

径 (μm)/リング径 (μm) で表示すると、50/200、100/400、200/700 の 3 種類である。それぞれに適用可能なディスクレーザー TruDisk[®] の機種を Table 2 に示す。これら多くの選択肢の中から加工対象に適した組合せを選ぶことが可能であり、幅広い用途への適用が可能である。

5. 結 論

以上述べてきたように、二重コアの 2in1 ファイバを用いた BrightLine Weld はビームプロファイルを制御することでスパッタ発生量を大幅に低減でき、これにより溶接品質の向上ばかりでなくプロセスウインドウの拡大、エネルギー効率の改善など多くの効果を有する。今後レーザーが使用される生産工程はますます増えていくことが予想される。これまでレーザーによる加工は条件出しや管理が難しいなどの声もあったが、本稿で述べたような技術により容易に高品質な加工ができるようになる。また、銅などの高反射材のキーホール溶接に対しての安定化にも有効である。将来的には溶接状態を常時モニタリングし自動補正をかけたがり、条件設定も自動化が進むなど、より使い勝手の良い装置が開発され、専門家の手を介さなくても誰でも高品質なレーザー加工が容易におこなわれるようになっていくものと思われる。

謝 辞

本文の執筆にあたり貴重なデータを提供していただいた TRUMPF Laser/Systemt. GmbH の Dr. Tim Hesse に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 窪田恵一, 鷲尾邦彦: 高出力 YAG レーザーと最近の進歩, レーザー研究, 28-11, (2000), 729.
- 2) Giesen, A., HiigeP, H., Voss, A., Wittig, K., Brauch, U., Opower H.: Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers, Appl. Phys. B, 58, (1994), 365.
- 3) 白川晃, 植田憲一: 高輝度高出力ファイバーレーザー, 電気学会論文誌 C, 124-7, (2004), 1367.
- 4) 川人洋介, 中田光紀, 上村洋輔, 水谷正海, 西本浩司, 川上博士, 片山聖二: ステンレス鋼の高出力レーザー溶接における 3 次元 X 線透視その場観察による湯流れと入射角および焦点はずし距離によるスパッタ制御との関係, 溶接学会論文集, 34, (2016), 239.
- 5) Hesse, T., Speker, N., Haug, P., Hermani, J.-P., Seebach, J., Havrilla D.: Laser welding with beam shapimng – latest application results, ICALEO 2018, paper #702.

著 者 紹 介

中村 強
NAKAMURA Tsuyoshi

1957年4月25日生。1981年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。同年日本電気株式会社に入社。電子ビーム装置の研究開発を経て1994年よりレーザーのアプリケーション技術開発に従事。2009年よりトルンプ株式会社にてレーザーアプリケーション技術開発に従事。2016年より現職。レーザー学会員、レーザー加工学会員、溶接学会員。

E-mail: tsuyoshi.nakamura@trumpf.com
TEL & FAX: (045) 931-8333 & 7534

特 集

レーザービームプロファイルの制御技術

ハイパワー領域に適用可能なビームモード制御と加工技術の開発

茅原 崇, 安岡 知道, 松永 啓伍, 高田 一輝, 田邊 猛

古河電気工業株式会社 (〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通6番地)

Development of Beam Mode Control Applicable to High Power Region and Processing Technology with Fiber Laser

KAYAHARA Takashi, YASUOKA Tomomichi, MATSUNAGA Keigo, TAKADA Kazuki and TANABE Takeshi

(Received March 20, 2020)

Key words: fiber laser, high power, high beam quality, beam mode control, weld quality

1. はじめに

ファイバレーザーは大出力、高ビーム品質、高エネルギー効率、小型、使いやすさ等の特徴と昨今の低価格化が相まって、生産ラインへの導入が急速に進んでいる。特に数100W~10kW超級の連続発振(CW)ファイバレーザーは、金属材料の溶接、切断および表面処理用途等への適用が拡大している。ファイバレーザーを用いた溶接においては、大出力でありながらレーザービームを数100 μm 以下の微小スポットに集光することが可能であるため、キーホールを容易に形成でき、薄板の高速溶接、厚板の深溶け込み溶接に適用されている。一方で、高出力レーザーを用いた加工においてはキーホールおよびその近傍で発生したスパッタがワークへ付着したり、ブローホールや割れ等の溶接欠陥が発生する問題がある。スパッタ付着、溶接欠陥発生のために、スパッタ除去工程や検査工程の追加が必要となり、次工程への負担が増すことから、これらの抑制技術が切望されていた。

当社は、高ビーム品質を有する産業用高出力ファイバレーザーを製造・販売しており、溶接分野を中心とした応用技術の開発にも取り組んでいる。ファイバレーザー応用技術の一つとして開発した高出力ファイバレーザー用ビームモード制御技術は、レーザービーム集光点のビーム強度分布を任意形状に制御することが可能である。近年は鉄に限らず、銅やアルミニウム等の種々の金属に対しても高品質溶接が求められており、当社が開発したビームモード制御技術を用いることで、さまざまな金属材料の溶接に対してスパッタや溶接欠陥の発生を大幅に抑制することが可能となった。本稿では、当社ファイバレーザーおよびビームモード制御技術の特徴と本技術を用いた加工事例について報告する。

2. 古河電工の産業用ファイバレーザー

古河電工では励起用半導体レーザーや特殊ファイバ等の技術を基盤として、ファイバレーザーの高出力化や高ビーム品質化を実現してきた。現在においては、シングルモードレーザーで1.5kW、マルチモードレーザーで12kWまでを製品化

している。Fig. 1に1.5kWシングルモードファイバレーザー、Fig. 2に12kWマルチモードファイバレーザーの外観写真を示す。

シングルモードファイバレーザーのビーム品質を決定する主要因であるYbドープファイバおよび伝送ファイバのモードフィールド径は $\phi 14\mu\text{m}$ となっており、光出力端における典型的なビーム品質はBPPで $0.36\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ($M^2=1.06$)である。 M^2 値をもつレーザービームの集光特性は式(1)で表される。

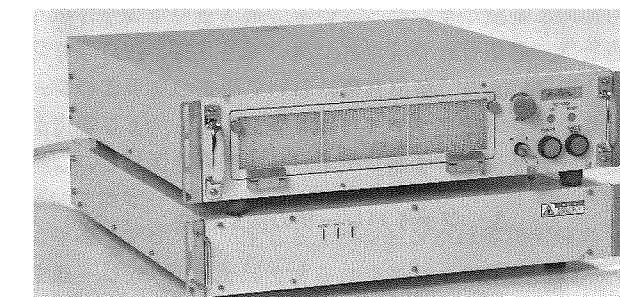


Fig. 1 Appearance of 1.5 kW single-mode fiber laser.

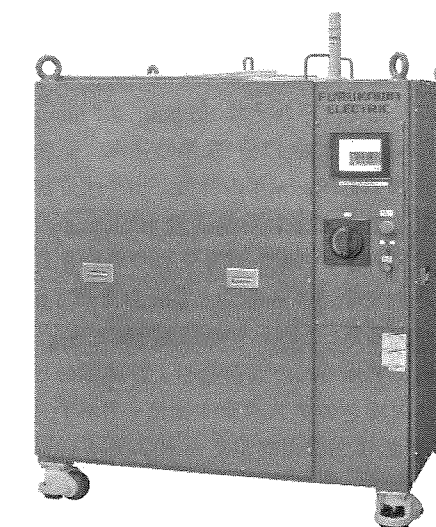


Fig. 2 Appearance of 12 kW multi-mode fiber laser.

$$\omega = \left(\frac{4\lambda}{\pi}\right) \left(\frac{f}{D}\right) M^2 \quad (1)$$

ω : 集光スポット径 [μm]
 λ : レーザ波長 [nm]
 f : 集光レンズ焦点距離 [mm]
 D : 集光レンズ入射前のコリメートビーム径 [mm]
 M^2 : ビーム品質定数 [-]

当社シングルモードファイバレーザの M^2 は 1 に近く良好な集光特性を有しており¹⁾, 集光スポット径は $\phi 20 \sim 30 \mu\text{m}$ で使用されることが多い。

ファイバレーザのさらなる高出力化は, シングルモードファイバレーザをビームコンバイナというファイバ部品で一本のマルチモードファイバに結合することで kW 級の出力を達成している。当社のマルチモードファイバレーザの伝送ファイバコア径はレーザ出力毎にラインナップを取り揃えており, ファイバコア径 $\phi 50 \mu\text{m}$ で出力 $\sim 6 \text{ kW}$, $\phi 80 \mu\text{m}$ で出力 $\sim 9 \text{ kW}$ および $\phi 100 \mu\text{m}$ で出力 $\sim 12 \text{ kW}$ まで対応している。ファイバコア径 $\phi 50 \mu\text{m}$, $\phi 80 \mu\text{m}$ および $\phi 100 \mu\text{m}$ のマルチモードファイバレーザの典型的なビーム品質は, BPP で $1.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ($M^2=5.0$), $3.0 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ($M^2=8.8$) および $3.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ($M^2=10.3$) である。マルチモードファイバレーザの高出力化, 高ビーム品質化に伴い, 厚さ $2 \sim 3 \text{ mm}$ 程度の薄板高速溶接や厚さ 10 mm を超えるような厚板溶接のご要望が多くなっている。

当社は, 通信分野で培われた高い部品品質と独自のコンバイナ構造により, 各出力毎において従来のファイバレーザよりも小さい伝送ファイバコア径を実現し, より安定かつ高ビーム品質を有するファイバレーザを提供している。

3. ファイバレーザの加工特性

Fig. 3 に 1.5 kW シングルモードファイバレーザを用いて, 出力 1.5 kW , 集光スポット径 $\phi 30 \mu\text{m}$, パワー密度 $2.1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ の場合のステンレス鋼 (SUS304), アルミニウム合金 (A5052) および純銅 (C1100) に対するビードオンプレートの溶け込み深さ特性を示す。溶接速度 0.5 m/min の低速領域では, ステンレス鋼, アルミニウム合金および純銅に対して, それぞれ 6.3 mm , 4.7 mm および 2.2 mm の溶け込み深さであった。深溶け込み, 低熱歪み等シングルモードファイバレーザの特徴が出やすく加工条件として設定されることが多い溶接速度 10 m/min の高速領域においては, ステンレス鋼, アルミニウム合金および純銅に対して, それぞれ 3.3 mm , 2.8 mm および 1.0 mm の溶け込み深さであった。このときの断面写真を Fig. 4 に示す。ステンレス鋼, アルミニウム合金および純銅のビード幅に対する溶け込み深さのアスペクト比はそれぞれ 14.6 , 3.99 および 1.98 であり, シングルモードファイバレーザの特性が反映された深い溶け込み形状となっていることがわかる。この特性からシングルモードファイバレーザは, 厚さ数 $\mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ 以下の薄板溶接等の加工に適用され, 高速,

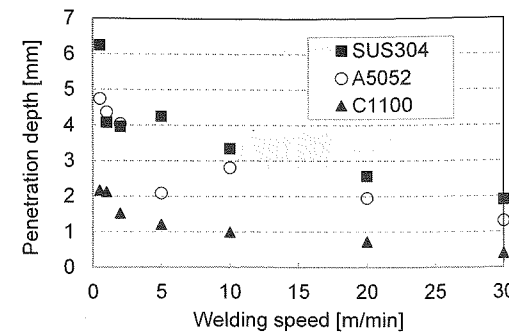


Fig. 3 Penetration depth of bead-on-plate with 1.5 kW single-mode fiber laser.

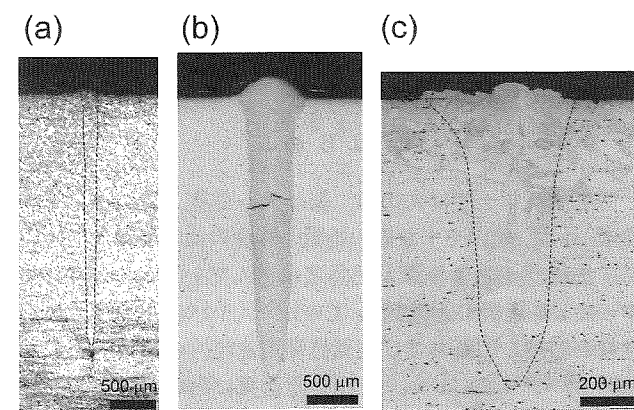


Fig. 4 Cross sections of bead-on-plate at 10 m/min with 1.5 kW single-mode fiber laser. (a) SUS304, (b) A5051 and (c) C1100.

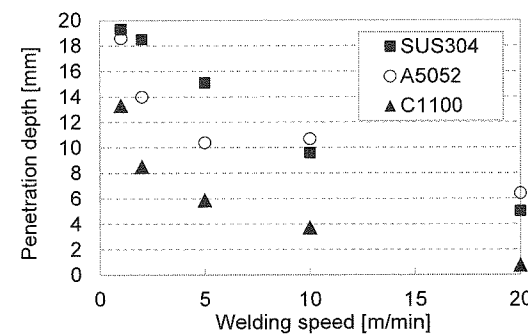


Fig. 5 Penetration depth of bead-on-plate with 12 kW multi-mode fiber laser.

深溶け込みおよび低熱歪みが必要な溶接に効果を発揮する。

Fig. 5 に出力 12 kW のマルチモードファイバレーザを用いて, 出力 12 kW , 集光スポット径 $\phi 270 \mu\text{m}$, パワー密度 $2.1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ の場合のステンレス鋼, アルミニウム合金および純銅に対するビードオンプレートの溶け込み深さ特性を示す。また, 溶接速度 1 m/min のときの断面観察結果を Fig. 6 に示す。溶接速度 1 m/min の低速領域では, ステンレス鋼, アルミニウム合金および純銅それぞれに対して 19.3 mm , 18.6 mm および 13.3 mm の溶け込み深さであった。各種材料のビード幅に対する溶け込み深さのアスペクト比は, それぞれ 3.96 , 2.34 および 4.62 の溶け込み形状を有

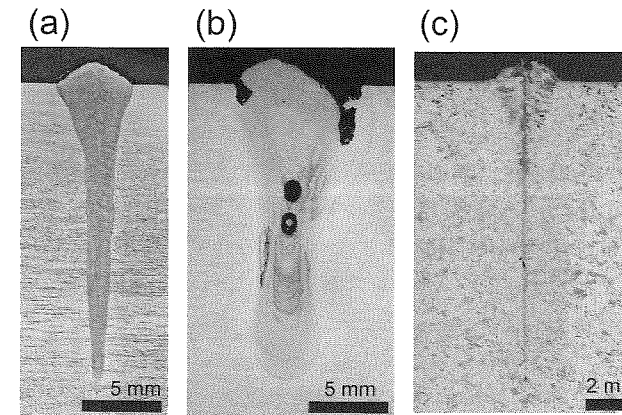


Fig. 6 Cross sections of bead-on-plate at 1 m/min with 12 kW multi-mode fiber laser. (a) SUS304, (b) A5051 and (c) C1100.

していることがわかった。溶接速度 10 m/min の高速領域においては, それぞれ 9.6 mm , 10.7 mm および 3.7 mm の溶け込み深さであった。ステンレス鋼およびアルミニウム合金に関しては溶接速度 20 m/min においても 5 mm 以上の溶け込み深さを有しており, 自動車用鋼板等の厚さ $2 \sim 3 \text{ mm}$ 程度の薄板に対する高速溶接に寄与することが期待される。

4. ビームモード制御技術

4.1 ビームモード制御技術の特徴

ファイバレーザ溶接においては 10^7 W/cm^2 を超える高パワー密度によりキーホールが形成され, 溶融池内部に急激な温度変化と激しい対流を引き起こすことが知られている²⁾。溶融池内部の不安定さは, ブローホールやスパッタのような溶接欠陥の原因となり, 結果として溶接部の割れ, 後工程における検査やスパッタ除去工程の導入が必要になっていった。ファイバレーザを導入した多くの生産現場において, これらの課題を解決する溶接技術の開発が期待されていた。

当社はファイバレーザ溶接で発生する溶接欠陥やスパッタ発生等の課題を解決するため, レーザ集光点の光強度分布を精密に制御可能なファイバレーザ用ビームモード制御技術を開発している。このビームモード制御技術は, 加工光学系中にビームモード制御素子を挿入することでビームを複数に分岐し, 任意の光強度分布に制御することが可能である。また, 生産現場で一般的に使用されているガルバノスキャナ等も含めたレーザ加工ヘッドに容易に組み込むことが可能でビームモード制御素子を交換するだけで容易にビームモードの変更が可能である。Fig. 7 に本技術により形成されたビームモード制御例を示す。Fig. 7 (a) はビームモード制御前の従来の集光スポット光強度分布, Fig. 7 (b) および (c) はビームモード制御後の光強度分布である。ビームモード制御素子により, 複数の集光スポットを密に配置すれば各スポットが結合され連続的な光強度分布になり, スポット間を十分に離せば離散的な複数スポットの光強度分布を形成できる。材料種や溶接・切断・

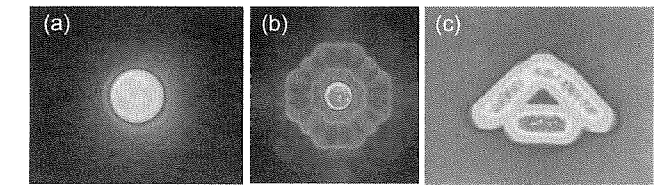


Fig. 7 Beam mode examples of the (a) conventional single-spot, (b) center and ring shape and (c) custom shape.

焼き入れ等の用途に応じてビームモードを選択する必要があるが, 自由度の高いスポット配置とエネルギー分配比率により最適なビームモード形状を作成することが可能である。これまでのビームモードを制御するための光学素子は, レーザパワー耐性, ビームモード形状の変換効率が悪く, 実用性がないと言われてきた。当社のビームモード制御技術は, 当社ラインナップの 1.5 kW シングルモードファイバレーザや 12 kW マルチモードファイバレーザを用いた加工において十分なレーザパワー耐性を有していることを確認している。また, 任意形状へのビームモード変換効率は 90% 以上を実現し当社の高出力ファイバレーザとともに量産ラインに導入されている。

4.2 ビームモード制御技術を適用した加工事例

4.2.1 シングルモードファイバレーザの加工事例

4.2.1 (1) 高速溶接におけるハンピングビード抑制効果
 シングルモードファイバレーザはマルチモードファイバレーザと比較してビーム品質が良く, レーザビームを $\phi 20 \sim 30 \mu\text{m}$ まで小さく集光することができる。この特徴から, 厚さ数 μm の電池用箱の重ね溶接や電子部品等の微細溶接に有効である。また, パワー密度を 10^8 W/cm^2 以上まで高くすることができるため, 銅やアルミニウムのような高反射材料の加工を誘起することが可能となる。一方で, 高速領域ではビード幅が細くなりビード形状が周期的に不安定になるハンピングが生じる。ハンピングは溶接欠陥の一つであり, この課題を解決するためにレーザ光をデフォーカスしたり溶接速度を低下させることで溶融池を拡大する方法がとられていた。しかしながら, レーザ光のデフォーカス照射は量産工程において装置セットアップの管理幅が狭くなること, 溶接速度低下はタクトタイムに直結することから, ジャストフォーカスかつ高速領域での加工条件設定が求められていた。Fig. 8 にシングルモードファイバレーザを用いて出力 1.5 kW , 溶接速度 5 m/min でステンレス (SUS304) 板上にビードオンプレートした際のビード外観写真およびビード表面形状を示す。Fig. 8 (a) はビームモード制御をしていない従来の 1 スポット照射, Fig. 8 (b) はビームモード制御を使用した場合の結果である。いずれの結果もステンレス板表面をレーザビームのジャストフォーカス位置に設定した。Fig. 8 (a) の結果から, 従来の 1 スポット照射ではビード幅が安定せずビード中央 A-A' 部の表面形状は高低差 $400 \mu\text{m}$ 程度の周期的な凹凸が見られた。Fig. 8 (b) のビームモード制御を使用した場合では, 1 スポット照射と比較しビード幅が一定となった。また, ビード中央 B-B' 部の表面形状は高低差 $100 \mu\text{m}$ 以下の滑らかな

な形状となりハンピングが抑制されていることがわかった。この時のビームモードは、集光スポット径 $\phi 21 \mu\text{m}$ を基本として $\phi 100 \mu\text{m}$ 領域内に複数スポットを配置し、さらには各スポットへのエネルギー分配比率を精密に制御することで独自のビームモードを形成している。

4.2.1 (2) 電池用銅箔の50枚重ね溶接

Fig. 9 に厚さ $8 \mu\text{m}$ の電解銅箔 (当社製品: NC-WS) 50枚の貫通重ね溶接結果を示す。Fig. 9 (a) に示すように従来の1スポットを用いた溶接では、溶接部の欠損が発生した。この現象を抑制するため、レーザー出力を低下させたりデフォーカスによるビーム径拡大を試みたが、1スポット条件では最下層まで溶融しなかったりレーザー光が全反射し加工を誘起できない結果となった。Fig. 9 (b) および (c) はビームモード制御を用いた場合のビード外観とその断面写真である。銅の加工を誘起するための高パワー密度領域と溶融池を拡大するための低パワー密度領域を形成することで、銅箔の50枚重ね溶接においても良好な接合状態を実現できた。

4.2.2 マルチモードファイバレーザの加工事例

4.2.2 (1) kW級高出力レーザのスパッタ抑制溶接

通常の1スポット集光ビームが加工対象に照射されるとキーホールが形成され、キーホール内で発生した金属蒸気により溶融池が押し出されスパッタとなる。特にkW級の

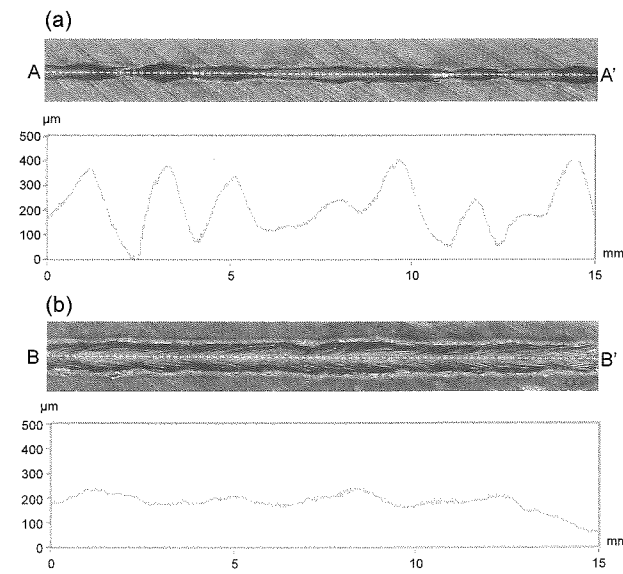


Fig. 8 Weld bead appearances and bead surface profiles of stainless steel using (a) conventional single spot and (b) beam mode control.

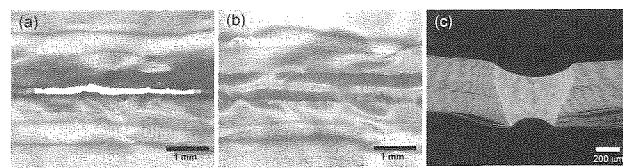


Fig. 9 Results of copper foil lap welding. (a) appearance of weld bead with conventional single spot, (b) appearance of weld bead with beam mode control and (c) cross section of (b).

大出力マルチモードファイバレーザの加工ではその現象が顕著になる。Fig. 10 は出力 3 kW でステンレス (SUS304) 板にビードオンプレートを行った際のスパッタ発生の様子である。Fig. 10 (a) は従来の1スポット照射、Fig. 10 (b) はビームモード制御を使用した結果である。1スポット照射の場合、多くのスパッタの発生が見られた。一方で、ビームモード制御を使用するとスパッタの発生が抑制されていることがわかる。ステンレス鋼以外の材料にも適用可能で、各材料の特性に合わせたビームモード形状を選択することでスパッタ抑制効果を期待できる。

4.2.2 (2) 亜鉛めっき鋼板の密着連続重ね溶接

当社は自動車用途で多く使用されている亜鉛めっき鋼板を隙間なく重ねて連続溶接をする“LC³W[®]: Laser (Continuous, Close Contact) Welding,”を開発した。従来の方法である1スポットビームを用いて、出力 3 kW、溶接速度 1.5 m/min で亜鉛めっき鋼板2枚を密着させて重ね溶接したときのビード外観を Fig. 11 に示す。亜鉛めっきの密着重ね溶接では、キーホール周辺の湯流れが亜鉛蒸気により不安定となり、キーホール中に流れ込んだ溶融金属がスパッタとして飛散すると推察されており³⁾、多量のスパッタが飛散することでブローホール等の溶接欠陥が多数形成される。LC³W[®]では、特殊なビームモード形状に加え、ガルバノスキャナによるビームオシレーションを付加することで、亜鉛めっき鋼板の密着重ね溶接に対して溶接欠陥を抑制することが可能となった。Fig. 12 に出力 3 kW、溶接速度 1.5 m/min において、厚さ 1 mm の電気亜鉛めっき鋼板 (めっき量 20 g/m^2) を重ね溶接したビード外観と断面観察の結果をそれぞれ示す。また、Fig. 13 に出力 4 kW、溶接速度 1.5 m/min において、厚さ 1 mm の溶融亜鉛めっき鋼板 (めっき量 60 g/m^2) を重ね溶接した場合のビード外観と断面観察の結果をそれぞれ示す。いずれの結果も従来のレーザー溶接と比較して安定したビード外観を形成しており、溶接部断面に致命的なブローホールは形成されていない。Fig. 14 に LC³W[®] 中のキーホール部の高速度カメラ像を示す。キーホール開口が大きくなり、ここから亜鉛



Fig. 10 Images of spattering of bead-on-plate of stainless steel using (a) conventional single spot and (b) beam mode control.

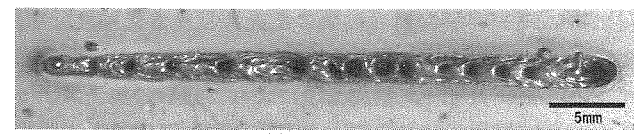


Fig. 11 A Result of zero gap lap welding of 1 mm thickness galvanized steel sheet at output power 3 kW and welding speed 1.5 m/min with a conventional single spot.

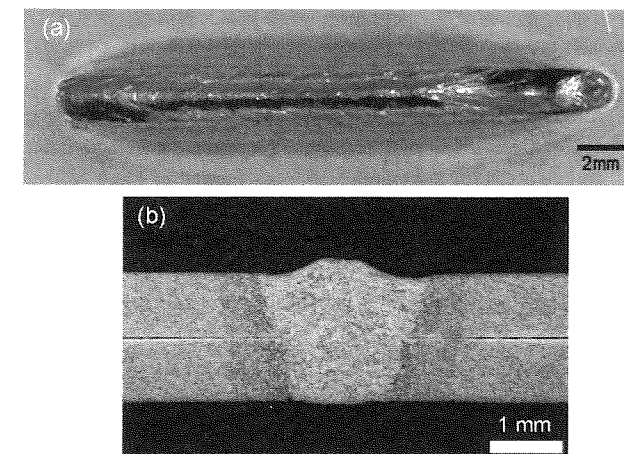


Fig. 12 LC³W[®] results for 1 mm thickness electrogalvanized steel sheet at output power 3 kW and welding speed 1.5 m/min. (a) appearance of weld bead, (b) cross section.

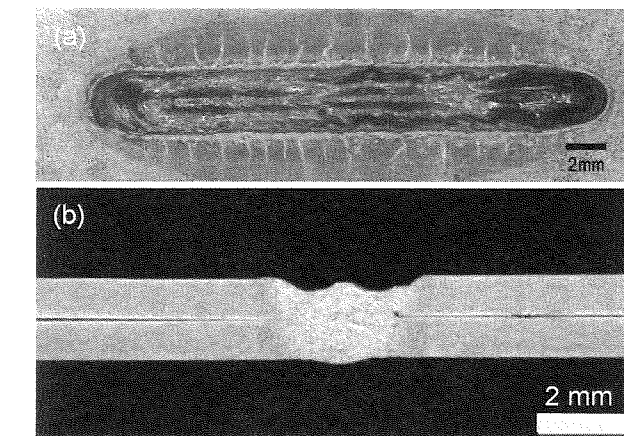


Fig. 13 LC³W[®] results for 1 mm thickness hot-dip galvanized steel sheet at output power 4 kW and welding speed 1.5 m/min. (a) appearance of weld bead, (b) cross section.

の金属蒸気放出が観察された。ビームモード形状やビームオシレーション条件が整合していないと、金属蒸気が十分に放出されず溶融金属が噴出しスパッタとなる。したがって、亜鉛の金属蒸気を安定して放出することが重要である。LC³W[®]では、亜鉛めっき量とめっきの種類によりビームモード形状とオシレーション条件を変更し、キーホールと溶融池の挙動を精密に制御している。

4.2.2 (3) アルミニウム合金の高品位溶接

アルミニウム合金は、軽量かつ高強度を実現可能なため自動車、航空宇宙、鉄道産業で多く採用されている。自動車用部材に対しては、ドア、フェンダー、ボンネット等の各種アルミニウム合金が採用されており^{4,6)}、自動車の組み立て工程における接合技術の重要性が増している。一方で、アルミニウム合金溶接全般として、酸化膜層の存在や高い熱伝導率、線膨張係数により溶接が難しく、変形や割れ、ブローホール等の溶接欠陥が発生しやすい⁷⁾という課題があった。また、ファイバレーザ溶接では、鉄鋼材料と比較してファイバレーザ波長の反射率が高く高パワー密度が必要なこと、溶融したアルミニウム合金の粘性が低いこ

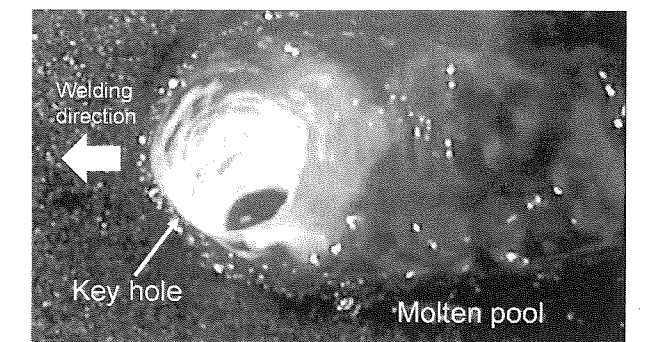


Fig. 14 High-speed camera image of the keyhole formed by LC³W[®].

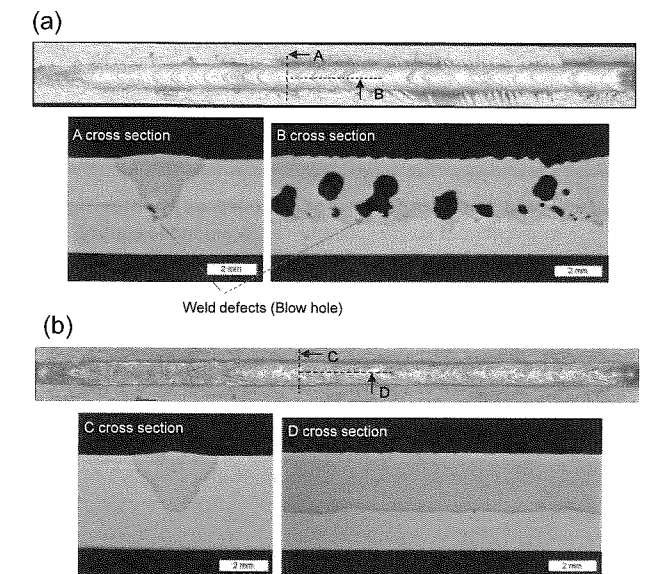


Fig. 15 Results of overlap welding of 2 mm thickness 6000 type aluminum alloy. (a) condition of weld defects formation, (b) condition of suppressing weld defects.

とから安定な溶接が難しいとされていた^{8,9)}。当社においては、10 kW マルチモードファイバレーザとビームモード制御技術を用いてアルミニウム合金に対する溶接条件を最適化し、ブローホール等の溶接欠陥を大幅に抑制することに成功した。自動車用のパネル部材に採用されているアルミニウム合金 (A6061) の板厚 2 mm 同士の非貫通重ね溶接のビード外観と断面観察結果を Fig. 15 に示す。Fig. 15 (a) はレーザー出力 5 kW、溶接速度 3 m/min、Fig. 15 (b) はレーザー出力 10 kW、溶接速度 8 m/min の場合の結果である。いずれの条件もビームモード制御を用いているが、ビームモードやその他条件が不適切である場合はブローホールが発生しやすく、材質、板厚に応じて、レーザー出力、溶接速度および最適なビームモードを選択することで良好な接合状態を得ることが可能となった。

4.2.2 (4) 純銅の高品位溶接

近年の自動車のEV化に伴い、純銅は自動車用モータやインバータ、電池などへ適用されている。これら部品の性能および設計自由度向上の手段として、ファイバレーザによる溶接が有力とされている。しかしながら、純銅は熱伝

導率の高さと光吸収率の低さから溶接が難しい材料として知られている。また、スパッタやブローホールなどの溶接欠陥が発生しやすく、溶接強度不足だけでなく部品内での回路短絡等の懸念があり大きな課題となっていた。Fig. 16はビームモード制御を純銅(C1100)板に適用した時のビードオンプレートのビード外観である。純銅溶接においては、純銅のレーザー光吸収率が10%未満と低く熱伝導率が高いため、古河電工製ファイバレーザの高ビーム品質、高パワー密度を活かしたビームモード形状を開発しスパッタ抑制効果を得ることができた。また、本技術を用いることでFig. 17に示すようなモーター部材として使用されている平角線の高品質溶接も可能となった。

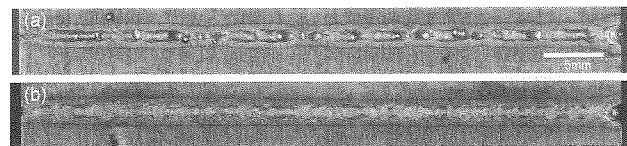


Fig. 16 Weld bead appearances of pure copper using (a) conventional single spot and (b) beam mode control.

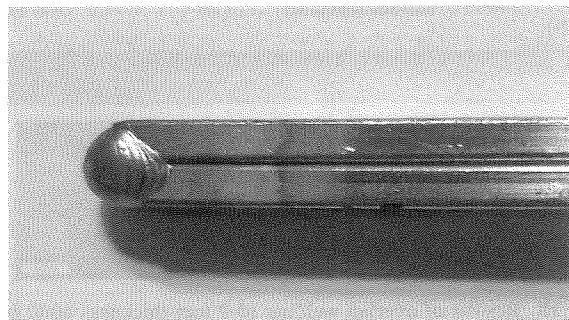


Fig. 17 Appearance of hairpin welding with beam mode control.

5. 結 論

古河電工のビームモード制御技術は、ビームモード形状および光強度分布の自由度が大きいため、スパッタ抑制、溶接欠陥抑制、難溶接材や異材溶接等その用途は拡大している。生産工程導入のためには、顧客毎の材料、形状、用途、加工条件に合わせたビームモードの最適化が必要である。古河電工では高い信頼性、高ビーム品質を有する産業用高出力ファイバレーザの提供とともに、ビームモード制御を含めた加工技術、周辺機器技術の開発を推進し顧客の課題を解決する提案を行っていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 次世代レーザプロセッシングとその産業応用調査専門委員会: 最新レーザプロセッシングの基礎と産業応用, 電気学会 (2007), 64-67.
- 2) 片山聖二, 川人洋介: 高速度ビデオ観察法およびX線透視法による溶接現象の可視化, 高温学会誌, 33-3 (2007), 118-127.

- 3) 小野守章, 海津享, 大村雅紀, 樺澤真事, 森清和: 亜鉛めっき鋼板のレーザ重ね溶接性, 溶接学会論文集, 15-3 (1997), 438-444.
- 4) A. Das, I. Butterworth, I. Masters and D. Williams: Evaluation of Key Geometrical and Mechanical Properties for Remote Laser Welded AC-170PX Aluminum Joints, Journal of Laser Micro/Nano engineering, 14-1 (2019), 1-7.
- 5) 渋谷和久: (株)UACJの高機能アルミニウム材料開発と将来展望, UACJ Technical Reports, Vol. 5, (2018), 2-13.
- 6) 小西徳次郎: 自動車車体の溶接・接合, 溶接学会誌, 74-8 (2005), 6-9.
- 7) 圓城敏男: アルミニウムおよびその合金の溶接, 軽金属, 33-8 (1983), 482-490.
- 8) 山岡弘人, 結城正弘, 土屋和之: Al-Mg-Si系合金レーザ溶接部における凝固割れ防止に関する検討, 溶接学会論文集, 18-3 (2000), 422-430.
- 9) 片山聖二: アルミニウム合金のレーザ溶接, 軽金属, 62-2 (2012), 75-83.

著 者 紹 介



茅原 崇
KAYAHARA Takashi

1980年生。2006年大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻修了。同年古河電気工業株式会社入社。主としてレーザ加工技術およびモニタリング技術の開発に従事。レーザー学会会員

E-mail: takashi.kayahara@furukawaelectric.com

TEL: 0436-42-1703



安岡 知道
YASUOKA Tomomichi

1986年生。2012年東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻修了。同年古河電気工業株式会社入社。主としてレーザ加工技術の開発に従事。



松永啓伍
MATSUNAGA Keigo

1993年生。2018年九州大学大学院工学研究科機械工学部門修了。同年古河電気工業株式会社入社。主としてレーザ加工技術の開発に従事。



高田一輝
TAKADA Kazuki

1995年生。2019年近畿大学総合理工学研究科エレクトロニクス系工学専攻修了。同年古河電気工業株式会社入社。主としてレーザ加工技術およびモニタリング技術の開発に従事。レーザー学会会員。



田邊 猛
TANABE Takeshi

1972年生。1993年情報科学専門学校卒業。1999年古河電気工業株式会社入社。光半導体デバイス研究と製造を経て、現在レーザ加工技術者として従事。

特 集

レーザービームプロファイルの制御技術

レーザー溶接品質に及ぼすビームプロファイルの影響 —Adjustable Ring Modeによるビーム成形—

山 森 浩 人, 稲 垣 陽 輔

株式会社ナ・デックス (〒481-0038 愛知県北名古屋市徳重御宮前1)

Effect of Beam Profile on Laser Welding Quality
— Beam Shaping with Adjustable Ring Mode —

YAMAMORI Hiroto and INAGAKI Yosuke

(Received March 2, 2020)

Key words: fiber laser, beam profile, adjustable ring mode, laser welding, aluminum alloy

1. はじめに

レーザ溶接は生産性が高く、高精度な溶接が可能であるため、多くの産業で利用されている。自動車産業においては、ハイブリッドカーや電気自動車などの環境負荷の少ない自動車の普及が進んでいる。これらの車には、電気を生み出すバッテリー、バッテリーからもたらされる電気を変換するインバータ、動力となるモーターが搭載され、その導体やボディにはアルミニウム合金や銅が多く使用されている。また、これらのコンポーネントを搭載することによる車両重量増加に対して、自動車構造部品に軽量のアルミニウム合金を採用することも増えている。

アルミニウム合金は、熱伝導率と光反射率が高いため、一般にレーザ溶接が難しいとされている。また、溶接部にポロシティや割れ等の溶接欠陥が発生しやすい¹⁾。このようなレーザ溶接が難しい材料の溶接性向上はもちろん、その他種々のレーザアプリケーションの最適化のため、レーザビーム形状を制御する「ビーム成形技術」がレーザ機器メーカーや光学部品メーカーによって開発されている。

ビーム成形は、①2層構造のファイバをもつレーザ発振器を使用する、または②DOE (Diffractive Optical Element) と呼ばれる回折光学素子や、ホモジナイザ等のビームシェイパーとよばれる光学素子を使用することによってなされる。

本稿では、レーザ出力分布が調整可能な、CORELASE社製ファイバレーザ発振器によるビーム成形の概要と、それを利用したアルミニウム合金のレーザ溶接結果について紹介する。

2. ビーム成形技術

先に述べたように、ビーム成形技術は、「レーザ発振器(およびそのファイバ)」またはレーザヘッドに組み込まれる「ビームシェイパー」によってなされる。

2.1 レーザ発振器によるビーム成形

レーザ発振器によるビーム成形は、センターとリングか

らなる2層構造のファイバを利用して、それぞれの出力を制御することによってなされる。代表的な装置としては、CORELASE社製ARM (Adjustable Ring Mode) レーザ(下記の3.で詳述する)やトルンプ社製BrightLineレーザなどがある。

トルンプ社の「BrightLine Weld」は2 in 1ファイバを用い、内側(100 μm)と外側(400 μm)の両方にレーザを導入し、中央が尖り周辺部が緩やかな裾形状のプロファイルを形成し、溶接に用いられている。レーザ発振器から2重コアファイバへの導入は、ファイバ結合部にレーザの位置を調整するための特殊な可変スイッチを設け1%単位で出力調整を可能にしている²⁾。レーザ出力をフレキシブルに分配でき、アプリケーションに合わせて最適に調整することが可能である。

BrightLine Weldの技術を用い、溶接が困難な銅の溶接を6 m/min以下の速度領域においても実現している³⁾。通常、波長1 μm付近でビーム成形をしないレーザ発振器を用い、この溶接速度領域で銅を溶接すると、大量のスパッタが飛散し、良好なビードを形成することは難しい。

その他の発振器メーカーでも、IPGフォトニクス社のファイバレーザYLS-AMB (Adjustable Mode Beam) やnLIGHT社のCoronaとして、2層構造のファイバを有するレーザ発振器を開発・販売されている。以上の2層構造のファイバをもつレーザ発振器によるビーム成形技術は、主に溶接やブレイジング(ろう付)、切断のアプリケーションに適しているとされている。

2.2 ビームシェイパーによるビーム成形

ビームシェイパーには、ホモジナイザやDOEなどがある。これらの光学素子を使用したビーム成形技術は、ビーム形状の制御(円形、矩形、線)、強度分布の制御(ガウシアン、トップハット、リング、分岐、多点集光)が可能のためアプリケーションは溶接・切断のみならず、熱処理、穴あけ、除去加工、ブレイジングなど多岐にわたる。

レーザ溶接用途では、レーザ光軸上に2~4スポットの