

xEVに適用可能なビームモード制御を用いたレーザ溶接技術

村山 太郎・茅原 崇・繁松 孝

古河電気工業(株)

1 はじめに

2030年の持続可能な開発目標 (SDGs), さらには2050年カーボンニュートラルの達成に向けて, 日本のみならず世界各国でCO₂排出量の少ない電動車 (xEV) の開発と普及が広がっている。xEV製造の際には, 電池やモータなどガソリン車と比べ溶接箇所が多く, 溶接時間の短縮やその接合形状の自由度向上の観点からレーザ溶接が有効だと考えられる。

当社は, 長年光通信分野で培ってきた半導体レーザ, 光ファイバー等の技術を基盤とし, 高ビーム品質を有する産業用ファイバーレーザを製造してきた。ファイバーレーザは高いビーム品質や大出力といった特徴から, 加工物に対して局所的に深い溶込みを得ることができる一方で, ブローホールやスパッタなど欠陥が発生しやすく高品質・精密な溶接に課題があった。当社が開発したビームモード制御技術は, それらの欠陥の発生を大幅に抑制することが可能であり, 鉄・銅・アルミニウム等の様々な金属材料に対して, 高品質・精密な溶接が可能である。

当社ではxEVの製造工程に着目し, ビームモード制御技術を用いて, 革新的なレーザ溶接技術の開発を進め

てきた。

本稿では, xEVの部品をボディ・リチウムイオン電池・モータの3つに分けて, それぞれの製造過程において適用可能なレーザ溶接技術について加工アプリケーション事例とともに説明する。

2 当社のレーザ技術の特徴

2.1 高ビーム品質を有するファイバーレーザ

当社は, 光通信分野で長年培ってきた励起用半導体レーザや特殊光ファイバー, 融着技術等を基盤として, 高ビーム品質および高出力産業用ファイバーレーザの開発, 販売を10年以上にわたり行ってきた。中でもビーム品質においては独自のコンバイナ構造により, 各出力において従来のファイバーレーザよりも小さい伝送ファイバーコア径を実現し, 高ビーム品質を有するファイバーレーザを提供している。

図1に, シングルモードファイバーレーザの光学構成概略図を示す。励起用レーザダイオードから発振した光は, テーパーファイバーバンドル (TFB: Tapered Fiber Bundle) によりYbドープ光ファイバー (YDF: Ytterbium Doped Fiber) へと導波され励起を引き起こす。YDFの前後に配置した反射率の異なるファイバーブラッググレーティング (FBG: Fiber Bragg Grating) で共振させ光増幅させることで, 波長1,070 nmのシングルモードレーザ光が出射される。このYDFのファイバーコア径は14 μmであり, 写真1に示す当社のシングルモードファイバーレーザの光出力端における典型的なビーム品質M²因子は1.06, ビームパラメータ積BPP (Beam Parameter Products) は0.36 mm·mradである。レーザビームの集光特性は, $\omega = (4\lambda/\pi)(f/D)M^2$ と表

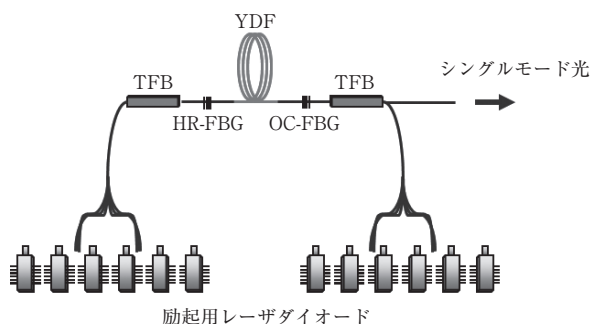


図1 シングルモードファイバーレーザの光学構成概略図



写真1 シングルモードファイバーレーザーの外観



写真2 12kWマルチモードファイバーレーザーの外観

され、ここで ω ：集光スポット径 [μm]、 λ ：レーザーの波長[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 ：ビーム品質因子である。 M^2 は理想的なガウシアンビームからのずれを示しており、1に近いほど高ビーム品質である¹⁾。

当社では、高効率でシングルモードファイバーレーザーを結合できるビームコンバイナ技術により、最大12 kWの高出力マルチモードファイバーレーザーを提供している。写真2に当社12 kWマルチモードファイバーレーザーの外観を示す。マルチモードファイバーレーザーのコア径は $50\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ であり、それぞれの典型的なBPPは $1.7\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ($M^2=5.0$)、 $3.0\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ($M^2=8.9$)、 $3.5\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ($M^2=10.3$)である。また、すでに18kWのマルチモードファイバーレーザーの開発に成功しており、そのBPPは $3.0\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ と、一般的な10 kW超ファイバーレーザーのビーム品質の $4.0\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ と比較して25%良好な値である。このように高いシングルモードビーム集光特性とコンバイナ技術により、マルチモードとなっても高いビーム品質が実現可能となっている。

上記のように当社のファイバーレーザーは高ビーム品質

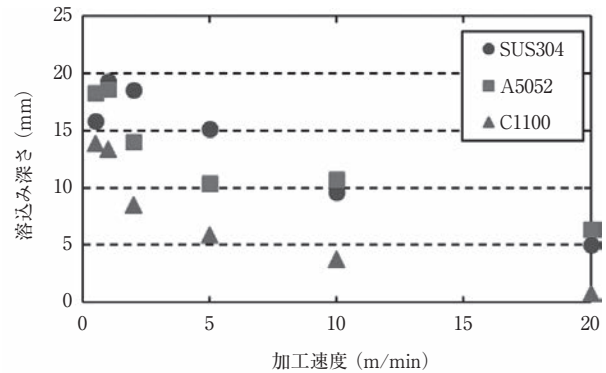


図2 12 kWマルチモードファイバーレーザーの溶込み深さ

を有するため、レーザー集光点において高いパワー密度を有する。出力1.3 kWのシングルモードファイバーレーザーの場合、集光スポット径 $30\mu\text{m}$ におけるパワー密度は $1.8\times 10^8\text{ W/cm}^2$ に達する。また、出力12 kWのマルチモードファイバーレーザーの場合、集光スポット径 $270\mu\text{m}$ におけるパワー密度は $2.1\times 10^7\text{ W/cm}^2$ となる。この時のステンレス鋼 (SUS304)および銅 (C1100)、アルミニウム合金 (A5052)に対するビードオンプレートの溶込み深さを図2に示す。加工速度 0.5 m/min の低速領域では、それぞれ 15.8 mm および 13.9 mm 、 18.3 mm の溶込み深さであった。加工速度 10 m/min の高速領域においては、それぞれ 9.6 mm および 3.7 mm 、 10.7 mm の溶込み深さであった。

2.2 ビームモード制御技術

高ビーム品質なファイバーレーザーから得られる高いパワー密度は、局所的に深い溶込み深さを得ることができる一方で、集光点にキーホールを形成し、図3 (a)のように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⁾。このように不安定な溶融池はブローホールやスパッタなどの溶接欠陥を引き起こし、溶接強度の低下や電氣的短絡の原因となる。中でも銅は、固体の状態ではファイバーレーザーの波長 $1,070\text{ nm}$ の光吸収率が約5%程度と非常に低く、溶融のために高いパワーが必要である一方で、一度溶融が始まり液体になると吸収率が増加することから溶融池が安定にくく、よりブローホールやスパッタが発生しやすい。ファイバーレーザーを用いて高品質な溶接を実現するためには、これらの課題の解決が求められていた。

そこで当社は古河電子と共同でファイバーレーザー用ビームモード制御技術を開発した。ビームモード制御技術とは、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レーザー光を分岐させ、レーザー集光点の強度分布を任意に制御することが可能である技術である。図4に

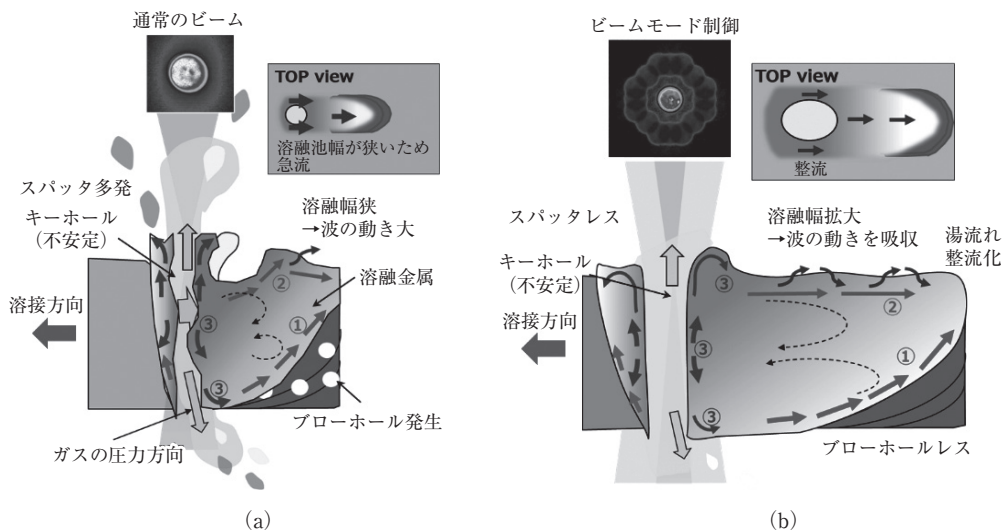


図3 (a) レーザ溶接時の欠陥の発生機構, (b) ビームモード制御技術による溶接欠陥の抑制機構

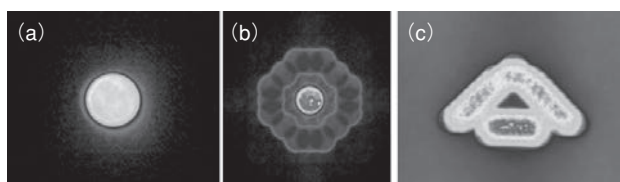


図4 ビームモード制御例：(a) 従来の集光スポット, (b) 中心+リング形状, (c) 自由形状

ビームモード制御例を示す。図4 (a) はビームモード制御前の通常のスポットの光強度分布, 図4 (b) および図4 (c) はビームモード制御後の光強度分布である。このようにスポットの配置や各スポットへのエネルギー分岐比率を自由に設定できるため, 加工物の大きさ・材質に合わせた最適なビームモードを形成することで, 溶接・切断・焼入れ等の様々な加工に適用可能となる。中でも溶接に対するビームモード制御の効果として, 加工用の主ビームの周辺に予熱効果と湯流れ整流化のための副ビームを複数配置することで, 図3 (b) に示すように溶融池を安定化することができる。当社のビームモード制御技術は, 高いビーム変換効率とレーザーパワー耐性を備えており, 当社の10 kW超のマルチモードレーザーにおいても適用可能である。

3 ボディ材への適用

レーザー溶接は, 遠隔加工による操縦安定性や, ステッチ溶接による衝突負荷耐性, 高速溶接による生産性の向上といった観点から, 自動車のボディ材の溶接に適している。高品質・高信頼性が求められるボディ溶接に対し, 当社はビームモード制御技術による溶接ソリューションの提案を行っている。

耐食性・防錆に優れ, 自動車のボディ材として広く使

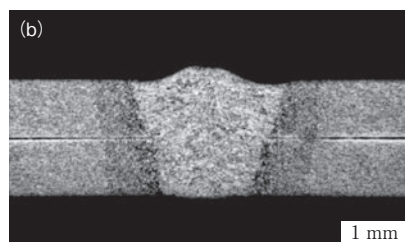
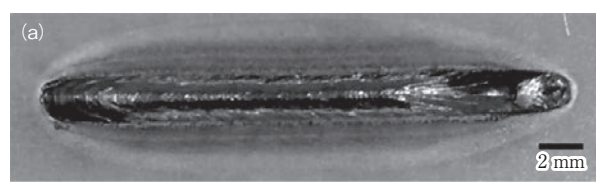


図5 亜鉛めっき鋼板の0ギャップ重ね溶接 (LC³W[®]) の結果：(a) ビード外観, (b) 溶接部の断面

用されている亜鉛めっき鋼板は, 通常すき間なく重ねて溶接した場合, 重ね境界部で発生する亜鉛蒸気圧によりスパッタや欠肉が発生しやすい。当社は, ビームモード制御技術とガルバノスキャナによるビームオシレーションを利用することで, 図5のように亜鉛めっき鋼板のゼロギャップ溶接が可能となる「LC³W[®]」(Laser [Continuous, Close Contact] Welding) を開発した。

板厚や材質の異なる複数の鋼板をプレス成形前に溶接するテーラードブランク (TWB: Tailor Welded Blank) は, 板材を最適配置することで, 車体の高強度化と軽量化を両立できるため, 自動車用ボディ材として用いられてきた。テーラードブランク溶接は, 厚さが異なる材料を溶接するため, 突合せ時にギャップや位置ずれが大きいと安定した溶接が難しいが, 当社のビームモード制御技術を利用し安定した溶融池を形成することで図6に示すように溶接欠陥の抑制と, 突合せ時のギャップ裕度と位置ずれの裕度を高くすることが可能で

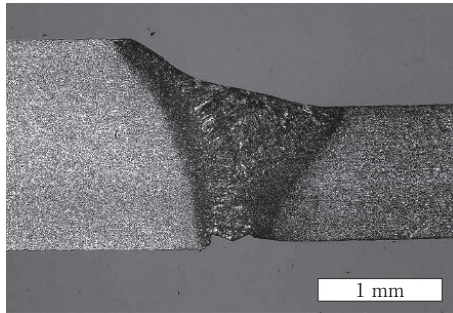


図6 ハイテナーハイテナー突合せ溶接部断面

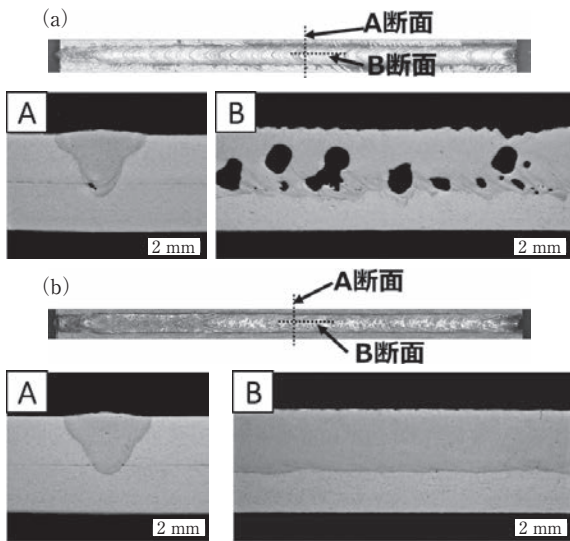


図7 t 2 mm 6000系アルミニウム合金の重ね溶接結果：(a) ブローホール形成条件：出力5 kW，溶接速度3 m/min，(b) ブローホール非形成条件：出力9 kW，溶接速度7 m/min

ある。

アルミニウム合金は軽量かつ高強度であるため、燃費向上やCO₂排出量削減を目的として車体軽量化が要求されている自動車・xEV用部材としてドア、フェンダー、ボンネットなどに各種アルミニウム合金の採用がされている^{3)~5)}。一般的にアルミニウム合金の溶接は、酸化膜の存在や高い熱伝導率、線膨張係数により、変形や割れ、ブローホール等の欠陥が生じやすい課題があった⁶⁾。ファイバーレーザーでの溶接は、エネルギー密度が高いため高速・低入熱での溶接が可能であり、溶接部の変形や熱影響の低減に効果が期待できる一方で、アルミニウム合金は鉄系材料と比較してファイバーレーザー波長の反射率が高いことや、溶融したアルミニウム合金の粘性が低いことから安定した溶接が難しいとされてきた^{7)~8)}。これらの課題に対し、当社は、12 kWマルチモードレーザー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、溶接欠陥の大幅な抑制に成功し、高速かつ高品質な溶接を実現した。自動車用パ

ネル部材に採用されている6000系アルミニウム合金の板厚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図7に示す。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の条件が不適合である場合は図7(a)のようにブローホールが発生しやすく、レーザー出力、溶接速度に応じてビームモードを最適化することで図7(b)のように、良好な溶接が可能となる。

また、これらの溶接は、溶接中の熱放射光および反射光をリアルタイムで計測し、溶接欠陥を検出する溶接モニタ計測技術や、溶接中のキーホール深さをリアルタイムで計測するOCT (Optical Coherence Tomography) モニタ計測等の品質管理技術と組み合わせることで、検査工程の削減および溶接品質の管理が可能となる。

4 リチウムイオン電池製造への適用

xEVの普及にともない、xEVの主要部品であるリチウムイオン電池の需要も増加しており、高い生産性と高性能化が求められている。リチウムイオン電池製造工程のうち、電極箔の積層・集電溶接、モジュール化・バスバーの溶接、パッケージの封止溶接において、レーザー溶接の適用が可能である。

すでに述べたようにリチウムイオン電池を構成する主要部材である純銅は近赤外域の光吸収率が低いため、近赤外レーザーで安定した溶接が難しいとされてきた。当社のファイバーレーザーは、スポット径を20~30 μmまで小さく集光して照射することが可能であり10⁸ W/cm²以上の高パワー密度が容易に得られるため、銅の溶接に有効である。一方で、とくに高速領域での溶接においては溶融池が細くなり、溶接強度の低下につながるピット(穴)・ブローホールや電氣的短絡の原因となるスパッタが発生してしまう。そこで、ビームモード制御技術を用いることで、溶融池を安定化させた銅の溶接を行った。

図8はリチウムイオン電池電極に使用されている厚さ

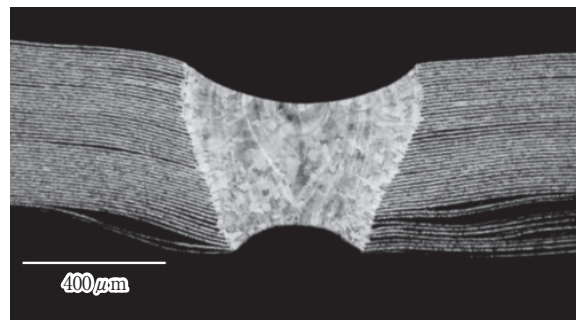


図8 銅箔50枚の重ね溶接部断面

8 μm 銅箔（当社製品：NC-WS）の50枚重ね溶接結果である。通常スポットでは、欠肉や破れが生じるため安定した溶接は困難であったが、ビームモード制御を用いることで溶接欠陥のない良好な接合状態を得ることができる。

図9に銅製のバスバを模擬した厚み0.5 mmと1.0 mmの純銅板を二枚重ねレーザー溶接した際のビード外観を示す。図9(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、図9(b)はビームモード制御技術を適用した結果である。従来の1スポット照射ではビードの幅が安定せず、スパッタやピットが発生していることが分かる。

一方でビームモード制御技術を適用した場合、ビードが安定し溶接欠陥が発生していないことが確認できる。本溶接で使用したビームモードは、集光スポット径21 μm のビームを100 μm の微小範囲内に配置し、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溶融池の安定化を図り、高品質な加工を達成した。

角型リチウムイオン電池は、集電部を一体化した後、アルミニウム合金のパッケージに挿入し、電解液を注入し封止することでバッテリーセルを構成する。封止の際、気密がとれていない場合、電解液の漏洩や湿度の侵入による性能低下につながるため、欠陥のない溶接が求められる。ビームモード制御を用いることで、アルミニウム合金の溶接欠陥を抑制することができ、写真3のように

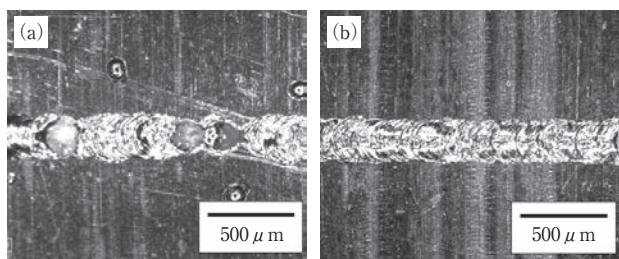


図9 レーザ溶接した純銅板表面：(a) ビームモード制御技術なし、(b) ビームモード制御技術有り

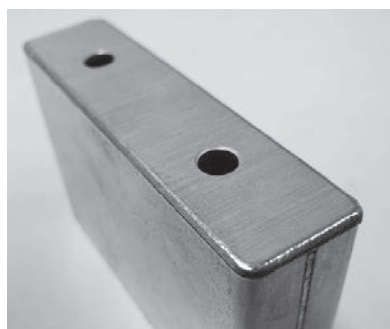


写真3 アルミニウム合金のパッケージ封止溶接

気密性のとれたパッケージ封止が可能である。さらにマルチモードファイバーレーザを用いることで、高速での加工が可能であり、生産性の向上につながる。

5 モータ製造への適用

電動化が進むにつれてモータの需要は高まり、小型化・多種化や生産性の向上が進むと考えられる。モータに使用される巻線は高効率化・小型化のため各社多様化が進んでおり、また溶接箇所が多いため、多様な巻線に適用でき、かつ高速で溶接できる溶接技術が求められる。非接触溶接であるレーザー溶接は、従来の巻線溶接に用いられているティグ溶接に比べて、接地をとる必要がないため被覆除去は最低限で良く、またレーザー光を任意の位置に照射することができるため、巻線の形状が複雑化したとしても溶接することが可能である。さらに、高出力レーザを用いれば溶接時間の大幅な短縮が可能である。しかし、巻線には主に電気伝導度が高い銅が用いられるため、レーザー溶接は強度や電気抵抗に影響を及ぼす溶接内部のブローホールの発生や、電氣的短絡の原因となる溶接時のスパッタの発生といった課題から高品質化が難しいとされていた。

当社では6 kWのマルチモードファイバーレーザにビームモード制御を適用することで、巻線に使用される平角銅線の高品質溶接に成功した。実際にモータに使用されている断面が1.5 mm×3.1 mmの平角銅線2本のヘアピン溶接を行った際の透過X線写真を図10に示す。ビームモード制御技術を適用していない従来のレーザー溶接では図10(a)のように内部に多くのブローホールが存在していることが確認できるが、ビームモード制御を適用した溶接では図10(b)のように、ブローホールが大幅に抑制できていることが確認できる。

また、図11に溶接時の様子を比較した写真を示す。図11から、ビームモード制御技術を適用することでスパッタのない良好な溶接ができていることが分かる。上

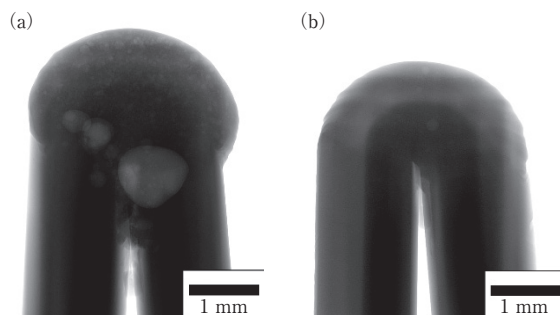


図10 平角銅線溶接部の透過X線画像：(a) ビームモード制御技術なし、(b) ビームモード制御技術有り

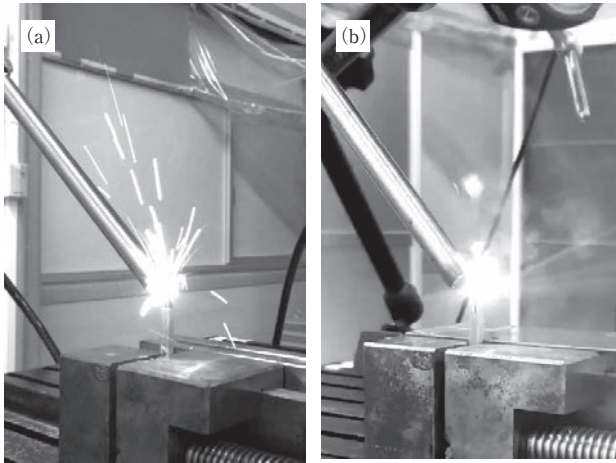


図11 平角銅線ヘアピン溶接時の様子：(a) ビームモード制御技術なし、(b) ビームモード制御技術あり

記溶接はレーザー照射時間0.1秒以下で可能であり、ティグ溶接では実現できない溶接時間の大幅な短縮が可能である。また、平角線の溶接は端部を溶接するため熱が伝導する方向が一方向しかなく溶接時間が長いと被覆焼けが生じてしまうため、溶接時間の短縮は被覆除去を最小限にすることにつながり、コスト削減とモータの小型化を実現することが可能となる。

これまでモータコアを形成する電磁鋼板の積層には1枚1枚ノッチ同士をはめ込む構造であったが、生産性を上げるために、積層後に一気にレーザーで接合する方法が検討されている。分割電磁鋼板の溶接において、ビームモード制御技術を使用することで、図12のように溶接欠陥や熱影響を抑制し鋼板の電磁特性の劣化を最小限にした溶接が可能である。

6 おわりに

当社の高いビーム品質を有するファイバーレーザーと自由度の高いビームモード制御技術を用いることで、xEV製造における多くの工程において、溶接欠陥・スパッタ抑制等の高品質な溶接を実現可能である。現在は、アル

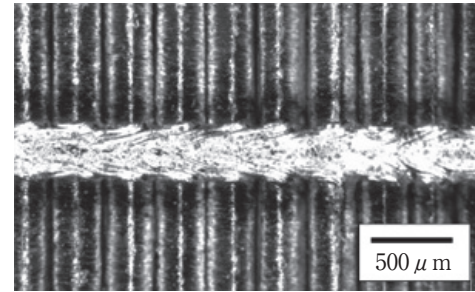


図12 レーザ溶接した分割電磁鋼板表面

ミニウム-鉄等の異材溶接や、微小箇所への溶接の検討も行っており、自由度の高さを活かしそれぞれに最適なビームモードの開発を進めている。

当社は、生産工程導入に当たって、材質、形状、サイクルタイムに合わせたビームモードの最適化が可能であり、高ビーム品質を有するファイバーレーザーの提供とともに、ユーザーの課題解決に向けた溶接技術の提案を行っていく。

参考文献

- 1) 次世代レーザープロセッシングとその産業応用調査専門委員会：最新レーザー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 聖二：1-4 レーザ溶接，溶接学会誌Vol.78, No.2（2009）124-138
- 3) A. Das, I. Butterworth, I. Masters and D. Williams：Evaluation of Key Geometrical and Mechanical Properties for Remote Laser Welded AC-170PX Aluminium Joints, Journal of Laser Micro/Nano engineering, Vol.14, No.1（2019）2-13
- 4) 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
- 5) 小西 徳次郎：自動車車体の溶接・接合，溶接学会誌，Vol.74, No.8（2005）6-9
- 6) 圓城 敏男：アルミニウムおよびその合金の溶接，軽金属，Vol.33, No.8（1983）482-490
- 7) 山岡 弘人，結城 正弘，土屋 和之：Al-Mg-Si系合金レーザー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, Vol.18, Bo.3（2000）422-430
- 8) 片山 聖二：アルミニウム合金のレーザー溶接，軽金属，Vol.62, No.2（2012）75-83