高出力半導体レーザーによる微細接合技術に関する研究

A Study of Micro Welding with High Power Direct Diode Laser

舟 田 義 則^{*}・阿 部 信 行^{**}・塚 本 雅 裕^{**}・村 谷 外 博^{***}
Yoshinori FUNADA, Nobuyuki ABE, Masahiro TSUKAMOTO and Sotohiro MURATANI

Key Words: Direct Diode Laser, Micro Welding, Air Cooled, Fiber Coupled Laser Diode

1. 緒 言

電気電子産業や精密機械産業では、工業製品の多機能化や省力化に対応するため、使用部材の微細化や薄肉化が求められ、それに対応した超薄板の溶接技術の確立が望まれている。超薄板を溶接する場合、溶け落ちなどが生じやすく、溶接における入熱の量や領域を精密に制御する必要がある。これには、レーザー溶接が有効である。アーク溶接に比べて入熱範囲を狭くでき、その量を精密に制御できるからである。

レーザー溶接に広く利用されているレーザー発振器として Nd : YAG レーザがある¹⁾。レーザー光の波長が 1.06 μm と近赤外領域であり、その伝送に光ファイバを使用できることから、集光ヘッドを溶接部材に応じて自由に配置可能である。また、金属材料に対する吸収率が CO₂ レーザに比べて高く、溶接部を効率良く加熱できる特徴がある。しかしながら、電気-光変換効率が数%と低いため、レーザー光の発振に多量の電力を消費する。また、励起ランプなど消耗品も高価であることからランニングコストが高い。さらに、イニシャルコストが高く、維持管理が煩雑であるため、その利用は大企業や一部の中小企業に限られている。

これを解決する次世代レーザー装置の1つとして高出力半導体レーザーがある²⁾。レーザーダイオード(LD)のエミッタから発振されるレーザー光を直接利用するレーザー装置であるが、これまで、エミッタ1つ当たりのレーザー光出力は低く、そのままでは材料加工には使用できなかった。そこで、エミッタを横方向に数十個集積したLDアレイ技術や、さらにそれを複数個積載したLDスタック技術が開発され、最大数kWまでの高出力化が達成されている。その電気-光変換効率は最大で50%あり、Nd : YAG レーザより十倍以上高い。また、定期交換が必要な消耗品がなくメンテナ

ンスフリーで10,000時間以上使用することが可能である。半田付けや樹脂溶着³⁾、表面処理⁴⁾の分野では既に実用化されている。

高出力半導体レーザーでは、レーザー光の拡がり方(発散角)が方向によって異なり、レーザー光を微細な円に集光することは困難であるため精密加工に利用されることはほとんどなかった。しかしながら、拡がり方に異方性のあるレーザー光では、細長い楕円に集光することは比較的容易である。楕円に集光したレーザー光をその長径方向に走査すれば、幅方向への加熱を抑えながら溶接方向に高効率で加熱できると考えられる。これを利用すれば、高出力半導体レーザーの超薄板精密溶接への適用が期待できる^{5,6)}。

一方、高出力半導体レーザーにて安定した出力のレーザー光を得るためには、レーザー光発振時のLDアレイやスタックの温度上昇を防ぐための冷却が必要である。エミッタが高密度に集積されているため空冷は難しく、通常はマイクロ流路による水冷が行われている。しかしながら、水詰まりによるオーバーヒートを起こしやすく、故障の原因になっている⁷⁾。これに変わるものとして、エミッタ1つ当たりの出力が従来に比べて数倍高く、さらに、伝送用光ファイバが直接に接続されたファイバ結合LD素子が注目されている⁸⁾。ファイバレーザー用の励起光源として開発された素子であり、装置化した場合の冷却が比較容易であるため空冷化が期待できる。

以上のことから、著者らは、高出力半導体レーザーを利用した精密溶接技術の開発⁹⁾や、ファイバ結合LD素子を利用した半導体レーザー装置およびこれを搭載した加工機の開発を行っており、その内容を紹介する。

2. 高出力半導体レーザーによる精密溶接

Fig. 1 に波長が 808 nm のレーザー光を CW 発振する LD ス

* 石川県工業試験場 機械金属部 (〒920-8203 石川県金沢市鞍月 2-1)

Industrial Research Institute of Ishikawa, Machinery/Metal Department (2-1 Kuratsuki, Kanazawa, Ishikawa, 920-8203 Japan)

** 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)

*** 株式会社村谷機械製作所 (〒920-0209 石川県金沢市東蚊爪町 1-32)

Muratani machine Incorporated. (1-32, Higashi-kagatsume, Kanazawa, Ishikawa, 920-0209 Japan)

Fig. 1 high power direct diode laser

Fig. 2 Beam profile

タック型の高出力半導体レーザ装置を示す。最大で 500 W のレーザ光を照射可能でありながら、そのサイズは $\phi 65 \text{ mm} \times \text{L}300 \text{ mm}$ と小型である。Fig. 2 は焦点距離 50 mm の位置における集光形状をビームプロファイラで測定した結果であり、 $2 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ の楕円である。この装置を用いて厚さ 0.1 mm のステンレス鋼超薄板の突き合わせ溶接実験を行った結果を Fig. 3 に示す。このときの出力は 300 W であり、溶接速度は 200 mm/sec である。この場合のパワー密度は 48 kW/cm^2 と低いにも関わらず、楕円状に集光したレーザ光をその長径方向に走査することによって部材を歪ませることなく貫通溶接することができた。

この要因として、レーザ光の楕円状集光による溶接方向への入熱の高効率化が考えられる。そこで、厚さが 0.1 mm のステンレス鋼超薄板について溶接時の温度分布を熱伝導解析によって調べた。板材表面中央を長手方向にレーザ光が移動して溶接する場合、解析の対象となる部材は光軸を中心とした線対称であることから、その片側だけを計算す

Fig. 3 Appearance and cross section of a welded stainless steel sheet in thickness of 0.1mm.

Fig. 4 Results of thermal conductive analysis on temperature distributions during welding.

れば十分であり、解析には 1/2 モデルを用いた。Fig. 4 は溶接方向に直角な断面について、温度が融点 (1700 K) を超える領域を、集光形状が $2 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ の楕円状の場合と投影面積が同じで集光形状が $\phi 0.9 \text{ mm}$ の円の場合とで比較して示した結果である。レーザ光出力およびパワー密度は 300 W、 48 kW/cm^2 と同じ条件でありながら、集光形状が楕円である方が、より高速で貫通溶接が可能であり、また、溶け込み幅を狭くできる。集光形状を楕円とすることで、溶接方向に高効率に入熱でき、高速で溶け込み幅が狭い超薄板の精密溶接が可能であることが示された。

3. 高出力半導体レーザによる精密溶接機の開発

高出力半導体レーザによる精密溶接技術を実用化するため、全 6 軸からなる多軸位置決め装置と高出力半導体レーザを組み合わせた精密溶接機を製作した。Fig. 5 はその概観である。部材の X 軸、Y 軸、Z 軸方向への直線移動に加えて θ 軸の回転移動が可能である。これに、CW 発振で最大出力が 200 W、発振波長が 808 nm、50 mm 離れた焦点位置での集光形状が $2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ の楕円である LD スタック型高出力半導体レーザを搭載し、A 軸による傾斜と C 軸

Fig. 5 Appearance and schematic diagram of a fine welding apparatus equipped with a high power direct diode laser and a multi axis positioner.

(a) Laser diode

(b) High power diode laser

Fig. 8 Appearances of a fiber coupled laser diode and air cooled high power direct diode laser utilizing it.

Fig. 6 Half cut parts welded with a fine welding apparatus.

Fig. 7 Width of weld beads at each regions of half cut parts with and without controlling laser output power.

による回転を可能とした。さらに、位置決め装置と同期してレーザ光出力を変動させる機能を付与した。

同装置を用いて、Fig. 6 に示す半割部品を2つ重ねて全周溶接した。Fig. 7 は、溶接部品の各位置における溶け込み幅を測定し、展開表示した結果である。出力が一定の場合、溶け込み幅はジグ接触部で狭くなり、先端部分で広がる。また、「行き」に比べて「帰り」の方が溶け込み幅は広がる。熱拡散が各位置によって異なることがその原因と考えられる。そこで、熱拡散が大きい位置では出力を上げ、逆に熱拡散が小さい位置では出力を下げるような出力制御パターンを作成し、これを基に位置決めと同期して

レーザ光出力を変動させた。その結果、溶け込み幅のばらつきを0.6 mm から0.25 mm まで低減でき、出力制御が溶け込み幅の均一化に有効であることがわかった。以上のことから、適用がほとんどなかった精密溶接の分野にも高出力半導体レーザは十分使用可能であることが示された。

4. ファイバ結合LD素子を用いたレーザ装置の開発

LD スタック型の高出力半導体レーザはマイクロ流路に水を流すことで冷却しながら使用される。その冷却水管が様々な原因で水詰まりを発生し、LD 素子のオーバーヒートによる故障が問題視されている。そこで、LD スタック型に変わる空冷式の高出力半導体レーザの開発を行った。

Fig. 8(a) は、装置開発に利用したファイバ結合LD素子であり、1個当たり10 W 以上の出力が可能である。これを必要な数だけ搭載し、各々から発振されるレーザ光を集光して照射可能な専用の加工ヘッドを備えた高出力半導体レーザを開発した。同図(b) は発振波長が915 nm で最大出力が150 W の空冷式高出力半導体レーザである。この装置では、LD 素子を個別に冷却できるため、空冷化が容易である他、構造が簡便なため故障した場合も短時間で修理可能である。

また、専用の加工ヘッドには、LD 素子からのレーザ光を伝送する複数の光ファイバが束ねて組み込まれている。その組み込み方を変えることによって、光ファイバに対応する各集光点を自由に配置でき、焦点位置での集光形状を変更できる。Fig. 9 はその例であり、光ファイバを直線状に束ねた加工ヘッドを用意すれば、各光ファイバに対応する集光点は直線的に並べられ、集光形状は直線となる。また、各集光点を全て同一点上に重ねることが出来る加工ヘッドに交換すれば、レーザ光を点状に集光することが可能となる。また、各集光点の配置を、交換することなく1台で自由に調整可能な加工ヘッドを開発した。

溶接の際のレーザ加熱では、これまでレーザ光を一点に集光して利用することがほとんどであった。これに対して、部材形状や接合方法に応じて集光形状を自由に設定できるようになり、このことは溶接品質と生産性の向上に大きく貢

(a) Line pattern head

(b) Point pattern head

(c) Adjustable pattern head

Fig. 9 Several types of Laser head connected with an air cooled high power direct diode laser.

献できると考えられる。

5. レーザ接合専用機への応用

5.1 レーザ精密溶接機

Fig. 10 は、電子部品向けに専用に開発したレーザ精密溶接機である。これは、Fig. 11 に示すように内外径がそれぞれ $\phi 10\text{ mm}$ と $\phi 12\text{ mm}$ の円管部材を上下に積み重ね、その間に厚さ 0.1 mm の超薄板を挿入し、その部分を全周溶接するための装置である。最大出力 150 W の空冷式高出力半導体レーザを V 字に 2 台搭載し、合計 300 W のレーザ光出力で溶接が可能である。これに組み合わせたのは一点集光型の加工ヘッドであり、 90 mm 離れた焦点位置においてレーザ光を $\phi 0.25\text{ mm}$ まで集光可能である。溶接部材を機械内に供給すると、専用ジグにより位置合わせと把持が自動で行われる。そして、固定された溶接部材を一定速度で回転させながら側面方向からレーザ光を照射することで、

Fig. 10 A fine welding apparatus equipped with two air cooled high power direct diode laser.

Fig. 11 Schematic diagram of welded parts consisting of metallic pipes and a sheet in thickness of 0.1 mm .

溶接が行われる。

Fig. 12(a) は、合計出力が 220 W 、溶接速度が周速で 10 mm/sec の条件でステンレス鋼 (SUS304) 製の部材を溶接したときの外観である。溶接中は不活性ガス (アルゴンガス) でシールドしているため、溶接部は変色せず、高品位な溶接が実現できている。同図 (b) は、溶接部部材のカットサンプル全体像と溶接部断面を拡大観察したものである。溶け込みは表面より 0.3 mm 程度まで到達し、また、3 部材間を確実に接合できている。また、溶け込み内部には空隙や割れは見られず、健全な溶接が行われていることが確認できる。

実製品を半自動で溶接可能としながら、溶接機のサイズは $W 800\text{ mm} \times D 800\text{ mm} \times H 1800\text{ mm}$ とコンパクトである。この中には、レーザ用駆動電源など必要な機材は含まれており、従来の Nd:YAG レーザ溶接機と比較して大幅に小

Fig. 12 Appearance and cross section of welded parts with the fine welding apparatus.

型化されている。

5.2 マルチビーム式レーザーろう付機

微細な部材をろう付する場合、高周波による局部加熱であっても入熱範囲が広くなり過ぎ、周辺に及ぼす熱影響が許容できなくなる。そこで、Fig. 13 に示す小径ピン用に開発したマルチビーム式レーザーろう付機を開発した。これには、最大出力 60 W の空冷式高出力半導体レーザーを 4 台搭載し、それぞれに、Fig. 14 に示すように集光点を直線的に配置することによって集光形状を直線とする加工ヘッドを組み合わせた。ピン材を中心にこれらを等間隔で設置し、全加工ヘッドからレーザー光を同時に照射することによって $\phi 1.5$ mm 程度までの小径ピンを回転させることなく全周加熱することを可能にした。部材を回転させて行う従来のレーザーろう付と比べて、接合精度の向上や接合時間の短縮、加熱に必要なレーザー光出力の低減が期待できる。

Fig. 15 は、マルチビーム式レーザーろう付機を用いて $\phi 1.5$ mm の超硬ピンとステンレス鋼ピンの異材ろう付を行った結果である。厚さ 0.1 mm の銀ろう材を用い、1 台当たり 40 W、合計 160 W のレーザー光を 2 sec 間照射した結果、変色や変形が全く見られないろう付が可能であった。接合精度を測定した結果、芯ずれは 0.01 mm 以下であった。また、せん断接合強度は使用したろう材のカタログ値とほぼ同じであり、接合部に隙間など欠陥はないものと考えられる。短時間のろう付で高精度かつ高品質な異材接合が可能となり、本装置の有用性を示すことができた。

Fig. 13 A multi beam laser brazing apparatus equipped with four air cooled high power direct diode lasers.

Fig. 14 A laser spot taking a shape of line pattern and a schematic diagram of multi beam laser brazing for micro pin parts without a rotation.

Fig. 15 Dissimilar brazing of micro stainless steel and tungsten carbide pins.

6. 結 言

本解説では、これまで精密加工の分野でほとんど使用されなかった高出力半導体レーザーを用いて超薄板の精密溶接が可能であることを示した。さらに、ファイバ結合 LD 素子を利用した空冷式の高出力半導体レーザーを開発することによって、従来の溶接用レーザー装置に比べて使いやすく、イニシャルコストの安いレーザー溶接機を実現した。これま

で導入を躊躇していた中小企業にレーザー溶接を広く普及する機会の1つになることを期待している。

また、同装置は、溶接部材や溶接方法に応じて最大出力や集光形状を様々に調整して製作することができる。これまでのレーザー機器のように1台で多くのことを行う汎用的な使い方よりも、部材や工法に応じて専用機化して使用することの方が有用な装置である。これと組み合わせるジグや自動機を工夫することによって他にはない高生産性と高品質、低コストを両立した装置となり、差別化を図ったものづくり技術の獲得に貢献できると期待している。

引用文献

- 1) オプトロニクス社編集部編：“実用レーザー加工応用ハンドブック”、オプトロニクス社(2000)22-26.
- 2) 阿部信行：レーザー加工学会誌、9-1 (2002) 7-12.
- 3) 三瓶和久：レーザー加工学会誌、14-4 (2007) 1-5.
- 4) 萩野秀樹、宮田良雄：大阪府立産業技術総合研究所報告、22 (2008) 33-38.
- 5) Y. Funada and N. Abe: Proc. of 22nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics (ICALEO 2003), 2003, M203.
- 6) Y. Funada and N. Abe: Proc. of 23rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics (ICALEO 2004), 2004, M702.
- 7) Georg Treusch, Raman Srinivasan, Dennis Brown, Robert Miller, Jim Harrison: Proc. SPIE, 5711 (2005) 132-141.
- 8) 藤本毅、山形友二、山田由美、斉藤剛、片平学、内田和臣：レーザー学会誌、39-9 (2011) 674-679.
- 9) 阿部信行、舟田義則：電気学会論文誌C、128-5 (2008) 703-706.