

システム技術開発調査研究

19-R-9

高品質化した加工用レーザーと開拓される
新加工領域に関する調査研究
報 告 書
— 要 旨 —

平成20年3月

財団法人 機械システム振興協会

委託先財団法人 製造科学技術センター

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring.keirin.go.jp>



序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人機械システム振興協会では、財団法人日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、機械システムに関する調査研究等補助事業、新機械システム普及促進補助事業を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 東京大学 名誉教授 藤正 巖氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を実施しております。

この「高品質化した加工用レーザーと開拓される新加工領域に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が財団法人製造科学技術センターに委託して実施した調査研究の成果であります。今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いであります。

平成20年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

日本の製造業（ものづくり）の競争力強化を目指し、ものづくり技術戦略ロードマップを検討している当財団としては、日本の企業は今後、何をすべきかに関し様々な視点で検討を進めており、そこには、すぐにでも必要なシステム技術開発から要素技術として将来的に育む必要のある技術まで様々あり、レーザー加工技術はまさに要素技術の典型といえます。

日本のレーザー開発の歴史は、経済産業省の大型開発プロジェクトだけでも、「超高性能レーザー応用複合生産システム（1977～1984年）」、「レーザー応用新加工技術に関する研究（1985～1988年）」、「超先端加工システム研究開発（1987～1995年）」、「フォトン計測・加工技術（1997～2001）」があり、CO₂レーザーからエキシマレーザー、LD励起YAGレーザー、新たなファイバーレーザー開発を行ってきましたが、市場規模の小ささやレーザー関連設備のコスト高により、本格的に日本製のレーザー加工装置が国内に利用されている例は少なく、原因としては、システムコーディネーターの不在やコスト競争力でドイツのレーザー発信器メーカーに市場を席卷されてしまっている現状が考えられ、このままでは、日本のレーザー技術の空洞化が懸念されます。レーザーに関する各種技術の継承と新たなレーザー技術、日本オリジナルの技術育成を早急に行わなければなりません。

明確な技術動向としては、今後様々な機器の進歩と同様に、レーザーを構成する各々の技術進歩から小型軽量、高出力化の方向性は確かであり、その1つとしてファイバーレーザーの技術体系化と革新の必要性は疑う余地がありません。

今後は、光ファイバー内で、レーザーを発振・増幅させるより高信頼性で扱い易いファイバーレーザーが開発され、高効率、小型、軽量で高品質なビームを非常に小さいスポット径で目的の場所に照射することが可能になり、サブミクロンレベルの加工や微小エリアの改質など次世代の精密製品製造に大きなブレークスルーをもたらす可能性が大きいいため、製造産業界、特に精密加工を行う企業より大きな期待が寄せられています。本調査研究においては、わが国において次世代ファイバーレーザーの技術開発を実施するための基礎調査として、レーザー技術全般、ファイバーレーザーを利用した加工技術等についての現状を明らかにし、それをベースにして新たなファイバーレーザー及び新加工技術の研究開発計画を提案することとしました。

本調査研究内容が、レーザー関連技術を中心とした日本独自の新たなものづくりシステムになる参考となれば幸いです。

最後に、本調査研究に関しご指導ご鞭撻を頂いた経済産業省、財団法人機械システム振興協会、各大学、企業の関係各位のご尽力に感謝申し上げます。

平成20年3月

財団法人製造科学技術センター

委員長あいさつ

21世紀は光の世紀と言われて久しいのは、その基盤技術としてのレーザーの出現によるものです。光としてのレーザー光の際だった特徴により、科学技術から産業技術に至る広範囲な分野で多彩でユニークな利用技術が開発され、実用に供されています。通信、情報産業における光技術は、情報革命の担い手としてすでに高度情報化社会の基盤技術となっており、さらにパワーレーザーの急速な進歩により、製造業・工業におけるレーザーエネルギー応用は、ものづくり国際競争力の源泉となりつつあります。

超高密度集積回路におけるナノ加工、高密度実装技術はレーザー・光技術抜きには語れません。超高ハイテン鋼などの高性能合金、カーボン素材、これらの複合材においてはレーザー加工が必須の技術となると考えられています。数百メートルをこす超高層ビル、海中、宇宙、高深度地下等人類の活動エリアの拡大につれ、レーザーを基盤とする新しい構築技術が必要とされており、自動車、造船、航空機等におけるものづくり競争力は、いかに効果的にレーザー技術を使うかにかかっています。

このような時代のすう勢、産業技術の動向を的確にとらえたドイツは、1990年代から「レーザー2000」、21世紀に入って「フォトニクス 21」と戦略的な大型国家プロジェクトをここ20年継続して実施しています。EU、米国においては、最先端のレーザー・光技術の開発を必要とするレーザー核融合エネルギー開発プロジェクトをけん引力として産業用レーザー・光技術の開発とその産業展開を図っています。

このような中、ものづくりを国富の源泉としている我が国においてこそ、製造業における機械システムに結集されるレーザーによるスマートマテリアル等の新材料の開発や省エネルギーにつながる高精度な新加工技術の開発は契機となる課題であり、そのためにもコア技術であるレーザー光源技術やレーザーと物質との相互作用の解明に立脚したレーザー加工・プロセス技術の継続した技術開発により、社会のニーズにマッチした新しいものづくりへの素早い展開を可能とする基盤技術の優位性を常に保持しておく必要があります。

本年度「高品質化した加工用レーザーと開拓される新加工領域に関する調査」として、我が国のレーザー光源技術及びレーザー活用技術の現状と、レーザー装置産業の国際的なトップシェア企業を保有するドイツの現状に関し調査し、我が国のレーザー技術をどの様にすれば良いか検討する機会を得られ、今後あるべき姿等も含め本報告書にまとめられたことはまさに時宜を得たものであります。

最後に、本調査を行うにあたりご理解・ご協力を賜りました、経済産業省及び財団法人機械システム振興協会、財団法人レーザー技術総合研究所、大阪大学、近畿大学を始めとする大学、企業関係者に感謝の意を表すると共に、本報告書が今後、我が国のレーザー・光技術の発展と産業の振興に役立てれば幸いに存じます。

平成20年3月

次世代レーザー技術活用調査委員会
委員長 中井貞雄

目 次
(要 旨)

序	i
はじめに	ii
委員長あいさつ	iii
目 次	iv
1 調査研究の目的	1
2 調査研究の内容	1
3 調査研究の実施体制	3
第1章 ものづくり技術分野におけるレーザー開発（技術体系化WG報告）	7
1. 1 要 約	7
1. 2 レーザー技術の現状と動向	8
1. 3 最新レーザー技術の整理・体系化（技術マップ）及び レーザー技術の動向（技術ロードマップ）	10
1. 4 導入シナリオ	13
1. 5 まとめ	31
第2章 ニーズ適合次世代レーザー技術開発（加工技術調査WG報告）	33
2. 1 要 約	33
2. 2 現状・ニーズ（総括）	34
2. 3 まとめ	34
第3章 次世代レーザー開発のための技術シーズ	35
3. 1 要 約	35
3. 2 次世代レーザー開発のための技術シーズ	35
3. 3 三位一体の産業化デザイン	47
3. 4 まとめ	57
第4章 今後の展望・課題（制度や教育問題等）	58
4. 1 次世代マザーマシンとしてのレーザー及びレーザーシステム化技術	58
4. 2 教育の産学循環による人材育成	60
4. 3 レーザーを利用した産業のビジネスプランの例	63

第5章 次世代ファイバーレーザー及び次世代ファイバーレーザーによる 新加工領域（製造技術）の技術開発提案	65
5.1 日本のオリジナル技術	65
5.2 高機動性大出力レーザーシステム開発及び超高速プロセス 技術開発プロジェクト	65
5.3 高効率可視光レーザーシステム開発及び微細領域材料制御開発 プロジェクト	66
4 成果の要約	67
5 今後の課題	68

参考資料 ①用語集

注：文中アンダーライン単語は、文末「用語集」参照

1 調査研究の目的

レーザーによる加工は、非接触で、しかも短時間による加工が可能であることから、切断や溶接といった加工プロセスに広く使われているが、反面、集光スポット径の制約があること。大量のエネルギーの投入により、周辺の温度上昇をもたらす等の問題もあり、精密な加工に用いるには限界がある。しかし、最近レーザー光を光ファイバーで誘導することにより、目的となる位置に適切なエネルギーを投入することが可能となってきた。さらに、光ファイバー内で、レーザーを発振・増幅させるファイバーレーザーが開発されている。

ファイバーレーザーは高効率、小型、軽量で高品質なビームを非常に小さいスポット径で目的の場所に照射することが可能であり、サブミクロンレベルの加工や微小エリアの改質など次世代の精密製品製造に大きなブレイクスルーをもたらす可能性が大きい。ファイバーレーザーは連続発振（CW）、パルス発振のどちらも可能であり、また変換効率が高く省エネルギーであり、さらに加工スループットの向上やレーザーの停止時間の短縮等の要求を満足することができるため、製造産業界、特に精密加工を行う企業より大きな期待が寄せられている。

しかしながら、わが国における加工用レーザー技術の開発は大出力LD励起のYAGレーザー開発や発振器の小型化に主眼が置かれてきており、ファイバーレーザーの実用開発はほとんど行われていない。そればかりでなく現在ではレーザー技術の研究自体大幅な縮小状況にある。

このような中、海外特にドイツでは、国策として、レーザーの高品質化を進める対象として、ファイバーレーザーの開発・実用化を進めてきた結果、ドイツメーカーによるファイバーレーザー製品の市場寡占化を許す結果になってきている。しかしながら電気、機械等の製品に用いられる様々な部品がより小型化、集積化する現代においては、現在の水準よりさらに高品質なファイバーレーザー、ファイバーレーザー応用加工機械及びファイバーレーザーを使用した加工技術の技術確立が要望されている。

本調査研究においては、わが国において次世代ファイバーレーザーの技術開発を実施するための基礎調査として、ファイバーレーザー技術及びファイバーレーザーを利用した加工技術についての現状を明らかにし、それをベースにしてファイバーレーザー及び新加工技術の研究開発計画を提案する。それによりわが国における次世代省エネ高品質レーザー技術を確立することで日本の競争力強化に資するものとした。

2 調査研究の内容

①国内外レーザー技術動向調査

レーザー技術動向調査及び海外動向調査を以下のように行った。

(企業／業界調査) 日本企業数社に対し、業界の状況と今後の取組等の調査を行った。

(海外調査) レーザー先進国であるドイツを中心に欧州におけるレーザー開発状況を調査。

レーザー開発に関わる体制、予算、制度、教育に対する取組はEU、国ベースで推進をしており、それら成果を利用した産業への応用展開が密接な連携をとり実施されている。そのため、ユーザニーズに対し即時対応できるような仕組みとなっており、開発の共有化によるコスト削減、技術革新へ展開されている。しかしながら、まだ、日本の得意とする技術は多数有り、国際競争力を生む技術的ベースがあることが判明した。

②レーザー技術の体系化及び将来動向分析（レーザー技術の Roadmap）

レーザー加工関連技術等技術分類を行い、課題の抽出を行った（技術マップ）。また、開発時期等時間軸や日本のレーザー加工装置の戦略として重点技術内容を明確にした（技術戦略 Roadmap）。その他、レーザー加工技術開発を必要とする時期や内容、社会的な背景等を明らかにする導入シナリオを作成し、既存のロードマップとの比較を行った。その結果、今回作成した技術マップおよびロードマップのようにレーザーを使う（応用・ユーザー）側の視点を重視し、ユーザーフレンドリー化、エコロジーコンシャス化及びアフォーダブル化（ニーズ適合性を重視した製造コスト低減化）を主軸とし、レーザー開発を進めることが重要であることがわかった。

③ファイバーレーザー技術と既存加工用レーザー技術の比較

レーザー加工を導入している企業の加工技術やコスト構造を調査。また、レーザー加工を取り入れられない理由等を分析し、ファイバーレーザーの優位性やその他レーザーの技術動向等に関しての調査を行った。その結果、ファイバーレーザーは、既存加工用レーザーであるロッド型 YAGレーザー、ディスク型 YAGレーザー 及び CO₂レーザー 等に比べ、コストが最も低く、ビーム品質が最も良いことが明らかになり、ファイバーレーザー技術が既存加工用レーザー技術に比べ優れていることがわかった。

④次世代ファイバーレーザーにより開拓される新加工領域・アプリケーション

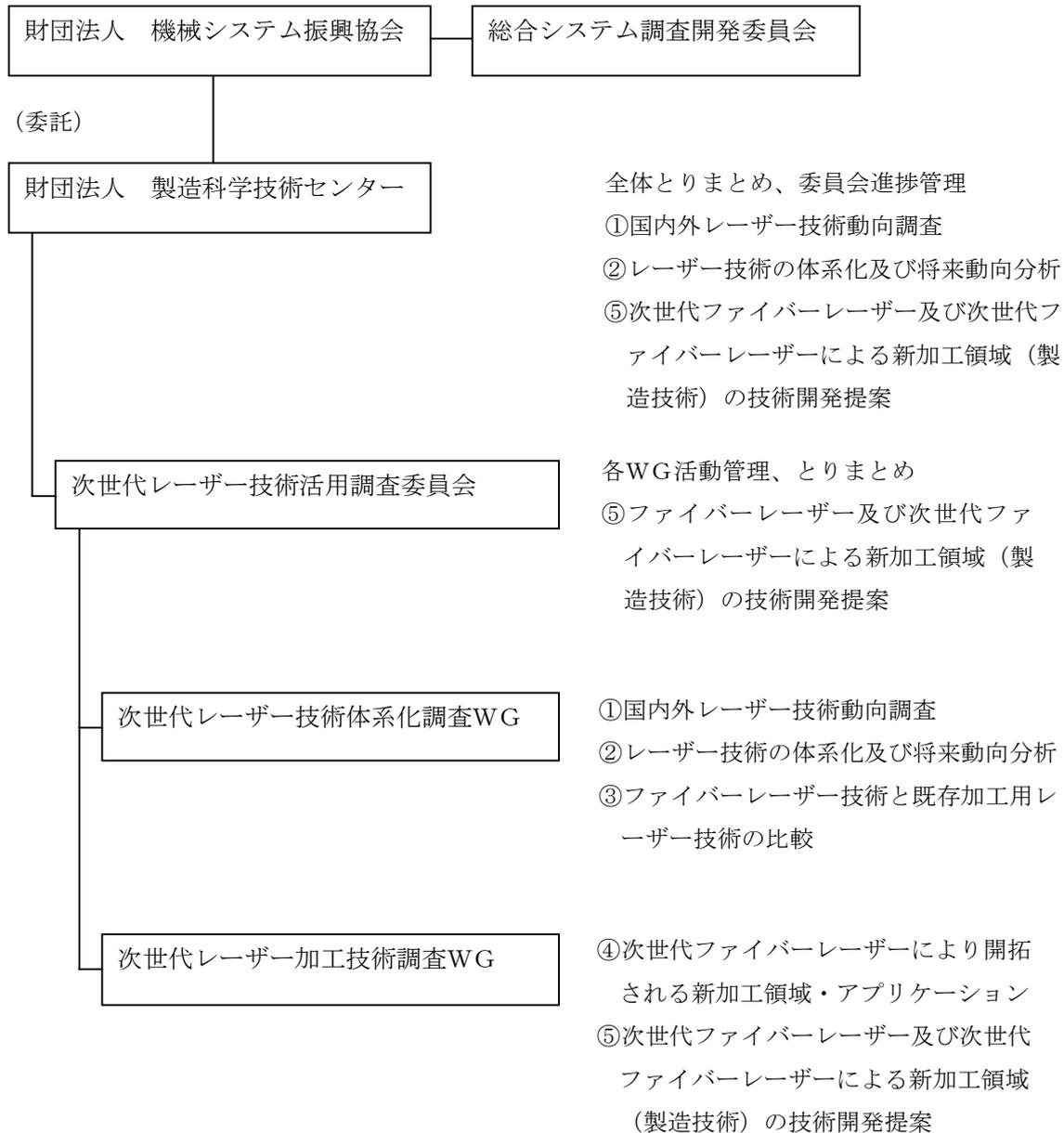
新たな高集光・高出力ファイバー加工用レーザーを利用した加工法や製品・産業等の調査分析を行った結果、溶接に代表される加工プロセスの高速化及び高度化、微細接合に代表される微細加工プロセスの高速化及び高度化並びに材料組織制御技術が創成され、高度化されれば新素材が創製される可能性が示された。

⑤次世代ファイバーレーザー及び次世代ファイバーレーザーによる新加工領域（製造技術）の技術開発提案

これまでの調査結果に基づき、レーザーを使用すれば優位性を見いだせる製造分野や製品の絞り込みを行った。さらに、次世代ファイバーレーザー加工に適合するための必要な性能と解決すべき課題や提案すべきシステム構成等の概略案（たたき台）を作成した。

3 実施体制

財団法人機械システム振興協会より委託を受け、財団法人製造科学技術センター内に、学術経験者、研究所、企業（メーカ、ベンダ、ユーザ）からなる「次世代レーザー技術活用調査委員会」、「次世代レーザー技術体系化調査WG」、「次世代レーザー加工技術調査WG」を設け、討議、指導を得て具体的な作業を進めることにより、成果をまとめて報告書を作成した。



総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	東京大学 名誉教授	藤 正 巖
委 員	埼玉大学 地域共同研究センター 教授	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 副研究部門長	金 丸 正 剛
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携推進部門 産学官連携コーディネータ	志 村 洋 文
委 員	東北大学 工学研究科 教授 (未来科学技術共同研究センター長)	中 島 一 郎
委 員	東京工業大学大学院 総合理工学研究科 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学大学院 工学系研究科 准教授	藤 岡 健 彦
委 員	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授 (副研究科長)	大 和 裕 幸

委員構成（名簿）

①平成19年度 次世代レーザー技術活用調査委員会

委員長	中井 貞雄	光産業創成大学院大学	学長
主査	塚本 雅裕	大阪大学	接合科学研究所 講師
主査	吉田 実	近畿大学	理工学部 電気電子工学系 准教授
幹事	中野 人志	近畿大学	理工学部 電気電子工学系 准教授
幹事	馬場 創	独立行政法人	産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 集積加工研究グループ 研究員
委員	阿部 信行	大阪大学	接合科学研究所 スマートプロセス研究センター 准教授
委員	宮永 憲明	大阪大学	レーザーエネルギー学研究センター 教授
委員	神成 文彦	慶應義塾大学	理工学部 電子工学科 教授
委員	松野 建一	(財)先端加工機械技術振興協会	専務理事
委員	上野 保	東成エレクトロビーム(株)	代表取締役社長
委員	杉本 武巳	(株)矢野経済研究所	インダストリー・テクノロジー本部 執行役員
委員	藤田 雅之	(財)レーザー技術総合研究所	主任研究員
オブザーバー	稲垣佐知也	(株)矢野経済研究所	インダストリー・テクノロジー本部 エレクトロニクス&オプティクス部

②技術体系化調査WG

主査	塚本 雅裕	大阪大学接合科学研究所	講師
幹事	馬場 創	独立行政法人	産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 集積加工研究グループ 研究員
委員	瀬渡 直樹	独立行政法人	産業技術総合研究所 デジタルものづくり研究センター 加工情報構造研究チーム 研究員
委員	岡本 康寛	岡山大学	工学部 機械工学科 助教
委員	橋田 昌樹	京都大学	化学研究所 先端ビームナノ科学センター 准教授
委員	松坂 壮太	千葉大学	大学院 工学研究科 助教
委員	甲藤 正人	宮崎大学	産学連携センター・産学連携部門 准教授
委員	本田 博史	独立行政法人	物質・材料研究機構 新構造材料センター 研究員
委員	福田 直晃	日立造船(株)	事業・製品開発センター 企画・開発部 主任技師
委員	古田 裕正	SUNX(株)	LMP 事業部 R&Dセンター シニアスーパーバイザー
委員	杉本 武巳	(株)矢野経済研究所	インダストリー・テクノロジー本部 執行役員
委員	藤田 雅之	(財)レーザー技術総合研究所	主任研究員
オブザーバー	神谷東志一	SUNX(株)	LMP 事業部 副事業部長 R&Dセンター センター長
	稲垣佐知也	(株)矢野経済研究所	インダストリー・テクノロジー本部 エレクトロニクス&オプティクス部

③加工技術調査WG

主査	吉田 実	近畿大学	理工学部 電気電子工学系 准教授
幹事	中野 人志	近畿大学	理工学部 電気電子工学系 准教授
委員	塚本 雅裕	大阪大学	接合科学研究所 講師

委員 鈴木 重啓 エンシュウ(株) 光関連事業部 RMT技術グループ長
 兼 マネージャー

委員 高島 康文 東成エレクトロビーム(株) 技術部 研究開発課 主任

委員 樽井 大志 日産自動車(株) 車両技術開発試作部 工法開発グループ 主担

委員 前田 純也 浜松ホトニクス(株) 中央研究所 材料研究室 部員

委員 藤崎 晃 古河電気工業(株) 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所
 光電送部品開発部 光新領域チーム マネージャー

委員 石出 孝 三菱重工業(株) 長崎研究所 所長室 次長

委員 松田 恭 ミヤチテクノス(株) 技術開発本部 技術部 技術1課 課長

委員 本越 伸二 (財)レーザー技術総合研究所 副主任研究員

オブザーバー

経済産業省 製造産業局 参事官室
 経済産業省 製造産業局 産業機械課

事務局 瀬戸屋英雄 財団法人 製造科学技術センター 専務理事
 笹尾 照夫 財団法人 製造科学技術センター 調査研究部 部長
 間野 隆久 財団法人 製造科学技術センター 調査研究部 課長

第1章 ものづくり技術分野におけるレーザー開発（技術体系化WG報告）

1.1 要約

日本のものづくり技術分野におけるレーザー開発は、1970年代に始まっている。国家プロジェクトでは、1977年～1984年「超高性能レーザー応用複合生産システム」において20kW級CO₂レーザーの開発に取り組んでいる。1989年には10kW級のCO₂レーザーが実用化した。1984年～1988年には、「レーザー応用新加工技術に関する研究」プロジェクトが進められ、表面改質技術の開発が目標の1つになり、非晶質、アロイング、セラミックス化技術についての研究が行われた。1987年～1995年「超先端加工システム研究開発」プロジェクトにおいては、2kW級のXeClエキシマレーザーと100W級ArFエキシマレーザーの開発が行われた。1997年～2001年の「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクトにおいては、10kWの半導体レーザー励起ロッド型YAGレーザーと1kW級の半導体レーザー励起ファイバーレーザー開発を進めた。その間、欧州、特にドイツでは、半導体レーザー励起ディスク型YAGレーザーの開発を進め、更に半導体レーザー励起ファイバーレーザーの開発が進められた。「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクト以降、大型のレーザー研究開発プロジェクトが日本において進められなかったことが、レーザー開発技術について欧米の先行を許す結果となった。「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクト終了当時、日本は、いわゆるナノテクブームであった。ナノテク自体は、非常に重要な推進すべき技術である。しかしながらブームに流されることで、日本が持続的に開発しなければならない技術、主軸となる技術の1つ、レーザー技術開発が減速してしまったのである。これから欧米に追いつき、レーザー技術を主軸となる技術の1つとし、世界をリードするものづくり技術立国になるには、これまでの経緯及び得られた知見をまとめ今後の展開に活かすことが得策である。

はじめに、現在に至るまでのレーザー開発を含むレーザー加工分野の変化についてまとめた。次にレーザー加工の現状を踏まえ、今後進めるべきレーザー開発について3講演を通じ議論した。更に最新レーザー技術の整理・体系化を行い技術マップを作成した。技術マップにおけるそれぞれの要素技術について今後の動向を議論し、技術ロードマップを作成し、それぞれの導入シナリオについてまとめた。本技術マップ及び技術ロードマップの作成並びに導入シナリオ作成にあたり、産業界、ものづくり技術分野においてどのようなレーザー、レーザーシステム及びレーザープロセス（加工・応用）が望まれているのかを考えることから始めた。望まれている3要素（項目なし）は、フレンドリー（User-Friendly）、エコロジーコンシャス（Ecology-conscious）そしてアフォダブル（Affordable）である。フレンドリーは、ユーザーフレンドリーのことで、高操作性、高安定性、コンパクト、ロバスト性（強靱性）、高機動性、そしてメンテナンスフリーである。エコロジーコンシャスは、省エネルギーつまり電気から光への変換が高効率であること。更に高集光性であること。必要なところに必要なエネルギーを投入できる。余分なエネルギーが不要となるとともに飛散物や熱影響部を最小化することができる。コストの低減とともに環境にもやさしい。アフォダブルは、手ごろな価格という意味である。チープ（cheap）という意味ではない。ニーズ適合性を重視し、製造コストを最小化したレーザー、レーザーシステム及びレーザープロセスのことである。産業界において、レーザーの価格は「高額」である。レーザーによって、新たな加工領域を開拓できる可能性が高いのはわかるが、高額なので挑戦ができないという声をよく聞く。つまりアフォダブルでないためにチャンスを逃しているのである。レーザー開発のみのプロジェクトは、どうしてもプロセス（加工・応用）、つまりユーザーを軽視した状態になり、

結局使えないレーザーを生み出しやすい。そこで、ものづくり技術分野におけるレーザー技術マップをユーザーフレンドリー化、エコロジーコンシャス化及びアフォーダブル化に大分類し、それぞれをレーザー本体デザイン、レーザーシステムデザイン及びレーザープロセスデザインに中分類した。大分類したテーマをそれぞれレーザー本体デザイン、レーザーシステムデザイン及びレーザープロセスデザインの三位一体で今後の動向を示したのが技術ロードマップである。

1. 2 レーザー技術の現状と動向

1. 2. 1 2つのレーザー加工分野

約 50 年前にレーザー(メーザ)が発明され、出力の増大とともにレーザーを加工に使おうとする試みが約 40 年前に始まった。そこで問題となったのが熱伝導である。加工対象物が金属の場合、レーザー光の電界により自由電子が振動し、それが格子振動を引き起こす。次の段階ではレーザー照射領域(レーザー光侵入領域)において溶融・蒸発が生じ加工が成立するはずであった。しかしながら溶融・蒸発は起こらなかった。レーザー照射領域外へと格子振動(熱)が伝わってしまったからである。つまり、熱が周囲に逃げてしまい加工部が融点に達しなかったのである。ここで2つの考え方が登場した。熱は逃げても良い。逃げる熱よりも大量のエネルギーを投入し、溶融・蒸発現象をもたらす。このためには、レーザーの出力を増加(増幅)させる方法が考えられた。もう1つの考え方は、熱が逃げる前、つまり、非常に短い時間内に大量のエネルギーを投入する。熱が逃げる前に瞬間的に溶融蒸発現象を引き起こす。このためには、レーザー光のエネルギーを短い時間内に注入(圧縮)し、光ピーク出力を増加させる方法が提案された。前者はCW(連続波)レーザー加工分野の誕生であり、後者がパルスレーザー加工分野の誕生である。(ここで言うパルスは、ナノ秒オーダー以下のパルス幅を示す。)図 1.1 に2つのレーザー加工分野の流れについて示した。別の言い方をすれば、前者が高エネルギー密度熱源加工(熱加工)分野であり、後者がアブレーション加工分野である。CW レーザー加

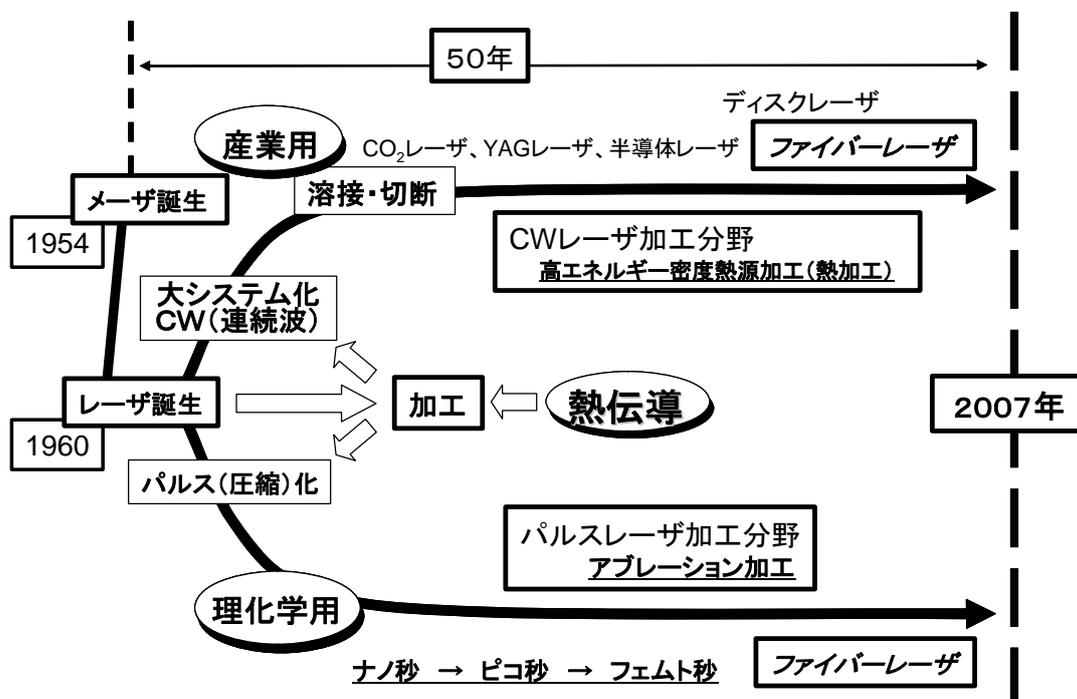


図 1. 1 2つのレーザー加工分野

工分野は溶接・切断という目的がはっきりとしていたので、産業界がレーザーの大システム化を推進した。いち早く登場したのが、大出力CO₂レーザーであった。次にYAGレーザーが登場した。YAGレーザーの波長が1.06μmであることからファイバー伝送ができるようになり、レーザーシステム室と加工室を分けることができ、更にレーザーヘッド(集光光学系)のロボットアームへの装着が容易になった。半導体レーザーはエミッターからの出力が増大するとともにスタッキング技術が向上し、大出力化へと進んだ。これにともない半導体レーザー励起YAGレーザーと直接加工を目的とした半導体レーザーシステムが登場した。そして、その半導体レーザーを基幹技術としたディスクレーザー及びファイバーレーザーの誕生を迎えることとなる。これらの流れは、前述したように産業界において溶接・切断という明確な目的の下、進められてきた。研究開発の成果については、溶接学会及びレーザー熱加工研究会(現高温学会内レーザー加工学会)で発表されてきた。一方のパルスレーザー加工分野では、アブレーション現象を利用した応用研究が、大学・研究機関を中心に進められた。パルス幅について言うとQスイッチ技術の開発からナノ秒が、モードロック及びチャープドパルス増幅(CPA)技術の開発から20世紀末には、パルス幅100 fs、繰り返し1kHz、平均出力1Wクラスのフェムト秒レーザーが市販されるまでになった。近年、発振器部及び増幅器部の殆どがファイバーから構成されるフェムト秒ファイバーレーザーも開発されている。理化学用レーザーとして考えられてきたパルスレーザーではあるが、近年、産業用を目指した開発が進められている。パルスレーザー加工分野の研究発表の場は、応用物理学会及びレーザー学会が中心である。CWレーザー加工とパルスレーザー加工の2つの分野(学会)は、あまり交流のないまま今日を迎えている。

1. 2. 2 現状と今後のレーザー開発

① フェアレーザー実現のための1提案 ～自己冷却レーザー～

講演者 福井大学工学研究科ファイバーアミニティ工学専攻 川戸 栄

レーザーの小型化及び冷却装置を必要としないことで、ユーザーフレンドリー化及びアフォーダブル化を実現する可能性のある自己冷却レーザーについてご講演いただいた。自己冷却レーザーが実現すれば、冷却装置を必要としないことに加え、熱光学効果が生じない、冷却面積を取る必要性がない、ビーム断面積をとる必要性がないなどの効果がある。可能性として、電力効率が高い、エコロジーコンシャス化が考えられる。

② 可視光ファイバーレーザーの可能性

講演者 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 藤本 靖

配線に用いられる銅は、近赤外線よりも可視光の方が吸収率が高い。つまり、銅の微細加工を行う場合は、ビーム品質(集光性)の良い可視光ファイバーレーザーが有効である。講演では、高ビーム品質が期待できる可視光ファイバーレーザー開発及び実現性について説明していただいた。

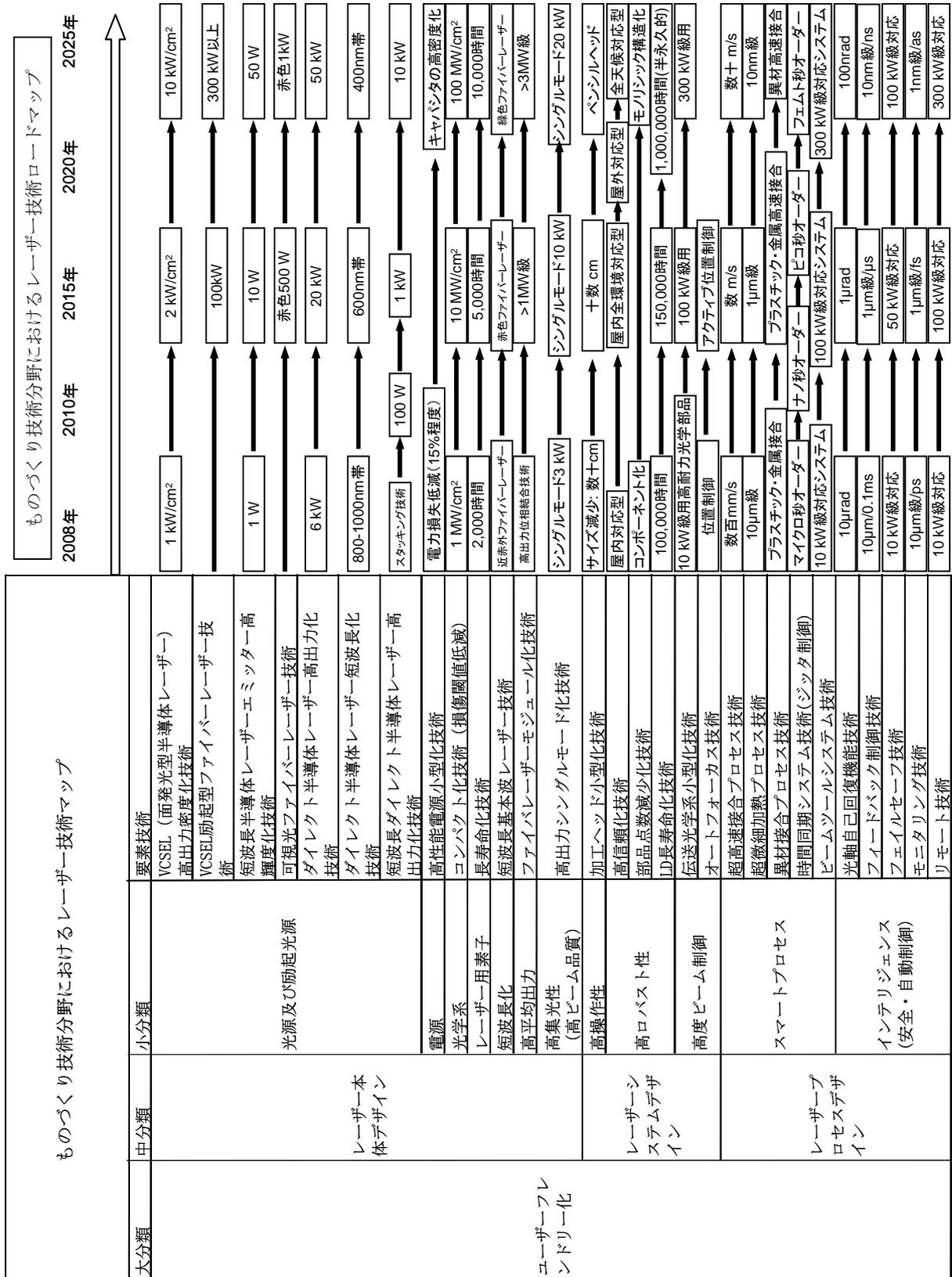
③ ファイバーレーザーマーカによる実施例と今後の展望

講演者 SUNX株式会社 古田 裕正

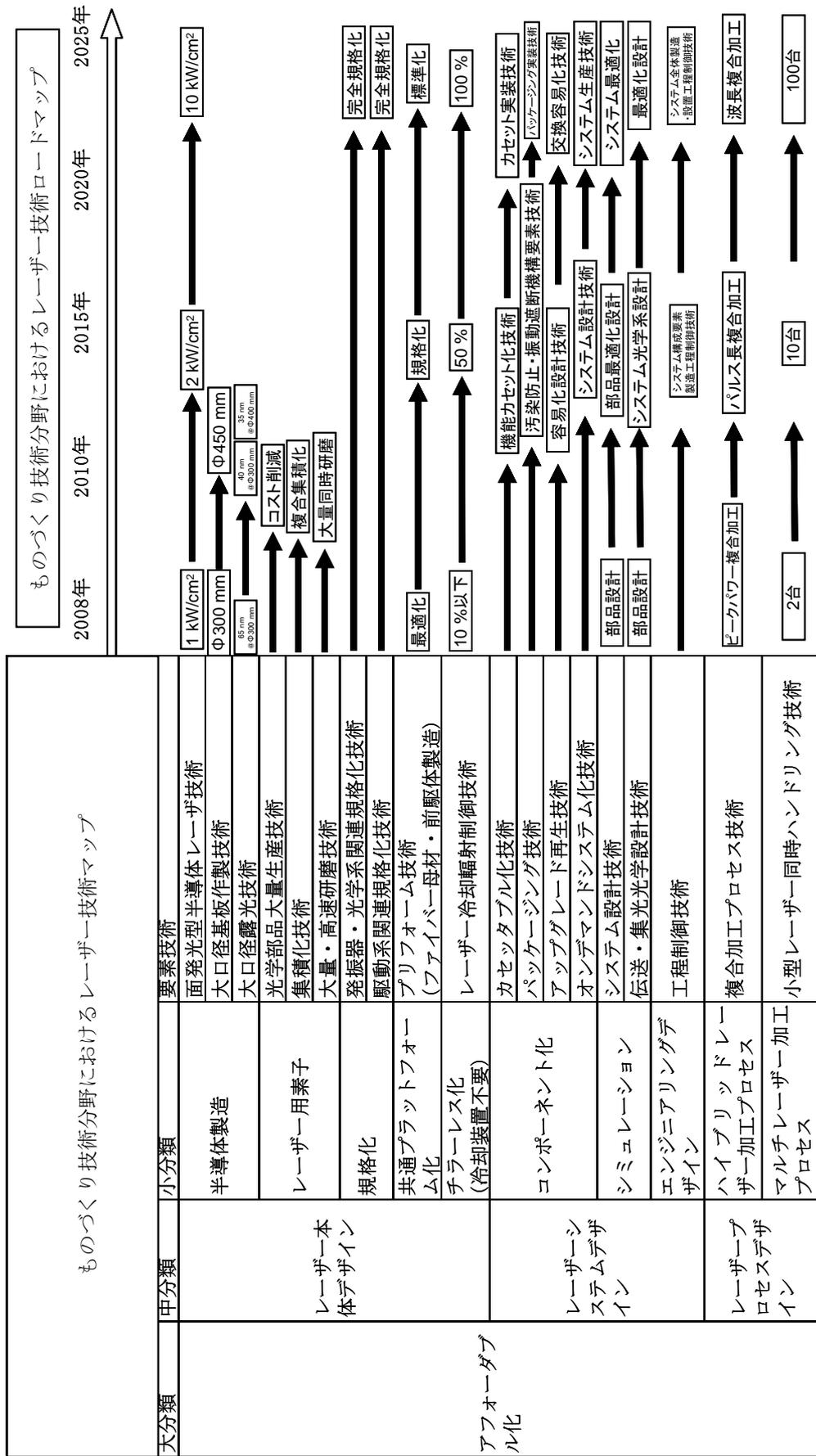
ファイバーレーザーを用いたレーザーマーカの優位性をCO₂レーザーマーカ及び2倍高調波(波長532nm)と比較した。ファイバーレーザーマーカは、他のレーザーマーカに比べユーザーフレンドリーであるが、波長が1060nmであるために材料によってはマーキングできないものもある。ファイバーレーザーマーカの実施例を説明していただき、レーザーの高出力化、短波長化及び短パルス化等を含む今後の展望についてご講演いただいた。

1. 3 最新レーザー技術の整理・体系化（ものづくり技術分野における技術マップ）及びレーザー技術の動向（ものづくり技術分野における技術ロードマップ）（2008年3月制定）

1. 3. 1 ユーザーフレンドリー化



1. 3. 3 アフォーダブル化



1. 4 導入シナリオ

1. 4. 1 ユーザーフレンドリー化

① レーザー本体デザイン

a. 光源及び励起光源

・ VCSEL(面発光型半導体レーザー)高出力密度化技術

日本発の技術である面発光型半導体レーザー(VCSEL)はアレイ化が容易かつ温度変化がレーザーの出力特性に及ぼす影響が非常に小さいことから、産業用レーザー光源として適している。VCSEL を高出力化し、ファイバーレーザーの励起用に用いることにより、2025 年までには 300 kW 級の出力を得ることも可能となり、従来型のファイバーレーザーよりもコンパクトかつ高ロバスト性の高出力ファイバーレーザーが実現できる。また、ダイレクト面発光型半導体レーザーとしての加工応用も可能となり、表面改質技術等への適用が現状より更に広がる。現在約 1 kW/cm² の面発光型半導体レーザーの出力を 2015 年までには 2 kW/cm²、2025 年までには 10 kW/cm²にする。

・ VCSEL 励起型ファイバーレーザー技術

VCSEL の特徴として、低消費電力で高い出力が得られ、温度特性に対してレーザー出力特性の変動が小さい。このため、VCSEL を励起光源としてファイバーレーザーを構成することにより、電気・光変換効率の向上と共に様々な環境下で安定に高出力が得られるレーザー光源の実現が予想される。2015 年には 100kW、2025 年には 300 kW の出力となる。

・ 短波長半導体レーザーエミッター高輝度化技術

一般構造材料(金属)加工において加工効率を増大させるには、レーザーの吸収率を増大させる必要がある。現在加工に使用されている近赤外光領域より短い波長の可視光あるいは紫外光は、加工対象材料に対する吸収率が高く、近赤外光レーザーに比較して 5 分の 1 以下程度の出力で同等の加工が、また吸収効率の向上と短波長性を活かした加工精度の精度向上が見込まれる。現在、青色シングルエミッター半導体レーザーにおいて、市販量産ベースでは波長 405nm 帯において 200mW の出力が、またサンプルとして 405nm 帯において出力 1W の製品が出荷されている。短波長半導体レーザーにおけるシングルエミッター出力を 2015 年には 10W 程度に 2025 年には 50W 程度まで増大させることで、直接加工用としての使用に加えファイバーレーザー励起光源等にも用いることができる。またアレイ化することで更に高出力化が可能となる。

・ 可視光ファイバーレーザー技術

短波長半導体レーザーを励起光源として用いることで、可視光ファイバーレーザーが実現可能である。発光ファイバー材料として、フッ化物系材料を用いた光ファイバーが有望である。フッ化物ファイバーに対する励起用紫短波長半導体レーザーの結合効率を上げ、高効率な可視光出力を得る。VCSEL を用い、かつ MEMS 技術を応用し、各半導体レーザーチップ上に光学回路を積層構築し、電気・光結合積層アレイを実現することが可能である。赤色 600nm 帯で 2015 年には 500W、2025 年には 1kW 級の開発が見込まれる。

- ・ダイレクト半導体レーザー(DLL)高出力化技術

高出力半導体レーザーを用い直接加工を行う **DDL** (ダイレクト半導体レーザー) 装置の出力は、現在 6 kW である。例えば自動車製造における車体の**テーラードブランク溶接**等の接合技術に **DDL** を用い、そのワークを高速化するためには、1 エミッターあたり的高出力化を実現することで、2015 年には 20 kW、2025 年には 50 kW の出力が必要と考えられる。

- ・ダイレクト半導体レーザー(DLL)短波長化

一般構造材料(金属)加工において加工効率を増大させるには、レーザーの吸収率を増大させる必要がある。より短い波長の光は加工対象の材料に対する吸収率が高く、近赤外光レーザーに比較して 5 分の 1 程度の出力で同等の加工が、また短波長性を活かした加工精度の精度向上が見込まれる。また高出力半導体レーザーによる直接加工(**DDL**)を実現することで、電気-光変換効率の飛躍的な向上が見込まれる。現在の 800-1,000nm 帯の半導体レーザー出力を短波長化し、短波長ダイレクト半導体レーザーを実現することで、高効率の **DDL** 加工が実現できる。2015 年には波長 600 nm 帯、2025 年には波長 400 nm 帯の **DDL** 装置を実現する必要がある。

- ・短波長ダイレクト半導体レーザー高出力化技術

短波長半導体レーザーのスタッキングあるいはアレイ化により短波長高出力 **DDL** 装置が実現できる。現在 400 nm 帯において、バンドルファイバーにより高出力化が計られ、6 W の出力でサンプル出荷されている。今後は新たにダイオードチップをアレイ化またはスタッキング化を計ることで短波長半導体レーザーのモジュール化を実現する、ことならびに短波長 VCSEL をアレイ化する技術開発が行われることで出力 100W が、更に 2015 年には 1 kW を、2025 年には 10 kW の出力を波長 400nm 帯で得る。

b. 電源

- ・高性能電源小型化技術

現在使用されている電源中で電力損失の大きい部品は MOSFET、IGBT 等の大電流半導体素子である。電源の小型化を考えた場合、2015 年までに電力損失を 15%程度まで低減させ、且つ、安定した電力供給を可能とする技術の開発が必要であると考えられる。また、2025 年までには電力貯蔵タンクとしてのキャパシタを高密度化することにより、さらなる小型化を図ることができる。

c. 光学系

- ・コンパクト化技術(損傷閾値低減)

光学部品は高出力レーザーにより損傷をきたす。レーザー装置の高出力・小型化においては、ビーム径の極小化が不可欠であり、単一コンポーネントからの高出力取り出しを検討する場合には、各種光学部品の高度集積化はもちろんのこと、それに用いる損傷耐力のさらなる向上が望まれる。現在、光学部品の損傷耐力値は連続発振の光源に対しては 1 MW/cm² であり、2015 年には 10 MW/cm²、2025 年には 100 MW/cm² を実現する。

d. レーザー用素子

・長寿命化技術

現在、光学部品の寿命は 2,000 時間であり、高出力レーザーが光学材料に照射された際に不純物等が種となって誘引される欠陥と、そこから生じる雪崩的な破壊現象、また雰囲気中に存在する有機物がレーザーにより焼き付く「ヤケ」が主な要因である。光学素子に多く用いられる誘電体材料において、混入する不純物を現状の ppm オーダーを越え、ppb オーダーで制御する技術ならびに定期的に表面の有機物質を取り除く技術開発により実現できる。光学部品の寿命は 2015 年には 5,000 時間、2025 年には寿命 10,000 時間を実現する。

e. 短波長化

・短波長基本波レーザー技術

現在、主流である連続発振イッテリビウムファイバーレーザーの波長は 1 μ m の近赤外領域である。2015 年度までに波長が 700nm から 600nm 領域の出力 100W 程度の赤色連続発振ファイバーレーザーを開発する。これにより、加工対象材料へのレーザー光吸収率が約 2 倍以上に増大する。また、短波長化により吸収の向上と共に回折限界角が小さくなること **BPP** 値が小さくなり、集光性が向上する。微細加工・接合への適用が期待される。2025 年までには、500nm 帯緑色領域のファイバーレーザー出力を 10kW 程度まで増大させれば、自動車の車体製造時のテーラードブランク溶接等の高効率高速溶接を実現することができる。

f. 高平均出力

・ファイバーレーザーモジュール化技術（**位相结合**技術）

ファイバーレーザーを複数台使用し、ファイバーレーザーモジュールとして高平均出力化を図る方法がある。この際に、各レーザー出力のそれぞれの位相が不揃いであると、波面の乱れにより、集光性が悪化する結果となる。このため、各レーザー出力の位相を揃える技術として**位相结合**がある。**位相结合**に用いる光学素子の高耐力化を進めることにより、高出力対応の**位相结合**技術を開発し、10 台（ビーム）以上のファイバーレーザーにおいて**位相结合**実現する。これにより、従来の最高出力の 10 倍近い集光出力を得ることができる。

g. 高集光性(高ビーム品質)

・高出力シングルモード化技術

現在用いられている酸化物系のファイバーに比べて、フッ化物系のファイバーにおいては、熱による損失が少なく、伝送損失が低い特長を持つ。高耐力ファイバー材料の開発により、シングルモードファイバーによる高出力発振を実現し、高集光効率化を実現する。現在の出力 3kW から 2015 年には出力 10kW、2015 年には出力 20kW をシングルモードで得る。

② レーザーシステムデザイン

a. 高操作性

・加工ヘッド小型化技術

立体的な被加工物を加工するシステムでは、レーザー光を照射する加工ヘッド、または、被加工

物を移動させるステージを3次元的に動かさないといけない。しかし、自動車産業などのように、被加工物が大きくなると、加工ヘッドを移動させる方が現実的であり、移動速度の高速化、移動エネルギーのエコロジー化、狭い部分への引き回しのために、加工ヘッドを小型化する必要がある。加工ヘッドサイズは、2015年には十数cm、2025年にはペンシルヘッドを実現する必要がある。

b. 高ロバスト性

・高信頼化技術

現在レーザー装置は屋内の一定環境下で使用することが推奨されている。ユーザーの使用環境により、電気回路部品や光学部品等が破損し、レーザー発振の停止に至る場合がある。ユーザー側で、使用環境を考慮しなくても良いように、2015年には屋内全環境対応型に、2025年には屋外対応を含めて、いかなる環境下でも安定してレーザー発振が得られる全天候対応型を備える。

・部品点数減少化技術

部品点数が多いと製造時の工数が増え、組付け誤差も大きくなる。また、耐環境性の低下にも繋がる。例えば、マーキングや加工ではガルバノミラーなどでレーザーを走査している。現在、コンポーネント化が進んでいるが、LDが高出力化することで、2025年にはレーザー発振器とレーザー走査部分をMEMS技術によりモノリシック構造とし、部品点数の削減による低コスト化、高信頼性に繋げる。

・LD長寿命化技術

固体レーザーやファイバーレーザーの場合、励起用LDの寿命によりレーザー本体の寿命が決まる。現在、LDの寿命は常温で約100,000時間であり、レーザー本体寿命は約10年となる。しかし、温度が10℃上がるごとに寿命は約1/2になってしまう。

マーキングや加工に使用する場合、生産性向上により24時間ノンストップラインで用いられていることが多く、かつユーザーからはメンテナンスフリーが熱望されているため、LDモジュールの寿命は2015年には150,000時間、2025年には1,000,000時間（半永久的）な寿命を実現する必要がある。

c. 高度ビーム制御

・伝送光学系小型化技術

高いエネルギー密度を実現するためにレーザー光を微細なスポット径に集光する必要がある。スポット径を微細にするためには大きなビーム径のレーザー出力を大口径のレンズで集光することが必要とされる。また光学部品の損傷を避ける観点からもレーザー出力の口径は大きい方が望ましい。しかし、レーザー加工プロセスの自由度を高めるためには伝送されるレーザー出力は小口径が望ましく、このため、伝送光学系の小型化が重要なポイントであることから、レーザーの集光効率を改善すると共に、今後小口径・高出力化が進むレーザーに対応するための技術開発が望まれる。2025年までには300kW級のレーザー装置が見込まれており、2025年の300kW級の高出力に対応できる小型な伝送光学系を可能とする耐パワー強度の高い光学部品の開発が望まれる。それにより、狭小域に大出力のレーザー光を伝送することが可能となり、土木産業や重工産業などへの新たな用途

と技術開発につなげることができる。

・オートフォーカス技術

通常、加工システムはレーザー光を照射する加工ヘッドと、被加工物を移動させるステージより構成され、加工結果はレーザー光の集光焦点位置からの距離によって大きく影響を受ける。しかし、レーザー加工では機械加工のように工具と被加工物が物理的に接触することがないため、原点位置となる焦点位置の決定に不確定さがある。被加工物の対象によって厚さや形状が異なる場合、この焦点位置決定の不確定さは加工結果を大きく左右する。ノズル先端と被加工物の距離を静電容量センサーにより測定する手法もあるが、ガルバノスキャナを用いるものや、ノズルと被加工物との距離が大きい場合、上記手法は適用できない。また、外気温度やレーザー出力によってレンズの温度が変化することで屈折率が変化し、加工プロセス中に焦点位置の変動が生ずる。更に、メンテナンスにより光学部品を取り替えた場合、焦点位置の調整時間が必要となる。加工ラインにおいては、実プロセス時間以外の時間短縮が望まれる。加えて、マクロ加工からマイクロ加工にいたるまで形状精度と自由度の向上が望まれている。これらの要望に対して迅速に対応できるスマートプロセスを確立するためにレーザー光軸方向の原点位置を決定することは基本となる点であり、今後開発される高機能レーザーにとって重要な要素技術となる。そのために、プロセス用レーザー光と同軸の光学システムを用いて高精度な位置決めを行う CCD カメラ方式や、レーザー測長方式等を用いる革新的アルゴリズムを有するアクティブな焦点位置制御によるオートフォーカス技術の開発が必要であり、レーザー発振器の革新的発展が始まるであろう 2015 年頃までにはその手法の確立が望まれる。このオートフォーカス技術の確立により段取り時間の削減、低出力から高出力までの出力変動への対応、マクロ加工から微細加工に至までのプロセスの信頼度の格段の向上が期待される。

③ レーザープロセスデザイン

a. スマートプロセス

・超高速接合プロセス技術

レーザーの高出力化、並びに集光性の改善が進んでおり、微小スポットへ大出力のレーザー光を導くことが可能となりつつある。2007 年にはシングルモードで 3kW を達成するファイバーレーザーが開発されており、2025 年には 300kW 級のファイバーレーザーの開発を計画していることから、それらを十分に活用できるプロセスの 1 つとして高速接合プロセスの確立が望まれる。高速接合プロセスを実現するためには、被加工物や加工ヘッド等の大きな質量を有する部位を移動させるのではなく、質量を無視できるレーザー光をポリゴンミラーやガルバノスキャナ等により必要な箇所へ導く手法が有効である。しかし、高出力ビームを伝送するためには大口径の光学部品が必要となることから、精密かつ高速にレーザー光を導く手法の開発が望まれる。また、大出力高速プロセスとなることで、これまでとことなる現象になることが予想されることから、2015 年までにプロセスメカニズムの解明も進め、そのメカニズムを利用、発展させたプロセスへ繋げていく必要がある。2015 年には数 m/s、2025 年数十 m/s の高速接合プロセスを実現することにより、生産性の飛躍的な向上が期待される。

・超微細加熱プロセス技術

集光性の改善と短パルス化により、微小領域に微小時間だけレーザー光を導くことが期待される。上記の特性を十分に活用するためには、パルスエネルギーとパルス幅の更なる安定化と、レーザー光のポインティングスタビリティの向上が必要である。2025年までには安定性の高いレーザーシステムの開発が期待されることから、その時期に技術展開できるだけの要素技術の開発とプロセスメカニズムの解明が求められる。現在では10mmオーダーである制御可能なサイズを2015年までに1 μ m級、2025年までには10nm級で可能とする超微細加熱システムの開発が望まれる。結晶性材料の必要とされる結晶を選択的に加熱することなどが可能となり、材料デザインの開発や結晶成長育成技術に利用できる。

・異材接合プロセス技術

これまで構造が似通った材料間の接合プロセスが主流であったが、工業製品の多様化にともなって異種材の接合への期待が高まっている。たとえば、高分子材料、金属材料、セラミック材料、ガラス材料、半導体材料などは構造が大きく異なっており、機械的、熱的性質も異なるが、これらを複合的に用いた工業製品は数多く普及している。現時点では、研究レベルにおいて高分子プラスチック材料と金属材料の接合プロセスの開発が進んでおり、2015年までにはその高速化が望まれる。また、その他の材料組み合わせによる異材高速接合に関しても2025年までに順次プロセス技術を確立していくことで、今後の工業製品の展開に貢献できると考えられる。これらの材料は間接的に接合されていることが多く、それらを直接的に接合できれば、製品の小型、軽量化と製品デザインの改善につながる。

・時間同期システム技術(ジッタ制御)

パルスレーザーの時間幅はピコ秒、フェムト秒とその時間分解能は飛躍的に向上している。それらを用いて安定したプロセスを実現するためには、レーザー発振の時間的制御を行うことが重要である。それを実現するためには、レーザー装置のジッタの制御を容易にする必要があり、レーザー光を伝送光学系にて導く時の空間的な時間制御も要求される。現在のマイクロ秒程度のジッタがあるが、2015年までにナノ秒からピコ秒のオーダーで、2025年にはフェムト秒オーダーでプロセスの時間同期システムを開発することが必要である。これにより、位相结合した複数のレーザー発振器による高出力化やあるいは複数のレーザーを用いた同時加工によるプロセス速度の向上、各種インタラクションの実現や、プロセスの安定性向上が期待される。

・ビームツールシステム技術

レーザー光を用いたプロセスの信頼性を向上させるため、工具となるレーザー光を一様に照射できるビームツールの開発が必要である。レーザー光の回転、強度分布の適正制御により機械加工の工具のように安定したプロセス状態を実現し、プロセスの信頼性と安定性を向上させる。現在10kW級のビームツールを2015年までに100kW級、2025年までに300kW級へ対応したシステムの開発が望まれる。これにより、レーザープロセス適用範囲の拡大とプロセスの安定性向上が期待される。

b. インテリジェンス(安全・自動制御)

・光軸自己回復機能技術

レーザーシステム装置全体の温度管理、もしくは熱的に安定な材料のみで装置を構成することが望まれる。大出力レーザーでは反射光学系、透過光学系によらず光学部品の熱膨張や収縮が繰り返されることから適正な箇所へレーザー光を照射するために光学部品の温度管理が求められる。そのため、光学部品のフェイズを適正なアルゴリズムを用いて制御することにより、熱的、材料的な変動に光軸が追従できる光軸自己回復機能の開発が必要である。現在の技術では 10 μ rad で追従できるが、2015年までに 1 μ rad、2025年までに 100nrad を ns オーダーで制御できる光軸自己回復機能の開発が望まれる。これにより、微小領域への正確なレーザー光照射が可能となり、超微細加熱プロセスの実現と、プロセスの安定性向上が期待できる。

・フィードバック制御技術

レーザープロセスの安定性を向上させるために CCD カメラによる同軸観察や加工ヘッドの位置情報等によるレーザー光照射位置の検出が必要である。また、X 線透過法等を用いた材料内部のプロセス進行情報の検出も有効である。更に、プラズマからの発光、加工位置の温度や音等を検出し、特定波長域の抽出やウェーブレット変換等を用いて適正条件の範囲内でプロセスが進行しているかどうかを判別し、適正条件外の場合には各種プロセスパラメータを適正状態に維持できるように適切に制御する。2015年まで 1 μ m 級の空間分解能でマイクロ秒オーダーの時間分解能、2025年までには 10nm の空間分解能でナノ秒オーダーの時間分解能を有するフィードバック制御技術の開発が望まれる。これにより、プロセスの安定性向上と製品の高機能化が期待できる。

・フェイルセーフ技術

高出力化にともない、安全性の向上は急務である。反射光の出力も大きくなることから、保護メガネや保護シート材の性能向上と視認性の両立が求められる。また、伝送光学系の位置がずれると装置のダメージにつながることから、光学系の常時モニタリングが必要である。更に、ファイバーへのダメージを低減するための アイソレーション 技術の向上も必要である。2025年までには 300kW 級のレーザー装置の開発を計画しており、現状の 10kW 級から、2015年までに 200kW 級、2025年までに 500kW 級の高出力に対応できるフェイルセーフ技術の開発が望まれる。これらにより、今後の高出力レーザーを高い安全性のもとで利用することが可能となり、作業環境と生産性の両立が実現できる。

・モニタリング技術

レーザー光照射位置、プラズマの発生状態、プロセス温度、プロセスによって発生する音、電場、磁場等のライブモニタリングが必要とされる。現状では 10mm 級の空間分解能でピコ秒オーダーでのモニタリングが可能であるが、2015年まで 1 μ m 級の空間分解能でフェムト秒オーダーの時間分解能、2025年までには 1nm 級の空間分解能でアト秒オーダーの時間分解能を有するモニタリング制御技術の開発が望まれる。これにより、フィードバック制御技術の新たな技術展開が可能となり、プロセスの安定性向上が期待される。

- ・リモート技術

モニタリング技術とフィードバック制御技術の発達により、プロセスの状態を的確に把握できることから、リモートプロセス技術の展開が期待できる。レーザー光を安定的に長距離伝送でき、プロセスポイントにおいて高い集光性を維持できるビーム伝送技術とその小型化が必要である。現状で 10kW 級レーザーに対応しており、2015 年までには 100kW 級、2025 年には 300kW 級の高出力レーザーに対応できるリモート技術の開発が望まれる。これにより狭小箇所や遠隔地でのプロセスを可能とすることから、新たな領域への展開も期待できる。また、従来技術と比較してプロセス速度の大幅な改善も可能となる。

1. 4. 2 エコロジーコンシャス化

① レーザー本体デザイン

a. 励起光源

- ・LD 高効率化技術

製造業においてレーザーは、精密な溶接や切断・穴あけ等に用いられており、高速で精密な加工ができるため、従来加工法に比べて環境負荷が低い加工である。また、アニールなどの熱処理においても、電気炉より廃熱が少ないためなどの省エネ効果があり、今後も環境の観点からこんなニーズが増えると考えられる。そのため、レーザー発振器は更に高出力化が求められ、励起源である LD は高効率化を重ねて、次第に大出力する(2015 年頃に 1kW、2025 年頃には 10kW を達成する)と思われる。また、LD の高効率化によって、同じ出力のレーザーでもレーザー発振器は小型化すると考えられ、省スペースでの運用及び省電力の面でも環境に貢献すると思われる。

- ・エミッタチャネル損失低減技術

エミッタチャネルの損失の低減が進むにつれて、レーザーエミッタの高輝度化は進み、2015 年には 10W くらいに、2025 年にはエミッタが 100W くらいになると見込まれる。これにより、より効率的にレーザーを発振することが可能になり、レーザー発振器の熱効率の上昇すなわち省電力化が加速され、環境に貢献する。

- ・VCSEL 用光学系

面発光型レーザー(VCSEL)は半導体ウエハ面から垂直にレーザーが発振されるため、素子の特性評価が LSI と同様に大量、高速かつ自動で行える。そのため素子製造コストだけでなく、製造に係るエネルギーも非常に小さく抑えることができ、環境負荷が小さい。また、VCSEL を用いた場合、半導体レーザーよりも大幅にシステムをコンパクトにすることができる。今後は高出力化が進み、2015 年までに 1kW/cm²、2025 年までには 2kW/cm²までの増加が見込まれる。これに伴い 2025 年までには 100kW 級のレーザー出力が得られるとみこまれ、超厚板の溶接(例えば圧力容器など)を 1 パス(現状ではアーク溶接で何パスも重ねて溶接している)で溶接できるようになるので、加工作業の効率化、及び有害物質(例えばヒューム)の発生低減など、環境に大きく貢献できる。

b. 冷却装置

・共振器冷却技術

VCSELは冷却の必要性が少なく、発振器で使われるLDや発振に要する熱効率が上昇するにつれて、強制的に大量の熱を奪う必要性がなくなる。したがって、現在多くの発振器で使われている冷却水をチラーで冷やして強制的に送り込むタイプから、2015年ごろには空冷もしくは普通に水を循環させるだけになると思われる。2025年ごろには発振器用の冷却器は自動車のラジエターのように小型化している、もしくはバイクのエンジンのような空冷型になってチラーレス化していると考えられる。これにより、冷却に要していた電力は大幅に削減され、節電の観点から環境に大きな貢献をする。

・電源冷却技術

電源は比較的熱を持つため、現在大型の空冷ファンが付いており、場合によっては水冷されているが、上記のように発振器の効率化や熱効率の上昇により、電源にかかっていた多大な電氣的負荷は軽減され、発生する熱は減少する。そのため、2015年ごろには水冷の必要性はなくなり空冷化が実現すると考えられ、2025年にはその傾向が更に進み、空冷の装置の小型化やチラーレスの運転が可能になると考えられる。これによって、電力的に環境に貢献し、また、騒音防止の観点からも環境にやさしいレーザーとなる。

・冷却効率向上技術

高効率化で強制的に冷却する必要性が下がるとはいえ、特に大出力を狙うなどの極限的なレーザーや、設置場所等が極端に限られているレーザーでは、どうしても少しの水やスペースで冷却を完了しなくてはならない。そのためには冷却効率の向上は不可欠で、まず現状のチラーのみではなく、ペルチェ素子や液体窒素などの手近に入手できる冷却装置との併用が進み、2015年には現状の約2倍の冷却能力が予想される。そして、2025年までにはチラー自身の性能向上や併用している冷却装置の性能向上により、現状の3倍の冷却能力が見込まれる。これにより、レーザー設置に係る省スペース化が進み、環境負荷を減らすことが予想される。

c. 共振器構造

・ファイバーカップリング技術

端面発光型レーザーが楕円形のレーザーとして広い出射角で発振されるのに対し、共振器構造をVCSELにした場合、円形のレーザーが狭い出射角で発振される。そのためレンズが不要であり、高精度なアライメントを必要とせずにファイバーと高効率でカップリングさせて伝送させることができる。したがって、2015年にはVCSELが $1\text{kW}/\text{cm}^2$ で発振しても対応できるファイバーカップリング技術ができあがり、2025年までには $2\text{kW}/\text{cm}^2$ で発振しても対応できる大出力に対応したファイバーカップリング技術ができあがると見込まれる。この結果、ファイバーレーザーの高出力化とコンパクト化が飛躍的に進み、レーザーによる高品質なスマート加工の適応範囲が広がって、効率化、省スペースの観点で環境に貢献する。

- ・共振器設計技術

共振器の設計は、まず、モジュール化が進み、モジュールをつけるだけで整備可能な状態になると思われる。これは、レーザーの故障の復旧にかかる無駄な時間(オフタイム)を減らす上でも重要で、生産性を維持するためにも大きく貢献する。しかしながら、最終的にはモジュール化してもまだまだ部品点数は多く、更に簡略化するために、MEMS 技術なども併用しながら最終的にはモノリシック構造になると思われる。これらの技術のより、レーザー発振器のオフタイムが減少し、生産力の維持が可能になり、その結果、高速・高精度な加工が維持できるため、環境負荷を減らすことに大きく貢献する。

- ・LD 励起化技術

LD 励起は主流になりつつあるので、今後は LD の継続時間が重要な問題にある。LD の交換回数を減らし、常に運転し続けることで効率の良い加工が維持でき、環境に対して貢献できるので、2015 年には今の 1.5 倍の寿命の 150,000 時間、2025 年には半永久的な寿命の 1,000,000 時間になると予想される。この結果、より ロバスト で壊れにくいレーザーになって、精密で迅速な加工ができる加工方法の 1 つとしてレーザー加工が産業界に浸透すると思われる。その結果、高速・高精度な加工が簡単に維持でき、整備・調整のような無駄な時間の少ない加工が可能であるため、環境負荷を減らすことに貢献する。

d. 電源

- ・高効率電気素子開発技術

電源の効率化を考える上で重要なのは電力損失の大きな部分を改善することで、電源部分で電力損失の大きな部分は MOSFET などの大電流半導体素子の部分である。まず、この部分の電力損失が 15%ほど改善されたものが 2015 年頃までに開発され、引き続き改善が進められて、2020 頃には 30%程度になっていると考えられる。そして、2025 頃には新しいデバイスなども用いられて電力損失は 50%以上改善されたものが開発されていると思われる。これは、電源の小型化にも直結しており、電源の高効率化、省スペース化が加速し、少ない電力、少しのスペースで動く環境に調和したレーザーになるものと考えられる。

- ・電源高効率化技術

半導体レーザーは駆動電圧が 1~2V 以下と小さいため、高効率スイッチング電源の開発は重要である。また、共振器を VCSEL にした場合、寿命は少なくとも 50 倍以上になると考えられる。よって加工用レーザー開発における電源効率化のために VCSEL を 励起 光に利用する必要があり、そのためのオンボード型高効率スイッチング電源を開発する必要がある。したがって VCSEL の出力に見合ったスイッチング電源が開発されると考えられ、2015 年頃には VCSEL の出力が 2kW/cm² に対応した電源が、2025 年頃には、10kW/cm² の出力に対応した電源あると思われる。このような電源の高効率化・高性能化によって、少ない電力、少しのスペースで動く環境に調和したレーザーになっていくものと考えられる。

- ・電源小型化技術

半導体レーザーは駆動電圧が1~2V以下と小さく、電流駆動が可能であるため、電源が小型化しやすい。そのため、CDやDVD(ブルーレイディスク含む)等に搭載されている半導体レーザーは電源も電子デバイスと共有化されている。しかし、加工用高出力半導体レーザーの場合、共振器駆動電源と素子の冷却装置の電源も含めて小型化する必要がある。そのためには、電子デバイスとのモノシリック構造化が必要であり、2015年頃にはDDL(20kW)相当の集積化が行われ、2025年頃までにはDDL(50kW)相当の集積化が行われると思われる。このような集積化によって、電源の高効率化、省スペース化が加速し、少ない電力、少しのスペースで動く環境に調和したレーザーになるものと考えられる。

② レーザーシステムデザイン

a. 省エネルギー

・エネルギーロス低減技術

レーザーシステムに用いる光学系を大別すると発振器出射口から加工対象物までの伝送光学系と照射レーザービームを所望の形状や強度分布とする加工光学系がある。伝送光学系は反射ミラー、分岐ミラー、ファイバー等を用いている。これらの光学系のエネルギーロスは加工光学系に比べ小さい。一方、加工光学系は伝送光学系と異なり照射ビームを成形する必要があるため、特に高度なビーム成形時には大きなエネルギーロスが発生する。例えばトップフラットビーム成形を用いる加工光学系のエネルギーロスは数十%となる。将来的には更なる高度なビーム成形技術が必要になるが、環境問題も考慮し2025年までにエネルギーロス数%で形状や強度分布が自由にコントロールできる光学系とする必要がある。これによって、加工点で必要な出力を出すために発振器は余分な出力を出さずにすむので、省エネの観点からも環境に貢献する。

・システム稼働率増大技術

レーザーシステムが実際に加工している時間は実稼働時間の半分以下である。なぜなら駆動部の加減速の非加工時間が発生し、加工する前の準備による非加工時間が発生するからである。現在は無駄な電気消費量を減らすため、非加工時間にレーザーパワーを減少させるよう制御している。2018年までにはシステムの稼働率を向上させるためレーザービームの照射と駆動系を完全同期させ加減速時にも定速加工と同じ加工を実施する技術と加工準備時間をなくす技術を確立しなければならない。この技術によって非加工時間におけるレーザー発振器の余分な電力消費等を抑えることができ、省エネの観点からも環境に貢献する。

b. リサイクル

・再利用コスト低減技術

現在の技術では、リサイクルすること自体にエネルギーがかかっている。回収物質を原料のレベルまで分解するという過程を経るため、場合によっては焼却処分以上にエネルギーを使う。このことから現在は、リサイクルが効率よく実施されているとは言えない。そのため少しでも再利用しやすくするため、再生目的の部品を回収しやすいデザインとする等の工夫が行われている。また、その一方で、その他にも目的と異なる純度を下げる物質が回収物に入り品質が落ちる問題がある。2015年までには不純物混入を低減させる分離技術を向上させ、2025年までにはロスが多く完全な

回収が困難なサーマルリサイクルの利用により、リサイクルコストを低減する必要がある。この技術により、リサイクル率の向上が見込まれ、環境にやさしいものになる。また、この技術はレーザーのみならず、その他の製品のリサイクル率向上の鍵にもなる。

- ・再利用率可能物質の拡大技術

現在、積極的にリサイクルを実施している物質としてはアルミ、スチール、ガラス、ペット、紙、プラスチック、塩化ビニル樹脂等である。アルミやスチールでは80%以上がリサイクルされ、ガラスも60%近いリサイクルが実現されている。一方でペットは20%程度にしかリサイクルできていない。また、これら以外の物質に関してはリサイクルするためのシステムができていない。リサイクルする物質を増大させ、再循環させるクローズドリサイクルを実現しなければならない。この技術により、リサイクル率の向上とリサイクルされる物質が多様化し、環境にやさしいものになる。また、この技術はレーザーのみならず、その他の製品のリサイクル率向上の鍵にもなる。

- c. 環境負荷低減

- ・原材料使用量減少技術

システムに使用するトータル原材料を減少させると、それを廃棄処分する時に発生する産業廃棄物も減少する。現在はシステムを小型化し、使用する原材料のボリュームを減少させている。2025年までにシステム全体の最適設計ができる技術を確認し、必要最低限の原材料でシステムが構成できるように取り組む必要がある。この技術により、原料の節約やオンデマンドな生産が加速し、現在の大量生産・大量浪費の生産スタイルが大幅に改善されて、環境にやさしい生産方式になると考えられる。

- ・RoHS 対象代替物質利用技術

RoHS は電子・電気機器における特定有害物質の使用制限についての欧州連合による指令であり、その物質には鉛、水銀、カドミウム、六価クロム、ポリ臭化ビフェニル、ポリ臭化ジフェニルエーテルがある。これら有害物質を使用せず、代替物質を使用していく必要があるが、代替物質を使用する技術が現状では完全とは言えない。例えば、鉛フリーはんだは従来の含鉛はんだより製品の歩留まりや耐久性が悪化するという問題が発生しており、廃棄物の増大を助長するという懸念がある。2013年までにはこれらの代替物質を有効に使用できる技術確立が必要である。

- ・REACH 対象代替物質利用技術

REACH は欧州連合における環境対策のための法律である。生産者は、製品の全化学物質の人類・地球環境への影響について調査し、2018年までに申請・登録する必要がある。これに伴い、2018年までに従来使用してきた化学物質よりも、高い安全性を立証した代替化学物質に置き換える必要が発生するため、代替物質の開発などが急務である。

- ③ レーザープロセスデザイン

- a. スマートプロセス

- ・レーザー吸収率制御技術

固体材料（金属、半導体、絶縁体）加工において加工効率を増大させるには、レーザーの吸収率

を増大させ、いかに効率よく材料にレーザーエネルギーを注入できるかにかかっている。これまでに様々な応用研究の分野において、共鳴吸収するレーザー波長を用いれば、非共鳴の場合に比べて約1桁程度小さいエネルギー密度で所望の材料加工ができることが報告されている。共鳴吸収の特徴は、材料を構成している原子間の振動モードまたは電子遷移に着目し、その遷移に共鳴するレーザー波長を用いる点にある。つまり、適用材料にあった波長のレーザー装置をラインナップしておく必要がある。特に金属では530nm付近の波長にインターバンドをもつものが多く緑色が有効である。2015年までに赤色ファイバーレーザーの開発を行い、2025年までに緑色ファイバーレーザーの開発を行い、高効率レーザー吸収加工を実現する。一方、極短パルスレーザーを用いれば、本来共鳴しないはずのレーザー波長でも非線形過程により励起準位に吸収が起こる。材料に制限されない本手法は材料加工の観点のみならず加工効率向上の面からも必要な技術である。2025年度までにアト秒パルスレーザーの開発が望まれる。このようなレーザー吸収率を制御する技術によって、目的に応じた加工を必需最小限のエネルギーで行うことが可能になり、無駄な出力を使わない環境にやさしい加工が可能になる。

・超高速加熱プロセス技術

どんな固体材料でも、非晶質（アモルファス）状態よりも安定な結晶相が少なくとも一つ存在することが経験的に知られている。非晶質金属は、熱力学的に完全な安定相ではなく、自発的に結晶化する傾向がある。ただし、室温程度の温度では、その速度は著しく小さく、完全な結晶化が達成されるためには地質学的年代を経過する必要があると考えられている。しかし、個々の非晶質金属は、液体状態から急冷、金属蒸気または溶液中の金属イオンの低温表面への蒸着または電着、高エネルギー粒子線による結晶金属の照射などの方法によってつくられる。これらのなかで液体を急冷する方法が非晶質金属材料をつくる最も一般的な方法である。その際、結晶核が成長する余裕を与えないほど急速に冷却する必要がある。この条件が満足されると、過冷却液体はガラス転移点とよばれる温度で固体となり、非晶質化（アモルファス化）する。実際には、熔融金属を高速で回転する金属ローラー表面に吹き付ける、いわゆる熔融紡糸法などの方法が用いられる。このような超急冷法によって種々の非晶質金属が作られている。しかし、超急冷法による純粋金属の非晶質化はまだ成功していない。超急冷法によってつくられる非晶質金属は、金属ガラスまたは超急冷金属ともよばれる。非晶質金属は、原子配列の無秩序性を反映して張力などの異方的な外力に対して強い、酸などに侵されにくい、軟磁性特性に優れている、放射性損傷を受けにくい、などの種々の性質を示す。非晶質金属の示すこれらの特性を利用して新機能材料としていろいろな応用が考えられている。加えて多結晶または単結晶の純金属や半導体について任意の部位を選択的にアモルファス化することで電気伝導や熱伝導が変化し、これまでにはない新しい概念に基づくデバイス開発につながることを期待される。現状では、RTA(Rapid Thermal Annealing)やナノ秒レーザー加熱により冷却速度 10^6 - 10^{10} K/s で急冷固化させることは達成されている。2015年まで急冷固化の物理機構解明を目的としてフェムト秒レーザーにより 10^{15} K/s のデータベース構築を行う。2025年には物理機構を制御し 10^{16} - 10^{17} K/s の急冷固化技術の確立が望まれる。このように急速に冷却するもしくは急速に加熱することで、未知の物性を持った物質の誕生が期待されるが、このような加熱冷却を容易にかつ効率的に作り出せる熱源の1つがレーザーであり、環境にやさしい新材料開発が可能である。

・超微細加熱プロセス技術

加工サイズはレーザーのパルス幅の減少とともに小さくなり、マイクロメートルサイズを切るところまできている。そして、これまで加工サイズは、レーザー波長程度に制限されるとされてきたが、最近、見出された新しい物理現象にもとづく加工を行えば、レーザー波長の10分の1程度まで微小化できることが示されている。また、レーザーを集光することにより容易に高強度化できるため、加工材料に関しては、金属、半導体、絶縁体、化合物、生体物質まで幅広く取り扱うことができる。このため、レーザーによる加工技術は、高集積化のために微細化が進行していくナノテクノロジー、情報技術、環境技術、バイオテクノロジー、製造技術など広い分野にわたって重要な技術要素となる。加えて、近年話題となっている材料組織の不均一性に着目し、特定の部位のみを局所的に加熱して特異的な組織状態を作る新しい材料科学・工学の分野が切り拓かれようとしている。2015年までにミクロンオーダー、2025年までにはナノオーダーでの超微細加熱システムの開発が望まれる。このように、レーザー加工は様々な分野に浸透し、必用最小限のエネルギーで必要な部分だけを加工する環境負荷の小さい加工を実現すると思われる。

・超高強度光電場プロセス技術

1010V/mの高強光電場を容易に実現できるレーザーは、高温、高圧などの従来法とは異なる新規材料創成の手法として期待されている。2025年までにはアト秒オーダーで安定して発振するレーザー装置の開発が望まれる。このような新規材料の開発にもレーザーは有効であり、難しく厳しい環境でも、容易にかつ効率的に加工できる手法の1つがレーザーであり、環境にやさしい新材料開発が可能である。

b. インテリジェンス(安全・自動制御)

・レーザービーム制御技術

レーザー装置は高繰返し高平均出力化を目指して開発が進んでいる。高出力化とともに、加工サイズに対する焦点は微小領域のみに留まらず、短時間に広い面積のナノ精度加工の可能性が出てきた。複数個の微小スポットにレーザーを分割し、一括大面積の微細加工の対応が必要になってくる。一括パターン加工では、レーザーの強度分布と位相とを組み合わせた位相マスクやパターン転写が有効と考えられる。2025年までにはナノメートルサイズの加工精度を保持しながら一括パターン加工を大面積に行える装置が開発できるかが今後のキーテクノロジーである。大面積加工技術は、微細形状、超平滑面、超低摩擦面を必要とする分野への寄与が期待される。一般にナノ精度加工では、大面積化は非常に難しい課題で、従来法では多大なエネルギーを要する。しかし、レーザーによる加工の場合は、従来法に比べて簡単かつ高効率に対応可能になる可能性があり、環境負荷の小さい加工であるといえる。

・超高速材料分析技術

レーザー吸収率制御技術、超高速加熱プロセス技術、超微細加熱プロセス技術を確立するためには、レーザー加工による材料の変化を高速度に分析する技術開発が必要不可欠である。2015年までにフェムト秒オーダー、2025年までにはアト秒オーダーでの超高速材料分析システムの開発が望まれる。本分析装置により、材料加工の目的にあった最適レーザー条件を短時間に見つけ出すことを

可能にし、同時に安定した材料開発の監視システムとしての役割を担う。このような技術の進化によって、無駄なトライ&エラーが減少し、無駄を省く観点から環境に貢献するレーザーになると期待される。

- ・モニタリング技術

安定した加工プロセスを実現するためにはレーザーエネルギー、レーザー照射サイズ、レーザー波長、スペクトル幅、レーザーパルス幅のライブモニタリングが必要である。目的とするレーザーのパラメータは電氣的に処理されるため測定精度は処理回路を構成する電子素子により決定される。2015年までに1%の測定精度を実現し、2025年までには0.1%以下の測定精度を有するモニタリング技術の開発が望まれる。これにより、フィードバック制御技術の新たな技術展開が可能となり、プロセスの安定性向上が期待される。このようにモニタリング技術とレーザー加工のロバスト化は表裏一体なので、より高いレベルのモニタリング技術が開発されることによって、更に環境にやさしい適正化されたレーザーが生まれ、環境に貢献する。

- ・フィードバック制御技術

モニタリング技術により得られた情報から、適正条件の範囲内でプロセスが進行しているかどうかを判別し、適正条件外の場合には各種プロセスパラメータを適正状態へ速やかに回復できるように制御する。2025年までにはナノ秒オーダーの回復時間で機能するフィードバック制御技術の開発が望まれる。これにより、プロセスの安定性向上と製品の高機能化が期待できる。このように、より適正化され安定したレーザー加工には、非常に高速な制御が精密に行われる必要があり、この技術の進歩によってより環境にやさしいレーザー加工の実現が可能になる。

1. 4. 3 アフォーダブル化

- ① レーザー本体デザイン

- a. 半導体製造

- ・面発光型半導体レーザー技術

面発光型半導体レーザーは、ウエハの切断が不要であり、集積化でアレイ化が可能となる。現在、パワー密度は約1 kW/cm²であるが、2015年には2 kW/cm²、2025年には10 kW/cm²にする。

- ・大口径基板作製技術

現在、ウエハの直径は300 mmであるが、2012年に直径450 mmとする。

- ・大口径露光技術

現在、直径300 mmのウエハのフラットネスは65 nmであるが、2011年に40 nmとし、2012年では直径400 mmで35 nmを達成する。

- b. レーザー用素子

- ・光学部品大量生産技術

2010年頃までに大量生産によるコスト削減を実現する。

- ・集積化技術

2010年頃までに複合集積化を実現する。

- ・大量・高速研磨技術

2010年頃までに職人技を数値化することによって大量同時研磨を実現する。

c. 規格化

レーザー発振器に関する規格化に関する活動は実施されておらず、同じメーカーの発振機であっても種類が異なるだけでレーザービームの出射口の位置、コネクタ、ケーブルや制御信号が異なる。当然、発振器の形状も全く異なっており、レーザーシステムを製作するためにはそれぞれの発振器に対応した設置方法や制御方法とする必要がある。一方、プロセスオートメーションの分野における駆動系に関してはフィールドネットワークを用いるといった統一規格に向けた活動があり、発振器関連より遥かに規格化が進んできている。しかしながら、この駆動系関連も完全統一規格には至っていない。これらレーザー発振器、光学系及び機械系を完全に規格化することでレーザーシステムにおける設計が容易となりコスト削減が可能となる。ハイパワー用、ミドルパワー用やローパワー用などいくつかの種類に分類する必要があるが、規格化すべき項目を列挙する。2009年までに規格化を行い、2011年までに標準化を行う。

- ・発振器・光学系関連規格化技術

1. レーザー出射位置
2. 発振器固定方法
3. 発振器寸法
4. 上位機器との通信方法
5. 発振器に付随するコネクタ関連
6. 発振器に付随するケーブル関連
7. 上位機器との通信ソフト
8. 上位機器とのコネクタ
9. 上位機器とのケーブル
10. 励起源交換方法
11. ハイパワー用ファイバーコネクタ etc.

- ・駆動系関連規格化技術

1. モーター寸法
2. モーター固定方法
3. 上位機器との通信ソフト
4. 上位機器とのコネクタ
5. 上位機器とのケーブル

6. P/C とドライバー間ケーブル
7. P/C とドライバー間コネクタ
8. ドライバーとモーター間ケーブル
9. ドライバーとモーター間コネクタ
10. ドライバーとモーター間制御信号 etc.

d. 共通プラットフォーム化

- ・プリフォーム技術(ファイバー母材・前駆体製造技術)

現在、プリフォーム設計を最適化し、2015年までに規格化し、2025年までに標準化を行い、量産システム化を実現する。

e. チラーレス化(冷却装置不要)

- ・レーザー冷却輻射制御技術

輻射率(熱→光変換効率)を2015年に50%、2025年に100%にする。

② レーザーシステムデザイン

a. コンポーネント化

- ・カセット化技術

レーザーシステムを構成機能ごとに分けてコンポーネント化し、コンポーネントを1つの取り扱い容易なカセットにすることにより、そのカセットをはめるだけでレーザーシステムにその機能を組み込んでいくことができれば、レーザーシステムを組み上げるときの時間と労力が低減され、製造及び納品に関わるコストの低減が期待できる。また、ある部品が損傷を受けた場合もカセットとなっていることにより交換が容易となる。そのためには、レーザーシステムのどの機能が分割・カセット化でき、また、どのようにカセットをレーザーシステムに接続させるかなどの技術開発が必要である。特にレーザー光の接続においては、正しく接続されていないとその部分だけでなくレーザー本体の破壊へと至る恐れがあり、不完全接続防止のための技術開発も重要と考えられる。2015年までにはカセット化に適した機能分割及びカセットへのコンポーネント組み込み技術の開発、2025年までには接続等、実際にシステムにカセットを実装するための技術開発が望まれる。

- ・パッケージング技術

レーザーシステムを機能ごとに分割・コンポーネント化し、それらを組み合わせてレーザーシステムを構成するためには、各コンポーネントの組み立て後は調整等の必要なくコンポーネントを取り扱えるようにすることが重要である。またアプリケーションによっては、レーザーシステムは非常に過酷な環境下に置かれることがあり、その中においてもレーザーシステム設置後、長期間安定動作し続けることが要求されるため、外部からの汚染防止や振動などの擾乱を遮断できる機構を備えている必要がある。そのためには、堅牢で安全にコンポーネントが取り扱えるよう部品群がパッケージングされている必要があり、そのためのパッケージングの技術の開発が望まれる。カセット化技術の進展の状況も踏まえ、2020年までにパッケージングに必要な汚染防止や擾乱遮断などの要素技術の開発、2025年までにはそれらを組み合わせて、必要なパッケージングを各コンポーネン

トに実装する技術の開発が望まれる。

- ・アップグレード再生技術

レーザーシステムを使用しているうちに、アプリケーションの発展により更に高い性能がレーザーシステムに対し要求されるようになり、そのシステムではその発展に追いつけなくなる事態が発生する。そのときにレーザーシステム全体を買い換えずに、レーザーシステムを構成する各コンポーネントのうち必要となった性能を満たすための最低限のコンポーネントを追加・アップグレードさせることができれば、性能向上にかかるコストを最小限に抑えられることが期待される。そのためには機能ごとのコンポーネント間の関連についての詳細な検討が設計段階から必要であり、2015年までにアップグレードを容易化するためのレーザーシステム設計技術の開発、2025年までにアップグレードを可能にするコンポーネント交換技術の開発が望まれる。

- ・オンデマンドシステム化技術

ユーザーが必要としているレーザーシステムはユーザーのアプリケーションごとに異なり、すべてのアプリケーションに対応できるようなレーザーシステムを開発することは困難である。また、開発したとしても当面必要としない機能を備えることとなり、製品価格を押し上げてしまう。そのため性能ごとに分けてモデル化して製造・販売されているが、それでもユーザーの望む性能に対して過剰であったり、不足していたりすることが多い。そこでユーザーの要望に合わせて、最小限のコンポーネントで最適なシステムを設計し提供できれば、過剰な設備や、不足設備の追加調達・開発にかかるコストを抑えることができ、レーザーシステムとしての価格を抑えられることが期待される。そのためには、ユーザーからの要望に合わせて素早くシステムを設計し、製品化する技術が必要で、納期短縮・製造コスト削減において重要となる。また、要求性能に合わせて様々なコンポーネントを選択、組み合わせられるようにするには、それらを構成するパーツの規格の標準化も必要となってくる。カセット化技術やアップグレード再生技術の進展状況を取り入れながら2015年までに要求性能を満たすシステム設計技術、2025年までにはその設計技術にもとづくオンデマンド生産システム技術の開発が望まれる。

- b. シミュレーション

- ・システム設計技術

レーザーシステムにおいて必要とされる部品はアプリケーション等により形状や組み合わせが異なり、非常に多様なものとなっている。また使用に際し、アプリケーションに合わせた設計・試作・試験が繰り返され、その最適化が図られている。あらかじめ設計段階において詳細に部品の形状や性能を評価できれば無駄な試作を減らすことができ、開発コストの削減が期待される。そのためには、2015年までに構成部品の最適化設計技術、2025年までにはシステム全体の最適化設計技術の開発が望まれる。

- ・伝送・集光光学設計技術

光学系を実際に組み上げ・試験する前に、システムとしてアプリケーションで要求されるレーザー光の性能が満たされているか、また使用時の損傷対策も十分かなどを設計段階で詳細に検討する

ことができれば、余分な光学部品の購入や試作、損傷などを抑えることができ、開発コスト削減が期待される。また、各光学部品の必要精度等を割り出すことも可能となれば、必要最小限の性能の光学部品群によるレーザーシステム構築の最適化が可能となり、製造コストの抑制も期待される。そのためには、2015年までにレーザーシステムの要求性能を満たすシステム全体の光学設計技術、2025年までにはその最適化設計技術の開発が望まれる。

c. エンジニアリングデザイン

・工程制御技術

レーザーシステムを組み立て、調整し、性能を検査するための工程は個々のレーザーシステムにより異なる。そこで最適なレーザーシステムの組み立て・調整・性能検査手順がレーザーシステムをデザインすると同時に示されれば、効率的にレーザーシステムを組み立てることができ、製造、設置のための時間及びコストの削減が期待される。2015年までにはレーザーシステムの構成要素についての製造工程制御技術、2025年までにはレーザーシステム全体の製造・設置工程制御技術の開発が望まれる。

③ レーザープロセスデザイン

a ハイブリッドレーザー加工プロセス

・複合加工プロセス技術

レーザー・物質相互作用は材料の種類（金属、ガラス、プラスチック、セラミックス等）とレーザーの特性（波長、パルス幅、ピークパワー等）によって異なる。材料によってこれらを組み合わせることにより、エネルギー的にも加工効率的にも最適な加工プロセスが得られる。まずピークパワー複合加工プロセスを実用化し、次いでパルス幅複合加工、2025年までには波長複合加工まで実用化が必要になる。

b. マルチレーザー加工プロセス

・小型レーザー同時ハンドリング技術

レーザー加工は、エネルギーの集中性には優れているが大量・大面積加工が困難である。高価な大出力レーザーを導入するよりも廉価な小型レーザーを多数同時にハンドリングする方が加工プロセスのコストは低い。故障した際もスペアの小型レーザーも廉価であるため交換コストも低く抑えることができる。2008年には2台、2015年には10台、2025年には100台を導入した同時加工プロセスが有用となる。

1. 5 まとめ

短波長化、短パルス化、高ピーク出力化などでトップデータを出すようなレーザー開発は、もちろん重要で必要である。新しいレーザーから新しい応用、市場が生まれる可能性があるからである。ものづくり技術分野においては、別の見方、特に市場からレーザー開発を見ることも大切である。欧米メーカーが開発したファイバーレーザーは、出力で **CW 固体レーザー** の新記録を出すとともにものづくり技術分野において重要なフレンドリーとエコロジーコンシャスの点で優位性を示した。国内メーカーもファイバーレーザー開発に着手し、製品化しているが、商品力をつけるのはこれからである。

欧米メーカーに先行された理由はいくつかある。ユーザーフレンドリー、エコロジーコンシャス及びアフォーダブルについてあまり重要視してこなかった点もその1つであるし、図1.1に示した2つのレーザー加工分野が殆ど交流のなかったことも原因の1つであろう。欧州は、光教育及びプロジェクトによる研究開発を長期的に行っているのに対し日本は、短期的な取り組み・プロジェクト研究開発しかない。日本のものづくり技術分野発展のための次の1手、光教育及びレーザー技術開発プロジェクトは、長期的視野を持って推進していくべきであると考ええる。

第2章 ニーズ適合次世代レーザー技術開発

2.1 要約

レーザーは発明以来 50 年もの間に長足の進歩をとげ、様々な分野で応用されるに至った。現在では CD や DVD 等の家庭用電化製品、バーコードリーダー、インターネット、長距離電話等の分野において日常的、経常的なツールとして重宝されている。これらの応用は主に「レーザーの波としての性質」を利用したものである。精密加工、溶接等、「レーザーパワー」を直接利用する分野においては、一部を除き経常的に利用されている例は少なく、発展途上の段階にある。

レーザーの最大の特徴は優れた制御性と非接触処理が可能なことにある。この特徴を最大限に発揮できるのが加工分野への応用であるが、従来の加工機に比べ十分に市場に進展しているとは言い難い。この原因の第一に挙げられるのは、レーザーの産業化デザイン力の不足である。つまり、ユーザーのニーズに適合したレーザー技術開発を組織的・機能的に実施する体制が日本には構築されていない。このような現状に鑑み、レーザーを利用した各種産業からの要求をまとめ、更にレーザー装置並びに加工装置を供給する立場から見たニーズと現状の分析を行った。

先ず、レーザー加工機における基本要件事項及び、近い将来に求められるであろう事項をまとめた。産業界がレーザー加工機に望む最大の要求事項はコストの低減である。レーザー加工機のコストの大部分はレーザー装置本体とその周辺機器が占めている。従来の加工方式では生産性を上げられない部品加工等については、レーザー加工機使用の優位性があったとしても、コストメリットが見出せず採用を見送るケースが多く見られる。コスト低減を実現するには、競争原理下における部品・製品の国産化が必要であり、国内メーカーの販売数を伸ばすことが最善の解決策であると考えられる。メンテナンス費用に関しても製造する部品の単価に直結しないような環境整備から始める必要がある。

次いでレーザーベンダー、すなわちレーザー加工機を供給する側から見た産業界ニーズの分析についてまとめた。産業応用の種別により、様々なレーザー性能が要求されている。連続発振、パルス発振の大別に始まり、出力パワー（エネルギー）、波長（短波長化）、ビーム品質、制御性、ロバスト性、高効率化、レーザーヘッドの小型化等である。産業界ニーズを総じて分析すると、レーザーベンダーが安定且つ、機能性の高いファイバーレーザー開発に注力する理由は明らかである。

最後にレーザーを利用した各種産業からのニーズをまとめた。ここで取り上げた産業は、「自動車分野」「半導体・電子分野」「造船・航空・宇宙・防衛分野」「建築・土木分野」「レーザーメーカー」である。レーザーに対する要求は、やはり各種産業において様々であるが、ここでもコスト低減が主となっている。レーザーベンダー、ユーザーの双方がコストを意識しているにも関わらず、未だに実現できない状況を十分に理解しておくべきである。高信頼性・高保全性の確保、ロバスト性、更に高効率省エネルギー動作は生産ラインへの導入においては当然のことであり、本質的に安定な構造を有するファイバーレーザーが光源としては最適である。加工ヘッドの小型化、各種制御機器等の周辺機器開発も同時に待望されている。また、現状、レーザー産業の多くは欧州製品を輸入して使用している。従って、契約時の運用、故障対策、メンテナンス時の対応等を欧州側の主導で進めなければならない実態がある。国産レーザー発振器の性能が欧州製に比べて低く、更に産業化デザイン能力に劣ることが最大の理由である。レーザーは欧州が位置付けているように今後の産業応用において必要不可欠なツールであり、開発の遅れを取り戻すため、国の積極的な関与が待たれる。総じてユーザーフレンドリー・エコロジーコンシャス・アフォーダブルなレーザー開発技術と、それを開発可能な陣容・組織を日本に構築する必要性が明確となった。

2. 2 現状・ニーズ(総括)

レーザー装置の役割は、レーザー光を発生させるだけではなく、製造などの利用分野において従来の加工機などと比較した優位性を得るために利用されることにある。優位性では従来は不可能であった微細加工ができたり、新たな材料の接合が可能になったり、価格競争力を高めることによって得られる。すなわち、先端技術を追い求める研究者が開発する最先端のレーザーと、市場が求めるレーザーは必ずしも一致するとは限らない。

本章ではレーザーを利用した各種の産業分野からの要求をまとめているが、単にユーザー側からの要求を記載しているだけではなく、レーザー装置並びに加工装置を供給する立場から見たニーズと現状の分析も行っている。

これらの分析によって、今後開発すべき方向性が見えてくる。波長に関しては、従来から利用されている、**Nd** 並びに高効率化のために近年利用が伸びている **Yb** をドープしたレーザーから得られる $1.06\mu\text{m}$ 付近のレーザーが主流である。鋼板などの溶接並びに切断には $1\mu\text{m}$ 帯のレーザーで対応できる。一方、新しい用途として、電子産業における RoHS 指令への対応に必要な鉛合金ハンダからの脱却のため、銅をレーザー溶接する要求がある。この場合、銅の吸収が高くなるグリーンの波長が求められている。

集光性に関しては、集光性の制御性が求められており、溶接、切断などの用途に合わせた**強度分布**が必要であることがわかる。それと同時に、たとえば自動車産業では三次元形状を持つ鋼板を高速で溶接する必要があるためレーザーヘッドを小型軽量化すると同時に、離れた位置からのレーザー照射を可能にする必要があり、**ファイバーレーザー**の様な高い**ビーム品質**を持ったレーザーが求められる。また、スループット向上のために溶接速度の高速化も求められている。

更に、可搬性と出力の面からは、造船や航空機製造並びに土木建築分野において高出力かつ移動能力の高い高機動性レーザーが必要になる。このためには、省電力かつ**ロバスト**性の高いレーザー装置が求められており、これらの目的には半導体レーザー**励起**とファイバによる光学的な構成により効率が高く、ファイバに光を閉じこめているため安定なレーザー構造を有する**ファイバーレーザー**が適していることなどが明らかになった。

2. 3 まとめ

今日の産業分野で利用されるレーザーは、ほとんどの用途において最終的にレーザー光を熱として利用している。また、加工対象物の材質や大きさ及び行うべき加工の種類(たとえば切断か溶接か)、などの違いにより各種の波長や出力を持つレーザーが求められる。すなわち、ユーザーの要求と開発可能なレーザー装置の性能が一致しなければならない。そのためには、シーズ思考の開発ではなく、ニーズから得られるレーザーへの要求事項を熟知し、それを満足できる開発を行うことが不可欠である。

本章で記載されているユーザー並びにベンダーから得られた産業別ニーズを満たすために、続く第3章において技術的なシーズなどについて論じている。

第3章 次世代レーザー開発のための技術シーズ

3.1 要約

日本の産業競争力を高め、従来の加工技術や生産技術では得られなかった高性能な製品や低価格な製品、あるいは高層建築物や航空機の製造及び解体、更には橋梁などのインフラの保守のためにレーザーの利用が期待されている。

これらの要求を満足するために、多くの技術開発を行う必要がある。通常、新規な技術の開発には多くの困難を伴うが、幸いにして日本は高度な光通信技術を擁している。これを利用すれば、高性能なファイバーレーザー開発の可能性は十分にあることが示されている。たとえば、光通信分野において伝送する情報量を増加させるために利用されている、波長多重技術の活用が可能であること、更には位相結合技術なども利用できる可能性があることが示されている。これらの技術により複数のファイバーレーザー出力を、単一のファイバーに束ねて高出力化することが可能になる。

更に、ファイバーの特性を生かした高いビーム品質と高い効率を得るための、最先端のファイバー光要素技術についても示されている。それと同時にファイバー独特の非線形現象や端面破壊に関する開発すべき要素も指摘されている。

また、光ファイバーを用いたレーザー並びに光学系は、レーザー光をコアとクラッドの構造に閉じこめた状態で利用するため、外部の空間に光が露出しない状態で構成できる。そのため、耐環境性が高く、振動、温度、湿度、塵埃などに対する耐力が非常に高いことが述べられており、たとえば、車両などに搭載可能な機動性の高いレーザーの開発に適していることが述べられている。

日本が得意とする電子産業分野において競争力を得るために、微細な銅の溶接技術は不可欠になるものと考えられているが、これに利用できる波長 500nm 程度のレーザー開発にも、日本が得意とする短波長半導体レーザーを励起源として組み合わせる方法が示唆されている。

本来、日本が比較的優位な立場にあったレーザー産業が、ドイツ製レーザーに国内市場まで席捲された理由の一つとして、加工機など生産装置の最終形態としてユーザーに供給できていなかったことがあげられている。そこで、レーザー装置、レーザーを加工対象物に導く導光及び集光のための集光照射光学系、加工ステージ及びロボットなどの周辺機械要素を、三位一体で開発する必要性が指摘されている。

三位一体のレーザー開発も、各種の用途とユーザーに適応する様に行わなければならない、レーザー装置メーカー(ベンダー)と各種業界のユーザーから意見が述べられている。この中で、ユーザーとレーザー装置の供給側が親密に情報を共有して開発を行う必要があり、日本国内におけるレーザー開発及び国内レーザーメーカーの重要性が指摘されている。

3.2 次世代レーザー開発のための技術シーズ

3.2.1 高性能ファイバーレーザーのためのファイバーレーザーの技術的な可能性

数々のレーザー技術があるなかで、ここではファイバーレーザーの可能性を考えてみる。理想的なレーザーの指標の要求性能として以下の項目を挙げた。

- ① 出力が大きく、投入エネルギーに対する効率が高い。
- ② 高い出力でビーム形状の時間安定性が高い。
- ③ 任意の波長を取り出すことが可能
- ④ 任意の時間波形を取り出すことが可能。変調及びパルス動作

- ⑤ 出力レベル、発振波長、発振線幅、偏光の時間安定性が高い。
- ⑥ 価格が安く取り扱いが容易。簡便で安全な動作

- ①についてはクラッド**励起**の Yb ドープ**ファイバーレーザー**にて 3kW を超える**シングルモード**出力と、80%近い**励起**光からの変換効率が報告されている。**励起**は半導体レーザーによって行われるが、半導体レーザーの電気→光の変換効率とファイバーへの結合効率も重要である。基本的に**ファイバーレーザー**で行っているのは輝度と空間モードの変換であるから、**励起**半導体の輝度の向上がそのまま**ファイバーレーザー**出力として現れる。
- ②については、まずは $M^2 < 1.1$ を実現する**シングルモード**ファイバーで構成することが理想であるが、ファイバー内で発生する非線形を抑圧するためにコア有効断面積が大きなファイバー (**LMA**) が使われる。更に Higher Order Mode (**HOM**)技術の様な技術により有効断面積を飛躍的 (~100 倍) に大きくする手法も報告されている。
- ③については効率も考慮して Yb による $1.08 \mu\text{m}$ の発振が高効率である。**Tm**を使った $2 \mu\text{m}$ のレーザーでは 790nm **励起**により 60%以上の高効率が報告されている。この波長は $1.4 \mu\text{m}$ より長い**アイセーフ**波長であり専門家でなくとも安心して利用できる。また、石英ファイバー伝送が可能な波長であることに加え、 $1.0 \mu\text{m}$ 帯と比較すると実効の**シングルモード**ファイバーのコア径が 2 倍と大きいため有効断面積としては 4 倍となり、4 倍高い出力の光を扱えることになる。
- ④を実現する上で、シード光源とファイバー増幅を組み合わせた MOPA 構造のレーザーは有効である。**パルス幅**が psec(ピコ秒: 10^{-12} 秒)やそれよりも短い場合、ファイバーの分散を調整する機構も有効である。高い**パルス**エネルギーが必要な場合、パルスピック機構により繰り返しを低減や、更に**固体レーザー**とのハイブリッドを行う手法も検討されている。
- ⑤については DFB 構造のファイバーや半導体シード光源を更に偏光保持増幅することにより数 MHz 以下の線幅と 20dB 以上の偏光消光比が実現可能である。

シード光源+変調機能	増幅器	分散補償器	デリバリー
DFBファイバーレーザー-1080nm 1064nm 半導体+直接変調 モードロックファイバーレーザー	976nm 励起高効率半導体 Ybドープ 1080nm 増幅器 ErYb1550nm 増幅器 790nm 励起 2050nmTmDF	ファイバ分散補償 バルク分散補償	デリバリーケーブル 光コネクタ標準化 切替スイッチ

図3. 2. 1 高性能ファイバーレーザーシステムを構成するための技術要素

- ⑥シード、増幅、分散補償、デリバリー等各部分のモジュラリティを図り、組合せにより汎用性、共通化によるコストダウンを出していく。ハイパワー対応光コネクタ等接続の標準化、光スイッチ等の切り替えが容易に行えるようにすれば、容易に冗長系を組むことも可能となり信頼度も向上する。更に使い勝手を決める上ではハードウェアだけではなくソフトウェア上の工夫が期待される。

3. 2. 2 ファイバー光学系を用いた高出力化

ファイバー型レーザー媒質とファイバー型光学部品を用いてレーザー発振を得る**ファイバーレーザー**は、従来の空間光を利用したレーザー装置と比較して可撓性のある導波路への安定した光の閉じ込め

と、発振光とファイバー内の増幅媒質領域との間に強い相互作用を得ることができる。これらを利用することにより高い効率を得られるが、それと同時にこれまでにない特長を有するレーザーを構成可能になる。

ファイバーの特長を生かしたレーザーの例を、時間的、エネルギー効率的、ビーム品質(空間的)な面から挙げる。

時間領域において特徴を持つレーザーとして、短パルスレーザーがある。これは、ファイバーの有する非線形性を利用することにより、**100fs** (10^{-13} 秒：光の速度で $30\mu\text{m}$ 、すなわち 30 波長程度しか進まない)の極めて短い時間の光パルスを発生可能としている。また、パワー領域では、増幅媒質とレーザー発振光がコア部において強く重なり合っているため、極めて高い(レーザー発振で生じる励起光から発振光への波長変換に起因する、原理的な損失である量子欠損のみを損失とした値に近い)励起光から発振光への光-光変換効率を得ることができる。この効率は、例えば Yb ドープファイバーレーザーの場合 80%を越すことが可能になる。

高効率化により、次の特長を得ることができる。光の損失は最終的に熱に変換されるので、損失が低いことは、高出力化のみならず発熱抑制においても有利である。更に、ファイバーは長いため、増幅媒質の体積に対する表面積が大きく、放熱面においても有利となる。

更に、光ファイバーは光の伝搬方向と直交する、横方向の空間を全長にわたって制限しているため、全長が空間フィルタの働きをしており、大変良好な空間モードを得ることが可能である。例えば、M²と呼ばれるビーム品質の指標においてほぼ測定限界以下の最良の値を得ることができる。

表3. 2. 2 ファイバーレーザーの高度化に活用できるテレコム分野から生まれた光技術

技術項目	テレコム光技術	ファイバーレーザーへの活用
低損失ファイバー	0.18dB	破壊閾値の高い高純度石英系ファイバー
光ファイバー増幅	利得 40dB(10^4 倍) 光-光変換効率>85% 寿命 10 万時間 高効率、高輝度励起 LD 光ファイバーカプラ	希土類元素ドープ技術 ファイバーレーザー用増幅媒質 <u>ダブルクラッド</u> (クラッド励起) 低損失、高輝度耐力光部品(耐パルス輝度：10GW/cm ²)
高密度波長多重	波長間隔 50GHz チャンネル損失<2dB アレイ導波路	高出力化用低損失合波器 石英系導波路 多層膜技術の高度化(消光比>45dB の二波長フィルタ)
導波路設計	多重屈折率コア構造 孔構造ファイバー	実効コア断面積の制御 波長分散制御
偏波制御	PMD 制御 ファイバー型偏波部品	低損失・高速・無反射偏波制御 偏波多重 位相结合多重化

将来のファイバーレーザー開発において行うべき次世代レーザーの特長は、テレコム分野で育成された光技術を転用できる点により得られる。基本的には極めて低損失な光導波路である光ファイバーを利

用できることがベースとして存在し、更に、1990年代の後半から2000年頃まで続いたITバブルは膨大な資金を投入して高度な光通信技術を育て上げた。この中に、光ファイバーに関する技術も含まれており、ITバブル以前の研究開発のペースに対して数倍の速度で高度な光技術が育成された。その代表例を表3.2.2に示す。

テレコム光技術を用いることにより、ファイバーレーザーの出力を高めることが可能となる。励起LDの高出力化やファイバー型光部品の高性能化等を利用すれば、単一ファイバーの出力を多重化し、ビーム品質を低下させずに高出力化できる。ここでは、溶接や切断など、産業分野に多く利用されている Nd : YAG と同一の波長を得られる、 $1\mu\text{m}$ 帯 増幅媒質 である Yb ドープ 光ファイバー(YDF) の多重化を示している。

テレコム光技術を用いて高出力化を行う場合、波長合波と位相结合の二種類の手法を考えている。

例えば、波長多重技術を用いて波長の異なるレーザーを単一のファイバーから出力する構成を考えてみる。YDFの利得波長幅は1020~1080nmの約60nmであり、この波長域内に、光の周波数で100GHz間隔にレーザー発振波長を配置すると合計で163波長を発振できる。単一波長の出力を10Wと仮定すると、合計で1.63kWを得ることができる。

YDFは Nd : YAG と比較すると利得帯幅が広く、帯域域内において自由な波長でレーザー発振できる。同一波長で発振するレーザーを単一の光路(ファイバーや導波路、広くは空間光における光軸の概念も含む)に結合することは難しいが、波長が異なればこれを合波することが可能となる。テレコムで成熟した波長多重化技術を用いれば、光の周波数間隔で100GHz、すなわち0.37nm間隔で波長合波が可能である。

多重化のもう1つの方法として、位相结合があげられる。これは、図3.2.2に示す並列化された複数のレーザー発振系を同一の波長で合波する技術である。従来の空間光学系を利用したレーザーでは、光学系が不安定であるため光の位相を安定に保持することが難しいが、光ファイバーのような閉じられた光学系を利用すれば位相の保持が容易になる。

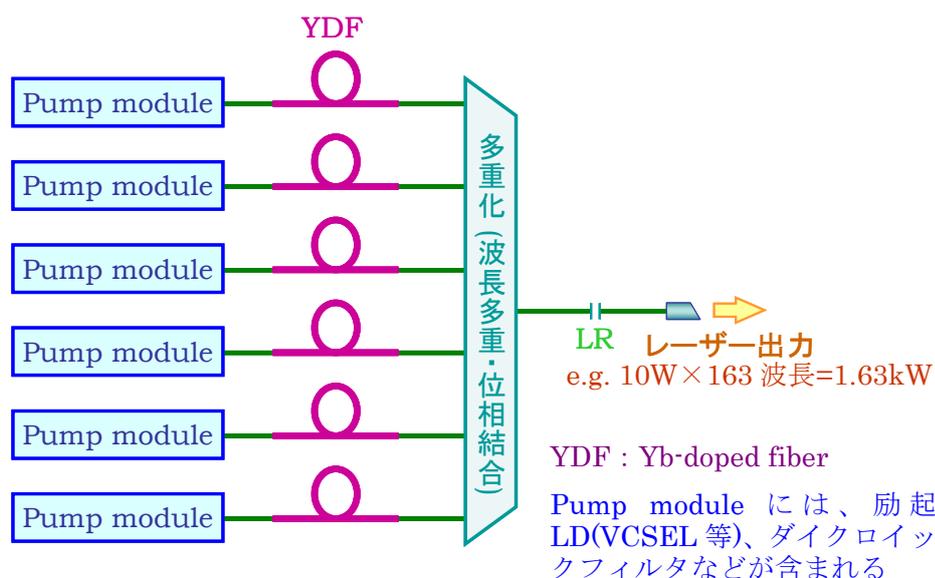


図3. 2. 2 テレコム分野で高度化した光技術を用いたファイバーレーザー出力多重化の概念図

位相结合を用いて多重化したレーザーを、更に波長多重すれば単一ファイバーからの出力は更に向上する。しかしながら、位相结合による多重化は 10 多重程度が限界であると言われている。これは、位相を一致させるためのマスター情報となるべき共通出力ポート(ファイバー)からの帰還光が多分岐されて単一のレーザー発振系に帰還することにより、それぞれの発振系へのマスター情報のパワーが低下し、各発振系が同一の位相で発振できなくなるためである。この問題点を打開するために、共通出力ポートに双方向増幅が可能な光増幅器を挿入することによりマスター情報を増幅すれば多重度を高められる。

ここまで、YDFを増幅媒質としたレーザーを例としてあげたが、同様の手法は、半導体レーザー(LD)出力の合波にも利用できる。電気を光に変換するキープデバイスとなる LD 出力光をファイバーレーザーなどの個体レーザーに変換せず、加工などに直接利用できれば効率面のメリットが大きい。LD 出力はビーム品質が低く、更に個体レーザーと比較すると輝度が低いなどの理由から用途は限定されるが、光を熱源として利用する分野における応用は幅広く存在する。LD にもテレコム光技術を活用し、波長の異なる素子を波長多重し、外部光をマスターとする方式を利用すれば、単一の空間あるいはファイバーから高い出力と輝度を得ることが可能になる。

テレコム光技術の利用は、単なる高出力化以外のメリットももたらす。光通信では 10~20 万時間の連続運転が可能となる信頼性を求められる。これは、クリーンルームなどの環境も重要であるがレーザー装置や光通信装置の組み立てには人手による作業が不可欠なため、現場管理のノウハウが不可欠である。高い信頼性を生み出してきた光通信用製造ラインを流用すれば、高出力化に対する耐力を得ることも比較的容易である。

複数のファイバーレーザー出力を単一のファイバー出力に多重化することにより、大きなメリットが生じる。単一導波路から高出力なレーザーを得ることが可能となるため、ビーム品質を低下させることなく高出力化が可能となる。すなわち、加工対象物上では高い輝度が得られるため、高速かつ高品質な加工が可能となり、従来の空間光によるレーザーとは異なる加工が可能となる。従来の機械加工ではできなかった加工が可能となれば、日本が得意とする機械加工分野に新たな展開をうみ、単にレーザーや光産業の育成に留まらず、広い波及効果を生むことにより日本の産業に貢献するものと考えている。

3. 2. 3 高機動性

増幅媒質並びに周辺光学系に光ファイバーを用いたファイバーレーザーは振動や埃及び温度変化などに対して高い耐力を持ち、更に高効率であるため消費電力が少なく、熱の管理(温度制御、除去など)が容易である。これらの特長を用いることにより機動性の高いレーザーを構築できる。

振動や埃並びに温度変化に対する耐力の高さは、屋外での使用やトラックなどによる輸送に耐えるレーザー装置となり得ることを示している。また、消費電力の低さはレーザーに付随する発電車両や現場における電源の調達において有利であり、更に発熱量の少なさはチラーなどの小型化にも貢献する。

これらの高機動性を備えたレーザーは、従来のレーザー装置では得られなかったフィールドでのレーザー活用への道が開ける。例えば、土木建築関連の用途への適用が可能となる。一例として、老朽化した橋梁の接合部分の溶接やカーボンファイバーの現地加工などに依る補強作業がレーザーにより可能となれば、社会インフラの長寿命化が低コストで可能になる。特に、車両重量の増加及び中国起因の酸性雨に侵された鉄並びにコンクリート構造物の寿命は、設計寿命よりも短くなる可能性が高い。2007年に米国ミネソタ州で発生した橋梁の崩落に類する事故を未然に防ぎ、インフラの長寿命化を図り、低コスト社会を実現するためにも高機動性レーザーは重要な役割を果たすものと考えている。

3. 2. 4 短波長レーザーの開発

電子材料として銅は必要不可欠な材料である。微細な電気配線においてレーザー溶接は有力な接合手法となることが予想できる。また、RoHS 指令に代表されるように、Pb フリーが求められるようになり、ますますレーザーによる銅の溶接並びに加工に対するニーズが高まっている。しかしながら、銅は $1\mu\text{m}$ 帯の光に対する反射が大きく、十分な加工性能を得ることができなかった。銅の吸収が高くなる波長である緑色の波長を発生し、かつ高効率で扱いやすいレーザーの実用化が望まれている。

従来、可視域の短波長レーザーの発生には、**Nd : YAG** の $1.06\mu\text{m}$ を基本波に、2倍あるいは3倍の高調波を発生させて緑や青のレーザーを得ていた。2倍高調波は $0.53\mu\text{m}$ の緑の波長を発生できる。無論、Ar イオンレーザーなどの気体レーザーを利用する方法もあるが、**固体レーザー**である **Nd : YAG** の高調波発生は大変利用しやすい短波長レーザーである。しかしながら、2倍高調波の発生には高調波発生用の結晶を利用しなければならず、耐久性並びに出力と変換効率の低さなどの点から産業現場への導入は進んでいないのが現状である。

光ファイバーに利用されるガラスはアモルファスであるため、多くの種類の元素をドーピングすることができる。現在商業的に利用されているドープ材料は、通信用光増幅器に不可欠な **Er** 並びに加工用高出力レーザー分野で **Nd** に取って代わろうとしている Yb である。それ以外にも、多くの希土類元素をドーピング可能である。

今後、ドープ材として興味深いのは、可視領域を直接発振できる希土類元素である。例えば、**Tm** は 455 、 480nm (紫、青)、Ho は 550nm (緑)、Ce は $550\sim 650\text{nm}$ (緑から赤)で発光することが予想あるいは確認できている。これらの元素をファイバーにドーピングすれば、高効率な短波長レーザーが可能になると考えられる。また、日本が得意とする紫外から青色で発振する GaN 系の短波長半導体レーザーを**励起**源に用いることにより、更に実用的な性能を向上できる。

3. 2. 5 面発光型半導体レーザー

面発光型半導体レーザー(VCSEL)の高出力化が進んでいる。従来の端面発光(エッジエミッター)型半導体レーザーと比較して、冷却に対する要求が少なく、波長安定度が高いなどの特長があるため、今後レーザー**励起**用光源として性能向上が進められると考えている。ここでは、これらの特徴を能くまとめた、文献 Jean-Francois Seurin, L. Arthur D' Asaro and Chuni Ghosh, "A New Application for VCSELs, High-Power Pump Lasers", Photonics Spectra (July 2007), pp66-71 の翻訳を掲載する。

VCSEL の新しい用途 高出力**励起**用レーザー

「垂直キャビティ面発光レーザーにおける最近の進展が産業、医薬及び防衛の為の今までにない高出力・高信頼性レーザーをもたらす。」

Jean-Francois Seurin, L. Arthur D' Asaro and Chuni Ghosh, Princeton Optronics Inc.

小型かつ頑丈で高出力の半導体レーザーが様々な用途において必要とされている。第一には**固体レーザー**及び**ファイバーレーザー**の**励起**用である。現在、エッジエミッター型半導体レーザーは**励起**用レーザーの市場を独占している。しかし、エッジエミッター型半導体レーザーには、一般的に、アレイの低

信頼性のみならずそれ自体の質の悪いビームプロファイル及びスペクトル特性等といった幾つかの欠点がある。加えて、高出力にするためには、エッジエミティングバーを積層する(スタック化)ための複雑かつ高コストの組み立てが要求される。

垂直キャビティ面発光型レーザ(VCSEL)は、出力を増大するための2次元アレイに簡単に作製できるので、(数百 W の)高出力半導体レーザー源として魅力的な代替手段である¹⁾。しかし、我々が知る限り、最新の市販システムは励起源に VCSEL を使っていない。

我々は、最近、パワー密度が 1 kW/cm^2 以上に相当する連続出力 230 W 以上を実証するために比較的小さな VCSEL の 2 次元アレイ(アレイ面積が約 0.22 cm^2)を使用した。更に、擬似 CW の小さなアレイ(アレイ面積が約 0.028 cm^2)からパワー密度 3.5 kW/cm^2 以上に相当する 100 W の実証も行っている。これらの CW 及び擬似 CW のパワー密度レベルはエッジエミッター型半導体レーザーのパワー密度レベルに相当する。

皮肉なことに、VCSEL は(サブミリ W の)低パワー用途として考えられている。VCSEL は 1980 年代半ばに発明され、ファイバーチャンネル、イーサネット及びイントラシステムリンクのような短距離テレコム用途のための優れた技術としての評価を直ちに得ることになった。市販されてからの最初の 2 年間(およそ 1996 年頃)、それはローカルエリアネットワークの候補技術となり、効率的にエッジエミッター型半導体レーザーと置き換えられた。この成功は、第一に、VCSEL がエッジエミッター型半導体レーザーと比べてより安い製造コストで、かつより高い信頼性を有している結果であった²⁾。

簡単な平面加工

VCSEL がどのように動作し、エッジエミッター型半導体レーザーを超える主要な利点は何なのかを理解するためには、両者の製造工程を把握することが重要である(Figure 2)。半導体レーザーは基板上面で成長させた半導体物質の層(“エピタキシャル”構造)で構成される。VCSEL 及びエッジエミッター型半導体レーザーでは、通常、この成長は分子線エピタキシーあるいは有機金属気相成長法で行われる。構造形成されたウェハは独立のデバイスを作るために加工される。

VCSEL では、高反射率と低反射率の半導体層が交互に積層され $1/4$ 波長幅となった 2 つの高反射ミラー(実際には分布ブラッグ反射器)の間に活性層が挟まれている。これらのミラーの反射率は一般的に

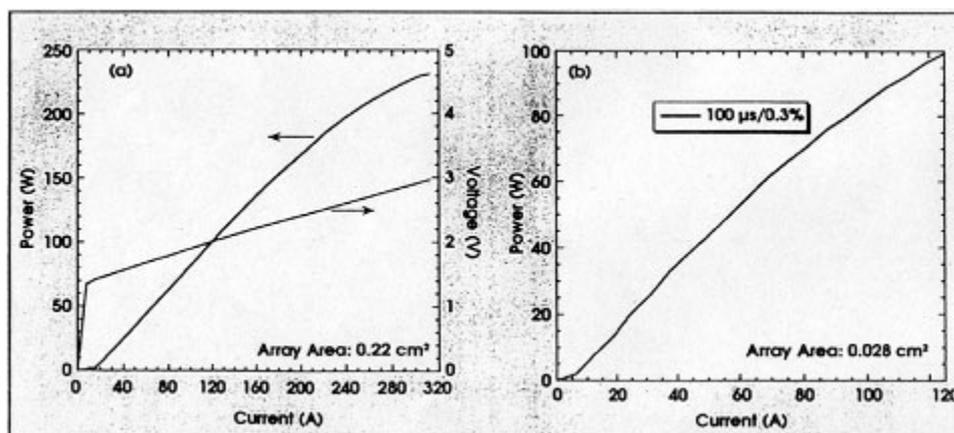


Figure 1. (a)のプロットは、高出力2次元VCSELアレイの室温における出力(赤)および電圧(青)を示している。最高出力は231 Wである。(B)のプロットは、パルス幅が100 μs で0.3 %の負荷時間率の条件で室温における注入電流に対する擬似CWの出力を示している。アレイは最大出力100 W、および最大エネルギー密度 3.5 kW/cm^2 まで到達する。

99.5 から約 99.9%の範囲である。結果として、光は2つの高反射ミラーに対して垂直に振動し、デバイスの上端(あるいは下端)を貫いて放射される。

電流及び光の閉じ込めは、(特定の用途に関しては次に挙げる両方の方法を介すが、)アルミニウムリッチ層の選択的酸化か、イオン注入のどちらかを介して得られる(Figure 3)。VCSEL は、例えば、ジャンクション・ダウン実装の場合においては、より効率的なヒートシンクに必要とされるエピタキシャルと空気の界面の上側放射または透明基板を通り抜ける下側放射に合わせて設計されている。

VCSEL はウエハ形状のまま成長が行われ、加工され、検査されるので、複数のデバイスを並列して処理できる能力があり重要な規模の節約ができ、それによって、装置稼働率及び歩留まりが最大化され、設定時間及び加工費が最小化される。事実、VCSEL の工程は定評のある低コストシリコン集積回路平面加工と同等である。

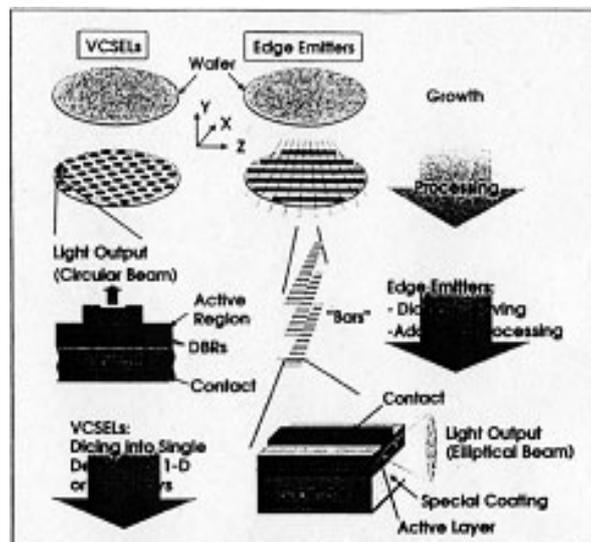


Figure 2. VCSELおよびエッジエミッター型半導体レーザーの製造工程が上から下へ示されている。エピタキシャル金属は初め(通常直径が3または4インチの)GaAs基板上で成長する。ウェットおよびドライエッチングのみならず標準のフォトリソグラフィ、メタライゼーション、および表面安定化を用いてウエハーがシングルデバイスに加工される。加えて、電氣的閉じ込めのためにVCSELでは選択的酸化またはイオン注入が行われる。この時点で、VCSELデバイスは完成し、ウエハーレベルで検査される(光がウエハーに対して垂直に放射される)。一方で、エッジエミッターはさいの目に切られバーとなり、検査を受ける前に傷つき易い面のコーティングが行われる。ウエハーレベルの後、良品デバイスとして選ばれたVCSELはシングルデバイスあるいは2次元アレイに劈開される。

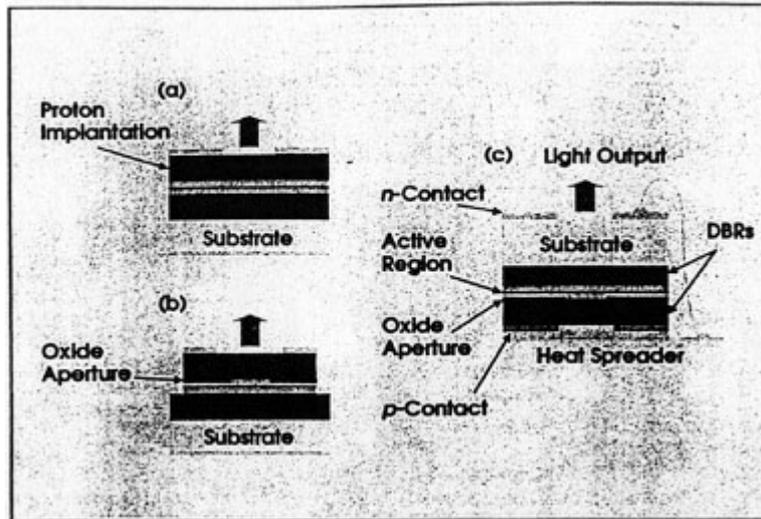


Figure 3. 共通した3つの種類のVCSEL構造は、電流閉じ込めのためのプロトンインプラネーションを有するトップ・エミッティング構造(a)、光学モードおよび電流を閉じ込めるために選択的に酸化されたトップ・エミッティング構造(b)、ならびに選択的に酸化されたボトム・エミッティング構造(c)。

VCSEL の場合、エピタキシャル成長の間、ミラー及び活性層が Y(言い換えれば、水平)軸に沿って連続的に積層される。ウエハは電氣的接続を形成するためにエッチング及びメタライゼーション工程を行う。この時点で、ウエハ上の個々のレーザー素子が検査され、良品・不良品が判断される。最終的に、ウエハはさいの目状に切られ、良品のレーザーは次の組立工程へ移る(歩留まりはたいてい 95%よりも高い)。ウエハがさいの目状に切られ、単一のレーザーデバイスまたは効率的に並列接続された単一レーザー素子のアレイになる。アレイは直線(1次元)、長方形あるいは正方形(2次元)である。

更に、VCSEL アレイの個々の要素の位置がフォトリソグラフィによって決められるので、マイクロレベルの配置精度でその要素の配置を設計することができる。用途によって、VCSEL の 2次元アレイは数百から数千のシングルデバイスを含んでいる。Figure 4 にマイクロクーラー上に組み立てられた完全パッケージ高出力 VCSEL アレイを示す。

エッジエミッター型半導体レーザー製造

エッジエミッター型半導体レーザーは、Z(言い換えれば水平)軸に沿ってミラーコーティングされるので、単に活性層を生み出すだけになるが、成長過程も Y 軸に沿って起こる。エピタキシャル成長後、ウ

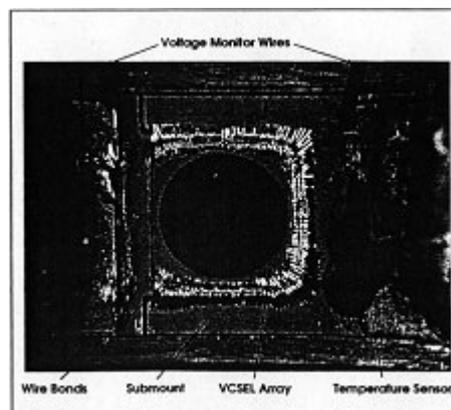


Figure 4. 高出力時において高出力2次元VCSELアレイが効率的に熱を逃がすためのマイクロクーラー上に設置されている。アレイチップは約 5×5 mm である。

エハはメタライゼーション工程を経て X 軸に沿って劈開され、積層されかつコーティング材へ埋め込まれた一連のウエハストリップを形成する。ウエハストリップの Z 軸方向の端はデバイスとしての鏡を形成するためにコーティングされる。

光の放射面では、通常、5%未満の反射率となるように設計されている。コーティングの不完全さは、いわゆるカタストロフィックオプティカルダメージ(回復不能な光学的損傷)を引き起こし、デバイスに早期で壊滅的な不具合をもたらすので、コーティングはエッジエミッター型半導体レーザーにとって決定的に重要な意味を持つ加工工程である。このダメージのモードは主に信頼性を決め、エッジエミッター型半導体レーザーに問題をもたらす。

このコーティング工程後、ウエハストリップは、キャリア上で実装される個々のレーザーチップあるいは(直線状のアレイ)バーを形成するためにさいの目に切られる。最後に、レーザーデバイスは検査される。明らかに、エッジエミッター型半導体レーザーは 2 次元モノシリクアレイに加工できない。パワーのスケーリングは多大な時間と、バーのスタックへの費用のかかる組み立てが必要である。

非常に高い信頼性

信頼性に関して言うと、VCSEL はカタストロフィックオプティカルダメージの影響を受けないのでエッジエミッター型半導体レーザーより原理的に優っている。エッジエミッター型半導体レーザーの場合、放射面は小さいので p-n 接合が放射面と交差する出力面において高いパワー密度をもたらす。もし、(例えば、誘電体コーティングを使用することによって)この面を正確に不動態化するために注意が払われないならば、極めて局所的な温度上昇のせいでその範囲ではゲイン媒質の品質が急速に低下し、カタストロフィックオプティカルダメージが発生する。このダメージのメカニズムは接合部温度だけでなくコーティングの質にも非常に影響される。一方、VCSEL は、利得領域がエピタキシャル構造内に埋め込まれ、放射面と交わらないのと、パワー密度がエッジエミッター型半導体レーザーよりも非常に小さいので表面状態に影響されにくい。

長年にわたる VCSEL の信頼性に関する幾つかの研究において、(10 億のデバイス時間における故障の数である)故障率は約 10 もしくはそれ以下となっている³⁾が、最上位テレコム用途のエッジエミッター型半導体レーザーにおいては約 500 である⁴⁾。産業用途の高出力エッジエミッター型半導体レーザーバーまたはスタックの故障率は、ほとんどの場合、もっと悪い。この信頼性における利点は、耐用年数を経た現場の故障が圧倒的に励起用レーザーの故障により生じているレーザーシステムにとって重要である。

活性化エネルギー(E_A)は特有の技術と関係している故障の温度依存性を記述するためにたいいてい使われる。このパラメーターは接合部温度と反比例する関数としての故障までの平均時間のプロットを通して導き出される。エッジエミッター型半導体レーザーの場合において、カタストロフィックオプティカルダメージが放出面の温度に敏感であるので、活性化エネルギーは一般的に約 0.45 eV である。しかし、VCSEL はカタストロフィックオプティカルダメージの影響を受けにくいので、活性化エネルギーはエッジエミッター型半導体レーザーのほぼ 2 倍(約 0.7 eV)である。そのため、VCSEL がより高い温度で確実に動作できる⁵⁾。冷却の必要性があまり重要でなくなるのでこの利点が大きな意義であり、その結果、全体にわたってより高い能力を有するより小型のレーザーシステムを構成できる。

スペクトル及びビーム品質

固有スペクトル及びビームの特性によって低出力 VCSEL は短距離テレコム市場をすっかり独占した。

結局のところ、これらの特性は高出力用途においても同様に利点となる。

VCSEL のレーザー共振器の特性は 2 つの分布ブラッグ反射器の間に挟まれた波長程度の厚さを持つ共振器によって決定されるので、デバイスはシングル縦モードで放射し、その放射波長は、エッジエミッター型半導体レーザーが必要とする付加的な波長安定化の仕組みあるいは外部の光学素子を必要とせずに、(エッジエミッター型半導体レーザーの約 0.3 nm/K と比べて約 0.065 nm/K と)本質的に安定している。更に、成長及びパッケージング技術における利点により放射波長は広い VCSEL の 2 次元アレイ内で均一であり、その結果、エッジエミッター型半導体レーザーのスペクトル幅(3 nm から約 5 nm)よりもずっと低い約 0.8 nm のスペクトル幅(Figure 5a)を実現している。この波長安定化及び限られたスペクトルの幅は、ゲイン媒質が狭い吸収帯域しか持たない多くの**励起**用途において効果的である。

エッジエミッター型半導体レーザーとは違って、VCSEL は付加的なオプティクスを必要とせずに低発散角を有する環状対称のビームを放射する。この低発散角は、高効率を保ったまま直接的にファイバーと結合(バットカップリング)できるので、テレコム及びデータコムのマーケットにおける低出力 VCSEL の非常に素晴らしい利点である。

Figure 5b から分かることは、高出力 VCSEL アレイは回状、低発散角、擬似トップハット**ビームプロファイル**で放射するので、これらのデバイスを**固体レーザー**の端面**励起**にとって理想的なかたちで作製することができる。

加えて、出力カプラである分布ブラッグ反射器の反射率は、(概して 5%に満たない)エッジエミッター型半導体レーザーの反射率と比較すると、VCSEL の方が(概して 99.5%を超える程に)高い。この設計が VCSEL を光学的フィードバックに対して非常に反応しにくくしているので、多くの用途において高価な**アイソレータ**やフィルターを不要としている。

将来の展望

VCSEL は、コスト面で言えば、重要であり特有利点のお陰で、信頼性及びパフォーマンスが小型かつ高効率で高出力の半導体レーザー光源のための次世代テクノロジーの候補となることができるだろう。

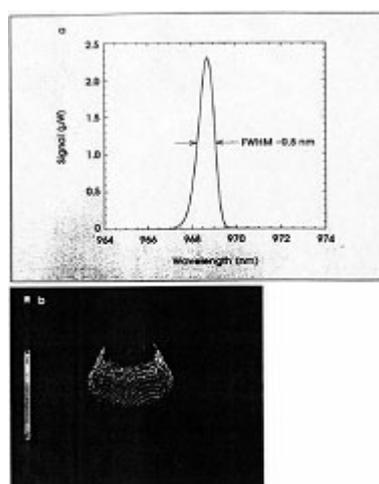


Figure 5. 100 W、CW2次元VCSELアレイのスペクトルは0.8 nmの半値幅を有する(a)。このビームは遠視野プロファイルにおいて17° の全発散角およびフラットトップを有する円である。

しかし、VCSEL が高出力市場の重要な市場占有率を得る前に、幾つかの技術革新への挑戦が行われ

ている状態である。まず初めに、シングル VCSEL デバイスの信頼性は十分に確立されているが、比較的若い技術であるので大型・高出力アレイの長期的なデータは不足している。第二に、近年、供給される電力から光出力への総合効率は著しく改善されているが、(既製品で約 55%)エッジエミッター型半導体レーザーに対して多少の遅れがある。VCSEL は高温下で確実に動作できるので、冷却の必要がなくなるのが予想され、システム全体の効率は高めることができるだろう。

最後に、エッジエミッター型半導体レーザーまたはスタックは高い(出力をビームの面積と発散角の積で割った値として定義されている)輝度を得るために複雑なオプティクスを必要とするが、この輝度に関して言えば、エッジエミッター型半導体レーザーは VCSEL よりも一歩進んでいる。それは主に、シングルエッジエミッター型半導体レーザーデバイスは VCSEL と比較して(約 $2 \times 100 \mu\text{m}$ の放射範囲から数 W と)高いパワー密度を得ることができるためである。

近い将来、我々は CW のパワー密度を 2 kW/cm^2 まで、擬似 CW のパワー密度を 6 kW/cm^2 まで高めるよう計画している。

謝辞

我々は Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA: 米国防高等研究所計画局)の超高効率ダイオード源計画(SHEDS)の支援に対して感謝している。

参考文献

- 1) L. A. D' Asaro et al (February 2005). High-power, High-efficiency VCSELs pursue the goal. *Photonics Spectra*, pp. 62-66.
- 2) K. S. Giboney et al (February 1998), The ideal light source for datanets, *IEEE Spectrum*, Vol. 35, pp. 43-53
- 3) J. A. Tatum et al (May 2000). Commercialization of Honeywell's VCSEL technology, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 3946, pp. 2-13.
- 4) H. -U. Pfeiffer et al (March 2002). Reliability of 980-nm pump lasers for submarine, long-haul terrestrial, and low cost metro applications, Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2002, pp. 483-184.
- 5) A. Morgan et al (May 1995). 200 °C, 96-nm wavelength range, continuous-wave lasing from unbonded GaAs MOVPE-grown vertical cavity surface-emitting lasers, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 7, pp. 441-443.

3. 3 三位一体の産業化デザイン

3. 3. 1 産業用レーザーに必要な要素

①ファイバー導光レーザーとファイバーレーザー

ここ数年の間に、ものづくり技術分野で、ファイバーレーザーが急速に普及した。つまり、「よく売れた」ということである。これは、ファイバーレーザーが他の固体レーザーに比べ、高い商品力を有していることを示す。ファイバーレーザーの商品力が高い要因は、大出力化と高集光性を同時に満たした点にある。図 3.3.1.1 にファイバー導光レーザーとファイバーレーザーの概略図を示す。ロッド型 YAGレーザー 発振器は、レーザー媒質である YAG の形状がロッド（円柱）になっている。YAG ロッドは、ランプあるいは半導体レーザーによって 励起 される。実験室では、YAG から出力されるレーザー光をミラー等でワーク前まで導きレンズにより集光照射する。産業界では、導光の容易さとロボットアーム等への装備が容易になることからファイバー導光が主流である。ディスク型 YAGレーザー についても同様である。ロッド型 YAGレーザー 及びディスク型 YAGレーザー の場合、レンズで集光しファイバーのコア内にレーザー光を注入しなければならない。この際、エネルギーの損失が発生する。損失を抑えるためにはコア径を大きくしなければならない。コア径の大きなファイバーは、ファイバーを引き回す際のフレキシビリティが小さく、ファイバー出力されたレーザー光をワーク表面で十分なエネルギー密度にするためには、縮小光学系を組まなければならない。10 数センチメートルの直径を有するレンズにより縮小光学系を組む場合でもワークとレンズマウントとの距離（作動距離：ワーキングディスタンス）が小さくなり、加工プロセスに対するフレキシビリティも小さくなる。ファイバーレーザー は、レーザー光が最初からレーザー媒質であるファイバーコア内に在り、クラッド層に半導体レーザーの光が導かれ、その光によってファイバーコアが 励起 されファイバーコア内に在るレーザー光は増幅される。レーザー媒質であるファイバーコアの材質で決まる損傷閾値を越えるまで増幅することができる。実際の製品では、マルチモード、CW、ファイバーコア径 100 μm で出力 10 kW を得ている。初

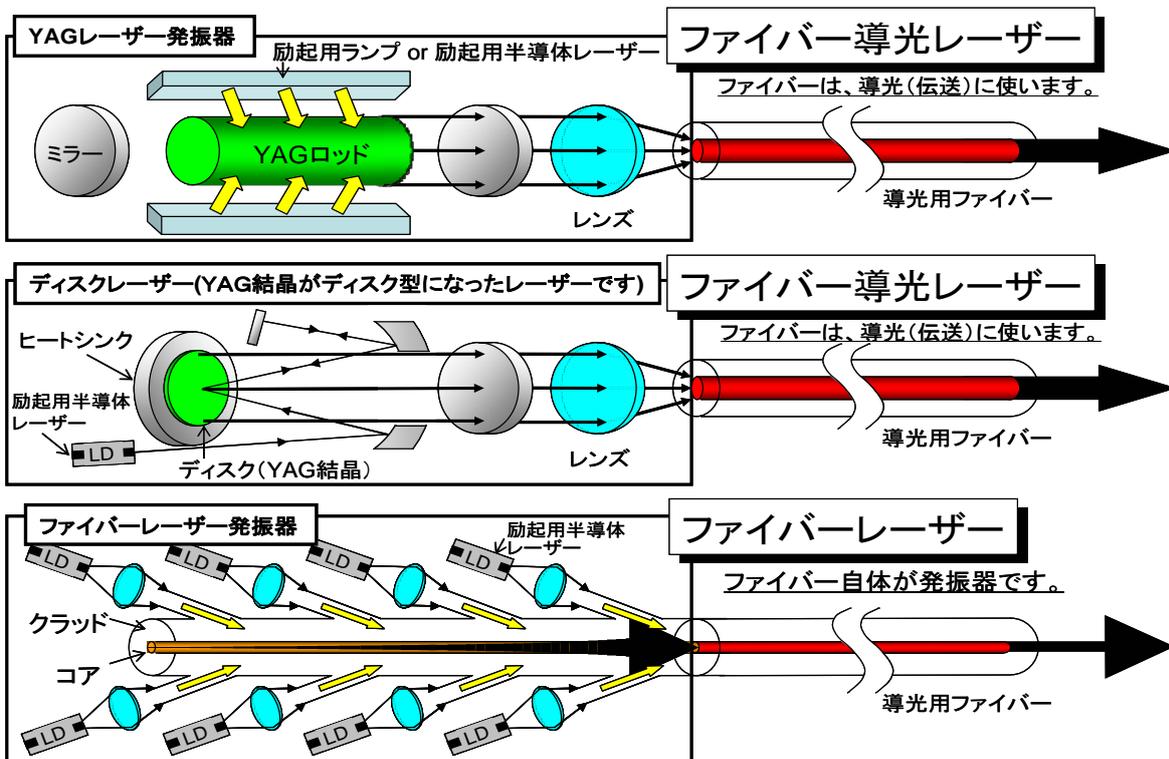


図 3. 3. 1. 1 ファイバー導光レーザーとファイバーレーザー

めからレーザー光は、ファイバーコア内にあるので、損傷及び非線形現象の閾値になるまで、コア径を小さくすることができる。コア径が小さいので、ファイバーから出力される際も拡大光学系を使用することができ、ワーキングディスタンスを大きくとることができ、リモート溶接などの新しい加工領域も生まれる。

②産業用レーザーに必要な3要素 – フェアレーザー –

前述したようにファイバーレーザーの商品力が高い要因は、大出力化と高集光性を同時に満たした点にある。しかしこれだけではない。産業用レーザーに必要な要素(項目)を有していることも大きく寄与している。産業用レーザーに求められる3要素は、フレンドリー(Friendly)、エコロジーコンシャス(Ecology-conscious)、アフォーダブル(Affordable)である。3要素を満たすレーザーをFEA(フェア)レーザーと呼ぶことにする。図3.3.1.2に示す。日本の学术界ではあまり議論されない評価項目である。フレンドリーは、ユーザーフレンドリーのことで、高操作性、高安定性、コンパクト、ロバスト性(強靱性)、高機動性、そしてメンテナンスフリーである。エコロジーコンシャスは、省エネルギーつまり電気から光への変換が高効率であること。更に高集光性であること。必要なところに必要なエネルギーを投入できる。余分なエネルギーが不要となるとともに飛散物や熱影響部を最小化することができる。コストの低減とともに環境にもやさしい。アフォーダブルは、手ごろな価格という意味である。チープ(cheap)なレーザーという意味ではない。ニーズ適合性を重視し、製造コストを最小化したレーザーのことである。産業界において、レーザーの価格は「高額」である。レーザーによって、新たな加工領域を開拓できる可能性が高いのはわかるが、高額なので挑戦ができないという声をよく聞く。つまりアフォーダブルでないためにチャンスを逃しているのである。図3.3.1.2に示したようにファイバーレーザーは、フレンドリーとエコロジーコンシャスにおいて高い位置にある。

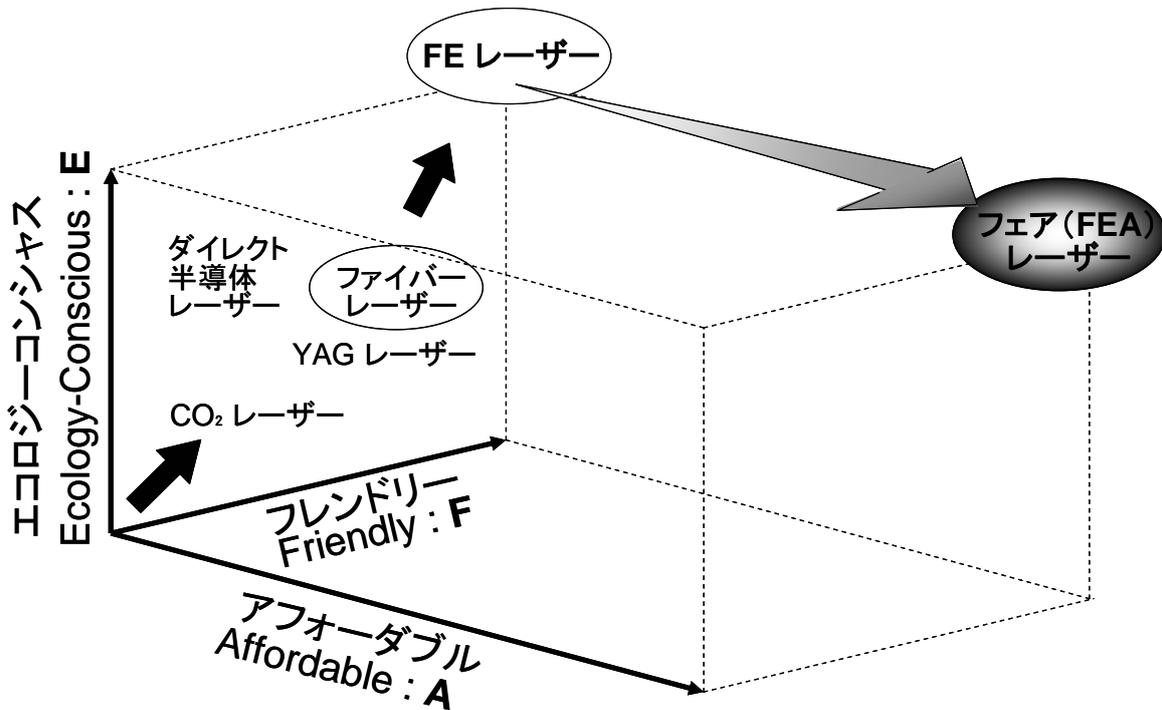


図3.3.1.2 産業用レーザーに必要な3要素 – フェアレーザー –

③新材料、新プロセス及び新システム

高張力鋼（High Tensile Steel：ハイテン）は、薄肉化しても高強度である。軽量化できるために自動車の車体、主要構成部材などに用いられている。ハイテンの溶接にはレーザーが有効である。複合材料の1つであるカーボンコンポジット材の切断には従来の機械的な切断手法では難しくレーザーによる切断が有効である。このように新材料が開発されるとその材料を加工するためにレーザーを用いた新プロセスが必要となる。新プロセスにはレーザーの高出力化が要求される場合があり、この場合、ロボット等と組み合わせた使用が必要となり、ユーザーによる遠隔操作を可能とするユーザーインターフェースを備えた新システム開発が必要である。

3. 3. 2 製造現場に適応したレーザー装置並びに加工機の開発

2.4.2 項でも掲げたように次世代レーザー加工におけるベンダーへのニーズとしては、高輝度光源の実現・短波長光源の実現と考えられる。高輝度光源の実現に対しては、先述したように現在独走状態を続けている海外メカに対抗するためには、ユニークなファイバーレーザー構成と国内の光産業全体の底上げが必要である。

フォトンプロジェクトで開発したファイバーディスク構造は日本独自の発想であり現在 500W のものがラインナップされている。また端面励起のファイバーレーザーは現在 300W のものが製品化されている。しかし残念ながら IPG 社と比べると、ビーム品質がかなり劣っており、ファイバーレーザーの特長を完全に活かしきれてはいない。まずはこれらの製品のビーム品質と出力を向上させていく方法を模索していくことが重要であると考えられる。そのための方策についてもワーキンググループ内で議論され、数 kW、横シングルモードをえるための設計図が描かれつつある。横シングルモード化することにより、加工ヘッドの小型化、それに伴うロボットの小型化など、加工システム全体に与える影響は大きい。

ファイバーレーザーの短波長化については、ワーキンググループの議論の中でも要望が大きかった。現状では研究レベルで、パルス駆動した高輝度ファイバーレーザーと波長変換結晶を用いて、波長 0.5 ~ 0.6 μm の光を得ることが盛んに行われているものの、信頼性、ロバスト性について確立していない。将来的には kW 級の短波長（波長 0.6 μm 以下）ファイバーレーザーができるのが一番好ましいが、それには非常に大きなブレークスルーが必要であり、現時点ではかなり困難の状況である。その方策については更なる議論・研究が必要と思われる。

またワーキンググループでは、加工制御技術の充実についても議論された。現在でもいくつかの研究機関で、加工点で発生するプラズマや、可視光をモニタして、光源にフィードバックをかけて、最適な加工になるように「適応制御」する研究はなされているが、製造現場に導入できるレベルには至っていない。現時点ではオペレータの経験と勘に基づいて半自動的な制御を行っているのが実情である。

しかし将来の日本の製造現場を想像するにあたり、「優秀なオペレータを低コストで確保できるかどうか？」は甚だ疑問であり、製造現場における日本の国際競争力を維持し続けるためにも、少量多品種に迅速に対応できるレーザー加工制御システムの構築が必要であると考えられる。

最近のソフトウェアの進歩には目を見張るところがある。加工点光量などのモニタ値を見て光源にフィードバックする単純なシステムではなく、現在のオペレータが経験に基づき勘を働かせて逐次制御しているようなことを、人工知能に置き換えることができないかどうか、検討し始める時期に来ているのかもしれない。失敗を学んで、次の加工に活かせることができる「職人的」な適応制御システムが望まれる。現在、政府が主導するイノベーション 25の中にも、ロボット技術の技術戦略が盛り込まれており、NEDOでは戦略マップ作りが行われている。ロボット並びに人工知能技術と、レーザー加工技術の

融合を考える時期に来ているように思える。

3. 3. 3 レーザーメーカーとユーザーの連携によるレーザー加工機のデザイン

レーザーを産業適用していくためにはレーザー開発だけではなく、システム開発をあわせて行う必要がある。また産業適用にフィットさせた仕様を効率よく生み出すためには、ユーザーとの連携も忘れてはならない。

産業界では年々競争が激化しており、いかに短い期間で開発を完了させるかが企業の大きな関心事の一つになっている。

先ず、システム開発の重要性について述べる。レーザアプリケーションを考えた場合、レーザー発振器はシステムの中の一要素にすぎない。レーザー発振器だけがあっても特定のユーザーを除いた大多数のユーザーはそれを使いこなせない。技術的に対応可能な特定のユーザーですら、開発から設備の立上げまでの全てをユーザー企業内で行うとなると多大な時間がかかり、三位一体の産業化デザインを確立している欧州他社に遅れをとる結果となる。大多数のユーザーにはレーザー発振器を使いこなすために必要な周辺機器をシステムトータルで提供し、かつ使い方、例えば品質管理のために何をどのように制御しなければならないか、どのようなメンテナンスが必要か、もあわせて提供する必要がある。レーザー産業が発達していない現状ではそこまでサポートしなければ底辺は広がらない。発振器だけ性能が上がりコストが下がっても不十分である。

そうはいつても、メーカーの中で最も重要なものはやはり発振器メーカーである。発振器はレーザー関連シーズ技術の核となるものであり、周辺機器は基本的にはレーザー発振器とセットで扱われる。周辺機器はレーザー発振器の性能に見合った仕様のもを発振器開発とタイミングをあわせて開発する必要があるし、信号のやり取り等については発振器メーカー、周辺機器メーカーが互いに歩み寄り開発を行う必要がある。システムサプライヤもレーザー、加工ヘッド、ロボットといったそれぞれのハードウェアのインターフェースを構築していかなければならないが、発振器開発のタイミングにあわせて開発を進める必要がある。

発振器メーカーが身近に存在することで、初めて周辺機器メーカーやシステムサプライヤなどはタイムリーな設備開発ができる。

次にユーザーとの連携について述べる。ユーザーはできうる限り、情報開示をする必要がある。具体的なアプリケーションについての情報開示は困難であるが、設備に対する現状ニーズ及び将来ニーズ、取得したい基本的なデータについては積極的に開示しメーカーや研究機関と情報を共有化しておきたい。ユーザーが開示した情報をもとにメーカー（発振器、周辺機器、システム）はあるべき設備の仕様実現に向け、開発を進める一方で、研究機関も積極的にユーザーが狙っているアプリケーションのプロセスについて基礎データ取得及びメカニズム解明を進めてもらいたい。

溶接部の品質保証ロジックの一般解化をすすめるためのメカニズム解明であるとか、そのメカニズム解明を踏まえた対策案の立案については全てのユーザー共通の課題であり、研究機関等の中立機関がこれらの研究開発を実施することで、ユーザーが個別に同じようなデータを重複取得する無駄を省くことができる。

グローバルで競争力を確保できる成果を生み出すためには、このような高効率な三位一体の開発のしくみを、メーカー、ユーザー、研究機関がそれぞれの役割をしっかりとこなすことにより確立することが必要であると考えられる。

3. 3. 4 高機動性、ロバスト性、高効率、ニーズ適合性（アフォーダブル）

1960年のレーザーの発明以来、様々な応用が提案され、また実用化されてきた。しかし、その広がりには当初描いていたところまで至っていない。実用化する上で、レーザー自身の問題点や課題、また限界が明らかになった部分もあるだろう。その一方で、応用のツールとして成熟していないのも事実である。本節では、機動性、ロバスト性、効率、アフォーダブルの4つの視点から、レーザーをより広く産業応用に用いるための性能についてまとめる。

① 高機動性

レーザー装置は、レーザー材料、ミラーをはじめとする光学素子、励起源とその電源、冷却器と、多くの部品から構成されている。1本のレーザー光線を使用するだけでも、これらの機器、部品を組み合わせなければならない。当然、レーザーエネルギーの増大に伴い、個々の機器、部品も大型になり、一度設置すると移動は困難である。移動により、光学系に大幅な調整が必要となる。つまり、自由にレーザー光線を取り扱うことは困難である。そのため、使用頻度に関係なく、必要なところに1台のレーザー装置が設置されなければならない。工場のラインにおいては、対象物が移動してくれるため、レーザー装置を移動させる必要がなく、レーザー装置の導入も行われている。しかしながら、加工対象物を移動することができない場合も大きい。

図 3.3.4 に示すのは、建造物表面の汚れをレーザー光により除去する作業の様子である。写真中央に作業者がゴンドラに乗りクリーニングを行っている。レーザー光はゴンドラの右下にある白いトレーラーの中から光ファイバー（40m）で伝送されている。このトレーラーの中には、レーザー装置、電源、冷却器が収まっている。高所や複雑な作業対象におけるレーザーの利用は、更に困難であることが容易に伺える。つまり、次世代レーザーにおいては、コンパクトであり、高い機動性、可搬性が要求される。

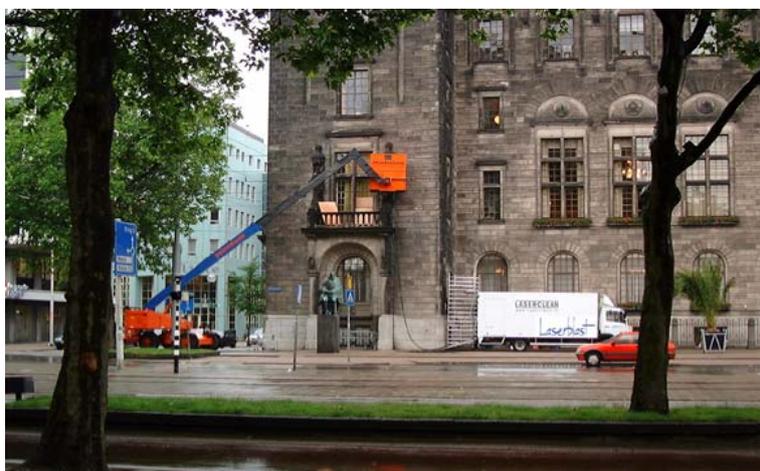


図 3. 3. 4 レーザークリーニングの様子（Laserbrast 社）

② 高ロバスト性

レーザー発振器は、高い精度で調整された2枚の鏡（共振器）の中にレーザー光を閉じ込めることから始まる。そのため、振動や熱などの外因により、共振器が機械的にずれることによってその特性は容易に変化する。通常、レーザー装置は、外からの振動から隔離するために除振台や防振台の上に設置され、雰囲気は温度制御されていることが望まれる。しかしながら、前述の高い機動性を得るためには、どのような劣悪な環境でも、また衝撃が加わった場合でも、レーザーの性能が維持される高いロバスト

性が必要である。

③ 高効率

高い機動性のためにはコンパクトさが不可欠であり、コンパクト化には高効率であることが必要である。半導体レーザーが高効率であることは知られている（電気—光変換効率 50%）。そのため、レーザーポインターや、ポータブル CD プレーヤーなど（充）電池で動作が可能である。しかし、半導体レーザーにおいても出力の増加、安定性向上に従い冷却器が必要になってくる。また、効率を考える上ではエネルギーの変換効率だけでなく、利用効率も考慮しなければならない。高いエネルギー変換効率であっても、集光性能が低く加工対象物への注入エネルギー効率が低ければ、トータルとして大きなエネルギーが必要である。そのため、次世代レーザーにおいては、エネルギー変換効率だけでなく、冷却効率、利用効率も含めた総合効率の高いことが望まれる。

④ アフォーダブル

上の3点はレーザー装置の技術的な課題である。しかし、レーザーの利用率（導入率）を妨げる最大の要因は、レーザー装置のコストにある。極端な例として、同じ性能のレーザー装置のコストが1/10であれば、レーザー装置は異なった場所に10台設置することが可能であり、機動性への要求も下がることになる。レーザー装置のコストが高い理由には、光学素子、電源、冷却器、構成する個々の機器への要求性能が高いこと、レーザー装置の調整に特殊な技術を有することが上げられる。そのため、用途に合わせた必要最小限の性能を持たせ、装置を普及することも必要である。もう一方で、装置の維持、稼働コストも大きな課題である。高い機動性を持たせることにより装置稼働率を向上するとともに、光学素子をはじめとする消耗品の寿命を延ばすことも必要である。これら初期投資費用、維持費用ともに手頃な価格（アフォーダブル）になることが望まれる。

3. 3. 5 伝送・集光照射光学系

次世代レーザー加工技術において、光ファイバーによる伝送は不可欠要素である。光ファイバーによる伝送は、従来の多段式ミラーを用いた伝送に比べて、自由度が高く、安全性に優れ、かつ高い伝送効率を持つ。また、レーザー自身がファイバ化されることにより、光結合が容易になるなどの利点も持つ。しかしながら、加工用のレーザー光への要求は、高い伝送効率とともに、高出力エネルギーの伝送が可能であることも重要な要素である。光ファイバーによる高出力伝送を制限する要素には、レーザー光によるファイバの損傷と、非線形効果による伝送効率、ビーム品質の低下などがある。本節では、各々の現状と課題、そして加工用途としての集光光学系の課題についてまとめる。

①ファイバーのレーザー損傷

レーザー光による光ファイバーの損傷は、入出射端面における損傷と、内部における損傷に分けられる。光ファイバーの基本材料となる石英ガラスのレーザー耐性は、約 $3\text{GW}/\text{cm}^2$ と見積もられている。しかしながら、現実には、内部欠陥や不純物、添加元素の影響でそれよりも下回る。また、端面においては、表面加工、研磨、コーティングの影響を受け、更に低いエネルギーにおいても損傷を引き起こす。

一般には、CW光よりもパルス光に対する耐光性の方が低い。CW光では、 10kW を超えるファイバレーザー市販されているが、パルスでは、数 10mJ を超えない。図 3.3.5.1 に典型的なファイバ端面の損傷を示す。波長 1064nm 、パルス幅 10ns のレーザー光に対して、約 $30\text{J}/\text{cm}^2$ のエネルギー密度にお

いて、損傷を引き起こしている。このエネルギー密度は、レーザー装置に使用される石英ガラス窓の表面損傷閾値の 1/3 以下であり、ファイバ端面の加工技術が重要な課題であることがわかる。

損傷閾値が単位面積あたりのエネルギーで定義できることから、コア径を大きくすることにより、入射可能エネルギーを増加できる。しかしながら、コア径の増大は、ファイバのマルチモード化を意味し、伝送効率の低下、空間自由度の低下、ビーム品質の低下につながる。また、マルチモード伝送となるために、伝送ファイバ内で局所的なエネルギーの集中が発生し、後述する内部の損傷及び非線形効果が発生し易くなる。

もう一つの改善策として、ファイバの入出射端面にエンドキャップと呼ばれる石英材料を接続する方法がとられる。図 3.3.5.2 に示すように、コア径 $10\mu\text{m}$ のファイバ端面に長さ 5mm の石英材料を接続することにより、石英材料の出射面における口径は 1mm にまで広げることができる。即ち、最も損傷を引き起こし易い入出射面において、面積を 1 万倍に拡大することが可能となる。しかし、エンドキャップを有効に使用するためには、ファイバ端面とエンドキャップ材料との接続技術が重要となる。エネ

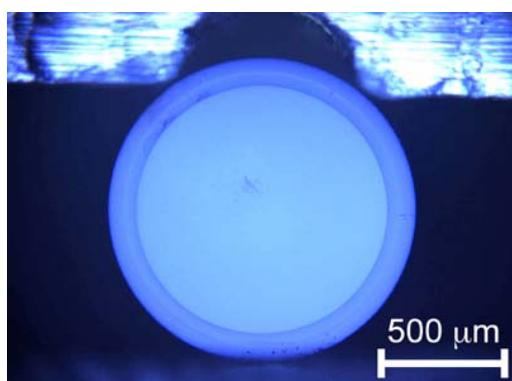


図 3. 3. 5. 1 光ファイバ端面の損傷例

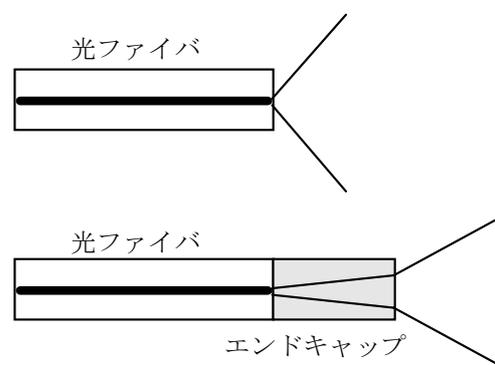


図 3. 3. 5. 2 エンドキャップによる端面エネルギー密度の低減

ルギー密度が高くなるため、通常使用される接着剤は使用できない。また、ファイバ、エンドキャップの端面の研磨加工精度が悪いと、境界面にレーザー光が閉じ込められることにより容易に損傷を引き起こす。そのため、ファイバ端面の加工技術と共に、エンドキャップ材料の接続技術が重要な課題である。

一方、ファイバ内部における損傷は、表面よりも損傷閾値が高いとは言え、致命的な損傷になることが多い。その原因は、内部に存在する欠陥や不純物であることから、100%取り除くことは困難である。また、確率的な局所吸収に依存することから、長いファイバ中のどの位置でも発生する可能性があり、更には、パルス、CWに関わらず発生する。特に、CW光の場合は融解として発生することが知られている。また、表面損傷ではコア径を大きくすることで抑制することは可能であるが、内部についてはマルチモード化により、単一モードの場合よりも高いエネルギー集中を起こす可能性もあり、損傷の抑制は簡単ではない。そのため、純粋な石英材料ではなく、欠陥を抑制する添加剤など、材料の最適化が要求される。また、この添加剤は伝送効率や、非線形現象にも影響を及ぼすことから、総合的に判断した高出力レーザー伝送用ファイバの製作が必要である。

② 非線形現象による伝送効率の低下

高強度のレーザー光が材料内を伝搬する場合、レーザー光の強電場に影響され非線形現象が生じる。非線形現象はファイバ以外の透過性材料においても常に生じるが、光ファイバーの場合はコアに閉じ込

められ、高強度のまま長い相互作用長を維持するために、容易に発生する。光ファイバーにおける非線形現象としては、第3高調波発生、四光波混合、非線形屈折（自己収束）、誘導ブリリアン散乱（SBS）、誘導ラマン散乱（SRS）が報告されており、これらの発現状態は伝送するレーザーの条件により異なってくる。特に、SBS、SRSは比較的低いエネルギーにおいても発生するために、高出力レーザーの伝送においては重要な課題である。

SBSは、レーザー光により励起された音響フォノンによるものであり、大きな特徴はその散乱光が、光の入射方向に戻る（後方散乱）ことである。そのため、低いエネルギーにおいて伝送効率90%を有するファイバでも、エネルギーの増加に伴いSBSが発生すると、伝送効率は50%以下にまで下がる。図3.3.5.3にマルチモードファイバ（長さ5m）における入出射エネルギーの関係と、同時に測定された戻り光（SBS光）の強度を示す。パルス幅10nsのレーザー光に対して、50mJまでは約85%の伝送効率を得ているが、入射エネルギーの増加に従い、SBS光が増加し、評価を行った最大入射エネルギーであ

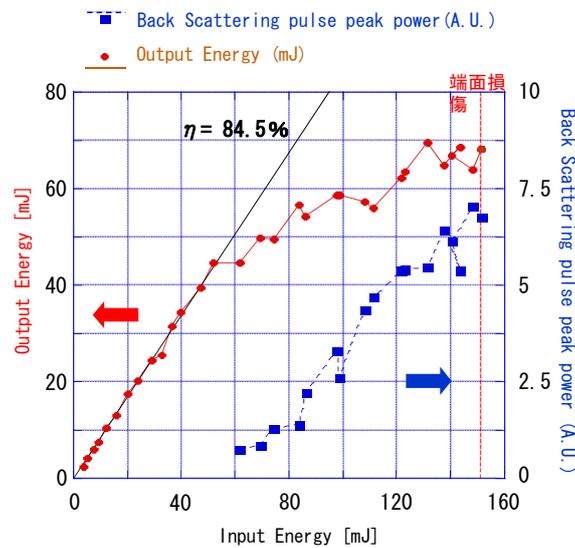


図 3.3.5.3 光ファイバの入出射エネルギーと戻り光（SBS 光）強度の関係

る 150mJ に対して 70mJ しか伝送できていない。つまり、先述のファイバ端面の損傷が抑制でき、入射エネルギーを増加しても出射側ではわずか50%程度しか利用できないことを意味している。図3.3.5.3はわずか5mのファイバ長であり、実際に利用する長さよりも十分に短い。このことから実際の使用条件では、更に伝送効率は減少することが予想できる。

一方、SRSは、材料内に励起された光学フォノンとの関係で説明されている。SBSとの大きな違いは、その散乱光は入射レーザー光と同じ方向に伝送する（前方散乱）ことである。伝送エネルギーだけを評価するならば、SRSによる損失はないように見られる。しかしながら、SRS光は、大きな周波数（波長）シフトを伴っている。そのため、伝送レーザー光とは異なったモードで伝送することになり、エネルギー損失が大きい。また、屈折率分散により位相ずれ、発散角のずれを生じ、加工点における集光性能を下げることになる。そのため、前方散乱であるがその発生を抑制することが必要である。

これら非線形現象は、伝送するレーザーの条件、ファイバの長さ、材料、モードにより大きく異なる。例えば、SBSは音響フォノンが寄与するため、相互作用長とともに相互作用時間が必要である。そのため、CWや長いパルス幅において容易に発生するが、パルス幅が短くなるに従い減少する。また、誘導散乱として大きな損失となるには、相互作用長が必要である。そのため、ファイバの適当な長さにおいて、周波数、空間フィルタを設置することにより、相互作用長を制限することが可能である。それ以外

にも、レーザー光のスペクトル幅、偏光、位相、ファイバ材料の添加剤などによっても抑制することは可能である。但し、これらのパラメータは、伝送後の加工性能にも影響を及ぼすことから、加工用途に応じた複数の抑制技術を確立することが要求される。

③ 集光光学系

単一モードファイバを用いた伝送では、伝送後のビーム品質の低下がなく、ほぼ理論限界値にまで光を集光照射できることから、微小領域、高いエネルギー密度による加工が可能である。しかしながら、ファイバ出射端を直接加工面に接することは不可能であることから、ファイバ出射後、加工対象物へレーザーを集光する照射光学系が必要となる。照射光学系へ要求される要素は、高い光学精度とともに、ファイバとの結合が容易であること、小型で少ない部品点数であること、加工点からの距離が長いこと、自由度が高いことである。

通常のレーザー加工では、加工点で必要なサイズ、エネルギー密度となるように、レーザー出力ビームを、一旦、数 mm から数 cm の平行ビームにし、所定の性能を持つ集光レンズで加工対象物表面に集光される。そのため多い場合には 10 個程度の光学部品が並ぶ。これらは、従来の多段式ミラー伝送において、平行光の光路を多くのミラーで折り曲げながら伝送していた光学系の構成を引き継いでいる。

しかしながら、ファイバからの出射光はほぼ完全な単一モードを得ることができ、更にはマルチモードファイバ出射後ですらビームの空間分布は制限されている。そのため、従来の屈折光学系ではなく、回折光学系における設計も可能であり、光学系のサイズ、部品点数を減少することができる。また、同じ加工でも穴あけ、切断、溶接では、要求される加工対象物に集光されるレーザー光の面積、強度分布は異なる。そのため、空間の位相分布の制御を行うことによる、加工点での照射ビームサイズ、照射分布の制御技術も必要である。これらの要求を満たすためには、高出力レーザーに対して使用可能な回折光学素子、位相制御素子の開発が重要である。位相制御素子では、石英ガラスに誘電体 SiO_2 膜を施すことにより、核融合用レーザー装置においてすでに実用化されている。更には、液晶を使用することにより任意に空間位相を変え、加工点におけるビームサイズ、空間分布を可変できる技術の開発も期待される。

3. 3. 6 加工ステージ・ロボット

現在普及しているレーザー加工システムのほとんどは、既存の多関節ロボットやNC加工機との組み合わせにより構成されている。それぞれに長所、短所がある。多関節ロボットとの組み合わせによるものは、装置自体が非常に簡素になり、多軸制御によって3次元形状に対応し易く、多種のワークにも対応できるといった長所を持つ。しかし、軌跡精度（軸移動時の真直度）が悪く、ティーチングポイントを増やし、更に加工速度を落とす必要性があり、品質、生産性という面で不安がある。そして、NC加工機との組み合わせによるものは、全く逆の特徴を持っている。軸移動時の真直度が良く、段取り時間も短いため生産性が高い。しかしながら、装置自体は非常に大きく複雑になってしまい、対象ワークを多種に対応できるようにしようとすると、複雑な治具構成になり、治具自体の段取り替えが必要になってしまう。

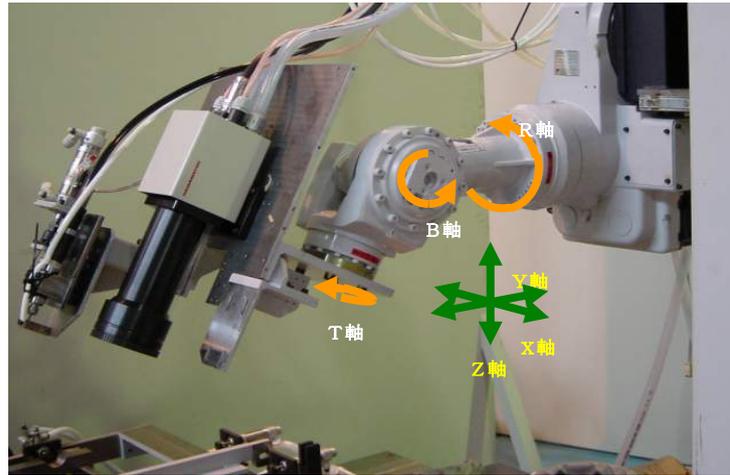


図3. 3. 6 直交3軸+回転3軸レーザー加工システム

これらの問題は、レーザーのスペック向上だけでは改善しない。例えば、移動時の真直度を改善する手段として直交3軸+回転3軸を組み合わせたレーザー加工システムも市場投入されており(図3.3.6)、今後は商用化されているレーザーのスペックに適合したシステムが増加するであろうし、そのためにもレーザーメーカーと機械装置メーカーは協力して開発する努力を進めるべきである。

また、周辺機器についても開発を行っていくべきである。例えば、切断においては加工ノズルの性能が切断面の精度に大きな影響を及ぼす。ワークとの隙間距離の制御等も高い精度を有し、加工機と連動できるようなシステムの開発を進めることが加工精度の向上につながる。また、溶接の場合には前後の検査システムの充実が不可欠である。溶接線の歪みを計測し、レーザー照射の軌跡を制御することで、溶接品質の向上が見込める。その付加効果として治具の精度を下げることもできるため、治具にかかるコストを減らすこともできる。なお、現時点では3次元的な溶接線の計測制御は、一部の限定的な仕様を除いて、ほとんど実用化されていない。この技術が実現できれば、加工対象物の範囲を多いに拡大できるだろう。

このように、加工ステージ・ロボット側にもレーザー加工に合わせた開発すべき項目が多々ある。これらの実現のためには、レーザーメーカー、機械装置メーカー、エンドユーザー、研究者等がお互いに協力しあい、情報を共有化できるような仕組みを作っていかなければならない。

3. 3. 7 三位一体の産業化デザインのために

前記までに述べたように、三位一体型の技術開発はレーザーの産業化デザインのために必須であると考えている。日本には、レーザー装置本体を十分に使いこなすための努力が実質的にユーザー側に委ねられている現状がある。

欧州製品は産業化を前提としてデザインされている。レーザーの使用方法に始まり、メンテナンス、安全管理、仕様変更への対応、加工ステージ、ロボット等、周辺機器をセットにして現場が望む製品を作り上げている。つまり、特定のレーザープロセスに対して、トータルの行程として製品を生み出す体制が既に確立されている。

日本製レーザー発振器本体の性能は欧州製に大きく遅れを取っているが、日本の加工ステージ・ロボット等の周辺技術水準は非常に高いものがある。レーザー本体デザイン、レーザーシステムデザイン、レーザープロセスデザインが三位一体型で技術開発を行えば、日本の強みを十分に活かすことが可能である。しかしながら、特定のレーザープロセスデザインに対してシステムトータルで検討する企業が日

本には数少ない。ユーザー側が人件費を割り、主体となって設備開発を行う必要性に迫られている。多種他業種が関わる設備開発であれば、そのコストは膨大なものとなり、欧州製品には太刀打ちできない。レーザープロセス導入にあたり、レーザー発振器本体のコストを下げるだけでは不十分な現状がある。

レーザープロセス側の情報提供を受け、直ちにレーザー発振器製作・開発、システムデザイン・開発が三位一体で機能する体制の確立が重要である。三位が相互に関わりあう組織を企業内に立ち上げる、マネージメント事業を興す等の対策が急務である。国が「三位一体実現」の推進役を担えば、レーザー産業に関わる「技術自給率」を向上させ、欧州の事情や日本との文化的相違に振り回されない独自のモノづくりが可能となる。また、レーザープロセスに関わる基礎技術を企業間で共有することにより、製品開発を効率良く進め、コスト低下、納期短縮等を図ることができると考えている。半導体産業界で既に実施済みであり、レーザー産業においても検討すべき課題である。

3. 4 まとめ

次世代レーザー開発のための技術シーズとして、高出力化と高安定化のためのファイバーレーザー開発のための技術要素及び同時に得られる高効率化に基づいた高機動性レーザー、並びに日本が優位性を保っている短波長半導体レーザーを励起源にした可視域レーザーの可能性が示された。しかしながら、同時に、非線形現象などの開発すべき要素も多く残されていることが指摘されている。

それと同時に、レーザーを市場で展開し、レーザーを利用した製品も含めて競争力を得るには、ユーザーとレーザーメーカーが十分に連絡を取り合っレーザーのみの開発だけではなく、その周辺装置も用途に適した開発を行わなければならない。

周辺装置とは、集光照射光学系と加工ステージであり、レーザー装置を含めた、これら三要素を一体として総合的に開発を行う、『三位一体のレーザー開発』が不可欠であることが示されている。更には、国内におけるレーザーと周辺装置の開発と供給並びに情報の共有化が重要であることも求められている。また、これらの仕組みを作り出すために、国による指導が重要であることも指摘されている。

これらを達成することにより、日本のレーザー産業とレーザーを用いた新しい加工技術をベースとした産業全体の国際競争力を強めることができる。

第4章において、これらの産業並びに社会的な仕組みの必要性と方向性を、海外の事情との比較及び人材育成まで含めて、長期的視野に立脚して言及している。

第4章 今後の展望・課題（制度や教育問題等）

4.1 次世代マザーマシンとしてのレーザー及びレーザーシステム化技術

4.1.1 産業基盤におけるレーザーの役割

産業分野におけるレーザー技術は、従来から利用されている全ての加工技術との置き換えが可能な技術ではないが、従来技術では不可能であった新たな加工が可能とである。これらは、例えば自動車におけるテーラードブランク溶接や平面ディスプレイ(FPD)におけるリペア、加工速度の向上や塗装前の表面処理が不要となる溶接に代表される、高性能化と省資源あるいは省エネルギーとの両立など、従来技術では困難であった分野に活用されている。

この様に、今後もわが国が世界の先端工場として高度な製品を世界に送り出し続けるには、レーザーに限らず新しいツールの開発と活用が不可欠である。これは、従来の機械加工において、マザーマシンとして高度な旋盤やフライス盤と同時に、高性能なドリルやバイトやエンドミルが不可欠であることと同様である。従来、日本は加工装置と刃物の両方、加えて加工される金属材料(製錬技術)を保有すると共に、技術伝承者を確保して技術者を再生産していた強みがあり、機械産業における世界的な競争力を維持していた。

レーザーを利用した各種の加工を考えても、「海外から購入すれば事足りるのか」という点については十分に考慮すべきである。輸入した加工装置を使用した場合、輸入国において加工装置の生産国を超える高度な加工技術は生まれまいであろうし、装置を作るための技術が失われた状況では、該当する分野の競争力はますます低下していくことは容易に予想できる。これは、前に述べた競争力の高い日本の機械加工と加工機械における環境が国内外で逆転した状況を想像する力があれば、容易に理解できるはずである。

更に、半導体製造技術において最も重要な、ステッパやアライナと呼ばれる露光装置は光技術の塊である。また、自動車など日本を支えてきた従来の産業においても、省エネルギーを可能とする次世代自動車製造を始めとする新規な製品や装置開発にレーザーが欠かせない。この様に、光技術とレーザーは新しい産業の創出並びに従来技術の変革に不可欠なツールである。これら光技術に関して、海外への依存を容認するか否かは、防衛や食料の海外依存に対する判断とならび『産業安全保障』の面から極めて高度な判断を要すると言える。

レーザーが生まれて間もなく50年である。すでに溶接や切断などの分野で応用が進められている。しかしながら、ちょうど今、世界的に見て広い産業分野にレーザーが応用され始めるタイミングであり、レーザーの産業展開が助走を終えて踏切台にさしかかろうとしている状況である。ここで新たに展開しようとしている産業用レーザー分野から日本が撤退することは、新たな産業分野を一つ失うことになる。更に、産業全般に言えることであるが、優秀な最終製品を完成させるためには、優秀な部品を供給する中小の企業が必要である。周辺を支える企業とその技術力は、柱になる産業がなければ維持できない。雇用も然りである。

すなわち、国内からレーザー産業を失うことは、単に加工用レーザービジネスを失うだけではなく、レーザー産業の周辺に成長するはずの光部品を含めた光産業構造と新しいビジネスチャンスも失うことになる。更には光の技術と光に関連する次世代を支えるサイエンスの育成環境をも国内から消失させることになる。その結果、単なる切断や溶接分野に限らず、今後生まれて来るであろう光応用とそれを利用した産業が根付く畑も失うことになる。

新しい分野を育て、更に高度な技術を実用に向くには、キャッシュフローを生む幹が必要である。米

国には防衛産業があり、欧州にはフレームワークプログラムが存在する。ぜひとも産業用レーザー分野発展の起点として高出力ファイバーレーザーをはじめとする新規なレーザーを開発し、その波及効果により半導体や自動車、加工機械に続く新しい産業を育成するべきである。新しい産業分野の育成により、時間を掛けて多様性と柔軟性を涵養された長期展開可能なポートフォリオを有する国内の産業マトリクスを構築しなければ、無資源国日本の将来は危ういと考えている。

4. 1. 2 レーザーのシステム化・規格化技術

産業用レーザーは、発展途上である。市場を考えたものづくりは、顧客からの要求・要望に答えるレーザーシステムづくりから始まる。良いレーザーシステムをつくるには、市場（顧客）からの要求・要望に答えることが必要不可欠である。レーザーシステムのコアであるレーザーを外国メーカーから購入するようなことをしては、市場（顧客）からの要求・要望に答えることは困難である。国民の利益（損失）について考えると、外国からレーザーを購入し、日本国で開発することを止めれば、他国でのみレーザー開発技術が向上する。言い換えると日本にとってレーザーのブラックボックス化が進む。外国からレーザーを購入する際、売り手の提示額（言い値）で購入することになる。これは、金銭的損失をもたらす。故障しても売り手の提示額（言い値）で修理費を支払うことになる。メンテナンスや修理に要する時間も売り手任せとなり、多大な時間的損失をもたらす。国民の安全について考えると、外国から購入したレーザーが故障した場合、「使い方が悪いから故障した。」あるいは、「レーザーは、そんなもの、寿命だ。」などと言われ、すまされてしまう。故障ばかりか、レーザーが要因となる事故につながった場合も同様である。「レーザーは、そんなもの。使い方が悪いからだ。」などと言われ、すまされてしまう。日本国にレーザー開発技術があつてこそ「交渉」の席につけるし、相手（売り手）からの謝罪及び保障を得ることができる。

アフォーダブル（手ごろな価格・ニーズ適合性）化を考えた場合、レーザーのシステム化及び規格化が必要となる。現在までのレーザー開発は、レーザー設計者の都合で全てが決まってきた。つまり、レーザー開発者が作りやすいように設計されている。これは、ユーザー（現場）の要求とは殆どの場合一致しない。例えば、レーザー発振器（本体）について、同じメーカーの発振器であっても種類が異なるとレーザー出射口の位置、コネクタ、ケーブル及び制御信号が異なるのでレーザーシステムを構築するためにはそれぞれの発振器によって設置方法や制御方法を変更する必要がある。今後、これらに関する規格化は、アフォーダブルなレーザー及びレーザーシステム作りには必要不可欠である。プロセスオートメーション分野における駆動系についてはフィールドネットワークを利用した規格化を進める動きがある。しかしながら、完全統一規格には至っていない。レーザー発振器、光学系及び機械系を含めたシステムを規格化することによりレーザーシステム設計が容易となりコスト削減が可能、アフォーダブル化することとなる。規格化すべき項目は、発振器・光学系関連では、レーザー出射位置、発振器固定方法、発振器寸法、上位機器との通信方法、発振器に付随するコネクタ関連、発振器に付随するケーブル関連、上位機器との通信ソフト、上位機器とのコネクタ、上位機器とのケーブル、励起源交換方法及びハイパワー用ファイバーコネクタ等がある。駆動系関連では、モーター寸法、モーター固定方法、上位機器との通信ソフト、上位機器とのコネクタ、上位機器とのケーブル、P/C とドライバー間ケーブル、P/C とドライバー間コネクタ、ドライバーとモーター間ケーブル、ドライバーとモーター間コネクタ及びドライバーとモーター間制御信号等がある。

4. 2 教育の産学循環による人材育成

4. 2. 1 ドイツにおける人材教育

著者は平成 18 年度に約 9 ヶ月間、ドイツ連邦共和国の北西に位置する学園都市アーヘンに滞在する機会を得た。その時に調査、聞き及んだ内容をもとに、ドイツにおける人材教育に関して述べたいと思う。

まず、ドイツの学校教育に関して理解を深める点が重要と考えられる。図 4.2.1.1 にドイツにおける学校制度の概略を示す。幼稚園は 3 年保育であり、日本においても一部検討が進んでいる縦割りクラスである。卒園後、日本の小学校に相当する Grundshule に進むこととなるが、卒業時の段階で将来の進路を大きく左右する進学先を決定する必要がある。この段階で両親の意向が大きく影響することは避けられないと考えられるが、少なくとも 10 歳に至るまでに将来の職業に関して高い意識を持つことになるのは間違いない。進路の決定には 2 年間の猶予期間があり、自分の進むべき道を決定していく。日本の中高一貫教育校普通科に相当する Gymnasium に進学するのは全体の 30-40% であり、大学入学資格である Abitur の取得を目指す。Abitur を取得したものは自分の希望する大学へ進学することとなるが、実力に応じて進学先を決定しているようである。理工系の大学における修業年数は 5 年間が一般的であり、卒業時に学位 Diplom を修得する。

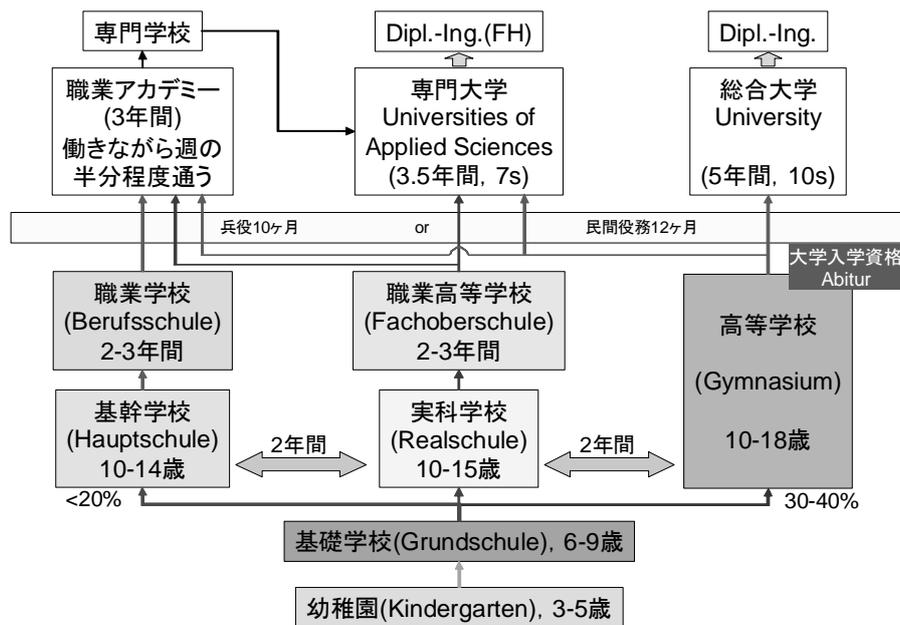


図 4. 2. 1. 1 ドイツにおける学校制度の概略

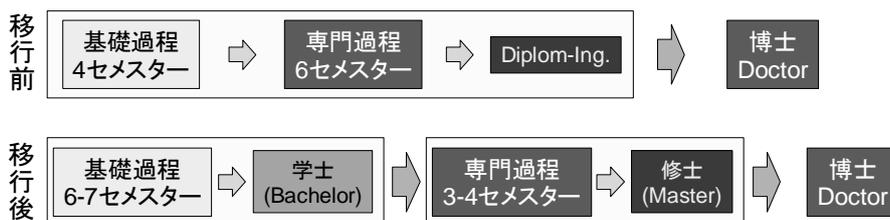


図 4. 2. 1. 2 理工系大学の修学形態

大学は2学期制であり、冬semester(10月～3月)と夏semester(4月～9月)に分けられている。図4.2.1.2に示すように、これまで理科系の学生はDiplom取得を目指し、基礎過程2年間(4s)と専門課程3年間(6s)の5年間学んできた。しかし、現在は、大学制度の改革時期であり、2010年までに3～3.5年間(6-7s)の基礎過程(Bachelor)、1.5～2年間(3-4s)の専門課程(Master)へと移行中である。基礎過程卒業時に学士号を、専門課程修了時に修士号を取得できる。基礎過程卒業時には専門課程に進むための試験が関門となっている。大学の運営は各州によって異なるが、基礎過程の単位は基本的にドイツ国内では互換性があるとされており(州をまたぐと有効でない場合もある)、基礎課程後は大学を変更することも可能である。理工系の学部ではインターンシップの履修が求められており、主に専門課程で履修する学生が多い。

アーヘン工科大学機械工学部のインターンシップ実習項目は大学のカリキュラムにより決められている。切断加工、成形加工、接合溶接。板金加工、熱処理、工具の取扱、組立などが実習項目として取り上げられており、26週間以上かけて行われる。インターンシップを受講するためには、学生は自らが情報を収集、問い合わせ、交渉を行って、条件が合致する企業を探す必要がある。大学側は基本的にインターンシップ先企業の選定作業に関与することはなく、インターンシップ終了前後の報告を受けるにとどまり、学生の自主性、交渉力を培う側面も有している。学生自らが選んだ実習先であり、期間も約半年程度と長期にわたることから、実務に沿った実り多いインターンシップが行われているものと推測される。また、多くはないが、このインターンシップを採用学生の見極め試用期間、無給で得られる労働力(有給の場合もある)として利用できるなどの企業側にとって有益な一面も有していることが、企業の積極的な支援を得られている要因の一つであるとも考えられる。

また専門課程では1編に対して実験と執筆に最低200時間を必要とする研究論文2編と、実験と執筆に最低400～500時間以上とするDiplom論文1編の作成が必須である。研究論文は3ヶ月程度の期間で行われるが、Diplom論文は半年程度の時間をかけて取り組むこととなる。Diplom論文のテーマ決定に関しては所属大学のみならず、学生の興味に沿ったテーマ選択を行える場合がある。その一例を以下に示す。

- ①各研究機関や企業がDiplom論文用テーマとしてトピックスをリストアップ
- ②トピックスリストを掲示板やWebサイトなどより入手(最も有力なのは研究ネットワーク)
- ③学生自身が希望するテーマを選択
- ④基本的に大学が関与することなく、選択テーマについて学生自身が直接各研究機関、企業と交渉
- ⑤学生と受け入れ先研究機関、企業間での話がまとまれば研究活動に従事可能

上記のように、学生自身が興味のあるものを調査し、担当教員との打合せで認められれば、学生自らが探してきた内容を研究論文、ディプロマ論文のテーマとして選択できる。すなわち、全てが大学内だけで行われているのではなく、学生が自ら学外の情報を収集して研究を始める。当然、そのためには社会的環境が整っている必要があるが、この様に自ら立案、計画、実行していく中で学生が得られる経験は大きいものと考えられる。

研究機関において、このDiplom論文の学生を指導するのは、一般的に博士課程に該当する研究員である。この研究員はプロジェクトを一つ以上受け持っており、給与を受取りながら研究に従事している。一般に3～5年で博士論文を執筆し、博士号の取得を目指す。プロジェクトには必ずといっていいほど、

そのアプリケーションを実施するユーザが含まれており、産業界に直結する内容である。研究員は給与を受け取りながら研究を進めるわけであり、プロジェクトなくして研究機関に在籍することはできない。決められた期限内に目的とする成果を得られるように研究が進められており、その一端を **Diplom** 論文の学生が担っていることから、大学に在籍する学生もより実践的な研究活動に携わっていると言える。

また、私の滞在した研究所では **HiWi** なるシステムが存在した。これは主に基礎課程後の試験に合格して専門課程に進んだ学生が、研究論文や **Diplom** 論文と異なるテーマの研究に参加し、有給にて研究活動の支援を行うものである。各研究員は1名もしくは2名の **HiWi** と一緒に研究を進めており、研究の中で **HiWi** が行う実務の割合は非常に大きく、研究を進行する上で欠かすことができない存在である。学生は **HiWi** 以外に授業や研究に時間を割かなければならない。しかし、**HiWi** として従事するのは週最大 19 時間までであり、給与を取得しつつ研究活動に携われる利点があることから、有効に活用されていた。

以上のように、大学の学生は自らが進んで積極的に交渉すれば、産業界や研究機関と密接な関係を構築していくことができ、より実践的な研究活動を行うことが可能となる。それを可能としているのは、先にも述べたように社会的システムができあがっているからこそであり、一朝一夕になしえるものではない。しかし、そのような経験を積んだ学生が博士課程へと進学し、更に給与を受け取りながら研究活動に従事できる環境を得ることもできる。博士課程の学生は、より専門に特化し、その分野の知識と経験を深めることができる。博士号を有する者への待遇も社会的に確立されており、関連分野へと就職をしている場合が多い。

特にドイツにおける光産業は、社会的にも注目が高く、人気が高いのも実情である。しかし、それを支えているのは金銭面のみではなく、このような社会的な環境によって育てられた人材が、修学関連の企業で多く働き、研究開発を推し進めているところが大きいと考えられる。ここではアーヘンの研究所を事例に述べてきたが、このような研究機関はレーザ関連のみでもドイツ国内に複数箇所存在し、多くの専門技術者を排出している。そこに、ドイツの光産業の力強さの一端を感じられる。

4. 2. 2 教育の産学循環による人材育成と行政の役割

国の柱となる産業はいつの時代にも存在している。富国強兵の時代から今に至るまで、繊維や重化学工業、細かく分類すれば絹、木綿、化学、石油化学、造船、自動車、半導体、などと産業構造は新陳代謝を続けている。しかしながら、次にどの産業が日の目を見て国家の柱となるのか、傾斜生産方式でも導入しない限り予想を付けることは難しい。次に柱となる産業は、時間を掛けて準備を行うことにより初めて柱となりうる。この育成準備に必要な導きを、かつては産官でスクラムを組んで行っていた。

高校生が進学を希望する大学の学部や学科は、経済の動向を強く受けて変化している。現在、電気工学並びに電子工学分野の人気は低迷しており、恐らく、NEC の小林宏治氏による **C&C** が、関本忠氏の功績により一世を風靡していた 20 年前には考えられない状況となっている。

この現象は、経済状況の変化と無縁ではない。電機メーカー各社は日本にとって重要な産業分野を担っているにもかかわらず長い不況の後にヒットを打つことができず、また、従来から知られている大手企業が **DRAM** で苦杯を嘗めたこと、大規模なリストラを実施したこと、これをテレビが優良企業の実体を暴いたかごとき特集番組を放映したことなど、多くの経緯によりかつての人気は失われている。

学生目から見た光分野は、未だに学科単位の下に隠れており、人気、不人気の指標は現れていないが、電気電子系学科の内部における小分類ですでに半導体を上回る比較的人気の高い研究分野となっている。しかしながら、大学によっては光を前面に押し出した学科が再編に追い込まれるなど、決して

裾野が広いとは言えないのも現状である。

どの産業分野も、その分野に就職する、あるいはその分野の業務(研究、開発、生産、営業)を希望する人口が少なくは十分な競争力を発揮できない。これは、エンジニアの地位全体に共通することであるが、日本が技術立国を目指すのであれば、技術者の待遇を高める必要がある。そのためには産業規模を拡大するか、利益率の高い先端分野に集中するかの何れかが必要である。残念ながら現時点に於ける日本の光産業は、このいずれにも位置していない。

この問題点を解決するためには、産業の育成と人材の育成の循環が産学の間で行われなければならない。国に根付いた産業を作り上げるには、学生にとって将来活躍する場として魅力ある産業となることで良い学生が集まり、産業界への人材供給が可能となり、更に魅力ある産業へと変化していく連綿とした世代間の受け渡しが不可欠である。時定数の長い循環であり、一旦縮小したりとぎれてしまったりすると、回復に時間を要する循環である。光産業においても、時間を掛けて光産業界と人材教育機関の循環場を涵養しなければならない。

循環場が回り始めるためには「きっかけ」が必要である。自由競争は重要であるが、競争力を有さないインファントが自由競争への参加を求められても勝つことができただけではなく新しい芽が育つ可能性も失う。市場から去った者の言葉やそれから得られる反省は日の目を見る機会が少なく、次に活かされる機会も少ない。ぜひとも、かつて行政が臆することなく行った産官の共同作業を復活させ、日本に新しい産業分野を育てて頂き、それを引き金として産業界と産業界が要求する人材の供給が滞りなく行える舞台装置を創り出されることを期待したい。また、これらに積極的にかかわっていきたい。少なくとも、海外では、かつての日本を真似た産官共同の作業は当然のこととして行われているのだから、日本がそれを復活させることにためらう必要は皆無と考える。

4. 3 レーザーを利用した産業のビジネスプランの例

4. 3. 1 自動車関連

自動車産業の中でレーザー溶接の適用拡大が進まない理由はコスト、発振器仕様だけの問題でない。溶接部の品質保証という問題(隙間の管理)がある。

車体部品はプレス成形により形状が作られるがプレス成形時の部品精度は±0.5mm である。近年では軽量化ニーズの増大に伴いハイテン材の採用も広がっており部品精度は悪い方向に動いている。また自動車部品は形状が複雑であり、多面合せが必要な部位が多い。治具や隙間矯正機構付き加工ヘッドを用いても、全ての溶接部位をレーザー溶接の許容範囲(0.3mm 以下)に制御することは困難である。結果的に車体におけるレーザー溶接は10~20%と言われている。リモート溶接のように1台で多くの溶接が可能な設備を考えると自動車産業に導入されるレーザー発振器の台数に多くは期待できない。そこで数百W~数kWを標準モジュールの構成数で対応するような発振器形態が自動車産業において求められるであろう。

4. 3. 2 レーザー加工機

今後のファイバーレーザー技術が目指すべき方向性とビジネスフィールドについて

- ・新興国に対抗していくものづくりのための生産性向上ツールとなる
 - ・高出力化によるスループット向上 → 電子部品、電装品、家電
 - ・信頼性向上によるダウンタイムの削減 → 電子部品、電装品、家電
- ・社会のエネルギー効率向上に貢献
 - ・レーザー自身のエネルギー効率改善 → 電子部品、電装品、家電

- ・電気エネルギーの効率的な伝達のために銅材料への適用拡大 → 電装品、電子部品
- ・新産業の創出
 - ・微細加工分野の拡大による生産イノベーションへの貢献 → 半導体、太陽電池、新素材

達成のための技術課題

- ・高出力化、信頼性向上
 - 高出力レーザーダイオード
 - ファイバー製造技術
- ・エネルギー効率改善
 - レーザーダイオード発振効率
 - 短波長化
- ・銅材料への適用
 - 短波長化
- ・微細加工分野の拡大
 - 短波長化
 - 偏光制御

これらの課題を克服することで必ずファイバーレーザーの応用は拡大すると考える。

4. 3. 3 まとめ

製品開発等企業は、いかにコストを安く、タクトタイムを短く製品を生み出すかが重要なファクターとなっていることは今も昔も変化はなく、製品開発・生産に関する新たな技術導入は、その安定性を確保した上で如何に早く導入できるかが重要な観点となっている。ただ、社会的な背景として製造に関してはグローバルな生産方式が一般化しつつある昨今、それぞれの国における戦略的な技術開発が、その国内企業の成長や発展を手助けしているのも事実である。国策としてまず、企業のビジネスモデルを描けるインフラを整え、そのインフラの上で企業は国際的な優位性を保つことができ、もって、その国の優位性につながっていると考えられる。現に韓国などは、最先端技術開発にかかる予算を国がふんだんに捻出し、半導体産業等優位性を確保し、レーザー技術開発においてもドイツの研究機関等が必須技術として、大学・研究所・企業との連携を図り国際的な優位性を得るに至っている。これらはすべて、中長期的な視点をもって、インフラの必要性を見極め、戦略として育ててきたからに他ならない。

日本では、残念ながらレーザーのコア技術としての開発を担う場所がなく、個々の企業が独自に開発を進めているのが現状であり、共通インフラを武器とした外国メーカーの安価な先端的な技術を保有した製品に圧されているのも事実である。大事なことは、インフラとしての最新技術の育て上げができる環境を国、大学、企業が共同し作り上げ、開発した技術を早い段階で生産に移せる仕組みを作ることであり、企業も率先した技術活用と自らが欲する技術内容の提供を行い、共通基盤としてのレーザーのコア技術を永続的に開発できる体制を、作り上げることが重要であることが判明した。

4. 3. 1や4. 3. 2に示すように、企業は個別部分ではレーザーの必要性を感じてはいるものの生産ライン全体を見極めた活用まではコスト等から断念しているのが現状だと考えられる。

日本としても早い段階でこれらの考え方を見直し、将来的なリスク(技術の空洞化)を正確に見極め、日本の製造技術を育てるためのキーテクノロジーの発展のため、どうあるべきかを企業のビジネスプランと併せ考えていかなければならない。

第5章 次世代ファイバーレーザー及び次世代ファイバーレーザーによる新加工領域の技術開発提案

5.1 日本のオリジナル技術

日本オリジナルの半導体レーザー技術は、面発光型半導体レーザー（VCSEL）及び短波長半導体レーザーである。また、ファイバーレーザーの大出力化に必要な不可欠な技術であるファイバー結合技術（テレコム技術）、ファイバーコア高性能化技術、ハイパワーレーザー用ファイバー作製技術及び半導体レーザー励起可視光レーザー技術がある。新プロセス技術として結晶粒制御技術及び微細接合技術も有している。これらの技術を組み合わせて図5.1で示す2つのプロジェクト「高機動性大出力レーザーシステム開発及び超高速プロセス技術開発プロジェクト」及び「高効率可視光レーザーシステム開発及び微細領域材料制御開発プロジェクト」を提案する。

「FEA LASER (FEAL) プロジェクト」(F: User-Friendly, E: Ecology-conscious, A: Affordable)

大学及び企業	基盤技術	プロジェクト(三位一体型)			プロジェクト No.
		レーザー開発 (レーザー本体デザイン)	システム開発 (レーザーシステムデザイン)	応用(ユーザー) (レーザープロセスデザイン)	
A社 B社	・VCSEL 面発光型半導体レーザー	<ul style="list-style-type: none"> ・高機動性大出力レーザー開発 「コンパクト・低コスト・大出力・高集光性」 VCSEL励起型ファイバーレーザー ※ダイレクト半導体レーザー 	<ul style="list-style-type: none"> ・高ロバスタ化技術開発 ・高操作性技術開発 (加工ヘッド小型化技術開発) 	<ul style="list-style-type: none"> ・超高速接合プロセス技術 ・超微細加熱プロセス技術 ・超高速切断プロセス技術 	FEAL プロジェクト I 「高機動性大出力レーザーシステム開発及び超高速プロセス技術開発」
近畿大学 大阪大学 慶應義塾大学 C社 D社	<ul style="list-style-type: none"> ・テレコム技術 ・ファイバーコア高性能化技術 ・ハイパワーレーザー用ファイバー作製技術 ・半導体レーザー励起可視光レーザー技術 ・結晶粒制御技術 ・微細接合技術 				
E社 F社	・短波長半導体レーザー				

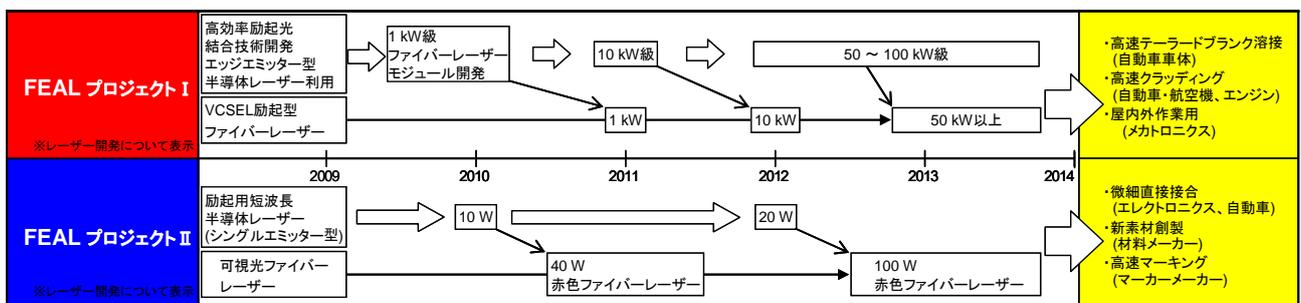


図5.1 「高機動性大出力レーザーシステム開発及び超高速プロセス技術開発」プロジェクト及び「高効率可視光レーザーシステム開発及び微細領域材料制御技術開発」プロジェクト提案

5.2 高機動性大出力レーザーシステム開発及び超高速プロセス技術開発プロジェクト

レーザー本体デザイン、レーザーシステムデザイン及びレーザープロセスデザインの三位一体でプロジェクトを進める。レーザー本体デザインは、VCSEL 励起ファイバーレーザーの開発を行うことで、高機動性大出力レーザーを開発する。VCSEL をファイバーに注入する技術がキーテクノロジーとなる。また、大出力化には高出力 VCSEL の導入が必須となるので、高出力 (パワー) VCSEL の開発を行う。開発されたパワーVCSEL は、直接加工にも使用することができる。レーザーシステムデザインでは、

高ロバスト化技術開発及び高操作性技術開発（加工ヘッド小型化技術開発）を進め、レーザープロセスデザインでは、超高速接合プロセス技術、超微細加熱プロセス技術及び超高速切断プロセス技術開発を行う。レーザー本体デザイン開発計画は、2009年に高効率励起光結合技術開発を、エッジエミッター型半導体レーザーを用い進める。2010年には、1kW級のファイバーレーザーモジュールを開発し、2011年に10kW級、2013年以降には、50～100kWを開発する。VCSEL励起ファイバーレーザーは、エッジエミッター型半導体レーザー励起ファイバーレーザーモジュール開発で得られた技術を適用し、2011年には、1kW、2012年には、10kW、2013年以降には50kW以上の出力を達成する。VCSEL励起高出力ファイバーレーザーにより、自動車製造の重要プロセスであるテーラードブランク溶接の高速化、航空機等のタービンブレード表面のクラディングの高速化が実現する。また、ロボット等への搭載が容易になり、老朽化したビルの解体あるいは、高層ビル建築時に必要となる溶接等の屋内外作業においてその機動性を発揮することができる。

5. 3 高効率可視光レーザーシステム開発及び微細領域材料制御開発プロジェクト

高機動性大出力レーザーシステム開発及び超高速プロセス技術開発プロジェクトと同様にレーザー本体デザイン、レーザーシステムデザイン及びレーザープロセスデザインの三位一体でプロジェクトを進める。レーザー本体デザインでは、高効率可視光ファイバーレーザー開発を行う。レーザーシステムデザインでは、高操作性技術開発及び高度ビーム制御技術開発を行う。レーザープロセスデザインでは、材料組織制御技術開発及び超微細接合プロセス技術開発を行う。レーザー本体デザイン開発計画は、励起用短波長半導体レーザー（エッジエミッター型）の出力10Wを2010年に達成し、2012年までに20Wを実現する。2011年には、2010年に開発した出力10Wのエッジエミッター型半導体レーザーを励起源として出力40Wの赤色ファイバーレーザーを開発する。2013年～2014年には、出力100Wの赤色ファイバーレーザーを開発する。高効率可視光ファイバーレーザーによりエレクトロニクス及び自動車の電装においてハンダを用いない銅配線の直接接合が従来よりも効率よくできるようになる。また、高効率可視光ファイバーレーザーは、結晶粒を効率よく加熱できることから新素材を開発する上で有効な手段である材料組織制御技術にも有用である。マーキングの高速化にとってもレーザーの吸収率を向上させることは得策である。今回の提案は、赤色ファイバーレーザー開発であり、将来的には加工材料を銅とした場合、より吸収率の高い、緑あるいは青色ファイバーレーザーの開発につなげたい。高出力化した短波長半導体レーザーについては、直接加工に適用することが可能となる。

4 成果の要約

本年度の調査検討分析に関しては以下の成果を得ることができた。

① 国内外レーザー技術動向調査

レーザー技術動向調査及び海外動向調査を以下のように行った。

(国内調査)

(企業調査)

日本の各レーザー関連技術の先端的企業（浜松ホトニクス、古河電気工業、エンシュウ、日亜化学工業 等）の状況と今後の取組等を調査した。又、そのほか日本における各種レーザー技術等の調査も行った。その結果、各企業内でレーザーに関わる先端技術の開発を独自に行っている場合が多いことが判明した。

(業界調査)

(財)光産業技術振興協会で行っている光技術（主に情報通信）から派生する加工システムの調査研究や光産業ロードマップ等の実状を調査した。その結果、最新技術の体系化やロードマップが存在していないことが分かった。

(シンポジウム)

光産業創成（浜松：主催・光産業創成大学院大学）シンポジウムに参加し、日本国内の様々な観点で利用されるレーザー技術の動向を調査した。レーザー加工のシステム化の必要性が判明した。

(学会)

レーザー学会講演会に参加し、現状のレーザー技術の現状を調査した。技術的には、レーザー加工における各種加工現象の原理分析・確証まで至っている事例は少ないが、製品製造を行う上での加工技術はかなり高度化している状況が判明した。

(海外調査) レーザー先進国であるドイツを中心に欧州におけるレーザー開発状況を調査。レーザー開発に関わる体制、予算、制度、教育に対する取組はEU、国ベースで推進をしており、それら成果を利用した産業への応用展開が密接な連携をとり実施されている。そのため、ユーザーズに対し即時対応できるような仕組みとなっており、開発の共有化によるコスト削減、技術革新へ展開されている。しかしながら、まだ、日本の得意とする技術は多数あり、国際競争力を生む技術的ベースがあることが判明した。

② レーザー技術の体系化及び将来動向分析（レーザー技術の Roadmap）

レーザー加工関連技術等技術分類を行い、課題の抽出を行った（技術マップ）。また、開発時期等時間軸や日本のレーザー加工装置の戦略として重点技術内容を明確にした（技術戦略 Roadmap）。その他、レーザー加工技術開発を必要とする時期や内容、社会的な背景等を明らかにする導入シナリオを作成し、既存のロードマップとの比較を行った。その結果、今回作成した技術マップ及びロードマップのようにレーザーを使う（応用・ユーザー）側の視点を重視し、ユーザーフレンドリー化、エコロジーコンシャス化及びアフターダブル化（ニーズ適合性を重視した製造コスト低減化）を主軸とし、レーザー開発を進めることが重要であることがわかった。

③ ファイバーレーザー技術と既存加工用レーザー技術の比較

レーザー加工を導入している企業の加工技術やコスト構造を調査した。また、レーザー加工を取り入れられない理由等を分析し、ファイバーレーザーの優位性やその他レーザーの技術動向等に関する調査も行った。その結果、ファイバーレーザーは、既存加工用レーザーであるロッド型 YAG レーザー、ディスク型 YAG レーザー及び CO₂ レーザー等に比べ、コストが最も低く、ビーム品質が最も良いことが明らかになり、ファイバーレーザー技術が既存加工用レーザー技術に比べ優れていることがわかった。

④ 次世代ファイバーレーザーにより開拓される新加工領域・アプリケーション

新たな高集光・高出力ファイバー加工用レーザーを利用した加工法や製品・産業等の調査分析を行った結果、溶接に代表される加工プロセスの高速化及び高度化、微細接合に代表される微細加工プロセスの高速化及び高度化並びに材料組織制御技術が創成され、高度化されれば新素材が創製される可能性が示された。

⑤ 次世代ファイバーレーザー及び次世代ファイバーレーザーによる新加工領域（製造技術）の技術開発提案

これまでの調査結果に基づき、レーザーを使用すれば優位性を見いだせる製造分野や製品の絞り込みを行った。更に、次世代ファイバーレーザー加工に適合するための必要な性能と解決すべき課題や提案すべきシステム構成等の概略案（たたき台）を作成した。

5 今後の課題

本調査が目指すユーザーフレンドリー（User-Friendly）、エコロジーコンシャス（Ecology-conscious）、アフォーダブル（Affordable）なレーザー（FEAレーザー）開発を明確にしていくため、具体的実用化に必要な数値データを把握し、また、コストや信頼性に関し、具体的な事例を数例あげ、既存設備等との比較を厳密に行い、産業への貢献度を明確にする必要がある。FEAレーザーシステムの開発が進めば、新機能を有した材料（スマートマテリアル）創製が期待される。FEAレーザーシステムの開発に先立ち、新機能材料創製の基幹技術であるレーザーによる金属材料の結晶粒選択的加熱技術について調査する。

参考資料

①用語集

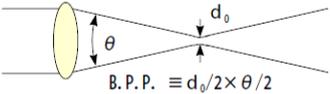
レーザー関連 用語集

50音	言語・記号	意味・語源等	類義語	反意語	参照頁	その他
ア行	アイセーフ	波長1.4～2.6μmの光は水の吸収係数が非常に高く、1μmと比較すると1000倍ほどになる。もしこの様な光が眼に入っても眼球前面の水分により吸収され、網膜まで到達しないので、眼に対する安全性が比較的高い。			36	
ア行	アイソレーション	レーザー光を一方のみに透過させ、逆方向へは透過させない。	アイソレータ		19	
ア行	アイソレータ	レーザー光を一方通行にする光部品。戻り光によるレーザーの不安定発振、損傷を抑制する。			45	
ア行	アニール	結晶に含まれる又は打ち込まれた不純物を拡散又は活性化させたり残留応力の低下や結晶中の乱れを戻したり成長させる目的で高温に保つ工程のこと。			20	
ア行	位相结合	複数のレーザー発振器の発振位相(光の波面など)を一致させることにより、あたかも一台のレーザーのように振る舞わせる技術。ビーム品質を維持したまま高出力化が可能になることが期待できる。			15,18,35,38,39	
ア行	イノベーション25	安倍政権の所信表明演説に盛り込まれた公約の1つで、2025年までを視野に入れた成長に貢献するイノベーションの創造のための長期的戦略指針のこと。			49	
ア行	ウエハ	半導体で出来た薄い基板のこと。ICチップなど半導体デバイス製造用としてはシリコンが多く利用されシリコンウエハと呼ばれる。シリコンウエハはインゴットと呼ばれる単結晶の塊を、薄くスライスして作られている。			20,27,40,42,43,44	
カ行	ガルバノスキャナ	反射鏡の角度を制御することでレーザー光の照射位置を決定。			17	
カ行	強度分布	空間的なレーザー光の出力(強さ)の分布。			18,23,26,55	
カ行	空間フィルタ	狭義にはビーム品質の低い光を除去するフィルタ。光ファイバーはコアが細いので、自由空間と比較すると伝搬可能横モードを品質の高いモードに制限できる。スペーシャルフィルタ。			37,54	
カ行	固体レーザー	希土類が添加されたレーザー結晶を励起してレーザー発振させる方法。			16,31,36,40,45,47	
サ行	ジッタ	信号のタイミングの時間的揺らぎ。			18	
サ行	真直度	ものが如何にまっすぐであるかの指標。すなわち、或る部位を直線的に測り、そのときのうねりや形状の最高点と最低点をそれぞれ通る2本の平行線の幅を指す。			55,56	
サ行	シングルモード	中心部のレーザー光強度が最も高く、円周方向にレーザー光強度が減少する強度分布。	ガウスモード、TEM ₀₀		15,17,36	
サ行	増幅媒質	光を増幅するための材料。例えば、ガラスやYAG等の材料に、NdやYb等の希土類元素をドープして作製する。	レーザー媒質		37,38,39	
タ行	チャープドパルス増幅	低エネルギーの極短パルス光を、波長分散の大きなファイバーや、回折格子等で構成される光学的なパルス拡張器によって時間的に広げる。この周波数チャープした長パルス光を、増幅器によって十分増幅させた後に、パルス圧縮器で短パルス化する方法のこと。			9	
タ行	ティーチング	座標教示、多点教示することでロボットの動作軌跡を決定する。			55	
タ行	ディスクレーザー	YAG結晶を薄いディスク状にしたものを発振媒体として用いる半導体レーザー励起YAGレーザー発振器。ディスク背面が直接冷却面と接触しているため、冷却効率が高く、熱レンズ効果をほとんど無視できるまでに低く抑えることが可能。これにより高品質のレーザーを得ることができる。			9	

レーザー関連 用語集

50音	言語・記号	意味・語源等	類義語	反意語	参照頁	その他
タ行	テラードブランク溶接	板厚の違う2枚の鋼板をレーザー溶接し、材料の軽量化や歩留り向上を図る溶接加工。			14,15,58	テラードブランクと呼ばれることもある。
タ行	テラードブランク	プレス成形用の素材(ブランク材)を複数の材料を突き合わせ溶接し、一体でプレス成形する工法。			14,15,58	
タ行	テレコム技術	大容量通信に求められる高度技術。高度な光通信技術の利用によって今日の通信インフラが成立しているため、特に光に関する技術を指すことが多い。			37,38,39,40,44,45	
ハ行	波長多重	一本の光ファイバーを用いて多くの情報を送るための技術。波長の数に相当する光ファイバーが存在しているような取り扱いが可能である。	WDM		35,38,39	
ハ行	波長変換結晶	高非線形性(入力光強度に対して出力強度が線形でない)を有する結晶のこと。高非線形性を利用して波長変換が出来る。			49	
ハ行	パルス	不連続な光であり、その不連続光にエネルギーが集約されているもの。QCWの違いとしては、そのパルスにエネルギーが集約されるため、パルス設定時の尖塔出力値(ピーク出力)はCW設定時の出力より遥かに大きくなる。		CW、QCW	8,9,18,25,31,33,35,36,37,49,52,53	
ハ行	パルス幅	レーザーをパルス照射しているときのパルス1shot当りのレーザー照射時間。			1,8,9,18,26,27,31,36,52,54	
ハ行	光ファイバー	屈折率の高いコアとそれを取り囲むクラッド構造により、光をコアに閉じ込めて伝送する伝送路。可撓性や光とファイバーの長い相互作用長、横モードの制限などの効果が得られる。			9,13,35,37,38,39,40,51,52,53,54	
ハ行	ヒューム	溶接又は切断時の熱によって蒸発した物質が凝集されて微粒子となったもの。			20	
ハ行	ビーム品質	光源が有するビームの集光性能品質。理論的な最小集光ビーム径に対して、どの程度大きくなるかを表すM ² 、出射ビーム半径と出射ビーム広がり角度の積で表されるBPP(Beam Product Parameter)などで表される。	M ² 、BPP		9,33,34,35,37,38,39,49,52,53,55	
ハ行	ビームプロファイル	レーザービームの空間的な強度分布。加工性に影響する。	横モード分布		41,45	
ハ行	ファイバーレーザー	光ファイバー自体を発振(光増幅)媒質とするレーザー発振器。従来のレーザーに比べ熱の影響を受けにくく、光学系部品が少ないため、安定した高いビーム品質を出力できる。単にファイバー内にレーザー光を伝送させる方式ではない。		FOLD 固体レーザー	1,2,7,9,13,15,16,17,21,25,31,33,34,35,36,37,38,39,47,48,49,57,59,63,64	
ハ行	フォトンプロジェクト	平成9年度から5年間行われた高品質ビームの発生技術並びにそれを用いる先進的な計測技術及び加工技術を確立するプロジェクト。			7,49	
ハ行	ポインティングスタビリティ	位置の安定性。			18	
ハ行	ポリゴンミラー	多角形の構成ライン上がミラー機能を有するもの。			17	
マ行	マーキング	品質管理やトレーサビリティを目的に商品に文字・数字・パターンなどを印字・表示すること。最近レーザーで印字したりするレーザーマーキングが普及している。			9,16	

レーザー関連 用語集

50音	言語・記号	意味・語源等	類義語	反意語	参照頁	その他
ヤ行	誘導ラマン散乱	光ファイバ中で発生する非線形現象の一つ。光が物質に入射した時、固体や分子の振動・回転等により光が変調され、その結果生じたうなりが、もとの波長とは異なる波長の光として観測されること。SRS。			54	
ヤ行	横シングルモード	その光線の持つ基本伝搬モード。もっとも集光性を上げることが出来る。		横マルチモード	49	
ラ行	リモート溶接	リモートとは遠隔操作ということであり、従来は目的とする溶接軌跡(経路)に沿って加工ヘッドが移動することにより行っていた溶接を、レーザー光を溶接対象物から離れた位置から複数のミラーにより走査して高速で溶接する方式。			48,63	
ラ行	量子欠損	レーザー発振する際、波長の短い励起光から長波の長い発振光への変換が生じる。長波長化すると光子のエネルギーが減少し、その差が量子欠損となる。レーザー発振に不可避な損失。損失したエネルギーは発熱の原因となる。			37	
ラ行	励起	増幅媒質にエネルギーを与え、光増幅可能な状態にすること。			7,913,20,25,35,36,37,40,41,44,47,54	
ラ行	ロバスト	外乱や設計誤差などの不確定な変動に対して、特性が変動しないこと。			7,13,16,22,27,33,34,48,51	
ワ行	ワーキングディスタンス	加工工学系から加工点までの距離。一般的に長い方がシステム設計がしやすい。			47,48	
ABC	B.P.P.	Beam Product Parameterの略。 レーザーのビーム品質を表す指標でありB.P.P.と標記するのが一般的。ビーム広がりが角(半角)と最小スポット径(半径)との積であり単位はmm/mrad。値が小さいほどビーム品質は高い。 			15	
ABC	CO ₂ レーザー	CO ₂ ガスを放電により励起して得られる波長10.6μmの遠赤外線レーザーで、比較的集光性に優れ、数十kW程度の大出力が得られるため、切断・溶接・熱処理加工に用いられる。波長が長いため、石英ファイバーは透過できずミラーによる伝送となる。			2,7,9	
ABC	CW	時間的に切れ目のない連続光。Continuous Waveの略。		パルス	8,9,31,41,46,47,52,53	
DEF	DDL	Direct Diode Laserの略。レーザーダイオードから出力された光線を束ね、集光し、直接レーザー加工対象物に照射出来る光源のこと。			14,23	
DEF	Er	エルビウム (Erbium) は原子番号 68 の元素。元素記号は Er。希土類元素の一つ(ランタノイドにも属す)。			40	
DEF	FPD	flat panel display フラットパネルディスプレイの略 従来主流であったブラウン管に対し奥行きが短く画面が平面であるディスプレイのこと。例えば液晶ディスプレイ・プラズマディスプレイ・有機ELディスプレイがある。			58	
DEF	fs	フェムト秒。1フェムト秒は10 ⁻¹⁵ 秒であり、真空中の光の速度で0.3μmしか進めない。			9,37	
GHI	HOM	Higher Order Mode マルチモードファイバーの高次モードの一つを選択的に励振して活用する手法。			36	
JKL	LMA	Large Mode Area fiber ファイバーに発生する非線形効果の低減をはかるためにコア径を大きくしたファイバー			36	

レーザー関連 用語集

50音	言語・記号	意味・語源等	類義語	反意語	参照頁	その他
MNO	M ²	エムスクエア。レーザーのビーム品質を表す指標。理想的に高い品質を有するビームの場合、測定限界などを含んだ数値は1.1程度となる。BPPと比較すると、M ² の数値は波長に依存せず、該当する波長に於けるビーム品質の善し悪しを容易に評価できる。	BPP		37	
MNO	MOPA	Master Oscillator and Power Amplifier 種となる光源を後置する増幅器で増幅した構成の光源。			36	
MNO	Nd	希土類元素の一つ。ネオジウム。YAG等との組み合わせにより、波長約1μmのレーザーを発生する増幅媒質として産業応用に不可欠であった。			34,38,40	
MNO	NC加工機	NCとはNumerical Control(数値制御)の略で、あらかじめ数値化した位置データに加え作業順序や内容を記憶させておき(NCプログラム)、数値制御装置に読み取らせて自動的に加工する機械。			55	
MNO	NEDO	日本の産業技術とエネルギー・環境技術の研究開発及びその普及を推進する我が国最大規模の中核的な研究開発実施機関。			49	
STU	Tm	ツリウム (Thulium) は原子番号 69 の元素。元素記号は Tm。希土類元素の一つ(ランタノイドにも属す)。			36,40	
YZ	YAG	イットリウムとアルミニウムの複合酸化物(Y ₃ Al ₅ O ₁₂)から成るガーネット構造の結晶のことで、Yttrium Aluminum Garnetの略。主に固体レーザーの発振用素子として、結晶構造内のイットリウムのうち数%をネオジウム元素で置き換えたNd:YAGが多く用いられ、波長1064nmを発振する。			1,2,7,9,38,40,47	
YZ	YAGレーザー	結晶(Yttrium Aluminum Garnet)中に混合された微量のネオジウムを励起して得られる波長1.06μmの近赤外線レーザーで、石英ファイバーを透過するため、CO ₂ レーザーと比較して3次元加工が容易である。励起源として、アークランプもしくは、より発振効率の高いLD(半導体レーザー)が用いられる。			1,2,7,9,47	
YZ	Yb	イッテルビウム (Ytterbium)。原子番号 70 の元素。元素記号は Yb。希土類元素の一つ(ランタノイドにも属す)。イッテルビウム。Ndと比較すると、ほぼ同じ波長でレーザー発振し、かつ量子欠損が少なく高効率である。故に、レーザー材料はNdからYbに置き換えが進みつつある。			34,36,37,40	
YZ	YDF	Ybドープファイバー。コアにYbをドープしており、波長1~1.1μm付近を増幅可能な光ファイバー。波長0.92あるいは0.98μmで励起できるので、量子欠損が少ない。	YDFA		38,39	

—禁無断転載—

システム技術開発調査研究 19-R-9

テーマ名 高品質化した加工用レーザーと開拓される新加工領域に関する調査
(要旨)

平成20年3月

作成 財団法人機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目4番28号
TEL 03-3454-1311

委託先名 財団法人製造科学技術センター
東京都港区虎ノ門三丁目11番15号
SVAX TTビル3階