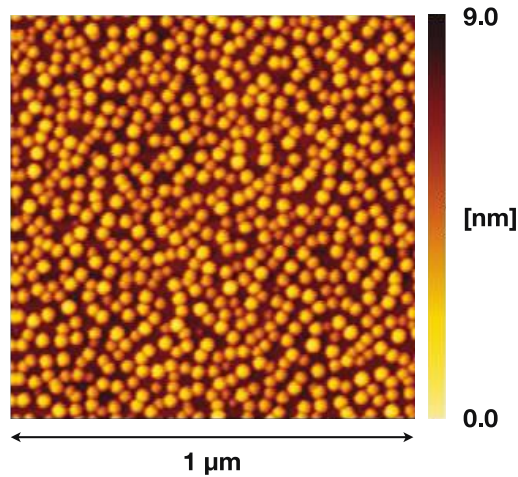
2. 高出力量子ドットレーザーの設計と実現可能性実証 (QDレーザー株式会社、東京大学)

本開発においては、高出力レーザーに適した量子ドット活性層及び光共振器の設計等を、量子ドットの利得媒質としての物理の理解に立脚して行い、大活性層体積を有する量子ドットレーザーにおける高出力かつ安定動作を実現する構造を明らかにするべく、試作を実施し、優れたデバイス特性の初期実証まで進めることができた。

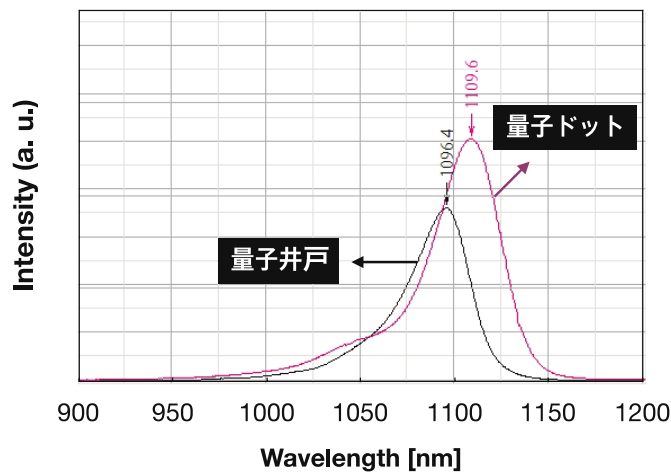
図Ⅲ2-3-5-2 に、本試作で用いた基本的な量子ドット構造の原子間力顕微鏡 (AFM) 写真を示す。現時点では、InGaAs を用いた量子ドット構造であり、量子ドット密度としては、 $7.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 程度のもとなっている。これを基本的な層構造とし、量子ドットの層数、障壁層・クラッド層の厚さ及び光共振器反射率等をパラメータとして振りつつ、最適な構造の調査を進めている。

本量子ドット構造については、PL 波長 $1.1 \mu\text{m}$ 程度で、密度の高いものを用いているが、今度、東京大学における成果も取り込み、より密度が高く、レーザー特性のさらなる改善が可能な活性層へと改善していく予定である。

現時点での量子ドットの発光特性を、ほぼ同じ波長で発光する量子井戸と比較した結果を図Ⅲ2-3-5-3に示す。532 nm の励起光を用いたフォトルミネッセンス発光特性であるが、量子ドットと量子井戸で、ほぼ同じ発光ピーク、半値幅のものが得られていることが明確である。実際には、若干量子ドットの方からが発光強度が高いレベルである。



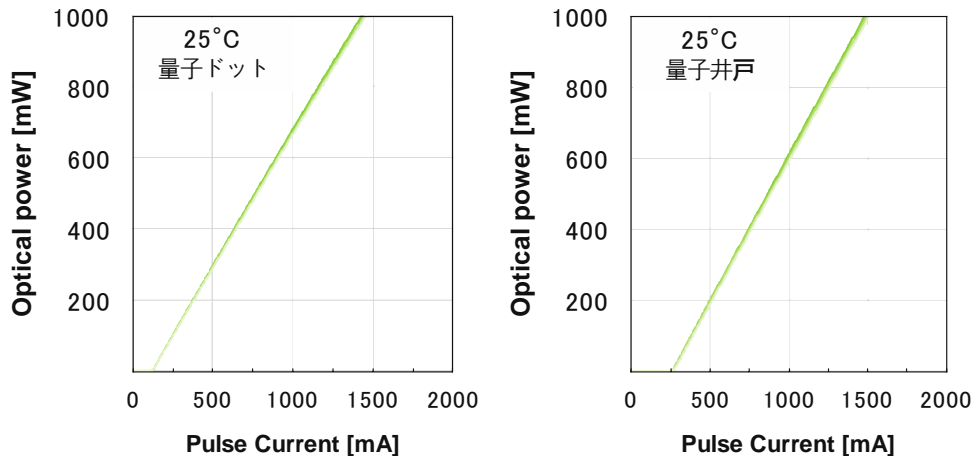
図Ⅲ2-3-5-2 レーザーに用いた、密度 $7.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ のInGaAs量子ドットのAFM像



図Ⅲ2-3-5-3 量子ドット活性層と量子井戸活性層の発光特性の比較 (PLスペクトル)

これらの活性層を元に、初期的な評価を行うべく、ブロードエリアストライプ構造の半導体レーザーの試作を行い、レーザー特性の評価を行った。図Ⅲ2-3-5-4 に、これらのレーザーの電流-光出力特性を示す。

これらは室温 (25 °C) での、パルス電流による測定結果であるが、従来用いられてきている量子井戸活性層と比較しても、現時点で初期的に作製した量子ドット活性層の構造にて、すでに同等の光出力が得られていることが明確である。さらには、発振閾値電流については量子ドットの

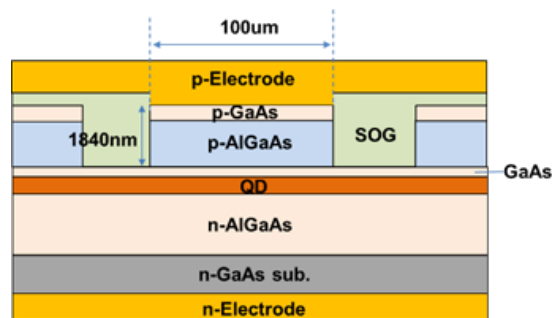


図Ⅲ2-3-5-4 量子ドット(QD)活性層と量子井戸(QW)活性層のレーザーにおける、電流-光出力特性

方が優れており、量子ドットにおける高い効率が実現できていることが実験的にも明らかになった。レーザー出力は 1 W であり、共振器長 1 mm、ストライプ幅 100 μm のレーザー構造であることを考慮すると、出力密度 10 W/mm² を達成していると結論付けられる。この値は、中間目標を上回る値となっている。

量子ドットの特徴として、温度上昇時にも特性変化が小さいことが明らかになっており、電流注入による温度上昇下の環境においても、この優れた特性が継続され、量子井戸より優れた特性が実現されていくことが期待される。

半導体レーザーの構造についても、検討、改善を行った。高出力特性を実現するにあたっては、活性層や、その周囲の抵抗成分より発生する発熱の影響を低減することが重要である。そのため、図Ⅲ2-3-5-5 に示す様なレーザー構造を設計し、実際の試作も行った。



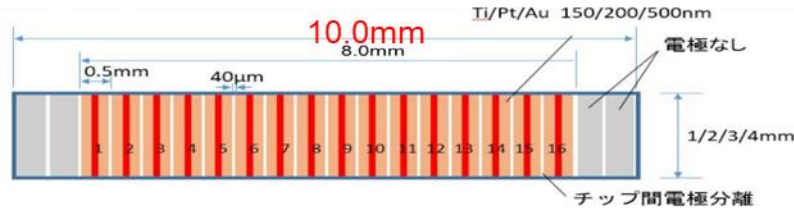
図Ⅲ2-3-5-5 高出力用に設計、製作した、量子ドット活性層半導体レーザー構造（断面図）

ここで、活性層からの発熱を電極側に速やかに移動させるべく、熱抵抗の小さい AlGaAs をクラッドとし、電極側への熱の移動効率を高めた。この基本的な構造を、さらなる高出力化のためのアレー構造とし、16 チャンネルの活性層を含むレーザーアレーを作製した。この構造を 図Ⅲ2-3-5-6 に示す。

各チャンネルは、100 μm の電極幅を有し、共振器長は 1、2、3、4 mm と振って作製している。またストライプ感覚は、0.5 mm となっている。この量子ドットレーザーアレイ構造について、

レーザー特性評価を共同で進めている段階であり、既に非常に優れた光出力が実現されている状況となっている。

今後、さらなる量子ドット活性層の改善とレーザー構造の最適設計により、より優れた特性の実証を行うべく、開発を進めていく予定である。

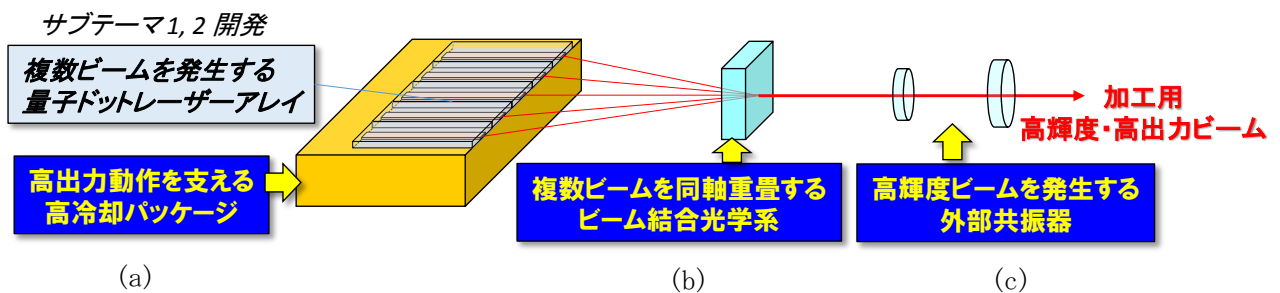


図Ⅲ2-3-5-6 16チャンネルを集積した、量子ドットレーザーアレイ構造（上面図）

3. 高出力量子ドットレーザー加工応用に向けた周辺要素技術開発（三菱電機株式会社）

高出力化に伴って、温度安定性に優れた量子ドットレーザーと雖も、効果的な排熱・冷却が必要となる。また、単一の半導体レーザーの出力では加工対象がごく限られた範囲となることから、幅広い加工応用のためには、複数の半導体レーザーを集積して加工に適した高輝度・高出力のビームを生成する技術が必要となる。

本研究開発では、集積化した高出力半導体レーザーによる高い発熱密度においても安定な動作を実現するために、高出力量子ドットレーザー用の高冷却パッケージを開発する。高冷却パッケージに搭載した高出力量子ドットレーザー発振ビームの特性評価と並行して、加工に適した高輝度・高出力ビームを生成するための技術として、複数ビームを同軸重畳するビーム結合光学系ならびに高集光ビームを発生する外部共振器に関する考案・試作・検証を実施し、高出力量子ドットレーザーの加工応用に向けた周辺要素技術の確立を図る。

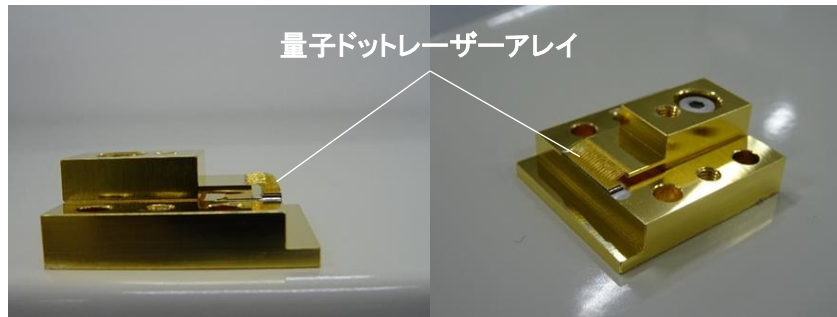


図Ⅲ2-3-5-7 加工応用に向けた周辺要素技術開発の概要

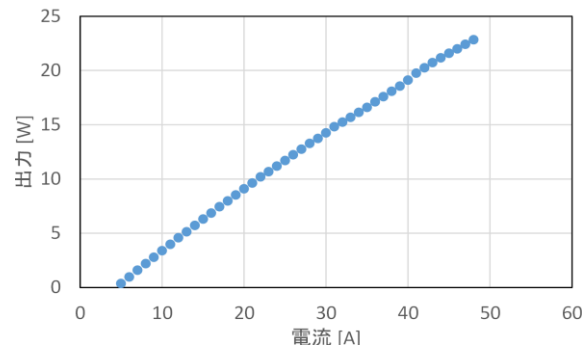
(a) 高冷却パッケージ開発

半導体レーザーチップの仕様検討、シミュレーションベースのパッケージ構造設計、ならびにダミーの半導体レーザーチップを用いたパッケージ製作プロセスの条件出しを経て、サブテーマ2において開発された発光点（エミッタ）数=16の高出力量子ドットレーザーアレイを搭載したパッケージを試作した。試作した量子ドットレーザーパッケージの外観を図Ⅲ2-3-5-8に示す。

図Ⅲ2-3-5-9 には、試作した量子ドットレーザーパッケージの入出力特性を示す。駆動電流 48 A において顕著な出力飽和を生じることなく集積パッケージ出力 23 W を得た。この結果は、試作したパッケージが顕著な出力飽和を生じることなく高い発熱を処理していることを示しており、今後進める高効率化、高出力化開発において有効な冷却手段を提供するものとする。



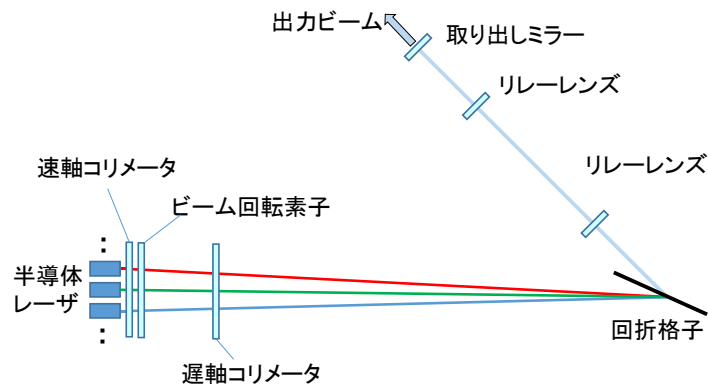
図Ⅲ2-3-5-8 試作量子ドットレーザーパッケージの外観



図Ⅲ2-3-5-9 試作パッケージの入出力特性

(b) ビーム結合光学系開発

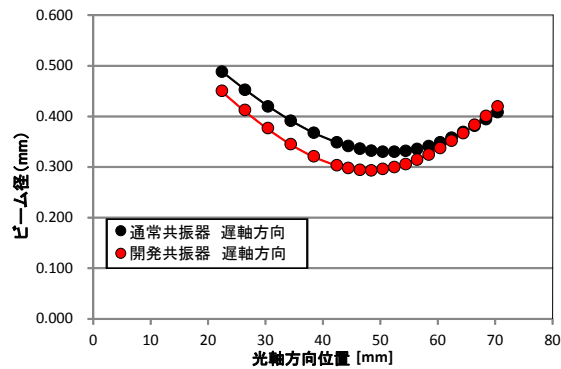
複数ビームを同一光軸に重畳する光学系として、回折格子の波長分散作用を利用して、僅かずつ波長の異なる複数のビームを同軸に結合する波長ビーム結合方式 (Wavelength Beam Combining) 光学系を試作し、動作を検証した。図Ⅲ2-3-5-10 に試作した結合光学系の概念構成を示す。複数ビームを同軸上に結合する動作を確認し、結合光学系の設計法ならびに具体的調整手法までの要素技術を確立した。



図Ⅲ2-3-5-10 波長ビーム結合光学系の概念構

(c) 高集光外部共振器開発

単一エミッタ自体の集光性を向上させる外部共振器の構成を考案し、試作・検証を行った。図Ⅲ2-3-5-10の共振器の取り出しミラーに高品質ビーム発生用のミラーを用いることによって、平面ミラーを取り出しミラーに使用した通常の共振器と比較して約10%の集光性(M2値)向上を確認した。また、出力に関しても通常共振器を約5%上回る結果を得た。



図Ⅲ2-3-5-11 従来共振器との集光性比較

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように中間目標の量子ドットレーザー出力密度 1 W/mm^2 可能性実証については達成した。また、最終目標である出力密度 10 W/mm^2 には満たない条件において、ビームを集積するための基礎技術を確立した。今後は、量子ドットレーザー出力密度および集積レーザー出力の増大に向けて、量子ドット結晶成長技術の向上、量子ドットレーザー構造の最適化、集積レーザー用の高冷却パッケージの高性能化を推進する。これまでの成果により、最終目標を達成できる見通しを十分持っている。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表・リストに記載している。

2-3-6. 「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）

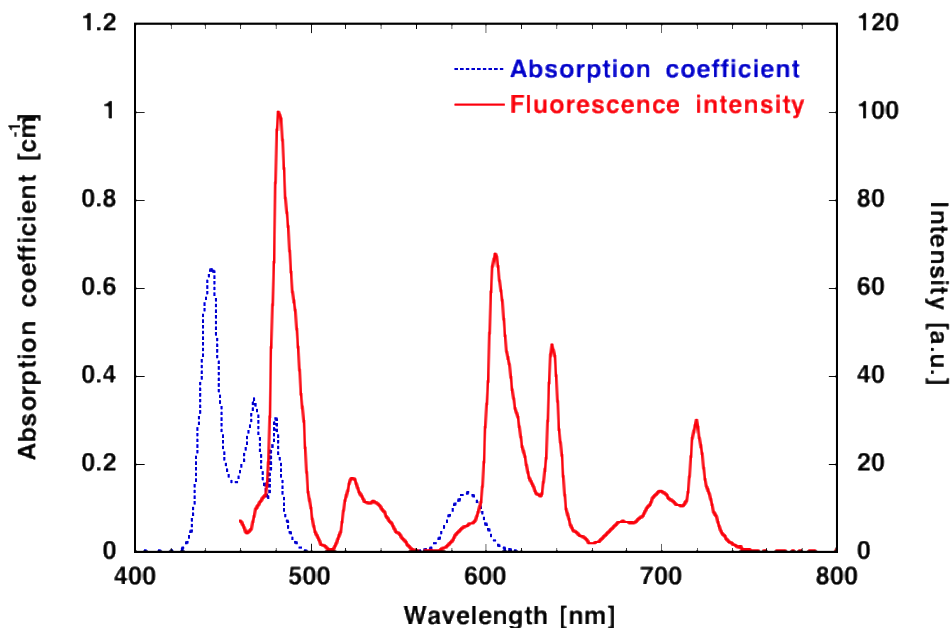
（1）事業の背景・意義（目的・概要）

我々の研究開発グループは、可視光ファイバレーザーを基本波とし、1回の波長変換により紫外（UV）光を発生し、従来にない高効率・高ビーム品位の連続光出力2W以上を有する固体UVレーザー光源を開発することを目的としている。この開発により、レーザー加工における省エネルギー化を進め、燃料消費、温室効果ガスの削減を図ると共に、日本のものづくり産業の競争力強化を図ることが期待できる。その成果である小型・高効率UVレーザー光源は、例えば3Dプリンタ、直接描画装置、光計測装置、露光装置、半導体検査装置、金属薄膜加工機等のへの応用が可能である。

現在市販されている連続波UVレーザーの問題点は下記の通りである。

- ① 近赤外からの波長変換はレーザー波長が離散的である。
- ② 266、355nmいずれも非線形波長変換が2回必要である。
- ③ He-Cdレーザーの高出力化は困難であり、固体化が必要である。

非線形現象は効率的動作が難しく、従来手法のUVレーザーはその動作を2回要求されている。また、325nm（He-Cdレーザー）付近で数多くの産業用途が既に存在していることから、UVレーザー波長の多様性は今後期待される。



図Ⅲ2-3-6-1 Prドープ耐候性フッ化物ガラスの吸収・蛍光スペクトル

従って、より多くの波長をUV光領域に提供することで、UV光応用は飛躍的に向上することが期待される。図Ⅲ2-3-6-1にPrドープ耐候性フッ化物ガラスの吸収・蛍光スペクトルを示す。図Ⅲ2-3-6-1に示す様にPrドープ耐候性フッ化物ガラスの蛍光はほぼ全ての可視帯域を網羅して

おり、またその蛍光効率も高く、高効率の基本波可視光レーザーが様々な波長において実現できる。

この様に、UV光源の多様性を与える手段として、我々は青色半導体レーザー励起によるPrドープ耐候性フッ化物可視光ファイバレーザーを基本波とし、1回の波長変換による高効率・高出力CW-UVレーザーの開発を進めている。波長変換プロセスは非線形光学効果であり、その数を減らすことで高効率化の助けになる事が期待できる。

ここで使用する青色半導体レーザー及び、耐候性フッ化物ガラス・ファイバは日本オリジナルの技術であり、潮解性が低く、耐候性フッ化物ガラスは従来のフッ化物ガラス（ZBLANガラス）に比べ500倍高い耐水性を持つ(株)住田光学ガラスにて開発された次世代の国産素材である。

以上を鑑み、我々の計画においては、可視光ファイバレーザーを基本波とし、波長変換技術を使って、最終的に波長320nm及び260nm帯で0.5W（平成30年度）及び2W（最終年度）のUVレーザーの出力を得る。それに係る技術要素の設計及び検証の後、プロトタイプ的设计、製作、及び評価と製品化を行う。またUVレーザーはビーム品質がTEM₀₀（M²<1.2）、低コスト化、コンパクト化、長寿命化を設計のコンセプトとする。

（2）研究開発目標と根拠

我々の開発する革新的小型・高効率UVレーザー光源における目標値は、以下の通りである。

表Ⅲ2-3-6-1 研究開発UVレーザーの目標値

項目	目標値
レーザー波長	320nm帯、260nm帯
レーザー出力	>0.5W、>2W（2タイプ）
発振横モード	TEM ₀₀ （M ² <1.2）
ウォールプラグ効率	>2%
寿命	>8700時間（1年）

レーザー出力は0.5W、2Wの2タイプを開発目標としている。また、波長選定は(株)金門光波の得意とする波長であり、既存ユーザーの取り込みも含めて320nmと、より深紫外（DUV）への革新的小型・高効率UVレーザー光源の展開を求めて260nmとした。その他の目標値はエンドユーザーからのニーズ「高出力、高ビーム品質、長寿命、コンパクト、低コスト化（含むランニングコスト）」の聞き取り調査等により、発振横モードTEM₀₀（M²<1.2）、寿命8700時間、コンパクト（He-Cdの1/6）、ウォールプラグ効率2%以上とした。

また、最終目標UV光2W、中間目標0.5Wを得るために、基本波の出力及び励起光出力を表Ⅲ2に示すように決定した。

表Ⅲ2-3-6-2 目標値と設定根拠

項目	最終目標	中間目標	設定根拠
UV出力	2W以上	0.5W以上	ユーザーニーズ及び現状の連続波UVレーザーアプリケーション調査
基本波出力	8W以上	2W以上	目標UV出力と波長変換効率（25%）より概算見積
励起光出力	20W以上	5W以上	目標基本波出力とレーザースロープ効率（40%）より概算見積

(3) 研究開発スケジュール

以下に研究開発スケジュールを示す。

表Ⅲ2-3-6-3 革新的小型化・高効率UVレーザー光源の開発スケジュール

項目	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	最終目標値
① 2WUVレーザーの開発	0.5WUVレーザー設計・製作 発振・動作検証、発振器安定		プロトタイプ設計製作	0.5WUVレーザーサンプル出荷・社内評価		0.5W、2Wレーザー検証・確立
	2WUVレーザー共振器・結晶安定化設計・検証			2WUVレーザープロトタイプの設計・製作	2WUVレーザーサンプル出荷社内評価	
	2WUVレーザー駆動回路レーザー冷却設計					
② 次世代機要素技術の開発（多波長によるUV、及び10W級超出力）	LDパワー向上 ダブルクダッドファイバ UVコーティング技術					要素技術の確立
	MOPA設計検討 多波長化検討					

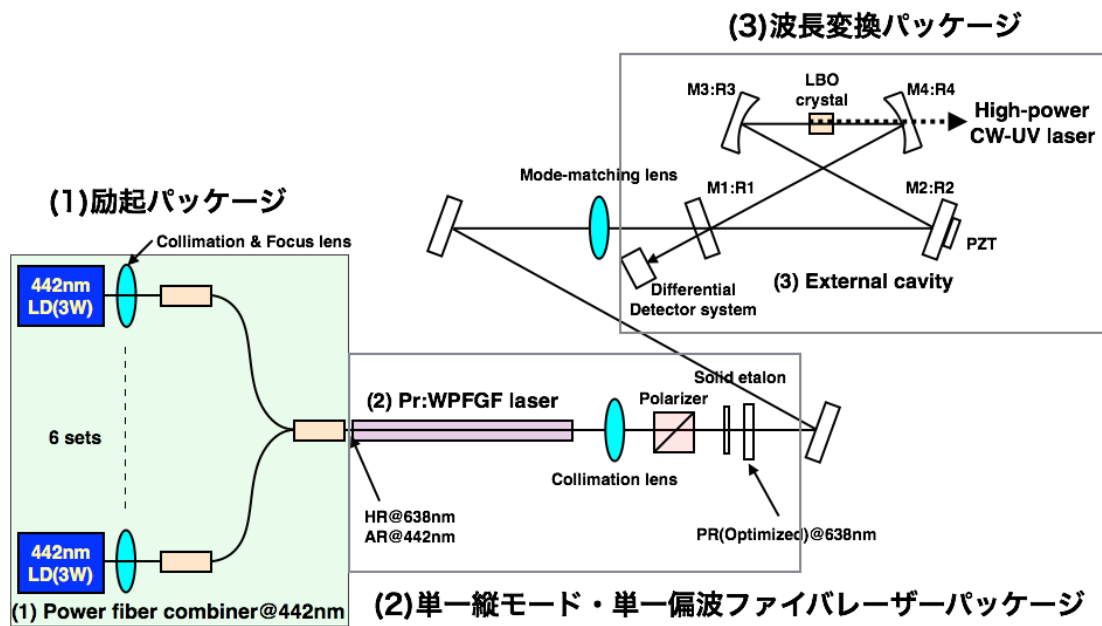
研究課題である「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」において、スムーズかつ、課題の明確化を計るため、開発要素を次の3つのパッケージに分類した。そして、その各パッケージの目標値を以下に示す。

① 波長変換パッケージ

中間目標値：0.5W以上

最終目標値：UV出力2W以上

- 直線偏光(1 : 1 0 0)
 シングルモード (TEM₀₀、M²<1. 2)
- ② 単一縦モード・単一偏波ファイバレーザパッケージ
 中間目標値 : 2W以上
 最終目標値 : 8W以上
 直線偏光(1 : 1 0 0)
 シングルモード (TEM₀₀、M²<1. 2)
- ③ 励起パッケージ
 中間目標値 : 5W以上
 最終目標値 : 20W以上



図Ⅲ2-3-6-2 開発3要素パッケージ

(4) 研究開発目標と達成状況

中間目標の達成状況を表Ⅲ2-3-6-4にまとめる。

表Ⅲ2-3-6-4 研究開発項目と達成状況

項目	UV出力/効率	基本波出力	励起光出力
中間目標	0.5W/25%	2W以上	5W以上
成果	0.058W/13.5%	1.04W	3.9W
達成度	△ (年度内達成見込み)	△ (年度内達成見込み)	△ (年度内達成見込み)
今後の課題	・共振器モードマッチの最適化 ・共振器位相ロック制御系の最適化とその採用	励起光出力の向上による出力向上	励起光学系光学部品のロス低減

コメント	<ul style="list-style-type: none"> ・変換効率は年度毎に目標をほぼ達成 ・UV出力は基本波出力の向上も重要 ・位相ロック制御系による効率向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・励起入力向上による出力向上が期待できる。 ・スロープ効率達成済 	<ul style="list-style-type: none"> ・各光学部品を精査、ロスの低減は十分可能
------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------

中間目標に関する今後の見通しについて以下にまとめる。

- ・励起光出力は中間目標に未達であるが、「(5) 成果の詳細」に示す光学系の再構築によるロスの低減によって、5.9Wの励起光出力の向上が期待でき、中間目標を達成する見通しである。
 - ・基本波出力については1.04Wの結果が得られている。上記で挙げた、励起光学系の再設計により励起入力の向上が期待されること、また、出力ミラー反射率の最適値の決定により、スロープ効率の向上が得られたことなどから基本波2Wは達成できる見通しが立った。
 - ・UV出力は中間目標未達だが58mWの結果が得られている。励起光出力の見通し及び基本波出力の見通しと、位相ロック制御の最適化により基本波2Wの25%の0.5Wの見通しが立った。

(5) 成果の詳細

(a) サブテーマ① 0.5W/2WプロトタイプUVレーザーの設計、製作、及び評価

・基本波レーザー特性の向上

○励起パッケージ

- 1) 励起LD冷却効率の向上→励起波長変動及び、励起光出力飽和の低減を達成した。
- 2) 励起LD光学系の光学計算による設計と評価→集光スポット位置の最適化及び、集光NAの最適化によるファイバ結合効率の向上を達成した。
- 3) 各光学素子の透過効率の評価→より良い透過率を持つ部品へ交換する事で、励起LDの伝達効率の向上を達成した。

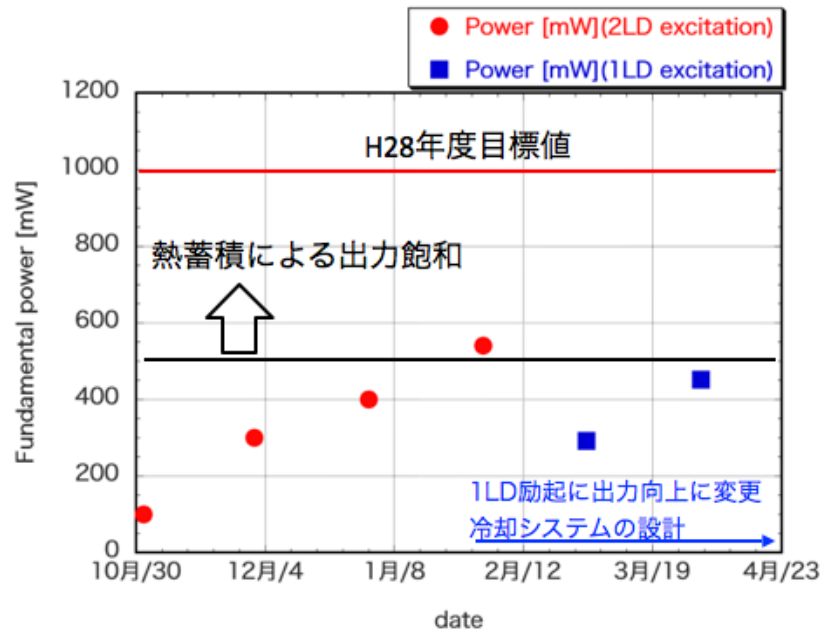
○ファイバレーザーパッケージ

共振器ロス低減へ向け次の取り組みを行った。

- 1) ファイバ端面への直接コーティングのテスト
- 2) 回折格子狭線化からエタロン狭線化へ→共振器ロスの低減により基本波出力の向上を達成した。

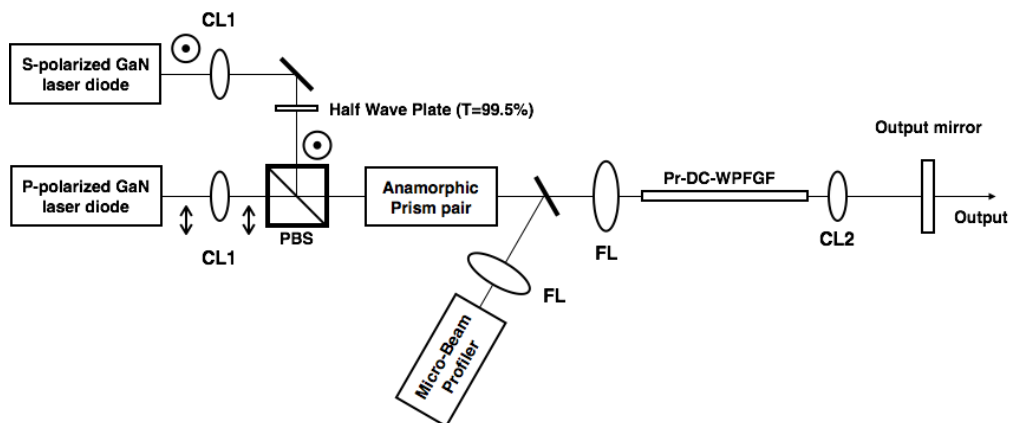
以上の取り組みにより、図Ⅲ2-3-6-3に示す基本波出力の向上を得た。基本波出力は500mWまで順調に増加したが、それ以降飽和特性を示した(平成29年2月時点)。出力飽和が発生したため方針変換し、1LD励起のパワースケーリングから2LDで基本波出力1W達成可能な光学設計を行った。また、同時にファイバの冷却システムの設計を進めた。また、出力向上のため、ダブルクラッドファイバの内クラッド径の拡大の検討を進めた。偏光光学素子を用いた直線偏光

機構を設計し、偏光比 (>1:100) にて動作することを評価した。また、次年度計画項目の基本波狭帯域発振 (<0.1nm) を確認した。

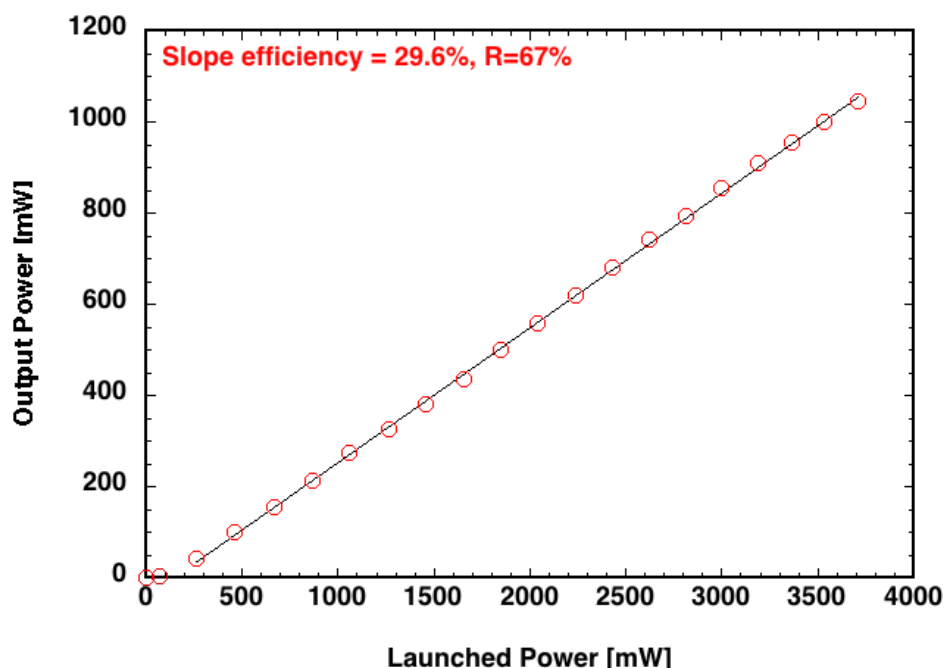


図Ⅲ2-3-6-3 基本波出力向上変遷（平成 28 年度）

図Ⅲ2-3-6-4 に基本波レーザーの構成図を示す。LD出力光の偏波特性を利用して、偏光ビームスプリッタ（PBS）により偏波合成する構成となっている。LD光はコリメートレンズ（CL1）により楕円状の平行光を得た後、アナモルフィックプリズムペアで擬似円形状にビーム成形される。そのビームはフォーカスレンズにより、Prドープ耐候性フッ化物ダブルクラッドファイバ（Pr-DC-WPFGF）に集光される。ファイバに入射されるビームスポット系は入射ビームの一部を切り出した光（折り返しミラーの透過光）を同じFLにて集光しマイクロビームプロファイラにて集光スポット径をモニタした。



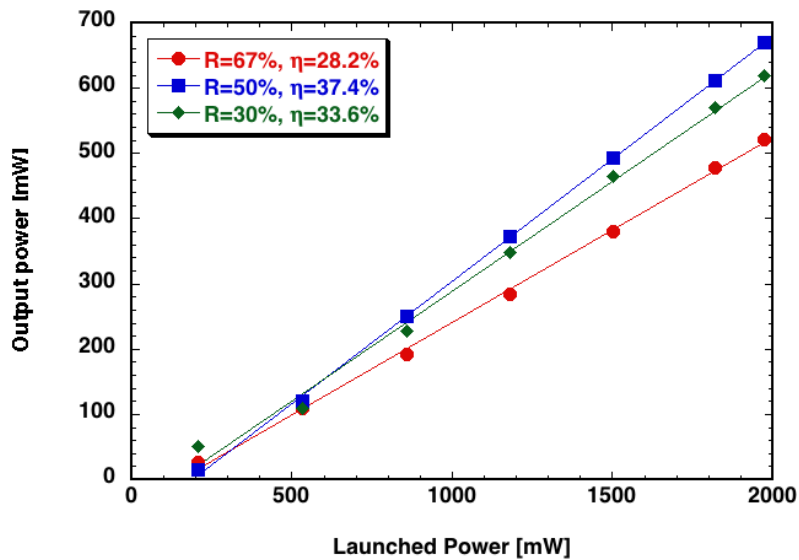
図Ⅲ2-3-6-4 基本波レーザー構成図



図Ⅲ2-3-6-5 現状における最高出力結果

図Ⅲ2-3-6-5に現状における最大基本波出力結果を示す。最大基本波出力は1.04W、その時のスロープ効率は29.6%であり、共振器出力鏡反射率は67%あった。現時点では基本波出力の中間目標値2Wに対し、達成度は約50%になる。原因を分析すると次の様になる。ここまでの開発では、市販(Thorlabs等)の光学部品(既製品)を用いて設計しており、LD光の光ファイバへの到達効率は55.9%(S偏光を採用)と見積もられる。例えば、LD光(2個)の出力を7.0Wとしたとき、Prファイバに入射するパワーは3.9Wと見積もられ、現状の励起状態と良く一致する。ここで、コリメート光学系を2枚の最適設計されたファーストアクシスコリメートレンズ(FAC)とスローアクシスコリメートレンズ(SAC)を用い、ロスが多いアナモルフィックプリズムペアを取り除くこと、特殊設計の集光レンズにより、総合効率を83.8%までの向上が期待できる。この時、Prファイバに入射するパワーは5.9Wまで向上する。

次に、基本波レーザー共振器の最適化実験を行った結果を図Ⅲ2-3-6-6に示す。共振器の最適化は出力鏡の反射率をパラメータとしてそのスロープ効率を測定し、その最大値を測定することで決定される。基本的な実験系は図Ⅲ2-3-6-2に示すとおりである。図Ⅲ2-3-6-6に示す様に、最もスロープ効率及び基本波出力の高い出力鏡反射率出力はR=50%であった。その時のスロープ効率は37.4%であった。この結果より、上で述べた改良励起入力光学系を、出力鏡反射率R=50%の共振器に導入したと仮定し、グラフを挿すると基本波出力は2.1Wが期待される。以上、各光学部品の透過率改善とスロープ効率向上により、基本波出力2W以上の目標値を達成できる見通しが立った。なお、以上の基本波レーザーの高効率動作を実現する上で、ファイバの冷却は非常に重要である。平成29年度に排熱対策を行うことで、基本波出力の向上に貢献している。



図Ⅲ2-3-6-6 基本波レーザー共振器の最適設計

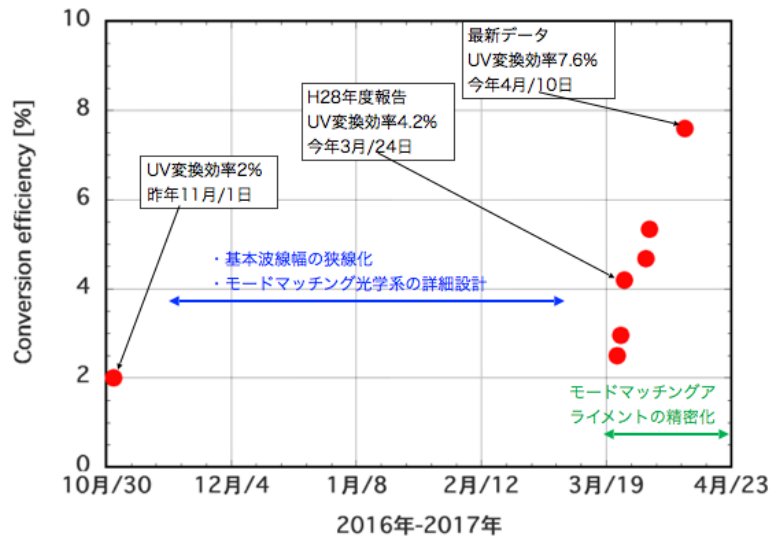
・波長変換光学系構築

大阪大学及び金門光波はリング共振器、V字内部共振器型の設計を行い、波長変換、及び共振器長安定化の設計と設計の妥当性の評価を行った。基本波、UV光の研究開発のために必要なインフラ（クリーンルーム、光スペクトラムアナライザ、ビームプロファイラ、ファイバ研磨機、倒立型金属顕微鏡（400倍）を購入した。また、波長変換効率の向上のための取り組みを以下に示す。

○波長変換パッケージ

- 1) 外部共振器のアラインメント手法の最適化
- 2) シングルモード基本波レーザーとUV波長変換外部共振器のモードマッチング最適化

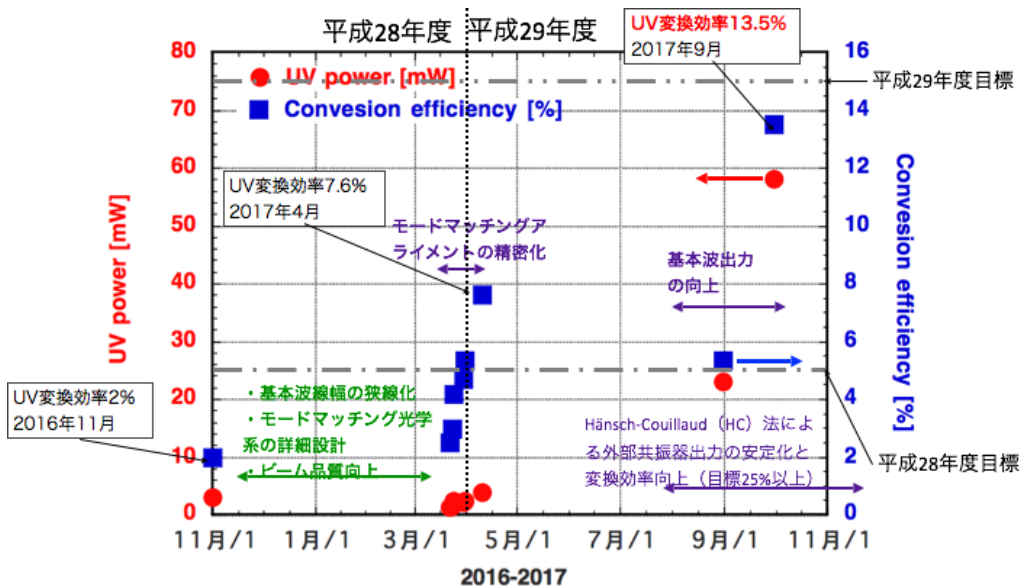
以上の取り組みにより得られた結果を図Ⅲ2-3-6-7に示す。これらの取り組みにより平成28年度の波長変換効率5%を達成した。



図Ⅲ2-3-6-7 UV 変換効率向上の変遷（平成 28 年度）

引き続き、リング共振器（外部共振器）によるUV変換効率の向上を行った。図Ⅲ2-3-6-8 にUV出力及び、変換効率の推移を示す。最大UV出力については58mW、最大変換効率13.5%を達成している。UV出力及び、変換効率の向上には次の要因が関係している。

- 1) 基本波ビーム品質の向上と共振器光学系へのモードマッチング設計
- 2) 共振器アラインメントの最適化
- 3) 基本波出力の向上
- 4) 共振器位相ロック制御



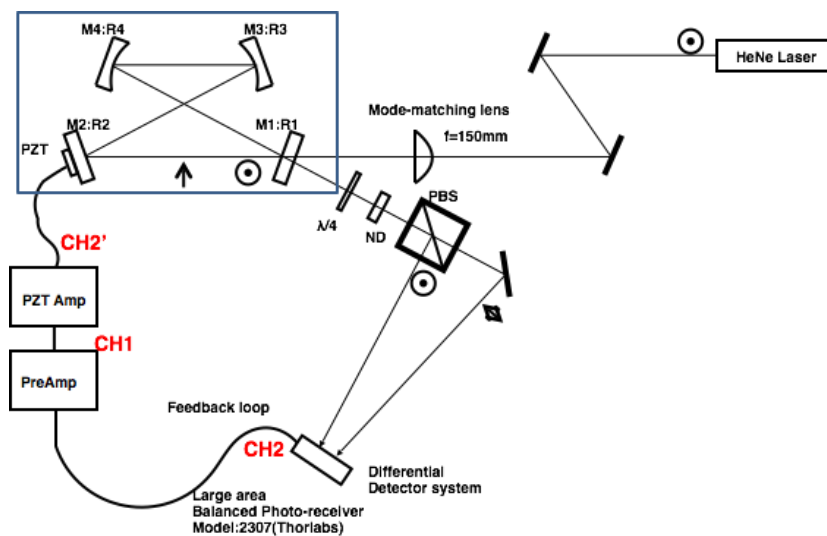
図Ⅲ2-3-6-8 UV出力及び変換効率の推移

図Ⅲ2-3-6-9 に示す様に、出力向上にはそれぞれ異なる要因がある事が解る。今後更に出力の向上と高効率動作を実現するには、共振器の位相制御が重要な技術となる。共振器位相制御に関する取り組みとして最初に我々が行ったのは、He-Neレーザーを用い、波長変換の結晶を設置

しない最も簡単な構造で、共振器の位相ロック状態を確認することである。HC法の論文に習い、 piezo素子を制御するフィードバックシステムを構築した。そのフィードバックシステムを構築する上で、まずは次の評価実験を行った。

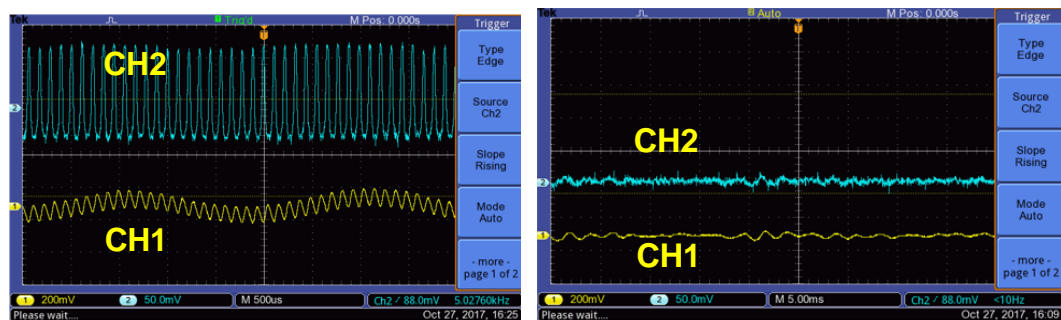
- 1) piezo素子の選択
- 2) ミラーの選択(サイズ、厚み)と設置方法(接着ポイント)
- 3) 検出器増幅のプリアンプ作成と評価(周波数特性)
- 4) piezo駆動アンプの周波数特性の測定
- 5) piezo駆動周波数応答特性

以上の測定によって、使用するpiezo素子、プリアンプの回路定数の決定、piezo駆動アンプの選択、ミラーのpiezoへの取り付け方法を決定した。



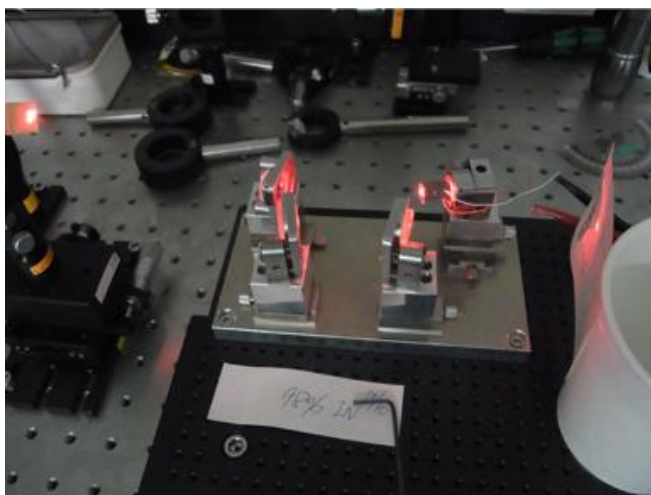
図Ⅲ2-3-6-9 外部共振器のフィードバックシステムによる位相ロック制御

次に図Ⅲ2-3-6-9に示すフィードバック系を用いて、エラーファンクションの観測を行った後、位相ロック制御の実験を行った。外部共振器を丁寧にアラインメント調整した後、共振器が擾乱により、ゆっくりと明滅を繰り返す状態になった後、フィードバック制御を始め、アンプのオフセットを調整する事で、位相の振動状態の信号(図Ⅲ2-3-6-10(a))から、位相ロック状態の信号へ遷移し、共振器内部の光強度が著しく増加した。



(a) 位相の振動状態の信号

(b) 位相ロック状態の信号

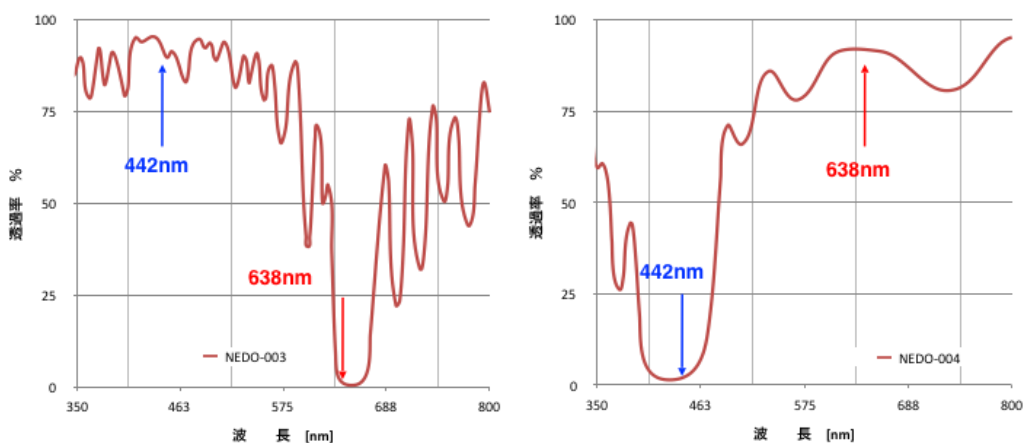


図Ⅲ2-3-6-10 外部共振器の位相ロック状態

これにより共振器位相をロックする手法が理解できたので、次はPrドープファイバレーザーを用いた位相ロック実験を行うための詳細設計と実験システムの構築を行う段階へと移った。これにより、外部共振器の位相ロック制御を用いたUV出力の向上得るめどが立ったと言える。

・基本波ファイバの端面コーティング及びUVレーザーミラーの高レーザー光耐性を持つコーティング技術の開発

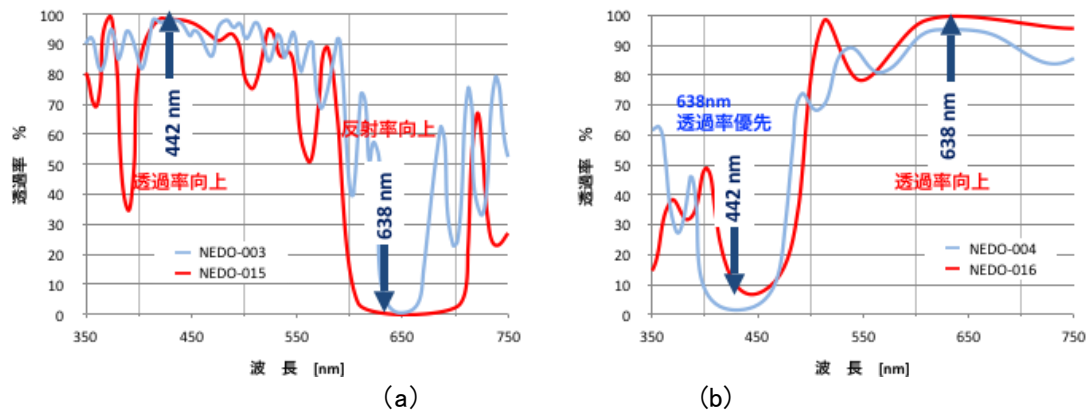
レーザー総研は2W高品質UVレーザー光源プロトタイプ及び次世代機に要求される高レーザー光耐性をもつ可視、UV域特殊ミラー（コーティング）の設計及び試作を行った。ファイバ端面への直接コーティングが可能となるように、コーティングチャンバー、温度履歴の最適化の準備も行った。



図Ⅲ2-3-6-11 基本波レーザー用誘電体多層膜ミラーコーティング（右）励起側高反射ミラー、（左）出射側ARコーティング

引き続き、基本波出力10W発振に必要な高耐力端面コーティングの設計、製作、及び評価を行う。またUV光へ高効率波長変換に必要な低散乱、高反射率コートの試作を行った。

基本波レーザーの高効率動作を実現する上で、ファイバ端面への直接コーティング技術の向上は必須の技術開発である。基本波出力効率よく取り出すための誘電体コーティングの最適設計を行い、それを達成した。図Ⅲ2-3-6-12はそのコーティングスペクトルを示しており、励起LD波長442nm、ファイバ発振波長638nmに対して、光学特性を改善(赤線改善後)した。ファイバレーザー構成要求に合わせたカスタム仕様を実現した。



図Ⅲ2-3-6-12 ファイバ端面コーティングの設計と試作。
(a) 励起側ファイバ端面、(b) 出射側ファイバ端面

・0.5W プロトタイプUVレーザーの設計、製作、及び評価

展示会への出展履歴でも分かるように、これまで4回の展示会出展を行い、積極的な製品紹介とともに、カスタマーの要望を聴取している。図Ⅲ2-3-6-13はOPIC2018での出展展示の様態を示している。



図Ⅲ2-3-6-13 OPIC2018 展示会出展プロトタイプ

・2W出力プロトタイプUVレーザー設計、製作、及び評価

金門光波は多段対応半導体レーザー駆動回路を設計し、製作検証する。また半導体レーザーの冷却設計、製作、及び評価を行った。

(b) サブテーマ② 次世代機に関する要素技術の開発

・ UV 10Wのための基本波レーザー出力の向上

GaN-LD 光源 (442nm) ファイバカップリング集光光学系の最適設計、複数個の GaN 半導体レーザーのレーザー光を可視光ファイバクラッドに集光させる空間光学系型、パワーコンバイナの設計を行った。更に設計結果を具体化すべく試作し評価を行った。本レーザー開発においては、中心的に利用している Pr ドープ耐候性フッ化物ダブルクラッドファイバは(株)住田光学ガラスの協力により開発を進めている。このファイバはこれまでのフッ化物ファイバには無い耐候性に優れた特性をもつ。UV10W 達成に必要な構成は、大口径のダブルクラッドファイバと励起コンバイナであり、ダブルクラッドファイバの高性能化はファイバレーザー開発と同時に進められており、コンバイナは空間結合型並びに、GaN-LD 用ファイバ型の開発検討を始めた。

(6) 最終目標の達成の見通し

中間目標の達成見通しは立っており、中間目標終了時において、高効率基本波ファイバレーザー構成及び、高効率波長変換共振器の基本開発項目の原理技術取得は終了していると考えられる。以降は、原理技術の取得では無く、それまでに開発した技術のモディファイであるので、パワーコンバイナ及び、大口径内クラッド DC ファイバの開発により、UV 光 2W (基本波 8W) の達成は可能である。

①ダブルクラッド耐候性フッ化物 Pr ドープシングルモードファイバ励起パワーの向上 のため、内クラッド (励起閉じ込め用クラッド) 径を拡大したものの開発を行う。また、ファイバの曲げを取り入れるなど、より大口径の光ファイバにおいてもシングルモード動作の可能性を検討する。

②GaN-LD 光源の高効率パワー多重化 (パワーコンバイナ)

レンズ結合型はプロジェクト内連携により島津製作所のファイバ結合型高輝度青色ダイレクトダイオードレーザーの利用の他、次の世代のファイバ型パワーコンバイナの設計・開発を行う。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。成果の普及に関しては、OPIC 2017、2018 において論文の発表を行い、昨年のドイツおよび本年のアメリカ、中国でのレーザーの展示会において、プロトタイプレーザーの展示し市場動向の調査を行った。目下、開発品の説明を積極的に行いエンドユーザーへの働きかけを行っている。

2-4. 研究開発項目④「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」

2-4-1. 「レーザー加工プラットフォームの構築」（実施先：東京大学－再委託先 東北大学、産業技術総合研究所、ギガフォトン株式会社、大阪大学－共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所）

本研究開発テーマでは、レーザー加工学理を解明し被加工材料の特性に合った高品位かつ高効率な加工を実現するために、最適な加工パラメータを抽出するレーザー加工テストプラットフォームの構築を行う。最終的には、最適レーザー加工探索と加工データベース構築を行う体制を構築し、産業界に最適レーザー加工レシピの提供を目指す。

2-4-1-1. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「時間制御型レーザー加工テスト加工装置の開発、波長制御型レーザー加工テスト装置の開発、プラットフォームの整備と運営、データベースの構築」（実施先：東京大学－再委託先 東北大学、産業技術総合研究所）

（1）事業の背景・意義（目的・概要）

（a）時間制御型レーザー加工テスト装置の開発

これまでのレーザー加工では、連続（CW）光あるいは、ナノ秒よりも長いパルス幅のレーザー光が用いられてきた。これは、レーザー光を熱に変換し被加工材料の切断、融着などを行う、いわゆる熱加工を基本としていたため、kW級以上の大出力化が実現されているCO₂レーザー、ファイバレーザーが主として用いられてきた。しかしながら、2000年以降、フェムト秒からピコ秒領域の極短パルスを用いると、従来とは異なり、溶融痕がなく、良好な加工痕が実現できるとの報告があり、世界の研究開発機関や企業で、短パルスレーザー光を用いた“非熱的加工”の研究開発が加速している。この極短パルスのレーザー光を用いたレーザー加工技術を確立することは、レーザー加工技術における日本の産業競争力の優位性を確保する上で不可欠である。

本技術開発を進めるにあたり、時間制御型レーザー加工テスト加工装置の開発を進めている。これは、レーザー加工テストプラットフォーム構築に必要なパルス幅、繰り返し周期、パワーを広範に制御できるレーザー装置を開発する。特に、省エネ加工に向けた非熱的加工の探索をはかるためには、材料における多様な熱拡散現象等の影響を制御する必要があり、従来になく広範な時間域にわたるパルス幅可変性と、産業用途の条件出しを目的とする試験加工に必要な高出力の両立を目標とする。

レーザー加工のパルス幅依存性に関する学理の理解も深めつつ、被加工材料の特性に最適なパルス幅等の時間領域加工条件を探索するため、パルス幅を連続可変（サブピコ秒～マイクロ秒）しながら、産業用途で求められる高出力（100W以上）照射での加工データの蓄積が可能な装置を構築する。そのために、(i)チャープパルス増幅方式のファイバレーザーシステム、また、これのシードレーザーとして使用できる(ii)時間波形制御可能な半導体レーザー（LD）システム、等の技術を組み合わせる。

これらの装置群は、レーザー加工プラットフォームに提供し、主に時間領域におけるレーザー加工学理の解明及び加工データベースの構築を行う。

(b) 波長制御型レーザー加工テスト装置の開発

前述のように、これまでのレーザー加工では、CO₂あるいはファイバレーザーとその第2高調波等が用いられてきた。その結果、レーザー加工に提供されているレーザー波長は、10 μ m帯、1 μ m帯、あるいは、その高調波と限定されている。しかし、レーザー加工において重要なのは、被加工材料の光学特性を考慮に入れたレーザー波長を選択することである。しかしながら、レーザー光を熱に変換することに注視してきたため、大出力化が実現されているレーザーが用いられてきた。このような「レーザー装置主体のレーザー加工」を、被加工材料の光学特性を考慮し、個々の被加工材料に最適な波長を用いる「被加工材料主体のレーザー加工」に変換することができれば、その生産性の向上、CO₂排出の低減等の経済効果が期待でき、日本の産業競争力向上に大きな効果が期待できる。

一方、被レーザー加工材料の光特性は、レーザーと物質との相互作用の学理そのものである。また、加工というプロセスは、固体から液体、気体、プラズマへの相変化であり、さらには、原子間結合の切断という物理である。これは、非平衡、非線形、非開放系という非常に難しい物理領域であり、単に、静的な光学特性に関する情報が得られていたとしても、加工中には、その特性そのものが大きく変動しているはずで、動的特性に関しては、ほとんど理解が行われていない。そのため、現在のレーザー加工技術は、勘と経験に基づいた製造技術ということができ、学理の裏付けという観点では、不十分である。このようなレーザー加工技術を、再現性、制御性の高い、さらには、新規材料に対するレーザー加工条件の最適化に要する時間を短縮するために、レーザーと物質の相互作用について、その解明が求められる。そして、その知見は、レーザー波長の最適化だけでなく、パルス幅の最適化にも貢献することができる。

波長制御型レーザー加工テスト装置については、被加工材料の特性に最適な波長の探索とともにレーザー加工のパルス波長依存性に関する学理解明を目的とした研究開発を行う。そのために、赤外から深紫外域までの波長を選択して出力し、加工及び観察を行うことが可能な波長制御型レーザー加工装置を構築する。また、加工プロセス及び加工結果を評価するために有用な観察方法を提案・構築する。これらの装置によってレーザー加工プラットフォームを構築し、主に波長領域におけるレーザー加工学理の解明及び加工データベースの構築を行う。

(c) レーザー加工プラットフォームの整備と運営、レーザー加工データベースの構築

多種多様な材料に対するレーザー加工の最適レシピを創るためには、レーザー加工技術者の経験と勘に頼った膨大な試行錯誤が必要とされる。そこで、レーザー加工の最適条件を迅速に導き出すためのレーザー加工プラットフォームの構築を行う。本レーザー加工プラットフォームでは条件可変の多種試験用レーザー加工装置、計測評価装置、加工学理の解明及びレーザー加工データベースを一体的に開発することによって、産業界へのレーザー加工レシピの提供を目指す。

(2) 研究開発目標と根拠

パルスレーザー加工においては、超短パルス化による熱負荷の低減効果は多くの事例で確認されており、変成を最小化した高品位加工が原理的には可能であることも認められているが、一方で、産業的に求められる高速加工を求めて高繰返しや高強度での照射を行うと、品質上の優位性が失われる、割れなどの思わぬ欠点が発生するなど、限界があることも知られている。すなわち、実用的な加工条件を想定した高出力での広範囲なパラメータ可変が、真に最適な加工条件出しのために極めて重要である。

多様な時間領域での現象を考慮する上で、サブピコ秒からサブナノ秒の可変域によって、電子-格子緩和時間、中性分子やイオン種の放出、プラズマの生成などマイクロからマクロへ繋がる加工関連現象をカバーできる。さらに、サブナノ秒からマイクロ秒では、加工対象物スケールでのエネルギー流入と散逸、熱拡散が制御できる。ファイバレーザーによるチャープパルス増幅と時間波形制御されたLDシードの技術を組み合わせることで、従来のレーザー加工に例を見ない、サブピコ秒からマイクロ秒の極めて広範囲なパルス幅における条件出しの実現を最終目標に設定した。また、パルスエネルギーは、実際的な加工で主流であるガルバノスキャナーとf-θレンズの組み合わせで扱える集光条件（焦点距離>10cm）において、アブレーション加工条件出しに必要なフルエンス（J/cm²）を確保出来る100μJを中間目標とし、長パルス域や高速加工の為にはさらなるフルエンスや瞬時強度（W/cm²）の増加が求められることから、最終目標では、mJ級に向けた高エネルギー化も図ることとした。さらに平均出力については、金属、セラミクス、ガラス等の薄板切断、穴あけなどの高品位加工機としてのユーザーに対応できる100Wを中間目標とし、最終目標では、さらに高速加工や厚物等へ発展させるための高出力化を図る。

また、レーザー加工に用いる波長に関しては、ガラスや誘電体結晶（サファイア等）では、光吸収が大きくなるUV領域でのレーザー加工が注目されており、一方、樹脂、プラスチックのレーザー加工では、近赤外（特に波長2μm以上）でのレーザー光が候補と上げられている。このような状況から、波長可変型としては、UVから3μmに渡る波長領域で、30フェムト秒および100フェムト秒の時間領域での光学特性評価を実現することを目標と設定した。

表Ⅲ2-4-1-1-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
④-1-1(a) 時間制御型レーザー加工テスト加工装置 (i) ファイバレーザー (ii) 半導体レーザー	高パワーのパルス幅可変レーザー出力による試作加工・その場計測への適用。 (i) サブピコ秒-サブナノ秒パルス幅可変。mJ級、kW級 (ii) サブナノ秒-マイクロ秒領域、時間波形制御。	パルスレーザー加工の主な対象をカバーする。	(i) サブピコ秒-サブナノ秒、100μJ、100W。試験加工に着手。 (ii) 増幅器シード用レーザー発振器。	(i) パルスレーザーアブレーション加工の条件出しに必要な性能。 (ii) サブナノ秒以上の長時間領域に対応。

④-1-1 (b)	レーザー加工プラットフォームに供給し最適条件探索及び学理解明。 波長領域は DUV から中赤外まで	CFRP、ガラス材料は UV、DUV 領域で、プラスチックは赤外領域に吸収があるため。	波長制御型レーザープラットフォーム構築 レーザー加工における波長依存性の探索開始。	CFRP、ガラス材料は UV、DUV 領域で、プラスチックは赤外領域での光学特性の把握が必要なため。
④-1-1 (c)	開発成果によるレーザー加工プラットフォームの運用及びデータベースの構築。	協調領域の構築に有用な加工プラットフォームおよび加工データベースが存在していない。産業界に大きな力となると予想。	レーザー加工プラットフォームの運用及びデータベースの構築開始。	最終目標と同じ

(3) 研究開発スケジュール

下記表Ⅲ2-4-1-2 に目標を達成するための研究開発スケジュールを表にして記載する。

表Ⅲ2-4-1-1-2 開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
④-1-1 (a) (i) ファイバレーザー (ii) 半導体レーザー	時間制御型レーザー加工装置の設計・開発		100W 動作	高輝度・高出力化		レーザー加工プラットフォームの構築および、加工データベースの整備
	LD 設計・試作・評価 10ps-1μs		改良型 LD 試作 数 ps-1μs 制御性	改良型 LD 試作 1ps 制御性	光源加工応用 機能評価	
10ps-1μs 駆動技術 中間増幅		LD 発振器製作 数 W 級出力	光源プロト タイプ試作	柏サイトで 加工応用試験		
④-1-1 (b)	環境整備・装置開発 加工試験開始		プラットフォームの構築・運用 シミュレーション		加工テスト運用 推進	
④-1-1 (c)	運用検討	環境整備 小型評価装置 導入	運用開始 データベース 構築開始	UV テスト加工 装置導入 データベース パラメータ検討	システム 構築	

(4) 研究開発目標と達成状況

表Ⅲ2-4-1-1-3 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
④-1-1(a) -(i) -(ii)	(i) サブピコ秒-サブナノ秒、100μJ、100W。試験加工に着手。 (ii) 増幅器シード用レーザー発振器	(i) パルス幅可変、400fs～400ps、最大出力：107μJ、107W。 試験加工の実施。 (ii) 半導体レーザーシステムによりサブns～サブμsの可変動作確認。	◎	H30年度末までの中間目標を1年前倒しで達成した。 今後、加工プラットフォームとしての活用を通じ、最終目標の達成と実用化・事業化に向けた取り組みを加速する。
④-1-1(b)	・波長制御型レーザープラットフォーム構築。 ・レーザー加工における波長依存性の探索開始。	・超短パルス波長可変レーザー加工システムの構築→加工実験開始。 ・波長依存性探索のための新評価装置開発着手。	◎	
④-1-1(c)	・レーザー加工プラットフォームの運用及びデータベースの構築開始。	・レーザー加工プラットフォームの構築を進めた。 ・データベースのプロトタイプ開発。	◎	プラットフォームのおよび、データベースの構築は順調に進んでいる。今後、これを確実に進展させる。

時間制御型レーザー加工テスト装置の開発において、(i)ファイバレーザー関連技術では、100Wを超える出力でのサブピコ秒～サブナノ秒のパルス幅可変機能を確認し、試験加工に着手できている。中間目標を前倒しで達成している。(ii)半導体レーザー関連技術では、広範な時間域でのパルス幅可変動作の開発が順調に進んでおり、中間目標のLDシードレーザーシステムの構築に問題ない。

波長制御型レーザープラットフォームは光源の整備は1年前倒しで完了し、中間目標を前倒しで達成している。加工の波長依存の実験も始まっている。

レーザー加工プラットフォームの構築は柏集中研を中心に順調に進んでいる。また、計画にはなかったが、本郷地区にも加工プラットフォーム(166m²)を構築することとした。

加工データベースは既に5万点の加工データを集めるに至っている。

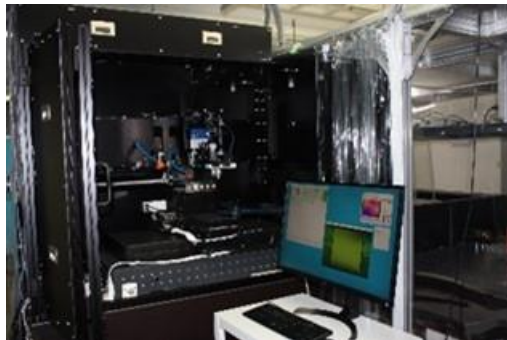
(5) 成果の詳細

(a) 時間制御型レーザー加工テスト装置の開発

(i) Yb 添加ファイバを用いたチャープパルス増幅方式の高出力パルス幅可変レーザーシステムを開発し、さらに音響光学 (AO) 変調器による高速 ($<1\mu\text{s}$) の断続制御、大型ステージ、ガルバノスキャナ、制御とモニター装置等と組み合わせた試験加工装置を開発した。また、これを用いた試験加工に着手した。さらに、(ii) 10ps から $1\mu\text{s}$ 領域の発振器用 LD のチップ作製と実装を行いつつ、時間幅 10ps から $1\mu\text{s}$ の光パルスを任意繰り返しで発生させる駆動技術開発と、駆動回路および低ノイズ光増幅器の設計・製作を行った。

(i) ファイバレーザー

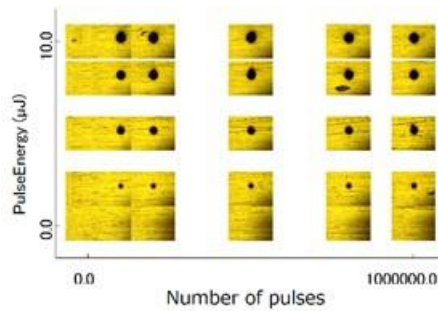
開発したレーザーシステムでは、ファイバリング構造の偏波回転モード同期発振器 (繰返し 75MHz、50mW) を種パルスとし、パルスを伸長した後、繰返し分周、前段増幅等の諸技術により、繰返し周波数 1 MHz の被増幅チャープパルスを用意した。これを、Yb 添加フォトニック結晶大口径ファイバ増幅器、次いで、ロッドファイバ増幅器により増幅した。出力は、可動式の回折格子対を用いて、パルス幅を可変化した。高出力でのパルス幅可変動作試験で、400fs-400ps の範囲で可変動作を確認できた。また、最大出力 107W (パルスエネルギー: $107\mu\text{J}/\text{pulse}$) が得られ、アブレーション等の加工試験に十分な強度である。



図Ⅲ2-4-1-1-1 時間制御型レーザー加工
テスト装置の外観

開発した試験加工装置 (図Ⅲ2-4-1-1-1) によるパラメータ可変加工の着手として、銅板にアブレーション加工を行った。照射パルスエネルギーを $0.1\sim 10\mu\text{J}$ の範囲で 9 点、照射パルス数を $1\sim$

$1,000,000$ の範囲で変化させた (25 点)。 $1\mu\text{s}$ 以下の高速制御が可能な AO 変調器を照射条件設定に適用したことで、パルスバーストについてのパラメータ可変を効率的に行うことが可能となり、計 225 点における加工痕の光学顕微鏡画像をもとにしたデータベース化を速やかに試行できた (図Ⅲ2-4-1-1-2)。

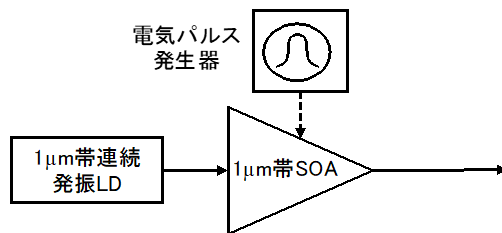


図Ⅲ2-4-1-1-2 銅加工痕の画像によるデータベース化の試行

(ii) 半導体レーザー

時間領域パラメータの広範制御に資する半導体レーザー素子の開発のための新規ウエハの設計、エピ成長と、加工を行い、光学評価系および理論解析系の構築を行った。

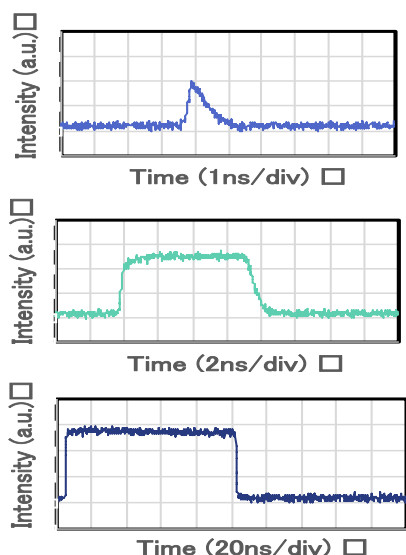
また、増幅器シード用レーザー発振器を構成するための、半導体レーザーサブナノ秒パルス発生器（図Ⅲ2-4-1-1-3、4）と前置光増幅器を開発した。半導体レーザーの光子寿命および動的非線形性の制御に基づいて、サブナノ秒以上の時間幅の光パルスを安定に発生できる発振器と光増幅器について、複数方式の利害得失を評価するとともに、サブナノ秒からサブマイクロ秒でパルス幅可変機能（図Ⅲ2-4-1-1-5）を確認した。



図Ⅲ2-4-1-1-3 半導体レーザー光増幅器（SOA）の利得スイッチ動作を利用した光パルス発生原理構成図



図Ⅲ2-4-1-1-4 外部共振器構造による長光子寿命半導体レーザー発振器モジュールのプロトタイプ



図Ⅲ2-4-1-1-5 発生した光パルスの時間波形測定データ. 0.4ns から 100ns 間でパルス幅を自在に可変できる機能を確認

[ベンチマークについて] 非熱加工として難加工材料の微細加工において近年注目が集まっている超短パルスレーザーに関して、高出力化については近年急速に進歩しファイバレーザーのコヒーレント結合技術を用いて 1.84kW の世界最高出力も論文レベルで報告されているものの、パルス幅の高速可変が可能なものは商用レーザーシステムにおける取り組みが先行しており、可変域がサブピコ秒～10 ピコ秒、最大出力は 60W にとどまっている。

本件の開発機は、加工プラットフォームにおける時間制御型レーザー加工テスト装置として、すでにユニークな存在であり、最終目標に向けて LD シード技術と組み合わせ条件可変域がさらに拡大することで、最適レーザー加工探索と加工データベース構築、さらには産業界への最適レーザー加工レシピの提供に、大きな貢献が期待できる。

(b) 波長制御型レーザー加工テスト装置の開発

本開発においては、約 190fs 及び約 50fs の 2 つのパルス幅領域において深紫外から赤外領域での広範囲な波長可変フェムト秒レーザー加工を可能とする波長制御型レーザー加工テスト装置の開発を行うと同時に、加工プロセス及び加工結果を評価するために有用な観察方法の構築を行っている。

波長制御型レーザー加工テスト装置として構築中の 50fs 波長可変加工システム及び 190fs 波長可変加工システムの写真を、それぞれ図Ⅲ2-4-1-1-6 及び 7 に示す。図Ⅲ2-4-1-1-6 の 50fs 波長可変加工システムは、繰り返し周波数 1kHz で動作し波長を 190nm～



図Ⅲ2-4-1-1-6 パルス幅 50fs の波長可変加工システム

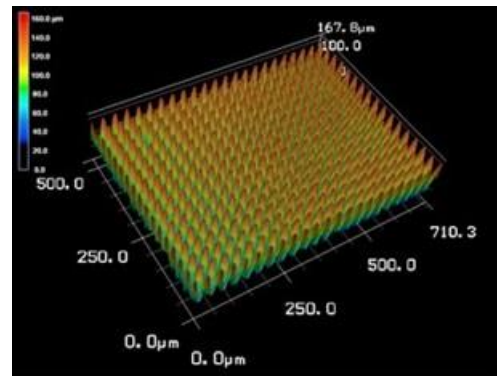
2.8 μm の幅広い範囲で可変可能である。図Ⅲ2-4-1-1-7 の 190fs 波長可変加工システムは、繰り返し周波数 6kHz で動作し波長を 210nm \sim 10 μm の広範囲で可変可能となっている。

また、ガラス、シリコン、サファイア等の典型的な被加工材料に対して試験的なレーザー加工を行い、光源波長の違いが加工に与える影響について検討を開始した。

本装置を用いた加工例として、フェムト秒レーザー加工を用いて微細モスアイ構造の作製に成功した。シリコン基板上に作成した微細モスアイ構造の顕微鏡写真を、図Ⅲ2-4-1-1-8 に示す。本加工構造は、今後テラヘルツ電磁波に対する無反射構造への応用（低損失ミラー等）が期待される。



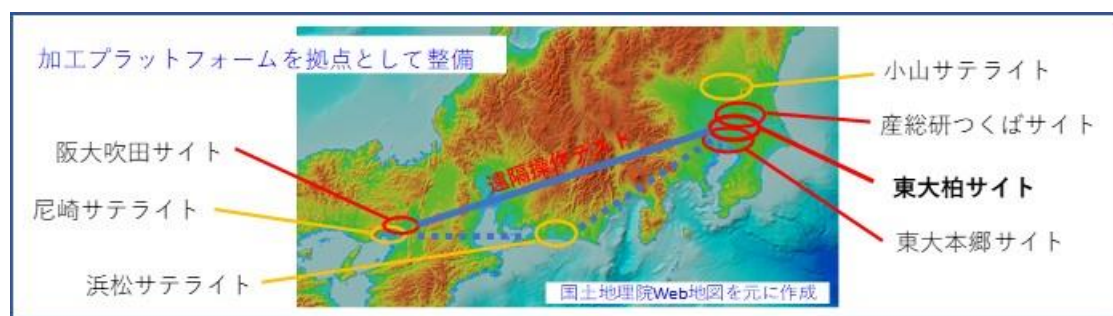
図Ⅲ2-4-1-1-7 パルス幅 190fs の波長可変加工システム



図Ⅲ2-4-1-1-8 シリコンモスアイ AR 構造の顕微鏡画像

(c) レーザー加工プラットフォームの整備と運営、レーザー加工データベースの構築

(i) レーザー加工プラットフォームの整備と運営



図Ⅲ2-4-1-1-9 レーザー加工プラットフォーム

NEDO プロで開発するレーザー加工装置を用いて加工プラットフォームを構築している（図Ⅲ2-4-1-1-9）。これまで、レーザー加工パラメータ抽出装置、時間制御型レーザー加工装置をはじめ、各種測定装置を導入し、プラットフォームの試験運用が始まっている。H30年度からはTACMIの一般会員の募集も始まり、一般ユーザーも含めて運用を開始する予定である。東京大学柏キャンパスを中心として、本郷キャンパス、つくば、阪大吹田キャンパス等、各サイトおよびサテライトにて加工プラットフォーム展開を行う。TACMIの活動が開始され、2018年4月の展示会では多くのユーザー企業との意見交換を行い、方向性の確認をしている。また、4-3の調査研究とともに、レーザー加工業界におけるニーズの調査が進んでおり、他の研究開発項目の事業展開も考慮しつつ、項目④会議を中心に運営戦略を練っている。

(ii) パラメータ抽出モデル装置

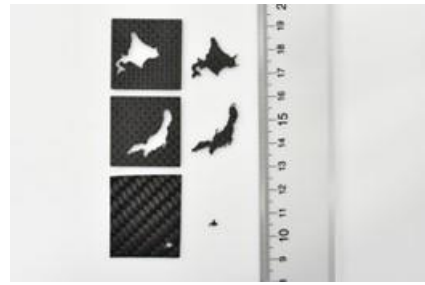
柏サイトでは、(a)で述べたように、100Wパルス幅可変CPAファイバレーザーシステムと加工装置から構成される時間制御型レーザー加工装置の開発を進め、初期テストを完了した。また、この装置に先立ってレーザー強度を可変しながら被加工材料のアブレーション閾値の各種依存性を評価するモデル装置として、小型・低出力タイプのパラメータ抽出モデル装置の開発を行った。

(iii) 難加工材料のテスト加工

市販のフェムト秒レーザー（800nm、35fs、7W）及びフェムト秒レーザー加工と同様のコールドアブレーションが期待される自作の高品位・高出力深紫外ナノ秒レーザー（258nm、5ns、最大10W）を用いたテスト加工装置をそれぞれ構築し、これまで加工が困難であったCFRPやガラスの加工評価テストを開始した。図Ⅲ2-4-1-1-10以下にフェムト秒レーザー加工装置によるCFRPの加工テスト結果を示す。図Ⅲ2-4-1-1-10に、地図の精密切り抜き加工結果を示す。上から北海道、本州、北海道を切り抜いたものとなっている。CFRPに対しても、切り代及びHAZ（Heat Affect Zone：熱影響領域）の十分小さな精密微細加工が実現できている。同様に、図Ⅲ2-4-1-1-11には製作したパネ構造を示している。図Ⅲ2-4-1-1-10と同様にHAZの少ないきれいな加工ができていることが判る。パネのように伸び縮みさせて壊れず、これはHAZが少ないためCFRPの強度を損なわない加工を行うことができていることを示している。

また、フェムト秒レーザーを用いて金属表面への超撥水性の付与も行った。チタン表面にフェムト秒レーザーを照射し、図Ⅲ2-4-1-1-12に示すように撥水角が 167° の超撥水性を付与することができた。

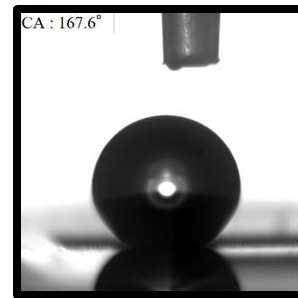
次に、高品位・高出力深紫外ナノ秒レーザー加工装置による加工テスト結果を示す。加工条件は、波長 258 nm、パルス幅 5 ns、平均出力 2.5W のレーザーを用い加工を行った。図Ⅲ2-4-1-1-13は厚さ 3 mm のCFRP 板を四角形状に切り抜いた加工結果である。ナノ秒レーザーを用いているにもかかわらず、フェムト秒加工と同様、切り代及びHAZが極めて小さい加工が実現できている。そのため加工部分を(a)押し出したり(b)元に戻したりすることが可能で、元に戻した場合も全く加工前のように表面がほぼ平に見えることが判る。図Ⅲ2-4-1-14は、同様に厚さ 3 mm のCFRP 板に切り込み加工を行ったものである。肉眼では確認できないほど切り代が小さくかつアスペクトレシオが大きい加工が実現できている。また、図Ⅲ2-4-1-1-15はやはり加工が困難な厚さ 10 mm の SiO_2 への微細孔加工を行った例である。孔が貫通しているかの確認がまだできていないが、緑のレーザー光で識別されているようにアスペクトレシオが極めて大きな微細孔加工が実現できている。



図Ⅲ2-4-1-1-10 フェムト秒レーザーによるCFRPの加工(地図の精密加工例)



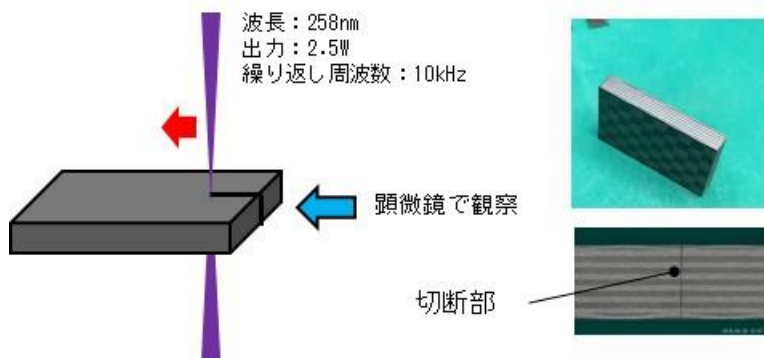
図Ⅲ2-4-1-1-11 フェムト秒レーザーによるCFRPの加工(バネ加工例)



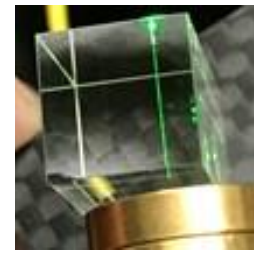
図Ⅲ2-4-1-1-12 フェムト秒レーザーによる超撥水性の付与



図Ⅲ2-4-1-1-13 高品位深紫外レーザーによるCFRPの加工(加工部を押し出した写真(a)と平らにした写真(b))



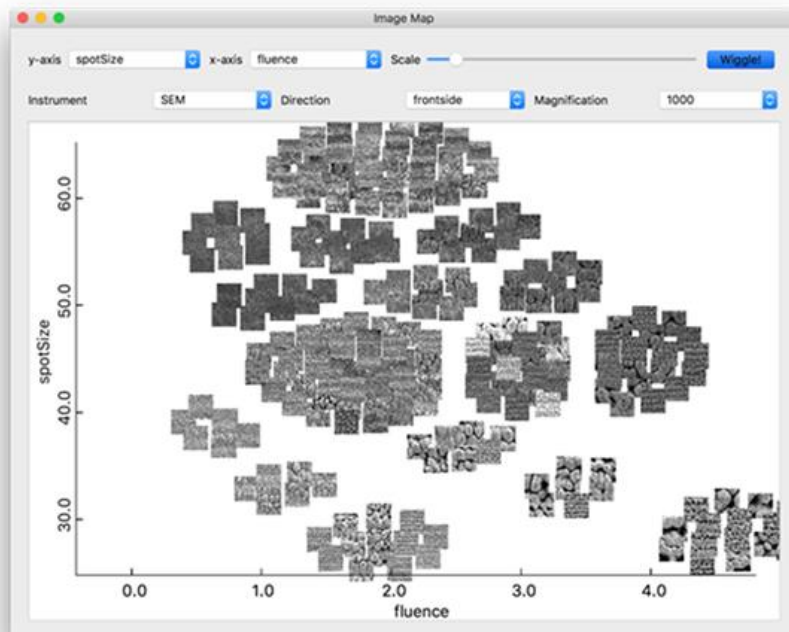
図Ⅲ2-4-1-1-14 CFRPの切込み加工



図Ⅲ2-4-1-1-15 高品位深紫外レーザーによるSiO₂の微細孔加工

(iv) レーザー加工データベースの構築

上記加工プラットフォームの立ち上がりと連動し、レーザー加工データベースの構築が始まった(図Ⅲ2-4-1-1-16)。自動データ取得装置の開発を行い、大量にデータが取得され始めた。研究開発項目4のみならず、多くのプロジェクト実施者からデータを集め、良質なデータベースを構築するための打ち合わせを重ね、全実施者へYAML形式のデータフォーマットを周知し、加工が行える実施者からのデータ収集を開始した。この過程は今後データをどのように集めるかのバグだとして、きわめて重要である。データの受け渡しを実際に行う体制を作る上での課題も集まりだした。当面柏集中研でのデータ取得を中心にデータベースの骨組みを構築している。これまでに加工データ数では4万を超えた。データベースに集約できたデータ数も7,000程度に達している。



図Ⅲ2-4-1-1-16 データベースプロトタイプ

(v) 加工その場モニタリング手法の提案

レーザー加工の現場では加工がどのように進んでいるかをリアルタイムでモニターすることはできない。加工を行ってみた後に、どのようにできたかが分かるだけである。進行中の加工の状態がモニターできれば、深さ何 mm で止めるなど、できる加工の種類が増えると期待されている。そこで、その場モニタリング手法の開発を行った。加工形状により、散乱光が変化することに着目し、散乱光パターンからどの程度加工が進んでいるかを推定する手法を提案した。

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように、中間目標の 100W 以上の時間制御型レーザー加工装置出力については 1 年近く前倒しで達成した。また、ガルバノミラー、大型ステージ、モニター等で構成した試験加工装置を構築し、前述のレーザー光源を用いた試験加工に着手し、レーザー加工データの取得を開始した。今後、この装置及び構築中の各種加工装置を加工プラットフォームに用い、時間領域、波長領域での加工条件のデータ収集、レーザー加工学理の解明及び加工データベースの構築に向けて加工試験を行い、最終目標を達成できる見込みである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-4-1-2. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）

(1) 事業の背景・意義（目的・概要）

波長 200nm 以下の領域は材料の結合エネルギー以上の 1 光子プロセスによる画期的な非熱加工に発展するポテンシャルを有する。この領域では先駆的な学術的研究はあるものの、実用性を含めた検討は世界的にも手付かず状態である。そこで、波長 193nm により本格的非熱加工技術開発を世界に先駆けて取組む。具体的には、ハイブリッド ArF レーザー加工技術の開発を 1) 193nm ハイブリッド ArF レーザーの開発、2) 193nm 加工評価装置の製作、3) 193nm 加工技術の開発の 3 項目によって実施する。

(2) 研究開発目標と根拠

193nm ハイブリッド ArF レーザーについては、NEDO 省エネルギープロジェクトで開発したハイブリッド ArF レーザーのプロト装置を用いて開発を実施する。非熱加工を実現するためには短パルス化することが有効であるため、固体オシレータ基本波部を短パルス化し、波長変換を行うことによりシード用固体オシレータを開発する。高フルーエンス化を実現するために高い集光性が求められ、また、経済合理性に適った生産性を実現する実用光源として数十 W 程度の出力が求められる。よって最終目標を 100W、M2<2 と定めた。

加工評価装置については、小山事業所に新規実験設備を立ち上げ、加工評価装置を製作する。また、九州大学に設置してあるギガフォトン社の既存実験設備を利用して先導的加工研究を実施し、加工技術の開発を行い、193nm レーザー加工の有意性を実証する。加工評価の指針および結果は集中研泊サイトにデータを提供し、ハイブリッド ArF レーザーの加工優位性を明らかにする。

表Ⅲ2-4-1-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
④-1-(3) 極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発	高コヒーレンス ArF レーザーによる 193nm 加工優位性検証	M2が2以下で平均出力が2W以上の193nm レーザーは現状では世界に存在しない。経済合理性に適った生産性を実現する実用光源として100W、M2<2を最終目標とした。	・波長193nmによる加工評価 ・10W高コヒーレンスArFレーザーの開発	初期的な加工実験に必要な10W、M2<2を中間目標とした。

(3) 研究開発スケジュール

表Ⅲ2-4-1-2-2 開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
193nm 加工評価						
加工装置開発						
193nm 加工光源						波長：193nm 出力：100W パルス幅：0.5-5ns $M^2 < 2$
ハイブリッド ArF 開発						
固体オシレータ開発						
		OSC : 1ns	0.5ns			

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。波長 193nm による加工評価については加工評価装置の立ち上げが完了し、今後高フルーエンス条件での加工試験を実施し、データを蓄積することで目標を達成できる見通しが立った。10W 高コヒーレンス ArF レーザー開発については、シード用固体オシレータ基本波部の製作が完了し、1ns のパルス幅での発振が確認でき、今後エキシマレーザーによる増幅試験、出力安定性等の評価を実施することで目標達成できる見通しが立った。

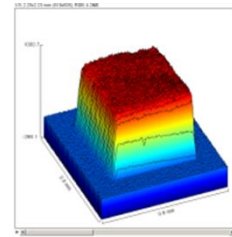
表Ⅲ2-4-1-2-3 研究開発項目と達成状況

項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
④-1-(3)	波長 193nm による加工評価完了	ガラス系材料 (EAGLE、合成石英) の加工評価	△ (2019 年 3 月達成見込み)	高フルーエンス条件での加工
	10W 高コヒーレンス ArF レーザー (193nm) 開発	シード用固体オシレータ基本波部 (ファイバレーザー、パルス幅 1ns) の製作	△ (2018 年 9 月達成見込み)	出力安定性等の評価

(5) 成果の詳細

ArF/KrF エキシマレーザーで右図に示すプロファイル (ArF 150 μ m \square 、KrF 350 μ m \square) が得られ、1~30J/cm² のフルエンスで加工が可能な KrF (波長 248nm) レーザー加工評価装置、ArF (波長 193nm) レーザー加工評価装置の立上げが完了しました。

無アルカリガラス (Corning 製 : Eagle 厚さ 300-500 μ m) の試料にて、 Φ 50-100 μ m の貫通穴が達成され、加工穴内表面は KrF レーザーより ArF レーザーの方が滑らかであることが確認されました。



図Ⅲ2-4-1-2-1 加工面ビームプロファイル

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように中間目標の波長 193nm による加工評価に関しては、ガラス系材料の加工評価に着手し、強化ガラス、合成石英の加工に関してこれまでにない知見が得られ、高フルーエンス条件での加工試験を実施することで中間目標達成の見通しを得ている。また、10W 高コヒーレンス ArF レーザー (193nm) 開発についても、シード用固体オシレータ基本波部の製作が完了し、ArF エキシマレーザーによる増幅を行い、出力安定性等の評価を実施することで、中間目標を達成する見通しを得ている。今後は、ハイブリッド ArF レーザーの開発を行うことによって最終目標である高コヒーレンス ArF レーザーによる 193nm 加工優位性の検証を達成できる見通しである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-4-1-3. 「レーザー加工プラットフォームの構築／「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」(実施先：大阪大学、株式会社島津製作所、大阪大学共同実施先：ヤマザキマザック株式会社)

(1) 事業の背景・意義(目的・概要)

【背景と意義】

レーザーは、世界的に次世代ものづくり産業技術の中核として期待されており、今後も市場の拡大が見込まれる。しかし、様々な加工条件に合わせて効率良く、また付加価値の高い加工を実現するためには、現在のレーザーは、波長や輝度(出力とビーム品質)、効率等の多くの点で技術的な課題を有する。我が国が世界的トップランナーとして、これまでにない高効率かつ高輝度(高出力・高ビーム品質)なレーザー技術を開発することにより、わが国のものづくり産業の競争力強化を推進し、Society 5.0の実現を図る。

【目的と技術課題】

「次世代加工」である高機能かつ難加工材料の接合・3Dプリンタ等の高品質加工技術開発には、加工材料に対し光吸収率の高い青色半導体レーザーを用いることが有効である。日本の強みである高性能青色半導体レーザー素子から出力される「光」を光ファイバに結合(コンバイン)することで「束ね」、高輝度光源化技術を開発する。これらを実現するために以下の3つの研究開発項目を実施している。

- (a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発
(大阪大学、島津製作所、ヤマザキマザック(大阪大学共同実施先))
- (b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発
(島津製作所、大阪大学)
- (c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発
(ヤマザキマザック(大阪大学共同実施先)、大阪大学)

・解決する社会課題と目指すマーケット

今後予想される労働人口の減少、高齢化に対応するため、生産性向上が望まれる。レーザー技術はIoT(Internet of Things)への高い親和性を持ち、また3Dプリンタに代表されるように高い柔軟性を併せ持つため、より効率的な生産技術の確立や小ロット生産での採算性向上の実現が期待される。特に、青色半導体レーザー光源は、従来技術では使用が困難であった金属材料を用いた高品質・高付加価値な新製品開発を可能とするので、産業界に普及するとともに産業界全体に大きな波及効果がある。まずは、急速に電動化の要求が高まる自動車産業や多種の精密樹脂成型を必要とする電気機器産業を中心とした産業界への貢献を目指す。青色半導体レーザー光源は、国内だけではなく、産業用レーザーの世界地図を大きく書き換える可能性を秘めている。

(2) 研究開発目標と根拠

本テーマでは先に示した3つの開発項目を実施し各々開発目標を以下の表のように定めた。

表Ⅲ2-4-1-3-1 目標値と設定根拠

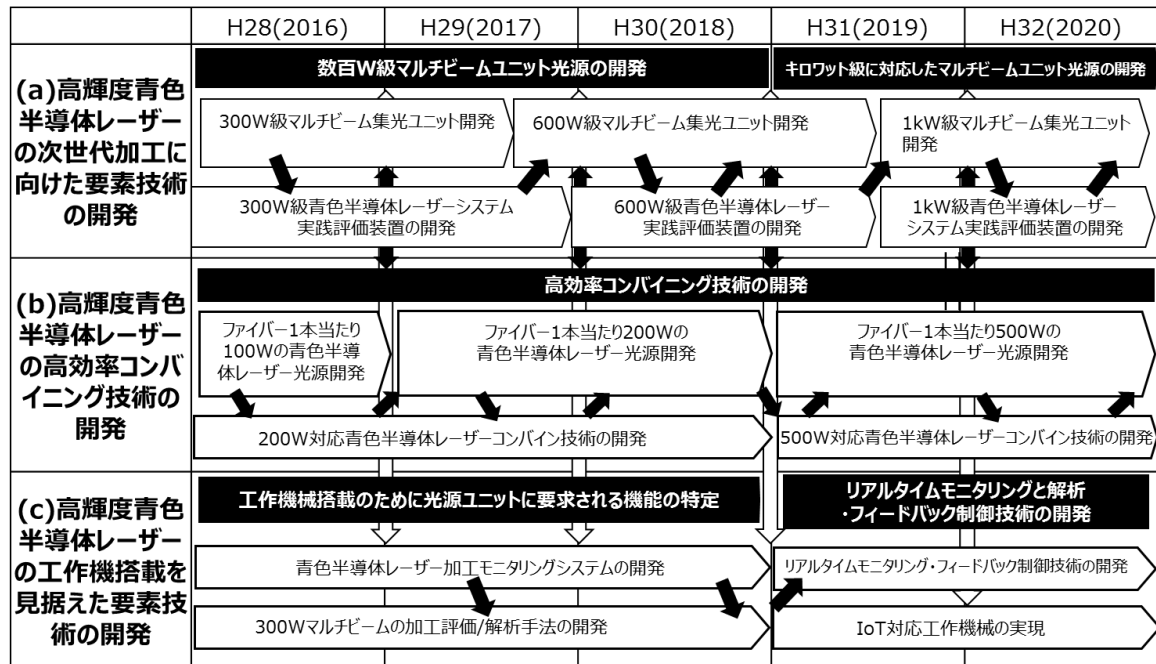
項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発	1 kW級マルチビームユニット光源の開発	集光光強度 1×10^6 W/cm ² を得るためには集光スポット径 300 μ m にした場合、200 W \times 6本重畳して得られる 1 kW が必要となるため。	高輝度青色半導体レーザーを用いた 600 W 級マルチビームユニット光源の開発	銅の溶接を実現するためには集光光強度 1×10^5 W/cm ² 以上が要求される。これを得るためには、スポット径を 300 μ m とした場合、600 W が必要なため
(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンパニング技術の開発	ファイバ1本当たりの出力 500 W 以上 波長：400 nm ~ 530 nm	1×10^6 W/cm ² を得るためには 500 W が必要となるため。	ファイバ1本当たりの出力 200 W 以上 波長：400 nm ~ 530 nm ファイバコア径 200 μ m 以下	2×10^6 W/cm ² 以上を得るためには 200 W が必要なため。
(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発	レーザーユニット搭載型工作機械の溶接加工において、溶融地の挙動から最適な加工条件をフィードバック制御できるシステムの構築	複合加工機（工作機械+マルチビーム集光ユニット）による高品質な加工の自動化のため。	青色半導体レーザーマルチビーム集光ユニットの工作機械への搭載 溶融地挙動のモニタリング	工作機械（複合加工機）において溶接品質に影響をあたえるパラメータを明らかにするために、溶接プロセス特に溶融地の挙動を明らかにするため。

【根拠】上記目標根拠は以下のように求める。

- (a) 青色半導体レーザーによって銅の溶接を実現するためには 1×10^5 W/cm² 以上のパワー密度が要求される。このパワー密度を達成するには、集光スポット径が 300 μ m のとき 600 W 以上の出力が必要となるため、1本当たりの出力が 100 W の青色半導体レーザー光源を 6本並べて1点に集光したときの出力 600 W 級を中間目標値とした。また、集光光強度 1×10^6 W/cm² を達成するには、集光スポット径 300 μ m のとき、1 kW 以上の出力が必要となるため、1本当たりの出力が 200 W の青色半導体レーザー光源を 6本並べて1点に集光したときの出力 1 kW 級を最終目標値とした。
- (b) 集光スポット径が 100 μ m の時、 2×10^6 W/cm² を達成するためには 200 W が必要となるため上記目標値を中間目標値として設定した。また集光スポット径が 200 μ m の時、 1×10^6 W/cm² を得るためには 500 W が必要となるため最終目標として設定した。
- (c) 溶接品質に影響をあたえるパラメータを明らかにするためには溶接プロセス、特に溶融地の挙動を明らかにすることが重要と考え、中間目標では溶融地の観察装置（モニタリング）を構築することとした。また複合加工機（工作機械+マルチビーム集光ユニット）による高品質な加工の自動化に向け、最終目標では溶融地モニタリング装置並びに自動フィードバックシステムの構築を行うこととした。

(3) 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを下図に示す。



図Ⅲ2-4-1-3-1 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術開発スケジュール

(4) 研究開発目標と達成状況

研究開発項目と達成状況を表に示す。(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発については現在3ビームで300W級を達成しており、6ビーム化することにより600W達成予定である。今後の課題は青色半導体レーザーの結合技術を向上させ、ひとつのファイバから1kW級出力できるように結合技術を開発することである。また(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発については現在100W達成しており、テスト環境にて200W達成済みである。今後の課題は複数の半導体レーザー素子からの光を輝度を低下させることなく多重合成するビームコンバイニング技術の確立である。(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機搭載を見据えた基盤技術の開発では、マルチビーム集光ユニットを工作機械に搭載済みである。今後は工作機械内で使用する事を考慮したフィードバックシステムの取付の設計、並びに工作機械側でのシーケンスの改良商品化に向けた評価の実施、結果を元にした改良案の作成が課題である。

表Ⅲ2-4-1-3-2 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
(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発	高輝度青色半導体レーザーを用いた600W級マルチビーム集光ユニットの開発	現在3ビームで300W級達成 6ビーム化により達成予定	○	青色半導体レーザーの結合技術を向上させ、マルチビーム集光ユニットから1kW級出力できる技術を開発することが課題

(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発	ファイバ1本当たりの出力 200 W 以上 波長 : 400 nm ~ 530 nm ファイバコア径 200 μm 以下	現在、100 W 達成 波長多重結合のベンチトップ試験では 200 W 達成 今年度、波長多重結合技術により 200 W モジュールを開発	○	複数の半導体レーザー素子からの光を損失なく多重合成するビームコンバイニング技術の確立が課題
(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発	青色半導体レーザーマルチビーム集光ユニットの工作機械への搭載 溶融池挙動のモニタリング	マルチビーム集光ヘッドの工作機械への搭載済み モニタリング機能搭載済み	○	工作機械内で使用する事を考慮したフィードバックシステム設計、並びに工作機械側でのシーケンスの改良 複合加工機としての評価の実施、結果を元にした改良案の作成が課題

(5) 成果の詳細

(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発

工作機械に搭載するために3台の100 W級青色半導体レーザーを搭載したマルチビーム集光ユニットを開発した。

実践的評価装置（SLM方式3D積層造形装置および熱伝導型溶接装置）を用いて100 W青色半導体レーザーの優位性を示した。



3Dプリンタにより製作した銅部品



熱伝導溶接機により製作したステンレスのダイアフラム（左は完成部品、右は切断断面）

青色半導体レーザー搭載型の加工装置
（左 3Dプリンタ、右 熱伝導溶接機）

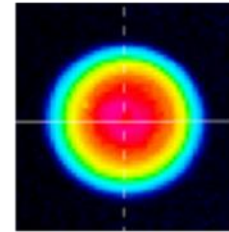
図III-2-4-1-3-2 高輝度青色半導体レーザー加工装置と製作した部品

(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発

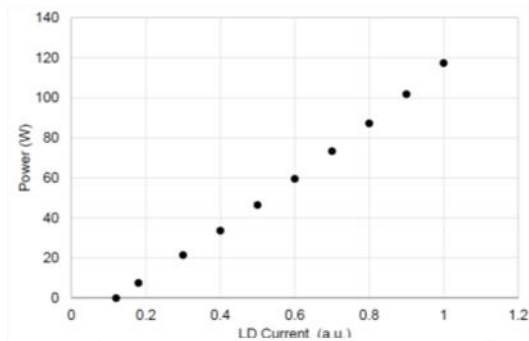
半導体レーザー素子の出力を1本の光ファイバに高効率コンバイニングする技術を開発し、コア径:100 μm、NA:0.2のファイバから100 Wの出力が得られるレーザー光源を開発した。2018年1月には同100 W機を製品化した。本システムの仕様と半導体レーザー加工機を以下に示す。本システムでは波長450 nmの青色半導体レーザーを用いて、出力100 W、集光スポット径100 μmの時に、パワー密度 $1.3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ を実現している。



100 W青色半導体レーザー光源
(19インチラックに搭載可能)



ファイバー端での空間強度分布



電流 – 出力特性

波長	; 450 nm
出力	; 100 W
コア径	; 100 μm
NA	; 0.2
強度	; $1.3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ (ファイバー端)

図Ⅲ2-4-1-3-3 開発した高輝度青色半導体レーザー光源と特性

ダイクロミックフィルタを用いた波長多重化 (Wavelength Beam Combining; WBC) に取り組んだ。具体的には、ピーク波長がそれぞれ 443 nm と 453 nm という 2 台のレーザーモジュール (出力: 100 W、ファイバコア径: 100 μm) からの出力を波長多重化し、再度、コア径 100 μm のファイバに結合し、200 W の出力を確認した。

本プロジェクトにおける達成状況に中間目標を加えて、グローバルベンチマークを行った。近年、米国 NUBURU 社は、青色半導体レーザーの高出力化に取り組んでいる。コア径 200 μm および 400 μm の光ファイバから出力 150W (カタログ値) および 500W (カタログ値) をそれぞれ得ている。ドイツの国家プロジェクト「Direct blue kilowatt diode laser (BlauLas) (2016～2018 年度)」では、青色半導体レーザー素子のメーカーである OSRAM 社とレーザコンバイニングが得意な Laserline 社が高輝度化を進めている。Laserline 社は、Photonics West 2018 (2018 年 1 月 30 日～2 月 1 日まで米国サンフランシスコ、モスコニーセンターで開催) にてコア径 600 μm の光ファイバから 700 W の出力が可能な青色半導体レーザー (モックアップ) を展示した。以下図に示すように、本プロジェクトにて開発した高輝度青色半導体レーザーが達成できる輝度に対し、それぞれ 8 分の 3 および 5 分の 1 程度の値である。

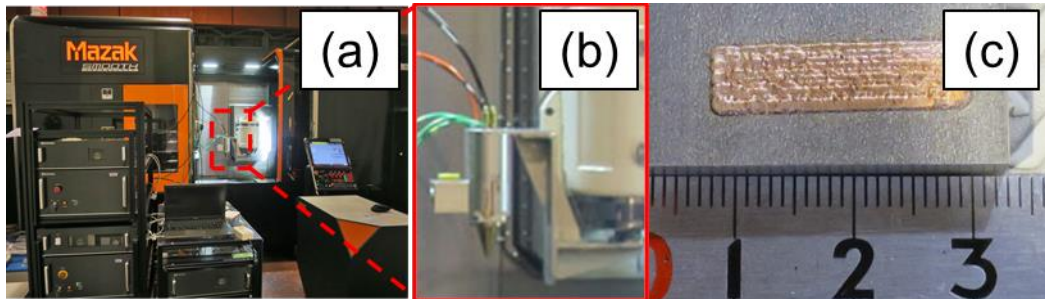
表Ⅲ2-4-1-3-3 青色半導体レーザーグローバルベンチマーク

	チップメーカー	波長	出力	ファイバコア径	ファイバNA	BPP (mm mrad)	ファイバ端の強度 (MW/cm ²)	輝度 (MW/cm ² · sr)	到達年度
NEDO (Japan)	NICHIA	442 nm	100 W	100 μm	0.2	10	1.3	10	2016
		452 nm	100 W	100 μm	0.2	10	1.3	10	2016
		442 nm + 452 nm	200 W	100 μm (≦ 200 μm)	0.2	10	2.5	20	2018 (中間目標)
NUBURU AO-150	OSRAM	450 nm	150 W	200 μm	0.22	22	0.48	3.1	2016
NUBURU AO-500	OSRAM	450 nm	500 W	400 μm	0.22	44	0.40	2.6	2018
Laserline (BMBF - Germany)	OSRAM	450 nm	700 W	600 μm	0.22	67	0.25	1.6	2017
Dilas	OSRAM	450 nm	135 W	200 μm	0.22	22	0.43	2.8	2017

(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発

溶融池挙動を観察するためのモニタリングシステムを構築し、工作機械に搭載した。

青色半導体レーザーを3台用いたマルチビーム集光ユニットを工作機械に搭載し、レーザーメタルデポジション(Laser metal deposition; LMD)の試験を開始した。



図Ⅲ2-4-1-3-4 工作機械への搭載

(a)ヤマザキマザック製工作機械。(b)100 W 青色半導体レーザー3台を搭載したマルチビーム集光ユニット。(c)加工サンプル

(6) 最終目標の達成の見通し

(a) 高輝度青色半導体レーザーの次世代加工に向けた基盤技術の開発

「1 kW 級マルチビームユニット光源の開発」については青色半導体レーザー1本当たりの出力を上げること、また、光学素子のわずかな光吸収や散乱光による発熱への対策を施すことで最終目標の達成を目指す。

(b) 高輝度青色半導体レーザーの高効率コンバイニング技術の開発

「ファイバ1本当たりの出力500 W以上、波長：400 nm ~ 530 nm達成」については、より高出力対応のコンバイニング技術を開発することにより最終目標の達成を目指す。

(c) 高輝度青色半導体レーザーの工作機械搭載を見据えた基盤技術の開発

「レーザーユニット搭載型工作機械の溶接加工において、溶融池の挙動から最適な加工条件をフィードバック制御できるシステムの構築」については、マルチビーム集光ユニットを搭載した機械で、実践的な評価を進め、フィードバックすべきパラメータを明らかにすることにより最終目標の達成を目指す。

(7) 知的財産権及び成果の普及

成果の普及は別紙に示す。

2-4-2. 「レーザー加工の計測評価基盤技術の開発」 (実施先：東京大学、産業技術総合研究所一再委託先 早稲田大学)

(1) 事業の背景・意義 (目的・概要)

レーザー加工の計測評価基盤技術の開発については、レーザー加工の学理解明や加工条件の最適化を探索する上で必要不可欠である、レーザー切断・穴あけ加工、レーザーピーニング部位等のレーザー加工計測評価技術を開発する。加工において制御すべきパラメータの種類は、パワー・波長・パルス幅・繰り返し周期と膨大である。そこで、光と物質の相互作用や反応過程の計測診断技術、加工中及び加工後の各種材料の特性変化を調べるための先端計測技術を構築する。これにより最適な加工条件を、研究開発項目①、②のレーザー開発、及び研究開発テーマ④-1の加工プラットフォームにフィードバックする。この時、加工パラメータだけでなく、加工手法も多様であるので、各々の加工手法に対応できる多種多様な計測評価技術を開発する。④-1をはじめとする他のテーマ・サブテーマと有機的に連携し、また、現有設備の活用や、関連する拠点やプロジェクトなども密に連携することにより効率的に実施する。

(a) 計測評価基盤技術、および、(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築、のサブテーマで取り組んでいる。

(a) 計測評価基盤技術では、レーザー加工の初期過程で物質がどのように応答しているのかについて、レーザー加工の際に生ずるイオン計測の手段を用いて探る。物質が切断や接合をするときには原子核が動くわけであるが、物質から放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することにより重要な知見が得られるはずである。また、10fs級の超短パルスを用いることにより非常に短い時間領域を探ることができればシミュレーションとの対応がつくことが期待される。これはエネルギー散逸の起きない時間領域だからである。これは、エネルギーの拡散の影響を排除してエネルギーを受け取る部分のみを議論できることに結び付く。時間依存密度汎関数理論による第一原理シミュレーションでは、数十フェムト秒から数ピコ秒の時間領域の連続的な解析や、高強度レーザーパルスによって与えられた高密度エネルギー散逸過程の原子レベルでの追跡が可能で、非熱的レーザーアブレーション加工への指針が期待できる。また、極短光パルス照射下の固体表面からの、放出イオンの運動量エネルギーおよび放出角度分布の測定技術は、レーザー加工過程の新しい計測手法や解析の実験的検証への応用が期待できる。学理と加工シミュレーション、それらと連動したフラグメントイオン分析などの計測技術の統合によって、実加工に資する基盤技術を開発する。

(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築では、レーザー加工条件の最適化やレーザー加工の学理・メカニズム解明のために必要な情報である各種レーザー加工材料の光物性評価(吸光係数・屈折率等)を実施し、それら測定結果のデータベース化を行う。またその評価のための測定装置の開発と整備を必要に応じて行う。物質と光との吸光係数等をまとめたデータベースとして、ACADEMIC PRESS社のハンドブック「Optical constants of Solids」が有名である。しかしCFRPのような近年重要視されるようになった高分子材料や多岐にわたるガラス材料などは掲載されていないという問題点がある。

(2) 研究開発目標と根拠

研究開発目標と根拠を下表に示す。

表Ⅲ2-4-2-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
2-4-2(全体目標) レーザー加工の計測評価基盤技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 加工結果の評価と加工レシピの設計に資する物性評価・計測技術の提示。 深紫外領域等の物性データベース構築。 物性評価技術、物性データベース、計測技術の連携により加工結果と予測し、必要な加工レシピを提示する新しい設計手法の体系化にむけた課題の提言。 	下段に記載	<ul style="list-style-type: none"> 加工状態の分析、加工の計測評価手法等の提案。 加工状態を表す物理パラメータの定義に関する指針を提示。 	下段に記載
2-4-2-(a) 計測評価基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> (i) 熱影響の少ない高精度なレーザー加工への指針を得る。 (ii) 高精度、高効率レーザー加工条件のシミュレーションによる検証。 	<ul style="list-style-type: none"> (i) 高精度レーザー加工において、熱影響の低減は必須。 (ii) 熱的に平衡状態に達しない短時間の運動の記述、摂動論では扱えない高強度の光励起状態の記述に優れている。 	<ul style="list-style-type: none"> (i) フラグメントイオン計測装置の完成。熱的/非熱的加工の判定法の確立。 (ii) 熱的・非熱的格子ダイナミクスのシミュレーションによる検証。 	(i/ii) 熱影響を調査するために必要。
2-4-2-(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築	真空紫外～赤外領域における光物性データベースをニーズの高い材料を中心に構築し、公開する。	実用性の高いものとするため、ニーズ調査結果を基に構築する必要がある。	光物性計測用の真空紫外エリプソメトリ装置を開発し、併せて光物性データベースの構築に着手する。	真空紫外域での計測装置は限られているためこの波長領域での装置開発をまず行う必要がある。

(a)計測評価基盤技術

ナノ秒パルスによるレーザーアブレーションの場合、レーザーが照射されるとまず電子が励起されエネルギーを吸収し、そのエネルギーが格子振動に移り高温のプラズマが発生して固体表面から粒子が放出される。レーザーの持続時間内で熱が周囲に伝わり、レーザービームの外側でも溶融が起こるため、加工痕は熱による影響を受ける。高温のレーザープラズマから粒子が放出されるため、粒子放出の運動エネルギー分布は熱統計的分布することが知られている。

ピコ秒パルスによるレーザーアブレーションの場合、レーザーからもらった電子のエネルギーが格子振動へ緩和する時間が数ピコ秒であるため、レーザーの持続時間内に高温のプラズマが発生して、粒子放出が起こると考えられる。数ピコ秒の時間領域でレーザービームの外側に熱が伝わる前に粒子放出が起こるため、加工痕が熱による影響が少ないと言われており、高精度な加工が可能となる。ピコ秒の場合でも、高温のプラズマから粒子が放出されるため、粒子放出の運動エネルギーは熱統計的分布すると考えられる。

さらにフェムト秒パルスによるレーザーアブレーションの場合、電子励起やクーロン爆発によって、電子系のエネルギーが格子振動のエネルギーに転換されずに、並進運動に転換される粒子の現れ始めると指摘されており、非熱的なレーザーアブレーションとなる。加工痕は熱影響を受けないばかりでなく、熱エネルギーとしてエネルギーが散逸しないため、高効率な加工の可能性が期待される。

レーザーアブレーションのすべて非熱的レーザーアブレーションに代わることはなく、一部が非熱的なレーザーアブレーションとなって現れはじめるというのが現実的だと考えられるが、熱的レーザーアブレーションと非熱的なレーザーアブレーションの境界は、材料やレーザー照射条件によって異なるため不明確であり、実験的にも整理されていないのが現状である。

そこで、本サブテーマにおいて、開発目標は以下のように定めた。

(i) 数十フェムト秒から数ピコ秒の時間領域において、高強度レーザーパルスによって与えられた高密度エネルギー散逸過程を原子レベルで追跡することのできる計測技術を開発する。レーザーアブレーションによって固体表面からの放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することのできるフラグメントイオン計測装置を整備する。この計測装置の特徴は、フラグメントイオンの運動状態は、光吸収分光や加工痕の画像観測などでは得られない、フェムト秒領域における熱的/非熱的イオン放出に関する直接的情報を含んでいるところである。またイオンカウンティングのため原子レベルでの情報を得ることができる。放出イオンの運動エネルギー分布のレーザーパラメータ依存性（レーザーパワー依存性、レーザーフルエンス依存性、レーザーパルス幅依存性 など）を測定する。得られた実験データから、非熱的なアブレーションが現れるのはどの時間領域なのか、熱的アブレーションと非熱的アブレーションが共存する場合、その割合を実験的に明らかにする。フラグメントイオン計測装置と10フェムト秒クラスの位相制御レーザー光源を組み合わせることによって、より直接的な熱的/非熱的レーザーアブレーションに関する独自性の高い判定法になるため、上記の目標設定とした。

(ii) 時間依存密度汎関数理論による第一原理シミュレーションを行い実験結果との比較を行う。この手法を採用した根拠は、電子励起に伴う電子と原子核の運動を近似的に取り扱うことができることが特徴であり、熱的に平衡状態に達しない短時間の運動の記述、摂動論では扱えない高強度の光励起状態の記述に優れているところである。数十フェムト秒から数ピコ秒の時間領域の連続的な解析結果から、固体表面からの粒子放出のメカニズムを明らかにし、熱影響の少ない高精度、高効率なレーザー加工への指針を得る。

(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築

レーザー加工の産業応用を促進するためには、レーザー加工に対する産業ニーズが高い試料に対する光物性評価、さらには評価結果等を基にした加工条件の最適化が重要である。本サブテーマでは、4-3等とも連携して、レーザー加工に対する産業ニーズが高い試料を中心に光物性評価を行うことで、実用性の高いデータベースを構築する。また深紫外光照射や高強度レーザーによる多光子励起による加工の最適化を検討する際に重要である紫外から真空紫外といった短波長領域においても光物性データベースを構築する必要がある。特に真空紫外域では測定装置は一般的ではないことから、この波長領域においても光物性評価が可能な装置として、真空紫外エリプソメトリ装置の開発も併せて行う。

(3) 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを下表に示す。

表Ⅲ2-4-2-2 「レーザー加工の計測評価基盤技術の開発」開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
2-4-2 (a) 計測評価基盤技術						
(i) フラグメントイオン計測	基本性能の確認		非熱的レーザーアブレーション加工の検証	評価装置（及び技術）の他レーザー加工機への適応		熱影響の少ない高精度なレーザー加工への指針を得る。
(ii) 時間依存密度汎関数理論による第一原理シミュレーション	熱的・非熱的格子ダイナミクスシミュレーションによる検証		材料に依存したレーザー照射後の構造変化のシミュレーションによる検証	高効率材料可変条件のシミュレーションによる検証		高精度、高効率レーザー加工条件のシミュレーションによる検証。
2-4-2 (b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築	真空紫外エリプソメトリ装置開発		光物性データベースの構築			・ 最短波長域130nm程度まで測定可能な装置を開発 ・ ニーズの高い材料を中心に構築し、公開する

(4) 研究開発目標と達成状況

(a) 計測評価基盤技術

レーザーアブレーションによって固体表面からの放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することのできるフラグメントイオン計測装置の作製および整備は完了しており、中間目標を達成している。放出イオンの運動エネルギー分布のレーザーパラメータ依存性（レーザーパワー依存性、レーザーフルエンス依存性、レーザーパルス幅依存性 など）は、100 フェムト秒より長いパルス幅のレーザー光源を用いた実験については、実験データが得られており、その解析手法の確立についても完了した。今後の課題は、100 フェムト秒より短いパルス幅のレーザー光源を用いた実験である。現在、現有装置の利得狭窄補償した10 フェムト秒クラスのレーザー光源を整備中である。

また石英について、レーザー強度、パルス幅を変えて第一原理シミュレーションを行った。今後の実験と解析により非熱的なアブレーションが現れるのはどの時間領域なのか、非熱的なアブレーションと熱的なアブレーションが共存する場合、どれぐらいの割合について明らかにしてゆく。それらの結果から、固体表面からの粒子放出のメカニズムを明らかにし、熱影響の少ない高精度なレーザー加工への指針を得る。

表Ⅲ2-4-2-3 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
2-4-2 (a)-(i) フラグメントイオン計測。	・フラグメントイオン計測装置の完成。 ・熱的/非熱的加工の判定法の確立。	・計測装置の作製および整備の完了。 ・100 フェムトのレーザー光源を用いたレーザーパラメータ依存性実験開始 ・実験解析手法の確立	○	10 フェムト秒クラスのレーザー光源を整備中である。
2-4-2 (a)-(ii) 時間依存密度汎関数理論による第一原理シミュレーション。	熱的・非熱的格子ダイナミクスシミュレーションによる検証。	石英について、2種類のパルス幅（10 フェムト秒、100 フェムト秒）について第一原理シミュレーションを完了。	○	10 フェムト秒から数ピコ秒の時間領域の連続的な解析。
2-4-2 (b) 真空紫外エリプソメトリ装置開発	最短波長域130nm程度まで測定可能な装置を開発	最短波長域として130nmまでの測定が可能なエリプソメトリ装置を開発した。	○	測定時間の高速化など
2-4-2 (b) 光物性データベースの構築	データベース構築に着手	ガラス試料を中心に既に真空紫外～可視、赤外における光物性スペクトル計測を開始している。	◎	試料準備・作製手法や加工評価等に必要な他物性計測手法などの検討、光物性シミュレーション手法の構築など

(5) 成果の詳細

(a) 計測評価基盤技術

レーザーアブレーションによって固体表面からの放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することのできるフラグメントイオン計測装置の作製を行った。基本構造は、飛行時間型質量分析装置とした。レーザーアブレーションによって生じた固体表面からの放出イオンを電極で加速してイオン検出器に導入する。作製したフラグメントイオン計測装置は以下のような特徴がある。(1) 小型で可搬(重量約 15kg)。(2) 超高真空が必要とせず、短時間で準備ができ試料も容易に交換。したがって、各レーザー加工プラットフォームに設置されているレーザー光源に適應することができる。

まず、金属の典型例として金の平板を用いた実験を行った。パルス幅 130 フェムト秒のフェムト秒レーザー(パルスエネルギー: 10 マイクロジュール)を用いてレーザーアブレーションを誘起し、金表面からの放出イオンをフラグメント計測装置で検出した。質量 200 付近に金イオンのブロードなピークが観測される。運動エネルギー分布のスペクトル形状を解析すると、全体をほぼ熱統計的な分布(shifted-Maxwell-Boltzman 分布)で説明できることが分かった。

次に、誘電体の典型例として合成石英の平板を用いた実験を行った。石英から放出された O、Si、SiO のイオンが観測される。運動エネルギー分布には、熱統計的な分布からはずれた構造のある形状が観測される。石英については、100 フェムト秒程度のパルスを用いた同様な実験はこれまでに報告例があり、高エネルギー側の成分が、クーロン爆発によるものと報告されている。

合成石英の実験と比較するために、 α クォーツを対象として、レーザー強度、パルス幅を変えて第一原理シミュレーションを行った。レーザーパルス照射後の電子運動を時間依存密度汎関数理論を用いて計算し、電子運動により変化する原子への力場を取り入れた分子動力学計算も同時に行うことにより、固体を構成する元素の運動をシミュレーションし、各原子の運動エネルギーの時間発展を調べた。

現在の所、非熱的/熱的レーザーアブレーションの境界については理論と実験は完全には一致していないが、今後、実験とシミュレーションの両方で、レーザーパラメータを系統的に変えた研究を行い、比較検討を行う予定である。

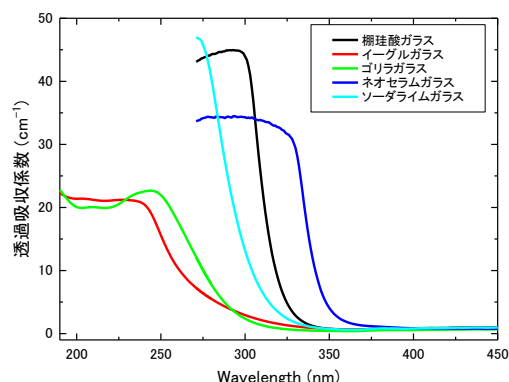
(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築

材料と光との相互作用データベース構築のための測定装置の一つである真空紫外エリプソメトリ装置の開発を進めた。開発中の装置の写真を図Ⅲ2-4-2-1に示す。測定波長範囲として130～650nm程度が測定可能な装置の開発に成功した。多くの市販のエリプソメトリ装置で測定可能な波長200nm以上の領域では、市販装置と良い一致が見られており、本装置の妥当性が証明された。本装置では更に短波長域での測定（最短130nm）にも成功しており、エリプソメトリ装置開発に関する中間目標は現時点で概ね達成されている。



図Ⅲ2-4-2-1 開発中の真空紫外エリプソメトリ装置

本装置ならびに既存の透過吸収スペクトル測定装置、赤外分光光度計などを用いて、レーザー加工用材料の光物性データベース（屈折率、消衰係数、吸収係数など）の構築にも着手している。図Ⅲ2-4-2-2では各種ガラス試料の透過吸収スペクトルの一例を示している。ガラス成分によって吸収波長域が大きく異なることが見て取れる。このように光物性データベースの構築にも既に着手するなど、中間目標は既に達成されており、さらにレーザー照射影響の分析手法としての評価を進めるなど目標を上回った進展があるといえる。



図Ⅲ2-4-2-2 各種ガラスの吸収係数スペクトルの例

(6) 最終目標の達成の見通し

(a) 計測評価基盤技術

上記のように中間目標の(1) レーザーアブレーションによって固体表面からの放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することのできるフラグメントイオン計測装置の作製および整備は完了しており、達成した。(2) 放出イオンの運動エネルギー分布のレーザーパラメータ依存性（レーザーパワー依存性、レーザーフルエンス依存性、レーザーパルス幅依存性 など）は、100フェムト秒より長いパルス幅のレーザー光源を用いた実験については、実験データが得られており、その解析手法の確立も完了した。今後は、100フェムト秒より短いパルス幅のレーザー

光源を用いた実験で実施する。現在、現有装置の利得狭窄補償した 10 フェムト秒クラスのレーザー光源を整備中であり、最終目標である数十フェムト秒から数ピコ秒の時間領域において、高強度レーザーパルスによって与えられた高密度エネルギー散逸過程を原子レベルで追跡することのできる計測技術の開発は達成の見通しである。

(b) レーザー加工のための材料との相互作用データベースの構築

上記のように中間目標の真空紫外エリプソメトリ装置の開発ならびに光物性データベースの構築に着手に関しては概ね達成した。今後はエリプソメトリ装置をはじめとした各種分析装置を活用して、ニーズ調査で明らかになった産業ニーズの高い試料を中心にした計測等を行い、データベースの構築と公開を進めていくことで、最終目標は達成の見通しである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

2-4-3. 「レーザー加工技術の標準化・調査研究」（実施先：産業技術総合研究所、東京大学）

（１）事業の背景・意義（目的・概要）

本開発においては、国内の知を産業に持っていくまでの障壁をいかに乗り越えかを解決する新しい仕組みが構築されることが求められており、常にモノ作り産業のニーズを把握し、市場動向の調査研究を進めながら行う必要がある。

ここで、加工特性を系統的に評価するにあたっては、評価結果どうしを正しく比較できるよう、試料の形状・純度・前処理・加工環境等に関する基準サンプルや標準作業も重要な課題である。これらの在り方について検討し、日本が主導して標準化を進めるとともに、戦略的にこれを活用する枠組みを構築する。また、ものづくり産業（材料、部品、自動車や航空機など）の企業や加工技術を横断的に見渡せる有識者等へのヒアリング、内外の技術動向や政策・標準化・安全性に関する調査研究など、本研究開発の方向性検討に必要な活動を積極的進めると同時に、研究開発計画へ適宜反映させることにより、高輝度・高効率次世代レーザー技術開発の効果的な推進に繋げる。産学官が連携したこれらの活動を通じて、次世代技術開発・産業界への技術成果移転・人材育成に努める。

本項目の、「レーザー加工技術の標準化・調査研究」については、次世代レーザー加工における顕在・潜在ニーズ探索及び標準化に関する具体的な調査を行う。

（２）研究開発目標と根拠

本調査では、次世代レーザー加工の顕在ニーズだけでなく、今後成長が期待されるレーザー加工応用分野や、各種業界の潜在的なニーズ、レーザー加工を含めた加工システムの市場動向、既存のデータベースや業界標準等を踏まえ、次世代レーザー加工プラットフォームで取り扱うべき材料や加工方法を、データベース化の優先順位を含め選定するとともに、真に必要な加工基準サンプルや加工標準の策定を目指している。

表Ⅲ2-4-3-1 目標値と設定根拠

項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
4-3 レーザー加工技術の標準化・調査研究	加工ニーズデータベースを整備し、産業に必要なプロセスモニタリング技術に関する指針を取り纏める。	ニーズに応じた加工のその場観察を低コストで行うことにより、サイバーフィジカルシステムに適合した加工エコシステムが構築可能となる。	i) 基準サンプルや標準作業に関する指針の提示 ii) 技術ロードマップの策定。	複雑な加工プロセスにおいて、ニーズに基づく基準を抽出することが重要。

加工データベースと連動した、加工ニーズデータベースを構築することで、データベースの価値を高め、幅広い運用を目指している。

(3) 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールを下表に示す。

表Ⅲ2-4-3-2「レーザー加工技術の標準化・調査研究」開発スケジュール

項目	2016	2017	2018	2019	2020	最終目標値
4-3 レーザー加工技術の標準化・調査研究		ロードマップ策定 標準作業の指針		レーザー加工技術戦略 モニタリング技術の指針		加工ニーズデータベースを整備し、産業に必要なプロセスモニタリング技術に関する指針を取り纏める

(4) 研究開発目標と達成状況

テストプラットフォームで統一的に扱うべき材料や加工法について、および加工装置における基準サンプルや加工標準のニーズについてユーザー調査を実施した。また、レーザー加工技術ロードマップの策定を開始した。

表Ⅲ2-4-3-3 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
4-3 レーザー加工技術の標準化・調査研究	i) 基準サンプルや標準作業に関する指針の提示。 ii) 技術ロードマップの策定。	顕在・潜在ニーズ調査結果の蓄積。	○	ニーズ調査結果の研究開発項目①～③ チームとの共有化・活用方法の検討。

(5) 成果の詳細

・次世代レーザー加工における顕在・潜在ニーズ探索及び標準化に関する具体的な調査を行った。まず、レーザー加工に係る顕在ニーズについて、産業分野毎に公開情報をベースに調査した。公開情報について、加工事例は30件以上、顕在ニーズは50件程度である。主な調査対象事例は、1) レーザー切断・穴あけ、2) レーザー溶接・ブレイジング、3) 医療機器製造および生体材料などである。

(6) 最終目標の達成の見通し

上記のように、ここまでの開発で、レーザー加工の標準化および加工ニーズ探索による次世代レーザー加工プラットフォーム、及びデータベース構築等への対象材料リスト化等のデータ蓄積と整理が進んだ。今年度さらに、テストプラットフォームで統一的に扱うべき材料や加工法につ

いて基準サンプルや標準作業に関する指針と技術ロードマップの作成、をすすめることで、中間目標を達成する見通しを得ている。今後は、ニーズ調査結果の研究開発項目①～③ チームとの共有化・活用方法の検討を深めるとともに、4-1の加工プラットフォーム、4-2の基盤技術開発との連携を図ることで、最終目標であるプロセスモニタリング技術に関する指針取り纏めも達成の見通しである。

(7) 知的財産権及び成果の普及

知財の確保実績と成果普及活動の実績は添付資料の表にリストに記載している。

IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

最初に、本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方を示す。

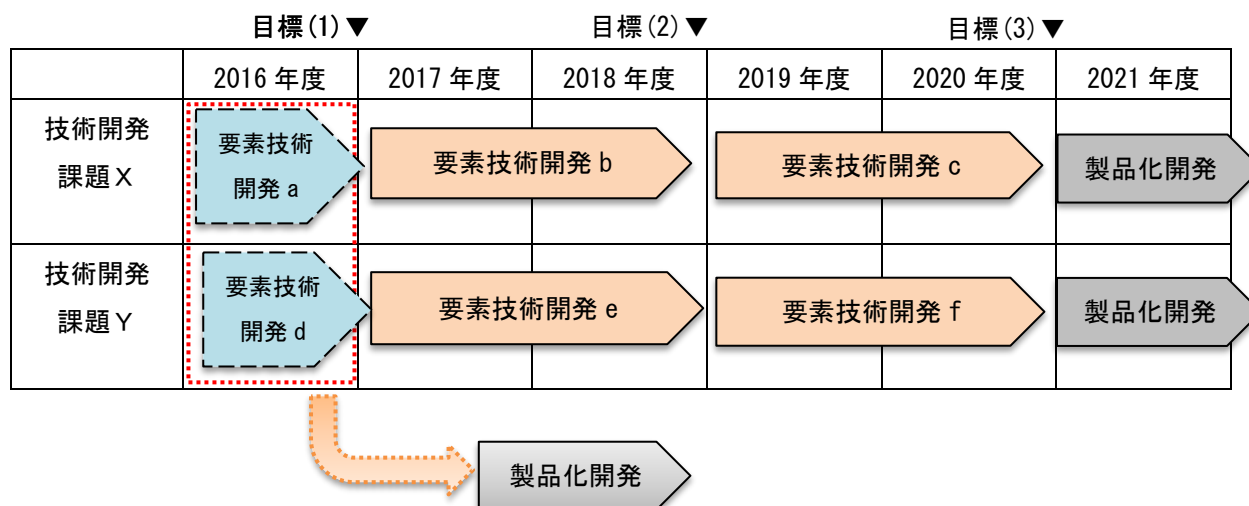
- ・「実用化」とは、当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることをいう。
- ・「事業化」とは、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することをいう。

1. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

1-1. 実用化・事業化に向けた戦略

本プロジェクトにはレーザーダイオード、光学結晶、レーザー光源、レーザー加工機など、上流から下流までの技術が含まれており相互の交流とアライアンス活動が活発化することが望まれる。また、多種多様なユーザーの期待に迅速に応え、早期の製品化により市場からのフィードバックを得ることが望ましい。このことから、本プロジェクトにおける実用化・事業化に向けた戦略を次のように定めた。尚、実用化、事業化の詳細は項目毎に記載する。

- 1) 垂直統合モデルではなく光源や加工機など各レイヤーで事業化を推進する。
- 2) 研究開発が終了した技術をプロジェクトから切り出しプロジェクト期間中から製品化を後押しする。



図IV1-1-1 製品化の切り出しモデル

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「高品位レーザー加工技術の開発」

2-1-1. 「高品質・大口徑波長変換素子の開発」（実施先：大阪大学）

（1）実用化・事業化の見通し

本事業終了後、実施先である大阪大学発ベンチャーの（株）創晶超光にて事業化を行う。本事業で取り組んでいるように、深紫外レーザーの高出力化の要求を満たすには高品質（高レーザー損傷耐性）結晶を使用することが装置の安定化の鍵となるため、事業化への見通しは立つものと考えている。また、CLB0 素子は消耗品として1年で交換することが一般的であり、装置台数の増加に伴って素子販売量が純増するビジネスモデルとなっている。

（2）事業化までのシナリオ

2016年に創業した（株）創晶超光では、高品質 CLB0 結晶の製品販売を手掛けており、高品質 CLB0 の市場での優位性を示している。これらのアドバンテージを活かし、本事業で開発した大型結晶育成装置をベースに量産用設備を新規導入して製品開発を進め、大型・高品質結晶に製品の軸足をシフトする。

（3）波及効果

本事業は次世代レーザー加工をターゲット分野としているが、半導体製造分野においても、CLB0 で発生する高輝度深紫外レーザー光はシリコンウェハの残留微粒子検査を行う際の散乱観察用照明として必要されている。これらは微細配線が進むシングルナノサイズの配線デバイスを実現するための必須技術であり、IoT/AI 時代の先端半導体素子製造、及びそれらを用いた超スマート社会 Society5.0 の実現に貢献する。

2-1-2. 「短波長・短パルスレーザー装置の開発」（実施先：スペクトロニクス株式会社）

（1）実用化・事業化の見通し

様々な電子機器の小型化、薄型化、高密度化が進む中で、10um以下の微細加工の需要が急増している。微細加工を実現するための手段として超短パルスレーザーが注目されており、中でも、セラミック、GFRP、GaN等の難加工先端材料や、各種基板への超微細穴開けにおいては、波長300nm以下のレーザー（深紫外レーザー）が求められている。本研究開発に係る深紫外ピコ秒パルスレーザー装置は、短波長（波長266nm帯）、短パルス（パルス幅100ピコ秒未満）、高出力（出力50W以上）という特徴を持ち、上述した市場ニーズに対して、加工品質、及び生産性（加工速度）ともにユーザーの要求に応えるものである。さらに、本レーザー装置のシード光源にはゲインスイッチング方式で駆動するDFB半導体レーザー（以下GS-LD）を採用しており、競合する短パルスレーザーメーカーが採用するモード同期レーザー光源とは異なる。GS-LDの最大の特徴

は任意のタイミングで 100ps 以下の短パルスが発生させられることであり、従来のモード同期レーザーにはない特徴である。モード同期レーザーは数十 MHz の固有の周波数で動作しており、加工装置のスキヤナ等と同期した場合数十 ns から数百 ns の時間ジッタが生じる。一方、GS-LD は固有の周波数をもたないため、時間ジッタは 0.05ns と小さくできる。また、シームレスに繰り返し周波数を変更可能であり次世代の高速レーザー加工や、多種多様な形状の加工に対して最適な加工を実現できるとともに、今後の製造革新をもたらす IoT、CPS (Cyber Physical System) へのレーザー技術の適用においても、大きく貢献するものである。

本事業終了後、実施先であるスペクトロニクス（株）にて事業化を行う。現在、実生産に使用可能な短波長短パルスレーザー光源は存在しておらず、本事業で取り組んでいるように、普及のための鍵となる高出力化を達成後は、優位性を明確に示すことができ、事業化への見通しは立つものと考えている。また、深紫外域のレーザー装置には CLBO 結晶を含むミラーやウィンドウなどの光学部品の定期メンテナンスが必要であり、これらの体制の拡充を行う必要があるが本メンテナンスも販売台数の伸張に伴い、事業として成立するものである。

（２）事業化までのシナリオ

実施先のスペクトロニクス社においては、平均出力 2W のレーザー装置の販売やデモ機運用に加えて、展示会等の普及活動の結果、ユーザー企業から求められるレーザー仕様などの情報が得られている。用途別に 10W 級、20W 級、50W 級と大別し、それぞれについて実用化開発を行い、ユーザーからのフィードバックを得て最終製品設計に反映する。同社は同時に生産設備の投資判断に従って事業化を行なう。

同社は、10W 級機、20W 級機については本事業期間と並行して別途実用化開発を実施し、10W 級機は 2020 年度内に、20W 級機は 2021 年度内の事業化を目指す。50W 級機については 2021 年度末に事業化判断を行ない、その判断に従って生産設備等の生産体制を整え、販売を開始する。

（３）波及効果

本事業で開発する深紫外ピコ秒レーザーは、CLBO 結晶をはじめとする国内の高い材料技術、半導体レーザー技術、それらの部材をベースとした光学設計技術を基に、高出力な深紫外線発生を可能とし、次世代の高効率、高品位かつ高生産性のレーザー加工ニーズを先取りし、世界をリードすることができる事業分野になりうる。この分野でいち早く事業化した技術的な先行者利益を次の開発に活かす連鎖を繰り返し、IoT/AI 時代に不可欠な先端デバイスに対して従来の機械加工では成しえないソリューションを提供することが可能となる。また、日本国内に保有する高い材料・デバイス技術・レーザーシステム技術を活用することで、国内で開発製造するレーザー加工システムはグローバルで高い競争力を維持し続けることが可能となる。

2-1-3. 「短波長・短パルスレーザー加工技術の開発」 (実施先：三菱電機株式会社)

(1) 実用化・事業化の見通し

以下のマーケットに向けて実施先において事業化を目指す。

- 半導体・電子機器製造用 DUV・ピコ秒レーザー加工機 (出力 20W)
- EV 部品 (電池等) 製造用 DUV・ピコ秒レーザー加工機 (出力 50W)

Ⅲ章の背景・目的に記載のとおり、上記市場の変革期にあたって新たな工法の確立が模索されており、レーザー加工によるブレイクスルーが期待される状況にある。本研究開発の高出力 DUV・ピコ秒レーザーによって既存レーザーでは困難なシングルマイクロメータ領域の微細加工品質と生産性を両立させることによってブレイクスルー技術の生産現場への導入が達成できるものとする。

また、レーザー微細加工の多用化が進んでいる半導体・電子機器産業に加えて、これまでマクロなレーザー加工が主体であった産業分野においてもレーザー微細加工への期待が高まっている。急拡大が予想される EV 関連部品を中心に、要求仕様の微細加工技術を開発することによってレーザー微細加工の新規産業分野への適用拡大を目指す。

事業化の体制としては、実施先である三菱電機 (株) の F A システム事業本部での事業家を想定する。半導体・電子機器産業向けのプリント基板穴あけ用レーザー加工機で世界トップシェアを占めており、十分な事業化能力を有する。

開発に関しては、同社の研究所が担当し、大阪大学 (創晶超光)、スペクトロニクス株式会社との連携継続を想定するとともに、本プロジェクトと関連する TACMI の活用も想定する。

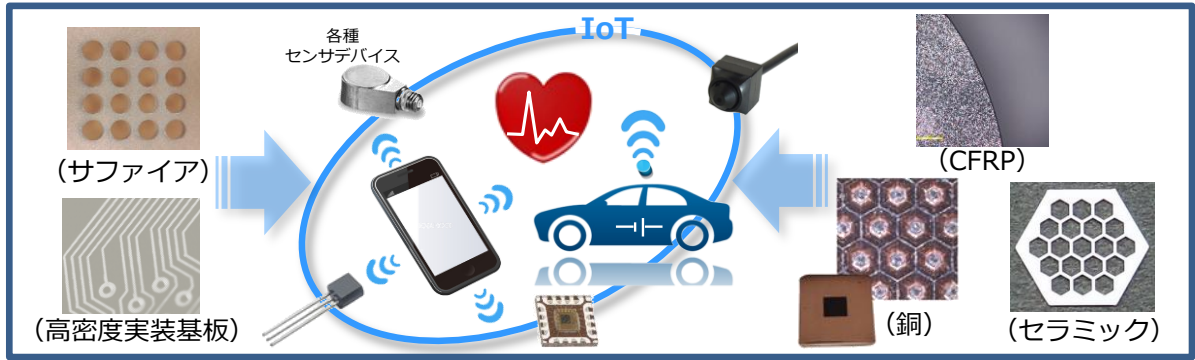
(2) 事業化までのシナリオ

実施先においては、本プロジェクト中からのユーザー連携を含めた活動を通じて高出力 DUV・ピコ秒レーザーによるプロセス革新の可能性を示すことによって早期の市場立ち上げを図る。

プロジェクト期間中の活動を含めて市場要求仕様を早期に絞り込み、加工機システムの設計を行う。想定連携先が供給する高出力 DUV・ピコ秒レーザー光源を試作加工機に搭載してユーザーとも連携した加工評価を実施し、ユーザーメリット明確化の成否によって事業化を判断する。事業化判断に従って製造設備等の生産体制を整え、生産、販売を開始する。

(3) 波及効果

高出力 DUV・ピコ秒レーザーによって加工品質と生産性を両立する新プロセスを実現することによって半導体・電子機器や EV 関連部品の製造能力向上が期待できる。製造技術の革新によって当該産業分野を活性化するとともに、最終製品である電子機器や車の高度化によってスマート社会の構築にも寄与できるものとする。



図IV2-1-3-1 社会実装の波及効果イメージ

2-2. 研究開発項目②「高出力レーザーによる加工技術の開発」

2-2-1. 「高輝度・高効率レーザー装置の開発」（実施先：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学）

（１）実用化・事業化の見通し

本プロジェクトにより確立する高出力パルスレーザー技術について、実用化に向けた開発を継続して行うことで、独自性があり国内外に対して競争力のある製品を開発することができる。並行して進めている。高出力パルスレーザー装置の他に LD ユニットの直接応用することも期待できる。

特にLDユニットについては、現在主流である連続波 (CW) 出力のLDの直接加工とは一線を画し、更なる高機能な加工が可能なパルス出力のLDとして、既存の装置の置き換えのみならず新たな市場の開拓が期待される。またパルス出力のLD装置は、様々なパラメータを制御することが可能なため、IoT やサイバーフィジカルシステム (CPS) に必要不可欠な基盤技術と言える。

（２）事業化までのシナリオ

高出力パルスレーザー装置は、ユーザー等との緊密な連携のもとで実用化開発を行う。

LD ユニットについては、塗装剥離や熱処理などの分野への事業化を念頭にプロジェクト後半から積極的にアウトリーチ活動を行い事業化の検討を行う。

（３）波及効果

高出力レーザー装置について、基礎科学の研究や医療応用に向けた実証研究のための光源としても期待されている。高出力のパルスレーザーは海外では既にこれらの分野で利用されつつあるため、国内においても今後需要が高まることが期待できる。LD ユニットについて、国内のLD製造技術が向上することで既存のLD装置の高性能化・低コスト化が進むことが期待できる。LDの他にもレーザー産業にとって重要な国内のコンポーネント・メーカーの競争力も高まることが見込める。

2-2-2. 「高出力レーザーによる加工基盤技術の開発」（実施先：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学、産業技術総合研究所）

（１）実用化・事業化の見通し

高パルスエネルギーを特長とした高出力レーザー加工応用の用途は、レーザー誘起の衝撃波に起因する金属材料の強化（ピーニング）技術に留まらず、塗装剥離などのクリーニング技術にもニーズがあることが明らかになってきた。実際に高出力レーザーを用いてレーザーピーニング加工や、塗装剥離加工の検証試験を実施し、その効果を確認した。レーザー加工は、非接触、局所的な選択加工が可能、産業廃棄物が少ない等の点で他の既存技術に比べて優位となる可能性があり、ユーザーからの期待の声が多く寄せられており、ユーザーのモチベーションは極めて高い。したがって、実用化・事業化の見通しはプロジェクト開始時よりも更に高まっている。

(2) 事業化までのシナリオ

実施者において、自動車メーカーへ向けたレーザーピーニングは生産プロセス評価を実施しながら実用化を進めている。航空機メーカーへは段階的な認証プロセスを経ながら実用化を進めていく。尚、レーザーピーニングの市場規模はプロジェクト終了時点で国内 30 億円、海外ではその 20 倍程の市場が見込まれる。その他、レーザーによる成形やレーザークリーニング等も含めるとさらに市場が拡大すると想定される。

表IV2-2-2-1 に実用化・事業化のスケジュールを示す。事業化までのシナリオとして、プロジェクト終了後にユーザー評価を通じてレーザー加工システムの最適化を進めていく。

表IV2-2-2-1 実用化・事業化のスケジュール

	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
LDモジュール			中間目標			実用化			事業化	
レーザー加工システム						最終目標	実用化			事業化

(3) 波及効果

高出力レーザー加工の実用化が進めば、学理を活用したサイバー空間での加工設計・加工予測とレーザー高い制御性を組み合わせることで、ものづくりの現場にける生産性の効率化が一段と高まり、競争力強化につながる事が期待できる。

2-3. 研究開発項目③「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」

2-3-1. 「フォトリック結晶レーザーの短パルス化・短波長化」（実施先：京都大学、スタンレー電気株式会社）

（1）実用化・事業化の見通し

本テーマ研究は、実施者において(A)近赤外波長域のフォトリック結晶レーザーの高ビーム品質・高平均出力・短パルス動作（パルス幅：サブナノ秒、平均出力：数ワット以上）の実現可能性を実証すること、(B)青紫色波長域のフォトリック結晶レーザーのワット級動作の実現可能性を実証することの2つを目標(POC)に据えて開発を進めている。5年間のプロジェクトを通じて、これらの目標(POC)を達成した暁には、加工システムとしての本格開発のフェーズへと移行し、“次々世代”から“次世代”光源としての位置付けへと展開する。このフェーズにおいては、平均パワーの一層の増大や、短パルス・短波長技術の深化、さらには高効率で簡便な波長変換（紫外域を含めた短波長化）などの技術開発を推進することにより、実用化・事業化へと展開していくことが可能になるものと期待される。これにより、究極的には、現在、項目①（あるいは項目④）グループにて開発が進められている高品位微細加工システム光源を、ワンチップのフォトリック結晶レーザー光源へと超小型化・低コスト化することが可能になると期待される。

高ビーム品質・高出力のフォトリック結晶レーザーは、加工応用以外においても、既存の半導体レーザーを大きく超える輝度が実現可能であるという特長により、自動車等の照明応用、レーザーメス等の医療・美容応用、光センシング応用など、幅広い分野において極めて魅力的であり、その社会実装が与えるインパクトは極めて大きいと言える。（なお、すでに出力 0.2W クラスのフォトリック結晶レーザー光源は、国内メーカーから販売を開始している。）

（2）事業化までのシナリオ

前項で記載のように、フォトリック結晶レーザーの短パルス化、短波長化は、本プロジェクトの目標(POC)の達成後、実施者において“次世代”光源開発のフェーズへと進展させ、このフェーズにおいて、さらに一層のパワー増大や、短パルス・短波長技術の深化を実現することで、超小型・低コスト・レーザー加工システムの事業化へと至ると考える。

（3）波及効果

本テーマの光源開発は、熱の影響が少ない精密加工を可能とする短パルス光源として、あるいは、金属材料の高効率な加工を可能とする短波長加工光源としての発展が期待され、CFRP等の先端材料や銅などの難加工材料の精密加工も可能とする次世代レーザー加工システムに搭載され、レーザー加工のマーケットの大幅な拡大に繋がるのが期待される。特に、超小型の半導体レーザー、ワンチップからなる、コンパクトで低コスト・低消費電力の、革新的なレーザー加工システムとしての発展が期待されるために、将来的には、その市場規模は極めて大きくなるものと期待される。

なお、フォトリック結晶レーザーは、加工用途以外にも、照明、医療、センシング応用など幅広い応用可能性を有している。本技術は、コンパクトで高輝度という特性を活かして、加工応用

以外にも、車のヘッドライト用の高輝度光源や、レーザーメスなどの医療用光源、さらには空間センシング・セキュリティーセンシングなどの光源としても、魅力的であり、大きな波及効果があることが予想される。

2-3-2. 「高品質 AIN 結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外 LD の研究開発」（実施先：理化学研究所、山口大学）

（1）実用化・事業化の見通し

深紫外 LD、ならびに、深紫外 LED は、レーザー加工機、殺菌・浄水、医療、樹脂硬化加工、印刷、塗装、コーティング、高密度光記録、バイオ産業、農業用途などの応用分野で実用化が期待される。具体的には、レンズ集光系と組み合わせたレーザー加工機用深紫外 LD、冷蔵庫、浄水器、エアコン、ポットなどに搭載する殺菌用 LED、樹脂硬化加工機器、3D プリンター、深紫外 DVD プレーヤー、ナローバンド UVB 免疫治療（皮膚治療）用深紫外 LD、イチゴ栽培病害防止ランプ（植物免疫作用機器）などが候補としてあげられる。深紫外 LD・LED チップとしての製品は、すでに UVLED の販売実績のある半導体素子メーカーに理研の技術を移転し、事業化することで販売が可能となる見通しである。また、深紫外 LD・LED を用いた上記の家電製品等は、国内国外の家電製品メーカーからの製品出荷が想定される。

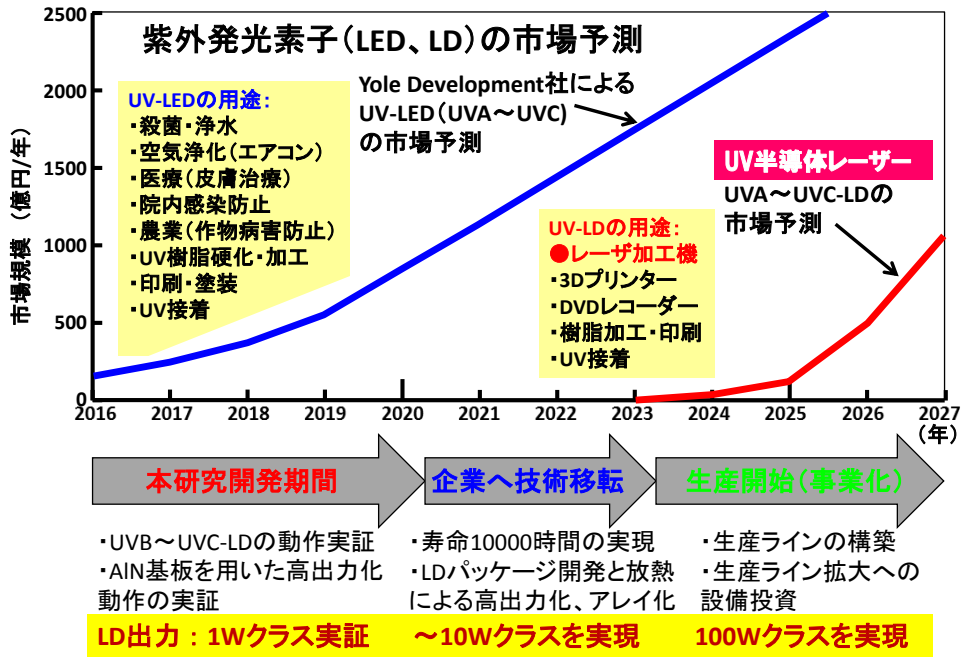
（2）事業化までのシナリオ

本テーマ研究で開発した、高品質 AIN、AlGaIn 結晶成長技術ならびに、UVA-UVC 深紫外 LD・LED の基盤技術を、実施者から半導体素子開発関連の企業に技術移管することにより、実用化・事業化が考えられる。事業化するにあたって、窒化物半導体を用いた高出力 LD、深紫外 LED をすでに事業化している企業が、技術移転・事業化までの時間と費用を考慮すると好ましいと考えられる。

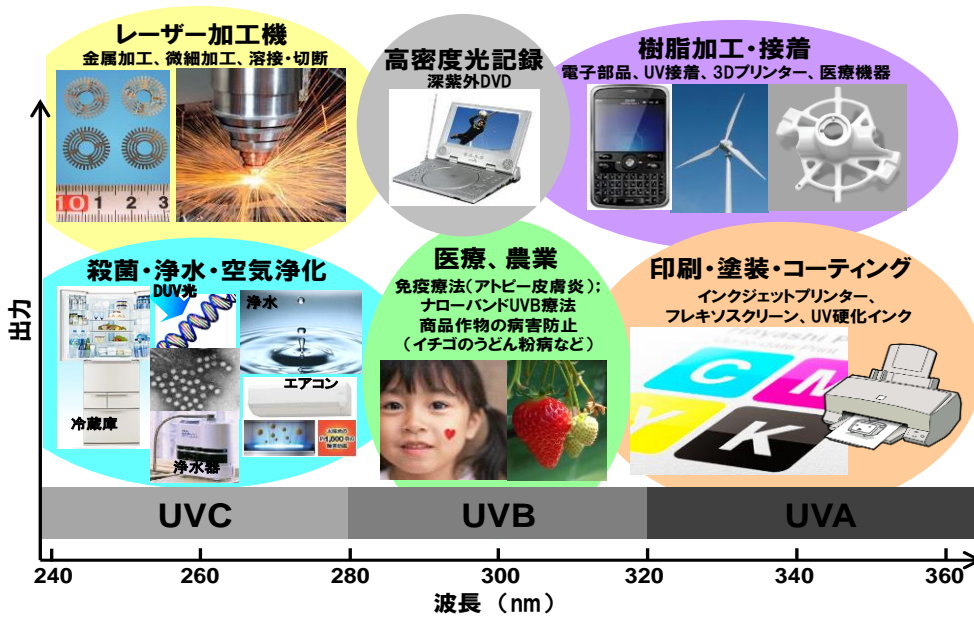
本開発期間中に、1W クラスの深紫外 LD の動作実証が完了したことを想定すると、その後、4 年程度の企業へ技術移転を経て事業化が可能であると想定される。企業への技術移転と事業化への準備として、LD パッケージ開発と放熱の最適化による高出力化、アレイ化により 10W クラスの出力の実現、ならびに、素子寿命 10000 時間を達成する必要がある。それらの開発を経て 2024 年頃に 10W クラスの深紫外 LD の生産出荷が可能になると考えられる。

（3）波及効果

深紫外 LD、ならびに開発途上で実現される深紫外 LED は、レーザー加工機、殺菌・浄水、医療、樹脂硬化加工、印刷、塗装、コーティング、高密度光記録、バイオ産業、農業用途などの応用分野で実用化が期待され、深紫外 LED までを含めると年間 2000 億円（2025 年）を超える市場規模が期待できる。



図IV2-3-2-1 深紫外LDの実用化・事業化へのシナリオの概略



図IV2-3-2-2 成果の波及効果: 深紫外LD、LEDの応用分野の広がり

2-3-3. 「高効率加工用 GaN 系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発」（実施先：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社）

（１）実用化・事業化の見通し

GaN 系発振波長帯レーザー発振器は 2025 年には DDL 方式の約 3 割を占めると予想している。このような市場環境の中、実施者のパナソニックは赤外レーザー加工機ならびにそれとロボットを融合させた DDL レーザー溶接ロボットシステムを製品化しており（図IV2-3-3-1）、レーザー溶接システムやレーザー切断機などの用途で市場導入を図っている。そこで、加工用 GaN レーザーは、本システムの次世代版として位置付けて展開することを想定している。



図IV2-3-3-1 レーザー溶接ロボットシステム

（２）事業化までのシナリオ

実施者のパナソニック（株）は 1984 年にコンパクトディスク用半導体レーザーの量産化を開始して以来、半導体レーザーの量産化技術を構築してきた。また、1991 年より現在に至るまでビデオカメラ、光ディスクのピックアップレンズ、デジタルカメラなど多くの光学技術の開発と生産、事業化を実施している。このようなキーコンポーネントの事業化実績、ならびに、上述のダイレクトレーザー加工システム事業の実績などをベースに加工用 GaN レーザーについても事業化を進めていく。

（３）波及効果

前述のように、リチウムイオン電池の生産性を高めることができる。これによって、車の電動化を加速することが期待される。

2-3-4. 「高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発」（実施先：東京工業大学、富士ゼロックス株式会社一再委託先 産業技術総合研究所）

（１） 実用化・事業化の見通し

レーザー加工用光源は既に世の中に広く流布しているが、低消費電力で小型可搬型、かつ信頼性の高い光源はまだ世の中に普及していない。本研究テーマでは、この課題解決に適した面発光レーザーにおいて従来ではなしえなかった大出力化を比較的シンプルな方法で成し得るものであり、他の面発光型の光源と比較しても煩雑なプロセス工程を必要としないという利点がある。ビーム品質と大出力化の両立という利点の他、従来の面発光レーザーの製造プロセスがそのまま使えるため、販売規模が大きくなるまでは、既存の設備で対応できると考えられる。

事業化に向けては、面発光レーザー素子開発だけでなく、素子実装形態、冷却システム検討、集光光学系の構築、駆動ドライバの設計などがあるが、実施者においては、光学系の設計機能を保有しており、駆動ドライバ設計の知見もあり、加工用光源に適した技術開発を実践していく。

（２） 事業化までのシナリオ

本テーマは、新規光源に向けた研究開発を実施している状態であるが、光出力の強度に応じて段階的に商品化していくことが考えられる（図IV2-3-4-1）。モジュールの完成度を高めながら、モジュール単体の商品化を手始めに、図IV2-3-4-2に示す応用用途を参考にしながら、加工用大出力モジュールへの展開を計ることを考えている。

低パワー：増幅光モジュール

ビーム品質を維持しながら安定した1W前後のパワーを提供する増幅光モジュールの商品化が候補のひとつである。既に励起用光源等の用途向けに商品化されている赤外波長における0.5～1Wの増幅器モジュールに対し、面発光レーザー自身もつ、劈開がいらぬ、ウエハ状態で検査できる、COD (Catastrophic Optical Damage) が発生しない、などといった利点を生かし、市販品よりも安価で小型かつ長寿命な増幅器モジュールを提供することができる可能性がある。増幅器モジュールについては、既に2.3WのCW動作を確認している。

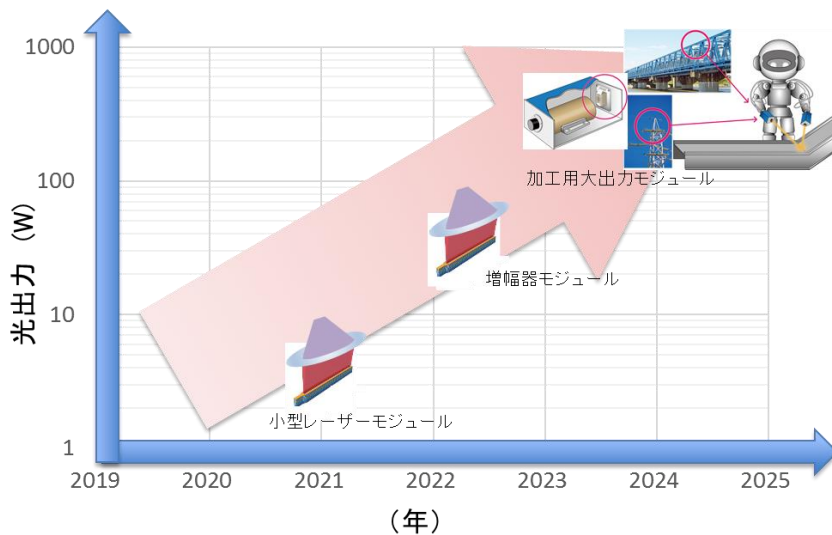
高パワー：加工用小型レーザーモジュール

面発光レーザーを用いたφ100umの領域に1kW(Pulse)を超える光出力を集光させる半導体レーザーモジュール。複数の面発光レーザー素子を面状に間隔をあけて配置できることから、1素子あたりの発熱量が抑えられる。端面型のようにスタック構造する必要がないので、冷却機構を1台で補えると予想している。またシリンドリカルレンズアレイと集光レンズといった、より簡便な光学系で良好なビーム品質を保ちながら集光させることができる。これらは価格と総体積の低減につながる。さらに面発光レーザー自身もつ長寿命の利点を生かし、信頼性に優れる安価で小型可搬型のレーザー加工装置用光源モジュールに繋げていきたい。

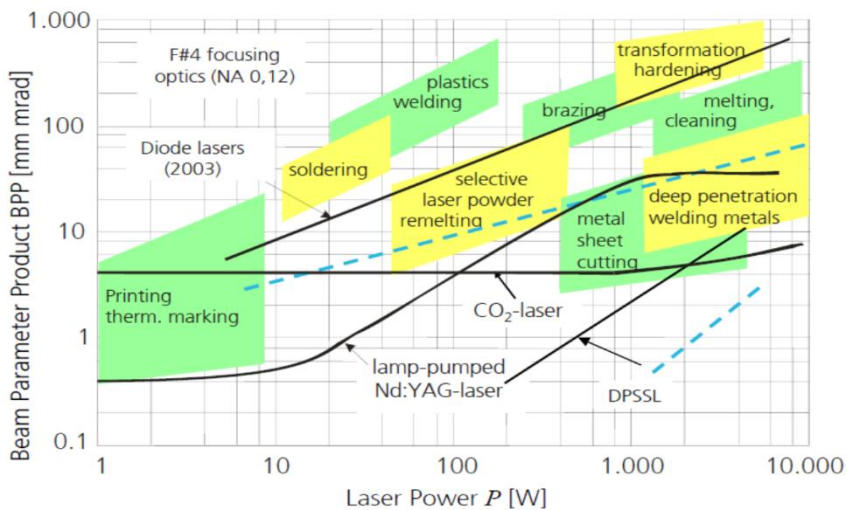
図IV2-3-4-3に板金溶接・スポット溶接でのワールドワイド市場動向調査結果を示す。本研究でターゲットとしているのは、この領域の特にスポット溶接市場である。固体・ディスク・ファ

イバレーザーが全体の約 80% を占めているが、DDL の採用も始まっている。ビーム品質と高出力の両立によって、まず約 500 億円の市場規模が推定されるスポット溶接市場への展開を考えている。

本レーザープロジェクトでは、1kW (Pulse) 光出力を目標にしているが、偏光制御や多波長化によってビーム品質を維持したまま大出力化することも可能となる。将来的には、波長ビーム結合方式を取り入れ、将来的には、用途に応じて 100W~数 kW オーダーの小型可搬型の加工用モジュールのラインナップを揃えていく方針である。

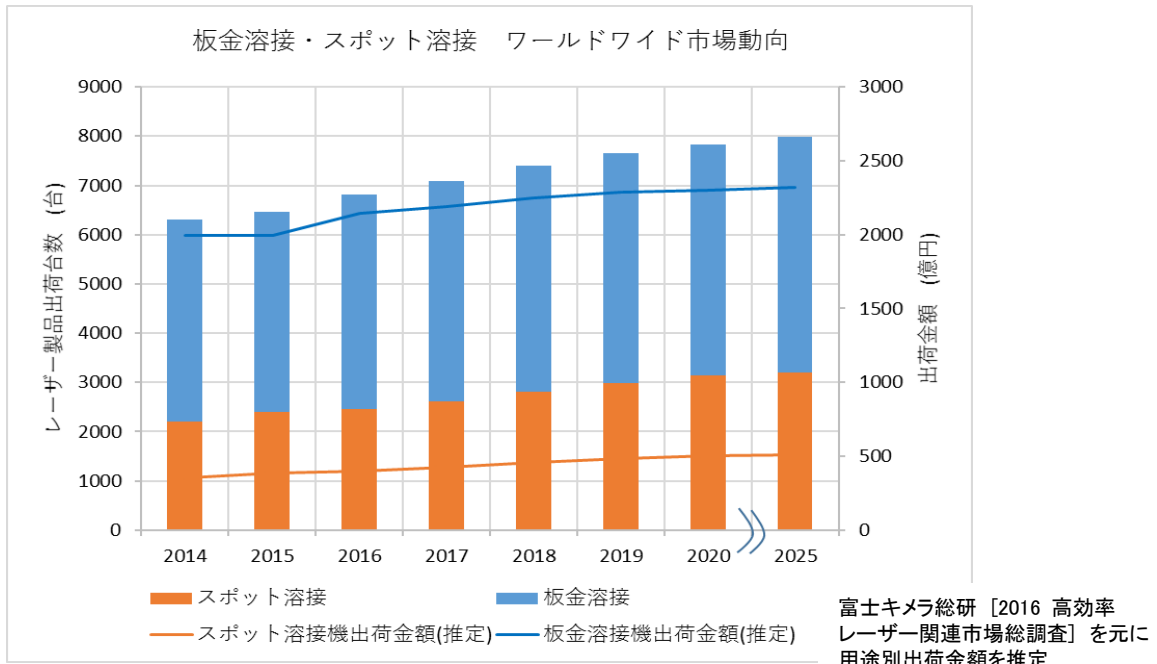


図IV2-3-4-1 実用化・事業化に向けた商品化イメージ



(出典)
 “Laser Sources Solid State Lasers – Overview” P.11
 Dieter Hoffmann
 Workshop: Laser technology and optics design
 Fraunhofer ILT Aachen, 4 – 6 November 2013

図IV2-3-4-2 光出力・BPP と加工応用例の関係



図IV2-3-4-3 板金溶接・スポット溶接 市場動

(3) 波及効果

レーザー加工装置の光源部分の小型化が実現できれば、加工装置設置のための十分な面積を確保できなかった事業所工場等での新たな導入が可能となる。安価な加工用光源の登場は、加工装置組み立ての技術を有していながら、光源モジュールが高価すぎるために導入をためらっていた中小企業へのハードルも下げる。これによって、小型レーザー加工装置の開発が加速し、携帯型レーザー加工装置の実現へ繋がれば、欧米が主力とする据え置き型のファーマーレーザー加工装置が導入できない領域、橋梁や高速道路の補修などの新領域への展開が可能となる。

2-3-5. 「高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発」（実施先：東京大学—再委託先 株式会社QDレーザ、三菱電機株式会社）

（1） 実用化・事業化の見通し

高出力量子ドットレーザーの市場、利用の形態として、実施者では以下を想定している。

（ア）金属の切断・溶接・積層加工（レーザーマクロ加工）

想定ユーザー：自動車・自動車関連部品メーカー、ジョブショップ等

（イ）光励起レーザーの励起用光源

想定ユーザー：電子部品メーカー他

レーザーを用いた生産装置市場は年率 8% 程度で成長し、産業装置としてのレーザーの重要度が増している。今後さらにレーザー加工の利用は伸長すると予測され、産業用エネルギー削減の観点からもレーザー装置の消費エネルギー低減が求められている。特に消費電力の大きい金属切断・溶接を代表とするマクロ加工市場においては、効率 10% 程度の CO₂ レーザーや固体レーザーに替えて、効率 30% 程度のファイバザーの導入が進行している現状にある。さらに 2030 年に向けた次なる技術シフトを考えると、全レーザー光源の中で最も効率の高い半導体レーザーの活用が予測され、各国で高効率・高出力半導体レーザー活用技術の開発が進められている。

本研究開発によって、高出力かつ従来の半導体レーザーと比較しても高効率の特徴を有する量子ドットレーザーを実現することができれば、社会のスマートエコシステム化を目指す世界的な動きの中で、究極の省エネルギー性能を有する加工用高出力レーザー光源として事業化可能と考える。

（2） 事業化までのシナリオ

本研究開発において従来技術との明確な差別化、将来技術としての可能性が実証された後は、次のステップとして、実施者において高出力量子ドットレーザーを基軸とした実用化フェイズの開発（期間 3 年程度）に繋げることを想定する。実用化開発の成功の暁には、競争力のある半導体レーザーチップ、加工用レーザー光源、レーザー加工装置として事業化を図ることになる。

（3） 波及効果

(1)の項にも記載したように、本テーマは次世代のものづくりの基盤技術となることによってスマート社会システムの構築に寄与する技術となる。具体的には、下図に示すように、次世代ものづくりにおいて重要な役割を担うレーザー加工の消費電力を 1/2 に低減することが期待される。



図IV2-3-5-1 量子ドットレーザーの普及による省エネ効果

また、本研究開発では、消費電力の大きい現行マクロ加工において多用される波長 $1\mu\text{m}$ 帯の半導体レーザーについて開発を実施しているが、量子ドットレーザー技術は紫外線を含む任意の波長を発生する半導体レーザーに拡張可能な基盤技術であり、短波長の加工用半導体レーザーや、加工以外のセンサ応用などに展開することにより広範囲な波及効果をもたらすことが期待できる。

2-3-6. 「革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発」（実施先：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所）

（１） 実用化・事業化の見通し

〔実用化・事業化を行う製品の概要〕

現状製品化されている 300nm 台のUVレーザーをもとに、本テーマ開発により実用化を目指す製品は、320nm/260nm の発振波長でかつ高出力（2W）、また高ビーム品質（TEM₀₀、M²<1.2）で、またユーザーのメンテナンスサイクルから年1回のレーザー交換が求められるレーザーの寿命は8700時間（1年）以上とするのが最適である。

UVレーザー光源は例えば以下のアドバンテージがあり、このような利点を踏まえ、UV光源を搭載する加工機、検査装置、測定装置メーカーにUVレーザーを提供できるよう実施者において事業化を進めていく。実用化の面では既存レーザーの置き換えなどの面もあり大きな優位点を持っていると考えている。

- ・加工対象の寸法精度向上（発振波長、高ビーム品位）
- ・加工スピード向上（高出力）
- ・加工コストの低減（長寿命、高出力、高効率）

〔用途〕

実施者の（株）金門光波は、既存のHe-Cdレーザー（波長325nm、3～100mW）の事業で高いシェアを持ち、多くのUVレーザーを使う顧客と長年の関係を構築している。この波長帯域（320nm）における高出力なレーザー光源の有効な代替手段は現在のところ他に無く、用途開発や製品の展開としては非常に有利な条件の下にある。開発するUVレーザーの特徴から、同社においては、以下に例示される装置等に搭載されることを想定し、顧客に情報提供など働きかけを行うことを考えている。

a) 3Dプリンタ用光源

3Dプリンタは、近年その造形方式と使用するニーズも同様に多様化していて、種類によっては非常に安価な装置も販売されている。一方、UV硬化樹脂を使用した光造形法に従来より使用されるHe-Cdレーザーは、波長325nmで出力40mW、寿命3000時間であり、YAGレーザーより波長が短いことからより高精細な造形が可能となっている。尚、開発するUVレーザー光源が出力2Wで8700時間以上の寿命を持つことを想定すれば、造形スピードが増し作業時間が短縮すること、寿命が長くなったことでの装置のランニングコストが低減できエンドユーザーにおいてコストダウンを大幅に図ることができる。またレーザー光源外形が1/6の小型になったことで3Dプリンタ装置自体がコンパクトになる利点がある。

その他想定される用途は以下になる。

- b) 直接描画装置用の光源
- c) レーザー励起蛍光観測装置、ラマン分光装置用のUV光源
- d) 半導体検査装置
- e) AR（拡張現実）/VR（仮想現実）への応用

（２）事業化までのシナリオ

実施者（株）金門光波）による事業化までのスケジュールを下表に示す。事業化については2021年度の市場販売を計画している。同社は、販売開始までに製造設備の整備、製造者の教育を行い、UVレーザー光源製品を市場へ供給する。販売開始後の売上の推移によって、生産ラインの増強等臨機応変に対応し、製造及び営業の人材補強にも力を入れていくことを考えている。

表IV2-3-6-1 実用化・事業化スケジュール

年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度
UV100mW タイプ市場評価	市場評価品投入			
量産ライン構築 量産設計・試作 UV500mW タイプ		ライン構築 量産設計・試作 (500mW)	UV500mWタイプ 市場投入	
UV2Wタイプ 量産設計・試作 生産 市場投入			量産設計・試作 (2W) 生産	UV2Wタイプ 市場投入

（３）波及効果

① CO₂削減

既存のHe-CdレーザーなどがUVレーザーへ置き換えられることで、CO₂削減効果が図られる。

UVレーザー搭載の装置のバリエーション

320nm及び260nmのUVレーザーの市場への提供により、UVレーザーを装置に搭載するメーカーの選択肢が増えて、市場が活性化する。

③ UVレーザー使用装置のスペック向上

装置に使用するUVレーザーの性能（出力、ビーム品質、寿命、サイズ）が向上することで、生産性の向上、高精細加工、ランニングコストの削減が可能と予想される。

2-4. 研究開発項目④「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」

2-4-1. 「レーザー加工プラットフォームの構築」（実施先：東京大学－再委託先 東北大学、産業技術総合研究所、ギガフォトン株式会社、大阪大学－共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所）

2-4-1-1. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「時間制御型レーザー加工テスト加工装置の開発、波長制御型レーザー加工テスト加工装置の開発、プラットフォームの整備と運営、データベースの構築」（実施先：東京大学－再委託先 東北大学、産業技術総合研究所）

（１）実用化・事業化の見通し

これまでなかった広域パルス幅可変（サブピコ秒～マイクロ秒）時間制御型レーザー加工テスト装置及び広域波長可変（赤外～深紫外）波長制御型レーザー加工テスト装置を開発し、レーザー学理と組み合わせた最適加工条件の探索を行うレーザー加工プラットフォーム構築に提供することにより、最適レーザー用いた新しい難加工材料の超精密加工が可能になる。さらに、項目①「高品位レーザー加工技術の開発」で開発されるレーザー装置を、本項目のレーザー加工プラットフォームに設置し、レーザー光源の選択性を拡大し、レーザー加工の最適条件をより広範囲で追及することを可能とする。

なお、OPIE' 18 展示会において、すでにパラメータ抽出装置の引き合いや、データベースの利用についての問い合わせを多数受けており、TACMI コンソーシアムを通じてニーズの把握を確認しつつ、事業化への戦略を立てていく。

（２）事業化までのシナリオ

本テーマの実施者においては、レーザー加工プラットフォームとユーザー企業を含むレーザー加工コンソーシアム（TACMI コンソーシアム）をリンクさせることにより、産業界への最適レーザー加工レシピの提供とともに産業界のニーズとシーズをマッチングする機会提供を目指す。TACMI コンソーシアムでは、会員数の拡大を図るとともに、より多くの研究機関、企業にレーザー加工プラットフォームの装置、データベースを活用してもらうための制度構築を現在進めており、単に技術開発のその普及だけでなく、TACMI を活用した市場のニーズの取り込みと、その後の研究開発テーマ企画へ発展させることを考えている。加工データベースはクリティカルボリュームを超えることで、産業界において求心力を発揮するとともに、ビジネスとしての価値も増大することから、今後はその価値を社会実装する上で、TACMI の法人化やベンチャー企業の設立も視野にいれ、グローバル企業へのトランスファーを検討していく。

（３）波及効果

レーザー加工プラットフォーム及び TACMI コンソーシアムの運営において、レーザー発振器、レーザー加工、レーザー加工シミュレーション、レーザー加工学理等における産官学の研究者、技術者の協働・融合が実践されることにより、レーザー加工産業、レーザー産業、レーザー加工機産業、レーザー科学の人材交流が活発化し関連企業、研究機関の連携構築が活性化する。

公的機関を中心に構築しユーザー企業も巻き込んだ協調領域の活動は、協調—競争ラインを押し上げることで、本分野における日本の製造業の国際競争力が高まり、加工データベースが十分に共有されると、データ活用型の新しいものづくりエコシステムが実現される。これにより、将来の超スマート社会の実現に寄与することとなる。

2-4-1-2. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発」（実施先：ギガフォトン株式会社）

（１）実用化・事業化の見通し

従来の露光用エキシマレーザーは比較的大面積への大出力の集光に適していたが、これに対してレーザーによる高精度加工には高い集光性能が必要となる。このため、今回オシレータをエキシマレーザーから固体レーザーに変更することにより、集光性能が格段に改善できることが期待できる。更にエキシマレーザーではできなかった短パルス幅（ナノ秒からピコ秒）化により加工効率を画期的に向上させることが期待できる他、併せて高出力化（>100W）、消費電力の大幅な低減（約1/2）が期待できるため、実施者においては、事業として大きく成功する可能性があると考えている。

（２）事業化までのシナリオ

プロジェクト期間にてハイブリッドArFレーザーの難加工材料への加工優位性が確認された後、実施者において、ユーザに加工性評価を受ける機会を設定し高い評価が得られた場合は、量産先行機の設計・製作、ユーザ評価（加工性評価・加工条件の最適化等）、量産の検討等を進め、事業化を図っていくことを考えている。

（３）波及効果

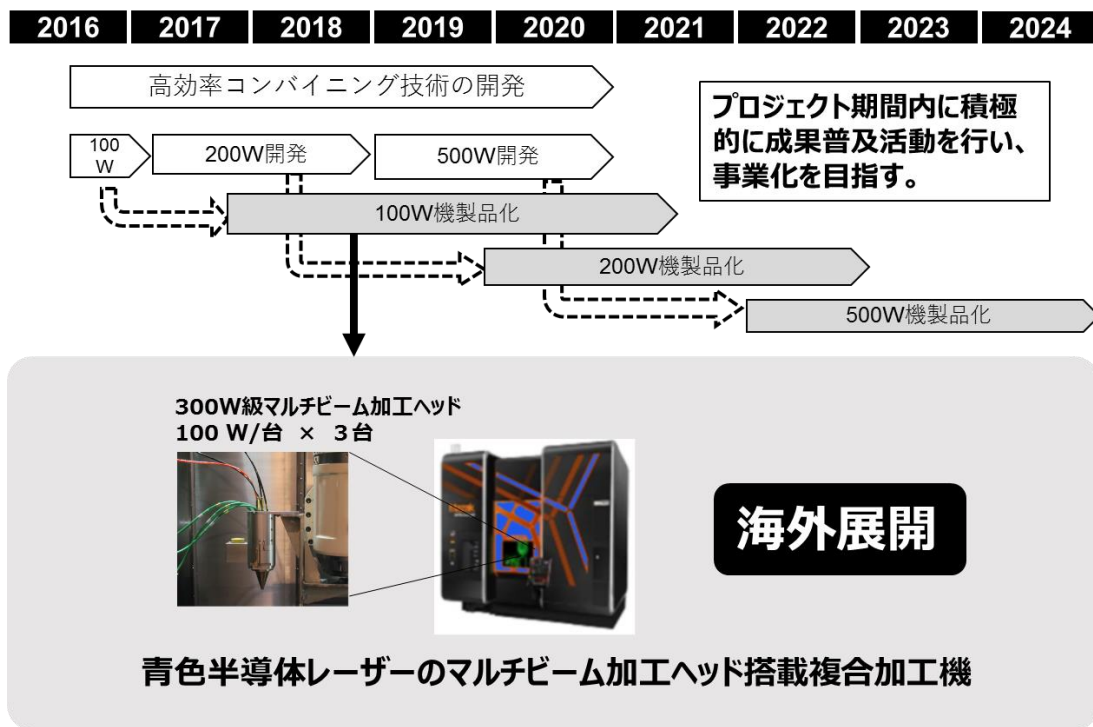
自動車業界は、より一層激化する燃費規制への対策の一環として、今後もCFRP等の軽量化素材を大幅に自動車本体に採用することが検討されており、2025年度の自動車用炭素繊維複合材料市場は2014年度に対して実に4.5倍もの高い需要の伸びが見込まれている。

このように自動車業界からは積極的に炭素繊維複合材料を採用するために必要な、レーザー加工の高精度化および加工コストの大幅な低減のニーズは極めて大きいと考えられる。

2-4-1-3. 「レーザー加工プラットフォームの構築」／「高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発」（実施先：大阪大学—共同実施先 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所）

（１）実用化・事業化の見通し

実施者において、次図IV2-4-1-3-1のように事業化に取り組んでいく。



図IV2-4-1-3-1 高輝度青色半導体レーザー事業化の計画

(2) 事業化までのシナリオ

実施者における事業化シナリオを以下に記す。

① 100 W、200 W、500 W 青色半導体レーザー単体の製品化（島津製作所）

2018年には100 W機の販売を開始した。現在開発中の200 W機を2019年の製品化を目標とする。また500 W機については2022年の製品化を目標とする。

協力先企業において半導体レーザーチップの量産体勢に入り価格の低下が見込まれている。

② 高輝度青色半導体レーザーの普及（大阪大学）

当該半導体レーザーを用いた溶接用加工ヘッドを開発。当該加工ヘッドの製品化を、実施希望の企業と実施する。

③ マルチビーム集光ユニットの普及（大阪大学）

大阪大学接合科学研究所にプラットフォームを設置、インターネット発信等で広く普及する。

④ マルチビーム集光ユニットを搭載した複合加工機の製品化（ヤマザキマザック）

(3) 波及効果

レーザー加工において、青色半導体レーザーは現在主流の近赤外半導体レーザーを凌駕出来ると考えられ、また、本テーマで開発する技術は、周辺光学要素部品の技術の開発にも繋がり、日本独自技術の結集体となる。さらに、青色半導体レーザーを導入すると、これまで困難であった加工を実現できるため、工作機械などへの搭載など潜在市場への適用が増加するため、高い波及効果が見込まれる。

2-4-2. 「レーザー加工の計測評価基盤技術の開発」(実施先：東京大学、産業技術総合研究所一再委託先 早稲田大学)

(1) 実用化・事業化の見通し

本テーマで開発されるフラグメントイオン計測装置は、レーザーアブレーションによって固体表面からの放出されるイオンの運動エネルギー分布を計測することができるが、以下のような特徴を有する。(1) 小型で可搬(重量約15kg)。(2) 超高真空が必要とせず、短時間で準備ができ試料も容易に交換できる。したがって、各拠点に設置されているレーザー加工プラットフォームに供給することができる。

また、レーザー加工などに用いられる実用材料の光物性を系統的に網羅したデータベースは少なく、特に真空紫外域は測定装置に限られることもあり、データ自体が希少なケースが多い。このことなどからも、ユーザーが実際に必要とする希少な情報にアクセスしやすいデータベースを構築することで、利用価値の高いデータベースとして実用化できると考えられる。

(2) 事業化までのシナリオ

実施者においては、フラグメントイオン計測とシミュレーション技術について、項目4-1等と連携することで産業界への最適レーザー加工レシピの提供を図ると共に、産業界のニーズとシーズをマッチングする直接的な機会提供も目指す。また、項目4-3等と連携して産業界のニーズの高い試料群に関するデータベースを構築する。屈折率や吸収係数などの基本的な光物性だけでなく、同じく項目4-3等での調査結果からニーズが高いとみなされる物性情報や、材料の成分と光物性との関係性やシミュレーション等による光物性発現のメカニズム解明などとも合わせたデータベースの構築を進めていく。データベースの外部公開は、レーザー加工プラットフォームやTACMIコンソーシアムとも連携して、公開手法や公開範囲(コンソーシアム内、日本国内、全世界など)を議論したうえで進めていくことになる。

(3) 波及効果

本テーマの成果は、拠点の利用やデータベースを通じてユーザーに提供される。産業界が必要とする各材料の加工レシピ、光物性情報を簡便に入手することで、レーザー加工条件の最適化、シミュレーション等による加工メカニズムの理解が深まり、製造産業における時間・コストの縮小が期待される。イオン計測技術は、汚染検出などの多様な応用の可能性も期待されている。

2-4-3. 「レーザー加工技術の標準化・調査研究」(実施先：産業技術総合研究所、東京大学)

(1) 実用化・事業化の見通し

加工ニーズのデータベースは加工データベースとともに、TACMIを通して利用方法の検討をしながら実用化を行う。現在すでに、実施者内における引き合いが多くあり、情報の使い方を慎重に検討した上で、さらに、ユーザー企業の意見も聞きながら事業化の方法を検討する。モニタリ

ングについては、研究開発項目4のすべての情報をもとに、その場観察に適した経済的な方法を抽出し、実施者内で実用化した上で事業化検討を進める。

(2) 事業化までのシナリオ

実施者においては、事業期間内にコンソーシアムを通じて利用料とデータ収集とのバランスを学習し、プロジェクト終了後に自律的に運用できる運用方法を見極めたのち、事業化に結び付けていく。

(3) 波及効果

今後、データベースは非常に大きな求心力となることから、データベースをもとに加工シミュレータが構築され、サイバー空間でものづくりのサプライチェーンが構築される。優れたサイバーフィジカルの加工システムを持つところにユーザーのニーズが集中すると予想されることから、優れた加工データベースを持つことは価値が大きく、高い波及効果が期待できる。

添付資料

●特許論文等リスト（2018年5月末時による）

【特許】（Patent Cooperation Treaty：特許協力条約による出願を含む）

◆項目① 高品位レーザー加工技術

出願（公開前） 1件

◆項目② 高出力によるレーザー加工技術

出願（公開前） 4件

◆項目③-1 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化

出願（公開前） 2件

◆項目③-3 高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザー

出願（公開前） 18件

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

出願（公開前） 1件

◆項目④-1-2 極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術

出願（公開前） 1件

【論文】

◆項目① 高品位レーザー加工技術

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名	査読	発表年月
1	K. Ueda, Y. Orii, Y. Takahashi, G. Okada, Y. Mori, and M. Yoshimura	大阪大学、スペクトロニクス（株）	Picosecond high-power 355-nm UV generation in CsLiB6O10 crystal	Optics Express, Vol. 24, No. 26, pp. 30465-30473	有	2016/12
2	吉村政志	大阪大学	UV 向け非線形波長変換素子の現状	OPTRONICS , Vol. 36, No. 421, pp. 46-50	無	2017/1
3	吉村政志, 高橋義典, 安達宏昭, 森勇介	大阪大学, (株) 創晶超光	紫外レーザー応用拡大に寄与する CLBO 結晶	光アライアンス, Vol. 28, No. 3, pp. 31-34	無	2017/3
4	西前順一, 吉村政志, 森 勇介, 折井庸亮	三菱電機、大阪大学、スペクトロニクス（株）	深紫外ピコ秒レーザーによる高品位レーザー加工技術の開発	レーザー学会誌、レーザー研究第 45 巻、第 9 号	有	2017/9
5	折井庸亮、澤田久、奥山大輔、山垣美恵子、泉英男、渋谷公彦、岡田穰治	スペクトロニクス（株）	高出力深紫外ピコ秒レーザー	レーザー学会誌、レーザー研究第 45 巻、第 9 号	有	2017/9

◆項目② 高出力によるレーザー加工技術

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名	査読	発表年月
1	栗田隆史	浜松ホトニクス（株）	次世代加工技術のための LD 励起高出力パルスレーザー開発	レーザー学会誌、レーザー研究第 45 巻、第 9 号	無	2017/9

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名	査読	発表年月
1	谷峻太郎、他	東京大学	Observing laser ablation dynamics with sub-picosecond temporal resolution	Proceedings, SPIE:Proceedings Volume 10252, The 4th Optical Manipulation Conference	有	2017/4
2	小林洋平	東京大学	NEDO 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発プロジェクト	レーザー加工学会誌	有	2017/6

3	小林洋平	東京大学	「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」特集号によせて	レーザー学会誌、レーザー研究第 45 巻、第 9 号	有	2017/9
4	湯本潤司、他	東京大学	レーザー加工研究プラットフォームとレーザー加工データベースの構築	レーザー学会誌、レーザー研究第 45 巻、第 9 号	有	2017/9
5	谷峻太郎、他	東京大学	Pulse-by-pulse depth profile measurement of femtosecond laser ablation on copper	Appl. Phys. A124, 265(2018)	有	2018/3
6	吉田剛、他	産業技術総合研究所	Robust generation of Fourier-synthesized laser fields and their estimation of the optical phase by using quantum control of molecular tunneling ionization	Journal of Physics B	有	2018/1
7	吉田剛、他	産業技術総合研究所	フーリエ合成レーザー場を用いた分子トンネルイオン化の 4 モード量子制御	電気学会光量子デバイス研究会	無	2018/3

◆項目④-1-2 極短波長領域のハイブリッド ArF レーザー加工技術

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名	査読	発表年月
1	柿崎弘司、他	ギガフォトン(株)	極短波長領域のハイブリッド ArF レーザー加工技術の開発	レーザー学会誌、レーザー研究第 45 巻、第 9 号	有	2017/9

◆項目④-1-3 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名	査読	発表年月
1	塚本雅裕	大阪大学接合科学研究所	高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発	レーザー学会誌、レーザー研究第 45 巻、第 9 号	有	2017/9

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

◆項目① 高品位レーザー加工技術

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	K. Ueda, Y. Orii, Y. Takahashi, G. Okada, Y. Mori, and M. Yoshimura	大阪大学、スペクトロニクス(株)	【口頭発表】 Picosecond high-power 355-nm UV generation in CsLiB ₆ O ₁₀ crystal	OSA Lasers Congress 2016 (Advanced Solid State Lasers)	2016/11
2	福原泰史, 高橋義典, 安達宏昭, 森勇介, 吉村政志	大阪大学、(株) 創晶超光	【口頭発表】 高品質 CsLiB ₆ O ₁₀ 結晶成長に向けたセルフフラックス組成の検討	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
3	福原泰史, 大驛悠一, 高澤秀生, 高橋義典, 日野桂子, 松本和久, 安達宏昭, 森勇介, 吉村政志	大阪大学、(株) 創晶超光	【口頭発表】 非線形光学結晶 CLBO の紫外レーザー損傷耐性向上に向けた育成技術開発	レーザー学会第 506 回研究会「高機能固体レーザーとその応用」	2017/7
4	Y. Mori, Y. Takahashi, H. Adachi, and M. Yoshimura	大阪大学、(株) 創晶超光	【招待講演】 Recent Progress in Nonlinear Optical Crystal CsLiB ₆ O ₁₀	The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24)	2017/8
5	T. Fukuhara, Y. Oeki, Y. Takahashi, H. Adachi, Y. Mori, and M. Yoshimura	大阪大学、(株) 創晶超光	【口頭発表】 CsLiB ₆ O ₁₀ grown from self-flux solutions for high resistance against UV laser-induced damage	The 24th Congress of the International Commission for Optics (ICO-24)	2017/8
6	M. Yoshimura, Y. Takahashi, H. Adachi, and Y. Mori	大阪大学、(株) 創晶超光	【招待講演】 Recent Progress in Nonlinear Optical Crystal CsLiB ₆ O ₁₀	The 7th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-7)	2017/10
7	T. Fukuhara, Y. Oeki, K. Ueda, H. Takazawa, Y. Takahashi, K. Hino, K. Matsumoto, H. Adachi, Y. Mori, and M. Yoshimura	大阪大学、(株) 創晶超光	【ポスター発表】 CsLiB ₆ O ₁₀ grown from Li-poor flux solutions for high resistance against UV laser-induced damage (Best Poster Award 受賞)	The 7th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-7)	2017/10

8	西前順一, 吉村政志, 折井庸亮	三菱電機 (株)、大阪大学、スペクトロニクス(株)	深紫外ピコ秒レーザーによる高品位加工技術の開発	第1回 TACMI シンポジウム	2017/12/13
9	吉村政志, 福原泰史, 上田健太郎, 大驛悠一, 高澤秀生, 高橋義典, 日野桂子, 松本和久, 森勇介	大阪大学、 (株) 創晶超光	【口頭発表】非線形光学結晶 CsLiB ₆ O ₁₀ の紫外レーザー損傷高耐性化	レーザー学会学術講演会第38回年次大会	2018/1
10	M. Yoshimura, R. Murai, Y. Takahashi, and Y. Mori	大阪大学、 (株) 創晶超光	【招待講演】 UV laser-induced degradation of nonlinear optical borate crystals	OPIC-Pacific Rim Laser Damage (PLD 2018)	2018/4
11	M. Yoshimura, Y. Takahashi, R. Murai, and Y. Mori	大阪大学、 (株) 創晶超光	【招待講演】 Recent Progress in Nonlinear Optical Crystal CsLiB ₆ O ₁₀	Asia-Pacific Laser Symposium 2018 (APLS 2018)	2018/5

◆項目② 高出力によるレーザー加工技術

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	関根尊史	浜松ホトニクス(株)	Demonstration of a 64J at 10ns Output from Cryo-cooled Yb:YAG Laser using new laser-diode technology	The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2017)	2017/4
2	渡利威士	浜松ホトニクス(株)	Development of Materials Processing Technology using 100-J class High-Energy-Laser Pulses	The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS2017)	2017/4
3	関根尊史	浜松ホトニクス(株)	64J Output Energy in 10ns Pulse from Cryogenic Yb:YAG Ceramics Laser	CLEO2017	2017/5
4	弘中陽一郎	大阪大学	高パルスエネルギーレーザーを用いた残留応力場の形成	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
5	栗田隆史	浜松ホトニクス(株)	大出力レーザーの産業利用と新たな量子ビー	第60回放射線化学討論会	2017/9

			μ計測技術への展望		
6	水田好雄	浜松ホトニクス (株)	Low Temperature Gas Cooling Technique for a High Efficiency 100 J Class Ceramics Laser Amplifier	Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL2017)	2017/10
7	森田宇亮	浜松ホトニクス (株)	Development of Compact LD Module for 10J at 10Hz Cryo-cooled Yb:YAG Ceramics Active Mirror Laser Amplifier	Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL2017)	2017/10
8	弘中陽一郎	大阪大学	高出力レーザーを用いた金属中の残留応力場形成	プラズマカンファレンス 2017	2017/11
9	川嶋利幸	浜松ホトニクス (株)	高出力レーザーの産業利用と新たな量子ビーム計測技術への展望	第1回 TACMI シンポジウム	2017/12
10	関根尊史	浜松ホトニクス (株)	100J級LD励起Yb:YAGセラミックレーザーの開発	平成29年度レーザー核融合とレーザー加速研究会	2018/1
11	関根尊史	浜松ホトニクス (株)	100J級LD励起Yb:YAGセラミックレーザー装置の開発	レーザー学会学術講演会第38回年次大会	2018/1
12	栗田隆史	浜松ホトニクス (株)	100ジュール級ナノ秒高輝度パルスによる加工基盤技術の開発	レーザー学会学術講演会第38回年次大会	2018/1
13	弘中陽一郎	大阪大学	高出力レーザーによる金属材料の強靱化に関する研究	レーザー学会学術講演会第38回年次大会	2018/1
14	三浦永祐	産業技術総合研究所	高出力レーザーの応用研究	計量標総合センター成果発表会	2018/2
15	宮西宏併	大阪大学	高パルスエネルギーを用いた残留応力場の形成とX線自由電子レーザーを用いた形成過程の観察	平成29年度衝撃波シンポジウム	2018/3
16	宮西宏併	大阪大学	NEDO 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発プロジェクトにおける	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 構造物性研究センター研究会	2018/3

			取り組み		
17	竹内康樹	浜松ホトニクス (株)	Development of Cryogenically Cooled Helium Gas Circulation System for Cooling Active Medium of 100 J Class Laser Amplifier	OPIC2018 (Advanced Lasers and Photon Sources)	2018/4
18	森田宇亮	浜松ホトニクス (株)	Development of a 10-J, 10-Hz Cryo-cooled Yb:YAG Ceramics Active Mirrors Laser Amplifier System	OPIC2018 (Advanced Lasers and Photon Sources)	2018/4
19	水田好雄	浜松ホトニクス (株)	Development of High-Energy-Class Laser Processing Technologies Using a Laser-Diode Pumped 100-J Pulse-Shaped Laser System	OPIC2018 (Smart Laser Processing Conference)	2018/4
20	重森啓介	大阪大学	Laser Peening Study with Large Scale High Power Laser	Laser Solutions for Space and the Earth 2018 (LSSE2018)	2018/4
21	重森啓介	大阪大学	高出力レーザーによるレーザーピーニングの研究	光・量子科学合同シンポジウム	2018/5

◆項目③-1 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	S. Noda	京都大学	Progress and Future Prospects of Photonic Crystal Lasers (invited)	25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2016)	2016/9
2	S. Noda	京都大学	Recent Progress in Photonic Crystals (invited)	OSA Frontiers in Optics / Laser Science (FiO/LS 2016)	2016/10
3	小泉朋朗, 江本溪, 園田純一, De Zoysa Menaka, 田中良典,	京都大学、スタンレー電気 (株)	GaN系フォトニック結晶レーザー実現のためのMOVPE空孔形成法の	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3

	野田進		検討		
4	井上卓也、森田遼平、田中良典、野田進	京都大学	3次元結合波理論によるフォトニック結晶レーザーの過渡応答解析	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
5	田中良典, Menaka De Zoysa, 野田進	京都大学	三角格子フォトニック結晶レーザーの高出力化のための格子点設計	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
6	森田遼平, 井上卓也, 北川均, 野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの高出力・短パルス動作の解析	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
7	野田進	京都大学	フォトニック結晶が拓く先端フォトニクス(招待講演)	日本学術振興会光電相互変換第125委員会 赤崎先生受賞記念研究会	2017/5
8	S. Noda	京都大学	Progress in Photonic Crystals (invited)	International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN 18)	2017/7
9	野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザー(招待講演)	2017年第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
10	井上卓也、森田遼平、田中良典、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの高出力・短パルス動作の解析－空孔形状の設計－	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
11	森田遼平、井上卓也、田中良典、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの高出力・短パルス動作の解析－電極形状の設計－	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
12	野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザー(招待講演)	第88回レーザー加工学会講演会	2017/10
13	野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーと加工・照明への展開(招待講演)	第9回光科学フォーラムサミット	2017/11
14	S. Noda	京都大学	Progress in Photonic Crystal Lasers (invited)	International Semiconductor Laser Conference (ISLC) 2018 Pre-conference/ Technical Committee on Lasers and Quantum Electronics (LQE)	2017/12

15	Menaka De Zoysa, 吉田 昌宏, 石崎 賢司, 初田 蘭子, 田中 良典, 野田 進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの進展(招待講演)	レーザー学会第 38 回年次大会シンポジウム「フォトニック結晶レーザーの進展」	2018/1
16	田中 良典, 北村 恭子, 野田 進	京都大学	変調フォトニック結晶レーザによるビーム走査(招待講演)	レーザー学会第 38 回年次大会シンポジウム「フォトニック結晶レーザーの進展」	2018/1
17	S. Noda	京都大学	Progress in photonic crystal lasers (invited)	SPIE Photonics West	2018/1
18	野田進	京都大学	フォトニック結晶が切り拓く新しい光技術と産業(招待講演)	京都高度技術研究所「次世代光学製品共創ネットワーク構築」フォーラム	2018/2
19	森田遼平、井上卓也、De Zoysa Menaka、石崎賢司、田中良典、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの自励パルス発振の実現	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
20	小泉朋朗、江本溪、園田純一、De Zoysa Menaka、田中良典、野田進	京都大学、スタンレー電気(株)	GaN 系フォトニック結晶レーザ実現のための MOVPE 空孔形成法の検討(II)	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
21	井上卓也、森田遼平、Kim Taejoon、De Zoysa Menaka、石崎賢司、野田進	京都大学	フォトニック結晶レーザーの緩和振動測定	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
22	江本溪、小泉朋朗、園田純一、De Zoysa Menaka、田中良典、野田進	京都大学、スタンレー電気(株)	GaN 系フォトニック結晶レーザにおける各種構造設計	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3

◆項目③-2 高品質 AlN 結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外 LD

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	T. Matsumoto, N. Maeda, M. Jo, N. Kamata and H. Hirayama	理化学研究所	Approaches towards Realizing Deep-UV Laser Diodes by Controlling p-AlGaN Layers	RIKEN Center for Advanced Photonics Advisory Council (RAPAC)	2016/8
2	松本卓磨, 大島一晟, 前田哲利, 定昌史, 鎌	理化学研究所	UVC-LD エピ構造への高密度電流注入の試み	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9

	田憲彦, 平山秀樹				
3	松本卓磨, 大島一晟, 前田哲利, 定昌史, 鎌 田憲彦, 平山秀樹	理化学研究所	AlGaIn系深紫外レー ザーダイオード (LD) 実現への進展	第4回「光量子工学研究 - 若手・中堅研究者から見た 光量子工学の展開 -」	2016/11
4	松本卓磨, 大島一晟, 前田哲利, 定昌史, 鎌 田憲彦, 平山秀樹	理化学研究所	AlGaIn系深紫外 LD 実現 へ向けた試み	第5回結晶工学未来塾	2016/11
5	平山秀樹	理化学研究所	半導体発光デバイス未 踏領域の進展と展望 (招待講演)	第13回エクストリーム・ フォトニクス「理研・分子 研合同研究会」	2016/11
6	平山秀樹	理化学研究所	AlGaIn系深紫外 LED、LD 開発の最近の動向-国 際会議報告などから (招待講演)	日本学術振興会第162委員 会「第102回研究会」	2017/3

◆項目③-3 高効率加工用 GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザー

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	持田篤範	パナソニック (株)	High-power continuous- wave operation over 100W of a single-chip InGaIn Laser Diode	The 7th Advanced Lasers and Photon Sources 2018 (Optics & Photonics International Congress 2018)	2018/4

◆項目③-4 高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザー

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Ahmed M. A. Hassan, M. Ahmed、中濱正統、 小山二三夫	東京工業大学	Numerical analysis of high output slow light VCSEL amplifier	第64回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3
2	許在旭、志村京 亮、顧曉冬、中濱 正統、谷晃宏、小 山二三夫	東京工業大学	面発光レーザー高出力化のた めの長尺半導体光増幅器	第64回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3
3	志村京亮、顧曉 冬、中濱正統、許 在旭、松谷晃宏、 小山二三夫	東京工業大学	増幅機能を有する VCSEL ビーム掃引デバイス	第64回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3

4	Shanting Hu、松谷晃宏、小山二三夫	東京工業大学	Unidirectional Coupling Of Laterally Coupled VCSEL And Slow Light Modulator/Amplifier	The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO)	2017/8
5	小山二三夫	東京工業大学	High Power VCSEL Amplifier For Laser Processing	The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO)	2017/8
6	Zeuku Ho、志村京亮、顧曉冬、中濱正統、松谷晃宏、小山二三夫	東京工業大学	High-resolution Beam Steering Of Slow Light VCSEL Amplifier	The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO)	2017/8
7	小山二三夫	東京工業大学	High Power VCSEL Photonics for Optical Sensing and Laser Processing	International Nano-Optoelectronics Workshop 2017 (iNOW)	2017/8
8	Shanting Hu、松谷晃宏、小山二三夫	東京工業大学	VCSELS Laterally Coupled with a Slow Light Modulator/Amplifier Showing Unidirectional Coupling	International Nano-Optoelectronics Workshop 2017 (iNOW)	2017/8
9	Ahmed Mohamed、Ahmed Hassan、Moustafa, Ahmed、中濱正統、小山二三夫	東京工業大学	Numerical analysis of Watt-class VCSEL amplifier	The 24th General Congress of the International Commission for Optics (ICO)	2017/8
10	Zeuku Ho、志村京亮、顧曉冬、中濱正統、松谷晃宏、小山二三夫	東京工業大学	VCSEL Optical Amplifier for High Power Operations	The 24th General Congress of the International Commission for Optics (ICO)	2017/8
11	鷹箸雅司、中濱正統、小山二三夫	東京工業大学	面発光レーザとスローライト導波路の高効率結合集積化	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
12	許在旭、顧曉冬、中濱正統、松谷晃宏、小山二三夫	東京工業大学	面発光レーザ増幅器の結合効率の検討	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
13	森長瑞、顧曉冬、小山二三夫	東京工業大学	高出力面発光レーザ増幅器の放射ビーム制御に関する研究	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9

14	小山二三夫	東京工業大学	面発光レーザ集積フォトニクス の最新動向と応用	光技術動向セミナー	2017/9
15	小山二三夫	東京工業大学	New Function and Integration of VCSEL Photonics	レーザ・量子エレクトロ ニクス研究会	2017/12
16	井上俊也、旭利 紘、西村 駿、中濱 正統、松谷晃宏、 坂口孝浩、小山二 三夫	東京工業大学	MEMS VCSEL 集積スローライ ト導波路ビームスキャナの 作製	第 65 回 応用物理学会 春 季学術講演会	2018/3
17	許在旭, 志村京亮, 顧曉冬, 中濱正統, 松谷晃宏, 小山二 三夫	東京工業大学	長尺面発光レーザ増幅器に よる高出力・高ビーム品質 動作	第 65 回 応用物理学会 春 季学術講演会	2018/3
18	森長瑞、顧曉冬、 志村京亮、中濱正 統、小山二三夫	東京工業大学	折り返し構造を有する VCSEL 増幅器によるドット パターン形成	第 65 回 応用物理学会 春 季学術講演会	2018/3
19	森長瑞、顧曉冬、 志村京亮、中濱正 統、小山二三夫	東京工業大学	VCSEL Amplifier with High Power and Narrow Divergence Applying a Folded Waveguide Layout	Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)	2018/5

◆項目③-5 高効率・高出力量子ドットレーザー

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	荒川泰彦	東京大学	Quantum dot light sources-Present and future- (Plenary)	19th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (MBE2016) , Le Corum, Montpellier, France (2016).	2016/9
2	荒川泰彦	東京大学	Quantum dot light sources-Past, present, and future- (Invited)	The 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2016) ,Kobe Meriken Park Oriental Hotel, Hyogo, Japan (2016).	2016/9
3	荒川泰彦	東京大学	Quantum Dot Photonics:From Science to Practical Implementation (Plenary)	Photonics Asia 2016, Beijing International Convention Center, China (2016).	2016/10

4	荒川泰彦	東京大学	Quantum Dots for Advanced Photonics (Plenary)	Optics & Photonics Taiwan, International conference -Annual Meeting of Taiwan Photonics Society, Taiwan (2016).	2016/12
5	荒川泰彦	東京大学	Advances in quantum dots for lasers and single photon sources (Keynote)	Joint 13th Asia Pacific Physics Conference and 22nd Australian Institute of Physics Congress, APPC-AIP 2016, Brisbane, Australia (2016).	2016/12
6	荒川泰彦	東京大学	Quantum dots for advanced photonics (Invited)	The 47th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE-2017) January 13th 2017, Snowbird, Utah, USA (2017).	2017/1
7	荒川泰彦	東京大学	Progress in Quantum Dot Photonics~ From Science to Practical Implementations ~ (Keynote)	The International Nanotech & Nanoscience Conference & Exhibition (Nanotech France 2017), Paris, France (2017).	2017/6
8	荒川泰彦	東京大学	Progress in quantum dots for advanced photonics (Plenary)	22nd Microoptics Conference (MOC' 17), The University of Tokyo, Komaba, Tokyo, Japan (2017)	2017/11
9	渡邊克之、岩本敏、荒川泰彦	東京大学	Photoluminescence improvements of InAs/GaAs quantum-dot multiple layers by introducing GaAsP layers	The 7th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2017)	2017/12
10	荒川泰彦	東京大学	Advances in quantum for advanced photonics (Plenary)	The 48th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE), Utah, USA. (2018).	2018/1

◆項目③-6 革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	藤本靖	千葉工業大学	Development of high-power visible fiber laser based on double-clad Pr-doped waterproof fluoride glass fiber	OPIC2017, Advanced Lasers and Photon Sources (APLS)	2017/4
2	藤本靖他	千葉工業大学他	Development of compact and high efficient UV laser system	OPIC2018, Advanced Lasers and Photon Sources (APLS)	2018/4

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	田口将大、他	東京大学	金属表面への超撥水性付与を最適化するレーザーパラメータの探索	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（朱鷺メッセ）	2016/9
2	谷峻太郎、他	東京大学	電気光学サンプリング法を用いた金属のレーザーアブレーションダイナミクスのサブピコ秒時間分解測定	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（朱鷺メッセ） 【光・フォトニクス分科内招待講演】	2016/9
3	谷峻太郎、他	東京大学	フェムト秒レーザーパルス励起による超高密度励起 Si からの電磁波放射の時間分解測定	日本物理学会 2016 年秋季大会 金沢大学	2016/9
4	水谷彬、他	東京大学	レーザー切断した炭素繊維のラマンスペクトルによる熱影響評価	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（朱鷺メッセ、新潟）、口頭発表	2016/9
5	水谷彬、他	東京大学	レーザー切断した炭素繊維のラマンスペクトルによる熱影響評価	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（朱鷺メッセ、新潟）、口頭発表	2016/9
6	大村英樹、他	産業技術総合研究所	分子トンネルイオン化の量子制御を利用したレーザー場フーリエ合成 4	2016 年（平成 28 年）第 10 回分子科学討論会	2016/9
7	小林洋平、他	東京大学	Research Progress for kW Femtosecond Solid State Lasers	OSA 2016 International Workshop on Compact EUV & X-ray Light Sources, Hiroshima (Invited)	2016/10
8	小林洋平	東京大学	レーザー加工における産官学協創	第 2 回大学等研究交流サロン	2016/11

9	小林洋平	東京大学	高輝度・高効率レーザー技術による加工 (NEDO 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発)	第8回光科学フォーラムサミット	2016/11
10	秋山英文	東京大学	Smart nano light emitters	NTU-UT Joint Conference 招待講演	2016/11
11	大村英樹	産業技術総合研究所	位相制御レーザーパルスによる物質制御	分子キラリティー研究センターシンポジウム 光科学の最先端 2016	2016/11
12	小林洋平	東京大学	“先端フェムト秒レーザーとその応用”	I SUP T 2016@NICT	2016/12
13	小林洋平	東京大学	レーザー応用技術 —新しいレーザーものづくりを目指して—	第19回光ものづくりセミナー@京都府産業支援センター	2016/12
14	伊藤隆、他	東京大学	利得スイッチ半導体レーザーの短パルス発生限界	レーザー学会 招待講演	2017/1
15	水谷彬	東京大学	Reduction of Thermal Damage during Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastic	CIAiS International Symposium 2017 (東大、福武ホール)、ポスター発表	2017/2
16	水谷彬	東京大学	Reduction of Thermal Damage during Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastic	CIAiS International Symposium 2017 (東大、福武ホール)、ポスター発表	2017/2
17	大村英樹	産業技術総合研究所	位相制御レーザーパルスによる分子トンネルイオン化の量子制御	日本大学工学部生命応用化学科セミナー	2017/2
18	大村英樹	産業技術総合研究所	Orientation-selective molecular tunneling ionization by four-color Fourier-synthesized laser fields	Frontiers in Theoretical and applied Physics (FTAP 2017)	2017/2
19	小林洋平	東京大学	NEDO 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発プロジェクト	第17回レーザー学会東京支部研究会・電気学会光・量子デバイス技術研究会@東海大学高輪キャンパス	2017/3
20	谷峻太郎、他	東京大学	複数の励起過程により駆動されるレーザーアブレーションの電磁場サブピコ秒時間分解測定	第64回応用物理学会春季学術講演会 パシフィコ横浜	2017/3

21	谷峻太郎、他	東京大学	金属のレーザーアブレーション過程の電場強度依存性の時間分解測定	日本物理学会第 72 回年次大会 大阪大学	2017/3
22	青柳弓槻、他	東京大学	フェムト秒レーザー加工過程のパルス毎散乱光イメージング	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 パシフィコ横浜	2017/3
23	中前秀一、他	東京大学	半導体反転分布状態に対する位相緩和測定	日本物理学会 ポスター発表	2017/3
24	Chang KaiHsun	東京大学	Generation of smooth-shape nano-second light pulses from gain-switched laser diodes	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
25	水谷彬	東京大学	Reduction of Thermal Damage during Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plasti	International Workshop in Brazil -Global Business and Industry-University Collaborations (サンパウロ大学、ブラジル) ,	2017/3
26	水谷彬	東京大学	Reduction of Thermal Damage during Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plasti	International Workshop in Brazil -Global Business and Industry-University Collaborations (サンパウロ大学、ブラジル)	2017/3
27	鳥塚健二	産業技術総合研究所	超短パルスレーザーの開発と物質プロセッシングへの応用	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (S6-シンポジウム 招待講演 15p-418-3)	2017/3
28	K. -H. Chang	東北大学	Generation of smooth-shape nano-second light pulses from gain-switched laser diodes	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
29	谷峻太郎、他	東京大学	Observing laser ablation dynamics with sub-picosecond temporal resolution	The 4th Optical Manipulation Conference	2017/4
30	大村英樹	産業技術総合研究所	Orientation-selective molecular tunneling ionization by four-color Fourier-synthesized laser fields	The 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC 2017)	2017/7

31	大村英樹	産業技術総合研究所	Interferometer-free Fourier-synthesized laser field generator estimated by molecular tunnelling ionization	Frontiers in Theoretical and Applied Physics (FTAPS 2017)、Journal of Physics: Conf. Series	2017/7
32	高橋孝、他	東京大学	レーザー加工の学理解明に向けたパルス幅可変レーザーシステムの開発	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
33	青柳弓槻、他	東京大学	深層学習を用いたアブレーション体積のパルス毎測定	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9
34	小西邦昭	東京大学	誘電体レーザー加工における光物性探索とマイクロ造形への応用	日本物理学会 2017 年秋季大会領域 5 シンポジウム	2017/9
35	谷峻太郎、他	東京大学	Direct observation of electromagnetic field emission from laser ablation with sub-picosecond temporal resolution	COLA 2017 (International Conference on Laser Ablation)	2017/9
36	吉田剛、他	産業技術総合研究所	フーリエ合成レーザー場による分子トンネルイオン化の 4 状態量子制御	第 11 回分子科学討論会	2017/9
37	田中真人、他	産業技術総合研究所	レーザー加工の高度化のための真空紫外領域における透過吸収・エリプソメトリ測定装置の開発	第 60 回放射線化学討論会	2017/9
38	坂上和之、他	早稲田大学	フェムト秒極端紫外光による有機薄膜のアブレーションに関する研究	第 14 回 X 線結像光学シンポジウム(招待講演)	2017/11
39	谷峻太郎、他	東京大学	光で物質を操る ～レーザー加工における極限的光と物質の相互作用とそのダイナミクス～	応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会	2017/12
40	谷峻太郎、他	東京大学	レーザーアブレーションダイナミクスの遠赤外波長領域計測	第 15 回赤外放射応用関連学会年会	2018/1
41	Jui-Hung Hung、他	東京大学	Generation of burst optical pulses from a gain-switched laser diode by CW laser light	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3

			injection		
42	He-Jie Yan、他	東京大学	長光子寿命半導体レーザーの利得スイッチング動作	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
43	櫻井治之、他	東京大学	フェムト秒レーザー加工によるテラヘルツ波反射防止モスアイ構造の作製	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
44	場本圭一、他	東京大学	フェムト秒レーザーアブレーションのレーザービーム幾何依存性	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
45	谷峻太郎、他	東京大学	フェムト秒レーザー加工における深さ形状のパルス毎測定	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
46	高橋孝、他	早稲田大学	レーザーアブレーション閾値のフルエンス・パルス幅依存性	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
47	谷峻太郎、他	東京大学	金属のフェムト秒レーザー加工過程におけるエネルギー移動	日本物理学会第 73 回年次大会	2018/3
48	谷峻太郎、他	東京大学	シンポジウム「超短パルスコヒーレント光源が拓く固体のサブフェムト秒電子ダイナミクス」まとめ	日本物理学会第 73 回年次大会	2018/3
49	J. -H. Hung	東北大学	Generation of burst optical pulses from a gain-switched laser diode by CW laser light injection	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
50	He. -Jie. Yan,	東北大学	Gain-switching operation of a semiconductor laser having a long photon lifetime	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3
51	小林洋平、他	東京大学	Toward cool laser manufacturing	SLPC 2018 (The 3rd Smart Laser Processing Conference 2018)	2018/4

◆項目④-1-2 極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	三村敏夫	ギガフォトン(株)	High-power DUV Lasers for Material Processing	Photonics Asia 2016	2016/10

2	藤本准一	ギガフォトン (株)	193nm high power lasers for the wide bandgap material processing	Photonics West 2017	2017/1
3	小林正和	ギガフォトン (株)	DUV High Power Laser Processing	Optics+Optoelectronics 2017	2017/4
4	藤本准一	ギガフォトン (株)	193 & 248nm high power lasers for the micro and macro material processing	Lasers in Manufacturing conference 2017	2017/6
5	老泉博昭	ギガフォトン (株)	Excimer Lasers Microfabrication for interposer materials made of industrial glass and organic matter	LPM 2017	2017/6
6	柿崎弘司	ギガフォトン (株)	193nm high-power lasers for drilling with high aspect ratio into wide bandgap materials	ICALEO 2017	2017/10

◆項目④-1-3 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	升野振一郎	大阪大学接合科学研究所	青色半導体レーザーによる金属の積層造形	溶接学会平成 29 年度秋季 全国大会	2017/9
2	升野振一郎	大阪大学接合科学研究所	Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing with 100W Blue Diode Laser	COLA2017 (International Conference on Laser Ablation)	2017/9
3	升野振一郎	大阪大学接合科学研究所	Metal Powder Bed Fusion Additive Manufacturing with 100W Blue Diode Laser	ICALEO 2017	2017/10
4	升野振一郎	大阪大学接合科学研究所	高輝度青色半導体レーザー搭載溶接機および積層造形装置の開発	レーザー加工学会 第 88 回講演会	2017/10
5	升野振一郎	大阪大学接合科学研究所	高輝度青色半導体レーザーを用いた積層造形装置の開発	レーザー学会第 516 回研究会	2017/12
6	塚本雅裕	大阪大学接合科学研究所	青色半導体レーザー開発とAMへの展開	第 8 回 AM シンポジウム	2018/1

7	升野振一郎	大阪大学接合科学研究所	青色半導体レーザ搭載SLM型3Dプリンタの開発	レーザー学会第38回年次大会	2018/1
8	塚本雅裕	大阪大学接合科学研究所	青色半導体レーザの高輝度化による純銅の積層造形を可能とした3Dプリンタの開発	溶接学会 第107回界面接合研究委員会	2018/2
9	塚本雅裕	大阪大学接合科学研究所	Development of high intensity blue diode laser system for materials processing	SPIE Photonics West 2018	2018/2
10	升野振一郎	大阪大学接合科学研究所	Selective laser melting for copper modeling with high power blue diode laser	SPIE Photonics West 2018	2018/2
11	塚本雅裕	大阪大学接合科学研究所	青色半導体レーザを用いたアディティブマニファクチャリング	2018年度精密工学会春季大会	2018/3

(b)新聞・雑誌等への掲載

◆プロジェクト全体

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	プロジェクト全体 (NEDO)	特集1 ものづくりを変える! NEDOのレーザー加工技術	Focus NEDO	2018/3

◆項目② 高出力レーザーによる加工技術

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	浜松ホトニクス(株)	LD モジュール開発「小型で高出力実現 半導体レーザーモジュール産業用 2 種 開発」	日刊工業新聞	2018/4/20
2	浜松ホトニクス(株)	「金属硬化レーザー開発 高出力で効率生産」	静岡新聞	2018/4/20
3	浜松ホトニクス(株)	「出力世界最高水準 浜ホトがレーザー開発」	中日新聞	2018/4/25

◆項目③-1 フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	京都大学	フォトニック結晶の現状と今後の展開可能性について	文部科学省ホームページ	2017/6/22
2	京都大学	レーザー加工や自動運転を革新、次世代フォトニック結晶	日経テクノロジー online	2017/10/16

◆項目④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学	先端レーザー技術の産業展開	Optronics, 2016 年 10 月号 p60-65	2016/10
2	東京大学	超スマート社会におけるレーザー加工	日刊工業新聞 (31 面)	2017/9/12
3	東京大学	レーザー加工自動化	日経新聞夕刊 (3 面)	2018/3/12
4	東京大学	レーザー加工、AI で自動化 三菱電機や東大が連携	日経新聞電子版	2018/3/12
5	東京大学	レーザー加工、AI で	日経産業新聞	2018/3/13
6	東京大学	レーザー加工がもたらす未来のものづくりシステムとは? - AI を駆使した加工レシピの最適化へ -	OPTRONICS, No. 4 p167-172	2018/4

◆項目④-1-3 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	大阪大学接合科学研究所	金属 AM 技術を支えるレーザー技術開発	スマートプロセス学会誌 第6巻 第3号	2017/5
2	大阪大学接合科学研究所	高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発	レーザー学会誌第45巻9号	2017/5/16
3	大阪大学接合科学研究所	銅を積層する3Dプリンタを初めて開発	OPTRONICS Online	2017/8
4	NEDO、(株)島津製作所、大阪大学	世界初、青色半導体レーザーの高輝度化により純銅を積層造形できる3Dプリンタを開発	NEDO ニュースリリース、大阪大学プレスリリース	2017/10/24
5	大阪大学接合科学研究所	阪大、青色半導体レーザーの高輝度化により純銅を積層造形できる3Dプリンタを開発	日本経済新聞 電子版	2017/10/24
6	大阪大学接合科学研究所	純銅を積層できる3Dプリンタを開発—航空・宇宙・EV産業への応用期待	マイナビニューステクノロジー	2017/10/24
7	大阪大学接合科学研究所	大阪大、世界初、青色半導体レーザーの高輝度化により純銅を積層造形できる3Dプリンタを開発	Moter Fun TECH	2017/10/24
8	大阪大学接合科学研究所	阪大、島津製作所など、純銅を積層造形できる3Dプリンタを開発	エンジニアのためのキャリア応援マガジン	2017/10/25
9	NEDO、(株)島津製作所、大阪大学	NEDO と大阪大学、純銅積層3Dプリンタ開発	鉄鋼新聞	2017/10/25
10	大阪大学接合科学研究所	3D印刷で純銅造形	化学工業日報	2017/10/26
11	大阪大学接合科学研究所	純銅を積層造形できる3Dプリンター 阪大などが開発	日本経済新聞 電子版 日経テクノロジー online	2017/10/27
12	大阪大学接合科学研究所	先端技術で製造業の競争力を高める溶接接合技術	日刊工業新聞特集記事	2017/12/4
13	大阪大学接合科学研究所	世界初、青色半導体レーザーの高輝度化により純銅を積層造形できる3Dプリンタを開発—航空・宇宙・電気自動車等の産業に必要な加工部品への応用に期待—	NEDO ニュースリリース、大阪大学プレスリリース	2018/1/25
14	NEDO・(株)島津製作所・大阪大学	NEDO と島津製作所と阪大、高出力・高輝度青色半導体レーザーを製品化	日本経済新聞 電子版	2018/1/25
15	NEDO・(株)島津製作所・大阪大学	世界最高性能の青色半導体レーザー製品化	日刊工業新聞	2018/1/26

16	(株) 島津製作所	青色レーザー出力 100 ワット、高輝度 島津製作所 金属加工の光源に	化学工業日報	2018/1/26
17	(株) 島津製作所、大阪大学 接合科学研究所	島津製作所 金属加工用の青色半導体 レーザー発売 阪大と開発 出力・輝 度、世界最高クラス	電波新聞	2018/1/29
18	大阪大学接合科学研究所	最高水準の半導体レーザー	京都新聞	2018/2/15
19	大阪大学接合科学研究所	純銅加工も楽々国産青色半導体レー ザー	日経ものづくり	2018/5

(c) その他（展示会出展）

◆プロジェクト全体

番号	所属	展示会名	開催/出展日
1	プロジェクト全体 (NEDO)	OPIE' 2018	2018/04/25~2018/04/27

◆項目① 高品位レーザー加工技術

番号	所属	展示会名	開催/出展日
1	スペクトロニクス (株)	第5回 [関西] 高機能プラスチック展	2017/09/20

◆項目③-6 革新的小型・高効率UVレーザー光源

番号	所属	展示会名	開催/出展日
1	(株) 金門光波	LASER World of PHOTONICS 2017 (ドイ ツ・ミュンヘン)	2017/6
2	(株) 金門光波	Photonics West 2018 (アメリカ・サン フランシスコ)	2018/1
3	(株) 金門光波	LASER World of PHOTONICS CHINA 2018 (中国・上海)	2018/3

◆項目④-1-3 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術

番号	所属	展示会名	開催/出展日
1	大阪大学 接合科学研究所	第88回レーザ加工学会講演会	2017/10/12~13
2	(株) 島津製作所、大阪大学接合 研究所	SPIE Photonics West 2018 Exhibition	2018/01/30~ 2/1