

## 高出力半導体レーザーによる材料加工の現状

阿部 信行

大阪大学 接合科学研究所超高エネルギー密度熱源センター (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)

### Trend of Direct Materials Processing with High Power Diode Lasers

Nobuyuki ABE

Research Center for Ultra High Energy Density Heat Sources,  
Joining and Welding Research Institute, Osaka University  
11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

(Received January 22, 2003)

Recently, diode lasers with high power and high power density have been developing and many researches have been reported in many application fields of materials processing. In this report, beam characteristics of high power diode lasers and the trend of materials processing with high power diode lasers are discussed.

**Key Words:** High power diode laser, Materials processing, Welding, Cradding, Surface modification, Forming

#### 1. はじめに

半導体レーザーは、1960年のルビーレーザー発振から2年後の1962年には早くも最初の発振に成功していたが、実用化されるのは遅く、1970年に常温で発振する素子が開発され、1980年代になり通信情報用として広く実用として用いられるようになった。しかしながら半導体レーザーは、40%以上という高い変換効率をもち、極めて小型・軽量であるという特徴をもつものの、出力や輝度が低いという欠点のため、材料加工用としては不向きとされてきた。

一方、CO<sub>2</sub>レーザーとNd:YAGレーザーは、ともに大出力化が可能であるため、実用的な熱加工用レーザーとして研究開発が進められ、現在ではそれぞれ50 kW、10 kWの出力をもち、材料加工用に実用化されるに至った。しかしながら、レーザー媒質を他のエネルギー源で励起するという本質的なメカニズムにおいて、電気エネルギーから光エネルギーへの変換効率が極めて低く、レーザーの大出力化に伴い装置が大型化することや、Nd:YAGレーザーで数%からCO<sub>2</sub>レーザーで10数%というきわめて低いエネルギー変換効率が、フォトンコストの面のみならず省エネや環境の面からも問題となっており、変換効率の高い半導体レーザーの大出力化が望まれていた。

1991年頃よりイギリス、ドイツ、アメリカ等において、比較的出力を必要としないはんだ付けや切断、穿孔、溶接、マーキングなどの分野に半導体レーザーを適用しようとする研究が行なわれ始めた。しかし半導体素

子がまだ高価なことや輝度・出力ともに低いことのために、多くの素子を集合させてもエネルギー密度を十分に上げることができなかったため、本格的な金属材料の加工には至らなかった。1993年に、それまでの半導体レーザーが、ファイバーに入射させた小出力半導体素子の出力をファイバーを束ねることで増加させようとしたのに対し、十数個の素子を一次元に並べたダイオード・バーを、さらに二次元に積み重ねて50 Wのダイオードスタックが完成され、これを集光させることで金属材料の溶接や切断への応用の道が開かれた<sup>1)</sup>。1996年には出力60 Wの半導体レーザーとコア径600 μmの光ファイバーおよび3軸CNCテーブルを用いて花崗岩や大理石のマーキングや彫刻、セラミックタイルのマーキング、ガラスの切断やマーキング、木材のマーキングや彫刻、塗料の剥離、金属ワイヤの溶接などへの挑戦が行われたが、まだ60 W、3 kW/cm<sup>2</sup>という低い出力とパワー密度のために、金属の溶接や切断等の本格的な熱加工はできなかった<sup>2)</sup>。

1996年頃から100 μm幅の素子当り1 Wを越すような高輝度の半導体素子の開発と、その素子を多数並べたダイオードバーや、それを更に積み重ねたダイオードスタックの集積や冷却、集光などの技術開発が飛躍的に進み始め、半導体レーザーを材料加工へ適用できる期待が増加し、1998年にはついにキロワット台のダイオードスタックが現れ、大出力半導体レーザーの時代が始まった。

Fig. 1は、レーザー材料加工における最大の国際会議であるICALEO (International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics)における半導体レーザー関連の研究

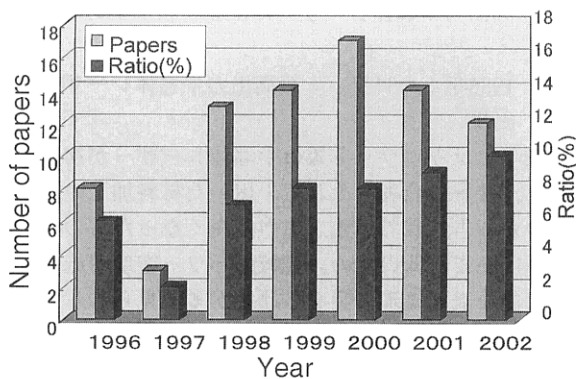


Fig. 1 Papers in ICALEO concerned with diode laser applications.

発表件数の推移を示している。1998年を境に全発表件数のうち1割近くを半導体レーザー関連の研究が占めるようになってきていることがわかる。

本報告では、高出力半導体レーザーのビーム特性とそれを活かす材料加工について考察するとともに、高出力半導体レーザーによる材料加工研究の現状について、1988年以降のICALEOでの発表を紹介する。

## 2. 高出力半導体レーザーの加工特性

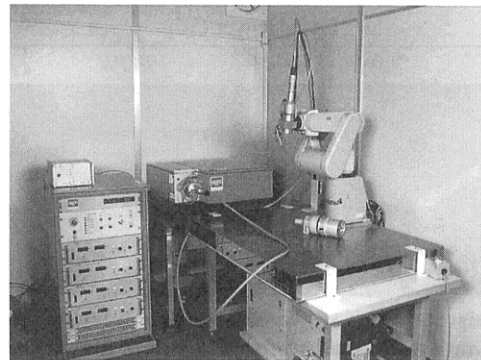
大阪大学接合科学研究所超高エネルギー密度熱源センターでは、半導体レーザーを次世代の材料加工用レーザーとして位置付け、第1段階として10 W級半導体レーザーシステムによる半導体レーザーのビーム特性と材料加工の可能性の検討<sup>3)</sup>、第2段階として高出力化のためのビーム合成方式の開発とそれを用いた50 W級半導体レーザーシステムの開発と加工特性の検討<sup>4)</sup>を行ってきた。

第1、第2段階で、出力・エネルギー密度の低さにもかかわらず、半導体レーザーによる鋼板の溶接が可能であることが明らかとなり、またビーム合成によって高出力化が可能であることも確認された。そこで第3段階として、2 kW級高出力・高エネルギー密度半導体レーザー材料加工システムの開発を行った<sup>5)</sup>。

波長807 nmと940 nmの出力1 kWのスタックをそれぞれ2本ずつ4本用い、第2段階の50 W級半導体レーザーと同様のビーム合成方式で、各スタックから出力されたレーザーを同一光軸上に重なるようにミラーで合成させ一本のビームにした後、光ファイバーにより伝送し、加工ロボットに取り付けたフォーカシングヘッドで集光した。Fig. 2に2 kW級半導体レーザーシステムの外観写真を示す。

UFF100ビームプロファイラを用いて測定したビーム形状の対物距離特性をFig. 3に示す。対物距離50.1 mmにおいて最もビームが絞られており、出力2 kWで1/e<sup>2</sup>におけるビーム径966 μm、パワー密度235 kW/cm<sup>2</sup>が達成された。

焦点位置で3 mm厚の軟鋼板SS400にレーザーを照射しビードオン溶接を行い、2 kW級半導体レーザーシステムの溶接現象を観察した結果、従来の加工用レーザーに比べ、エネルギー密度が比較的低いにもかかわらず、出力



<b>Diode laser head</b>	<b>Power supply unit</b>
Wave length: 807 and 940nm	Output: 50V, 70A × 4
Size: 520 × 700 × 220mm	Size: 553 × 600 × 970mm
Weight: 90kg	Weight: 160kg
<b>Water cooling unit</b>	<b>Focusing unit</b>
Size: 560 × 730 × 1650mm	Focusing distance: 50mm
Weight: 100kg	Weight: 0.98, 2kg

Fig. 2 2 kW diode laser materials processing system.

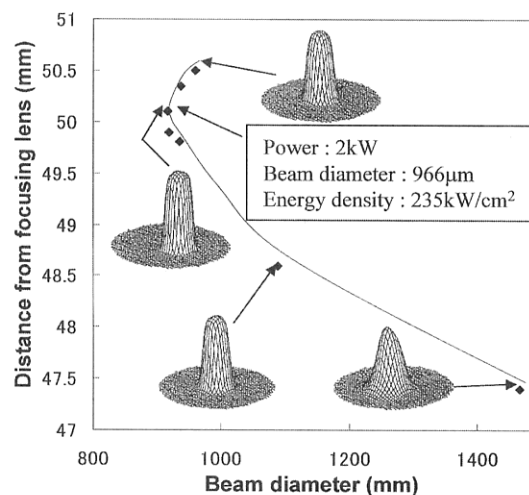


Fig. 3 Beam profile of 2 kW diode laser system.

が900 Wを超えるとFig. 4に示すような激しいレーザープラズマの発生が観測された。これはビームプロファイル形状が通常のガウシアン分布ではなくトップハット型をしているためと考えられる。焦点距離が短いため、このレーザープラズマにより保護ガラスが損傷を起こすため、大出力CO<sub>2</sub>レーザーと同様のアシストガスノズルシステムを採用し、レーザープラズマの抑制を行い、70 l/minという大量のアシストガスを流すことで、レーザープラズマを除去することができた。

厚板に対する溶接特性を検討するために、板厚5 mmのステンレス鋼SUS304に対し、溶接速度0.24 m/minで突合せ貫通溶接を行なった結果をFig. 5に示す。ビード形状は平行で欠陥もなく、極めて良好なビードが得られていることがわかる。また、板厚1 mmの軟鋼SS400に対して薄板高速溶接を行ったところ4 m/minの速度で貫通溶接を行なうことができた。Fig. 6には板厚1 mmから5 mmのSUS304で溶接を行なったときの溶接速度と溶込み深さの関係を示した。また同時にCO<sub>2</sub>レーザーとNd:YAGレーザーの溶込み深さも示した。5 kWのCO<sub>2</sub>レーザーで溶接した場合、約

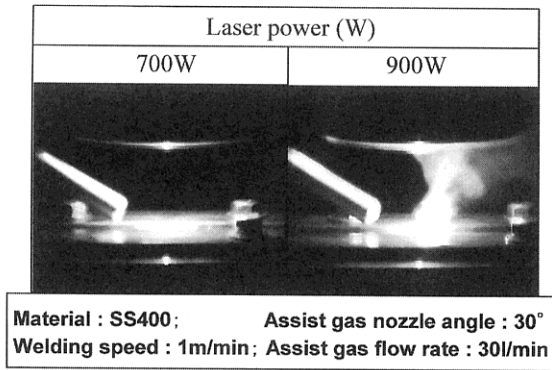


Fig. 4 Laser plasma generated in diode laser welding.

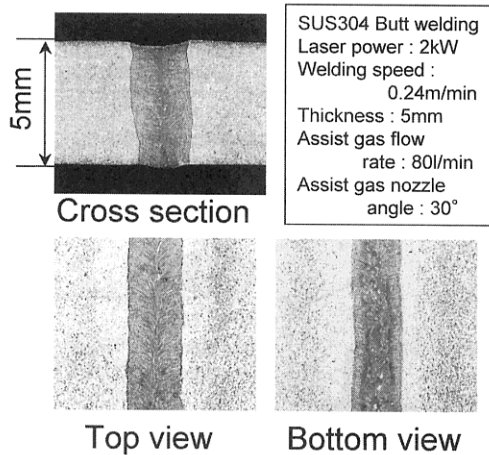


Fig. 5 Butt welding of 5 mm thick steel plates with diode laser.

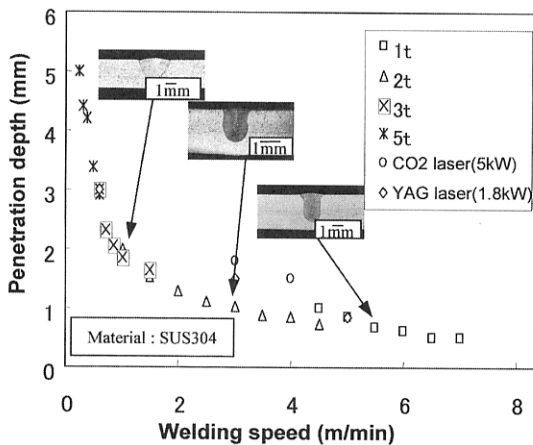


Fig. 6 Welding characteristics of 2 kW diode laser system.

1.5倍の溶込みが得られているが2 kWに換算すると同程度の溶接特性と考えられる。また、1.8 kWのNd:YAGレーザーとも同等の溶込み深さが得られており、材料加工に不向きとされてきた半導体レーザーにおいても、出力2 kWでエネルギー密度235 kW/cm<sup>2</sup>を達成することで、他の加工用レーザーと同程度の溶接を行なうことが可能であることがわかった。

### 3. 高出力半導体レーザーによる材料加工の現状

#### 3.1 1988年：キロワット級高出力半導体レーザーの出現

1988年にはキロワット級の半導体レーザーが初めて発表され、装置の発表やそれらを用いた材料加工の試みがいくつか報告されている。出力は高くなったものの、パワー密度がまだ低いため、比較的パワー密度が低くても適用可能な表面処理に関する研究が多く見られる。例えば、波長940 nm、出力1.4 kWのダイオードスタックと5軸のロボットを組み合わせてビーム径を1.8 mm×3.8 mmまで収束し、鋼材やアルミ合金の基板上にCo, Ni, アルミナなどのレーザークラディングを行い、5 mm幅で厚さ0.2~1.5 mmのCo基合金やカーバイド強化Ni合金皮膜が0.5 kg/hの速度で形成されている<sup>6)</sup>。彼らは波長による吸収率の差により、半導体レーザーの1.4 kWはCO<sub>2</sub>レーザーの3.9 kWに相当(2.5倍)すると報告している。また出力2.4 kWの半導体レーザーを用いて中炭素鋼に対する表面硬化を行い、2 kWのNd:YAGレーザーと比較した例や<sup>7)</sup>、波長940 nm、出力1.5 kWの半導体レーザーと6軸ロボットを組み合わせ、焦点距離150 mm(作動距離45 mm)でアルミニウム合金の再溶融、鋼材の表面硬化、溶接等を行った例があるが、集光面積が1.5 mm×3.5 mmでパワー密度が28 kW/cm<sup>2</sup>とまだ低いため、深溶込み溶接は不可能であった<sup>8)</sup>。波長820 nm、出力15 Wの半導体レーザーの出力を400 μmの光ファイバーで伝送し(先端出力6.5 W)、アモルファス鉄基合金リボンのアニーリングやスクライビングを行った例<sup>9)</sup>、波長808 nm、出力700 Wのスタックを2台合成させた、出力1.4 kW、焦点距離50 mmおよび100 mmの集光系をもつ半導体レーザーを用いた、ろう材によるアルミニウムと鋼材の異材接合も報告されている<sup>10)</sup>。彼らは半導体レーザーに対するアルミニウムの吸収ピークがNd:YAGレーザーより大きいために利点があると報告しており、同程度の出力の半導体レーザーとNd:YAGレーザーとのコスト試算も行っている。溶接では出力500 Wの半導体レーザーで150 μm厚のステンレス鋼を6 m/minで溶接したり、出力2 kWの半導体レーザーで0.8 mm厚のアルミニウムの1.1 m/minでの突合せ溶接が行われているが、いずれも熱伝導溶融でありレーザー溶接特有の深溶込み溶接には至っていない<sup>11)</sup>。近赤外での吸収率の高さを利用して40 W程度の低出力の半導体レーザーを用いたプラスチックの接合も試みられている<sup>12)</sup>。

#### 3.2 1999年：さまざまな材料加工の試み

1999年には半導体レーザーの特集が行われ、材料加工も含めた長距離センシングや長距離通信のためのアメリカの半導体レーザー開発プロジェクトHPSLTの紹介<sup>13)</sup>やドイツの半導体レーザー開発の報告<sup>14)</sup>がなされた。研究では、1.5 kWの装置を用いた表面硬化<sup>15)</sup>、Nd:YAGレーザーとの表面硬化の比較<sup>16)</sup>、3 kWの装置を用いた各種材料の溶接や表面処理<sup>17)</sup>などが報告された。またNd:YAGレーザーよりも波長が短いため吸収率が高いことを利用した808 nm、100 Wのレーザーによるろう付けの研究<sup>18)</sup>

や、10 Wのレーザーに赤外線センサーによるフィードバックシステムや波形制御システムを付加した電気部品のろう付け<sup>19)</sup>などが報告された。さらに半導体レーザーの特徴を活かした新しい応用を目指す研究も現れてきた。たとえば100 W以下の出力で適用可能なプラスチックの接着<sup>20,21)</sup>、120 Wの半導体レーザーによる熱電対の溶接<sup>22)</sup>、2.5 kWの装置を用いたコンクリートの耐食性の改善<sup>23)</sup>、1.4 kWの手持ちの溶接トーチの開発<sup>24)</sup>など、高出力や短波長、装置の小型性・操作性あるいは低運転コストを意識した応用が目立ってきた。

### 3.3 2000年：実用化への始動

2000年になると、半導体レーザーを複合させる試みが現れ、1.3 kWの半導体レーザーと30 kWのプラズマ溶射ガンを複合させたレーザークラディングシステム<sup>25)</sup>や3 kWのNd:YAGレーザーと3 kWの半導体レーザーとを複合させてビーム強度分布の制御とビーム特性の改善を試みたシステム<sup>26)</sup>が報告された。表面処理では60 W、120 W、2.5 kWの半導体レーザーを用いてコンクリート表面のペンキ剥ぎを行い、CO<sub>2</sub>レーザーやNd:YAGレーザーと比較した研究<sup>27)</sup>、表面処理によるぬれ性の向上<sup>28)</sup>や溶融シリカやソーダガラスへのSnO<sub>2</sub>の皮膜形成<sup>29)</sup>など、新しい展開が見られた。半導体レーザーによるレーザーフォーミングの試みもなされた<sup>30)</sup>。プラスチックの接合も多く見られ、1.2 kW、940 nmの赤外領域の半導体レーザーを5 mm×0.3 mmのスポットサイズで3.2 mm厚のナイロンに照射して接合したり<sup>31)</sup>、新方式のスタッキングやそれによるプラスチックの接着<sup>32,33)</sup>が報告された。合成光学系を用いない4スタック並列複合方式による4 kWのダイレクト半導体レーザー<sup>34)</sup>による溶接、表面処理、クラディングなどが行われ、3.6 kWの出力において1 mm厚のアルミニウムを6 mm/minで溶接するなど材料加工の分野において実用化に向けた本格的な動きが現れ始めた。

### 3.4 2001年：表面処理、溶接への系統的報告

2001年になると、これまでの試行研究から、表面処理や溶接に関する系統的報告が見られるようになった。表面処理では、1 kW、25 kW/cm<sup>2</sup>の半導体レーザーを用いた表面溶融レーザーピーニング処理が行われ、SUS316Lの耐食性が向上したと報告されている<sup>35)</sup>。また、6軸ロボット搭載の6 kW高出力半導体レーザーの22 mm×5 mmのビームを用いて、400 mm/minの速度で軟鋼上へのインコネル625粉末のレーザークラディングが試みられ、HVOF溶射やPTA溶着と比較してレーザー溶射はバルクと同等性能が得られ、溶射や溶着より優秀であると報告されている<sup>36)</sup>。さらに、複雑形状の材料に対応するため、2台の半導体レーザーとパイロメータを同時使用して温度制御することで、スピンドルヘッドやガイドレールにレーザービーム表面硬化が行われた<sup>37)</sup>。セラミックス加工では、120 Wの半導体レーザーを用いたエポキシセメントの除去加工技術の特性と可能性の検討が行われ、酸素ガス中でしきい値300 W/cm<sup>2</sup>、最低反応時間0.5 s、最大除去率66 mm<sup>2</sup>/sが得られ、CO<sub>2</sub>レーザー、YAGレーザーとの比較が

行われたり<sup>38)</sup>、出力60 W、波長810 nmの半導体レーザーを、600 μmの光ファイバーで4 m導光し、セラミックタイルのセメントシーリングプロセスが開発され、破碎セラミックスタイルを安価なバルク基材やガラス質エナメルに非通気性被覆することが検討され、レーザー出力45 W、ビーム径1.75 mm、パワー密度750 W/cm<sup>2</sup>で600 mm/minの速度まで有効であると報告されている<sup>39)</sup>。

溶接では、波長合成により出力500 Wとしたビームを0.06 mm×1.2 mm(FWHM)で集光させたコンパクト・高輝度半導体レーザーシステムが開発され、パワー密度600 kW/cm<sup>2</sup>でAL5052やSS304薄板を溶接したことが報告された<sup>40)</sup>。また、出力2.5 kW、ビームサイズ1.2 mm×1.2 mm、パワー密度1.7 kW/mm<sup>2</sup>から出力0.5 kW、ビームサイズ2.3 mm×4 mm、パワー密度54 W/cm<sup>2</sup>までの種々の出力とパワー密度を持つ半導体レーザーを用いて、レーザー溶接、熱処理、アニーリングが行われ、さらに半導体レーザー・TIGアーク複合溶接や半導体レーザー2台同時溶接も試みられた<sup>41)</sup>。出力3 kW、パワー密度200 kW/cm<sup>2</sup>の半導体レーザーを用いた熱伝導溶融溶接が軟鋼、ステンレス鋼、アルミニウム、マグネシウムに対して行われ、6 mmまでの溶込みが得られ、熱伝導シミュレーションプログラムとの比較がなされたり<sup>42)</sup>、出力2.2 kW、ビーム径1 mmのビームを用いて、0.77 mm厚低炭素鋼の重ね溶接が溶接速度10-50 mm/sで試みられ、溶接部組織や引張り強度等が報告された<sup>43)</sup>。はんだ付けでは、出力30 W、波長980 nm、ビーム径800 μmの半導体レーザーを用いた鉛フリーはんだ付けが検討され、半導体直接およびファイバー導光での鉛入りと鉛フリーはんだの比較検討がなされた<sup>44)</sup>。

その他、出力2 kWの半導体レーザーを用いた5 mmおよび10 mmの厚鋼板の曲げ加工<sup>45)</sup>や出力10 W、ビーム径1 mmの半導体レーザーを用いた0.1 mm厚のステンレス薄板のレーザーフォーミングにおける走査速度や前加工の影響についての報告がなされた<sup>46)</sup>。プラスチック接合については、22 Wの半導体レーザーを用いたポリプロピレンに対するサーモダイナミックプロセスシミュレーションが行われ、線入熱(レーザー出力、ビーム形状、強度分布、反応時間)、材料物性定数、ギャップ等について検討がなされ<sup>47)</sup>、出力20 W、ビーム径1 mm、波長810 nmの半導体レーザーを用いて、3 mm厚ポリプロピレンの透過接着について、カーボンブラックの添加率を変化させた検討がなされた<sup>48)</sup>。

### 3.5 2002年：金属溶接、プラスチック接合への系統的報告

2002年になると、高出力では金属溶接への、低出力ではプラスチック接合への系統的報告が見られてきた。溶接では、出力1.5 kW(照射点で925 W)、波長940 nm、パワー密度16 kW/cm<sup>2</sup>、ビームサイズ1.6 mm×3.6 mmの半導体レーザービームの長軸を溶接方向に向けて溶接を行い、6.4 mm厚のAISI1045鋼の突合せ溶接を、溶接速度2.5 mm/sで行い、ファイラー添加やプレ・ポスト加熱なしでクラックのない溶接部が得られたことが報告された<sup>49)</sup>。さ

らに出力4 kW, パワー密度20 kW/cm<sup>2</sup>, ビームサイズ2 mm × 10 mmの半導体レーザービームを同様に長軸を溶接方向に向けてアルミニウム合金の溶接を行い, ビードオン溶接で7 m/min, 重ね隅肉溶接で2 m/minの溶接速度で溶接した例が報告された<sup>50)</sup>. また, 出力3 kWの半導体レーザー直接ビーム溶接において, シールドガスとしてAr/CO<sub>2</sub>混合ガスの効果が検討され, マランゴニ対流効果で溶融池が小さくなり溶込みが大きくなることが報告された<sup>51)</sup>.

プラスチックの接合では, 従来法では一方が透明, 他方はレーザーに対して不透明である必要があったのに対し, 光学的に透明なサーモプラスチック同士との接合が可能なクリアウェルドと呼ばれる方法が開発され, 出力150 W, 波長940 nm, ビームサイズ2 mm × 2 mm, の半導体レーザービームを用い, 作動距離138-189 mmで各種サーモプラスチックの接合が検討された<sup>52)</sup>. また, 出力20 W, パワー密度25 W/cm<sup>2</sup>, ビーム径10 mm, 波長808, 977, 949 nmの半導体レーザーを用い, クリアウェルドに使用される赤外線吸収インクの波長依存性が透明アクリルの接合に及ぼす影響について検討がなされた<sup>53)</sup>. さらに, 出力150 Wの半導体レーザーを用いて, サーマプラスチックゴムと30%ガラスファイバー強化ポリプロピレンの接着について, 出力, 走査速度, スポット径, 拘束圧力の影響に関する検討も報告された<sup>54)</sup>.

クラディングに関する報告は相変わらず活発で, 同軸ノズル式の6 kW半導体レーザー溶射システムが開発され, レーザー溶射はTIGやPTAに比べると成膜速度が100 g/min以下と低効率であるが, CO<sub>2</sub>レーザーやYAGレーザーに比べて大径のビームが得られることがメリットで, 20 mm幅で1.5 mm厚のステライト(42CrMo4)クラッド層が低希釈率で得られたことや<sup>55)</sup>, 出力6 kW, ビームサイズ6 mmのCO<sub>2</sub>レーザー同軸クラディングシステムと出力6 kW, ビームサイズ22 mm × 5 mmの半導体レーザー軸はずしクラディングシステムとを比較し, Fe52ロッド上へのステライト21粉末による硬化層成膜に対して, 基板への熱負荷は半導体レーザーの方が高いものの, 熱影響部は2倍深く, 3.6-5倍高速のクラディングが可能であることが報告された<sup>56)</sup>. 出力4 kW, 波長808 nmの半導体レーザーを6軸ロボットに搭載したシステムによる4140鋼の表面硬化, 炭素鋼上へのステライトのクラディングも報告された<sup>57)</sup>. さらに, 出力3 kWの半導体レーザーによるクラディングについて, 光ファイバー導光の方が結果は良いが, 直接照射に比べるとロスが大きく, 同軸パウダーフィーダーを用いることで, ポロシティやクラックのない高濃度WC/Ni基コーティングができ, CO<sub>2</sub>レーザーシステムより3倍高効率であること, 石油分野の掘削ドリルへの適用等が報告された<sup>58)</sup>.

その他では, 出力3 kW, 波長940, 808 nm, ビームサイズ10 mm × 5 mmの半導体レーザーによる表面硬化の際の吸収率について検討があった. 表面温度が吸収率に影響を及ぼし, 高いほど吸収率が大きくなること, アルミナプラストは吸収率を増加させるが, グラファイトコーティングはレーザー出力が一定なら反応時間に影響しないこと, 不活性シールドガスは酸化膜の形成を押えるの

で吸収効果を減少させることなどが報告された<sup>59)</sup>. また, 出力120 W, 波長810 nm, ビーム径2 mmの半導体レーザーによるタイルセメント除去について, タイルへのダメージ, ほこり, 騒音対策に効果的であることや, 反射防止のカーボンコーティングは多重照射による温度上昇に効果的で, デブリスが微細化されること, 水フィルムは水の加熱反応による過激反応のため割れや隙間が発生することなどが報告された<sup>60)</sup>. フォーミングについては, 出力1.2 kW, 波長940 nm, ビームサイズ4 mm × 4 mmの高出力半導体レーザーと, 出力1 kW, 波長10.6 μm, ビーム径4.5 mmのCO<sub>2</sub>レーザーの, 薄鋼板のフォーミングに対する比較がなされ, 照射回数とレーザー出力の増加および照射速度の減少に伴い曲がり角が増加すること, 曲がり角は照射回数に比例し, 照射回数が増えるとバンドエッジに沿った板厚の増加のため曲がり角が小さくなること, 半導体レーザーの波長の鋼板に対する大きな吸収係数のため大きな曲がり角が得られ, 半導体レーザーのほうが効率的に優れていることなどが報告された<sup>61)</sup>. さらに, 出力20 W, 波長807 nmの半導体レーザービームを0.6 mm径の光ファイバーで導光し, スポット径0.9-3 mm, 走査速度10-50 mm/sでSUS304, 鉄, 銅, モリブデン, ニッケル, アルミニウム等の各種金属薄膜のフォーミングを行った結果, 低熱伝導率材料の方が低熱拡散による温度上昇のため大きく曲がること等が報告された<sup>62)</sup>.

## 5. 半導体レーザー直接加工の新しい展開

半導体レーザーは, 変換効率は極めて高いもののビーム品質が低く, 高出力・高エネルギー密度にすることはできたが, まだ焦点距離を大きくすることが困難なのが現状である. 一方, 光ファイバーで導光を行わずに, 半導体レーザーのビームを直接照射することも行われている. Fig. 7は500 W級半導体レーザー直接ビームのプロファイルである. 焦点距離62.4 mmにおいて, ビームサイズ363 μm × 1800 μm, 平均パワー密度84.8 kW/cm<sup>2</sup>のきわめて細い楕円形ビームが得られている. さらにFig. 8は4 kW級半導体レーザー直接ビームのプロファイルで, 4 kWの高出力においても作動距離100 mmにおいてビームサイズ2 mm × 10 mm, 平均パワー密度20 kW/cm<sup>2</sup>のビームが得られている.

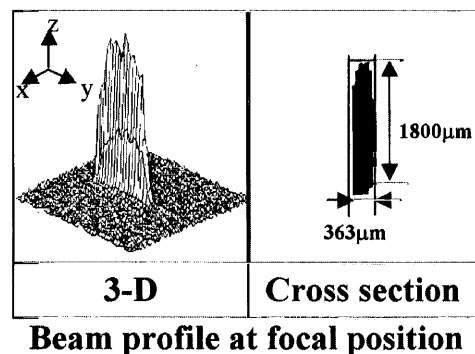


Fig. 7 Direct beam profile of 500 W diode laser.

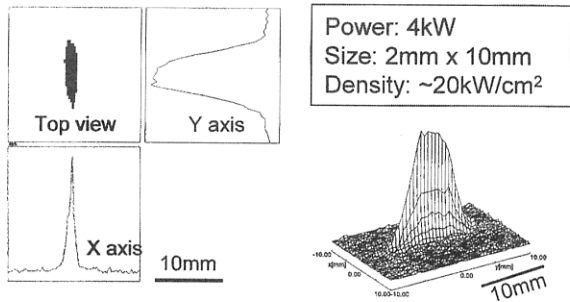


Fig. 8 Direct beam profile of 4 kW diode laser.

これらのビームプロファイルからわかるように、半導体レーザー直接ビームはパワー密度は光ファイバー導光に比べて低いものの、細長い楕円形をしており、長径方向に移動させれば溶接幅の狭い熱伝導溶接が、短径方向に移動させれば大面積の照射が可能となる。Fig. 9に示すように、半導体レーザーをアーク熱源およびCO<sub>2</sub>あるいはNd:YAGレーザーと比較したとき、現在の半導体レーザーの熱源特性は出力・効率ともに、従来のアーク熱源とレーザー熱源の中間に位置すると考えられる。すなわち、アーク熱源と比較したとき、効率は劣るがエネルギー密度ははるかに勝っており、一方従来のレーザーと比較したとき、効率は高いがエネルギー密度はまだ不十分で、しかも焦点距離が短い。これらのことを考えると、レーザー加工の中でさほど高エネルギー密度を必要としないもの、すなわち薄板の溶接、プラスチックの接合、ろう付け、フォーミング、焼き入れ、表面処理等の低エネルギー密度への応用が効果が高いと考えられる。以下にそのような応用例のうちで、超薄板の溶接、レーザーフォーミング、アルミニウム合金の溶接、微細クラディングについて紹介する。

Fig. 10に出力100 Wにおいて、溶接速度3 m/minで50 μm

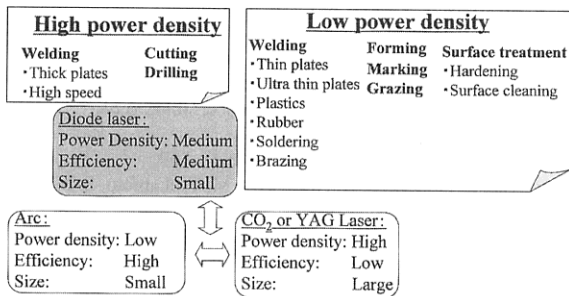


Fig. 9 Applications of diode laser materials processing.

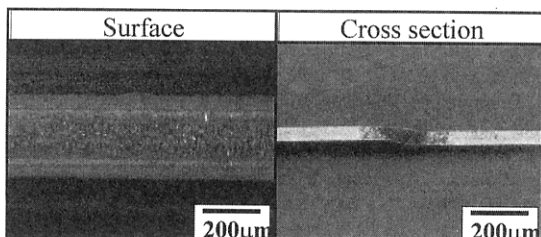


Fig. 10 Butt welding of ultra thin steel plates of 50 μm in thickness.

の厚さのSUS304に対して溶接を行った結果を示す。表面・断面ともにきれいなビードを得られていることがわかる。また出力100 Wではレーザープラズマの発生も見られなかった。薄板の溶接においてはレーザープラズマの発生が少ないため、焦点距離が短いという半導体レーザーの欠点が緩和されるため良いアプリケーションになると考えられる。

Fig. 11はレーザーフォーミングに適用した結果を示す。板厚5 mmのSUS304にレーザー出力1000 W、ビーム径3.2 mm、レーザー照射速度1.5 m/minで30回レーザー照射を行い、このサイクルを5 mm間隔で18回行なうことでU字型に大きく曲げることが出来た。さらに、ビーム形状を改善して入熱を均一にすることで、10 mm厚のSUS304でも図のように90度変形させることができる。レーザーフォーミングは焦点位置での加工ではないため作動距離が長くなること、非溶融の加工であるためレーザープラズマの影響を考えなくてもよいこと、波長が短いので材料に対する吸収が高いこと、出力の制御が容易で精密なことなど、半導体レーザーの最も良いアプリケーションのひとつになると考えられる。

Fig. 12にアルミニウム合金の突合せ溶接の例を示す。アルミニウムの吸収率は半導体レーザーの波長とマッチしているため非常に効率の良い溶接ができる。また熱伝導溶融溶接の領域で加工するため、スパッタもなく非常にきれいな溶接ビードとなるのも半導体レーザー直接ビ-

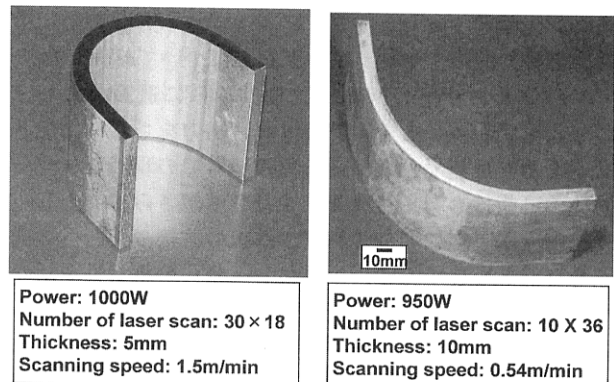


Fig. 11 Diode laser forming of thick steel plate.

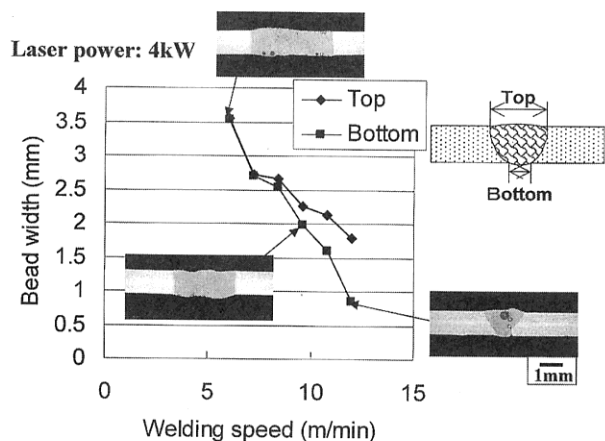


Fig. 12 Butt welding of 1mm thick aluminum alloy plates.



ムによる溶接の特徴である。

Fig. 13に500 W級半導体レーザー直接ビームを用いた微細クラディングの例を示す。軟鋼上にNi基自溶合金をクラディングしたもので、出力、パワー密度ともに低いため、金属蒸気やスパッタも見られず、静かな溶融現象となっている。クラッド幅はビームの長軸幅と同じ1.8 mmで、材料粉末の撒布量が多くなるにつれて、厚さが増加し、アスペクト比が大きくなってゆくことがわかる。

## 6. おわりに

発振成功は早かったものの、出力や輝度の低さから材料加工には不向きとされてきた半導体レーザーが、近年の半導体素子の改良や集合化技術の開発により大出力化が可能になり、現在6 kWクラスのものまで出現し、2 kWシステムで焦点距離50 mmにおいてビーム径966  $\mu\text{m}$ 、パワー密度235  $\text{kW}/\text{cm}^2$ が達成された。このビームを用いると5 mm厚のSUS304を24 cm/minで貫通溶接することができ、従来の加工用レーザーと遜色のない溶接を行うことができることがわかった。応用分野も広がりを見せ、溶接、クラディング、表面硬化、表面除去加工、フォーミング等さまざまな試みがなされている。近年のレーザーの複合化とともに半導体レーザーと他の熱源との複合も試みられており、半導体レーザーの特徴を生かす新しい利用方法も色々と考案されている。本報告では、半導体レーザービームの特長をより活かした、超薄板溶接、レーザーフォーミング、アルミニウム合金の熱伝導溶融溶接、微細クラディングなどについて紹介した。

半導体レーザーの開発・改良はさらに進んでおり、ビーム形状が多少大きくてよければ出力をさらに増加させることも可能で、大型構造物の屋外での現場レーザー溶接の可能性も考えられる。また輝度がさらに向上しパワー密度がさらに増加すれば、厚板の溶接や切断への展開も可能となってくる。半導体レーザーの小型性を活かすことで、小出力の複数レーザーを並列に同時駆動することも可能であり、エネルギー密度がさほど必要とされない薄板の場合には高速度溶接が可能となる。さらに高輝度の半導体レーザーシステムの開発も進んでおり、微細加工への適用も夢ではなくなるであろう。高効率・小型・軽量の半導体レーザーは、省エネや可搬性のみでは

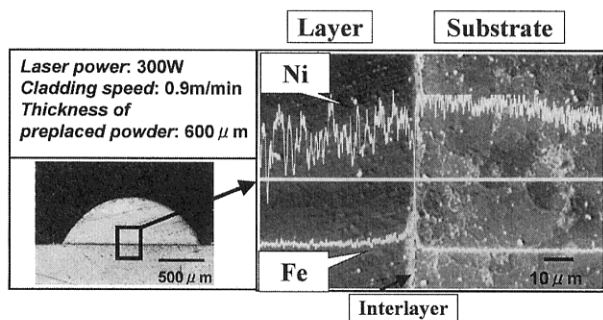


Fig. 13 Micro cladding with direct beam of 500 W diode laser.

なく、次世代高機能レーザーとして、新しい加工分野や新しい組立て方式への展開が期待される。

## 参考文献

- 1) M. S. Zediker and R. E. Juhala: McDonnell Douglas 社技術資料, (1993).
- 2) L. Li, J. Lawrence, and J. T. Spencer: *Proc. 15th Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, Detroit* (1996, Laser Institute of America) E38.
- 3) N. Abe and Y. Kunugita: *Trans. JWRI*, **26**(2) (1997) 89.
- 4) N. Abe, Y. Kunugita, and S. Miyake: *Proc. 17th Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, Orlando* (1998, Laser Institute of America), G95.
- 5) N. Abe, R. Higashino, M. Tsukamoto, S. Noguchi, and S. Miyake: *Proc. 18th Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, San Diego* (1999, Laser Institute of America) A236.
- 6) S. Nowotny, A. Richter, and E. Beyer: *Proc. 17th Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, Orlando* (1998, Laser Institute of America) G68.
- 7) B. Ehlers, H. J. Herfurth, and S. Heinemann: *ibid.*, G75.
- 8) P. Kugler, P. Hoffmann, and M. Geiger: *ibid.*, G85.
- 9) S. V. Ponnaluri and P. A. Molian: *ibid.*, G103.
- 10) E. Schubert, I. Zerner, and G. Sepold: *ibid.*, G111.
- 11) S. Bonss, B. Brenner, E. Beyer, and F. Bachmann: *ibid.*, G121.
- 12) D. Hänsch, D. Haaf, H. Pütz, H. G. Treusch, A. Gillner, and R. Poprawe: *ibid.*, G131.
- 13) W. P. Latham, W. T. Cooly, and G. J. Vansuch: *Proc. 18th Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, San Diego* (1999, Laser Institute of America) A1.
- 14) A. Gillner, P. Loosen, D. Petring, K. Wissenbach, and R. Poprawe: *ibid.*, A12.
- 15) B. Ehlers, H. J. Herfurth, and S. Heinemann: *ibid.*, A194.
- 16) C. Lampa, P. Vomacka, and G. Tegwall: *ibid.*, A198.
- 17) M. E. Marince, R. P. Martukanitz, J. M. Haake, and C. M. Cook: *ibid.*, A207.
- 18) M. Brandner, G. Seibold, C. Chang, F. Dausinger, and H. Hügel: *ibid.*, A217.
- 19) B. Ehlers and S. Heinemann: *ibid.*, A245.
- 20) A. Wetzig and S. Naegeler: *ibid.*, A227.
- 21) H. Herfurth, B. Ehlers, S. Heinemann, and D. Haensch: *ibid.*, B48.
- 22) D. Triantafyllidis, M. J. Schmidt, and L. Li: *ibid.*, B38.
- 23) J. Lawrence and L. Li: *ibid.*, A108.
- 24) E. Exner, J. Drechsel, V. Neumann, and S. Klötzer: *ibid.*, B28.
- 25) St. Nowotny, S. Scharek, R. Zieris, T. Naumann, and E. Bayer: *Proc. 19th Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, Dearborn* (2000, Laser Institute of America) A1.
- 26) G. Reinhart, J. Härtl, and C. Lehner: *ibid.*, A81.
- 27) L. Li, M. J. J. Schmidt, and J. T. Spencer: *ibid.*, A24.
- 28) J. Lawrence and L. Li: *ibid.*, A40.
- 29) J. Lawrence, P. Lubrani, and L. Li: *ibid.*, A69.
- 30) N. Abe, R. Higashino, N. Nakagawa, M. Tsukamoto, S. Miyake, S. Noguchi, and M. Hayashi: *ibid.*, A16.
- 31) I. R. Pashby, B. Bryden, and S. Barnes: *ibid.*, A34.
- 32) A. M. Ozkan, M. N. Rekow, A. P. Hault, M. Hmeler, and J. L. Nightingale: *ibid.*, A50.
- 33) A. P. Hault, A. M. Ozkan, and R. S. Ong: *ibid.*, A11.
- 34) C. M. Cook, J. M. Haake, M. S. Zediker, and M. D. Cryderman: *ibid.*, A59.
- 35) P. Peyre, C. Carboni, G. Beranger, C. Lemaitre, C. Séverac, L. Berthe, and R. Fabbro: *Proc. 20th Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, Jacksonville* (2001, Laser Institute of America) A102.
- 36) J. Tuominen, P. Vuoristo, T. Mäntylä, J. Latokartano, J. Vihinen, and P. H. Andersson: *ibid.*, D1005.
- 37) M. Seifert, S. Bonß, B. Brenner, and E. Bayer: *ibid.*, G1606.
- 38) K. Minami, J. Lawrence, L. Li, R. E. Edwards, and A. W. Gale: *ibid.*, G1604.
- 39) J. Lawrence, L. Li, R. E. Edwards, and A. W. Gale: *ibid.*, G1605.
- 40) G. Bonati, H.-G. Treusch, and S. Anikitchev: *ibid.*, F201.
- 41) S. Bonss, M. Seifert, K. Barthel, B. Brenner, and E. Beyer: *ibid.*, F409.

- 42) D. Petring, C. Benter, and R. Poprawe: *ibid.*, G1601.  
 43) C. A. Walsh, H. K. D. H. Bhadeshia, A. Lau, B. Matthias, R. Oesterlein, and J. Drechsel: *ibid.*, G1602.  
 44) A. P. Houlton, R. S. Ong, A. P. Malshe, and A. R. Dhamdhere: *ibid.*, F202.  
 45) N. Abe, N. Nakagawa, M. Tsukamoto, K. Nakacho, M. Sogabe, S. Miyake, and S. Noguchi: *ibid.*, D607.  
 46) T. Miyazaki, M. Saito, S. Yoshioka, T. Tokunaga, T. Misu, and R. Oba: *ibid.*, G1603.  
 47) U.-A. Russek: *ibid.*, P509.  
 48) S. Abed, P. Laurence, C. Carretero, and J. R. Deschamps: *ibid.*, P527.  
 49) A. Sánchez-Castillo, J. Pou, M. Rodríguez-Lage, F. Lusquiños, F. Quintero, R. Soto, M. outinguiza, and M. Pérez-Amor: *Proc. 21st Int. Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, Scottsdale (2002, Laser Institute of America)* P535.  
 50) N. Abe, A. Morikawa, K. Maeda, and K. Namba: *ibid.*, 504.  
 51) J. Berkmann, W. Danzer, and J. Härtl: *ibid.*, 509.  
 52) V. A. Kagan and N. M. Woosman: *ibid.*, 1404.  
 53) A. P. Houlton and M. Burrell: *ibid.*, 1403.  
 54) B. Baylis, Y. P. Huang, and D. Watt: *ibid.*, 1401.  
 55) P. Hayhurst, J. Tuominen, P. Vuoristo, and T. Mäntylä: *ibid.*, 1201.  
 56) J. Tuominen, J. Laurila, J. Vihinen, P. Vuoristo, T. Mäntylä, L. Olausson, and T. Peltola: *ibid.*, 1207.  
 57) M. S. Zediker and J. M. Haake: *ibid.*, 302.  
 58) A. Groth, C. Walz, and S. Naegeler: *ibid.*, P537.  
 59) H. Panster and V. Kujanpää: *ibid.*, 301.  
 60) K. Minami, J. Lawrence, L. Li, R. E. Edwards, and A. W. Gale: *ibid.*, 602.  
 61) J. Lawrence: *ibid.*, 705.  
 62) T. Miyazaki, T. Misu, S. Yoshioka, T. Tokunaga, and M. Saito: *ibid.*, 702.

---

### レーザーワード

---

#### レーザー・クラディング (laser cladding)

レーザーによる表面改質技術のひとつ。レーザー照射により皮膜材料を熔融させ基板上に堆積させることで、基板表面上に耐磨耗性あるいは耐腐食性の皮膜を形成させる。基板上に皮膜材料粉末を溶媒で塗布したり、直接

皮膜材料粉末を基板上へ散布しながらレーザー照射を行う。基板の熔融を抑えて皮膜への基板材料の希釈率を低くしたり、内部欠陥のない均一な厚さの皮膜を形成させることが必要とされている。  
 (阿部 信行)

---