

システム技術開発調査研究

20-R-7

産業用次世代レーザー応用・開発に関する  
調査研究

報 告 書

— 要 旨 —

平成21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JKA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「産業用次世代レーザー応用・開発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21年3月

財団法人機械システム振興協会

## はじめに

アメリカのサブプライム問題に端を発した現在の100年に1度と言われている経済低迷は、貿易差益で生計を生業としていた日本の企業にも少なからず打撃を与え、生産縮小を余儀なくされ、ひいては労働者の削減まで行う状況に陥っています。資源を持たない我が国としては、製造製品生産は大きな糧であり、不可欠な経済活動の一環であることから、早急に日本の得意とする基礎技術を前面に出し、効率的かつ高付加価値な製品を製造していく必要が改めて認識されています。

そのような中、当財団では、上述の課題解決に向け、また、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おり、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います。そこでは、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。

本来、得意技術であった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）」、「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、CO<sub>2</sub>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、その原因としては、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巻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。

このような状況の中から、昨年度、レーザー加工技術のあるべき姿を模索し、本年度は、「産業用次世代レーザー応用・開発」と銘打ち、産業界が真に欲する加工技術。レーザー加工技術の高度化と新たな日本発の次世代レーザー加工技術スペックを明らかにし、国策として取り組むべき、レーザー開発の方向性を示す提案を作成するため多角的な検討を進めてまいりました。

本調査研究の内容が、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の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・研究機関、企業の関係各位のご尽力に感謝申し上げます。

平成21年3月

財団法人製造科学技術センター

## 委員長あいさつ

光・レーザー技術がいま急速な進展をみせており、ものづくり技術を変革し、新しい産業基盤技術となりつつあります。この技術が現下の不況を乗り越え、新しい経済・産業社会構築の切り札となるものと期待されています。

例えば、ファイバー強化複合材料が、これまでの長い雌伏の期間を経ていよいよ産業のメイン部材として航空機、船舶、自動車等に導入されています。画期的に軽量化された電気自動車の実現には必須の技術であり、その加工ツールとしてはレーザーをおいてほかにありません。

太陽電池の普及がいま世界的な潮流として、風力、バイオエネルギー等とともに新しいエネルギーシステムの中核デバイスとなりつつあります。薄膜型太陽電池の高機能、高効率化、製造プロセスの省エネ・省資源化等発展途上の技術であり、これのプロセス技術のツールとしてレーザーに大きな期待が寄せられています。

レーザーピーニングは、現在軍用ジェットエンジンのブレード表面処理や原子炉圧力容器のような超高性能仕様が必要な部位に使用されていますが、レーザー技術の進歩とともに汎用産業技術として広く用いられようとしています。

このような状況をふまえ、欧米では最先端のレーザー・光技術の開発を戦略的な大型国家プロジェクトとして、ここ20年継続して実施しています。このような中、ものづくりを国富の源泉とするわが国においてこそ、新しいものづくり技術の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、新しい時代の産業構造を構築することが必要です。

レーザー・光技術は、ものづくり技術をはじめとして、光による診断・治療、光による植物育成制御、レーザー核融合発電、長距離エネルギー伝送等々、あらゆる産業の基盤技術として新しい時代の産業を構築するものと期待されています。

今回の「産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査研究」は、現下の不況を克服し、新しい時代に向けての国家戦略の策定が必要なきに、まさに時宜を得たものであります。19世紀は蒸気の時代と言われ、産業革命により社会が一変しました。20世紀は電気の時代として電力、電信電話、コンピューター、コミュニケーションに代表される高度産業社会を構築してきました。21世紀は光の時代として、省エネ、省資源でクリーンな環境をもった新しい文明を築くときです。新しい科学技術、産業技術は光・レーザー技術を中心に展開されようとしています。

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を始めとする大学、企業関係者に感謝の意を表するとともに、本報告書が今後わが国のレーザー・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21年3月

産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査委員会  
委員長 中井貞雄

## 目 次

序	
はじめに	i
委員長あいさつ	ii
目 次	
1. 調査研究の目的	1
2. 調査研究の内容	2
3. 調査研究の実施体制	5
4. 成果の要約	10
第1章 レーザーによる異種材料の接合・切断	14
1.1 要 約	14
1.2 まとめ	14
第2章 局所表面改質	16
2.1 要 約	16
2.2 まとめ	17
第3章 反応制御	20
3.1 要 約	20
3.2 まとめ	21
第4章 次世代レーザー加工システム	22
4.1 要 約	22
4.2 自動車生産におけるレーザー利用：リモート溶接の現状と将来	23
4.2.1 リモート溶接の現状	23
4.2.2 リモート溶接の将来	25
4.3 太陽電池製造におけるレーザープロセスの現状と将来	28
4.3.1 レーザープロセスの現状	28
4.3.2 レーザープロセスの将来	31
4.4 レーザーを用いた材料組織制御の現状と将来	32
4.4.1 均一組織を前提とした組織制御の現状	32
4.4.2 組織の空間的不均一性	32
4.4.3 レーザー局所加熱法の誕生	33
4.4.4 ファイバーレーザー援用局所加熱システム	33
4.4.5 レーザー局所加熱システムの問題点と課題	34
4.4.6 レーザー局所加熱法の将来展望	35
4.5 短波長半導体レーザーの現状と将来	36
4.5.1 短波長半導体レーザーの開発の背景	36
4.5.2 短波長半導体レーザーの用途	37
4.5.3 ディ스플레이向け青色半導体レーザー	38
4.6 高出力半導体レーザー・ファイバディスクレーザーの現状と将来	40
4.6.1 高出力半導体レーザーの現状	40
4.6.2 ファイバディスクレーザーの現状	41
4.6.3 高出力半導体レーザー・ファイバディスクレーザーの将来	43
4.7 高効率・高輝度LD光源の現状と将来	44
4.7.1 加工用レーザー装置の市場動向	44

4. 7. 2	高出力LD光源の開発動向	45
4. 7. 3	高効率・高輝度LD光源の将来の開発の方向性	46
4. 8	ファイバーレーザーの現状と将来	48
4. 8. 1	CWシングルモードファイバーレーザーの現状	48
4. 8. 2	ファイバーレーザーの将来	50
4. 9	高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源の 現状と将来	51
4. 9. 1	ファイバーレーザーの現状と主な加工応用分野	51
4. 9. 2	高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源の 実現に向けた課題	52
4. 9. 3	高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源の将来	54
4. 10	グリーンレーザーの現状と将来	55
4. 10. 1	はじめに	55
4. 10. 2	グリーンレーザーの必要性	55
4. 10. 3	グリーンレーザー光源の現状	56
4. 10. 4	オールジャパン体制への課題と希望 (基盤技術の脆弱さと新しい技術)	60
4. 10. 5	課題	63
4. 11	まとめ	64
第5章	産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査のまとめ	67
5. 1	要約	67
5. 2	国内の関連プロジェクト	68
5. 2. 1	過去のレーザー関連プロジェクト	68
5. 2. 2	最近のレーザー関連プロジェクト	72
5. 2. 3	関連プロジェクトの総括	73
5. 3	まとめ — 調査結果と技術開発提案	74
5. 3. 1	レーザー技術開発の必要性	74
5. 3. 2	異種材料の接合切断	75
5. 3. 3	局所表面改質	76
5. 3. 4	反応制御	77
5. 3. 5	次世代レーザー加工システム	78
5. 3. 6	おわりに	78

## 1. 調査研究の目的

わが国の製造業は、高度な生産財と高精度高効率加工技術、鉄鋼等の高特性部材技術などに支えられているといえる。これらの生産財としての機器装置および技術の中核となるものは、今後とも発展させ、また新たな革新的な機器および技術の開発・導入も必要不可欠である。さらに、国の施策として「現在は利用されにくくなっているが、将来技術革新されることを期待し、これを維持すること」も重要である。例えば現在の工作機械は利便性の追求によって国際競争力が高くなっているが、この状況に甘んじ開発の手を緩めると、外国で革新技術が現れた場合に競争力が失われる可能性がある。また、鑄造技術や熱処理技術のように、いったんは技術の発展が停滞したが産業で必要なため、技術の保全が行われて今日開花しようとしている技術もある。このような状況の中で、発展と保全の双方が要求され期待されている、加工ツール（生産財）・加工方法（技術）は早急に取り上げなければならない課題の一つである。

高出力化に向けたわが国のレーザー開発・レーザー加工技術開発は、炭酸ガスレーザーの開発およびそれを用いた金属の切断加工で、また、固体レーザーはNd:YAGレーザーとそれを用いた溶接技術で始まった。その後、半導体のステッパー用のエキシマレーザー、F2レーザーを経て、完全固体のレーザー開発で終わっている状況である。半導体レーザー励起のYAGレーザーおよびファイバーレーザーは、フォトンコストの低下と加工品質の向上が両立し、自動車等の製造に活用されるまでになった。金属薄板の切断や穴あけ、接合などの加工ツールとしては、世界的にみても優位な状況である。しかし、レーザー光が持つ局所加熱特性や高強度単波長性を利用した加工に対しては、技術的未成熟から、開発への挑戦がとまっているといえる。

今やレーザー加工は工作機械と併用した生産財として認識され、世界各国で製造現場に導入されつつある。2000年前後に世界中で開発競争が行われた加工用レーザー開発とレーザー加工技術開発はわが国が辛うじて先行したが、それから数年過ぎた今ドイツを中心に巻き返しにかかっており、自動車業界をはじめその応用展開を精力的に進めている。ドイツ飛躍の要因の一つにファイバーレーザーの高出力化ならびに低コスト化が挙げられる。わが国はドイツ同様自動車産業という巨大産業を抱えるばかりでなく、電子機器分野でも大きな市場を持っているが、これらの分野における優位性を維持・強化していくには、加工対象物や加工方法に適した高出力・高品位レーザー発振器の開発が必要と考える。また、化学系・医薬系分野ではわが国は、ドイツ・アメリカに大きく引き離されている。これらの諸国に追従し追い越すためには、高品位な光（レーザー光）を併用した新たなプロセスを開発し技術の確立を図る必要がある。

日本の製造業が置かれた状況を鑑みると、高い性能を持つ製品（例えば、自動車や家電製品、医薬品など）を生産する高い技術を維持強化する方向が望ましく、「レーザー加工」はこれに大きく貢献可能な技術であるといえる。「レーザープロセスでなければ出せない」製造現場での加工とは何か、それを実現するために解決しなければならない課題は何か、その課題を解決する方法は何かを明確にし、その解決に向けた開発を行うことが日本の製造業の発展に不可欠と考える。レーザー光が持つ「高エネルギー密度（局所加熱）」「単波長」と材料が持つ「光透過性・吸収性」「熱移動」などの特性を活かし、レーザー加工の新たな展開・方向性について調査することは、産業政策を議論するうえでも不可欠と考えられる。

そこで、レーザー発振器・伝送・波長変換・コヒーレンス向上等のレーザー光技術、材料技術、熱制御技術に対する原理原則に立脚したレーザー加工技術の問題点の抽出、解決方法ならびに、出口の産業応用やその波及効果について十分な精査を行い、わが国の製造業を支える基盤技術の一つであるレーザー加工関連技術の高度化を図ることを目的とした調査研究を実施した。

## 2. 調査研究の内容

レーザー利用加工に関連する技術は、レーザー発振器・伝送技術および加工技術に加え材料との相互作用が関連した複雑な体系であり、応用する状況によって求められる技術が異なり、技術展開先も異なってくる。複雑系に属するこれらの技術群を同時に議論することには、非常に意味があり技術の発展と応用には不可欠と考えられる。

具体的には、開発が望まれるレーザー加工の応用先としては「金属とポリマーなどの異種材接合」が最も多く、その他は現状では産業規模や環境への影響は大きくないと考えられる。また、「局所表面改質」は、レーザー加工の急速加熱急冷という得意な点を活用した応用であり、今後の需要が期待できる。また、フォトン（光の波長）と物質の化学結合は、エネルギーレベルが等しく、それらを一致させることでさまざまな状態計測が可能となってきた。この技術を高エネルギー加工分野で応用すれば、「化学反応制御」が可能となる可能性があり、バイオ・ケミカル分野にイノベーションをもたらす可能性がある。

そこで上記の視点から市場や技術の発展性、技術的壁の高さ等を考慮し、①異種材料接合・切断、②局所表面改質、③反応制御、④前記3テーマに適切な次世代レーザー加工システム、についてレーザー利用加工に関連する新たな展開先や現状の課題（開発課題）とその解決方法を、レーザー発振器・伝播部材と技術・加工技術と部材の専門家が集まったワーキンググループで議論するとともに、離散的情報間の関連性を「応答曲面法」等の整理法を用い、より明確化し、産学官それぞれの立場から調査する。さらに、調査結果の意義や方向性に関して、より多くのユーザーの意見を聞き、効果的な研究開発に結びつけるためにワークショップを開催し、産業界への開発提案を積極的に進め、また、表層に現れづらい世界の次世代レーザー最先端技術の調査を行う。以下に各テーマで議論する内容を記す。

### ① 異種材料接合・切断

金属と金属の接合は、薄板ではほとんど欠陥なく、実用上十分な強度が得られ、スーパーメタル等新素材をのぞいて完成域に入っていると言える。これに対し、自動車業界や家電業界を中心に「金属とポリマー」あるいは「ポリマーとポリマー」といった異種材料の高品位接合や、CFRP（炭素繊維強化複合材料）など複合材料の切断等の需要が高まってきており、これを達成可能な技術が求められている。すなわち、これまではポリマー系接着剤が用いられてきたが、初期強度や経年劣化などの問題があり、これを解決する新たな技術が必要となってきている。ポリマー系複合材切断では、ウォータージェットが活用されているが、微細加工には対応しきれていない。これらの問題を解決可能な技術としてレーザー加工が挙げられる。レーザー光の持つ「高集光性」「物質依存透過性・吸収性」を活用すれば、短時間で高強度接合や切断が可能と考えられる。そこで、異種材料接合・切断に顕在化する課題を解決するために、レーザー発振器（例えば波長可変レーザーの高出力かつ高品位化）や加工方法（急速冷却、波長選択など）、材料（光透過性・吸収性改善など）に求められる特性を多角的に調査し、明確な課題の提示を行う。

- a. 異種ポリマーのレーザー接合に関する調査
- b. 金属とポリマーのレーザー接合に関する調査
- c. CFRPなど複合材料のレーザー切断に関する調査



## ② 局所表面改質

革新的部材開発が進む一方で、これらを実用化する際に接合や形状加工の際に部材の特性が失われることがあり、大きな壁となっている。また、省エネルギー・高効率システム運用の観点から、形状設計では回避が困難な部材表面の「摩擦・摩耗・潤滑、エロージョン・コロージョン（トライボロジー関連技術）」諸問題等解決が求められている。これらに共通した課題は母材の特性を失わない表面改質である。3次元局所性が求められ、これに適した入熱方法と材料の冷却方法を検討開発する必要があると考えられる。このため、レーザー発振器（例えば高出力かつ高繰り返し、波長選択性）や加工方法（ビーム操作方法や入射方法、雰囲気制御など）と、材料に求められる特性（比熱、伝熱などの熱特性）との相関を考え、技術の到達点を多角的に調査し、明確な課題の提示を行う。表面改質による部材性能の向上と、生産性の向上とが両立可能となれば、安価な材料（例えば鋳物）を自動車等の輸送機器向けすべり軸受けや歯車等の主要機械要素に利用され、安全性向上とコスト低減が達成可能と考える。

- a. 機械的特性向上のための表面改質に関する調査
- b. 電磁気特性の表面近傍の傾斜化に関する調査
- c. 光学特性（屈折率など）の傾斜分布技術に関する調査

## ③ 反応制御

レーザー光の特徴として、単色性、高強度性、パルス性、可干渉性が挙げられるが、これらの特性を活かした技術としては低出力レーザーによる計測・観測技術が近年格段に進歩した。また、エレクトロニクス分野で重要なフォトリソグラフィ等の微細加工技術にもレーザーは重要な役割を果たしている。しかしながらこれら以外の化学、バイオ等の分野では現在の所レーザーを利用する特筆すべき技術は用いられていない。光化学反応は熱化学反応と異なり物質へのエネルギーの供給に媒体を必要とせず直接対象物質にエネルギーを供給できたり、混合物の中の特定の物質だけにエネルギーを供給することもできることから、本質的に省エネルギープロセスを構築することが可能な手法である。このように優れた手法であるにもかかわらず現在まで化学、バイオ等の分野で光化学反応があまり用いられてこなかったのは従来の光源では対象物質への照射を十分に制御できなかったことが大きな原因であると考えられる。本調査では、レーザーが有する特徴が反応に及ぼす影響、および現在行われているレーザー利用について調査し、化学、バイオ等の分野における明確な研究課題の提示を行う。レーザー光は物質に対する照射を、エネルギー的、エネルギー量的、時間的、および空間的に制御して行うことができるため、本調査で提示する課題についての研究を行うことにより、化学、バイオ等の分野へのレーザー利用を通じ、他国に先んじて従来プロセスを高選択的省エネルギープロセスに変える技術革新を可能とし、それにより国際競争力の強化を図ることができる。

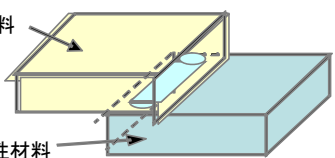
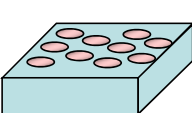

- a. レーザーの特徴（波長、光強度等）とそれを利用した化学反応制御に関する調査
- b. レーザー利用（バイオ・バイオマス、メディカル、製造業等）に関する調査

#### ④ 次世代レーザー加工システム

レーザー発振器はこれまでさまざまな形態のものが提案・開発され、実用化されてきた。しかし、調査で提案する3つのテーマに適應するレーザー発振器は確立されていない。現状のレーザー発振器をベースに「高出力」かつ「高品位」かつ「高波長選択性」を満たし、さらに、将来広く産業活用され、現状のレーザー加工機に取って代わるレーザー発振器を開発する必要がある。このようなポテンシャルを有するレーザー発振器として「半導体レーザー」と「ファイバーレーザー」が挙げられる。現状考えられる究極の加工用レーザー発振器は「半導体レーザー」と考えられるが、前記3条件を満たすには発振媒体の冷却方法や高品位化法に対する周辺技術レベルが低いと考えられる。このような半導体レーザーの出現までの間、産業を支えるツールとして「ファイバーレーザー」が挙げられるが、高出力化や高品位化、高波長選択性には、解決しなければならない課題が数多く存在する。これらの課題の解決には、レーザー発振器（本体）開発、システム化技術開発、プロセス技術（応用）開発の三位一体による研究開発が必要である。そこで、次世代レーザー加工システムのコアとなるファイバーレーザー発振器を実現するために壁となっている課題、その課題の解決方法と実現性、解決に必要な周辺技術などを多角的に調査する。次世代レーザー加工システムの開発が進めば、ファイバーレーザーをはじめとする高出力高品位レーザーを産業界に現状よりも導入しやすい状況が生まれ、幅広い分野での活用が期待できる。

- a. 次世代固体レーザー・加工システム開発に関する調査
- b. 次世代固体レーザー・加工システムが開く次世代市場に関する調査

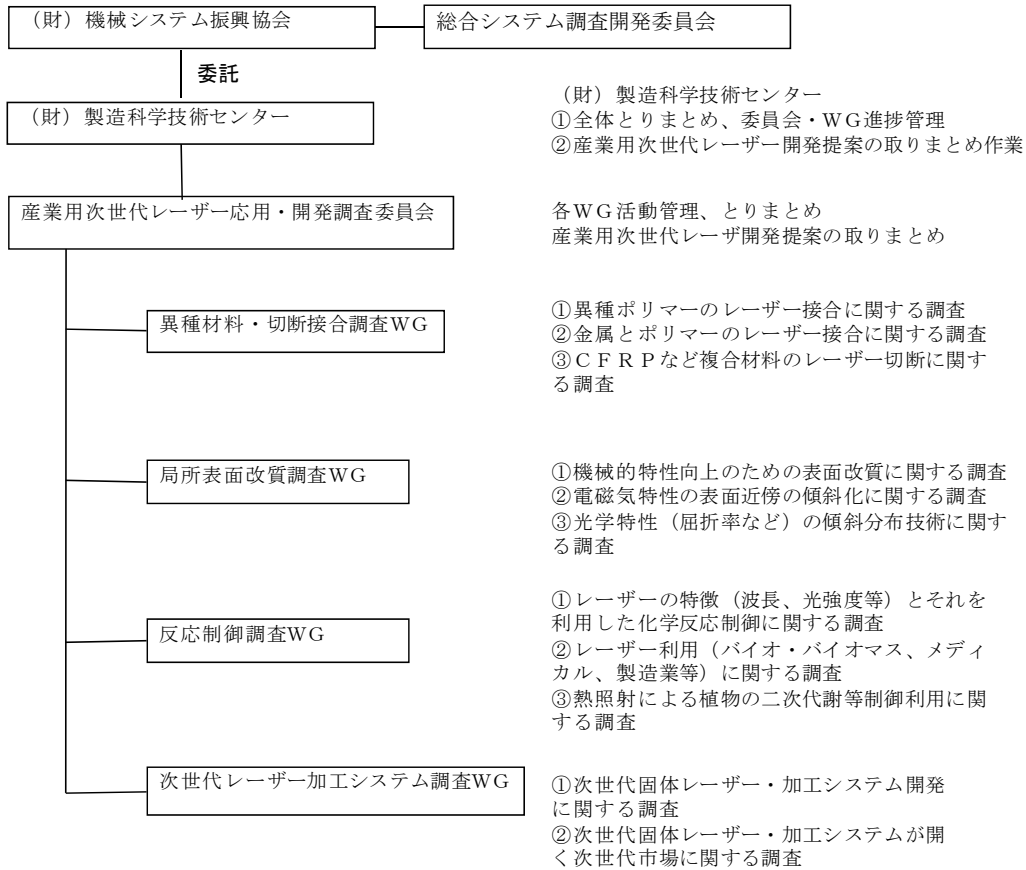
### 調査における四テーマの提案内容

<p>異種材料接合・切断: 自動車や家電など</p>  <p>光透過性材料 光吸収性材料</p> <p>光透過性・吸収性の差を利用した 異種ポリマー接合</p> <p>金属とポリマーの接合ポリマー間の接合プロセスの開発を目指す</p>	<p>局所表面改質: 自動車・電子デバイス向け</p>  <p>表面に性質の異なる部位のパターン形成により摩擦特性を制御</p> <p>表面に異種化合物や別構造を形成</p> <p>部材の急速加熱冷却により微細構造を固定化し、高い電磁気特性を膜状物質として生成する</p> <p>高効率放熱・除熱により微細組織を固定化</p>
<p>反応制御: 酵素や触媒の機能を利用した生化学向け</p>  <p>バイオ応用 反応促進エネルギー源として光を用いた高効率反応</p> <p><math>R-C-OH</math> <math>R'-C=COOH</math> → <math>OH-R''-C=COOH</math> ケミカル応用</p> <p>わずかな差である有機系共有結合を、光エネルギーで切断し、かつ、新たな結合を誘発させる</p>	<p>次世代レーザー発振機システム:</p> <p>ポリマー接合や局所表面改質、反応制御向け</p> <p>ポリマー接合や局所表面改質、反応制御は、現状のレーザー発振機では応用範囲に限界がある。これを打破するには「高出力」「高品位」「易波長選択性」が同時に実現可能な次世代レーザーを開発する必要がある</p>

### 3. 実施体制

#### (1) 委員会・WGの設置

本調査研究は(財)機械システム振興協会の委託を受け、(財)製造科学技術センターが実施した。本調査研究の実施体制は、(財)機械システム振興協会内に「総合システム調査開発委員会」を、(財)製造科学技術センター内に、本調査に関する各分野の企業・研究所・大学の専門家なる委員会・WGを設置して、検討を行った。また、必要に応じ専門家による講演、ワークショップ等による技術交流を行った。



#### (2) 実施日程

(平成20年度)	平成20年							平成21年		
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
産業用次世代レーザー応用・開発調査委員会	●			●		●				●
合同ワーキンググループ (WG1～WG4)						●		●		
異種材料接合・切断に関する調査 (WG1)		●	●	●	●	●		●	●	
局所表面改質に関する調査 (WG2)			●	●	●	●	●	●	●	
反応制御に関する調査 (WG3)			●		●	●	●	●		
次世代レーザー加工システムに関する調査 (WG4)		●	●	●	●	●	●	●	●	
ワークショップ開催								◎		

(3) 委員会名簿

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 総合研究機構 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 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 デジタルものづくり研究センター 招聘研究員	志 村 洋 文
委 員	東北大学 工学研究科 教授	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	大 和 裕 幸

産業用次世代レーザー応用・開発調査委員会・ワーキンググループ（WG）名簿

①委員会

委員長	中井 貞雄	光産業創成大学院大学 学長
副委員長	植田 憲一	電気通信大学 レーザー新世代研究センター センター長 教授
幹事	加納 誠介	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 表面機能デザイン研究グループ グループ長
幹事	塚本 雅裕	大阪大学 接合科学研究所 講師
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
	片山 聖二	大阪大学 接合科学研究所 接合機構研究部門 レーザ接合機構学分野 教授
	水野 一彦	大阪府立大学大学院 工学研究科 物質・化学系専攻 応用化学分野 教授
	神成 文彦	慶應義塾大学 理工学部 電子工学科 教授
	新井 武二	中央大学 研究開発機構 教授
	大内秋比古	独立行政法人 産業技術総合研究所 環境化学技術研究部門 循環型高分子グループ 主任研究員
	新納 弘之	独立行政法人 産業技術総合研究所 光技術研究部門 レーザー精密プロセスグループ グループ長
	上野 保	東成エレクトロビーム(株) 代表取締役社長
	森 清和	日産自動車(株) 車両生産技術本部 車両技術開発試作部 総括・企画グループ エキスパートリーダー
	北側 彰一	日立造船(株) 事業・製品開発センター 技術研究所 生産技術グループ 主席研究員
	石出 孝	三菱重工業(株) 長崎研究所 次長
	安井 公治	三菱電機(株) 開発本部 開発業務部 企画グループ マネージャー
	藤田 雅之	(財) レーザー技術総合研究所 主任研究員

②異種材料・切断接合調査WG

主査	片山 聖二	大阪大学 接合科学研究所 接合機構研究部門 レーザ接合機構学分野 教授
幹事	新納 弘之	独立行政法人 産業技術総合研究所 光技術研究部門 レーザー精密プロセスグループ グループ長
委員	川人 洋介	大阪大学 接合科学研究所 助教
	山岡 弘人	(株) I H I 技術開発本部 生産技術センター 生産技術開発部 主任研究員
	毛利 政博	旭化成ケミカルズ(株) 感光材技術開発部 主査

水戸岡 豊	岡山県工業技術センター 機械系技術部 金属材料グループ 技師
久保田修司	東洋紡績(株) 機能性ポリマー開発センター
清水 信彦	東レ(株) オートモーティブセンター 課長
宮城 雅徳	(株)日立製作所 日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 接合プロセスユニット
高橋 佳弘	日立化成工業(株) 研究開発本部 新材料応用開発研究所
中村 浩	(株)ホリカワ 技術部 技術課 主任
中井 出	パナソニック(株) 生産革新本部 生産技術研究所 機械・レーザ加工技術開発グループ
三田 雅昭	三菱化学(株) 技術・生産センター 技術部 加工組立技術開発室長
三瓶 和久	(株)レーザックス 取締役

### ③局所表面改質調査WG

主 査	新井 武二	中央大学 研究開発機構 教授
幹 事	加納 誠介	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 表面機能デザイン研究グループ グループ長
委 員	佐々木信也	東京理科大学 工学部 第一部 機械工学科 教授
	西 幸二	(株)ジェイテクト 研究開発センター 材料技術研究部 材料研究室 主担当
	黒崎 博史	住友スリーエム(株) 技術本部 コーポレートリサーチプロセスラボラトリー
	塚本 武志	(株)日立製作所 日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 接合プロセスユニット
	小相澤 久	古河電気工業(株) 生産技術部 第1生産技術開発センター センター長
	岡本 達樹	三菱電機(株) 先端技術総合研究所 加工制御システム技術部 専任

### ④反応制御調査WG

主 査	水野 一彦	大阪府立大学大学院 工学研究科 物質・化学系専攻 応用化学分野 教授
幹 事	大内秋比古	独立行政法人 産業技術総合研究所 環境化学技術研究部門 循環型高分子グループ 主任研究員
委 員	松村 健	独立行政法人 産業技術総合研究所 ゲノムファクトリー研究部門 植物分子工学研究グループ グループ長
	佐々木政子	東海大学 名誉教授
	濱崎 勇二	(株)島津製作所 分析計測事業部 産学官・プロジェクト推進室 副室長(部長)
	山田 稔	東海染工(株) 開発顧問

#### ⑤次世代レーザー加工システム調査WG

主査	神成 文彦	慶應義塾大学 理工学部 電子工学科 教授
幹事	塚本 雅裕	大阪大学 接合科学研究所 講師
委員	三浦 永祐	独立行政法人 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 パワーレーザーグループ 研究グループ長
	柴柳 敏哉	大阪大学 接合科学研究所 准教授
	藤本 靖	大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター パワーフォトンクス研究部門 助教
	吉田 実	近畿大学 理工学部 電気電子工学科 准教授
	湯浅 広士	㈱東芝 生産技術センター 光応用システム技術センター 研究主幹
	樽井 大志	日産自動車㈱ 車両生産技術本部 車両技術開発試作部 製品・新技術開発グループ 主担
	前田 純也	浜松ホトニクス㈱ 中央研究所 材料研究室 部員
	助田 祐志	日亜化学工業㈱ 第二部門 事業企画本部 LD事業企画部 係員
	福田 直晃	日立造船㈱ 事業・製品開発センター 製品開発部 主任技師
	藤崎 晃	古河電気工業㈱ 研究開発本部 ファイテルフォトンクス研究所 光伝送部品開発部 光新領域チーム マネージャー
	安井 公治	三菱電機㈱ 開発本部 開発業務部 企画グループ マネージャー

#### ⑥オブザーバ

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
経済産業省	産業技術環境局	研究開発課
独立行政法人	新エネルギー・産業技術総合開発機構	機械システム技術開発部

#### ⑦事務局

瀬戸屋英雄	(財) 製造科学技術センター	専務理事
笹尾 照夫	(財) 製造科学技術センター	調査研究部 部長
間野 隆久	(財) 製造科学技術センター	調査研究部 課長

#### 4. 成果の要約

##### (1) 委員会

産業用次世代レーザー加工・システムに関する調査を実施した結果、今後の製品や製造プロセスの環境負荷低減に向けた取り組みとして、以下に示す開発項目を推進すべきであると提案する。

複合材料や異種材料など熱的・光学的物性が異なる材料を一体化させた部材の接合や切断、薄膜内部の結晶制御（レーザーアニーリング）、部材表面の大気中でのドライ洗浄（レーザークリーニング）、マイクロ流路や植物内での化学反応の制御による光化学反応・生合成促進、ならびにこれを支える半導体レーザーの高輝度高出力化が重要である。

これらの加工技術に共通した項目は、「多波長レーザーのハイブリッドプロセス」であり、これにより光化学反応を利用した新規プロセス＝「脱真空プロセス」と「脱液体洗浄プロセス」を実現し、環境負荷低減製品の製造や製造現場の環境負荷低減を図る。

その加工技術の有効性を示すために、市場性や環境性を考慮して、CFRP（炭素繊維強化複合材料）の切断、金属とポリマーの直接接合、薄膜太陽電池用アモルファスシリコンの部分結晶化、金属部材のクリーニングと接着・被膜形成、マイクロ流路を利用した化学反応制御と植物を利用した生合成を行うことを提案する。これらの加工検証は、既存のレーザー発振器(高次高調波の利用やオプトパラメトリックオシレーターなど)を利用して行う。

さらに、これらのプロセスに利用することを想定した半導体レーザーの高輝度・高出力化とその利用に適した光学系（集光光学系や波長変換など）の開発も実施することを提案する。

##### (2) 異種材料・切断接合調査WG

日本の製造業が優位性を維持強化していくために不可欠なレーザー加工技術は、金属・ポリマーや複合材等の切断・接合技術が挙げられる。とくに、アプリケーション側である産業ニーズから、CFRP（炭素繊維強化複合材料）を中心とした複合材料の精密切断・接合の強い要望がある。これは、自動車における各種材料による重量軽減効果が、CFRPでは現状製造コストが高いものの重量軽減には最も効果的であることに由来する。現在のレーザー装置では性能不足だが、高出力・高品位モード性ならびに波長選択制御性が実現すれば、革新的な製造技術として高精度なレーザー切断やレーザー接合が可能であることが判明した。この他にも産業応用波及分野としては、航空・宇宙・船舶、電機・電器・電子等の構造材や部材の加工が有力である。本WGでは、必要なレーザー加工システムのスペックの具体的な数値化検討ならびに各種熱可塑性樹脂における異種接合、樹脂と金属との接合に関してのベンチマーキングを行った。

##### (3) 局所表面改質調査WG

表面改質と一言で表現されるが、その種類はさまざまある。本調査研究で扱う表面改質は局所における表面改質で、「新しい材料の出現や従来材料の用途の多様性に対応して、材料本来の性質を維持しつつ材料の表面および表層の局所的性質をレーザーによって改善し、それによって材料表面の性質や物性値を変化させて、当該材料に新しい機能を付加する加工法である。」と定義する。すなわち、局所表面改質は表面近傍の組成や構造を母材と異なる状態にし、母材の特性を補う特性を付与するための加工法である。この手法には、加熱または熔融プロセス、蒸発・蒸着プロセス、光化学プロセスなどがある。それぞれの手法に対して均一プロセスと不均一プロセス



があるが、大量生産を効率よく行うことを念頭に、工業プロセスとしては均一プロセスが適応されてきた。加熱溶融では、炉を用いるヒーター加熱がその代表である。不均一加熱方法としては誘導加熱やプラズマ加熱、レーザー加熱がある。蒸発・蒸着プロセスでは、均一プロセスとしてプラズマやCVD（化学蒸発法）・PVD（物理蒸発法）がある。不均一プロセスとしてはレーザー法があり、PLD（パルスレーザー蒸着法）がある。光化学プロセスでは、均一プロセスとして、エキシマレーザーを用いたリソグラフィ法やメッキやこれを応用した電解研磨方法などがある。不均一プロセスではあまり行われることはない。

均一プロセスを選択するかどうかは、前後の工程にもよるが、大半は前述したように大量生産を念頭に置いた場合、均一プロセスは不均一プロセスよりも効率がよいと考えられてきたからであるが、近年、不均一プロセスのほうが、多くの場合にメリットがあることがわかってきた。例えば、半導体業界が利用する多層膜の加熱処理や部材の一部のみの浄化などがそうである。

では、不均一プロセスの中でどのような不均一性が求められているのか。以下に一例を示す。一つは外部表面付加処理で、材料表面に異種材料を層として付加するレーザー処理、すなわち箔や異種フィルムをデポジション（蒸着）させるプロセスで、境界接合、境・界面での不均一になされる拡散がキーとなるプロセスである。また、材料表面溶融処理で、同種、または異種材間の融合により層を生成するレーザー処理であり、合金化、パウダー添加、表面硬化など、材料自身または材料間の溶融・拡散と冷却の状態が場所によって異なるプロセスである。さらには、内部表層変質処理があり、母材内部表層の形状・構造・配列を変化させるレーザー処理（表面突起生成、極表層内変質処理など）で、波長依存エネルギー（フォトンエネルギー）吸収による材料表層部に変化を与えるプロセスなどがある。これらのプロセスは、次に挙げるような効果を狙った処理法である。一つは機械特性の向上で、耐摩耗性、耐熱性、表面硬化を目的とする処理であり、光学特性を変化させる際に、表面から材料の厚さ方向への構造傾斜分布で、光学濃度、屈折率、透過率、吸収率に差異をつける処理である。また、物理的性質の変化を意図した処理で、密度、磁界・磁区の方向性、物性値、構造に変化をつけ、電気的・磁気的特性や熱的特性を内部と異なったものにする。さらに、化学的性質の変化があり、耐酸性、耐熱性、耐蝕性、構造・配列などを母材と異なるものにする処理である。

レーザーのエネルギー密度は加工光学系により広範囲に変化させることができるため、プロセスコントロールが他と比べて容易である。

加工に適用するために、レーザー光の集光技術はこれまでも多く研究されてきた。パルス化によって空間的・時間的エネルギーの制御で実証加工が行われ、広く接合や切断に用いられてきた。表面局部を除去するレーザーマーキングもその例といえる。

この他にも、レーザーでは発振波長の違いからくる加工特性も試されてきた。加工される材料物質による光吸収は波長依存性をもつため、赤外光だけでなく可視光や紫外光も利用されてきた。レーザープロセスは異なる波長を用いることができるという特徴がある。一般にレーザープロセスは、波長とエネルギー密度（Energy Fluence）とでプロセスをコントロールしている。このため、レーザープロセスでは、この発振波長とエネルギーの使い分けが重要となってきた。

#### (4) 反応制御調査WG

従来のレーザーの産業利用技術ではレーザーを単なる機械的加工用「熱源」として捉え、レーザーの最も重要な「光エネルギー」としての性質は殆ど無視されてきた。化学、バイオ等の分野でのレーザー利用を図るためには、この光エネルギーを利用する光化学反応の特徴と、レーザー光の特徴をうまく融合させて反応制御を効果的に行う技術の確立が必要である。

反応制御を効果的に行うために求められるレーザーの最低限の性能としては、紫外可視光領域での波長可変性と高出力化である。これにより光エネルギーをコントロールした反応を行うことが可能となる。また、レーザー装置が広く用いられるためには、可搬性、易操作性、低価格化、高効率化、高信頼性等の諸性能も求められる。

レーザー光の特徴としては、①単波長性、②高強度性、③指向性・光制御性、および④パルス性が挙げられるが、これらの特徴を有効に用いた化学、バイオ等の分野での利用を行うためには、①単波長性を用いた反応制御、②パルス性を用いた時間制御、③レーザー反応開発生産システムからなるレーザー反応技術の開発を行う必要がある。また、表面反応技術と医療・バイオへの利用技術の開発により、レーザー反応技術を実際の産業に直接的に利用するための技術の確立を図ることが必要である。表面反応技術としては、特に高分子材料のアルキル部位、およびアリアル部位の表面化学修飾法を行うための汎用性の高い方法論の創出が不可欠である。

これらの技術開発により、現在わが国が国際的優位性を保っている光化学反応とその利用に関する研究を産業に活かした、環境調和型レーザー・光化学プロセスに関する技術革新を進めさまざまな分野で使いこなすことにより国際競争力の先進性と強化を図ることができる。

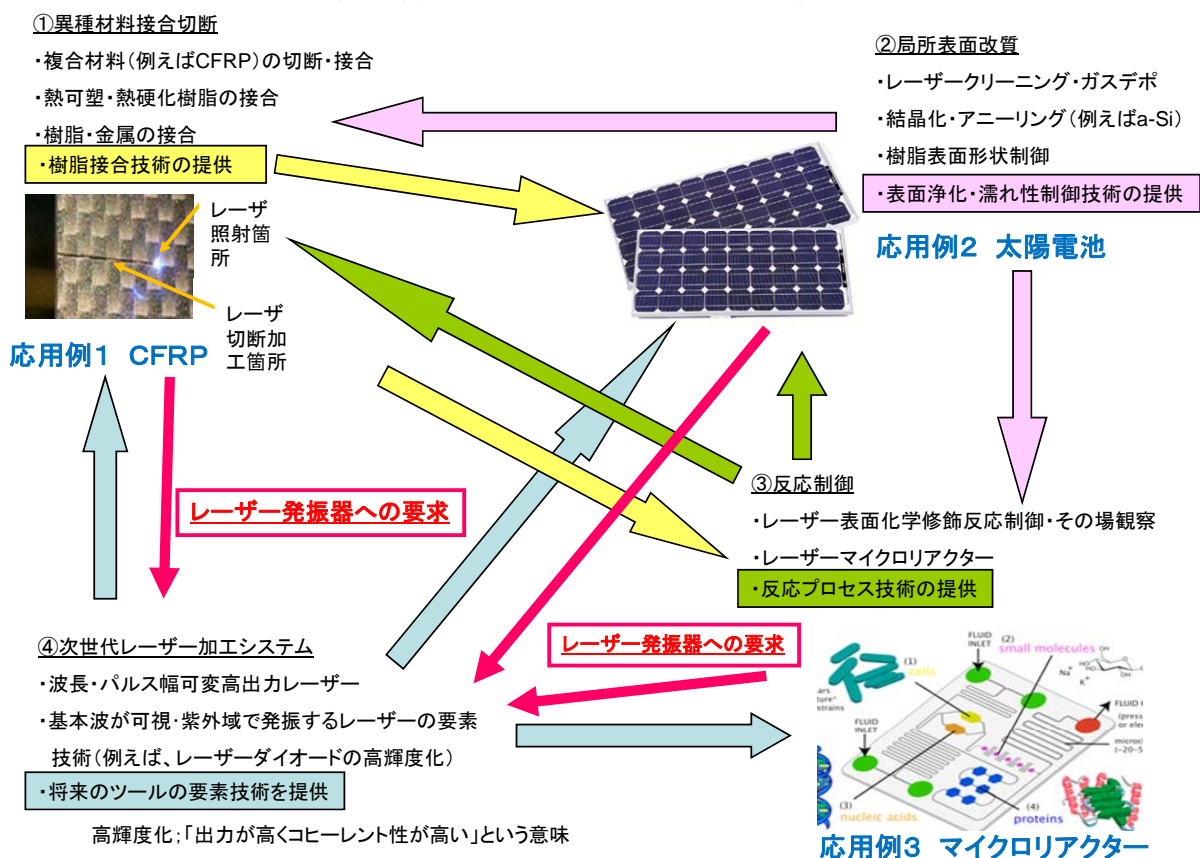
#### (5) 次世代レーザー加工システム調査WG

現在のレーザー加工システムおよびその主要装置であるレーザーの現状を把握するために自動車製造、太陽電池製造および材料組織制御におけるレーザー加工プロセスについて調べた。自動車製造では、近年クローズアップされている環境・省エネルギー問題への対応技術として軽量化、グローバル化によってもたらされた競争激化への対応技術として低コスト化、そして、少子化により将来起こる労働力不足への対応技術として省人化を実現するためにレーザー加工技術がキーテクノロジーであることが判明した。太陽電池開発は、エネルギー問題が深刻化する現代社会において急務である。次世代の太陽電池は、製造コスト削減および発電効率増大が必須課題であり、そのためには、レーザーによる接合、切断、薄膜剥離、アニール技術の高度化等次世代レーザー加工システムの必要性が明らかとなった。材料の軽量化や高機能化を実現するためには必要な結晶方位を有する結晶粒のみを成長させる、あるいは不必要な結晶粒を消滅させるといった材料組織制御技術が必要となる。本材料組織制御は、高ビーム品質のレーザー光源とそれに付随する周辺技術の開発によって達成されることがわかった。

次に次世代レーザー加工システム開発に必要不可欠である半導体レーザーの現状と将来について調べた。日本オリジナルの技術である青色半導体レーザーに代表される短波長半導体レーザーは、ディスプレイへの適用とともに将来的には加工への応用も期待されている。現在すでに加工に適用されている近赤外光半導体レーザーについては、更なる高輝度化と高ビーム品質化のための技術開発を進めファイバーレーザーへの励起光源としての利用はもちろんのこと、将来、ものづくりで世界をリードするためには、直接加工へ適用する大出力ダイレクト半導体レーザーの開発を促進すべきであることが明らかになった。レーザーによる加工にとって重要な材料へのレーザー光の吸収率は、レーザー光の波長に依存する。材料によっては、可視光あるいは紫外光レ

ザーによって高度な加工が可能となる。また、微細・微小な材料の接合・切断およびアニーリングには照射時間（パルス幅）の制御が重要となる。つまり、波長変換技術の高度化とともにレーザー照射時間の制御技術の高度化も進めていかなければならない。吸収率制御技術の高度化を実現するために波長変換でなく、基本波でグリーン等の可視光を出力可能なレーザー媒質が日本オリジナルの技術で開発されていることも判明した。このレーザー媒質で作られたファイバーは、十分な耐候性を有している。日本オリジナルの技術である短波長半導体レーザーによって励起すれば、高ビーム品質な可視光レーザーを創製することができ、短波長半導体レーザーの高輝度化のための技術開発を行えば高出力かつ高ビーム品質なレーザーを世界に先駆けて開発可能であることがわかった。

### ワーキンググループ検討課題とアプリケーション例の関係図



## 第1章 レーザーによる異種材料の接合・切断

### 1.1 要約

日本の製造業が優位性を維持強化していくために不可欠なレーザー加工技術は、金属・ポリマーや複合材等の切断・接合技術が挙げられる。とくに、アプリケーション側である産業ニーズから、CFRP（炭素繊維強化複合材料）を中心とした複合材料の精密切断・接合の強い要望がある。これは、自動車における各種材料による重量軽減効果が、CFRPでは現状製造コストが高いものの重量軽減には最も効果的であることに由来する。現在のレーザー装置では性能不足だが、高出力・高品位モード性ならびに波長選択制御性が実現すれば、革新的な製造技術として高精度なレーザー切断やレーザー接合が可能であることが判明した。この他にも産業応用波及分野としては、航空・宇宙・船舶、電機・電器・電子等の構造材や部材の加工が有力である。本章では、必要なレーザー加工システムのスペックの具体的な数値化検討ならびに各種熱可塑性樹脂における異種接合、樹脂と金属との接合に関してのベンチマーキングを行った。

#### (ABSTRACT)

Laser materials processing for the industrial applications is significant for the cutting and joining of metals, polymers and composite materials. Especially, the needs of an industrial side strongly demand the high precision cutting and joining of CFRP (carbon fiber reinforced plastic), because CFRP, which is expensive at the moment though, is expected to be the most effective materials to reduce the weight of transportation vehicles among the other promising materials. It turns out by the investigation that materials processing utilizing a laser with a prospective high-power, high-beam-quality and high-wavelength-selectivity is fascinating for the advanced materials processing, whereas the performance of the current laser equipments is not satisfactory for these applications. The next generation lasers will be applicable to not only motor vehicles but also aerospace, vessels, electronics and electrical engineering. In this chapter, benchmarking is actively performed to define the specifications of the lasers for applications to the joining of metals and plastics or dissimilar plastics, or to the cutting of CFRP, etc.

### 1.2 まとめ

金属と金属の接合は、適切な溶接条件の下で、薄板ではほとんど欠陥なく、実用上十分な強度が得られ、スーパーメタル等新素材を除いて完成域に入っていると言える。これに対し、自動車業界や家電業界を中心に「金属とポリマー」あるいは「ポリマーと異種ポリマー」といった異種材料の高品位接合や、重工業分野ではCFRPなど複合材料の切断の需要が高まってきており、これを達成可能な技術が求められている。すなわち、異種材料接合では、これまではポリマー系接着剤が用いられてきたが、接合に長時間を要し、強度のばらつきや品質管理・経年劣化などの問題があり、これを解決する新たな技術が必要となってきた。

一方、ポリマー系複合材の切断ではウォータージェットが活用されているが、高品位な微細加工には対応しきれていない。これらの問題の解決可能な技術としてレーザー加工が挙げられる。レーザー光の持つ「高集光性による超高パワー密度」、「高柔軟性」、「物質依存透過性・吸収性」、「高速加熱・急冷処理」などを活用すれば、短時間で高強度接合や切断が可能と考えられる。そこで、異種材料接合・切断に顕在化する課題を解決するために、レーザー発振器（例えば連続発振と超高出力の重畳化かつ高品位化）や加工方法（急速加熱・急速冷却、波長選択など）、

材料（光透過性・吸収性改善など）に求められる特性を多次的に調査した結果として、課題の提示を行う。

### CFRPの接合・切断

#### 加工時間の比較と従来技術の問題点

CFRPの切断	加工時間
ウォータージェット	0.3 ~ 1 m/分
レーザー	1 ~ 20 m/分

CFRPの接合	加工時間
接着剤	20分~1日(硬化時間)
レーザー	0.5 ~ 10 分/m

**ウォータージェット切断の問題点:**

- 対象ワークに**砥粒**を含む水分が付着
- 表面汚染などの弊害が起きやすい
- 厚物部材不可
- 切断面が荒く(後処理(表面研磨)が必要)
- アプローチラインが必須**

**レーザー切断の優位性:**

- 非接触加工
- 厚物部材可
- 平坦な切断面(短パルス化)
- アプローチラインは不要**
- タクトタイム短縮可能**

貫通穴加工(直径 2 mm)

ウォータージェット切断  
http://www.cfdesign.co.jp/product/index01.html

レーザー照射箇所  
**紫外線レーザー(波長355nm)**

レーザー切断加工箇所  
SEM写真(約50μm幅)

### 異種材料接合・切断

#### 研究開発項目

- CFRPの切断**
  - 厚物部材高速切断法の開発
  - 切断表面高品位化技術の開発
- CFRPと金属の接合**
  - 各種熱可塑性樹脂における異種接合(データベース化)
  - 熱可塑性と熱硬化性樹脂(FRP)の接合
  - 樹脂と金属(アルミや高張力鋼)との接合(直接、エラストマ等利用法、傾斜法、ラビットプロシニング、表面活性化等)
  - CFRP(熱可塑性)同士または金属との接合**
  - 樹脂とガラスとの接合、
  - ガラスと金属との接合

**必要なレーザー特性**

- 高輝度・高集光性
- シングルモード
- 短パルス、
- ハイブリッド化(高輝度・短パルス高繰返し)
- 高輝度・高集光性
- 低反射率(高吸収率)
- 高効率
- 矩形形状(幅広)
- 低価格化

評価・分析方法

- 強度等の特性評価法の確立(規格化・標準化への取組)
- 部材耐久性の指針確立
- モニタリング、シミュレーション

## 第2章 局所表面改質

### 2.1 要約

表面改質と一言で表現されるが、その種類はさまざまある。本調査研究で扱う表面改質は局所における表面改質で、「新しい材料の出現や従来材料の用途の多様性に対応して、材料本来の性質を維持しつつ材料の表面および表層の局所的性質をレーザーによって改善し、それによって材料表面の性質や物性値を変化させて、当該材料に新しい機能を付加する加工法である。」と定義する。すなわち、局所表面改質は表面近傍の組成や構造を母材と異なる状態にし、母材の特性を補う特性を付与するための加工法である。この手法には、加熱または熔融プロセス、蒸発・蒸着プロセス、光化学プロセスなどがある。それぞれの手法に対して均一プロセスと不均一プロセスがあるが、大量生産を効率よく行うことを念頭に、工業プロセスとしては均一プロセスが適応されてきた。加熱熔融では、炉を用いるヒーター加熱がその代表である。不均一加熱方法としては誘導加熱やプラズマ加熱、レーザー加熱がある。蒸発・蒸着プロセスでは、均一プロセスとしてプラズマやCVD（化学蒸発法）・PVD（物理蒸発法）がある。不均一プロセスとしてはレーザー法があり、PLD（パルスレーザー蒸着法）がある。光化学プロセスでは、均一プロセスとして、エキシマレーザーを用いたリソグラフィ法やメッキやこれを応用した電解研磨方法などがある。不均一プロセスではあまり行われることはない。

均一プロセスを選択するかどうかは、前後の工程にもよるが、大半は前述したように大量生産を念頭に置いた場合、均一プロセスは不均一プロセスよりも効率がよいと考えられてきたからであるが、近年、不均一プロセスのほうが、多くの場合にメリットがあることがわかってきた。例えば、半導体業界が利用する多層膜の加熱処理や部材の一部のみの浄化などがそうである。

では、不均一プロセスの中でどのような不均一性が求められているのか。以下に一例を示す。一つは外部表面付加処理で、材料表面に異種材料を層として付加するレーザー処理、すなわち箔や異種フィルムをデポジション（蒸着）させるプロセスで、境界接合、境・界面での不均一になされる拡散がキーとなるプロセスである。また、材料表面熔融処理で、同種、または異種材間の融合により層を生成するレーザー処理であり、合金化、パウダー添加、表面硬化など、材料自身または材料間の熔融・拡散と冷却の状態が場所によって異なるプロセスである。さらには、内部表層変質処理があり、母材内部表層の形状・構造・配列を変化させるレーザー処理（表面突起生成、極表層内変質処理など）で、波長依存エネルギー（フォトンエネルギー）吸収による材料表層部に変化を与えるプロセスなどがある。これらのプロセスは、次に挙げるような効果を狙った処理法である。一つは機械特性の向上で、耐摩耗性、耐熱性、表面硬化を目的とする処理であり、光学特性を変化させる際に、表面から材料の厚さ方向への構造傾斜分布で、光学濃度、屈折率、透過率、吸収率に差異をつける処理である。また、物理的性質の変化を意図した処理で、密度、磁界・磁区の方向性、物性値、構造に変化をつけ、電氣的・磁氣的特性や熱的特性を内部と異なったものにする。さらに、化学的性質の変化があり、耐酸性、耐熱性、耐蝕性、構造・配列などを母材と異なるものにする処理である。

レーザーのエネルギー密度は加工光学系により広範囲に変化させることができるため、プロセスコントロールが他と比べて容易である。

加工に適用するために、レーザー光の集光技術はこれまでも多く研究されてきた。パルス化によって空間的・時間的エネルギーの制御で実証加工が行われ、広く接合や切断に用いられてきた。表面局部を除去するレーザーマーキングもその例といえる。

この他にも、レーザーでは発振波長の違いからくる加工特性も試されてきた。加工される材料物質による光吸収は波長依存性をもつため、赤外光だけでなく可視光や紫外光も利用されてきた。レーザープロセスは異なる波長を用いることができるという特徴がある。一般にレーザープロセスは、波長とエネルギー密度（Energy Fluence）とでプロセスをコントロールしている。このため、レーザープロセスでは、この発振波長とエネルギーの使い分けが重要となってきた。

さらに、レーザー装置を含む製造プロセスの側からの要求を基に、本調査研究では表面改質に限定して調査した。詳細は後述するが、従来からのエネルギー分野や一般プラント等で問題となるエロージョン・コーロージョン対策としての表面改質、クリーンエネルギー分野における薄膜太陽電池を事例としたアモルファス材料の多結晶化、輸送機器向けモータ部材などの接着向け表面浄化・活性化など、母材の特性が失われることなく表面近傍や表面の部分的な改質を効率よく行うことで、低環境負荷製品が生み出されるばかりでなく、その製造プロセスそのものの低環境負荷を図ることができる。これは、製品の広義の性能向上でありプロセスのコスト低減につながることから、製造現場から熱望されている技術である。これらの対策はレーザー以外のプロセス装置でも達成可能なものもあるが、成功の見込みや効果の大きさからレーザーによるプロセスが選択される可能性が高い。また、局所アニーリングや局所クリーニングは、レーザーが得意とするものであり、他のプロセスでは得がたいものである。以下に、それぞれのプロダクトやプロセスの特異性とレーザーを用いたメリットなどの調査結果を報告する。

## (ABSTRACT)

Surface treatment and modification, in this section, identified the allowance process on and near the surface to arrange the composition and structure. The methods already applied using furnace heating or several vapor processing and chemical reaction. Laser processing is also investigated for these treatments to control the energy density. In the case of laser process, the photon energy is different with their wavelength. Therefore, in future laser surface treatment the multicolor laser processing becomes key-technology. In this section several surveys for surface treatment and modification to industrial application requiring from manufacturing including laser processing.

In conclusion, we find newly laser surface treatment and modification effective to laser annealing for thin film type solar-cell to generate micro-crystals from the amorphous silicon, and to laser cleaning for metal surface to coat another materials or adhesion materials.

## 2. 2 まとめ

今後のものづくりを考えた場合、高機能製品の需要や安価な汎用品の需要もあるが、消費者や社会の要請として、低環境負荷製品の需要が現状よりも増加すると考えられることから、これに対応した製品製造を中心に考える必要がある。このような製品として、太陽電池等電子デバイス、自動車等機械部品、プラント等に使用する機器を例として、その製造の現状と課題、課題の解決方法などを調査した。

その結果、太陽電池等電子デバイス、特に薄膜デバイスや多層膜デバイスにおいて、膜の結

晶制御がデバイス性能と強く関連があり、これを低環境負荷プロセスで製造することに、わが国の勝ち残りの道があることがわかった。成膜後の薄膜に対して、膜内の結晶性を制御するには極めて繊細な短入熱コントロールが必要となる。光学的特性の異なる多成分系多層膜ではなおいっそう結晶性制御は複雑となる。現在行われている真空装置内でのプラズマ照射による成膜で結晶性を制御する方向もあるが成膜速度はきわめて遅い。これに対して成膜後に結晶制御ができればプロセス速度を上げることが可能となる。技術開発が進めば、大気プラズマによる質の悪い膜から高特性膜を作ることも夢ではなくなる。これに対応可能なプロセスとして「レーザーアニーリング」が有効であることがわかった。これは現在研究室レベルで検討され始めている単一レーザーによるアニーリングを高度化させた技術として位置づけられ、多波長をほぼ同時に照射し、熱拡散を時間的空間的に制御してアモルファス層から結晶核の生成と結晶成長を行う技術である。吸収波長域が異なる多層膜ではそれぞれの吸収帯にあった波長を照射し結晶化を実現しようというものである。この技術の完成により、薄膜太陽電池デバイスのみならず広く薄膜電子デバイスにこの技術を応用し「脱真空プロセス」を達成しようというものである。

自動車等機械部品の製造においては、部材の直接接合も重要な技術であるが、高強度を必要としない部位では、高速高信頼接着が有用な手段となる場合がある。例えばモーター機材への磁石の接着などがそうである。現在は加工部材の表面を覆っている油等を大量の有機溶剤で洗い流し、接着剤を接着面に均一に塗布した後に接着している。この工程の後接着面以外には防錆目的で再度油を塗布しなおす場合がある。接着剤からこのプロセスを見ると、過剰な接着剤塗布となるが、接着強度の信頼性の観点からは面内均一塗布がなされている。この一連の工程が乾式プロセスで実現できれば、既存プロセスの環境負荷が著しく低減できるばかりでなく、少量の接着剤塗布により十分な接着強度を確保可能であることがわかった。この実現のために「レーザークリーニング」の技術開発が必要である。これは赤外域レーザーの熱エネルギーによる作用と紫外域短パルスレーザーによる化学結合への直接作用効果の相乗効果で表面を浄化する方法である。さらに、レーザーによって活性化された表面に接着剤をスポットで数点滴下し、場合によっては紫外域レーザーを照射して接着させるなどのことを行い、信頼性の高いドライプロセスを実現する方法である。これらのプロセスが達成できれば、部品製造における「脱溶液プロセス」が実現可能となるばかりでなく、高信頼接着技術にも発展・展開できると考えられる。

プラント等に使用する機器では、複雑な形状の部品が過酷な使用条件にさらされる場合が多く、加工性と耐環境性の両立が求められる。耐摩耗性や耐熱性耐食性を求められる部材では、環境負荷低減を目指した更なる性能向上・高効率運転が求められると考えられる。加工性や機械的強度を追求する反面これらの特性も求めるため、部材本来の特性を活かしつつ、その部材が持たない耐環境性(硬さと耐熱性・耐酸化性の両立)を、達成する必要がある。このためには通常クラディング等の被膜形成を部分的に行う。しかし、通常の方法では、熱の影響が大きくひずみが発生する、熱膨張・熱収縮による割れが発生する、酸化被膜等が発生するといった問題が発生することがわかった。これらの課題を解決する方法として、ガス気流中でのレーザー照射が有効であることが明らかとなった。紫外域パルスレーザーで表面酸化物や油脂成分を蒸散させつつ、可視・赤外域のレーザーで微粒子状物質を焼結させながら堆積膜を形成させる、レーザー表面活性化とレーザーアシストデポジションの「ハイブリッドプロセス」が重要であると



いえる。これにより環境負荷低減を実現可能な製品を、環境負荷が少ない不活性ガスシールによる大気環境化で達成することが可能となる。

以上のように、本WGにより以下のことが明らかとなった。

- ①薄膜電気電子デバイスの結晶制御をレーザーで達成する「レーザーアニーリング」を、薄膜太陽電池セルで検証した。
- ②接着剤の有効利用を目的とした機械部品の局所洗浄をレーザーで達成する「レーザークリーニング」を、自動車部品で検証した。
- ③機器部品の部分的特性（耐熱耐食耐摩耗性）向上をレーザーで達成するレーザークリーニング+レーザーアシストデポジションを、タービンブレード部材で検証した。

これらの事例はいずれも環境負荷低減に貢献する製品であり、さらにこれを製造する工程においても環境負荷の低減が図れる。また、市場性もあり社会に与えるインパクトも大きい。今後、これらの事例に対する具体的な対象物や技術の検証方法、達成目標などを検討し、技術開発につなげていくことが重要である。

### 第3章 反応制御

#### 3.1 要約

従来のレーザーの産業利用技術ではレーザーを単なる機械的加工用「熱源」として捉え、レーザーの最も重要な「光エネルギー」としての性質は殆ど無視されてきた。化学、バイオ等の分野でのレーザー利用を図るためには、この光エネルギーを利用する光化学反応の特徴と、レーザー光の特徴をうまく融合させて光反応制御を効果的に行う技術の確立が必要である。

光反応制御を効果的に行うために求められるレーザーの最低限の性能としては、紫外可視光領域での波長可変性と高出力化である。これにより光エネルギーをコントロールした光反応を行うことが可能となる。また、レーザー装置が広く用いられるためには、可搬性、易操作性、低価格化、高効率化、高信頼性等の諸性能も求められる。

レーザー光の特徴としては、①単波長性、②高強度性、③指向性・光制御性、および④パルス性が挙げられるが、これらの特徴を有効に用いた化学、バイオ等の分野での利用を行うためには、①単波長性を用いた反応制御、②パルス性を用いた時間制御、③レーザー反応開発生産システムからなるレーザー反応技術の開発を行う必要がある。また、表面反応技術と医療・バイオへの利用技術の開発により、レーザー反応技術を実際の産業に直接的に利用するための技術の確立を図ることが必要である。表面反応技術としては、特に高分子材料のアルキル部位、およびアリアル部位の表面化学修飾法を行うための汎用性の高い方法論の創出が不可欠である。

これらの技術開発により、現在わが国が国際的優位性を保っている光化学反応とその利用に関する研究を産業に活かした、環境調和型レーザー・光化学プロセスに関する技術革新を進めさまざまな分野で使いこなすことにより国際競争力の先進性と強化を図ることができる。

#### (ABSTRACT)

The most important feature of lasers is that the lasers are excellent source of "photon energy". However, in present industry, lasers are mostly used as a "heat source" for mechanical processing of materials, and the most important property of lasers as a source of "photon energy" is usually neglected. To develop new applications of lasers in chemical and biological industries by using lasers as "photon energy" sources, it is necessary to develop new methodologies for the efficient use of characteristics of laser light to photochemical reactions.

To achieve efficient control of photochemical reactions using lasers as "photon energy" source, the most important requirements of the lasers is to control wavelength and power in UV-VIS region, which enables to conduct photochemical reactions with controlled photon energy. In addition, to extend the use of lasers in various fields, the following requirements are necessary: i. e., portability, easy operation, low price, high efficiency, high reliability.

Generally, laser light has four characteristics; (i) monochromacity, (ii) high intensity, (iii) high directivity and manipulation of light, and (iv) intermittence. To develop new applications of lasers in chemical and biological industries using these characteristics of lasers, it is necessary to conduct the following researches; (i) photochemical reaction control using monochromacity, (ii) time-controlled photolysis using pulsed lasers, and (iii) development of experimental and production system for

laser-induced reactions. Furthermore, it is necessary to develop technologies for using laser reactions in industry, particularly by developing novel photochemical surface modifications and application in chemical and biological industries. As for the development of surface reactions, establishment of general methodologies for surface chemical modification of alkyl and aryl moieties of polymer materials is indispensable.

By developing new environmentally-benign photochemical processes for industry, it is possible to have advantage over international competition in industry.

### 3. 2 まとめ

レーザー・光化学プロセスの開発は、さまざまな産業のグリーン化と高度化を図る観点から重要な研究開発課題と考えられる。特にレーザーの利用がされてこなかった化学、バイオ等の分野でのレーザー利用は、レーザーの新たな利用開発と共にマーケットの拡大に繋がり、わが国の産業の発展に不可欠である。

従来のレーザーの産業利用技術では、レーザーを単なる機械的加工用「熱源」として捉え、レーザーの最も重要な「光エネルギー」としての性質は殆ど無視されてきた。化学、バイオ等の分野におけるレーザー利用には、光エネルギーを利用する光化学反応の特徴と、レーザー光の特徴を融合して利用するイノベーションが必須である。

レーザー光の特徴としては、①単波長性、②高強度性、③指向性・光制御性、および④パルス性が挙げられるが、これらの特徴を効果的に利用する化学、バイオ等の分野での利用を行うためには、レーザーの、①単波長性を用いた反応制御、②パルス性を用いた時間制御、③レーザー反応開発生産システム、からなるレーザー反応技術開発が必要である。また、レーザー反応技術を実際の産業に直接的に利用するために、表面反応技術と医療・バイオへの利用技術の確立が必要である。表面反応技術としては高分子材料のアルキル部位、およびアリアル部位の表面化学修飾を行うための汎用性の高い方法論開発が重要である。この手法を用いて材料表面に求める性能を発現するための化学構造を容易に導入することが可能となる。医療・バイオへの利用技術としては、レーザー照射により植物内の二次代謝の反応を制御し、医薬品等の有用物質の合成・蓄積を行うこと、および新たな原理によるPDTの開発が考えられる。

光化学反応を制御するためには、紫外可視光領域での波長可変性と高出力化が可能な光源が不可欠で、この性能をもつ可能性の高い光源としてレーザーが適している。従って、光反応制御に必要なレーザーの基本的性能は紫外可視光領域での波長可変性と高出力化になる。これにより光エネルギーをコントロールした光反応を行うことが可能となる。また、広く用いられるためには、可搬性、易操作性、低価格化、高効率化、高信頼性等の性能も求められる。

以上述べた各種の技術開発と共に、現在わが国が国際的優位性を保っている光化学反応とその利用に関する研究を産業に活かした、環境調和型レーザー・光化学プロセスに関するイノベーションが進むことにより、さまざまな産業分野での国際競争力の強化を図ることができる。

## 第4章 次世代レーザー加工システム

### 4.1 要約

現在のレーザー加工システムおよびその主要装置であるレーザーの現状を把握するために自動車製造、太陽電池製造及び材料組織制御におけるレーザー加工プロセスについて調べた。自動車製造では、近年クローズアップされている環境・省エネルギー問題への対応技術として軽量化、グローバル化による競争激化への対応技術として低コスト化、そして、少子化により将来起こる労働力不足への対応技術として省人化を実現するためにレーザー加工技術がキーテクノロジーであることが判明した。太陽電池開発は、エネルギー問題が深刻化する現代社会において急務である。次世代の太陽電池は、製造コスト削減および発電効率増大が必須であり、レーザーによる接合、切断、薄膜剥離、アニール技術の高度化等、次世代レーザー加工システムの必要性が明らかとなった。材料の軽量化や高機能化を実現するためには必要な結晶方位を有する結晶粒のみを成長させる、あるいは不必要な結晶粒を消滅させるといった材料組織制御技術が必要となる。本材料組織制御は、高ビーム品質のレーザー光源とそれに付随する周辺技術の開発によって達成されることがわかった。

次に次世代レーザー加工システム開発に必要不可欠である半導体レーザーの現状と将来について調べた。日本オリジナルの技術である青色半導体レーザーに代表される短波長半導体レーザーは、ディスプレイへの適用とともに将来的には加工への応用も期待されている。現在すでに加工に適用されている近赤外光半導体レーザーについては、更なる高輝度化と高ビーム品質化のための技術開発を進め、ファイバーレーザーへの励起光源としての利用や将来ものづくりで世界をリードするために、直接加工へ適用する大出力ダイレクト半導体レーザーの開発が必要であることが判明した。レーザー加工にとって重要な材料へのレーザー光の吸収率は、レーザー光の波長に依存する。材料によっては、可視光あるいは紫外光レーザーによって高度な加工が可能となる。また、微細・微小な材料の接合・切断およびアニーリングには照射時間（パルス幅）の制御が重要となり、波長変換技術の高度化とともにレーザー照射時間の制御技術の高度化も進めていかなければならない。吸収率制御技術の高度化を実現するために波長変換でなく、基本波でグリーン等の可視光を出力可能なレーザー媒質が日本オリジナルの技術で開発されていることも判明した。このレーザー媒質で作られたファイバーは、十分な耐候性を有している。日本オリジナルの技術である短波長半導体レーザーによって励起すれば、高ビーム品質な可視光レーザーを創製することができ、短波長半導体レーザーの高輝度化のための技術開発を行えば、高出力かつ高ビーム品質なレーザーを世界に先駆けて開発可能であることがわかった。

#### (ABSTRACT)

Advanced laser materials processing systems are important for solution of energy-saving issue. The advanced system can promote weight saving and cost cutting for energy-saving in automobile production. Developments of high intensity and high beam quality semiconductor and fiber lasers are required for the advanced system. Solar panel generates electrical energy to resolve the energy problems. The advanced system should be obtained for production of solar panel with higher conversion efficiency and lower cost, advanced solar panel. In the production of the advanced solar panel, technologies for controlling laser irradiation time, relation to pulse width and repetition rates, should be established. Absorption rates of laser energy on materials depend on the laser wavelength. Semiconductor and fiber lasers with short wavelength between 250 nm and 550 nm should be developed for production of the advanced solar panel.

## 4. 2 自動車生産におけるレーザー利用：リモート溶接の現状と将来

### 4. 2. 1 リモート溶接の現状

自動車産業では、近年の環境問題に対応するための軽量化技術、グローバル化に対応する競争力確保のための低コスト化技術、少子化による将来の労働力不足に対応するための省人化技術を強化していく必要がある。スキャナヘッドによりレーザーを任意の位置に照射し溶接を行うリモート溶接技術（図4. 2. 1. 1）はこれらの諸課題を解決するキー技術として注目されており、欧州や日本および韓国などの自動車産業界で既に適用されている技術である。

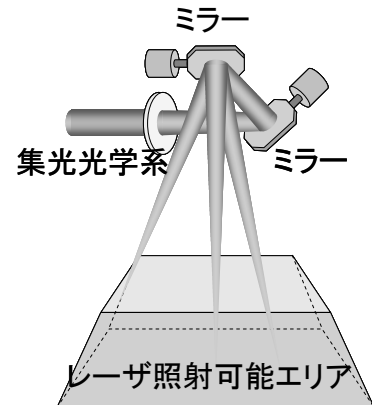


図4. 2. 1. 1  
リモートレーザーの概念図

#### (1) リモート溶接のメリット

レーザー溶接には・非接触加工、・細幅溶接、・自由度の高

い溶接ビード形状、・高速といった特徴があり、リモート溶接ではそれらレーザーの特徴を上手く活かして、軽量化、低コスト化、省人化を実現している。

図4. 2. 1. 2はドア部品にリモート溶接を適用した事例であるが、サッシュ部の溶接形状を直線にし、溶接のためのフランジ幅を短縮することにより部品として約7%の軽量化を実現している。

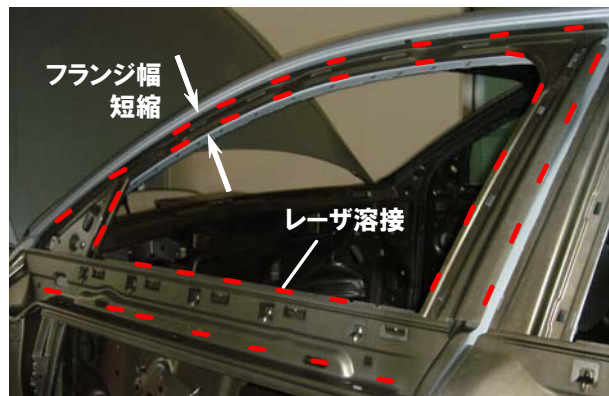


図4. 2. 1. 2 ドアへのリモート溶接適用

図4. 2. 1. 3に複数の車種の部品を一つのリモート溶接設備で生産した事例を示す。これらの部品は従来は抵抗スポット溶接されていた。抵抗スポット溶接ではロボットを用いても1打点2～3秒、人が溶接する場合はそれ以上の時間が必要であり、車種の数だけ、溶接ステージが用意されていた。リモート溶接(1打点0.3～0.7秒)を適用することにより、個々の部品にかかる溶接時間が飛躍的に短縮されたため、複数の工程を集約することができた。また、工程を集約することによりこれらの溶接にかかる作業者の数を低減(省人化)することができた。抵抗スポット溶接とリモート溶接との溶接速度は大きく見積もっても10倍程度であり、溶接機自身のコストのみで考えるとリモート溶接化はコスト低減にはつながらない。工程集約によるステージ数の削減や省人化による効果を合わせて総合的に検討し

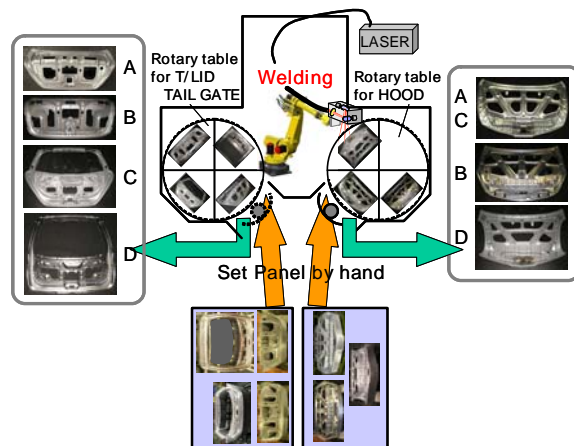


図4. 2. 1. 3 リモート溶接による工程集約

てはじめてコスト低減効果が得られている。

日本の自動車車両アッセンブリーメーカーは一つのラインで複数の車種を生産するケースが一般的である。最近ではお客様が注文してから納車までの期間をできるだけ短縮させるために注文された順番で生産するメーカーも多い。決められたサイクルタイムの中で決められた順番で複数の車種の部品を組立て次の工程に供給する必要があるが、サイクルタイム内で部品を組立てることができない

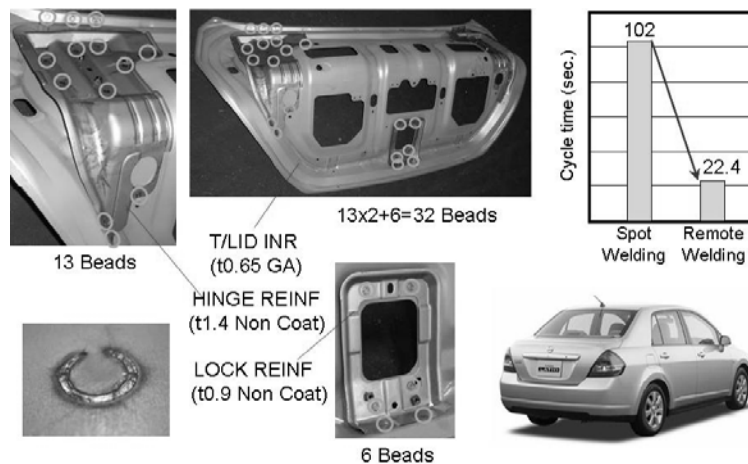


図4. 2. 1. 4 リモート溶接適用事例

抵抗スポット溶接の場合、部品の作りだめが発生していた。このことが工場内の在庫を増加させ、キャッシュフローの悪化につながっていた。リモート溶接は短いサイクルタイムで部品組立が可能であるため、必要なタイミングで必要な車種の部品を供給することが可能であり、在庫の削減にも寄与できる技術である（図4. 2. 1. 4）。

## (2) リモート溶接のためのシーズ技術

### ① 高輝度レーザー発振器

リモート溶接をより効率的に行うためには、スキャナヘッドによるレーザー照射可能エリアがある程度必要であり、長焦点距離化が必要である。また、自動車は防錆性能を保証するために多くの車体部品に対して亜鉛めっき鋼板が使用している。亜鉛めっきは鉄の融点ではガス化しているため、スパッタを誘発することが多く、スキャナヘッドの光学部品の保護のためにも長焦点距離化が必要である。必要とされる焦点距離は適用対象部品によって異なるが概ね500mm程度である。この焦点距離500mmを溶接速度を犠牲にすることなく（加工点におけるレーザースポット径φ0.6mm以下）実現する必要があり、レーザー発振器としてはB.P.P.: 8mrad以下のビーム品質を確保していることが望ましい。

集光前のビーム径を拡大すればビーム品質が低くても焦点距離500mm、レーザースポット径φ0.6mmの実現は可能であるが、スキャナヘッドが大きくなるため、適用できる部品が限定される可能性がある。

レーザーの出力要件については、現在車体で使われている鋼板の板厚が0.5~2mm程度であることを考えると4kW以上必要であると考えられる。

### ② スキャナヘッド（加工ヘッド）

ガルバノモータ等で制御される回転ミラーを備えた加工ヘッドであり、任意の平面上にレーザーを照射することが可能である。光学系の位置制御機能が追加され3次元領域の任意の位置にレーザー照射が可能となったスキャナヘッドも市場投入されている。照射可能領域についてはレーザー発振器のビーム品質および加工点でのスポット径仕様により異なるが、X300mmY300mmZ100mm程度が一般的である。これらスキャナヘッドの特徴としては既に

述べたとおり任意の位置にレーザー照射が可能であるということと、レーザー照射可能エリアにおいての照射位置移動時間が  $50\mu\text{sec}$  以下と高速であることが挙げられる。リモート溶接ではサイクルタイムの 80%以上が溶接として使われるため、熱に対する対策が織り込まれていることが重要である。

### ③ オンザフライ制御技術

上記レーザー発振器とスキャナヘッドとを組み合わせると、スキャナのレーザー照射可能エリア内での溶接は  $0.3\text{sec}$ /打点レベルの効率が可能となるが、 $300\text{X}300\text{X}100\text{mm}$  のレーザー照射エリアで溶接が完了する部品はほとんどない。そのため、ロボットの先端にスキャナヘッドを取り付け、スキャナヘッドを移動させて溶接する必要があるが、抵抗スポット溶接などで用いられる一般的な多関節ロボットではロボット自身の位置制御に対するサンプリング周期が長すぎるため、スキャナヘッドの移動中は溶接ができない。オンザフライ制御というのはロボットとスキャナ光学系との動きを同期させることにより、スキャナを移動させながらのレーザー溶接を可能にする制御のことである。部品形状や溶接打点の分布状態によるがオンザフライ制御なしの場合、溶接能力は  $0.7\text{sec}$ /打点程度まで低下するのに対し、オンザフライ制御ありの場合は  $0.3\sim 0.5\text{sec}$ /打点と溶接能力を維持したままのリモート溶接適用が可能となる。欧州のリモート溶接適用事例ではそのほとんどがオンザフライ制御を採用している。これに対して日本国内ではオンザフライ制御が可能なシステムがないため欧州の適用事例に比べて溶接能力が低いのが現状である。

## 4. 2. 2 リモート溶接の将来

キー技術として注目されているリモート溶接技術であるが、適用されている部品は世界的にみて、ほとんどがフード、トランク、バックドア、ドアといったクロージャ部品に限定されているのが現状である。これらの部品は・構成部品数が少ない、・サブ工程であるといった特徴があり、適用のための技術的ハードルは比較的低かったといえる。

今後のリモート溶接適用拡大を考えると、メイン工程の精度凍結工程への適用のための技術課題解決が必要であると考えられる。ここではまずメイン工程の精度凍結工程への適用について述べ、次にそのために必要なシーズ技術について述べる。

既に述べたが車体溶接における主たる溶接工法は抵抗スポット溶接である。車体の溶接打点数およびサイクルタイムは車の大きさや生産台数によるが概ね  $3,000\sim 5,000$  打点、 $30\sim 100$  秒/台である。現状では部品同士の溶接はこのサイクルタイムの制約により一つの工程で溶接しきれない部品が多く、その場合は最初の工程で部品同士の相対位置決定に寄与する部分についての溶接を行い（これを精度凍結工程と呼ぶ）、それ以降の工程（複数）で不足分の溶接を行っている（これを増し打ち工程と呼ぶ）。精度凍結工程では治具で部品が固定されているため溶接後の部品精度は確保されているが、増し打ち工程では治具による部品の固定がない。増し打ち工程での抵抗スポット溶接による入熱およびガン接触時の負荷入力などにより部品の精度は変化し易く、部品の最終精度を確保するために多くの調整が必要となる。

リモート溶接で述べたような高速溶接を精度凍結工程に導入することで精度凍結工程での溶接打点数が増え、増し打ち工程での溶接打点数を減らすことが可能となる。精度凍結工程での打点増は増し打ち工程前での組立部品の剛性向上につながり、増し打ち工程での打点数減と合

せて部品精度変化を少なくする効果が考えられる。また、増し打ち工程での溶接点数削減による工程短縮効果もあり、生産性向上（低コスト化）といったメリットも考えられる。

### （１）さらなるレーザーの高輝度化、高出力化と加工ヘッドの小型化

実部品はさまざまな形状を持っており、精度凍結のためには狭隘部の溶接が必要な場合もある。狭隘部にレーザーを照射するためには加工ヘッドの小型化が必要であり、レーザーのさらなる高輝度化が必要とされる。また車体に対する要求性能は衝突時の安全性向上など年々上がっており、3枚重ね、4枚重ねで溶接しなければならない部位が増加傾向にある。そのため溶接すべき部位の合計板厚は年々増加しており、リモート溶接の高速性を損なわないためには、10kW級の出力が必要になると考えられる。また溶接打点は部品によっては密集しているため、このようなアプリケーションは今のレーザーシーズ技術だけでは成立しない。

### （２）低コスト化

工程短縮、工程集約や省人化により一部の部品についてはレーザー溶接によるコストメリットが確保され採用に至っている。しかし多くの部品（或いは車種）はレーザーのライフコストが高いために採用に結びついていないのが現状である。現在のレーザーコストで課題となっているのは、初期投資とLDの交換コストである。

初期投資についてはkW当りのコスト5百万円、LDの寿命については50,000Hを狙った開発をお願いしたい。

車体のレーザー溶接の場合、そのほとんどが抵抗スポット溶接からの置き換えとなる。これは欧州でも同様であり、欧州の自動車産業が同じスポット溶接からの置き換えであるにもかかわらず、日本よりもレーザー適用領域が広い理由について説明する。

その理由は2つある。一つは日本のスポット溶接機が低コストであること、一つは欧州メーカーの単一モデルの生産量が多いことである。

日本も欧州も車体の防錆対策として亜鉛めっき鋼板を採用している。しかし亜鉛めっき方法が異なる。日本では溶融亜鉛めっきの後に合金化処理を施すため亜鉛めっき層を安定して薄くすることができる（GA材と呼ばれている）のに対して、欧州では溶融亜鉛めっきのみのため（GI材と呼ばれている）GA材と比べめっきの膜厚が約2倍となる。抵抗スポットの溶接性はこの亜鉛めっきの膜厚と関係がありGI材を溶接する必要がある欧州の溶接機コストは日本のものに比べ高い。また、スポット溶接ガン先端のチップがめっきにより痛みやすくチップドレスの頻度も高い。

欧州メーカーは単一モデルの生産台数が多く基本的には1ライン1車種である。これに対し日本メーカーは単一モデルの生産台数が少なく1ラインで複数車種を生産している。1台当りのレーザーコストで算出すると欧州スタイルの方が当然安くなる。

### （３）高信頼性・高保全性

前述したとおり車体のサイクルタイムは30～100秒であり、30～100秒毎に部品を溶接し、次の工程に部品を搬送する必要がある。設備の故障などによるラインの停止、特にメインラインの停止は生産停止に直結しており大損害につながる恐れがあるため、設備の高信頼性は絶対に必要な条件である。万が一故障した場合も、暫定的に次の非稼働日（土日）までは設備を



稼働できるようなバックアップ措置を講じておく必要がある。

修理やメンテナンスは非稼働日（土日）に実施する必要があるが、レーザー設備以外の修理、メンテナンスも併行して実施する可能性が高いためできるだけ短時間で作業を完了させることが望ましい。

また、故障が発生した場合、早急に再発防止策を施す必要があり、短期間で原因究明および対策立案、実行をしなければならない。海外製の設備を利用する場合はこれら保全性や故障発生時の原因究明および対策立案を短期間で実施することが難しい場合が多く、大きな課題となっている。

#### （４）制御技術・教示技術

精度凍結工程では複数のロボットが同時にさまざまな位置の溶接を行う。レーザーを効率よく用いるためにはレーザー・加工ヘッド・ロボット間の連携やレーザー同士の連携を円滑に行う必要がある。オンザフライ制御などはこのような制御の基本となる部分であり、今後はより複雑な制御が必要となる。レーザー～ロボットまでを同期制御するためには関連するメーカー同士が連携し、役割分担を決めて各ハード、ソフトの仕様を決定、開発する必要がある。

同期制御可能なシステムが構築できたとしたら、それらを使いこなすためのソフトウェアが必要となる。最も効率の高いレーザー・加工ヘッド・ロボットの動きの決めるための技術（教示技術）が必要となる。教示技術については２通りの技術を用意しなければならない。一つは最適パスの決定とするためのオフライン教示システム、一つは現場で教示の微修正をするための技術である。

オフライン教示システムでは最も効率が良くかつお互いに干渉することない複数のレーザー・加工ヘッド・ロボットの動きを算出し、個々の動作プログラムを作成する機能が必要とされる。

また現場での修正については部品とロボットとの相対位置ずれや、溶接位置の変更に対応するための微修正を誰もが簡単にできるシステムが必要となる。レーザー溶接は非接触溶接であるため、焦点位置の確認や本溶接でのロボット・加工ヘッドを移動させながらの溶接を教示でどう再現するかなどが課題となる。

#### （５）隙間制御技術

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、発振器仕様だけではない。溶接部の品質確保という課題（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原理的に部品精度は悪化している。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%と言われているが、それでも隙間制御技術を確立させることはレーザーの適用拡大のための必須条件である。隙間制御については治具などによる隙間矯正機構だけではなく、部品形状、部品の合わせ構造による工夫も重要であるため、これらは車体部品組立メーカーが積極的に取り組むべき課題であると考えられる。

#### (6) 品質保証技術

前述のとおり、リモート溶接に限らずレーザー溶接は継ぎ手隙間が溶接品質に与える影響が大きい。継ぎ手隙間は部品のプレス精度や部品同士の相対位置関係によって変化することが考えられるため、部品により溶接品質が異なることが予想される。溶接品質の保証は車両性能を保証する上で必要不可欠であるため、レーザー溶接においては溶接品質の全数保証が行われるケースが多い。溶接品質保証の方法としては溶接時の加工中の信号（加工点の光や音の挙動など）の計測結果より溶接品質を判断する方式と、溶接後に外観観察や超音波探傷をする方式の2通りが考えられるが、加工中の信号計測をする手法が溶接工程と検査工程が同一工程になり、検査のための工程増を防げることから現在は主流となっている。さまざまな部品にレーザー溶接を適用していくためにはさまざまな板組み（枚数、板厚、材料強度、めっき仕様）に対する品質保証方法の閾値を設定する必要がある、多くの基礎実験が必要とされる。

### 4. 3. 太陽電池製造におけるレーザープロセスの現状と将来

近年、太陽電池に関して非常に高い関心が寄せられ、その最大の課題である発電コスト削減に対する研究・開発が活発に行われている。レーザー加工は製造コスト削減と発電効率増大が改善可能な革新的加工法として注目されている。

#### 4. 3. 1. レーザープロセスの現状

住宅用として急激に市場が拡大している主な太陽電池の種類を図4. 3. 1. 1に示す。現在の主流である結晶シリコン太陽電池には単結晶タイプと多結晶タイプがある。発電効率は単結晶よりも多結晶の方がやや劣るが、製造コストメリットから結晶シリコン太陽電池の過半数は多結晶タイプとなっている。また、近年の原料シリコン不足の影響を受け、シリコン使用量の少ない薄膜シリコン太陽電池や薄膜化合物太陽電池が急速に成長しつつある。これら主な太陽電池に対するレーザー加工の適用例について述べる。

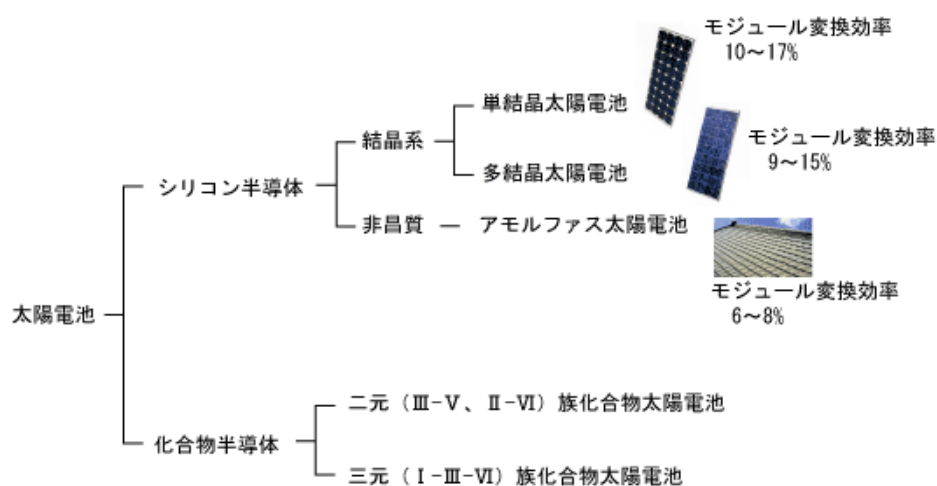


図4. 3. 1. 1 主な太陽電池の種類（出所：PVかんさいホームページ）

## (1) 結晶シリコン太陽電池

### ① エッジアイソレーション

結晶シリコンに最も利用されているレーザー加工技術はエッジアイソレーション(電氣的絶縁)であり、太陽電池セルの電氣的短絡防止が目的である。レーザー加工は他の加工法に比べ加工溝が細く、エッジに近接させた加工が容易であり、信頼性と歩留まりの向上に役立っている。この加工には波長1064nm、波長532nmや波長355nmのレーザーが用いられる。図4.3.1.2に加工例を示す。

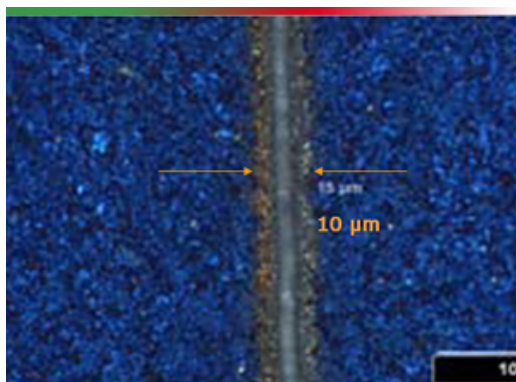


図4.3.1.2 エッジアイソレーション例 (出所: コヒレントホームページ)

### ② コンタクトホール

正極と負極の両方を裏面側に配置させたタイプの太陽電池にもレーザー加工が用いられている。窒化膜を堆積したシリコンに対しレーザー加工にてコンタクトホールを作製し、シリコン基板と裏面電極の接触面積を減らした点接触構造を形成する。これには数十Wクラスの波長1064nmのレーザーが使用されている。波長532nmと波長355nmを用い熱損傷が少なく穴径の小さいコンタクトホールを形成する試みも行われている。図4.3.1.3に加工例を示す。

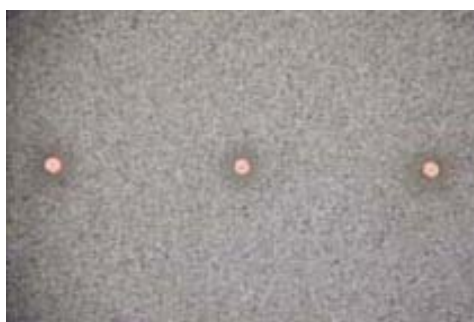


図4.3.1.3 コンタクトホール加工例 (出所: コヒレントホームページ)

### ③ シリコン切断

原材料であるシリコンウェハの厚さを薄くする開発も活発である。その一つとして従来

のインゴットからウェハーをスライスする方法ではなく、シリコン薄板を八角柱の側面に形成させ引き上げる方法が研究されている。この方法では板厚80 $\mu$ mまで薄型化が可能となっている。引き上げられた八角柱形状のシリコン薄板をウェハー状に切断する過程で波長1064nmのレーザー切断が利用される。また、インゴットのスライスにレーザー切断の適用化研究も行われている。

#### ④ セル接続

太陽電池セルの電極接続にレーザーを用いる研究がある。この研究には鉛フリーはんだ付けと溶接の両方からアプローチがあり、従来のはんだ付けに比べ非接触で加工が実施できるメリットを持つ。その一つとして出力250Wの半導体レーザーを用いた研究発表がある。

### (2) 薄膜太陽電池

薄膜太陽電池にはシリコンタイプと化合物タイプがある。これらは幅数mmの細長いセルを直列接続させた集積構造となっている。この構造はガラス基板や透明フィルム上に発電層と電極層をプラズマCVDやスパッタリングなどの方法で積層させ、各薄膜をパターンニングすることにより形成する。各薄膜のパターンニングに対してレーザー加工が適用されており、一般的には波長1064nmや波長532nmのレーザーを用いる。その他、パターンニング以外にも薄膜太陽電池に適用されているレーザー加工には基板縁の絶縁加工や製造番号のマーキングなどがある。薄膜シリコン太陽電池の製造工程を図4.3.1.4に示す。

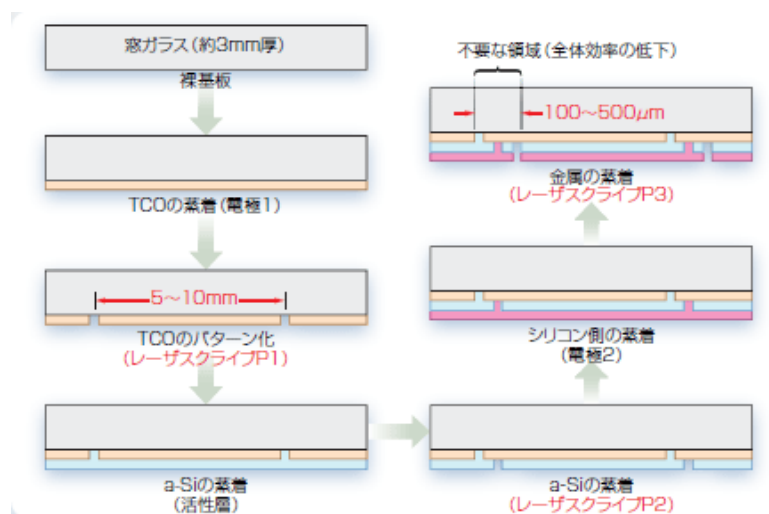


図4.3.1.4 薄膜太陽電池製造工程 (出所: Laser Solution Japan 2008年4月号)

#### ① 薄膜シリコン太陽電池

薄膜シリコン太陽電池は透明電極層(TCO膜)、発電層(シリコン膜)、裏面電極層(メタル膜)から構成されている。発電層にはアモルファスシリコンが用いられるが、発電効率を上げるため微結晶シリコンを堆積させた製品もある。適用されているレーザー加工を以下に示す。

#### a. パターニング

ガラス基板上に形成されたTCO膜にレーザー照射し、TCO膜だけをスクライブする。スクライブ本数は太陽電池の製品設計によって異なるが、基板1m角で100本前後である。スクライブ幅は30～60 $\mu\text{m}$ で、隣り合うTCO膜間の絶縁が目的である。次に、シリコン層の成膜後、TCOスクライブに沿ってレーザー照射し、シリコン膜をスクライブする。加工幅は50～70 $\mu\text{m}$ 、TCOスクライブとの間隔は数十 $\mu\text{m}$ である。このスクライブではTCO膜にダメージを与えずにシリコン膜のみを除去する必要がある。さらにメタル膜の成膜後、シリコンスクライブに沿ってレーザー照射し、シリコン膜とメタル膜の両方をスクライブする。加工幅は50～70 $\mu\text{m}$ 、シリコンスクライブとの間隔は数十 $\mu\text{m}$ である。隣り合う裏面電極間の絶縁を目的とする。このスクライブではTCO膜にダメージを与えずにシリコン膜とメタル膜を除去する必要がある。

#### b. 基板縁絶縁加工

TCO膜、シリコン膜、メタル膜を同時に除去する基板縁の絶縁にレーザー加工が適用されている。大面積の膜除去となるため、高出力タイプの波長1064nmのレーザーが用いられる。

#### c. マーキング

基板へ製造番号等がマーキングされ、マークを利用した基板の追跡と記録が全工程で行われる。マーキングには波長1064nmのレーザーとスキャナー光学系を用いる。

### ② 薄膜化合物太陽電池

薄膜化合物太陽電池としてCu-In-Ga-Seの化合物(CIGSと呼ぶ)を用いた太陽電池が製品化されている。CIGS太陽電池は透明電極層(ZnO膜)、発電層(CIGS膜)、裏面電極層(Mo膜)から構成されている。その製造工程の一部にレーザースクライブが適用されており、Mo膜には波長1064nmのレーザースクライブが適用されている。

#### 4. 3. 2. レーザープロセスの将来

太陽電池は図4. 3. 2に示すNEDOのロードマップどおり推移している。このロードマップから今後、システム大型化、超薄型化や多結合化による高性能化、新材料の太陽電池による発電コスト削減へ展開していくことが分かる。レーザーは接合、切断、薄膜剥離、アニール等が実施でき、今後の展開においても太陽電池の製造コスト削減と発電効率増大のキーテクノロジーになると言える。

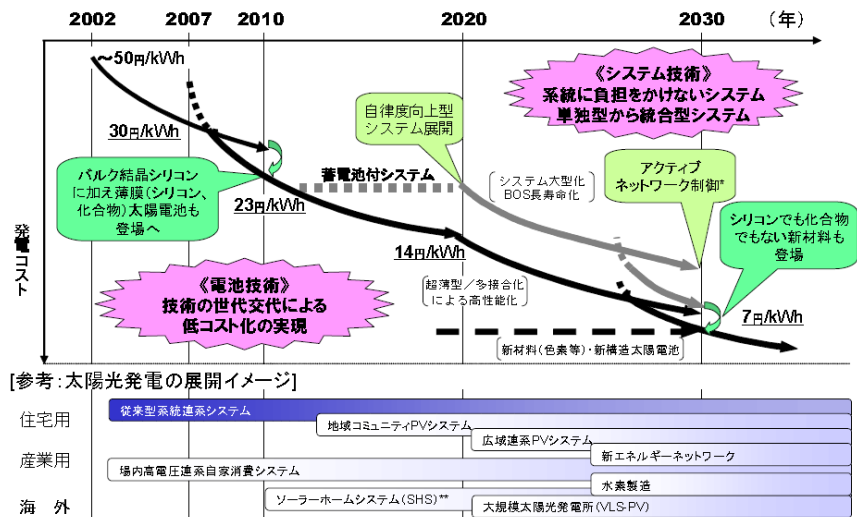


図4. 3. 2 太陽電池ロードマップ(出所: N E D Oホームページ)

4. 4. レーザーを用いた材料組織制御の現状と将来

本節では、レーザー光を用いた金属材料表面近傍領域のミクロンオーダーでの局所空間の状態制御を可能にするファイバーレーザー局所加熱法の背景・現状ならびに将来展望について報告する。

4. 4. 1. 均一組織を前提とした組織制御の現状

材料組織を構成する基本要素である結晶粒はその形状・大きさならびに結晶方位といった材料学的な情報を有する。力学特性改善の観点からは、古くより結晶粒を微細化する組織制御がもの作りの基本として位置づけられ、可能な限り微細で均一な粒度分布を持った組織を造り出すことのための学理の体系化と具体的な工場レベルでのプロセスパラメータの最適化が進められてきている。すなわち、組織は均一であるという前提条件の上に熱処理工学が展開されてきている。

4. 4. 2. 組織の空間的不均一性

個々の結晶粒が持っている結晶方位は試料全体の統計的な「分布」と空間的配置すなわち場所の関数として表現される「空間分布」の2種類の様相を持つ。前者は集合組織という研究領域で標準的に取り扱われる概念でその表示方法として極点図法などがある。これに対して後者の場合は現時点で標準的と言える表現法が確立されていないが、隣り合う結晶粒間の方位関係や結晶粒界の構造・エネルギーあるいは結晶粒径の局所的な大小関係などによってそれぞれの結晶粒の持つキャラクターが異なってくる。Electron Back Scatter Diffraction(EBSD)法による空間方位分布解析結果を見ると、図4. 4. 2に一例として示したように、多くの材料で方位



図4. 4. 2 Al-3Mg 合金結晶方位分布の一例

分布は空間的には不均一な分布をしていることが分かる。すなわち、材料組織はたとえ結晶粒径がほぼ同じ程度であったとしても結晶方位や結晶粒界といった組織要素の観点からは不均一に分布しているのである。

#### 4. 4. 3. レーザー局所加熱法の誕生

組織制御には力学エネルギーと熱エネルギーを種々のタイミングで組み合わせて使うことが多いが、熱エネルギーについてはいわゆる電気炉を用いた均一温度場が前提となっていることが多い。実際の現場では不均一な温度分布になっているのだが、意図的に設計されたものではない。組織の単位要素の一つである結晶粒や析出物といったミクロンあるいはナノレベルでの組織要素をその空間分布としてとらえたとき、必ずしも均一な温度場が技術者の意図する組織状態を実現しているとは限らない。

一例として結晶粒が成長する材料組織現象（以下粒成長と呼ぶ）を考えてみる。粒成長は隣り合う結晶粒同士の間で生ずる「粒界移動を基調現象とした領地の奪い合い」である。一つの結晶粒が成長するということはその結晶粒に隣接する結晶粒にとっては縮小・消滅過程を意味する。この粒界移動は局所的な粒サイズ分布、粒界エネルギーや3重点における粒界エネルギー均衡関係などで移動方向、すなわち成長する運命にある結晶粒が決まる。極めて局所的な組織状態を反映して決定論的に進行する粒界移動が試料全体の組織変化に多様性を与えるのである。

このように空間的に不均一に分布する組織要素に対して均一な温度場を与えた場合、「成長して欲しくない結晶粒」までも組織変化に関与させてしまう。したがって、狙った結晶粒あるいは粒界や粒界3重点にのみ熱エネルギーを投入する局所熱処理法が開拓されるとこれまでの均一温度場で行われてきた組織設計・制御技術に大きな変革をもたらすことが期待される。このような背景を基にしてレーザー局所加熱法が提案され、その実現に向けてシステムの構築ならびに基礎データの収集が続けられてきている。以下に大阪大学接合科学研究所にて開発され研究が進められてきているファイバーレーザー援用局所加熱システムの概略と局所加熱法の将来展望について概観する。

#### 4. 4. 4. ファイバーレーザー援用局所加熱システム

本システムに求められるレーザー光の品質は第一に集光性の高さである。その理由は照射対象となる結晶粒の大きさが数ミクロン程度であるからである。ビーム品質や

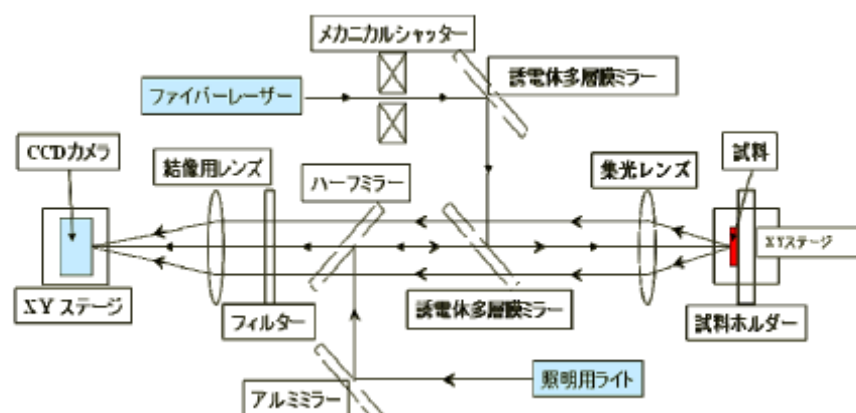


図 4. 4. 4. 1 ファイバーレーザー援用局所加熱システムの概略

発振器の取り回しなども考慮して最終的に最大出力100WのIPG製ファイバーレーザーが採用

された。レンズやミラーの配置など光学的な調整を終えて完成したプロトタイプの光学系を図4.4.4.1に示す。現時点ではさまざまなプローブを入れている関係上複雑な光学系になっているが基本設計思想に変わりはない。なお、出力は現行最大級のファイバーレーザー発振器に比べると遙かに微弱であるが、集光域の大きさが数ミクロン（計算値では3ミクロン程度）径であることから実際のフルエンスは数MW/cm<sup>2</sup>と熔融溶接に用いられるエネルギーレベルに近い値が材料に投入されている計算になる。

本システムを用いて実際に純アルミニウム板にレーザー照射した結果を図4.4.4.2に示す。図4.4.4.2(a)から(c)は照射時間に伴う表面状態の変化をSEM観察したものであるが、照射時間が長くなるにつれて表面の一部が熔融し、噴き出した金属ジェットによると思われる堆積物を穴の周囲に持つクレーター（熔融痕）が現れた。熔融痕の直径はたかだか10ミクロン程度であるので、本システムは確実に局所領域に光エネルギーを集光することができることが明解に示されている。なお、高融点材料である純チタン板についても同様の実験を行い、数ミクロン径の熔融痕が数秒の照射時間で出現することも確認されており、本システムの潜在

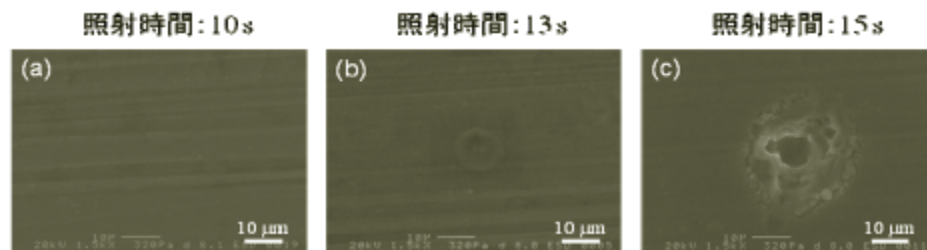


図4.4.4.2 工業用純アルミニウム板へのファイバーレーザー照射実験結果：表面状態の変化

的な局所加熱能力がうかがい知れる。現時点ではレンズの組み合わせを工夫することで集光面でのビームサイズを任意に調整できるように改良されている。

局所領域への光エネルギーの投入にともなう局所加熱とその結果として観察された再結晶組織を図4.4.5に示す。試料は工業用純アルミニウム冷間圧延板で、照射後の組織解析には前出のEBSD法を用いている。図中央部に大きな花びら状の結晶粒が複数個一群となって加工組織の中に浮かび上がるようにして存在しているのが分かる。これら組織は局所加熱によって加工組織の中から現れて周囲の加工組織を侵食しながら成長した「再結晶粒」である。これが世界初のデータで、人類が意図的に再結晶粒組織を作り出すことに成功したことを意味している。なお、任意の位置にビームを集光して局所加熱処理を施す機能もその後付け加えられており、組織を実験者が顕微鏡下で確認しながら狙った結晶粒あるいは粒界三重点にビームを固定して再結晶組織を造り出すことが現時点ではできるようになっている。

#### 4.4.5. レーザー局所加熱システムの問題点と課題

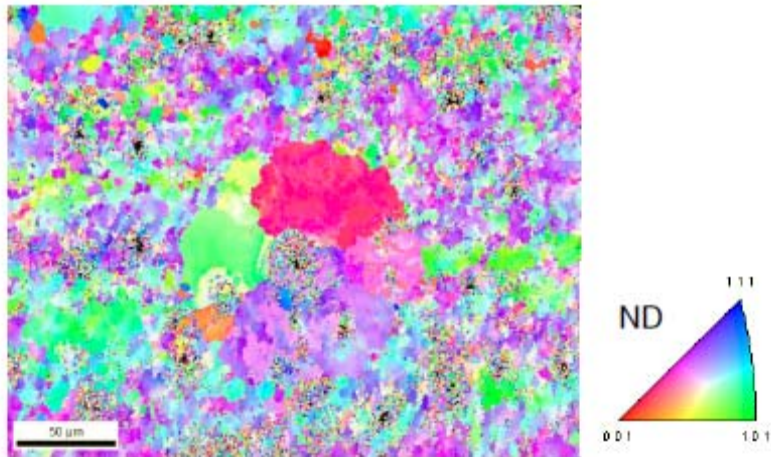
当該調査期間内における国内外の学会発表・講演会・国際会議の記録を調べても上述の局所加熱に成功した例は接合科学研究所のグループ以外からは報告は見あたらない。これは、レーザー局所加熱は学術研究領域の範疇にとどまったままで、後述する工業化のための多くの課題が存在しているものと考えられることもできる。ここでは、本局所加熱システムがその適用対象も



含めて将来発展していくべき方向性について述べる。

本加熱法がとにかく達成すべき課題の筆頭に「温度計測」が挙げられる。結晶粒加熱に限らず、プロセス温度を正確にモニターして局所組織制御の精密化につなげる基礎技術の確立が緊急テーマとして求められている。

次に、加熱する対象を自動的に探し出す技術の開拓である。例えば集合組織制御を目的とした局所加熱の場合、ポイントになるいくつかの結晶粒を探し出すためにコンピュータシ



ミュレーションによりどの結晶粒が成長するかを精度良く予測する計算技術の開拓を必要とする。

図4. 4. 5 工業用純アルミニウム冷間圧延板へファイバーレーザー局所加熱を施した時に表面近傍領域に現れた再結晶粒群. 各色は基準方位（板面）に対する結晶方位を示している。

#### 4. 4. 6 レーザー局所加熱法の将来展望

レーザー光を組織制御に適用する工業技術は素材産業ではほとんど見あたらない。太陽光発電素子などのエレクトロニクス関係では研究が進められているが、鉄鋼や非鉄金属メーカーで実際に稼働しているラインにこのエネルギー源は使われていないのである。自動車を例に挙げて説明しよう。素材となる鋼板あるいはアルミ合金板などは素材メーカーで開発・製造されて組み立てラインに導入されて種々の加工（切断、接合、表面処理など）を経て製品となる。レーザーが使われているのは組み立てラインでの溶接・溶断のみであると言っても過言ではない。すなわち、ものづくり技術マップにおいてレーザー工学には明らかな「技術の空白地帯」がある。その理由は、敢えてレーザーを使う意味がない、あるいはコスト高になり技術としては失格だからなどが考えられる。

前者については、組織制御あるいはさらに高度な素材作りを目指したレーザー加熱法案の提案が急務で、局所加熱法の有用性が学術側から多くの実例が示されながら具体的に証明されていくことが必要である。素材産業の立場からレーザー熱処理を見た場合、従来の均一加熱の概念を破るくらいのインパクトのある実証実験、すなわち特異な組織状態を持った素材の創出がなされることで突破口が開かれるであろうし、その経済波及効果は大きい。材料組織制御は素材に対するさまざまな要求事項を満足するようにしてきめ細かくそのプロセスが最適化されているが、基本となる材料学的現象のそれぞれに局所熱処理というキーワードを当てはめるとその多くは新規研究課題として見えてくる。言い換えると、材料工学に新たな座標軸を導入することになる。これら研究課題のそれぞれについて具体的な成果を挙げていくことが学術の立場

での責任であり、また将来展望の柱となる。

後者については、本調査研究にて他のグループが調査・報告しているように、わが国独自の技術として経済的な競争力を十分に備えた斬新な発想に基づくレーザー発振器やそれに付随する周辺技術の開発が将来展望の柱となる。その際に、レーザー加工（熱処理も含めて）の研究サイドからの提案を遅滞なく光源開発に反映できるような横断的研究組織の構築と持続的な運営が望まれる。

#### 4. 5 短波長半導体レーザーの現状と将来

半導体レーザー（LD；L a s e r D i o d e）は小型かつ軽量、低消費電力、長寿命などが特徴であり、中でも短波長の405nm帯に属する青紫色半導体レーザーは、B l u e r a y D i s cに代表される大容量光メモリなど、広く実用化されている。今後、B l u e r a y D i s c用の短波長半導体レーザーは高速記録化、多層記録化に向けてさらなる高性能化が求められると予想される。

本節では短波長半導体レーザーについて紹介するが、一概に短波長と言っても比較的幅広い波長域が考えられるため、近紫外領域～青緑色可視領域（波長；375－488nm）をターゲットとする。

##### 4. 5. 1 短波長半導体レーザー開発の背景

日亜化学工業は、1995年に410nmの窒化物半導体レーザーの室温パルス駆動発振を世界で初めて成功させた（図4. 5. 1. 1）。それ以来、窒化物半導体レーザーは技術的に進歩を続けている。材料となる窒化物半導体は主に、G a N、A l N、I n Nで構成される直接遷移型の化合物半導体である。図4. 5. 1. 2に各種化合物半導体のボンド長（原子間距離）とそのバンドギャップを示す。



図4. 5. 1. 1  
レーザー発振の様子

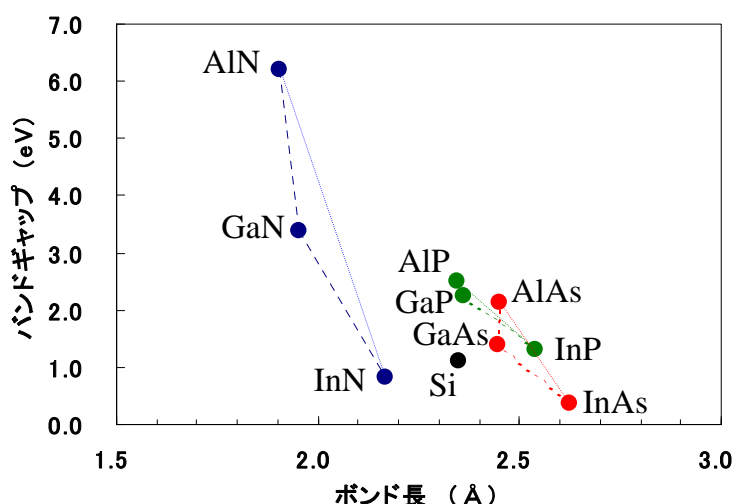


図4.5.1.2 各種半導体のバンドギャップとそのボンド長

図4. 5. 1. 2に示されているように、赤外レーザーや赤色レーザーで使用される砒素系、リン系の半導体材料と比較して、窒化物半導体はボンド長が短く安定な物質であることが分か

る。また、Al、Ga、Inの組成比を変化させることにより、バンドギャップをコントロールして可視から紫外まで幅広い波長領域をカバーできる物質である。GaN系半導体レーザーの特徴として、

(1) 堅牢である

原子間距離が短く、原子結合が強いため、「結晶の安定性が高い」という特徴を持つ。

(2) 発振波長が短い

発光効率の良い直接遷移型のバンド構造を持ち、混晶の組み合わせで従来の半導体より波長の短い可視から紫外の領域の光を出すことが可能である。

(3) 環境にやさしい

砒素(As)やカドミウム(Cd)といった毒性の強い元素を含んでおらず、環境により優しい半導体材料である。

したがって、GaN系半導体は長寿命、高信頼性が要求される機器の光源に適した物質であるともいえる。

#### 4. 5. 2 短波長半導体レーザーの用途

短波長半導体レーザーの用途はさまざまであるが、わずかに数十nmの波長の違いでその用途が異なってくる。例を挙げると、以下のようなものがある。

○375nm LD (紫外)

露光装置光源、ナノ粒子径分布測定装置 など

○405nm LD (青紫色)

光ディスク書き込み/読み込み用光源(AV/PC用)、直接描画露光装置、印刷機光源 など

○445nm LD (青色)

ディスプレイ用光源、レーザーショー、小型プロジェクタ用光源 など

○473nm LD (青色)

ミラボ用光源、バイオテクノロジー分野 など

○488nm LD (青緑色)

フローサイトメーター、DNA分析装置、共焦点レーザー顕微鏡 など

このうち、発振波長445nmの半導体レーザーについては後述するが、フルカラーレーザーディスプレイ用の純青色光源として開発が進んでいる。さらに、発振波長488nmのレーザーは、抗体検査や白血球細胞検査を行うフローサイトメーターやDNA分析装置に使用されており、生物・医療分野の発展に寄与している。従来のこれらの装置にはアルゴンレーザーや固体レーザーが用いられているが、半導体レーザーに取って代わることで、大幅なコストダウン、小型・軽量化、電力消費の低減が実現可能となる。光ディスク用レーザーからの長波長化の取り組みによって、2008年には同波長の半導体レーザーの開発に成功しており、さらなる発展が期待されている。

表 4. 5. 2 短波長半導体レーザーの特性例

<初期特性>						(ケース温度; T <sub>c</sub> =25°C, CW)
ピーク波長 [nm]	光出力 [mW]	しきい値電流 [mA]	動作電流 [mA]	動作電圧 [V]	電力変換効率 [%]	
375	150	300	500	5.2	5.8	
405	600	140	550	4.1	26.6	
445	1000	230	890	4.7	23.9	
473	20	50	100	5.5	3.6	
488	20	30	75	5.3	5.0	

※各波長の代表値

表 4. 5. 2 に短波長半導体レーザー製品の一例を示した。現在までに 5 つの波長帯で製品化、サンプル出荷を行っている。とりわけ、ピーク波長 400 – 405 nm (青紫)、440 – 455 nm (青色) の LD は高い光出力を得ることに成功している。特筆すべきは、通常は高出力化に伴って低下する傾向にある電力変換効率 (WPE; Wall-Plug Efficiency) が、20% 以上の非常に高い数値を保っている点である。

#### 4. 5. 3 ディスプレイ向け青色半導体レーザー

近年、レーザー光源を用いたフルカラーディスプレイの実用化へ向けた開発が行われている。光源にレーザーを使用する利点は、その高彩度・高単色性により非常に広い色再現範囲を有する、高出力で小型の光源であるためレンズなどの光学系を小型にできる、軽量化が可能、動画の追随性が良いなどである。フルカラーレーザーディスプレイの実用化には、高出力かつ長寿命の赤、緑、青の 3 色のレーザー光源が不可欠である。このうち、赤は AlInGaP 系の半導体レーザー (LD)、また、緑には光第二高調波発生 (SHG) を用いた波長変換デバイスの高出力固体レーザーが既に実用化されている。しかしながら、青においては高出力・高効率・長寿命を有するレーザーの実用化が遅れていた。日亜化学では GaN 系材料を用いた純青色高出力 LD を作製しており、その特徴および特性について説明する。

ディスプレイの大画面化のトレンドに伴って、光源はさらなる高出力が求められている。その一方で進む薄型化のためには、光源は小さなものでなければならない。半導体レーザーの特徴の一つが小型であることは繰り返し述べてきたとおりである。故に半導体レーザーはディスプレイ光源として適していると考えられる。一般に、高出力化の方法には出射端面の光密度を低減するために、単一ワイドストライプ構造、マルチストライプ構造などの構造が採られる。われわれのレーザーは  $2 \times 15 \mu\text{m}$  の単一ワイドストライプ構造を採用している (Ex. 光ディスク用 LD;  $< 1 \times 2 \mu\text{m}$ )。また、高出力化に伴って放熱が困難になることを想定し、 $\Phi 9$  パッケージを採用して熱抵抗値の低減 (パッケージ熱抵抗;  $9^\circ\text{C}/\text{W}$ ) を図っている (Ex. 光ディスク用 LD;  $\Phi 5.6$ )。その結果、光ディスク用半導体レーザーの開発から培ってきた技術をもとに、出力 1 W (25°C、CW 駆動)、電力変換効率 24%、推定寿命 (半減期)  $> 30,000$  h の信頼性の高い LD を作製できることが確認された (図 4. 5. 3. 1)。

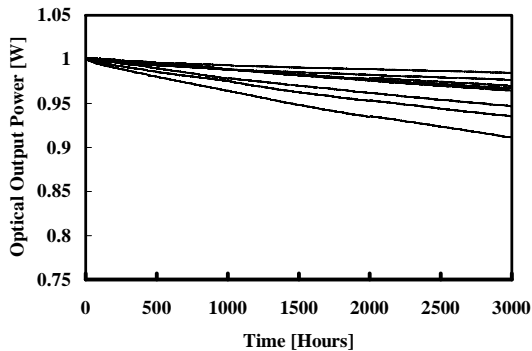


図 4. 5. 3. 1 寿命試験の結果

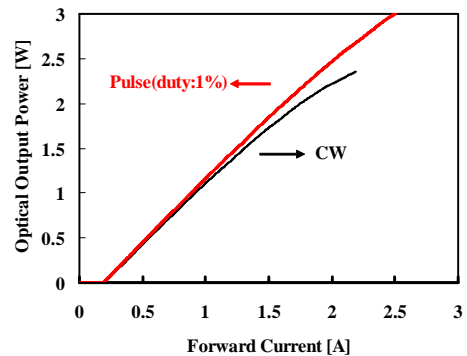


図 4. 5. 3. 2 光学損傷試験の結果

図 4. 5. 3. 2 は光学損傷試験の結果である。この結果から、出力 3 W までは光学損傷が観測されず、CW 駆動時に最大 2.4 W まで発熱による出力飽和が起こらないことが分かっており、さらなる高出力化、1 W あたり単価の低コスト化の余地が十分にあるといえる。今後、これらの技術をベースに、例えばマルチチップ化を取り入れることで、出力を飛躍的に向上できる可能性がある。

また、本節でこれまで対象としてきた短波長領域からは少し外れるが、ディスプレイ向けという観点から考えると、緑色の半導体レーザーが開発されれば RGB の 3 色が揃った小型のレーザープロジェクタが実現できるため、大きな期待が寄せられている。改めて、フルカラーレーザーディスプレイの色再現性の高さについては、図 4. 5. 3. 3 を参照していただきたい。

小型で色再現性の高い光源として、半導体レーザーは有望である。レーザーディスプレイが一般に広く認知されるようになれば、緑色や純青色の短波長半導体レーザーは市場拡大の可能性を大いに持っているといえる。

最後に、レーザーディスプレイ用と同じ純青色半導体レーザーを使用した応用製品（レーザー白色光源）を紹介する。レーザー白色光源はレーザーダイオードと蛍光体を組み合わせた高輝度点光源である。白色光源とファイバを組み合わせることで高効率、高輝度、小さい発熱量、かつ自由な光の取り回しが可能であり、ハロゲン/キセノンランプの代替、内視鏡用光源、デ

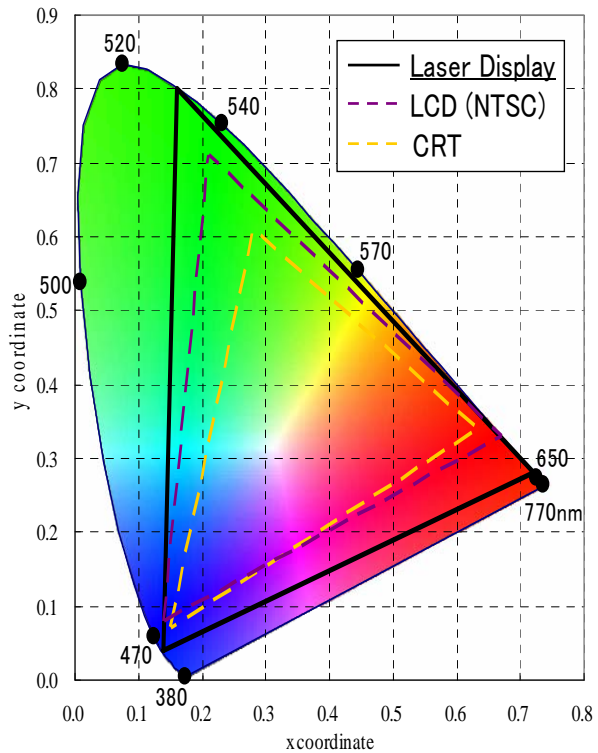


図 4. 5. 3. 3 レーザーディスプレイの色再現範

サイン照明などの利用が考えられている(図4.5.3.4)。さらに輝度のアップを実現した、超高輝度白色光源(図4.5.3.5)を作製しており、こちらは $\Phi 1\text{ mm}$ の発光点から $150\text{ lm}$ の光束、 $8\text{千万 cd/m}^2$ の輝度が得られることが最大の特徴となっている。高輝度化の実現は高出力化の賜物であり、今後も高出力化を追求することで、短波長半導体レーザーの更なる飛躍が可能となるであろう。



図4.5.3.4 レーザー白色光源

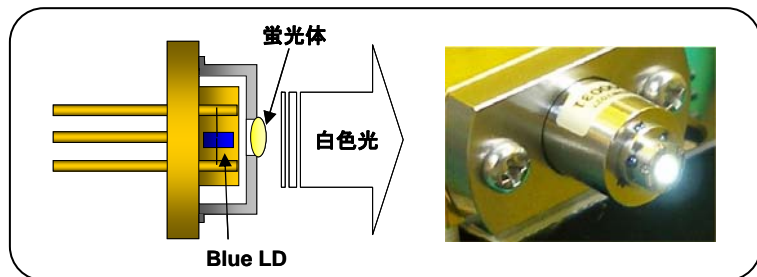


図4.5.3.5 超高輝度白色光源

#### 4.6 高出力半導体レーザー・ファイバディスクレーザーの現状と将来

1997年から2002年にかけて実施された「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクトが終了して7年が経過する。プロジェクトで得られた成果が今日も活かされているのかどうか確認するため、高出力半導体レーザーダイオード、そのレーザーダイオードを励起源として使用したファイバディスクレーザーの現況について調査し、実際に産業技術に貢献できているかどうか検証した。また同技術における今後の検討課題についても、報告する。

##### 4.6.1 高出力半導体レーザーの現状

「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクト後、その技術は開発担当企業である浜松ホトニクス(株)により継続検討された。プロジェクト終了後は「レーザー加工出来得る光源」といった試作レベルであったものが、現在では信頼性試験や同社でのレーザー加工実験ノウハウの蓄積を加えた製品の形となって販売されている。

同社で高出力半導体レーザー加工光源として市販されているのは、ダイレクトダイオードレーザー(DDL)とファイバアウトレーザーダイオード(FOLD)の2種類である。定格光出力としてはDDLでは500Wから6kWまで、FOLDでは電子冷却30Wから水冷4kWまでがラインナップされている。なお将来、DDLは定格光出力10kWを目指すとされている(図4.6.1.1)。

図4.6.1.2は5kW-DDL(1.7×0.4mm矩形高輝度スポット)による軟鋼への溶接痕を示したものである。DDLによる直接加工では珍しく、深さ4mmの深溶け込みが実現されている。本光源は既に鉄鋼やステンレス鋼の溶接など、産業界で活躍している。

DDLは半導体レーザーから出射される光を集光し、加工対象物に直接照射する構造をとるために、構造が簡単でかつ光伝送ロスが少ないといったメリットがある。しかしその筐体は大きくなり(270×295×561mm:5kWタイプ)、DDL光

源をロボットに搭載すると、ロボットの動きが制限されてしまう。

この問題を解決したのが、FOLDである。FOLDはDDLの光出力を一旦、レーザーガイドと呼ばれる光ファイバに入れて伝送させ、反対側のファイバ端から出射させる方式で、レーザーガイドへの集光時に若干のロスが出てしまうといったデメリットがあるものの、ファイバ伝送であるために取り回しが容易で、軽量・コンパクトな



図 4. 6. 1. 1 浜松ホトニクス㈱により製品化されている高出力半導体レーザー加工機

(左) DDL、(右) FOLD

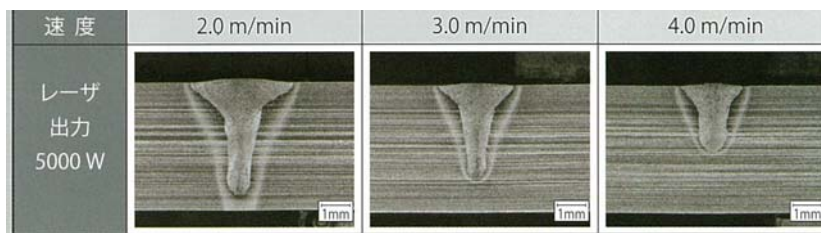


図 4.6.1.2 DDL (1.7×0.4 mm 矩形スポット) による軟鋼への溶接痕

レンズ系のみが取り付けられた出射部のみをロボットに搭載できる。また装置への組み込みを行う場合にも、自由度が増大するという利点もあり、本光源の需要はますます増えているようである。

#### 4. 6. 2 ファイバディスクレーザーの現状

「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクトで、図 4. 6. 2. 1 のような円盤上に巻かれた希土類ドープファイバ側面から励起光を導入する「ファイバディスクレーザーが開発された。

プロジェクトとの最終成果としては、3 台のファイバディスクレーザーを直列接続し、連続発振で 1 kW という当時は考えられない高出力を達成していたものの、ファイバへの添加希土類元素はネオジウム (Nd) であり、励起光→発振光変換効率は 46%、電気入力→発振光効率は 16% に留まっていた。

同プロジェクト終了後、その技術は開発担当企業である HOYA ㈱から浜松ホトニクス㈱に移管され、先述した高出力半導体レーザーダイオードの開発と平行して、フ

ファイバディスクレーザーの製品化検討が進められた。同社での開発中、Ndに代わり、量子欠損が少なく発振効率が高められるイッテリビウム（Yb）が添加希土類元素として採用され、更に各所の最適化を重ねることにより励起光→発振光効率を70%以上、電気入力→発振光効率を30%以上に向上させることに成功している。効率が高められたことにより、高出力が得やすいと共に、熱に起因する損傷を抑制することができ、信頼性の向上に寄与しているものと推定される。

同社では当初、1機のファイバディスクレーザーを用い、定格光出力500Wで商品化している。プロジェクトでは1機あたりの最大出力が330～350Wであったことから、高出力化と製品化出来る信頼性を確保した上で商品化したものと考えられる。同社は本商品の長期信頼性試験データを公表しており、約8,000時間の連続運転試験で光源がメンテナンスフリーで連続稼働できることが報告されている。

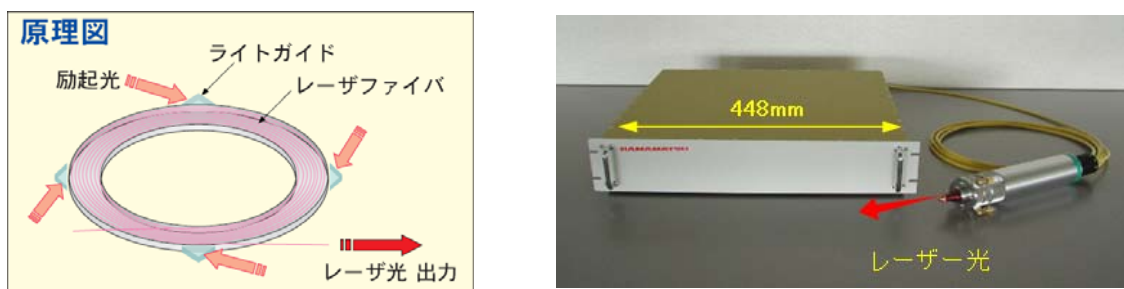


図 4. 6. 2. 1 ファイバディスクレーザーの原理図と同製品

なお、表 4. 6. 2 に示すように、同社では既に1機のファイバディスクで1kW級のファイバディスクレーザーを実現しており、参考データとして公表している。プロジェクト直後の特性と比較して光出力にして約3倍、それに製品使用に耐えうる信頼性を確保したと言える。

表 4. 6. 2 浜松ホトニクス(株)製ファイバディスクレーザーの発振特性

定格光出力	励起光→ 発振光変換効率	電力→ 発振光変換効率	発振波長	BPP	備考
500W	～70%	～30%	1.1μm	3～7mm・mrad*	カタログ仕様 参考仕様
1,000W	70%以上	30%以上			

\*要求仕様による

同社では本光源を用いたレーザー加工性能についても自社で検証しており、高ビーム品質を生かした切断加工や穴あけ加工ができることが報告されている(図 4.6.2.2)。



図 4. 6. 2. 2 ファイバディスクレーザーによる切断加工の一例

スポット径φ0.09mm  
鉄鋼(SPCC)0.5mm t  
加工速度 2.8m/分



ところで現在、ファイバレーザーメーカーとして急成長したイメージがあるIPG社であるが、現在キー技術となっているサイドパラレル励起光導入方式が発明されたのは1994年12月であり、同プロジェクトが始まる前のことである。本プロジェクト開始当初はIPG製のファイバレーザー出力は数Wレベルであり、レーザー加工に使える光源になるとは誰もが想像しなかった。キーとなる技術が原理的に確かなものであるならば、いつかは技術革新がおこり、驚愕する性能が生み出される可能性があることが示されている。

1997年からの「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクトで生まれたファイバディスクレーザーについても、原理的には励起光を高効率で導入できる理想的なファイバレーザー構造であり、今後飛躍的な技術革新が起こる可能性を秘めている。

#### 4.6.3 高出力半導体レーザー・ファイバディスクレーザーの将来

先述したように、「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクトの成果として、高出力半導体レーザーやファイバディスクレーザーが製品化され、レーザー加工用光源として産業界に貢献されていることが確認された。

しかしフォトンプロジェクト時には全く予想されなかったスピードで、顧客のレーザー加工に対する要求レベルは強くなってきており、フォトンプロジェクトで開発されたレーザー装置で産業界の先駆的な技術要求に十分応えているかということ、必ずしもそうとはいえない。

本WGでは自動車業界、太陽電池加工分野でのレーザー加工における光源への要求について活発に議論された。

まず国内自動車業界においては、欧州と異なり、レーザーの導入はレーザー加工の醍醐味が活かされるリモート溶接併用型がメインになるであろうとまとめられた。要求される光出力は4～5kWであり、BPP（集光性能を表すパラメータ）は5mm・mrad以下、ロボットで首振りをしていても伝搬モード・集光状態が変わらないことなどの要件により、できれば完全シングルモードが望ましいとの意見があった。

先述したファイバディスクレーザーは表4.6.2に示すように、BPPは満足しているものの、完全シングルモード発振ではなく、また定格光出力が1kWに限定されてしまっている。国内自動車業界の要望を完全に満足させるためには、ファイバディスクレーザーの光出力を4kWまで向上させ、更にシングルモード発振させるといったかなりハードルの高い技術革新が必要である。

太陽電池加工分野については、1064nm、532nm、UV領域といった多種の波長が利用され、また発振形態もCWであったり、高ピークパワーのパルス光であったりと、太陽電池加工用レーザー光源に対する必要条件というのは一概には決められないということであった。ただ現況では短波長を得るためには波長変換を行わざるを得ないこと、その変換効率を如何に上げていくか、また波長変換しない高出力短波長レーザーができれば一番良いという提案が多く出された。

波長変換の変換効率を上げるためには、ビーム品質の良い、ピーク出力の大きい基本波を使用する必要がある、この点についてはフォトリック結晶ファイバを使用したファイバレーザーが今後有力候補となるのは間違いなさそうである。フォトリック結晶

ファイバについては、国内では三菱電線工業(株)などにより研究試作が行われてきたが、現在ではデンマークに本拠地のあるCrystal Fibre社の勢力が圧倒的に強く、ほぼ独占状態となっている。調査委員会では国内でフォトニック結晶ファイバを開発継続できる体制を維持しなければならないのではないかといった提言もあった。

一方レーザー加工に使用できるような高出力短波長半導体レーザーについては、特にシリコンの吸光度が高い532nm付近では、有効なレーザー媒質がほとんどなく、また可視域に蛍光を有するファイバレーザーについても高出力のものは報告されていない。このことから今のところ波長変換以外には、良い手段はない。これらについては学術的な議論からはじめないといけないうだろう。

最後のまとめとして、「フォトン計測・加工技術」研究開発プロジェクトの成果として、高出力半導体レーザーおよびそれを使用したファイバディスクレーザーは、製品となり、レーザー加工分野に貢献しつつある。しかしレーザー加工で要求される技術は、日々高度になってきており、それを満足させるためには、更なる技術革新が必要であることが明らかとなった。他国に負けない国内の「ものづくり」体制を築くためには、「国産レーザー」というアイテムが必須であることはいうまでもなく、そのための体制作りをせねばならぬだろう。

#### 4.7 高効率・高輝度LD光源の現状と将来

##### 4.7.1 加工用レーザー装置の市場動向

加工用レーザー装置の世界市場規模の推移・今後の見込みを図4.7.1.1に示す<sup>47-1)</sup>。レーザー加工装置は、汎用性・効率性が高い省エネ型の加工機として従来の加工装置を置き換える形で景気変動の影響を受けながらも年率12%で成長してきた。代替できる加工対象市場の中での占有率がまだまだ低いこと、および市場自体も拡大することを勘案すると、今後も成長が継続し、2030年には、2007年の14倍に拡大すると見込まれる。これに対応した2030年の加工用レーザーの消費電力を見積もると、日本の総発電量の1%以上を消費することになる<sup>47-2)</sup>。したがって、加工用レーザーの高効率化、高輝度化を実現すれば日本の省エネの実現に大きく貢献できることになる。

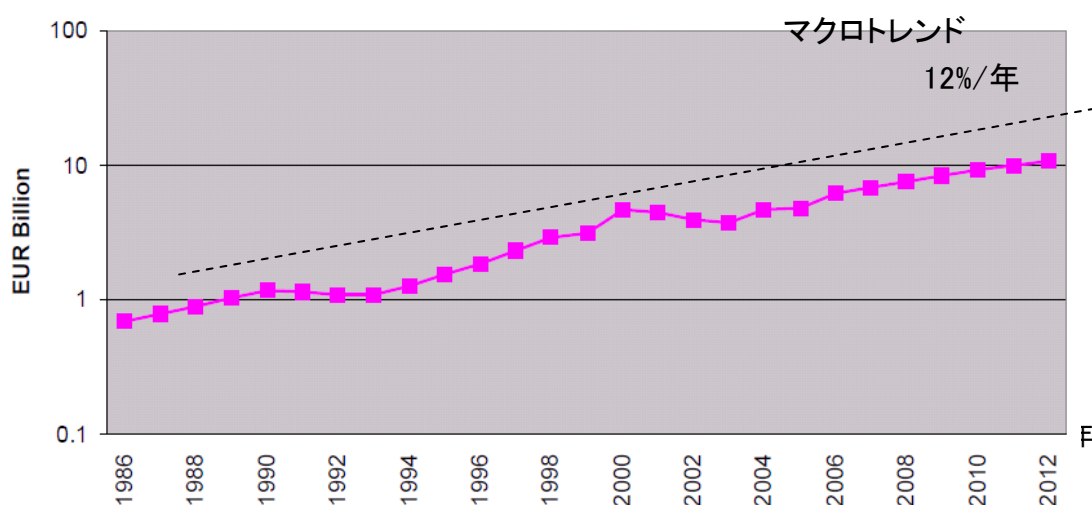


図4.7.1.1 加工用レーザー装置の世界市場動向

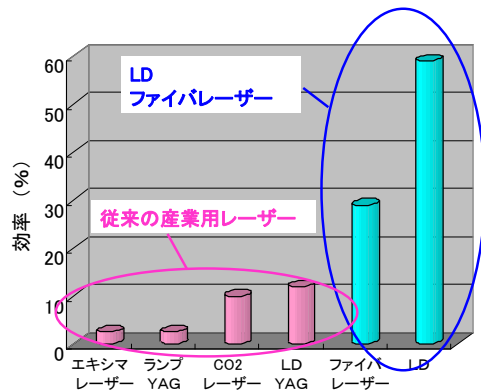


図 4. 7. 1. 2 加工用固体レーザー装置におけるパラダイムシフト

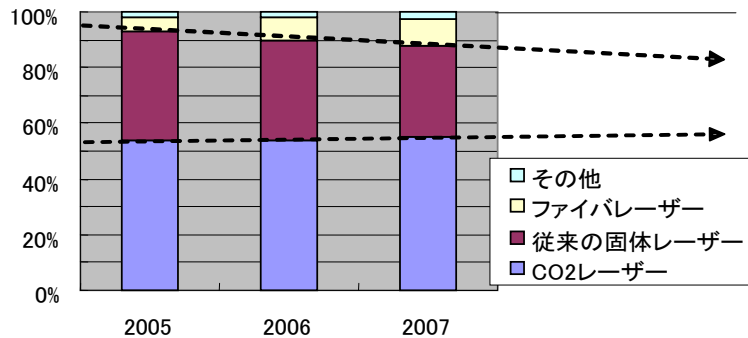


図 4. 7. 1. 3 産業用レーザーの効率比較

次世代の新用途向け加工用レーザーは、多様な発振形態が可能な広義の固体レーザー（ロッド型、ディスク型、ファイバ型、LD 直接等）が成長しており、今後もこの傾向が進むと予測される。広義の固体レーザーの市場は、2006 年に 0.7 Billion €であったものが、2010 年には 1.2 Billion €になると見積もられている<sup>1)</sup>。また、固体レーザー市場では、図 4. 7. 1. 2 に示すように従来の固体レーザーからファイバレーザー、その他（高出力 LD 直接）へのシフトが顕在化している<sup>47-3)</sup>。これは、図 4. 7. 1. 3 に示すように、従来の産業用レーザーと比べて電気→光変換効率（以下、効率）が極めて高く、省エネルギー加工に適しているためである。これらのレーザーを産業用に適用するためには、省スペース、省エネルギー、低コスト、高信頼性、そして、アプリケーションからの要求に応えられる出力、集光性等が必要である。次世代の加工用レーザーの高効率化、高輝度化を行うためには、各種の固体レーザーで共通して必要である高出力 LD 光源の開発がキーとなる。

#### 4. 7. 2 高出力 LD 光源の開発動向

LD は、直接電気エネルギーを光エネルギーに変換するため、他のレーザーと比べて原理的に効率が高い特長があり、図 4. 7. 2 に示すように広義の固体レーザーの光源、あるいは直接利用を想定し開発が進められている。

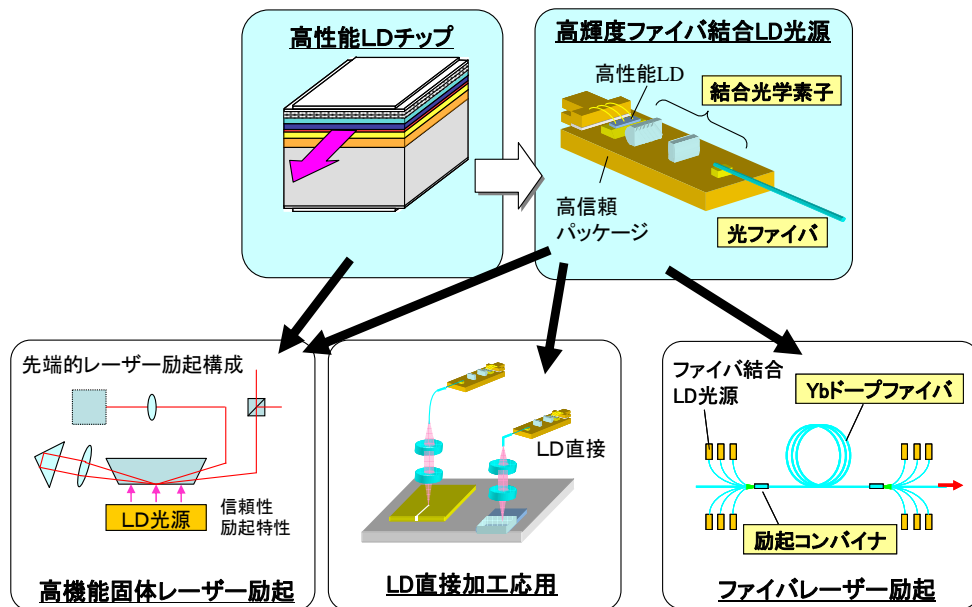


図 4. 7. 2 高出力 LD の応用

この分野の開発については、欧米、特に、ドイツ、米国で大きなプロジェクトが進められており、急速に開発が進んでいる。ドイツでは、BRIOLAS(Brilliant diode lasers)プロジェクトが 2004/10~2009/03 の期間で実施され、100 億円規模の投資が行われている。レーザー光源、光学部品、加工応用、ディスプレイや医療応用まで、ユーザ企業も参画して、幅広い分野での開発が行われている。一方、米国では、DARPA(米国国防総省の研究所；Defense Advanced Research Projects Agency)のプロジェクトで、SHEDS(Super High Efficient Diode Source)プロジェクトが実施されている。効率の目標値を 80%に設定した超高効率 LD の開発であり、期間は、2006~2008 年で、10 億円以上の規模である。DARPA が目指しているのは、100kW の防衛用固体レーザーであり、LD からの変換効率を 20%とすると、500kW の LD 出力が必要であるとしている。特徴としては、国防総省のプロジェクトということで、ドイツのプロジェクトとは異なり、開発目標を明確にした大出力 LD の高効率化に徹したプロジェクトである。

LASE 2009 (SPIE Photonics West；2009 年 1 月 24 日~29 日に米国で開催されたレーザー関係の最大規模の国際会議)<sup>47-4)</sup>でも米国、ドイツの企業からの最新技術の報告や、新製品の展示が目立った。高出力 LD の高輝度ファイバ結合の報告が多く、また、固体レーザー高効率励起が可能な狭スペクトル帯励起対応の新しい波長の波長安定化光源の報告も目立っている。レーザー加工システムとしての高効率化、高輝度化への開発の方向がうかがえる。

#### 4. 7. 3 高効率・高輝度 LD 光源の将来の開発の方向性

日本は LD 光源の開発においては DVD/BD 等の光源で世界を席巻するなど技術的にリードしており、加工用 LD 光源でも世界をリードできる開発例が見られるが、ドイツや米国で行われている様な大きなプロジェクトによる急加速は行われていない。欧米が、日本の技術を巻き返して市場を確保するために戦略的に高出力に特化しているといえる。Si 系の半導体で日本は世界をリードしていたが、米国・韓国が CPU 開発への特化やメモリへの巨大投資で日本を抜き去ったのと同じ構図が展開されようとしている。技術的な優位性を生かし、成長するレーザー

加工機市場での世界競争力を確保するには、高効率・高輝度 LD 光源の開発推進が不可欠である。以上の背景を踏まえて、図 4. 7. 3 に、開発すべきと提案する高効率・高輝度 LD 光源の概念図を示す。LD 自体の高効率化、高出力化、高輝度化、低コスト化に加え、低コスト・高信頼で LD 光をファイバに結合する技術、また、加工品質からみたレーザー光の高輝度化が必要と考える。これにより、加工用レーザーの省エネが実現できる。また、加工に用いられるレーザー光の必要な品質は、加工用途と密接に絡んでいる。今後、ものづくり力の向上として、新しい材料、新しいプロセスにレーザーを適用していくためには、海外製の市販のレーザーの適用ではなく、加工技術開発と融合したレーザー開発を実施する必要があると考える。即ち、新しいものづくりを目指したレーザー加工システム開発は、単なるレーザー発振器の高出力化や高効率化だけではなく、加工品質、信頼性、コストを重視した開発体制で臨むべきである。

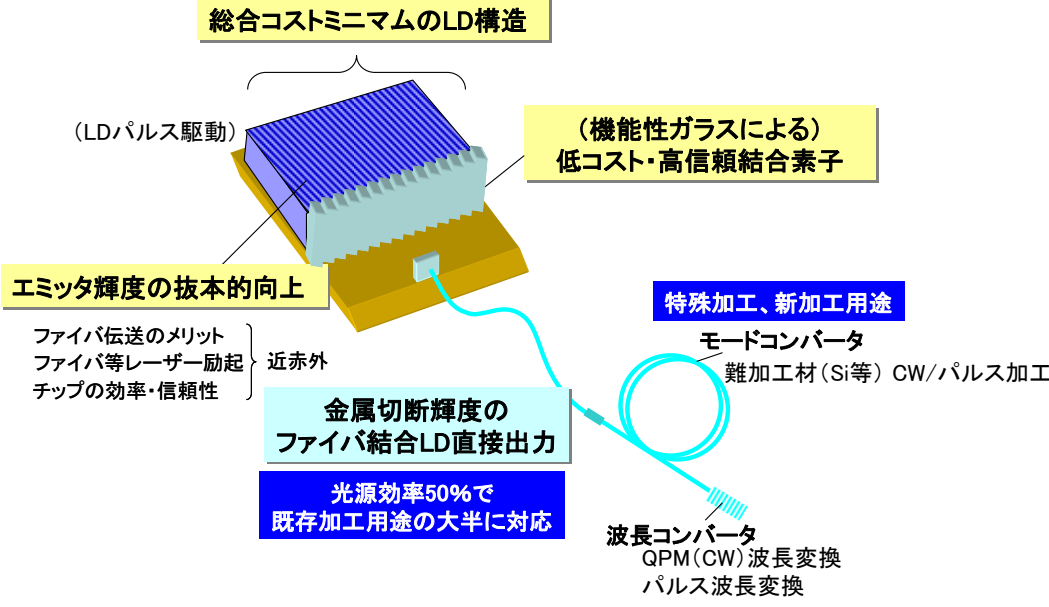


図 4. 7. 3 高効率・高輝度 LD 光源

参考文献

(47-1) 8<sup>th</sup> International Laser Marketplace(2007年6月、ミュンヘン)  
 (47-2) Industrial Laser Solution (2007年1月)  
 (47-3) レーザ加工分野における省エネルギーの可能性に関する調査報告書, (財)光産業技術振興協会, レーザ加工省エネ調査委員会 (2007年8月)  
 (47-4) SIPE Photonics West, Conferences:24-29 January 2009, San Jose Convention Center, San Jose California USA (2009)

#### 4. 8 ファイバーレーザーの現状と将来

##### 4. 8. 1 CWシングルモードファイバーレーザーの現状

ファイバーレーザーのコンセプト自体についてはレーザーの黎明期からいろいろ提案され研究がなされてきたが、その進化をまず加速させたのはエルビウムによる  $1.55\mu\text{m}$  帯のファイバ増幅器(EDFA)の開発である。1988年に最初の報告が出て以来、EDFAは今や光通信では欠くことができない装置となっている。その間、EDFAに使われる光部品として、希土類ドープ等の特殊ファイバ技術、大出力かつ長寿命の性能を年々向上させている励起用半導体レーザー、ファイバ溶解型や空間型の光受動部品等がさらに発展し、またその製造コストも大幅に低下した。2000~2001年にかけてはITバブルともいわれそれ以降は飽和気味の通信市場に取って代わりこれら通信向けに開発された光部品技術の適用先が通信市場以外の方向に転用されてきた。100W 超出力のイットリビウム(Yb)ドープクラッド励起シングルモードファイバーレーザーの報告が2000年にIPG社から報告されて以来、シングルモードファイバーレーザーの出力はどんどん向上しており同社は2008年に6kW出力の報告を行っている。同社はシングルモードにて10kWに向けて開発を進めているとのことである。

また2008年に起こったレーザーとファイバに関する大きな動きとしては、Rofin社によるNufern社の買収、nLight社によるLiekki社の買収、そしてTrumpf社によるSPI社の買収である。このような垂直統合型の動きは、既存技術による大出力レーザーを製品として抱える各社のファイバ技術活用に対する今後の逼迫性を象徴するものである。IPG社も開発当初に比べて社内開発品の活用を増やしているとのアナウンスもしている。

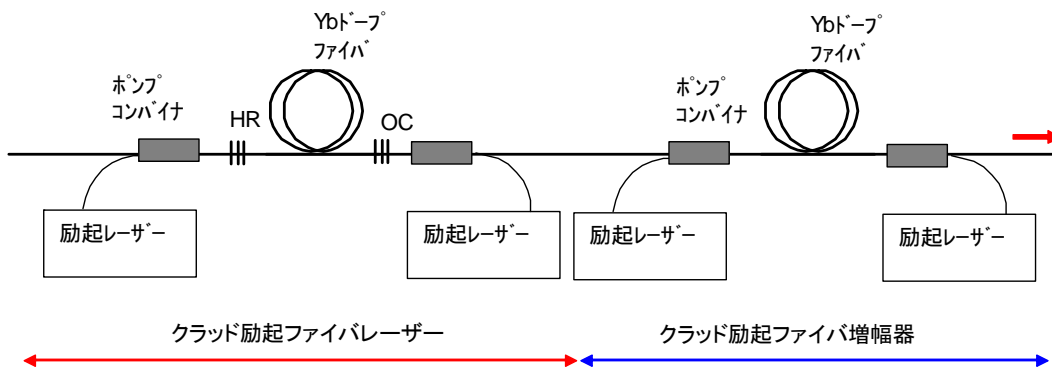


図4. 8. 1. 1 シングルモードファイバーレーザーの構成例

図4. 8. 1. 1はシングルモードファイバーレーザーの構成例と出力特性である。ファイバーレーザーの高出力化については関連する部品技術の向上が欠かせないが、kW級のファイバーレーザーを支える技術として特に重要となっている以下の3点の現状についてまとめてみる。

##### ① 励起レーザー技術

Ybファイバの励起波長については図4. 8. 1. 2に示すようにYbの吸収ピークである920nm付近と976nm付近が使える。920nmで励起する場合、波長の制御精度が要求されないがレーザー波長に対する量子効率の面で976nm励起と比較して5%程度効率が悪い。一方で976nmを使う場合吸収のスペクトル幅が狭いため励起レーザーの波長を正確に合わせる必要がある。半導体レーザーは駆動電流、温度により波長が変わってしまうため波長の制御技術が必要である。現状ではレーザーチップの製造技術により波長を揃える努力やレーザーの冷却方法により波長制御をすることが行われているが、Volume Bragg Gratingという形で光学的に波長を揃える技術もいろいろな研究が行われている。励起レーザーについてはその出力の向上がファイバーレーザーの出力に大きく作用するが、全

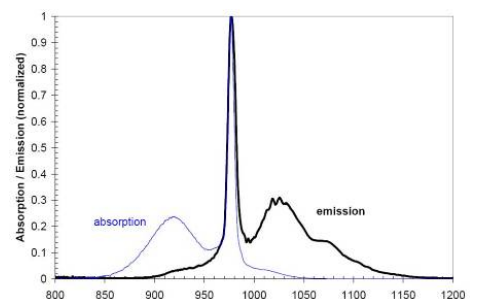


図4. 8. 1. 2 Ybドープファイバの特性

ファイバ型のファイバーレーザーの場合、コア径  $105\mu\text{m}$ 、クラッド径  $125\mu\text{m}$ 、そして NA が  $0.12\sim 0.22$  のファイバに結合する形が標準となってきた。シングルチップをこのファイバに結合する場合、 $10\sim 12\text{W}$  級の出力が得られている。昨今各社が力を入れているのは複数のチップ出力または、マルチストライプのレーザーバーやスタックされたチップ出力を結合してやはり  $105/125\mu\text{m}$ 、 $\text{NA}=0.15$  級のファイバに結合するマルチチップモジュールへの動きである。先日行われた Photonics West 2009 では各社から同ファイバ出力の形で  $80\sim 100\text{W}$  級の出力の報告も行われている。図 4. 8. 1. 3 はクラッド励起ファイバーレーザーの特性例であり、 $10\text{W}$  級の励起半導体レーザーを 36 個の励起ポートからコア径  $12\mu\text{m}$ 、クラッド径は  $200\mu\text{m}$  の Yb ファイバに入力し 70% 程度の効率で  $250\text{W}$  の出力が得られている結果（プロットされたデータ）である。前述の  $100\text{W}$  級の励起半導体レーザーは今後の高出力化には欠かせないもので、ポンプコンバイナや希土類ドープファイバの特性向上によりより  $\text{kW}$  を超える高い出力が期待されている。また VCESL 等の従来とは違った利点を持ったレーザーの効率も向上しており今後の適用が期待されている。

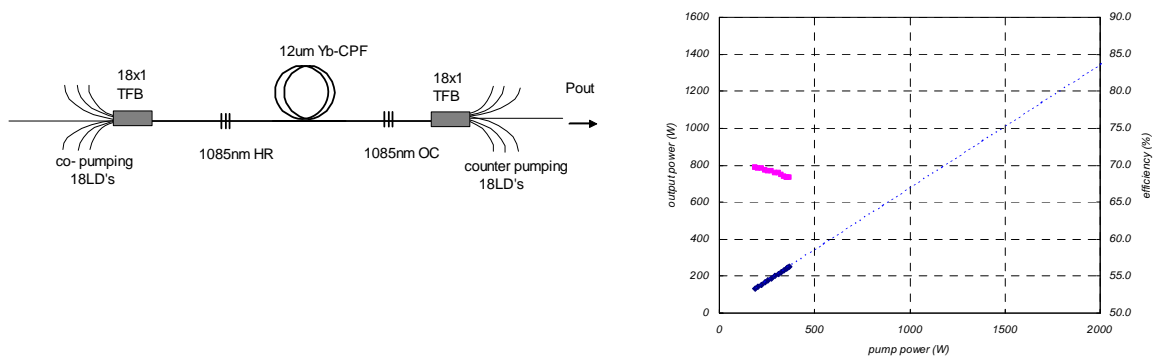


図 4. 8. 1. 3 クラッド励起シングルモードファイバーレーザーの構成と特性例

さらに高い  $10\text{kW}$  級のシングルモード出力を考える場合、一つの方向性としては図 4. 8. 1. 1 の様にファイバ増幅を重ねていく設計となるが、さらに高い励起光源が必要になってくる。実際、IPG 社の  $6\text{kW}$  のファイバーレーザーでは  $200\text{W}$  出力の  $1018\text{nm}$  のシングルモードファイバーレーザー（光-光変換効率 70%）が使われている。この波長での励起は図 4. 8. 1. 4 でわかるとおり吸収効率が低くなるが、一方で発振波長の  $1070\text{nm}$  に対する波長の差は小さく量子効率は向上するので IPG 社の報告によれば 75% の光-光変換効率を得られたとのことである。励起半導体レーザーからの光-光変換効率は  $75\% \times 70\% = 49\%$  という事で現時点でのコストは別として効率としては実用的なレベルである。このようにファイバーレーザーでファイバーレーザーを増幅するという形態は高輝度レーザーを実現するために今後さらに検討が進むと考えられる。

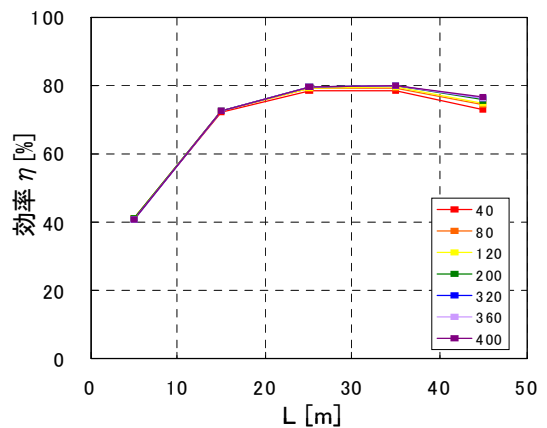


図 4.8.1.4 ファイバ-長、励起光パワーと効率

## ② 希土類ドープファイバ

光ファイバは細くて長いという特徴から他のゲイン媒体と比較して非線形現象が発生しやすい。誘導ラマン散乱 (SRS) や誘導ブリルアン散乱 (SBS) はその典型例であり、カー効果等も含めてこれを低減させることが必要となっている。非線形の低減するにはこの細くて長いという特徴に対して逆の方向、つまり太くて短いという方向で設計をしていけば良いわけであるが、いろいろなトレードオフが存在する。図 4. 8. 1. 4

は、200dB/mの濃度のYbドープファイバ増幅器のファイバ長と励起光レベルに対する効率であるが、励起光レベルに従い最適長が存在することが分かる。ファイバを短くしても一定の効率を得るためにはYb濃度の向上が一つの方向であるが、一方でYbを高い濃度でドープする場合、Ybイオン同士の結合（クラスタリング）による効率の低下や、さらにフォトダークニングと言われる可視光波長を基点とする損失の異常な増加が報告されている。フォトダークニングの低減についてはいろいろな研究がなされているが、一緒にリン(P)をドープすることによりこれを低減するという結果が多数報告されている。また、リン酸ガラスやビスマスガラス等、従来のシリカガラスとは違うホストガラスの研究開発も行われているがハイパワーレーザーへの実用性に関してはまだまだ未知数である。

また非線形低減の別な方向としてはファイバを太くするということになるが、ファイバのコア径を太くする、ラージモードエリア(LMA)にすると、通常のファイバ構造の場合シングルモードが崩れて高次のモードが発生しビーム品質が劣化していく。LMA化を進めながら、ビーム品質を高品質に保つために提案されている開発の方向としては、ファイバに空孔をあけることによりさまざまなフォトリソグラフィックファイバ(PCF)や、HOM(Higher Order Mode)技術が知られている。PCFでは1m程度の長さで実現できたゲインファイバも報告されているが、一方でロッドファイバという言い方で従来ファイバの様にフレキシブルな構造を有していない物もある。HOMについては選択的に高次モードを励振できる技術で、従来ファイバと比較して100倍程度のコア有効断面積(Aeff)が確保でき、非線形の限界を押し上げる有望な技術と考えられている。

### ③ ポンプコンバイナ

励起光源からの光をゲインファイバのクラッドに低損失で導光する技術については各社各様の方法で実現している。高出力シングルモードファイバーレーザーを実現させる場合、一定の効率を得るために、クラッド径を200~400 $\mu$ m程度に制限する設計が一般的である。IPG社はパラレルサイド励起方式という方法を唱えているが、その詳細については公開されていない。SPI社はGT-WAVEという方式で、ゲインファイバと励起ファイバを並行して線引きし側面から励起する方式をとっている。その他ファイバの端面から空間結合する方式も実験室のデータとしての報告はされている。古河電工では前述のファイバーレーザーの設計例に示すように、図4.8.1.5のようなテーパファイババンドルというファイバ溶解型の光部品を使用している。励起光をクラッドに導波する際の透過率は95%以上が確保できており非常に低損失な合波機である。

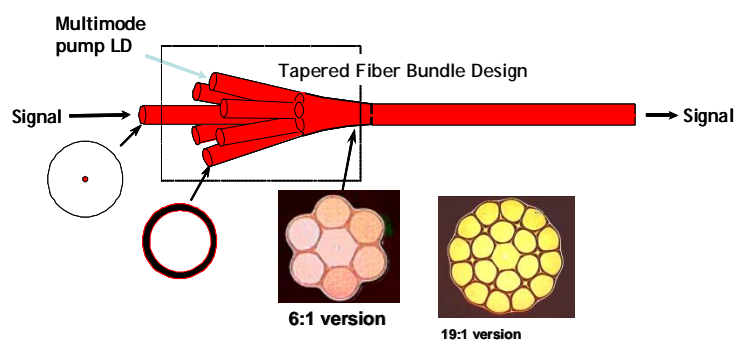


図 4.8.1.5 テーパーファイババンドル

## 4.8.2 ファイバーレーザーの将来

半導体レーザーで励起されているファイバーレーザーは、半導体レーザーの輝度変換を行っているデバイスに他ならず、半導体レーザーの輝度向上がそのままファイバーレーザーの出力向上につながっている。半導体レーザーそのままで使われる分野もさらに増えていくものと考えられるが、さらに性能が向上するファイバーレーザーではまだまだ今後の発展が期待されている。現状の高出力ファイバーレーザーにおいてまだまだ足りていない性能としては、偏光保持出力とその安定性、制御性、発振波長とその線幅の制御性、安定性がまず挙げられる。これらは今後の展開として期待されるSHG、THG、FHGやOPO等の波長変換用途や、コヒーレントなレーザーコンバイナを考えていく場合、需要がでてくる。ファイバーレーザーにおいて偏光、波長の課題が解決していくに従い、波長変換素子やレーザーコンバイナに関する周辺部品技術も今後進歩すると考えられる。



また現状では、Yb による  $1\mu\text{m}$  帯のファイバーレーザーが主流であるが、角膜の吸収が一段と増える  $1.4\mu\text{m}$  帯よりも長いアイセーフ波長のレーザーも期待されている。エルビウム (Er) やツリウム (Tm) であるが、特に Tm については  $793\text{nm}$  付近の励起で  $2.1\mu\text{m}$  付近のレーザー出力を光-光変換効率 60%程度の高効率で実現できるという報告もあり、注目されている。

ファイバーレーザー技術は今後もいろいろな方向での発展性を秘めており、ここでは詳しく述べなかったパルスレーザーも加えるとまだまだ開拓できていない分野も多く、海外勢との競争を考えるとより多くの開発リソースの投入と、国内ユーザーと協調した応用分野の確保が必要であると考えられる。

#### 4. 9 高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源の現状と将来

##### 4. 9. 1 ファイバーレーザーの現状と主な加工応用分野

レーザー出力の動作形態は、CW (連続波) 動作とパルス動作の 2 つに大別できる。CW 動作による加工は、数百 W から数 kW 以上の高出力で、主に自動車分野や重工業分野における金属の切断や溶接、プラスチック部品の溶着などに使われることが多い。ファイバーレーザーは、近年、この CW 動作において急速に進展し、 $50\text{kW}$  以上の出力が得られており、これらの分野で使用され始めている。

一方、電気部品・電子デバイス分野におけるレーザーの利用は、リチウム電池の溶接、抵抗体のトリミング、半導体ウェハのマーキング、液晶配線リペアなど多岐にわたっている。表 4. 9. 1 は、電気部品・電子デバイス分野におけるレーザー加工の主な応用事例と使用されるレーザーの種類を示したものである。この表から、これらの分野では、パルス幅が数十 ns から数百 ns 程度と比較的短い Q スイッチパルス固体レーザーが多く用いられていることが分かる。特に、電子デバイスの薄膜加工などでは、材料の吸収特性などに適した加工を行うため、近赤外光に加え、可視光や紫外光の Q スイッチパルス固体レーザーが良く使われており、表 4. 9. 1 では (※) で示したものがこれに相当している。

表 4. 9. 1 電気部品・電子デバイス分野におけるレーザー加工例

レーザー加工対象	応用事例	使用されるレーザーの種類
半導体デバイス	フォトマスクのリペア	Q スイッチパルス固体レーザー (※)
	エキシマレーザーリソグラフィ	エキシマレーザー
	シリコンウェハマーキング	Q スイッチパルス固体レーザー (※)
	メモリリペア	Q スイッチパルス固体レーザー
	IC パッケージマーキング	Q スイッチパルス固体レーザー (※)
ディスプレイデバイス	ブラウン管電子銃の精密スポット溶接	パルス固体レーザー
	液晶ディスプレイ (LCD) 用カラーフィルタリペア	Q スイッチパルス固体レーザー (※)
	TFT-LCD リペア	Q スイッチパルス固体レーザー (※)
	低温ポリシリコンエキシマレーザーアニール	エキシマレーザー
電気・光回路部品	抵抗体トリミング	Q スイッチパルス固体レーザー
	多層ビルドアップ基板のビア加工	パルス $\text{CO}_2$ レーザー
	IC はんだづけ	CW 固体レーザー
	光機能部品の精密スポット溶接	パルス固体レーザー
周辺機器	ハードディスクのレーザーテクスチャリング	Q スイッチパルス固体レーザー
	ハードディスクヘッドサスペンションのスポット溶接	パルス固体レーザー
	インクジェットプリンタノズルの穴あけ	エキシマレーザー
	キーボード、キーパッドのマーキング	Q スイッチパルス固体レーザー
エネルギーデバイス	リチウムイオン電池ケースのシーム溶接	パルス固体レーザー
	太陽電池のレーザーパターニング	Q スイッチパルス固体レーザー (※)

図4.9.1は、主な個体レーザーのパルス幅とパルスエネルギーによる分布を示している。なお、ここでは、ファイバーレーザーもレーザー媒体が石英ファイバーであることから、固体レーザーの一種として同時に示してある。現在、これらの固体レーザーでは、比較的高い効率が得られる半導体レーザー（LD）励起が多く使われているが、この図から、電気部品・電子デバイス分野における薄膜加工に使用されるQスイッチパルス固体レーザーの多くは、パルスエネルギーが数百 $\mu\text{J}$ 程度以下であることが分かる。また図4.9.1には、固体レーザーのほか、特に半導体や液晶デバイスのプロセスに多く使われているエキシマレーザーも同時に記載している。図からも分かるように、エキシマレーザーは、紫外光で高いパルスエネルギーが得られるため、特に半導体のリソグラフィや液晶ディスプレイのシリコンアニールなどの大面積加工に多く使われている。しかし、このエキシマレーザーは、塩素やフッ素などの腐食性ガスを使用しているため、取扱いに注意が必要であることや、これらのガスが封入されているレーザーチャンバの交換などでメンテナンスコストが高価であるなどの欠点を有している。そこで、ファイバーレーザーなどの固体レーザーで、パルスエネルギーの比較的大きな紫外パルスレーザー光源を実現することができれば、これらの欠点を回避することができる。特に、他のレーザーに比べて高い効率が得られるファイバーレーザーで高エネルギーパルス光が得られれば、信頼性が高く、安全な加工が低コスト（低消費電力、低メンテナンスコスト）で実現できると考えられる。これにもかかわらず、現在、急速に研究開発、製品化がなされているファイバーレーザーは、前述したようにCW動作のものが多く、パルス動作のファイバーレーザーはそれほど多くはないのが現状であり、これらの開発が期待されている。

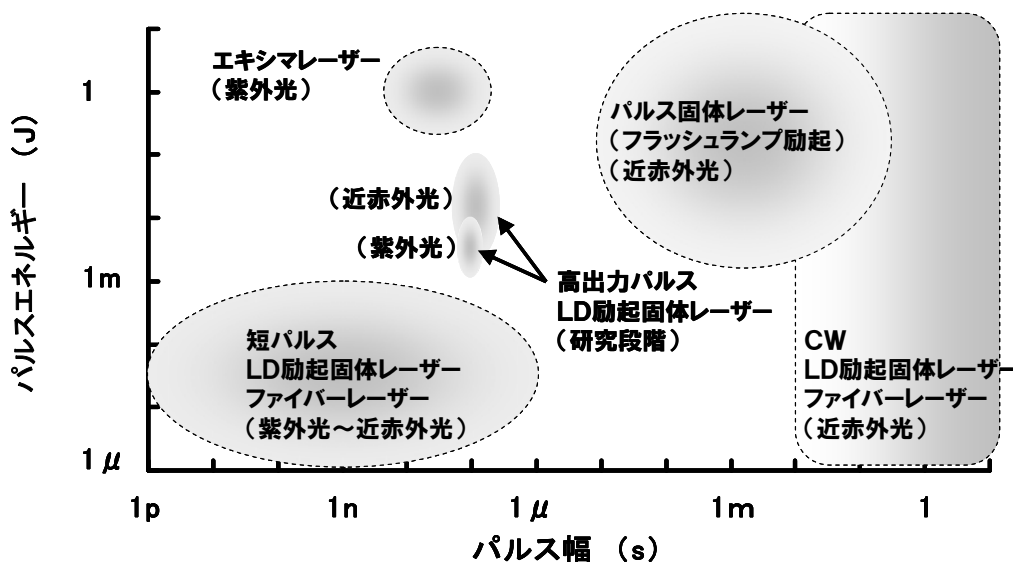


図4.9.1 主な固体レーザー、ファイバーレーザーにおけるパルス幅とパルスエネルギーの分布

#### 4.9.2 高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源の実現に向けた課題

加工用途として多く用いられる Yb ファイバーレーザーは、波長が 1030nm～1100nm 程度

の近赤外光であるため、非線形結晶による波長変換により紫外光を得るのが一般的である。したがって、波長変換に適したファイバーレーザー光としては、波長幅が狭く、直線偏光であることが望ましい。また、高パルスエネルギーを有するレーザーとして、前出したように、液晶ディスプレイのシリコンアニールなどに使われるエキシマレーザーがある。このエキシマレーザーで代表的なものに、パルス繰り返し300Hzでパルスエネルギー1Jを発生するものがある。このエキシマレーザーのパルス幅は数十ns程度であるため、ピーク出力も数十MWという高い値を有している。ファイバーレーザーで高エネルギーパルス紫外光を実現するためには、この高いピーク出力が障害となり、具体的には以下のような課題がある。

#### (a) ファイバー損傷

ファイバーレーザーは、直径が数 $\mu\text{m}$ ～数十 $\mu\text{m}$ 程度のコアからレーザー光を出力するため、高いピークパワー密度のためにファイバーが損傷することがある。この損傷は、ファイバー内部で発生する場合と、入出射端面で発生する場合とがあるが、通常、内部よりも端面での耐性が低い。一般的なファイバー材料である石英の場合、端面の損傷しきい値は $3\text{GW}/\text{cm}^2$ 程度である。したがって、これを超えないような太いコア径のファイバーを用いるか、エンドキャップと呼ばれる石英の棒を端面に融着することで入出射面でのレーザー光の面積を広げるような手法がとられる。また、ファイバー内部は、端面よりも高い耐性を有しているが、内部欠陥や不純物などがあると、この部分での耐性が低下するため、損傷が生じることがある。パルス動作では、CW動作に比べてはるかに高いピークパワー密度となるため、これら端面の処理やパルス動作に適したファイバーコア径の設計、高品質なファイバーの入手などが課題となる。

#### (b) 自己パルス発生による不安定動作

ファイバーレーザーにより、高効率で高いパルスエネルギーを得るには、シード（種）となるパルス光を発生する発振器とパルスエネルギーを増大させる増幅器とを組み合わせたMOPA（Master Oscillator Power Amplifier）方式の構成が一般的である。増幅器には、パルスエネルギーを増大させるために、強い励起が必要となるが、励起が強すぎると、ファイバーレーザー自体の高い利得のため、発振器からのパルス信号が入力していない間に、パルス信号とは無関係に増幅器自体から自己パルスが発生することがある。この場合、励起の一部がこの自己パルスで消費されるため、必要なパルス信号の増幅率が低下するとともに、パルス動作そのものが不安定となる。また、この自己パルスは、パルス信号の入射方向とは無関係に、両方向に発生するとともに、ファイバーのコアだけでなくクラッドも伝播する。このため、自己パルス光が励起用のLDに戻り、LDを破損するような悪影響をおよぼすこともある。したがって、この自己パルスが発生しないようなMOPA構成の設計が課題となる。

#### (c) ファイバーの非線形現象による性能劣化

ファイバー内を高いパワー密度でレーザー光が伝播する場合、誘導ブリルアン散乱（SBS）や誘導ラマン散乱（SRS）などの非線形現象が発生することがある。SBSは、増幅パルスの進行方向と反対方向に発生し、出力低下を生じる。このSBSは、レーザー光により励起される音響フォノンとの相合作用によって生じるものであり、高いピークパワー、長いパルス幅、狭い波長幅、長いファイバーであるほど影響が強くなる。これは、高い増幅出力を得るためにファイバー長を長くしたり、非線形結晶による波長変換の効率を上げるために波長幅を狭くしたりするための障害となる。またSRSは、信号とは異なる波長の光に変換されるため、増幅パルス出力が低減し、波形が乱れる現象が生じるため、後段の波長変換による紫外光発生に悪影響を

およぼす。SRS は、レーザー光により励起される光学フォノンとの相合作用によって生じるものであり、高いピークパワー、長いファイバー長であるほど影響が強くなる。したがって、これらの非線形現象を抑制または回避するようなファイバーレーザーの設計が課題となる。

#### 4. 9. 3 高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源の将来

高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源を得るためには、前節に示したような多くの課題があるため、CW ファイバーレーザーに比べ、まだその開発が進展してはいない。しかし、これが実現されれば、特に電気部品・電子デバイス分野におけるレーザー加工に大きな好影響を与えることが可能である。

たとえば、エキシマレーザーによるシリコンアニール技術は、主に中・小型の液晶ディスプレイに使われているが、ここで使われているエキシマレーザーのほとんどが海外製である。このディスプレイ市場は、2006 年度の約 7.7 兆円をベースとして、年 14%程度の成長を続けている。また、このアニール技術は有機 EL ディ스플레이にも適用でき、この市場も含めて、年 14%の成長が続くと、2015 年には 18 兆円程度の市場規模が想定される。また、この 18 兆円の市場規模は、中・小型パネルサイズの平均を 5 インチ程度とすると、パネル枚数で 170 億枚程度である。現在のエキシマレーザーでのアニールプロセス能力は  $28\text{cm}^2/\text{s}$  程度であるので、この枚数を処理するためには、全世界で 2700 台程度のレーザーアニール装置が必要となる。これは、中・小型ディスプレイの国内シェアが 17%程度としても、460 台程度のレーザーアニール装置が国内で使われることに相当する。したがって、海外製のエキシマレーザーを用いたアニール装置価格が 4 億円程度とすると、国産の高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源によるレーザーアニール装置が同程度の価格で実現できれば、2015 年には国内だけでも、1850 億円程度のファイバーレーザーアニール装置市場が育つことになる。

高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源技術が国内で開発されれば、上記のように既存のレーザー加工装置市場の国内シェアを拡大することができるとともに、この光源によって作製される電気部品・電子デバイス分野の製品市場成長、国内メーカーのシェア拡大にも寄与すると考えられる。また、エキシマレーザーの電気-紫外光発生効率は 3 から 5%程度であるが、50%以上の高い効率が得られるファイバーレーザー光を波長変換して得られる紫外光では、10%以上の電気-紫外光発生効率が期待できる。さらにエキシマレーザーは、前述したように腐食性ガスを用いていることから、レーザーガスを封入したチャンバの交換などで、年間 5000 万円程度のメンテナンスコストが必要とされているが、これを固体材料であるファイバーレーザーに置き換えることで、半減することも可能と考えられる。

上記したように、高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光源は、国内のレーザー加工装置の市場拡大のみならず、消費電力、メンテナンスコストが低減できることにより、電気部品・電子デバイス分野の市場にも大きく寄与すると考えられる。また、現在主流であるエキシマレーザーからファイバーレーザーに置き換われば、毒性の高い腐食性ガスが不必要となることや低消費電力となることによる環境負荷の低減効果も大きい。

パルス動作のファイバーレーザーの開発は、前述したように、まだ大きく進展してはいないが、最近、ミシガン大学で EUV 発生のドライバーとしてファイバーレーザーから 4mJ のパルスエネルギーを得るなど、ファイバーレーザーによる高パルスエネルギー発生の研究開発が開始されつつある。したがって、国内で早期に、高エネルギーパルス紫外ファイバーレーザー光

源の開発を進めることが必要である。また、国内レーザー加工装置市場の拡大、電気部品・電子デバイス分野での国内メーカーシェア拡大のために、高パルスエネルギー紫外ファイバーレーザー光源の開発・実現が期待されている。

#### 4. 10 グリーンレーザーの現状と将来

##### 4. 10. 1 はじめに

一口にグリーンレーザーといってもさまざまなものが存在する。例えば、Ar イオンレーザー(514nm)、銅蒸気レーザー(511, 578nm)、フラッシュランプ励起色素レーザー(coumarin6)、電子ビーム励起の半導体レーザー(ZnTe:535nm)等がある<sup>410-1)</sup>。これらに加え、非線形光学結晶の発達に伴って、波長変換技術が進歩し、Nd や Yb といった、1 $\mu$ m 帯の近赤外固体レーザー光をその半分の波長に変換することで、0.5 $\mu$ m 近辺のグリーン光を得ている。今日、我々が目にするグリーンレーザーのほとんどが波長変換によって得られていると言って過言ではない。この節では、グリーンレーザーの現状を概観し、グリーンレーザーの必要性と現状のトレンドに関する分析を行い、新しい技術の紹介を行う。

##### 4. 10. 2 グリーンレーザーの必要性

グリーン光は人間の目の感度の最も良い波長帯域の光である。したがって、視認性を上げるような用途、例えば、レーザーポインタなどには都合の良い波長である。それと同様に、ディスプレイ等に用いる光源としても魅力的である。グリーンが鮮やかであれば、画像は生き生きとし、その表現力を増すだろう。ところが、可視光のレーザー光源として、青色(波長 450nm 近傍)および赤色(波長 630nm 近傍)においては既に半導体レーザーが実用化されているが、緑色(波長 530nm 近傍)については半導体でのレーザー発振が難しく、別な手法(例えば、波長変換技術)を利用したグリーンレーザーの構築が必要である。

もう一つは、人間ではなく物がグリーン光をどの様に感じるかである。図 4. 10. 2. に物質の吸収率の波長依存性を示す。

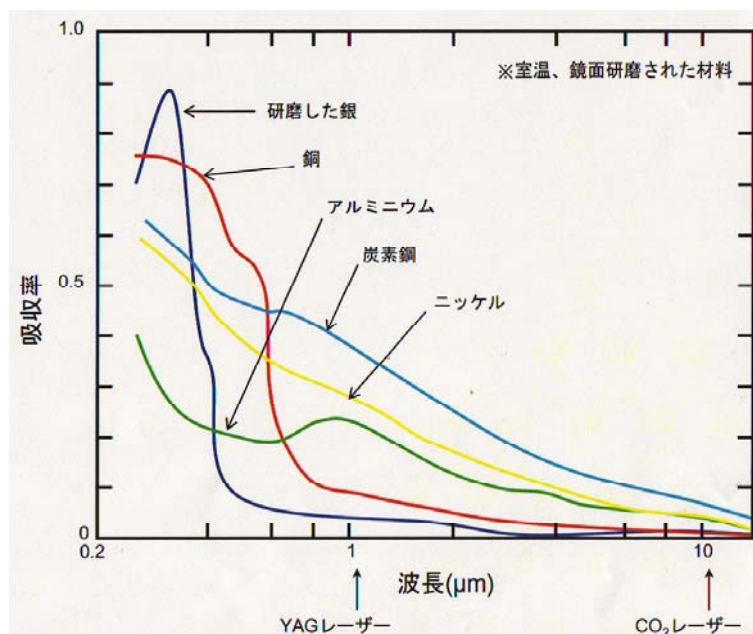


図 4. 10. 2 物質(金属)の光吸収率の波長依存性

図4. 10. 2を見てわかるように全ての金属において、波長が短くなるにつれ、吸収率が高くなることわかる。特に、銅におけるグリーン光の吸収は50-60%に到達する。一方で、1 $\mu$ m以上の波長の光では10%以下の吸収率であり、ほとんど吸収を受けないことがわかる。現在、世に出回っている一般的な加工用レーザーはCO<sub>2</sub>もしくは、YAGレーザーである。レーザー加工は照射したレーザーエネルギーを金属等に吸収させ、熱エネルギーとし、溶断する手法がとられる。この際、CO<sub>2</sub>レーザーでは、銅の加工効率が非常に悪いことがわかる。したがって、グリーンレーザーは人間の視覚に訴える用途（ディスプレイ）や、加工用途（銅の加工：鉛フリー直接銅溶接、マーキング、一般金属加工・溶接）に非常に重要な役割を果たすことが期待される。特に波長を532nmに選ぶことで、マーキング時のダメージを低減できる効果がある。

#### 4. 10. 3 グリーンレーザー光源の現状

ここで考える現状とは、固体レーザーに関する物に絞ることとする。したがって、上述したような、気体・液体を媒質としたレーザーに関しては割愛する。装置の大型化、メンテナンスフリー特性等を考えて、将来的にはファイバー形状の固体レーザーが加工用途等には有望であると考えられるからである。

さて、一口にグリーンレーザー光源といっても、その目的とするところで、さまざまな形態が存在するが、大きくは、パワー（エネルギー）、波長、パルス幅、繰り返し周波数、ヘッドサイズによって、大別できると考えられる。現行のグリーンレーザー光源製造メーカーをピックアップし、米国の国際学会であるPhotonics WEST 2009における展示を参照しながら、以上の観点でレーザーの種別を整理する（表4. 10. 3. 1）。

##### 4. 10. 3. 1 海外メーカーの取り組み

表4. 10. 3. 1 グリーンレーザー光源に関する海外メーカーの取り組み

メーカー名 (国名)	動作モード	Head size [mm <sup>3</sup> ]	備考
	Wavelength [nm]/Repetition [Hz]/ Power [W]/etc.		
< 欧州 >			
Xiton Photonics (Germany)	Nd:YAG Q-SW Laser 532nm/1~50 kHz/7ns/5W/M <sup>2</sup> <1.3	446×440×134	XVL-AMP
Frankfurt Laser Company (Germany)	532nm/CW/2-10W/M <sup>2</sup> <2/ 532nm/CW/0.8-1.0W/M <sup>2</sup> <2/	180×125×430 60×77×156	523nm (~500mW) の波 長もある。
Jenoptik (Germany)	JenaLasD.2.8/532nm, 8W/M <sup>2</sup> <10		
Pico Quant (Germany)	LDH-P-FA-530/532nm/100mW/CW/	20×100×150	

Phoxx (Germany)	488nm/CW/20mW/M <sup>2</sup> <1.3	40×40×100	グリーンはなし
IMM Photonics (Germany)		12φ×55L	グリーンもやろうとしているが、カスタム。微小サイズが特徴
Sacher Lasertechnik (Germany)			青から緑にかけて様々な波長での出力。OPO出力は100mW程度
IPG Photonics Corp. (Russia)	532nm/CW/15W/ Single Frequency <5MHz adjustable 0 to 100%,	45×70×200	Yb ファイバーレーザーの2倍波
Laser-Compact (Russia)	532nm/200mW	46×90×228	
THALES (France)	532nm/2.5J@10Hz/4-8ns/ 527nm/50J/(shot/min.)/20ns/	188 × 288 × 1100 390 × 750 × 1500	SAGA Atlas
Time Bandwidth (Switzerland)	532,527,523nm/8ps/50-150MHz/ 150mW/M <sup>2</sup> <1.1/	170×78×380	Lynx-SGH、ピコ秒パルス
ELFORLIGH T (UK)	532nm/10ns/1kHz/100mW/M <sup>2</sup> <1.2/ 532nm/CW/~5W/M <sup>2</sup> <1.2/	30×50×150 30×50×150	(FQ-532) (HPG)
Laser Quantum (UK)	532nm/ CW/~7W/M <sup>2</sup> <1.1/	136×57×217	
Cobolt (Sweden)	532nm/CW/300mW/M <sup>2</sup> <1	40×60×95	比較的小スケール、その他波長あり
<北米>			
Coherent (USA)	523nm/10-15ps/200kHz/8W/M <sup>2</sup> <1.1/ 523nm/60ns/120kHz/45W/M <sup>2</sup> <1.1/ 532/CW/8W/M <sup>2</sup> <6/ 532/CW/18W/M <sup>2</sup> <1.1/	393×169×972 241×260×989 44×65×121 109×140×464	Talisker AVIA 532 Genesis™Taipan™ Verdi™ その他、小型で多波長： ~100mW
Spectra-Physics (USA)	532/CW/5W/M <sup>2</sup> <1.2/ 532/CW/15W/M <sup>2</sup> <1.1/ 532/CW/150mW/M <sup>2</sup> <1.1/	102×135×495 104×135×350 42×39×110	Centennia Millennia Pro Excelsior 小型で多波長：~100mW

Photonics Industries (USA)	532nm/30W/25ns 532nm/20W/20 to 25ps	190×127×600 190×127×600	DS20HE-532 PS500-532
Continuum (USA)	Genus/4J@10Hz/532nm Custom/10ps-100ns/<5Hz/150J		パルスパワーでは最大の150J出力, 10Hzで4J
Crystalaser (USA)	532nm//1kHz/10-25ns/1W/M <sup>2</sup> <1.1	30×30×120	様々な波長が展開されている。~W クラス
BW TEK (USA)	532nm/20mW/		
MPB communications (Canada)	514nm/ CW/~1W/M <sup>2</sup> <1.1/	30×50×132	Yb-fiber レーザーの2倍波
<アジア>			
PHOTOP (China)	532nm/CW/1mW-500mW	5.6φ×20L 他	特徴はヘッドサイズが小さいこと。
Kimmon (Japan)	Green 300mW CW/	50×50×100	

以上のように、一口にグリーンレーザー光源といってもさまざまであるが、最も多いのが532nm/~100mWで、ヘッドサイズが50×50×150mm<sup>3</sup>のものである。特徴的なレーザーとしては、IPG Photonics Corp.、PHOTOP、Continuumが挙げられるだろう。

まずはIPG Photonics Corp.であるが、Ybファイバーレーザーの出力のLBO結晶を用いた2倍高調波変換により15W以上のシングルモードグリーンレーザー光の展示があった。光・光の変換効率は84%と報告されており<sup>410-2)</sup>、高効率での動作が可能である。ヘッドサイズもコンパクトであり、Coherentなどが提案しているTi:Sapphire励起用の高出力グリーンCWレーザー(Verdi)にとっては非常に驚異になることが予想される。また、IPG社のラインアップを見ると既に、kWクラスのシングルモード近赤外レーザーがあり、サブkWクラスのグリーン光の出現も予想される。欠点は、出力は調整可能とあるが、最高出力では効率が84%となるものの、LBOの非線形特性により、低出力では効率が著しく低下する。したがって、定出力の高出力グリーン光を必要とする用途に使う方がよい。

次に挙げるのは、PHOTOPである。出力はCWでW程度であるが、パッケージのサイズが小さい。5.6mmφ×20Lのサイズに、おそらく、励起用半導体レーザーとNd:YVO<sub>4</sub>+PPLNを組み合わせたイントラキャビティ型の共振器構造を持っている様で、レーザーディスプレイ等の光源を強く意識していると考えられる。このパッケージサイズは一般的な半導体レーザー6倍程度と他のグリーン光源よりも遙かに小さい。また、この帯域で有効な半導体レーザーが存在しない現状では非常に有効なツールとなり得る。

最後に挙げるのはContinuumである。このメーカーの特徴は、高出力のパルスグリーンレーザーであり、4J/pulse/10ns/10Hzおよび、150J/pulse/10ps-100ns/<5Hzは世界最高パルス出力の市販レーザーであると考えられる。固体レーザーはファイバーレーザーが今後の産業の



中心になっていくのは確実であるが、バルクレーザーが唯一ファイバーレーザーに勝る動作モードである。

#### 4. 10. 3. 2 日本メーカーの取り組み

表4. 10. 3. 2 グリーンレーザー光源に関する日本メーカーの取り組み

メーカー名	動作モード	Head size [mm <sup>3</sup> ]	備考
	Wavelength [nm]/Repetition [Hz]/ Power [W]/etc.		
Cyber Laser Inc.	532nm/1-50kHz/60-150ns/15W/ M <sup>2</sup> <4 532nm/single shot-30kHz/ 10-13ns/2.5W/M <sup>2</sup> <1.5	230 × 125 × 470 160 × 120 × 410	
古河電気工業 <sup>410-3)</sup>	Yb doped fiber laser with FBG 波長変換：PPLN 532nm±0.1nm /CW/1.5W/M <sup>2</sup> <1.2 Δλ<0.04nm	16×100×100	用途：マイクロ加工装置、 医療機器、レーザーディス プレイ等
昭和オプトロニクス	JUNO 8000 532nm/CW/8W/M <sup>2</sup> <1.2	140 × 126 × 410	各種理化学応用、チタン サファイアレーザー励起、 マイクロマシーニング 、エンターテインメン ト、医療機器、印刷機器、 可視化装置
ミヤチテクノス	ML-9001A 532nm/Q-SW~200kHz/5W/SM	175 × 200 × 480	金・銅・樹脂・ガラス・ セラミックのマーキング
SUNX	LP-G050 532nm/Q-SW 40kHz/6W	120 × 271 × 380	マーキング
島津製作所	BEAM MATE™ 532nm/ /50mW/M <sup>2</sup> <12	20φ×50L 他	レーザーラインマーカ ーや プロジェクター等
金門光波	Green 300mW CW/	50×50×100	
高知豊中技研	GSHG-2200 532nm/CW/200mW/M <sup>2</sup> <1.2	50×50×100	グリーンレーザーポイン ターをはじめグリーンレ ーザー製品
カトウ光研	グリーンレーザーシート 5000m/G 532nm/CW?/5W	150 × 150 × 268	

今回の調査（Photonics WEST, Web 検索、レーザーポインタ等数 mW までのメーカーは省略している。）の範囲では、グリーンレーザー光源を手がけている会社の数としては、ドイツ・

米国とさほど変わらない。これは、ドイツ・米国のメーカーで、Photonics WEST に展示のなかった物は省いているためとも考えられ、同程度の市場が展開されていると考えるのはいささか早計である。ここに、リストアップした物から特徴を述べると、欧米の企業にはいわゆるガリバー企業（Coherent, Spectra-Physics 等）や、トップデータを示す Continuum（固体レーザー）や、IPG Photonics（ファイバーレーザー）、が存在する。また、それらの企業群が持っている商品ラインナップは多岐にわたる。また、PHOTOP（中国の会社）は小型パッケージで出力等のラインアップの多く、それらの企業群の隙間をうまく補充している。

日本のメーカーに見えるのは目的ありきのレーザー商品開発である。これは、用途を絞ることで、顧客を囲い込める反面、他用途への展開が難しい。最も、Coherent や Spectra-Physics のガリバー企業の持つ強力な商品ラインアップに対抗するためには致し方ないことかも知れない。そういう意味では、昭和オプトロニクスやサイバーレーザーの取り組みは評価されるが、ラインアップの絶対数で分が悪い。目的オリエンテッドという意味では、三菱電機のレーザー TV (LaserVue) に使用している Nd:YVO4+PPMgLN+LD(808nm)のマルチ導波路型グリーンレーザーがそれに相当する。励起光は 27W、グリーン出力は 10.9W、電気-光変換効率では 20% を達成している<sup>410-4)</sup>。チップサイズは 3.2×7mm で非常にコンパクトである。しかしながら、このコンパクトなチップが他の用途に利用可能かという点必ずしもそうではない。他の用途では、出力の安定性を問われるであろうし、また、ビーム品質もしかりである。

国内唯一ファイバーレーザー+波長変換グリーン光の出力という観点からいけば、古河電工の取り組みはおもしろい。欧米のファイバーレーザーの 2 倍高調波変換では、IPG Photonics, MPB communications が挙げられるが、IPG Photonics は高出力をねらっているが、変換効率は出力に依存し、低出力では効率が良くない。PPLN は波長変換能が高く、低出力からでも高効率がねらえる。また、主要部品（ファイバ、励起レーザー、コンバイナ、アイソレータ等）を内製しているため、商品価格をコントロールしやすい。IPG Photonics においても部品は基本的に内製であると聞く。全て内製でなくとも全て国産が望まれる。

#### 4. 10. 4 オールジャパン体制への課題と希望（基盤技術の脆弱さと新しい技術）

今回の調査研究でのグリーンレーザーの出力最高値は CW で 18W、パルス動作モード 45W で、共に、米国コヒーレントの製品である。固体レーザーはおそらく更に出力を上げることも可能であろうが、コンパクトなサイズおよび、低コストを考えると、ファイバー型へのシフトが望まれる。IPG Photonics の取り組みは、まさにこの流れに乗ったもので、今後更に出力を向上させてくるだろう。したがって、グリーンレーザー光源開発にしても、ファイバー化への流れはいつそう強まることとなる。また、商品の競争力は内製もしくは、国内に基盤技術を持つ企業・国が強い。つまり、日本において、産業を支え、かつ、国際的な競争力を持つレーザーを製造するためには、レーザーに関する知識・技術のみならずそれを支える周辺技術、例えば、光学部品加工、電源、微細機械加工、光学アSEMBル、素材等の技術が同時に、その企業内もしくはその国内において発展する必要がある。

##### 4. 10. 4. 1 既存技術の脆弱さ

高出力のファイバーレーザーを作るときには、良質の希土類ドープファイバーを得ることの他に、高出力・高輝度の半導体レーザーの製造技術と、それら 2 つをつなぐ LD とのファイバ

ーカップリングの技術が必須である。Photonics WEST 2009 においては Fiber Lasers のセッション（口頭発表件数 70 件）の他に、High Power Diode Laser Technology and Applications のセッションにおいては、高出力半導体レーザーの発表が 10 件、高出力半導体レーザーのパッキングに関する発表が 9 件、ファイバーカップルの発表が 12 件そのほとんどが、アメリカおよびドイツの発表である。日本の発表は 2 件のみであり、ファイバーレーザー開発における基盤の脆弱さが概観できる。

#### 4. 10. 4. 2 グリーンレーザー光源の新しい技術

前述したように、悲観的な材料が多い中、グリーンレーザー光源開発のための、日本独自の技術の発展がある。Pr ドープフッ化物ファイバー（住田光学ガラス）と高出力青色半導体レーザー（青色 LD：日亜化学）がそれである。元来、フッ化物ガラスは酸化物では蛍光を発しないような希土類元素でも発光すると行った蛍光体母材としての物理的優位性をしばしば指摘されてきたが、その耐候性（特に耐水性）の悪さによってその使用範囲が限られてきた。しかしながら、その固定概念を覆すに十分な耐候性を持ったフッ化物ガラスが開発され、更にファイバー形状へ加工することに成功した。また、近年の青色半導体レーザーの高出力化にともなって、Pr フッ化物ファイバーレーザー発振のデモンストレーションに成功している（図 4. 10. 4. 2）。Pr は酸化物中では発光せず、この様にフッ化物で耐候性のあるガラス（PAYAC：住田光学ガラス）の開発に成功したことが、レーザーの実現につながったことを付記する。図 4. 10. 4. 1 に Pr ドープフッ化物ガラスの蛍光・吸収スペクトルを示す。

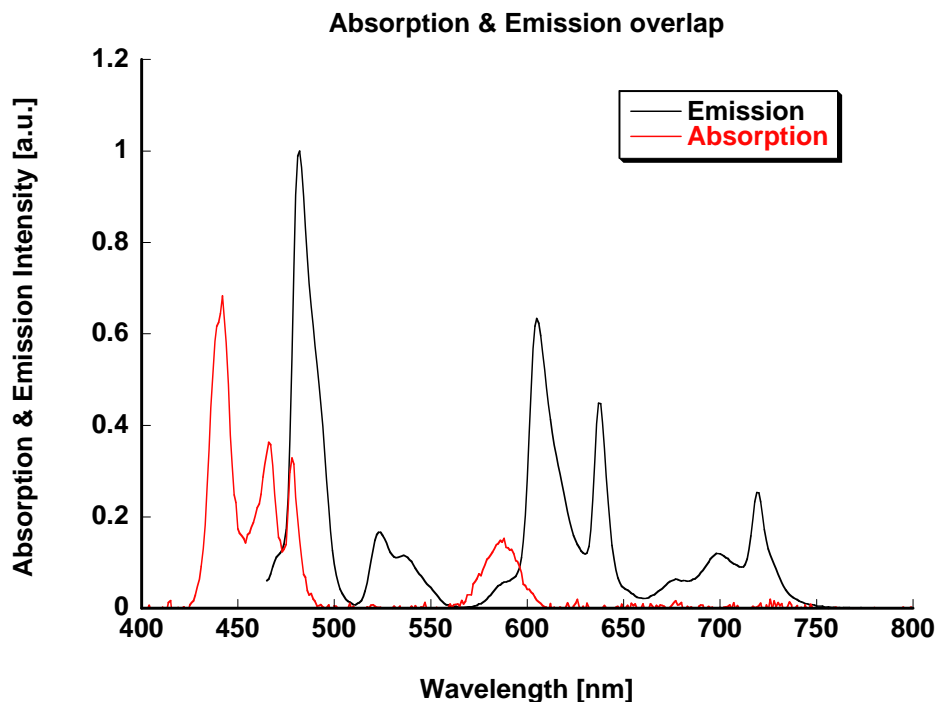


図 4. 10. 4. 1 Pr ドープフッ化物ガラスの蛍光・吸収スペクトル

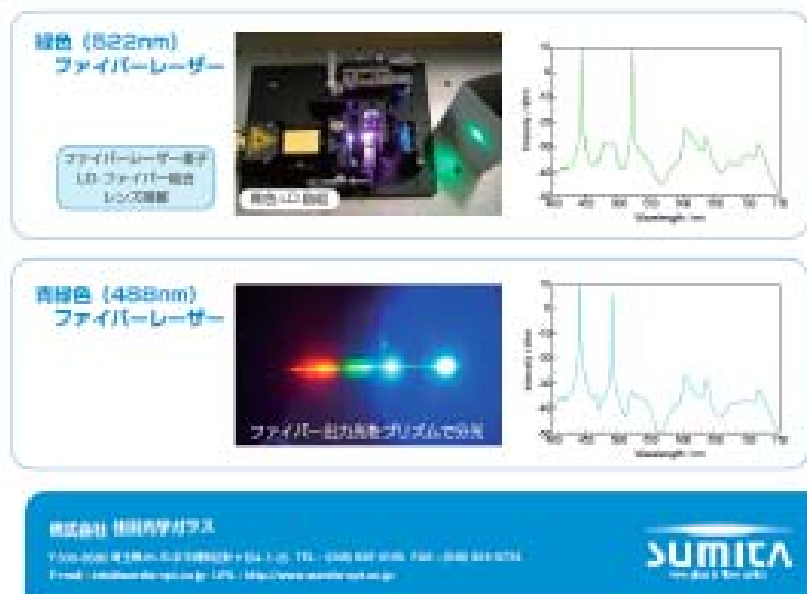


図 4. 1 0. 4. 2 Pr ドープフッ化物ファイバーのレーザー発振

この Pr フッ化物ガラス (Pr:PAYAC) の利点を挙げると次のようになる。

- ・ 高い量子効率
- ・ ガラス屈折率が 1.46→主流の石英ファイバーおよびその関連技術を利用できる。
- ・ 緑色レーザー発振 (既に達成済み) は SHG による波長変換を必要としない。装置がコンパクトになる。
- ・ 実用上十分な耐候性
- ・ ブロードなスペクトル特性→短波長化、コヒーレンス制御、波長可変性

例えば、現状の技術のみを用いても、Wクラスのグリーン CW レーザーの実現が可能であると考えられ、新しい技術として青色 LD のさらなる高出力化および、青色 LD のファイバーカップルおよび、青色 LD のパワーコンバイナを開発することで、SHG 変換型のグリーンレーザー光源に比べ、コンパクトで高効率そして、制御性の良いレーザー光源を作ることができる。開発の優位性とその効果を次にまとめる。

(開発の優位性と効果)

- ・ パワースケーリングが線形、速やかなパワー変動が可能。加工性能の優位性
- ・ グリーン光を得るために SHG 結晶が不要。装置の簡略化
- ・ Pr フッ化物ガラス・ファイバー及び、青色半導体レーザーは国際競争力を持つ純国産技術
- ・ 青色半導体レーザーの高出力化に対するモチベーションを与える。
- ・ 膨大かつ、テレコムで日本が優位な石英ファイバー技術の転用が可能。既存技術の発展したがって、グリーンレーザーの現状で述べたレーザーを超越するレーザー光源の出現が期待できる。

#### 4. 10. 5 課題

良く理解しておかねばならないことは、全てのメーカーが世界トップの何かを持っているか？というそれは、否である。いわゆる「まあまあ」の企業もたくさん存在する。これが、その業界に厚みを持たせている所以であり、そういった意味でも海外（特に米国、ドイツ：上記展示に参加しなかった企業もあるであろう。）は層が厚い。

日本は、無機材料等の素材メーカーは十分な競争力を持っている。その裏に隠れた、ツールである電気炉は実に大小を含め実に 1000 社以上におよぶ電気炉製造メーカーの存在により支えられていると聞く。つまり素材を作り出す手段を豊富に持っているからこそ、十分な競争力を持った素材を作り出せるのだと考えられる。しかしながら、おそらくはこれら電気炉等の市場は、最終製品の市場に比べればとても小さいだろう。これと同じことは、半導体製造およびその道具である半導体ステッパー技術の市場の大小関係についても言える。米半導体工業会（SIA）は 2 月 2 日、2008 年の世界半導体売上高が 2486 億ドルだったと発表した。2007 年現在、最先端の液浸ステッパー装置ですら高々 40-50 億円程度（0.5 億ドル）であるとされている。

レーザーは加工用の道具として非常に有用である。しかしツールであるため、最終製品に比べて市場は遙かに小さいことが予想されるし、事実そうである。しかしながら、既に、レーザーでしか加工できない（レーザーで加工する方が良い）、そして波長の短い方がよい結果をもたらす今、先端技術を生み出すレーザーの産業を育てないのは、将来の技術革新を放棄したにも等しい。

大学の研究者の観点から見て、日本のレーザーを利用した研究開発のレベルは決して低くない。論文も相当数出ているし、最先端の研究である自負もある。しかしながら、その開発を行う上で、ベースとなるレーザー技術を生み出しているのは欧米のメーカーである。かく言う私ですら、研究用のレーザーは欧米の物を用いている場合がほとんどである。欧米メーカーの製品は使いにくい、サービスが悪いと言いつつも、使わざるを得ないのである。これが、何を意味するのか、我々レーザーの研究者もよく考えるべき時が来ている。自分の道具を持たなければ、その上の創造性は生まれてこない。

#### 参考文献

(410-1) レーザーハンドブック/ レーザー学会編、オーム社、1982 年

(410-2) Photonics WEST 2009, **7195-07** “Recent progress on high-power CW fiber lasers”, V. P. Gapontsev, IPG Photonics Corp. (United States)

(410-3) Laser Focus World Japan 2008.2, p28

(410-4) Laser Focus World Japan 2008.8, p34

#### 4. 1 1 まとめ

本WGでは、日本製産業用高出力レーザー装置開発に対する多方面からの強い要望に耳を傾けながらも、まずは先端的レーザー装置開発がもたらす生産技術の飛躍的向上とその産業波及効果、有望な市場の存在について調査し、その上で先端的レーザー装置開発に必要な要素技術、国内関連メーカーのポテンシャル、国費をかけてでも研究開発すべきレーザー装置開発戦略、さらには今後維持していくべき継続的な生産技術サポート体制にいたるまでを議論した。

産業界にインパクトを与える可能性のある高出力レーザーを用いた加工技術としては、第一に、次世代の電気自動車に代表される構造素材の革新に備えた高輝度レーザービーム加工に着目した(4. 2)。次に、脱化石燃料に基づいたエネルギー立国としての方向性を考えた場合、太陽電池に代表される半導体電子デバイスの高性能化において、多段階の多様なプロセスの究極的最適化に注目した(4. 3)。最後に、革新的な次世代機能性素材開発として、金属結晶ドメイン毎の改質をマイクロに制御することで可能になる素材技術の将来性を調べた。

これら3つの応用から要求されるレーザー装置の性能は決して単純ではない。図4. 1 1. 1は、現在加工用レーザー装置市場で急激にシェアを伸ばしているファイバーレーザーの開発動向の軸を示す。現在の高輝度レーザー市場では、いまだに高ビーム品質で高出力を実現できるCO<sub>2</sub>レーザーがその低価格性もあり、最も広く用いられている。このCO<sub>2</sub>レーザーの高輝度性は、そのビーム品質パラメータで表現すると出力1 kWレベルで~3 mm.radと言われている。これに対して高出力ファイバーレーザーのターゲットは、ひと桁ビーム品質の高い~0.3 mm.radである。このbeyond-CO<sub>2</sub>レーザーの領域で可能となるのが炭素繊維素材CFRPに代表される、軽量・高強度新素材加工である。この方向性が図4. 1 1. 1に示した矢印方向の技術開発である。ただし、このkW級高輝度ファイバーレーザー開発は、ある意味自明の開発方向ではある。しかしながら、国産装置として信頼性が高く競争力のあるファイバーレーザーを持たないわが国としては、現状においてはこの開発軸に沿ってレーザーの性能を向上させるすべも有していない。自動車メーカーに代表される構造材の切断・溶接の現場では、輸入レーザー装置の高価格、サポート体制の不備、スタンダード製品にプロセス側が適応しなくてはならない不具合性、加工基礎データの海外流出、等々の不満が今や限界にきている。早急に、国外のファイバー装置レベルに追い付き、高輝度beyond-CO<sub>2</sub>レーザーをもって新素材の加工データを蓄積し、構造素材の軽量・高強度化をもって省エネ化を進めるべきである。同時に必要な技術開発としては、励起用半導体レーザーの高出力化、レーザーデリバリーのための伝送用ファイバー溶融接着技術、リモートプロセッシング用のビーム光学系がある。

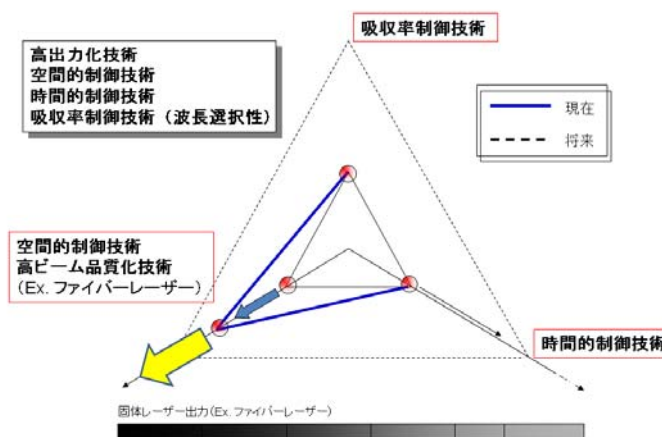


図 4. 1 1. 1 現状の(ファイバー)レーザー装置の開発動向と残されている開発軸

一方、太陽電池に代表される半導体プロセスの最適化に必要なレーザーは kW レベルの高出力レーザーではない。図 4. 1 1. 1 の吸収率制御軸に沿ったレーザーの短波長化が必要となる。現在、ファイバーレーザーの第 2 高調波発生（いわゆるグリーンレーザー）は平均出力で 10 W 程度である。ファイバーレーザーはパルス動作の高出力化にはまだ研究開発が必要であり、さらに波長変換効率を向上するためには単一モード・直線偏光で 100 W を超える出力が要求される。また、半導体プロセスにおいて熱的プロセスを制御して極浅層のドーパント拡散を制御するような場合には、波長の多様性ととも、パルス波形の制御性も重要となるはずである。実は、レーザー加工技術において、この時間域制御の利用は著しく遅れているのが現状である。多波長レーザーを複合的に用いる試みもほとんど実用化されていない。

加工材料面のミクロなサイズで、このレーザーの多波長性、時間制御性を局所的に多様化する全く新しいプロセス技術が可能になると、前述の金属結晶ドメイン毎の改質制御のような未来技術が見えてくる。図 4. 1 1. 2 は、この時空間制御マイクロ加工システムのレーザーヘッドの概念図である。個々のファイバーには、現状の波長 1 μm 帯のファイバーレーザーおよびその 2 倍高調波のグリーンレーザー、さらに、青色半導体レーザー、青色半導体レーザー励起による赤、オレンジ、緑、青色可視域レーザー、およびその 2 倍高調波による紫外レーザーが結合されており、ユーザーの要望に応じてバンドル化され、ここのレーザーの時間波形もプロセスの要求に応じてコンピュータ制御される。このインクジェットヘッドの様なファイババンドルヘッド（個々のファイバー径は単一モードに相当し、バンドル全体で数 mm）によって、素材の局所的熱および電子励起を時間制御することで改質プロファイルを制御していくのである。

以上の **near-term** から **mid-term** さらには **long-range** のレーザー装置開発の意義を調査した結果、本WGは次のような次世代加工用レーザー装置の提案に至った。必要とする性能は、

(1) **beyond-CO<sub>2</sub>** レーザー領域に迫る高出力・高輝度性、(2) 多波長、時間制御性、(3) 多波長レーザーを加工用途に従って時空間制御し重畳する光学系である。現状の欧米レーザーメーカーは、まさに(1)、(2)の目標をファイバーレーザーをもって実現しよう

としているが、その次に来る技術フェーズを見込んで、これらを半導体レーザーで実現することを提案する。現状で半導体レーザーのパワーは 4 kW/cm<sup>2</sup> レベルに達し、国内メーカーによる青色半導体レーザーの高出力化も現実のものとなってきた。エッジエミッター型あるいは面発光型半導体レーザーを高効率でファイバーに結合する技術を開発し、これら的高出力レーザーを単一モードファイバー伝送させコヒーレントに重畳することによって(1)の **beyond-CO<sub>2</sub>** レー

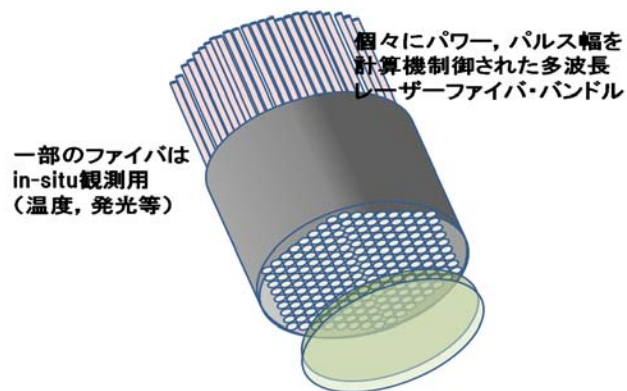


図 4. 1 1. 2 時空間制御マイクロ加工システム用 マイクロファイババンドル

ザー領域を実現する。半導体レーザーは元来、電流制御によって時間制御性に優れたレーザーである。半導体レーザーではカバーできない波長領域は、ファイバーレーザー、波長変換で補うことで、(2) (3) の多波長、時間空間制御を半導体レーザーをメインに据えて実現することが、効率性、機能性の面からも間違いなく将来のレーザー加工技術のあるべき姿である。

最後に、このような先端的レーザー装置開発と並行して必要なのが、プロセスデータの蓄積を主としたノウハウの構築とデータベース化、そして公的な機関による生産技術の集約である。個々のメーカーが生産現場で新しいレーザーの性能に戸惑いながら個々のプロセスノウハウの獲得に時間を浪費し、その上でその技術を秘匿するという非効率な体制ではなく、公的機関がプロセスに適したレーザーの利用方法とパラメータに関するデータ所得とノウハウの蓄積を担当し、知財管理の上で技術供給を行えるような、いわゆる日本版フランホーファー研究所の構築こそが国のプロジェクトの出口として、今まさに要求されるものであると信じる。レーザー加工装置、加工技術が工業製品の設計現場から遊離せず、プロセス技術を念頭に置いた設計ができるような、素材－加工－構造デザインが有機的に結合できる産業体制の確立こそが、次の産業を牽引していくはずである。



## 第5章 産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査のまとめ

### 5.1 要約

産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査を実施した結果、波長可変・高出力半導体レーザーおよびそれを利用した加工・表面改質・化学反応制御等の応用技術は、自動車、電子機器、化学製品等幅広い分野において、現在のものづくりを革新し、より高付加価値でしかも環境負荷がきわめて少ない製造プロセスおよび製品を可能にすることが判明した。そのため、今後のわが国における製造業の高度化と製品や製造プロセスの環境負荷低減に向けた取り組みとして、以下に示す技術開発項目について産・学・官協力による研究開発を実施すべきである。

- (1) 複合材料や異種材料など熱的・光学的物性が異なる材料を一体化させた部材のレーザーによる接合、切断技術
- (2) レーザーを用いた、太陽電池や薄膜内部の結晶制御（レーザーアニーリング）、部材表面の大気中でのドライ洗浄（レーザークリーニング）、部材表面の改質による対摩耗、耐熱、耐食性能の向上
- (3) レーザーの持つ光エネルギーの単波長性、指向性、パルス性を活かした光化学合成技術、高分子材料の表面化学修飾技術、医療・バイオへの利用技術
- (4) (1)～(3)の技術の実現と産業としての確立に不可欠なレーザー発振システム。特に高出力で紫外域においても波長可変な半導体レーザー発振システムおよびその利用に適した光学系（集光光学系や波長変換など）技術

### (ABSTRACT)

A current situation is surveyed about a next generation laser processing and manufacturing system for industrial application. As results of this survey, we conclude we have to promote following development categories for the improvement of more value added and environmental friendly products and manufacturing processes.

One processing is welding and cutting process by multi lasers for combined composite materials for thermal or optical properties. Another processing is surface treatments to control the crystallization in the thin film materials and to cleaning the surface in the dry conditions. The other processing is photo chemical reaction control in micro-reactors and its medical and bio technology applications.. For these newly application, we propose developments of high quality and power laser diode.

The common concepts for these processing is a hybrid processing by multi color laser beams to realize the vacuum-less process and wet-less process for environmental burdens. We propose to show the effectiveness of these concepts by CFRP laser cutting, metal-polymer laser welding, partially crystallization from amorphous silicon for solar-cell, metal surface cleaning by lasers, and photo chemical micro-reactor process by color variable lasers. These application examples for newly multi lasers processing are inspected by existing high power lasers, such that, several harmonic lasers and OPO (Optical Parametric Oscillator). And also we propose to develop the high power and high quality laser diode and OPO, and also their suitable optical systems by governmental supports.

## 5. 2 国内の関連プロジェクト

### 5. 2. 1 過去のレーザー関連プロジェクト

レーザーが1960年に発明され10年余りが経過した1970年代、高出力レーザーの開発は米国が先行し主導してきた。今から30年前に開始された大型プロジェクトをきっかけに、日本のレーザー開発は成功を収め、国際競争力の向上が図られてきた。特にこれらのプロジェクトにおいてはレーザー発振器とその応用分野の開発が平行して行われたことに特徴がある。しかし、2000年代以降こうした総合的なレーザープロジェクトが立案されなかったこともあり、現在ではその間に急成長してきた欧米のレーザー産業によって、その市場を奪われつつあるのが現状である。このような状況を打破し、日本のものづくりの競争力強化を目指した次世代の産業用レーザー開発・応用の方向性を検討する上で、これまでに実施されてきたプロジェクトの研究背景・目的、研究成果、波及効果等を振り返り、その位置付け、果たしてきた役割を明確にすることは重要である。ここでは、過去の産業用レーザー開発に関連した3つのプロジェクトの概要について述べる。

#### (1) 超高性能レーザー応用複合生産システム

研究開発期間：昭和52年度～昭和59年度

研究開発費総額：137億円

研究背景・目的

戦後日本では、「大量生産」が主流であった。時代の流れと共に、製品の形態化が多様化していく中で、「多品種少量生産」が求められるようになっていた。その背景には、省エネルギー、省力化が社会的にも要請され、エレクトロニクス、コンピュータ制御技術が飛躍的に向上してきたことも挙げられる。このような多品種少量生産を目指すフレキシブル生産システムが重要な手段として位置付けられるようになり、それに適合したハードウェアおよびソフトウェアの研究開発が通商産業省の大型工業技術研究開発制度のもと実施された。本プロジェクトの中では、フレキシブルな生産システムに適した加工手法としてレーザーを切断、溶接、熱処理に応用するために研究開発が、光源開発と共に実施された。

主な研究成果

- ・世界最大級の26.5 kW（励起エネルギー効率16.5%）の炭酸ガスレーザーが開発された。
- ・出力365 W（励起エネルギー効率3.6%）のYAGレーザー発振器が開発された。
- ・レーザー加工装置に用いられる光学部品の製作、加工技術、特性評価技術が開発された。

これら開発された炭酸ガスレーザー、YAGレーザーが、複合切削機構、レーザー加工機構、複合組立機構、自動検査機構、製造管理装置等の各機構から成る複合生産システムのプラントに実際に組み込まれた。炭酸ガスレーザーは表面熱処理、溶接作業に応用され、金属加工分野における大出力レーザー加工の実用性を実証した。レーザー加工の導入で溶接、焼き入れ、バリ取りがオンラインで迅速かつ高精度に処理することができ、加工時間、加工工程の短縮に有効であることが示された。

波及効果

将来のファクトリーオートメーション工場において、フレキシブルな新しい加工方法として、レーザー技術を大幅に導入されうる可能性を示した。このプロジェクトの実施によって市場にレーザーの需要が増加し、多くのメーカーが出現し、レーザー加工機産業が形成されるに至った。実用に耐えられるように、レーザーの寿命、使いやすさ、効率あるいは経済性などの改良

が進められるに至った。

本プロジェクトの終了後、官民連帯協同研究制度のもとで、「レーザー応用新加工技術に関する研究」が立ち上げられ、レーザー加工に必要な機器の開発、レーザーによる材料表層の高性能化、レーザー切断、溶接、焼き入れ、レーザー加工技術を基盤とする生産システムに関する研究が行われた。

## (2) 超先端加工システム研究開発

研究期間：昭和 61 年度～平成 6 年度

研究開発費総額：161 億円

### 研究の背景

エネルギー、精密機械、エレクトロニクス、航空、宇宙等あらゆる先端技術分野の共通基盤となる加工技術のより一層の進展を計るために、エキシマレーザーやイオンビームを用いて従来とは異なる方式で超精密加工、超微細加工、超高品位表面加工技術を開発することを目的として、通商産業省の大型工業技術研究開発制度のもとで研究が実施された。

当時、加工に用いられてきた炭酸ガスレーザー、YAG レーザーは共に、赤外域のレーザーであり、材料を熱によって溶かして切断し、表面の加工を行っていた。これに対してエキシマレーザーは、紫外域のレーザーであり、従来とは異なる光プロセス応用、微細加工（レーザーアブレーション加工）への応用が期待されていた。当時の日本国内におけるエキシマレーザー開発においては、大学、国立研究所での基礎研究では、世界の最先端を行っていたが、安定度、ビーム品質等、実用ツールとしての開発は、欧米に比べて遅れを取っていたので、大出力エキシマレーザー技術の開発が中心に据えられた。

### 主な研究成果

- ・ ArF レーザーの  $10^9$  ショット（繰り返し 400 Hz）の長寿命化が達成された。
- ・ ArF レーザーの平均出力 250 W（繰り返し 200 Hz）の高出力化が達成された。
- ・ XeCl レーザーの 5 kHz での高繰り返し動作（出力 0.55 kW）が達成された。
- ・ XeCl レーザーの平均出力 2 kW（繰り返し 800 Hz）が達成された。

長寿命化技術として、絶縁部材としてのセラミックスの利用が実用化され、繰り返し技術として固体スイッチング技術が開発された。

### 波及効果

現在ではエキシマレーザー全般において不可欠な技術となっている固体スイッチング技術および絶縁部材としてのセラミックス利用技術が確立された。

エキシマレーザーは現在、半導体露光装置や低温ポリシリコン TFT (Thin film transistor) 液晶プロセスに用いられるレーザーアニーリング装置の光源として広く用いられている。

半導体露光装置の光源として用いられているエキシマレーザーには、KrF レーザー（波長 248 nm）と ArF レーザー（波長 193 nm）がある。KrF レーザーについては、早くから実用化が進展してプロジェクト実施当時にも、販売が開始されていた。その先を見据えて発振波長が短く技術的に困難が伴う ArF レーザーを取り上げて実用化に必要な技術開発を行うことによって、多くの技術的成果が得られた。その後、プロジェクトに参加した企業から合弁会社が設立されて技術移転がなされ、露光用エキシマレーザー光源の日本国内の市場を独占すると共に、世界市場でもシェアを確保している。

このプロジェクトの後、半導体露光用光源のさらなる短波長化を目指して、官民共同研究開

発制度のもとで、F2 レーザー（波長 157 nm）の高性能化技術開発を主眼とした「F2 レーザ—リソ技術の開発」（平成 11～13 年度）が実施された。

### （3）フォトン計測・加工技術の研究開発

研究期間：平成 9 年度～13 年度

研究開発費総額：72 億円

#### 研究の背景・目的

当時、米国、ドイツをはじめとする欧米諸国ではレーザー技術の重要性・将来性を認識し、大きな資金を投入、産学官連携の国家プロジェクトを推進していた。日本でも、産業基盤技術の強化、先端産業の育成等を推進し、製造業等の産業の国際競争力を強化するという産業政策上の観点から、フォトン（レーザー）技術の確立を目的として、産官学が連携して、産業技術としての可能性の見極め、基盤技術の確立、ならびに実用化・事業化に結び付けるべく、フォトンビームによる先進的な計測技術、加工技術ならびに高品質フォトンビーム発生技術を確立するための基礎的・基盤的な研究開発が、通商産業省の産業科学技術研究開発制度のもとで実施された。本プロジェクトはフォトン応用加工技術、フォトン応用計測技術、フォトン発生技術の 3 技術分野に大別される。

この当時、産業用レーザーとして炭酸ガスレーザー、エキシマレーザー、ランプ励起 YAG レーザー等が使用されていた。集光性が高く、高出力の炭酸ガスレーザー、波長が短く大きなエネルギーのパルスが得られエキシマレーザーでは、ファイバー伝送が不可能という問題があった。エキシマレーザーでは、腐食性ガスを使う必要があった。ランプ励起 YAG レーザーはファイバー伝送が可能であるが、効率が低く、励起用ランプの寿命が短く、メンテナンスコストが高いことなどの問題がある。このように、従来から使用されているレーザーにはまだ問題点が多く、技術的な改善の余地が大きいことが指摘されてきた。当時、注目されて始めていたのが、半導体レーザー励起の YAG レーザーである。高効率でメンテナンス頻度の大幅に低減が可能であること共に、可搬性に富む小型装置の実現も可能になる等の長所があることで、開発が進められた。

#### 主な研究成果

フォトン発生技術（レーザー開発）については、高出力完全固体化レーザー技術と高集光完全固体化レーザー技術の研究開発が実施され、各々、下記の成果が得られた。

##### ○高出力完全固体化レーザー技術

半導体レーザー励起によるロッド型およびスラブ型 Nd:YAG レーザーの開発が行われた。

・ロッド型では、平均出力 2 kW のモジュールを 6 段直列に連結する構成で、平均出力 12 kW、発振効率（電気→光変換効率）23%の性能を持つ完全固体化レーザー装置が開発された。

・平均出力 1 kW 級の任意波形制御が可能な波形制御レーザー装置が開発され、Qスイッチ動作でも、平均出力 1 kW 以上が得られた。

・スラブ型では、単一のスラブ型固体レーザー発振媒体を用いてパルス動作にて平均出力 6.1 kW、発振効率 20.7%が達成された。また、CW 動作においては出力 4.3 kW、発振効率 20.6%が達成された。

・平均出力が 5 kW を超える 2 台のモジュールからの出力を合成させて、平均出力 10.2 kW、発振効率 20.%が達成された。

##### ○高集光完全固体化レーザー技術

レーザーダイオード励起の構造体型ファイバーレーザーの開発と高輝度のロッド型高エネルギーパルスレーザーおよび波長変換結晶を用いた紫外光発生技術の開発が行われた。

- ・ファイバーレーザーの高出力化を可能にする日本オリジナルの技術である「構造体型ファイバーレーザー」（ファイバーディスクレーザー）が開発され、連続発振出力 1 kW、集光径 38  $\mu\text{m}$  が達成された。

- ・励起用半導体レーザーの開発では、InGa(As)P 系により、平均出力 80 W、変換効率 50% が達成された。

- ・集光方式・伝送光学素子等を改良したロッド型高効率励起モジュールを完成させ、これを4台、熱複焦点を補償するように直列に連結して、平均出力1.05 kW、発振効率23%を達成すると共に、集光径40  $\mu\text{m}$  の集光性能が得られた。

- ・波長変換技術では、溶液攪拌を取り入れた結晶成長法で高品質のCLBO結晶の育成に成功し、これを用いて波長266nm で世界最高平均出力42W の紫外レーザーの発生に成功した。

#### 波及効果

プロジェクト終了後から、7年程度しか経ていないことから、さらなる今後の追跡調査が必要であるが、既に商品化された技術例がある。4-6節にも述べられている様に、本プロジェクトで開発された高出力半導体レーザーやファイバーディスクレーザーは製品化され、レーザー加工用光源として用いられている。

また、本プロジェクトで高品質化が実現されたCLBO結晶は紫外光発生用の非線形光学結晶として幅広く市場に出回るようになっている。

#### (4) その他の関連プロジェクト

紙面の都合上、詳細については省略するが、上記に述べた以外にも下記の様なプロジェクトが実施されてきた。

- ・科学技術振興機構地域結集型共同研究事業 福井県「光ビームによる機能性材料加工創成技術開発」（平成 12 年度～平成 17 年度）

機械金属、繊維関連産業において高付加価値化をもたらす、生産工程の環境負荷を低減する新しい加工ツールの開発を目的として、Yb:YAG レーザーを中心としたレーザー技術、新しい光源を利用したレーザー加工、材料創成システム技術、超微細加工技術、表面・薄膜形成技術等の研究開発が進められた。

- ・科学技術振興機構地域結集型共同研究事業 静岡県「超高密度フォトン産業基盤技術開発」（平成 12 年度～平成 17 年度）

超高密度フォトンを利用した新規産業を創成するための基盤技術開発を目的として、高強度全固体フェムト秒レーザーの開発、高強度フェムト秒レーザーの開発における加工モニタリングシステム、ファイバー伝送技術の開発、陽電子放出断層撮影用の短寿命放射線同位体生成等の研究開発が進められた。

- ・産業科学技術研究開発制度にて実施された「フェムト秒テクノロジー」（平成 7 年度～平成 16 年度）

高度情報化社会を支える大量の情報を処理する技術、多様な計測技術のさらなる高速化を目指して、光の超高速性に着目した超高速光エレクトロニクス技術の基盤技術開発を目的として、テラビット／秒級の時間分割多重光通信システムを可能とする超高速光デバイス技術、高速動体などの高度な計測を可能とするフェムト秒高輝度 X 線発生・計測技術の研究開発が実

施された。

#### (5) まとめ

30年前に開始された産業用レーザー開発に関連したプロジェクトを概観した。時代背景、社会の要請に沿ったレーザーとその応用技術の研究開発が実施されてきた。後に、市場に直接的効果をもたらし、国際競争力を高めた成果も数多く存在する。しかし、平成13年度に「フォトン計測・加工技術」プロジェクトが終了してから、産業用レーザー開発における日本の地盤沈下が指摘されている。このような状況を打破し、日本のものづくりの競争力強化を目指し、次世代の産業用レーザー開発・応用研究開発体制を早急に構築する必要がある。

#### 5. 2. 2 最近のレーザー関連のプロジェクト

次世代の産業用レーザー開発、その応用技術の今後のあり方、方向性を検討する上では、最近、実施されたレーザー関連のプロジェクトの現状、動向、レーザー開発と応用技術を広い意味では含む光科学研究の現状、課題、方向性を把握する必要がある。本節では、これらについて概観する。

##### 5. 2. 2. 1 極端紫外リソグラフィ光源開発プロジェクト

25nm以降の世代における半導体リソグラフィ装置であるEUVリソグラフィ装置の光源として開発が行われている。平成14年度から19年度にかけて新エネルギー・産業技術総合開発機構のプロジェクトの「極端紫外（EUV）露光システムの基盤技術開発」が、平成15年度から19年度にかけて文部科学省リーディング・プロジェクト「極端紫外（EUV）光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」が実施されてきた。異なる省庁から2つのプロジェクトが立案されていることが、この技術の重要性を物語るものである。かなりの成果は出ているものの、まだ実用化には時間を要すると見られている。

##### 5. 2. 2. 2 文部科学省における光科学技術関係の研究拠点構想

###### (1) 先端光量子科学アライアンス

幹事機関：東京大学

参画機関：理化学研究所、電気通信大学、慶応義塾大学、東京工業大学

目的、研究概要

究極的に制御された光源や小型汎用高出力レーザーといった次世代光源開拓とその高度利用による新しい光量子科学の発展をめざし、東京大学、理化学研究所、電気通信大学、慶応義塾大学、東京工業大学の研究グループが密接に連携し、相補的な協力により、研究と人材育成・教育を行う世界をリードする拠点を形成する。光格子原子時計を用いた超高周波数安定光源の配信実験、アト秒科学などを推進すると共に、光源技術を支える物質科学を開拓する。現代光科学の学理の体系整理をすすめつつ、知と技と発想力を有する博士人材を育成し、産学に送り出す仕組みを確立する。これにより、光科学を軸としてイノベーションの創出と人材強化を加速する。

###### (2) 融合光新創生ネットワーク

幹事機関：日本原子力研究開発機構

参画機関：大阪大学、京都大学、分子科学研究所

## 目的、研究概要：

本拠点が有する世界トップレベルのフォトニック結晶などに代表される質の高い光技術と、超高強度レーザーおよび高輝度光・量子ビーム制御用プラズマデバイスで代表される強い光技術との融合により、テラヘルツ～X線、量子ビームに至る超広帯域の高品位高輝度光源を開発する。これにより、タンパク創成から反物質創成といった幅広い分野において、学術創成から新産業創出にまたがる光新創成を目指した世界拠点を形成する。また、有機的な連携により本拠点の世界最高レベルのレーザーや多くの最新供用装置を効果的・効率的に運用する。さらに学術から産業界を含めたわが国の光社会の将来を担う国際的な視点に立った若手リーダーの育成を目指す。

この拠点形成事業と時を同じくして科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 CREST「先端光源を駆使した光科学・技術の融合展開」ならびに、さきがけ「光の利用と物質材料・生命機能」が発足している。

### 5. 2. 3 関連プロジェクトの総括

#### (1) 過去のレーザー関連プロジェクトについて

30年前に開始された産業用レーザー開発に関連したプロジェクトを概観した。時代背景、社会の要請に沿ったレーザーとその応用技術の研究開発が実施されてきた。後に、市場に直接的効果をもたらし、国際競争力を高めた成果も数多く存在する。しかし、平成13年度に「フォトン計測・加工技術」プロジェクトが終了してから、産業用レーザー開発における日本の地盤沈下が指摘されている。このような状況を打破し、日本のものづくりの競争力強化を目指し、次世代の産業用レーザー開発・応用研究開発体制を早急に構築する必要がある。

#### (2) 欧米との対比から見た開発の必要性

レーザーのような総合システムにおける研究実施体制の構築には、研究コアとなる拠点形成が必要であるとは言うまでもない。ドイツでは、Franhofer研究所が核となり、基礎研究から応用研究までのスペクトルの広い研究を組織的に実施することによって、成功を収めている。日本においても、産学官が一丸となった研究拠点を早急に形成する必要がある。しかし、Franhofer研究所の例を模倣することなく、日本のものづくりに整合した拠点形成を行うべきであるとは言うまでもない。人材育成も同時行っていかなければならないが、研究コアとなる拠点がその役目の一翼を担う場となる。

さらにもう一つ重要な点がある。既存の欧米製の光源にばかり頼っていて良いかという問題である。「光科学技術の推進に関する懇談会」においては、既存の欧米製の光源に頼っているのでは、世界最先端の研究が実施できないことも指摘されている。これを産業用レーザーの場合に置き換えてみれば、欧米製の産業レーザーを用いてのでは、新たな技術革新は生まれない、強いては日本の産業の空洞化を招くと言えるのではなかろうか。特に、産業用レーザーでは、高性能、信頼性に加えて、メンテナンスの迅速性、容易さも要求される。特に、外国製の光源を用いてメンテナンスを外国に頼っているようでは時間的損失が大きく、生産力の低下を招く懸念もある。日進月歩で技術が高度化し、また社会のニーズも多様化している。このような情勢の変化に迅速に対応するためにも、国産のレーザー装置は必須である。日本は、炭酸ガスレーザー、エキシマレーザー、情報通信の分野で幅広く用いられている小出力の半導体レーザーでは高い生産能力を維持、市場を確保している。しかし、近い将来、より高効率で長寿命の高出力半導体レーザーやこれを使ったファイバーレーザーが炭酸ガスレーザー、エキシマレーザー

等にとって代わって、主流を占めてくると予想されているが、日本は世界市場で遅れを取っている。高出力半導体レーザーは固体レーザーの励起にも適した光源であり、加工等の産業用途のみならず、光科学分野全般における光源開発にも不可欠である。また、レーザー産業を支える光学部品を含めた周辺技術の産業も存在する。レーザーも含めた光産業の世界市場における競争力を維持するためにも、レーザー開発を積極的にかつ継続的に推進する必要がある。

また、フォトンコストが高く産業用としてはまだまだ低価格化が必要なフェムト秒レーザーについても、市場は欧米製の光源に独占されていると言っても過言ではない。次世代だけではなく、次々世代の技術開発も見据えて、フェムト秒レーザーの様な現時点では需要が小さいが将来性の高い先進的レーザー開発についても、積極的に推進する必要がある。

過去 20 年にわたるプロジェクトの実施によって、日本のレーザー技術の発展の基礎が築かれ、依然として国際競争力を維持している技術もある。欧米の産業用レーザーの寡占を許し、日本独自の技術の空洞化の危機が叫ばれている昨今、この様な閉塞的状态を打破するにはこれまでの課題を検討し、新たな研究開発体制を構築する必要があることは言うまでもない。幸いなことに、4 章でも述べられている様に、日本には国際的競争力を持つ基盤技術が多数存在している。継続的に、集中的な資金投資を行うことにより、これらの技術を組み合わせることによって、日本の産業用レーザー技術が復権を果たすことが可能になるのであろう。

### 5. 3 まとめ — 調査結果と技術開発提案 —

#### 5. 3. 1 レーザー技術開発の必要性

将来のわが国の社会やものづくりを取り巻く状況を考えると、現在のわが国の強みである自動車産業や情報家電産業をその関連産業を巻き込みながら発展させ、持続発展可能な社会を実現すべく、さらにいっそうの努力を重ねていく必要があると考える。その推進力の一つに、関連する先端技術の開発がある。先端技術開発の方向の一つには環境関連技術がある。製品や製造プロセスの効率向上や単純化は、電力使用量を低減するばかりでなく、タクトタイムを短縮し、製造コストの抑制も可能となり、国際競争力をつけることができる。環境負荷の少ない製品を生み出す技術力は、「売れる製品」を生み出す力となる。これを支えるのは、環境負荷の少ない製造技術や他国では容易にまねをすることができない高い技術の確立やノウハウの蓄積にある。ではそのような先端技術とは何か？その答えの一つはレーザー加工技術である。

レーザー発振器の出現は高々 50 年の歴史であり、レーザー加工の歴史も他の加工技術と比較して短い。しかし技術開発は加速的に進み、従来の薄板鉄系材料の接合や切断を中心に従来技術を駆逐する勢いで産業応用されている。わが国においては、炭酸ガスレーザーやエキシマレーザー、YAG レーザー等による全固体レーザーに関して「加工技術開発」と「発振器開発」をセットで国が支援することで、ユーザーメーカーを牽引してきた。わが国のレーザー・加工技術開発プロジェクトは「フォトン計測加工技術開発：1997-2001」以降実施せず、民間での技術の浸透と発展を見守ってきた。2001 年以降にも計測用レーザーや通信用レーザーなどの個別開発は公的資金で実施されてきたが、レーザーを応用した「加工技術」の開発とそれに適したレーザー発振器とシステムの開発は、民間に委ねられてきた。各事業者は個別に加工や加工装置としての発振器・加工用光学系の開発を進めてきたが、ユーザーとメーカーといった「点」が、わずかに「線」でつながることがあっても「面：ネットワーク」としてつながっていなかったため、大きな発展はなかった。もちろんこれまでの開発により技術が製造ラインに応用され、また、切断や接合などの「板金加工」の分野では、わが国が世界のトップ



を走っている。

これに対してドイツは、2001年以降も公的資金による産学官による「レーザー加工・発振器技術開発」を継続し、いまや世界のトップレベルの技術力を誇る。このため、日本におけるユーザー企業でも自動車関連や造船関連などを中心に、ドイツ製の「ファイバーレーザー」による「リモート溶接技術」の導入が始まっている。しかし、使用条件の不明確さ、メンテナンスの不自由さなどがネックとなり、大幅な導入は進んでおらず、わが国のレーザーメーカーの開発に期待を寄せている。一方で、わが国の発振器メーカーは、技術力はあるものの開発投資に見合うレーザー発振器市場が見込めないため十分な装置開発が進まず、また、発振器販売コストも高い状態が続いている。このような状況では最新のレーザーを用いた製品製造（特に自動車）は進まず数年後の製造技術でドイツをはじめ諸外国に先を越されると予想されている。

レーザー加工やレーザー加工機の使用を増やし、よりよい製品を製造し、加工機に係るインシヤルコストを削減する、といった正のスパイラルを生み出すには、レーザー加工の応用先や新規性を提示することが必要であると考え、調査を行った。

本調査研究では、上記のような状況を踏まえ、この先10年を念頭において、レーザーの能力を引き出すための応用分野について異種材料の接合・切断、局所表面改質、化学反応制御の3分野を取り上げて「レーザー加工」の有効性を調査し、課題や解決方法、その市場性などを検討した。また、各応用分野毎に求められるレーザーの仕様を検討するとともにそれを実現するために不可欠なレーザー発振システム。特に高出力で紫外域においても波長可変な半導体レーザー発振システムおよびその利用に適した集光光学系や波長変換などについても詳細な検討を加えた。

### 5. 3. 2 異種材料の接合切断

物性の異なる材料で作る複合材料は、設計者が希望する特性を発揮可能な反面、加工が難しい。複合材用の接合や切断が容易になれば、輸送機器への応用のみならず、広く構造材料の製造に適応でき、設計の幅を拡大することが可能となる。軽量で強度が高く熱物性の良い炭素繊維強化複合材料（CFRP）は宇宙航空機産業への導入が進んでいるが、レーザーでの加工が現状では容易ではない。今後自動車等にも用途が拡大すると考えられるが、従来のウォータージェット加工と比べ、反力のないレーザーでの加工は大幅なタクトタイムの短縮や現場での加工、少加工幅、ガイドライン不要、穴あけも容易、といったメリットがある。

また、異種ポリマーやポリマーと金属の接合も重要な課題である。機械的強度が必要な場所や圧力がかかる場所、封入した液体などの漏洩が許されないものなどの接合は、現在は接着剤を利用している。接着剤自体には十分な強度があるが、接着面が粗い、汚れている、といった状態のために求める強度が得られない。そこで大量の接着剤を使用し、時間をかけて硬化・乾燥させる。このため接着までに時間がかかる。あるいは大量の有機溶剤により接着面以外も含め洗浄を行い、接着剤を使用後、再度防錆材などを塗布する。これらのような課題を解決するために、レーザーによる直接接合が有効であることがわかった。この技術はまだ完成したのではなく、気泡発生による強度や経年劣化、光学特性の低下を抑制する技術や、照射するレーザー波長の選択等のレーザー照射条件の探索などを行う必要がある。また、レーザーによる表面クリーニングや接着剤のレーザー硬化などの技術の開発も必要であることが明らかとなった。

複合材料やポリマー等を広汎に使用することにより、航空機、自動車等の大幅な軽量化が図られ、省エネルギー性、環境適合性、安全性は大きく向上する。また、その切断や接着にレー

ザーを利用することにより下降時間の短縮と使用エネルギーの削減を同時に達成することが可能である。こうした技術の確立は我が国の産業にとって急務であるといえる。

### 5. 3. 3 局所表面改質

切断や接合以外の加工技術としては、レーザーの高エネルギーやパルスや照射パターンを制御することができるという特性を利用した表面改質が大きな可能性を有している。太陽電池等の電子デバイス、特に薄膜デバイスや多層膜デバイスにおいて、膜の結晶制御がデバイス性能と強く関連があり、これを低環境負荷プロセスで製造することには、大きな産業的意義がある。成膜後の薄膜に対して、膜内の結晶性を制御するには極めて繊細な短入熱コントロールが必要となる。光学的特性の異なる多成分系多層膜ではなおいっそう結晶性制御は複雑となる。現在行われている真空装置内でのプラズマ照射による成膜で結晶性を制御する方向もあるが成膜速度はきわめて遅い。これに対して成膜後に結晶制御ができればプロセス速度を上げることが可能となる。技術開発が進めば、大気プラズマによる質の悪い膜から高特性膜を作ることも夢ではなくなる。これに対応可能なプロセスとして「レーザーアニーリング」が有効であることがわかった。これは現在研究室レベルで検討され始めている単一レーザーによるアニーリングを高度化させた技術として位置づけられ、多波長をほぼ同時に照射し、熱拡散を時間的空間的に制御してアモルファス層から結晶核の生成と結晶成長を行う技術である。吸収波長域が異なる多層膜ではそれぞれの吸収帯にあった波長を照射し結晶化を実現しようというものである。この技術の完成により、薄膜太陽電池デバイスのみならず広く薄膜電子デバイスにこの技術を応用し「脱真空プロセス」を達成しようというものである。

自動車等機械部品の製造においては、部材の直接接合も重要な技術であるが、高強度を必要としない部位では、高速高信頼接着が有用な手段となる場合がある。例えばモーター機材への磁石の接着などがそうである。現在は加工部材の表面を覆っている油等を大量の有機溶剤で洗い流し、接着剤を接着面に均一に塗布した後に接着している。この工程の後接着面以外には防錆目的で再度油を塗布しなおす場合がある。接着剤からこのプロセスを見ると、過剰な接着剤塗布となるが、接着強度の信頼性の観点からは面内均一塗布がなされている。この一連の工程が乾式プロセスで実現できれば、既存プロセスの環境負荷が著しく低減できるばかりでなく、少量の接着剤塗布により十分な接着強度を確保可能であることがわかった。この実現のために「レーザークリーニング」の技術開発が必要である。これは赤外域レーザーの熱エネルギーによる作用と紫外域短パルスレーザーによる化学結合への直接作用効果の相乗効果で表面を浄化する方法である。さらに、レーザーによって活性化された表面に接着剤をスポットで数点滴下し、場合によっては紫外域レーザーを照射して接着させるなどのことを行い、信頼性の高いドライプロセスを実現する方法である。これらのプロセスが達成できれば、部品製造における「脱溶液プロセス」が実現可能となるばかりでなく、高信頼接着技術にも発展・展開できると考えられる。

プラント等に使用する機器では、複雑な形状の部品が過酷な使用条件にさらされる場合が多く、加工性と耐環境性の両立が求められる。耐摩耗性や耐熱性耐食性を求められる部材では、環境負荷低減を目指した更なる性能向上・高効率運転が求められると考えられる。加工性や機械的強度を追求する反面これらの特性も求めるため、部材本来の特性を活かしつつ、その部材が持たない耐環境性(硬さと耐熱性・耐酸化性の両立)を、達成する必要がある。このためには通常クラディング等の被膜形成を部分的に行う。しかし、通常の方法では、熱の影響が大きくひずみが発生する、熱膨張・熱収縮による割れが発生する、酸化被膜等が発生するといった問題

が発生することがわかった。これらの課題を解決する方法として、ガス気流中でのレーザー照射が有効であることが明らかとなった。紫外域パルスレーザーで表面酸化物や油脂成分を蒸散させつつ、可視・赤外域のレーザーで微粒子状物質を焼結させながら堆積膜を形成させる、レーザー表面活性化とレーザーアシストデポジションの「ハイブリッドプロセス」が重要であるといえる。これにより環境負荷低減を実現可能な製品を、環境負荷が少ない不活性ガスシールによる大気環境化で達成することが可能となる。

以上のように、本調査研究により以下のことが明らかとなった。

①薄膜電気電子デバイスの結晶制御をレーザーで達成する「レーザーアニーリング」を、薄膜太陽電池セルで検証した。

②接着剤の有効利用を目的とした機械部品の局所洗浄をレーザーで達成する「レーザークリーニング」を、自動車部品で検証した。

③機器部品の部分的特性（耐熱耐食耐摩耗性）向上をレーザーで達成するレーザークリーニング+レーザーアシストデポジションを、タービンブレード部材で検証した。

これらの事例はいずれも環境負荷低減に貢献する製品であり、さらにこれを製造する工程においても環境負荷の低減が図れる。また、市場性もあり社会に与えるインパクトも大きい。今後、これらの事例に対する具体的な対象物や技術の検証方法、達成目標などを検討し、技術開発につなげていくことが重要である。

#### 5. 3. 4 反応制御

レーザー・光化学プロセスの開発は、さまざまな産業のグリーン化と高度化を図る観点から重要な研究開発課題と考えられる。特にレーザーの利用がされてこなかった化学、バイオ等の分野でのレーザー利用は、レーザーの新たな利用開発と共にマーケットの拡大に繋がり、わが国の産業の発展に不可欠である。

従来のレーザーの産業利用技術では、レーザーを単なる機械的加工用「熱源」として捉え、レーザーの最も重要な「光エネルギー」としての性質は殆ど無視されてきた。化学、バイオ等の分野におけるレーザー利用には、光エネルギーを利用する光化学反応の特徴と、レーザー光の特徴を融合して利用するイノベーションが必須である。

レーザー光の特徴としては、①単波長性、②高強度性、③指向性・光制御性、および④パルス性が挙げられるが、これらの特徴を効果的に利用する化学、バイオ等の分野での利用を行うためには、レーザーの、①単波長性を用いた反応制御、②パルス性を用いた時間制御、③レーザー反応開発生産システム、からなるレーザー反応技術開発が必要である。また、レーザー反応技術を実際の産業に直接的に利用するために、表面反応技術と医療・バイオへの利用技術の確立が必要である。表面反応技術としては高分子材料のアルキル部位、およびアリアル部位の表面化学修飾を行うための汎用性の高い方法論開発が重要である。この手法を用いて材料表面に求める性能を発現するための化学構造を容易に導入することが可能となる。医療・バイオへの利用技術としては、レーザー照射により植物内の二次代謝の反応を制御し、医薬品等の有用物質の合成・蓄積を行うこと、および新たな原理によるPDTの開発が考えられる。

光化学反応を制御するためには、紫外可視光領域での波長可変性と高出力化が可能な光源が不可欠で、この性能をもつ可能性の高い光源としてレーザーが適している。したがって、光反応制御に必要なレーザーの基本的性能は紫外可視光領域での波長可変性と高出力化になる。これにより光エネルギーをコントロールした光反応を行うことが可能となる。また、広く用いら

れるためには、可搬性、易操作性、低価格化、高効率化、高信頼性等の性能も求められる。

以上述べた各種の技術開発と共に、現在わが国が国際的優位性を保っている光化学反応とその利用に関する研究を産業に活かした、環境調和型レーザー・光化学プロセスに関するイノベーションが進むことにより、さまざまな産業分野での国際競争力の強化を図ることができる。化学反応に目を向けると、これまでも光エネルギーによる化学反応が行われてきたが、光エネルギー（光の波長）を任意にコントロールできる光源がなかったため、高選択的反応の実現が困難であった。必要なエネルギーの光を照射することで、このような問題の解決が可能になると考えられる。このことを実証し、光化学的合成反応の開発やその有機材料改質への応用や植物の生合成経路の制御に応用することは、社会的インパクトが大きく意義がある。また、この光プロセスが実現すれば、ポリマー部材の接合や局所表面改質などへの展開が期待できる。レーザー発振器の研究開発者やレーザー加工技術の研究開発者が化学反応・生合成の研究開発者と一体となり、この分野への挑戦的取り組みを行うことによって、技術革新が可能となると考えられる。この技術分野は前2分野に比べるとまだ基礎的な研究が必要な部分も多いが、逆に将来わが国がレーザー応用マイクロケミストリーやレーザー応用バイオ・医療といった技術分野において世界をリードできる可能性をもった分野である。

### 5. 3. 5 次世代レーザー加工システム

以上のようなレーザーに対するニーズを踏まえ開発を提案するレーザー装置について検討した。

性能は、(1) beyond-CO<sub>2</sub> レーザー領域に迫る高出力・高輝度性、(2) 多波長、時間制御性、(3) 多波長レーザーを加工用途に従って時空間制御し重畳する光学系である。現状の欧米レーザーメーカーは、まさに(1)、(2)の目標をファイバーレーザーをもって実現しようとしているが、本調査研究はその次に来る技術フェイズを見込んで、これらを半導体レーザーで実現することを提案する。現状で半導体レーザーのパワーは数 kW/cm<sup>2</sup> レベルに達し、国内メーカーによる青色半導体レーザーの高出力化も現実のものとなってきた。今後はエッジエミッター型あるいは面発光型半導体レーザーを高効率でファイバーに結合する技術を開発し、これらの高出力レーザーを単一モードファイバー伝送させコヒーレントに重畳することによって(1)の beyond-CO<sub>2</sub> レーザー領域を実現する。半導体レーザーは元来、電流制御によって時間制御性に優れたレーザーである。半導体レーザーではカバーできない波長領域は、ファイバーレーザー、波長変換で補うことで、(2) (3) の多波長、時間空間制御を半導体レーザーをメインに据えて実現することが、効率性、機能性の面からも間違いなく将来のレーザー加工技術のあるべき姿であり、そのため発振器および光学系、波長制御システム等を含むレーザーシステムの開発が必要である。

### 5. 3. 6 おわりに

以上のような調査結果研究を踏まえ、今後の産業用次世代レーザー加工・システム開発においては、下表に示す技術項目を技術開発項目として提案する。

分野	技術項目	技術課題	必要なレーザー	産業分野（利用者）
異種材料接合切断	CFRP切断・穴あけ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・厚物部材の高速切断加工</li> <li>・アプローチライン不要な精密穴開け加工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高品位ハイパワーレーザー</li> <li>・赤外+紫外ハイブリッド照射用レーザー</li> </ul>	・自動車、航空
	異種材料接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高速化处理</li> <li>・接合阻害因子の抽出・改良</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高効率・高吸収率レーザー、</li> <li>・多波長ハイパワーレーザー</li> </ul>	・電機・電子機器、自動車
局所表面改質	結晶制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>・熱拡散</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・可視紫外同時照射レーザー</li> </ul>	・電子機器
	表面洗浄	<ul style="list-style-type: none"> <li>・アブレーション</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パルス幅可変・可視紫外同時照射レーザー</li> </ul>	・自動車、電子機器
	皮膜形成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・レーザーアシストガスデポジション</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パルス幅可変・可視紫外域波長可変同時照射レーザー</li> </ul>	・自動車、電子機器
反応制御	光化学合成技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光エネルギー制御による光化学反応の高効率化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・波長可変紫外可視レーザー</li> </ul>	・ファインケミカル、医薬品
	表面化学修飾	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高分子材料改質のための汎用性の高い光化学反応の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・波長可変紫外可視レーザー</li> </ul>	・高分子材料
	光線力学療法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・近赤外光で作用する薬剤の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・波長可変近赤外レーザー</li> </ul>	・医療
	生合成代謝制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高出力単色光源による代謝経路制御因子の解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・波長可変高出力紫外可視レーザー</li> </ul>	・バイオ
レーザーシステム	レーザー発振	<ul style="list-style-type: none"> <li>・半導体レーザービームコンバイナ</li> <li>・直線偏光，パルス動作</li> <li>・短波長半導体レーザーの高輝度化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・位相制御面発光レーザー</li> <li>・偏波保存/単モードダブルクラッドファイバーレーザー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自動車製造：リモート溶接</li> <li>・自動車製造、航空機製造、造船：CFRP加工</li> </ul>

	集光光学系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・波面制御</li> <li>・マルチファイバー（多波長）重畳</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ファイバーアレイレーザー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CFRP 加工</li> <li>・太陽電池デバイス製造</li> </ul>
	波長制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>・可視域直接発振レーザー</li> <li>・高効率波長変換</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高出力青色半導体レーザー</li> <li>・Pr ファイバーレーザー</li> <li>・UV 波長変換レーザー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CFRP 加工</li> <li>・半導体デバイス製作</li> <li>・太陽電池デバイス製造</li> <li>・エキシマレーザー代替</li> </ul>
	パルス幅制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ファイバー耐光強度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・計算法制御パルス半導体レーザー&amp;ファイバー増幅器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新機能材料創製：材料組織制御</li> <li>・半導体デバイス製作：極浅アニーリング</li> </ul>

すなわち、複合材料や異種材料など熱的・光学的物性が異なる材料を一体化させた部材の接合や切断、薄膜内部の結晶制御（レーザーアニーリング）、部材表面の大気中でのドライ洗浄（レーザークリーニング）、マイクロリアクターや植物内等での光化学反応制御や生合成経路の制御、ならびにこれを支える半導体レーザーの高輝度高出力化が重要である。

これらの加工技術に共通した項目は、「多波長レーザーのハイブリッドプロセス」であり、これにより光化学反応を利用した新規プロセス＝「脱真空プロセス」と「脱液体洗浄プロセス」を実現し、環境負荷低減製品の製造や製造現場の環境負荷低減を図る。

具体的にはレーザーによる CFRP の切断、金属とポリマーの直接接合、薄膜太陽電池用アモルファスシリコンの部分結晶化、金属部材のクリーニングと接着・被膜形成、マイクロリアクター等を利用した光化学反応制御等に関する研究開発とこれらプロセスに利用される高輝度・高出力で波長可変の半導体レーザーと集光光学系や波長変換技術などを含むレーザー発振システムの開発を密接な連携を伴って実施する必要がある。

提案においては、レーザー加工の実施者（レーザーの利用者）のみならず、レーザー発振器の開発者が一体となり、早期市場開拓に取り組むべきと考える。また、テーマによる成熟度の差や、開発には時間がかかることを考え、開発開始から 3 年目に開発経過の評価を行い、実用化に近い技術と更なる開発が必要な技術、開発目標達成に大きな壁があり再度基礎から開発をやり直すべき技術を見極める必要もあろう。

一連の技術開発は製造プロセスに共通した課題であり、現在わが国が諸外国と競争しながら生産を実施している産業分野の今後ますますの競争力強化が図れると考えられる。しかし、現状技術の改良や単独企業の開発では目標を達成することが困難またはリスクが高いため、国の支援が必要である。複数の産業界が新たな加工情報や生産財情報を共有化することで、ますますの発展が期待できることから、今後関係者で協議の上、開発体制、所要資金の見積もりを含む技術開発の詳細を決定していくべきであると考えられる。

—禁無断転載—

システム技術開発調査研究 20-R-7

テーマ名 産業用次世代レーザー応用・開発に関する調査  
(要旨)

平成21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  
TEL 03-5472-2561