スマートプロセスの発展に向けて

Progress in Laser Processing

片山 聖二*
Seiji KATAYAMA**Key Words:** High Brightness Laser, Laser Welding, Laser Cutting, Laser Drilling, Remote Welding, Precise Processing,
Fiber Laser, Monitoring

1. はじめに

レーザは、そのビームをミラーかレンズで集光させると、高パワー密度の熱源となり、ほとんどすべての材料を加熱、溶融、蒸発させることができる。この特性を利用して、表面焼入れ、クラッディングなどの表面改質加工法、溶接、ブレイジング（ろう付）、ソルダーリング（はんだ付）などの接合加工法、切断・穴あけなどの除去加工法など、多数のレーザプロセスが開発され、実用化されてきている。

レーザプロセスは、システム化・ロボット化・自動化・省力化が容易であることから、自動車や鉄道車両、電子・電機、装飾、産業機器、船舶・橋梁の重工業など、各種産業分野において利用が拡大している。特に最近、レーザ装置の高パワー化・高品質化・高効率化・高輝度化が図られ、レーザ溶接やレーザ切断は、治具やモニタリング装置などの周辺技術の開発とともに実用化が進展しており、21世紀における日本のものづくりの基盤技術や最先端技術を担うことが期待される。

プロセス用レーザとしては、当初、各種加工法で高パワー化が容易な CO₂（炭酸ガス）レーザが利用されてきた。最近では、表面改質とブレイジングでは、レーザの発振効率が高く、金属固体表面での吸収率が比較的高い半導体レーザが使われる傾向にある。また、レーザによるスマートプロセスとしては、高輝度レーザによる高速リモート切断および高速リモート溶接が活発に検討され、さらに、極短パルスレーザまたは UV（ultraviolet：紫外線）レーザによる熱影響部の少ない微細穴あけや第2高調波レーザによる薄膜太陽電池のスクライビングなどが注目されている。そこで本稿では、今後、ものづくりの更なる展開・発展を計るため、レーザおよびレーザプロセスについて、特に、レーザ溶接・接合の研究開発・実用化の動向を中心にレビューする。

2. レーザの発展

2.1 レーザの種類と特徴

レーザには、多数の種類があるため、プロセス用熱源として利用する場合、レーザの名称と特質を十分に理解しておく必要がある。プロセス用レーザの名称と特徴をまとめて Table 1¹⁻⁵⁾ に示す。連続発振ができるレーザとパルス発振を特徴とするレーザに分けて考える。これまで、表面改質、接合および切断などのプロセス用熱源としては、連続発振で高パワー化が容易であり、高品質切断と高速・深溶込み溶接が可能な CO₂（炭酸ガス）レーザとファイバ伝送が可能で高柔軟性のランプ励起 YAG レーザが開発され、中・厚鋼板のコイルやパイプ、テーラードブランク材、自動車ルーフ、電装部品などの溶接に適用されてきた¹⁻³⁾。最近、これらの装置開発は一段落し、電気―光変換効率が高くファイバ伝送が可能な高柔軟性の半導体レーザ (LD) ならびに Yb をドープした固体媒質を用いる高輝度・高ビーム品質のファイバレーザおよびディスクレーザの開発が活発である¹⁻³⁾。一方、パルス発振のレーザとしては、YAG レーザが開発され、タービンプレードの穴あけや装飾品、携帯用電池などの溶接に利用されてきている。また、エキシマレーザは短波長レーザとして、主に半導体リソグラフィ（露光装置：ステッパ）に使われて、さらに各種微細加工や TFT アニールングなどに使われている。また、波長 9.4 mm のパルス CO₂ レーザも携帯用基板の穴あけ⁴⁾ に用いられている。

レーザ微細加工の適用分野としてエレクトロニクス分野があり、そこで用いられている各種レーザの代表的な加工用途とその使用出力範囲を Fig. 1³⁾ に示す。微細加工には 500 W 以下のレーザが使われていることがわかる。最近では、ピコ秒やフェムト秒の超短パルスレーザや固体レーザの第3や第4高調波の短波長 UV レーザ⁵⁾ の高パワー装置の開発も活発であり、その適用が検討されている。

* 大阪大学接合科学研究所（〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1）
Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047 Japan)

Table 1 Kinds and characteristics of lasers for processing.(2011, Dec.)

連続発振

- **CO₂ レーザ** (波長: 10.6 μm; 遠赤外)
 レーザ媒質: CO₂-N₂-He 混合ガス (気体)
 出力: 45 kW (最大) (通常) 500 W ~ 5 kW
 メリット: 高出力化容易 (高発振効率: 10 ~ 20%)
- **ランブ励起 YAG レーザ** (波長: 1.06 μm; 近赤外)
 レーザ媒質: Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ ガーネット (固体)
 出力: 10 kW (通常) 500 W ~ 4 kW (発振効率: 1 ~ 4%)
 メリット: ファイバ伝送可能、分岐容易
- **半導体レーザ (LD)** (波長: 0.8 ~ 1.2 μm; 近赤外)
 レーザ媒質: Al(In)GaAs, InGaAsP 等 (固体)
 出力: 15 kW (ファイバ伝送型最大) (通常) 50 W ~ 4 kW
 メリット: 最高効率 (発振効率: 30 ~ 60%)、コンパクト
- **LD 励起固体レーザ** (波長: 1.05 μm; 近赤外)
 レーザ媒質: Nd³⁺ または Yb³⁺:Y₃Al₅O₁₂ ガーネット (固体)
 出力: 13.5 kW (ファイバ結合型最大) (通常) 100 W ~ 4 kW
 メリット: ファイバ伝送可能、高効率 (発振効率: 10 ~ 20%)
- **ディスクレーザ** (波長: 1.03 μm; 近赤外)
 レーザ媒質: Yb³⁺:YAG, YVO₄ 等 (固体)
 出力: 16 kW (カスケード型最大) (通常) 500 W ~ 8 kW
 メリット: ファイバ伝送、高輝度、分岐可能、高効率 (15 ~ 25%)
- **ファイバレーザ** (波長: 1.07 μm; 近赤外)
 レーザ媒質: Yb³⁺:SiO₂ 等 (固体)
 出力: 50 kW (最大) (通常) 100 W ~ 10 kW
 メリット: ファイバ伝送可能、高効率 (発振効率: 20 ~ 30%)
 極細ビーム径 (8 ~ 15 μm)、コンパクト、高輝度

パルス発振

- **ランブ励起 YAG レーザ** (波長: 1.06 μm; 近赤外)
 レーザ媒質: Nd³⁺:Y₃Al₅O₁₂ ガーネット (固体)
 出力: 1 kW (通常) 20 ~ 500 W (発振効率: 1 ~ 4%)
 メリット: ファイバ伝送可能、分岐容易
- **エキシマレーザ** (波長: 1.06 μm; 紫外)
 レーザ媒質: 希ガス+ハロゲン+バツファガス ArF (193 nm), KrF (248 nm), XeCl (308 nm)
 出力: 1.2 kW (最大) (通常) 5 ~ 500W (発振効率: 2 ~ 3%)
 メリット: 短波長、高フォトンエネルギー、高ピークパワー
- **CO₂ レーザ** (波長: 9.4 μm; 遠赤外)
 レーザ媒質: CO₂-N₂-He 混合ガス、TEA-CO₂ (気体)
 出力: 1 kW (最大) (通常) 500 W (発振効率: 10%) (パルス幅: .1 ~ 100 μs)
 メリット: 高速・高精度微細穴あけ
- **グリーンレーザ** (第2高調波レーザ)、UV レーザ (第3高調波レーザ・第4高調波レーザ)
 (波長: 532 nm) (波長: 355・266 nm)
 レーザ媒質: Nd:YAG (固体) 変換結晶 (LBO 結晶、CBO 結晶等)
 出力: 500/100/40 W (最大) (通常) 1 ~ 500 W
 メリット: 高ビーム品質、短パルス、高繰返し
- **極短パルスレーザ** (フェムト秒レーザ・ピコ秒レーザ) (波長: 0.8 ~ 1.6 μm; 近赤外)
 レーザ媒質: チタン・サファイア、Yb(Er) ファイバ、Yb ディスク等 (固体)
 出力: 1 kW (最大) (通常) 1 W ~ 100 W
 メリット: 極短パルス、熱影響が少ない

2.2 高パワー・高輝度レーザの開発動向

固体レーザの発振の特徴を表現した模式図を Fig. 2⁵⁾ に比較して示す。YAG レーザでは、熱レンズ効果のために品質が悪くなり、それを改善するため、半導体レーザ励起の固体レーザが開発された。その後、半導体レーザ励起のディスクレーザまたはファイバレーザが、YAG ロッドに対して冷却を工夫することによって高品質化・高輝度化が図られたことがわかる。したがって、半導体レーザは直接用いられるか、レーザの励起源として用いられるかであり、半導

体レーザの開発が重要であることがわかる。

レーザ加工の場合、通常、高パワー密度・高エネルギー密度を得るため、レーザビームをレンズなどで集光させる必要がある。焦点位置でのビーム直径(集光径またはスポット径と言う) D_f は、 $D_f = (4f\lambda M^2) / \pi D_i$ で表される^{5,7)}。ここで、 f は集光レンズの焦点距離、 λ はレーザの波長、 D_i は集光前のビーム直径であり、 M^2 (エムスクエア) はマルチモードのシングルモードに対する拡がり係数で、 $\pi\alpha\omega_0 / \lambda$ で表される。この α と ω_0 はそれぞれ集光時の半角と集光ビー

Fig. 1 Typical lasers and average powers for main processes used in electronics industry.

Fig. 3 Processing areas for typical lasers with respective beam qualities (schematic representation; source: LZH).

Fig. 2 Typical solid state lasers (rod-type YAG laser, disk laser, fiber laser and diode laser) and their cooling and irradiation situations.

ムの半径である。したがって、高パワー密度化は、ビームのスポット径を小さくする目的で、(1) 焦点距離の短い集光光学系を用いること、(2) 集光前のビーム径を広げること、(3) ビーム品質が優れたレーザを用いること、などにより達成されることがわかる。そして、 $M^2 = 1$ のシングルモードレーザの場合、波長が短い方が細く絞れることになる。なお、レーザのビーム品質は、 M^2 または K (ケー: $1/M^2$) 値で (1 に近いほどよいとして) 表されてきた⁷⁾が、最近、 $\alpha\omega_0$ (集光角度と集光ビーム半径の積) で表記される BPP (Beam Parameter Product) が用いられる⁸⁾。BPP が小さいほど、レーザビーム品質は高いと判断され、(1) 小形の集光光学系が利用できる、(2) 同一の集光径を得るのにより長焦点の光学系が利用できる、(3) 同一の焦点距離のレンズではより小さいビーム径に集光できるという利点⁹⁾がある。レーザのビーム品質 (BPP) とその加工可能範囲を Fig. 3¹⁰⁾ に示す。品質が高いほど、長焦点の集光系が使える、広い範囲が加工できることになる。

各種レーザにおけるパワーとビーム品質 (BPP) との関係の種類を種々のレーザ加工において通常使われる条件範囲と共に

Fig. 4 Beam quality of each typical laser as function of laser power, and conditions of beam quality and laser power for respective laser processing techniques.

Fig. 4^{2, 11)} に示す。低パワーでは、波長が約 $1.06 \mu\text{m}$ と短い YAG レーザ、半導体レーザ (LD) 励起固体レーザ、ディスクレーザおよびファイバレーザの BPP が小さく、ビーム品質が良好である。しかし、高パワーになると、YAG レーザの BPP が大きくなり、次に LD 励起固体レーザ、ディスクレーザおよびファイバレーザの BPP も大きくなる。ただし、ファイバレーザ、ディスクレーザおよび CO₂ レーザとも BPP はランプ励起 YAG レーザや半導体レーザと比べると小さい。半導体レーザは、BPP が大きいのが欠点であったが、最近、ビーム品質が従来の YAG レーザと同等レベルまで改善されてきている¹²⁾。

レーザ加工法との関連において、穴あけには、通常、低平均パワーであるが、高ピークパワーのパルス YAG レーザが使われている。最近、高品質・低熱影響などの観点

から、パルス時間の短いナノ秒だけでなく、ピコ秒やフェムト秒レーザなどの利用が検討されている。また、プラスチックや薄板の溶接およびはんだ付やブレージング（ろう付）では、レーザのパワー密度が低くてもよいことから、半導体レーザが直接またはファイバ伝送で使われることが多い。なお、薄板の溶接では、低パワー・微細スポット径のディスクレーザやファイバレーザも連続またはパルス化の条件で検討されている。焼入れやクラディングは、ビーム形状を工夫した CO₂ レーザや YAG レーザが使われてきたが、最近では、高パワーの半導体レーザによる検討が多い。金属材料表面の引張の残留応力を圧縮応力に変えて、応力腐食割れなどを防止する手法の一つとして、レーザピーニングがある。これは、第2高調波の YAG レーザを水中で照射する方法で実施されている¹³⁾が、最近では、銅管に対して高パワーファイバレーザを加熱源に利用する表面処理方法も開発されている¹⁴⁾。一方、レーザ切断には、高品質・高出力のレーザが必要であり、一般に CO₂ レーザが使われている。レーザ切断は、今後、欧州では、薄板の場合に高品質・高輝度のディスクレーザまたはファイバレーザが使われ、厚板の場合に高パワーの CO₂ レーザが使われることが予想されている。一方、日本では、水中でのレーザ切断を含めて、ファイバ伝送できる高柔軟性の高輝度なディスクレーザやファイバレーザの利用が検討され、期待されている。

半導体レーザでは、パワー 4 または 5 kW (30 または 40 mm*mrad) が 0.3 または 0.4 mm 径のファイバで伝送できるものが市販されている¹²⁾。一方、ディスクレーザは 1 kW で 50 μ m のファイバ径が利用されるものや 0.2 mm 直径のファイバが利用できる 16 kW (BPP : 8 mm*mrad) が市販されている¹⁵⁾。特に、ファイバレーザは、理想的なシングルモード発振が 10 kW の高パワーでも可能であり、最大 50 kW の大出力の装置¹²⁾も販売され、装置サイズも小さく、今後の展開が注目される。高パワーファイバレーザ装置は、1台 600 W または 1.2 kW のシングルモードファイバレーザ装置が数台利用されて高パワーが保証されている¹⁶⁾。なお、半導体、ディスクおよびファイバレーザで上記の優れた諸特性が達成できるのは、それぞれ 1 社であり、他社も高パワー・高品質装置の開発に努力されている。いずれもレーザの高パワー化は、超高品質レーザの重量やバンドル化によって達成されており、各社とも工夫されている。

波長が短く、フォトンエネルギーの高いエキシマレーザは、日本では、CO₂ レーザ、YAG レーザに続いて国家プロジェクトとして高パワー装置が開発された。高分子材料の穴あけや切断、半導体露光用光源（ステッパー）に利用され、また、半導体用 Si の切断や割断、アニーリングなどに利用されている。しかし、発振用ガスが有毒であることから、波長変換素子による固体 (YAG) レーザの 2、3 または 4 倍の高調波のレーザが開発され、利用が検討されている⁹⁾。

Table 2 Names and classification of laser processes.

さらに、パルス時間が短いピコ秒やフェムト秒レーザは、材料を瞬時に蒸発でき、加工部の熱影響がきわめて少ないことからエキシマレーザと競合するレーザとして注目されている。

以上のことから、ファイバレーザやディスクレーザは、高パワー・連続発振でも BPP が小さく、高輝度であることから、また、ミリ秒 (ms) からフェムト秒 (fs) までのパルス化も可能であることから、ほとんどすべてのスマートプロセッシングに適用できることが推測され、今後の動向が最も注目される。

3. レーザプロセッシングの発展

レーザプロセッシングは、Table 2¹⁷⁾ に示すように、材料・製品の表面を改質する表面改質処理法、2つ以上の物をつなげる接合法、物質の一部を取り除く除去加工法および高機能な材料の製造や製品作製の新材料合成法の 4 つに大別される。それぞれの特徴と動向について以下に記す。

3.1 レーザ表面改質の動向

レーザ表面改質は、熱的プロセスと化学的プロセスを利用したものに大別される。通常、熱的なプロセスが主である。この分野では、発振効率の高い半導体レーザの表面焼入れ、クラディングなど熱的プロセスへの利用拡大が検討されている。また、オーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基超合金の応力腐食割れを防止するため、第2高調波固体レーザを水中で照射処理を行い、表面に圧縮応力を残

留させる方法がレーザーピーニングとして実用化されている¹³⁾。

最近、フェムト秒レーザーによる表面の高硬化化、凹凸化、高機能化などが注目され、検討されている^{18, 19)}。

3.2 レーザ溶接・接合の動向

レーザー溶接は、電池ケースや電装品から自動車用のテラードブランク材やルーフの溶接まで広範囲に利用されている。最近のレーザー溶接は、高輝度レーザーを利用する高速溶接、深溶込み溶接または微細溶接がトレンドである。

現在、高速・高生産性の接合法として最も注目されるのがリモート溶接・スキャナ溶接と呼ばれる技術である。リモート溶接には、スキャナ（ミラー）を動かすタイプと動かさないタイプがある。特に、ミラーを動かすタイプでは、レーザーの加工点を瞬時に移動させることができ、機械動作（ロボット等）による移動のロスタイムを画的に削減することが可能である²⁰⁾。

まず、スラブ型の高輝度CO₂レーザーを用いて、米国でジープのシングドアの溶接に最初に適用され、56箇所の溶接を32秒で完了し、生産性の高さが実証された。続いて、欧州および日本でもボデーパーツおよび薄鋼板のインパネにリモートレーザー溶接が適用され、1日24時間稼動するラインが構築された。これまでは、ビーム品質の高いCO₂レーザーによるリモート溶接法が実用化されていたが、最近では、ファイバレーザーやディスクレーザーのビーム品質が向上したことから、リモート溶接用熱源の主流はCO₂レーザーから、ファイバレーザーやディスクレーザーなどの固体レーザーに変わりつつある²⁰⁾。レーザービームをファイバ伝送で、多関節ロボットに装着した溶接ヘッドに導くようにシステムを構成することにより3次元のリモート溶接が可能となった。約1m離れた位置にある鉄鋼やアルミニウム合金薄板の高速接合がファイバレーザーでも可能であることが示されている²¹⁾。ビーム品質がよいほど、広範囲な領域で接合が可能になる。日本でも、Fig. 5に示すように、2007年から、リモート溶接システムの自動車部品の量産への適用が始まっている²²⁾。なお、リモート溶接では、レーザー誘起ブルームが大きく成長すると、試料上方の屈折率が小さくなり、レーザービームが屈折したり、焦点位置が下方へ移動したりして、溶融部形状が変化して溶込み深さが浅くなることがあるので、ファンやブローアを用いてブルームを抑制するような対策を取る必要がある²³⁾。今後、亜鉛めっき鋼板や高張力鋼、アルミニウム、チタンなど各種材料の接合技術として、ファイバ伝送レーザーとロボットとを組み合わせたりリモート／スキャナ溶接技術の確立が期待されている。

深溶込みの溶接部を得るための開発は、鉄鋼や重電・重工業の分野で特に期待されている。変形の低減・防止の観点からレーザー溶接法が望まれる場合とギャップ裕度拡大の観点からレーザー・アークハイブリッド溶接法が望まれる

Fig. 5 Remote laser welding situations and car kinds made by remote welding.

Fig. 6 Molten pools observed during laser welding at various gas flow rates, and cross-sectional photos of laser weld beads produced.

Fig. 7 Cross-sectional photo of laser multi-pass welds in thick plate of Type 304 steel.

場合がある。Fig. 6²⁴⁾からわかるように、ステンレス鋼に対する高パワーファイバレーザーによる溶接において、高集光光学系でブルーム制御ガスのノズル径と流量および吹付け位置と角度ならびにレンズの焦点位置を試料内部に調節することによって深溶込みが可能であることが明らかにされている。また、Fig. 7に示すように、多層溶接で厚板の

Fig. 8 Penetration depths of laser welds made at various powers under 1 atm or 0.1 kPa low vacuum, and example of deeply penetrated laser weld in Type 304 steel made at 26 kW and 0.1 kPa.

Fig. 9 Laser-arc hybrid welding apparatus and cross-sectional photo of hybrid weld bead.

溶接が行われるようになってきている^{25, 26)}。さらに、低真空中で長焦点の集光光学系を用いたファイバレーザ溶接では、**Fig. 8**から明らかなように、大気中では得ることができないほどの深溶込みの溶接部を得ることができる²⁷⁾。高パワーレーザ溶接では、集光光学系の選択も重要である。特に、集光レンズの冷却が十分でないと、熱レンズ効果が起こり、焦点位置が上方へ移動することがあるので注意が必要である²⁸⁾。また、鉄鋼材料厚板の貫通溶接の場合、板表面にアンダーフィルが起こり、裏面にハンピングが生じるなど、溶落ちが起こりやすいので対策が必要である^{29, 30)}。

欧州では、客船の製造にハイブリッド溶接法が使われている³¹⁾が、日本でも、**Fig. 9**に示すように、造船への適用が始まりつつある³²⁾。ハイブリッド溶接では、通常、溶着量を得るためにアーク電流の高い条件を使う。しかし、アーク力が強くなって、溶融池表面が凹んで広くなり、表面ビード幅が広がってアンダーフィルが形成しやすくなる。このため、最近、ハイブリッド溶接法においては、さらにワイヤを添加溶融させる FLA 溶接法³³⁾が開発されている。今後、この FLA 溶接は薄板から厚板まで広範囲な適用が期待される。

一方、マイクロ溶接の分野では抵抗スポット溶接やはん

Fig. 10 Glasses frames produced by pulsed laser welding.

だ付に替って低入熱レーザの利用が拡大している。パルス YAG レーザ溶接で作製された眼鏡フレームの例を **Fig. 10**³⁴⁾に示す。レーザ溶接では、高強度でばね性能や意匠性とも良好なものの作製が可能であることが明らかにされ、今後も更なる展開が期待されている。極細径のファイバレーザやディスクレーザでは、約 50 ~ 100 μm 径の微小溶接部の作製が可能であり、今後、電子・電気機器分野などでの超精密微細溶接法として、パルス YAG レーザと競合しながら発展することが予想されている。

近年、構造物や部品の軽量化が要望されることが多い。これに対応して、軽量のアルミニウム合金やマグネシウム合金のレーザ溶接性に関して良好な溶接部を作製する条件が明らかにされている³⁵⁾。また、多量に使用される鉄鋼材料と軽量のアルミニウム合金やマグネシウム合金などとのレーザ異材接合が種々検討されてきている³⁶⁻⁴⁷⁾。重ね溶接法で鉄鋼材料側からレーザを照射し、アルミニウム合金板の溶融を制御することによって高強度の継手が高速度に作製できることが明らかにされている³⁶⁻⁴¹⁾。また、重ねと突合せを同時に行うことが可能な継手が考案され、さらに高強度化が計られ³⁸⁾、さらに、溶接ビードを3線作製することにより母材で破断する高強度の継手が得られることも明らかにされている³⁹⁾。さらに、鉄鋼材料とアルミニウム合金の接合では、めっき層の工夫、ローラ利用レーザ異材溶接、レーザブレイジング法なども検討され、高強度接合部の作製が図られている⁴²⁻⁴⁶⁾。また、鉄鋼材料とマグネシウム合金のレーザ突合せ溶接では、レーザビーム照射部を突合せ位置からずらす手法により、接合界面においてマグネシウム合金のみを溶融させることによって界面拡散接合をし、高強度な継手が得られることが示されている⁴⁷⁾。そして、最近では、鋳鉄と低合金鋼とのレーザ溶接法の確立、熱伝導の良い銅と軽量のアルミニウム合金とのレーザ接合法の開発などが要望されている。

さらに、最近、超軽量であるプラスチックの利用が増加し、金属とプラスチックの接合も要望されている。それらの接合は、通常、接着剤やボルトなどの機械的な結合で行われるが、接着剤では、接着に長時間を要する、剥離強度が弱い、有害物質が排出されるなど、また、機械的な結合では、別の機械加工工程が必要である、接合用部品が必要

Fig. 11 Laser direct joints of Type 304 steel and PET plastic before and after tensile shear testing, and TEM photo and analytical results of cross section of joint at high magnification.

である、設計の自由度が制限されるなど、種々の問題がある。そこで、金属とプラスチックを重ねた継手に対してレーザを金属に照射して直接加熱し、その接合界面の熱でプラスチックを溶融させて接合する簡便な方法が開発されている⁴⁸⁻⁵²⁾。その方法で得られたステンレス鋼 SUS 304 と非結晶 PET とのレーザ接合サンプルとレーザ直接接合部の透過型電子顕微鏡観察の結果を Fig. 11⁴⁹⁾ に示す。引張せん断試験では、プラスチック母材が伸びて破断し、その荷重は、幅 30 mm、板厚 2 mm のサンプルで、1500 から 4000 N を呈するほど高いことが明らかにされている。鉄鋼材料、チタン、アルミニウムなどの金属とポリアミド (ナイロン)、ポリエチレンテレフタレート (PET)、ポリカーボネートなどのプラスチックの接合では、継手強度が十分に高く、プラスチック母材で破断する継手が得られている⁴⁸⁻⁵⁰⁾。この接合では金属酸化皮膜を通じてプラスチックが金属と接合していることがわかる。プラスチックでは、通常、気泡の発生をいやがるが、レーザ直接接合法では気泡の発生を利用する。レーザはプラスチックと接する金属の接合界面を溶融しない程度に加熱させ、プラスチックのみを溶融させる。さらに、高温部では一部のプラスチックが分解して気泡が発生し、その気泡の発生と急膨張に伴う高圧の発生により、溶融プラスチックが流動して活性な溶融プラスチックが金属表面に密着し、アンカー効果、ファンデルワールス力や化学結合などの関与する高密着機構が発現したことが考えられている。従来、金属とプラスチックの接合は、構造が異なることから不可能とみなされてきたが、レーザにより高強度接合部の作製が可能であることが判明したことから、異種金属間にプラスチックを挟む異材接合^{48, 51)}やセラミックスとプラスチックの接合、ガラスとプラスチックの接合、また金属と CFRP (炭素繊維強化プラスチック) との接合⁵²⁾ も可能であることが確認され、今後、軽量化と高機能化の観点から更なる展開が期待される。

3.3 レーザ除去加工の動向

除去加工として、鋼板のレーザ切断が広く利用されている

Fig. 12 Comparison of laser cutting speed among respective lasers

る。従来、CO₂ レーザが適用されてきたが、最近は、Fig. 12⁵³⁾ に示すように、高ビーム品質・高輝度のファイバレーザやディスクレーザの方が CO₂ レーザより高速切断が可能であることが報告され²¹⁾、薄板の切断においてはこれらの高輝度固体レーザの利用が増加している。一方、鋼板厚板のレーザ切断では、CO₂ レーザの方がファイバレーザなどの固体レーザより切断面の品質が優れていることが知られている。この理由として、波長 1 μm 帯の方がレーザの吸収率が高いため切断前壁での溶融がダイナミックに起こるため、またレーザの吸収率が高いブリュースター角が波長 1 μm 帯の方が小さいために板底部で溶融が垂直方向に起こりにくくなり傾斜しやすくなるためという解釈と、レーザと切断面からの蒸発物との相互作用が 10 μm 帯の方が強く、より高温状態になっており、蒸発物質からの熱放射が高いため切断が容易に起こり、切断面も良好であるという考えが報告されている⁵³⁾。この点については今後さらに詳細に検討し、解明する必要がある。

最近、1つの加工ヘッドで、レーザビームの集光状況とシールドガス圧を変えることによって、レーザ切断とレーザ接合が可能であることが示されている²⁹⁾。また、太いファイバ内の中央に細いファイバが内蔵された形状の1本の特殊ファイバでレーザ切断とレーザ接合が可能なシステムが開発されている⁵⁴⁾。今後の動向が注目される。

CFRP は、軽量・高強度であることから、飛行機や高級自動車、風力発電用ファンなどに利用されており、環境とエネルギー問題の観点から今後の利用拡大が予想されている。その切断は、通常、砥石利用機械加工やウォータージェット切断加工によって行われているが、工具の摩耗や吸水性による強度低下、長時間加工などの課題がある。一方、レーザには、高出力・高輝度の連続発振のファイバレーザまたはディスクレーザ、短波長化した第2または第3高調波のパルス固体レーザ、フェムト秒またはピコ秒の極短

パルスレーザなどがあり、最近では、CFRPのレーザ切断について注目され、各種レーザを用いて盛んに検討されている^{52, 55-58)}。特に、短パルスレーザは熱影響の少ない高品質な切断が可能であることが明らかにされ、期待されている。また、高輝度レーザによる超高速切断は、品質の改善と高生産性の実現を目指す切断法として今後の展開が期待されている。なお、レーザ切断に有効なCFRPの開発も同時に進める必要がある。

Si ウエハのダイシングには、ダイヤモンドダイシングとレーザダイシングがある。レーザダイシングには、非接触加工であり、切りくずの発生がない、チッピングの発生が少ないなどの長所があり、Q スイッチ短パルス UV レーザが使われている⁵⁹⁾。これは Si ウエハ内部に微細な割れ(蒸発除去部)を発生させ、後で破壊する切断である。同様の加工がガラスでも行われている。薄型テレビやノートパソコンおよび携帯電話に利用されるガラスが薄板化されており、CO₂ レーザによるスクライビング法が検討されている。特に、レーザ照射加熱部直後にウォータージェットで表層を冷却する方法が検討され、良好な切断法が確立されている^{60, 61)}。また、レーザによるガラスの曲線切断は従来困難であったが、最近改善されてきている。

高ピークパワーのパルス YAG レーザは、タービンブレードの穴あけに利用されており⁶²⁾、良好な穴形状の作製法やスパッタの付着防止法、高速穴あけ法などの開発が研究されている。また、携帯電話などのプリント基板において、VIA ホール加工は元々メカドリルが主流であり、当初エキシマレーザが利用されたが、Fig. 13⁴⁾に示すように、穴径が 100 μm 以下が要望されるようになって、短パルス CO₂ レーザによる穴あけが主流になっている。今後、50 μm 以下の微細穴あけが要望されると、Fig. 14⁵⁾に示すように、CO₂ レーザによる穴径には限界があり、第3高調波または第4高調波の UV レーザが利用されるようになることが予想されている⁵⁾。

一般に、微小な穴あけについては、ns より ps または fs のパルス時間の短いレーザほど、熱影響が少ないことが明らかにされ、フェムト秒レーザの適用が期待されてきた。最近、Fig. 15⁶³⁾に示すように、フェムト秒レーザによる微小穴の作製が実用化されつつある。

地球温暖化対策やエネルギーコスト削減の観点から、太陽電池の製造が注目されている。太陽電池は、結晶型(多結晶 Si、単結晶 Si)と薄膜型(薄膜 Si、合金系など)があり、薄膜 Si タイプの製造プロセスにおいては、Fig. 16に示すように、Q スイッチレーザによるスクライビングなどが行われ、基本波レーザ(P1)とグリーンレーザ(P2、P3)が利用されている⁶⁴⁾。また、ビーム形状が方形状であるレーザビームを照射するラップ処理によって良好なスクライビングができることが示されている。

レーザマーキングは、レーザ照射部を溶融または蒸発さ

Fig. 13 Manufacturing processes for printed build-up circuit board.

Fig. 14 Examples of holes produced in printed circuit boards with CO₂ laser and UV lasers.

Fig. 15 Drilled sample and enlarged cross sections of holes produced with femtosecond laser.

Fig. 16 Illustration of structure of thin film type Si solar cell and manufacturing process.

Fig. 17 Example of three-dimensional laser welding for car roof.

せて、レーザ照射部と非照射部の間にコントラストを発生させてパターンを形成させることができ、Si ウエハのソフトマーキング、ドリル、バイトなどへの黒色マーキング、IC 樹脂パッケージの脱色、塗装表面のマーキングなど、広範囲に利用されている⁶⁵⁾。最近では、スキャンタイプが主であり、LD 励起 YAG レーザや YVO₄ レーザが主流であったが、ファイバレーザの利用も増加している⁶⁵⁾。

4. レーザシステムの知能化による高品質溶接部作製と実用化

日本では、LD 励起 YAG レーザとロボットを組み合わせた溶接システムが開発され、Fig. 17⁶⁶⁾に示すように、自動車用亜鉛めっき鋼のルーフやステンレス鋼製車両構体⁶⁷⁾が製造されている。これらの重ね溶接法は、従来の抵抗スポット溶接に代わる技術である。今後、レーザ溶接時には、インプロセスモニタリングや適応制御法の更なる高度化と接合部の高速検査システムの開発が必要とされている。

高品質なレーザ溶接部を作製するためには、信頼性のあるモニタリングシステムを用い、溶接プロセスを制御することが望ましい。実際、レーザ溶接中には物理現象に基づく情報が多数存在する。プロセスモニタリングに関しては、プラズマ／プルームから放出される光⁶⁸⁻⁷⁵⁾、蒸気／プラズマあるいは溶融池の圧力変化による音響⁷²⁻⁷⁶⁾、溶接材料中の機械的応力による超音波⁷⁶⁾、金属蒸気もしくはプラズマの誘電率またはプラズマ電位⁷²⁻⁷⁶⁾、反射レーザ光(パワー)^{70, 76, 77)}などの測定、突合せ接合部や溶融池およびキーホルの直接観察法^{70, 75-83)}などが検討されている。

CO₂ レーザ溶接の場合、レーザ誘起プルームの発光強度からアンダーフィル状の溶接欠陥の検出が可能とされている^{68, 69)}。また、レーザ誘起プラズマの挙動の検討結果⁶⁹⁻⁷⁵⁾から、溶込み深さは、発光およびプラズマ電位の計測信号

(最大と最小の差である平均振幅)と相関し、モニタリング指標としての有効性が示唆されている。一方、波長 1 μm 帯のレーザではプラズマ電位は小さいようである。

反射光を利用する方法に関して、YAG レーザの場合、反射光のみが透過する干渉フィルター ($\lambda = 1064 \pm 5 \text{ nm}$) と Si のフォトダイオードが装備される⁸⁴⁾。一方、CO₂ レーザ溶接の場合は、長波長のため、小さい隙間または穴あきの集光ミラーが利用される。亜鉛めっき鋼板の YAG レーザ重ね溶接では、溶接中の反射光を測定し、その周波数解析結果から、良好な接合部、スパッタの発生によるアンダーフィルビードの生成および未接合の 3 つの接合状態を推測する手法が提示されている⁸⁰⁾。溶込み深さやポロシティとの関連性が示唆された報告もある^{72, 78)}が、今後、さらに検討が必要であろう。

レーザ溶接では、ビード幅が狭いため、突合せ継手や重ね隅肉継手では、センシング技術の開発が必要である。レーザ溶接をしたい箇所を半導体レーザラインの反射光から検知して、溶接ヘッドをそこに移動でき、10 m/min 程度までの高速度に対応できる装置が市販されている⁸⁵⁾。また、この検出器は、レーザ溶接後の表面ビードの凹凸の評価やピットの検出に利用することもできる。今後、レーザ溶接中の溶融池の直接観察とその結果の適応制御への利用開発が注目される。

連続レーザ溶接時には、熱放射光をモニタリングし、信号強度とビード幅の相関から、薄板での溶接ビード幅を一定にできる適応制御法が開発されている^{86, 87)}。

パルス YAG レーザ溶接は、精密・微細溶接に多用されているが、材料の表面状態や治具とその押さえの程度などのわずかな差異により不良品が発生する場合がある。そこで、Fig. 18 に示すように、良品と不良品を判断するインプロセスモニタリング法が開発され、さらに、数ミリ秒の短

Fig. 18 Representative arrangement of pulsed YAG laser apparatus for in-process monitoring, in-process repairing and adaptive control.

時間の溶接プロセスをマイクロ秒で診断して、常時、良好な溶接部を得るためのレーザー適応制御法・インプロセスリペアリング法が開発されている⁸⁸⁻⁹⁰⁾。この手法は、穴あき欠陥の生じない良好な溶接部が常時得られる理想的な接合法であり、今後の利用拡大が望まれる。

レーザー表面焼入れやクラディングでは、放射温度計による温度（分布）または熱放射をモニタリングし、フィードバック制御によって、一定温度を保つように制御し、一定の硬化層やクラディング層の作製ができることが明らかにされている。

5. 終わりに

レーザーとその材料加工の研究開発は、活発に行われており、特に、レーザー溶接、レーザー切断およびレーザーマーキングの適用は順次増加している。その内、リモート加工（溶接および切断、穴あけなど）が高速度・高生産性加工法として注目されている。一方、深溶込み溶接としては、高パワーレーザー装置の利用またはハイブリッド溶接法についても検討されている。通常の熱源では溶接できないような微細部の溶接については、パルス YAG レーザが利用されている。今後、ファイバレーザーまたはディスクレーザーが代用されていくかが注目される。実用化に際し、モニタリングや適応制御技術の開発も重要である。また、高機能化のレーザー異材溶接としては、実用化が待たれる。

表面改質としては、半導体レーザーによる焼入れやクラディングおよびグリーンレーザーによるピーニングが行われている。CFRP のレーザー切断もウォータージェットに代わる方法として世界的に検討されている。エキシマレーザーは半導体露光用光源として利用され、微細加工分野にも利用されている。一方、短パルスのグリーンレーザーや UV レーザ、さらにピコ秒またはフェムト秒レーザーなどの微細加工分野での利用拡大が注目される。

技術の発展は、通常、関連する研究者数と予算額に依存する。近年、欧米では、21 世紀は「光の時代」と言

われ、極めて多くの研究者や技術者がレーザープロセス分野に関与し、レーザー装置とプロセスの研究開発に多額の予算が投入されている。日本でも、レーザープロセスが発展するためには、レーザープロセスに興味を持つ研究者・技術者が増加し、レーザープロセスプロジェクトへの投資も活発化することが望まれる。本稿がレーザープロセスの発展に若干でも貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 片山：ふえらむ、17-1 (2012) 18-29.
- 2) 片山：溶接学会誌、78-2 (2009) 40-54.
- 3) 鷲尾：レーザー加工学会誌、16-2 (2009) 98-103.
- 4) 西前、黒沢：レーザー加工学会誌、16-2 (2009) 115-119.
- 5) 古田：精密工学会関西支部講習会「生産技術特別セミナー」、(株)精密工学会関西支部、(2011) 95-102.
- 6) 中村：第 76 回レーザー加工学会講演論文集、レーザー加工学会、(2011) 107-112.
- 7) 新井、杓名、宮本：レーザー加工の基礎（下巻）、マシニスト出版、(1993).
- 8) W. O' Neil, M. Sparks, M. Vamham, R. Horley, M. Birch, S. Woods and A. Harker: Proc. of the 23rd Int. Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO) 2004, San Francisco, LIA, Fiber & Disc Laser Session, 1-7 (CD).
- 9) F. Bachmann: 第 61 回レーザー加工学会論文集、61 (2004) 16-29.
- 10) C. Emmelman and S. Lunding: Proc. ICLEO 2001, LIA, Section D, (2002) 1-10. (CD)
- 11) P. Losson: 'Data from Fraunhofer Institut für Lasertechnik' (片山 修正版)
- 12) Laserline カタログ
- 13) 佐野：LMP シンポジウム 2011「レーザー加工技術の欧州および国内の最新動向」、(株)日本溶接協会レーザー加工技術研究委員会、(2011) 139-147.
- 14) 坪田、鴨、太田、石出、中村、上田、鬼塚、赤羽：第 70 回レーザー加工学会講演論文集、70 (2008) 149-153.
- 15) トルンプ株式会社 Web (<http://www.jp.trumpf.com/>)
- 16) IPG フォトニクス Web (<http://japanese.ipgphotonics.com/>)
- 17) 片山：講義（2002～2011 利用）用 OHP の一部
- 18) 佐野、廣瀬：第 76 回レーザー加工学会講演論文集、76 (2011) 51-54.
- 19) 塚本、篠永、堀口、吉田、藤田、阿部：高温学会誌、37-6 (2011) 311-315.
- 20) 三瓶：レーザー加工学会誌、16-1 (2009) 8-15.
- 21) 辻：LMP シンポジウム 2007「輸送機器のレーザー加工」、(株)日本溶接協会 LMP 研究委員会、(2007) 103-131.
- 22) 吉川、樽井、森、長谷川：LMP シンポジウム 2007「輸送機器のレーザー加工」、(株)日本溶接協会 LMP 研究委員会、(2007) 3-10.
- 23) S. Katayama, S. Oiwa, N. Matsumoto, M. Mizutani and Y. Kawahito: Proc. of the Fifth Int. WTL-Conference on Lasers in Manufacturing 2009, Munchen, (2009) 829-835.
- 24) X. Zhang, E. Ashida, S. Katayama and M. Mizutani: 溶接学会論文

- 集、27-2 (2009) 64s-68s.
- 25) X. Zhang, E. Ashida, and S. Tarasawa: Proc. of ICALEO 2010, LIA, (2010) 374-379.
- 26) Takeshi Tsukamoto¹, Hirotsugu Kawanaka¹, Yoshihisa Maeda: Proc. of ICALEO 2011, LIA, (2011) 141-146.
- 27) S. Katayama, Y. Abe, M. Mizutani, and Y. Kawahito: Physics Procedia, 12, Part 1(2011) 75-80.
- 28) X. Zhang, E. Ashida, S. Katayama and M. Mizutani: Proc. of ICALEO 2008, LIA, (2008) 374-379.
- 29) D. Petring: 第 70 回レーザ加工学会講演論文集、(2008) 7-12.
- 30) 大西輝政、川人洋介、水谷正海、片山聖二：溶接学会論文集、29-1 (2011) 41-47.
- 31) M. Litmeyer and H. Lembeck: 第 70 回レーザ加工学会講演論文集、(2008) 139-143.
- 32) 古賀：LMP シンポジウム 2010 「レーザおよびレーザ加工の基礎と応用」、日本溶接協会レーザ加工技術研究委員会、大阪、(2010)、81-87.
- 33) 王、西村、片山：溶接技術、57-5 (2009) 90-94.
- 34) 中村：第 75 回レーザ加工学会講演論文集、レーザ加工学会、(2011) 39-43.
- 35) M. Wahba, M. Mizutani, Y. Kawahito and S. Katayama: Science and Technology of Welding and Joining, 15-7(2010) 559-566.
- 36) S. Katayama, R. Usui and A. Matsunawa: Proc. 5th Int. Conf. on TRENDS IN WELDING RESEARCH, Georgia, June (1998) 467-472.
- 37) S. Katayama, M. Mizutani and A. Matsunawa: IIW Doc. IV-814-02 (2002).
- 38) S. Katayama and M. Mizutani: Proc. ICALEO 2003, LIA, Section E, (1401) (2003). (CD)
- 39) S.-M. Joo, Y.-P. Kim, H.-S. Bang, S. Katayama and W.-S. Hwang: Key Engineering Materials (Advances in Nondestructive Evaluation, Part 3), 270-273 (2004) 2389-2394.
- 40) E. Schubert, I. Zerner and G. Sepold: Proc. ICALEO '98, Orlando, 85, (1998) Section G, 111-120.
- 41) F. Wagner, I. Zerner, M. Kreimeyer, T. Seefeld and G. Sepold: Proc. ICALEO 2001, (2001), Section C, 1301 (CD).
- 42) 杵名、ラソッド・マノーシュ：溶接学会論文集、21-2(2003) 282-294.
- 43) 杵名、山上、ラトウド、アザール：第 63 回レーザ加工学会講演論文集、(2005) 139-148.
- 44) 西本、藤井、片山：溶接学会論文集、22-4(2004) 572-579
- 45) 西本、安宅、藤井、片山：第 63 回レーザ加工学会講演論文集、63 (2005) 133-138.
- 46) 才田、西本：溶接技術、51 (2003,6) 92-98.
- 47) S. Katayama, M. Morita and A. Matsunawa: Proc. DIS, 02 (Designing of Interfacial Structures in Advanced Materials and Their Joints), Edited by M. Naka, Osaka, (2002) 747-750.
- 48) S. Katayama: EALA – European Automotive Laser Applications 2011, (2011) 121-144.
- 49) Y. Kawahito and S. Katayama: “Characteristics of LAMP Joining Structures for Several Materials” , Proc. of ICALEO 2010, (2010) 1469-1473.
- 50) M. Wahba, Y. Kawahito and S. Katayama: Journal of Materials Processing Technology 211, (2011), pp.1166-1174.
- 51) 日野、水戸岡：高エネルギービーム加工研究委員会資料、HEB-626-10, IIW-IV-159-10 (2010).
- 52) S. Katayama, K.-W. Jung and Y. Kawahito: Proc. of 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2010), LIA, (2010) 333-338.
- 53) F. O. Olsen: Proc. of 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2011), LIA, (2011) 6-15.
- 54) K. Loeffler, R. Brockmann and R. Kohlloeffel: Proc. of ICALEO 2011, LIA, (2011) 147-149.
- 55) A. Klotzbach¹, P. Vessio, U. Klotzbach¹ and J. Hauptmann: Proc. of ICALEO 2011, LIA, (2011), pp.511-515.
- 56) R. Weber, M. Hafner, A. Michalowski, P. Mucha and T. Graf: Proc. of ICALEO 2011, LIA, (2011) 523-528.
- 57) 杵名、井上：第 76 回レーザ加工学会講演論文集、76 (2011) 23-28.
- 58) 藤田、染川、尾崎、吉田、宮永：第 76 回レーザ加工学会講演論文集、76 (2011) 33-38.
- 59) 長澤：第 73 回レーザ加工学会講演論文集、73 (2010) 173-179.
- 60) 山本、羽阪、森田、大村：レーザ加工学会誌、15-4 (2008) 270-276.
- 61) 山本、羽阪、森田、大村：レーザ加工学会誌、15-4 (2008) 277-282.
- 62) M. Naeem: Proc. of ICALEO 2006, LIA, (2006) 148-156.
- 63) 茂呂：溶接学会高エネルギービーム加工研究会、資料 HEB-649-11.
- 64) 岩間：レーザ加工学会誌、15-2 (2008) 90-94.
- 65) 川田、木下：レーザ加工学会誌、16-2 (2009) 104-109.
- 66) 森 (日産自動車：私信)
- 67) 平嶋、梅林、田口、下山、神岡、丸谷、村田、平松：川崎重工技報、No.160 (2006) 50-53.
- 68) K. Mori and I. Miyamoto: J. of Laser Applications, **9** (2000) 155-159.
- 69) 森：第 52 回レーザ熱加工研究会論文集、(2001) 146-151.
- 70) R.E. Mueller, H. Gu, N. Ferguson, M. Ogmen and W.W. Duley: Proc. ICALEO '98, LIA, **85**-Section C (1998) 132-138
- 71) M. G. Muller, F. Dausinger and H. Hugel: Proc. ICALEO '98, LIA, **85**-Section C (1998) 122-131.
- 72) 渡辺、中林、平賀、井上、松縄：溶接学会論文集、**16-2** (1998) 169-180.
- 73) 渡辺、中林、平賀、井上、松縄：溶接学会論文集、**16-2** (1998) 181-188.
- 74) 渡辺、中林、平賀、井上、松縄：溶接学会論文集、**16-2** (1998) 189-198.
- 75) 金鍾道：大阪大学博士論文 (1997).
- 76) H. K. Tonshoff, A. Ostendorf, V. Kral and O. Hillers: Proc. ICALEO '99, LIA, **87**-Section E (1999) 109-118.
- 77) S. Katayama, M. Takayama, M. Mimutani, T. Tarui and K. Mori: IIW 2003, Bucharest, IIW Doc. IV-839-03, (2003) 1-10.

- 78) S. Katayama, N. Seto, J.D. Kim, A. Matsunawa: Proc. ICALEO, 97, LIA, **83**-Section G (1997) 83-92.
- 79) P. Abels, S. Kaierle, C. Kratzsch, R. Poprawe and W. Schulz: Proc. ICALEO '99, LIA, **87**-Section E (1999) 99-108.
- 80) J. Beersiek: Proc. ICALEO '99, LIA, **87**-Section D (1999) 49-58.
- 81) M. Dahmen, S. Kaierle, P. Abels, C. Kratzsche, E. W. Kreutz and R. Poprawe: Proc. ICALEO '99, LIA, **87**-Section D (1999) 29-38.
- 82) 中林、吉田：：溶接学会全国大会講演概要 - 第 68 集 -, (2001) 18-19.
- 83) P. Abels, S. Fujinaga, S. Kaierle, S. Katayama, et al.: Proc. of the 2nd Int. WLT Conf. on Lasers in Manufacturing 2003, Munchen, (2003) 339-343.
- 84) 青木、木村、野島、谷崎：第 52 回レーザ熱加工研究会論文集、(2001) 138-145.
- 85) 鳥井、芦田、J.-P. Boillot：LMP シンポジウム 2007「輸送機器のレーザ加工」、(社)日本溶接協会 LMP 研究委員会、(2007) 91-100.
- 86) Y. Kawahito, M. Kawasaki and S. Katayama: Proc. of 26th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2007), (2007) 52-57.
- 87) 大西、川人、片山：溶接学会全国大会講演概要、第 83 集 (2008-9) 232-233.
- 88) 川人、片山：レーザー研究、32-5 (2004) 357-363.
- 89) Y. Kawahito and S. Katayama: J. of Laser Applications, 17-1 (2005) 30-37.
- 90) 川人、片山：レーザ加工学会誌, 12-2 (2005) 101-105.