ファイバレーザ技術で、亜鉛めっき鋼板の溶接を隙間ゼロで実現

茅原崇、西井諒介、安岡知道、繁松孝

レーザビームモード制御を用いた亜鉛めっき鋼板のファイバレーザ溶接

亜鉛めっき鋼板は防錆効果に優れているため、自動車、家電製品、建築材料の製造に広く用いられている。溶融亜鉛めっき鋼板（合金化および非合金化）や電気亜鉛めっき鋼板など、用途に応じてさまざまな種類の亜鉛めっき鋼板が存在する。

これらの材料を加工する際には、スポット溶接、アーク溶接、レーザ溶接が適用される。適用時には、亜鉛の量、その他の成分の含有量、亜鉛めっき材料と鋼板の結合状態を考慮して、プロセスの安定化を図る必要がある。

スポット溶接は、特に車体用の亜鉛めっき鋼板の溶接に広く用いられている。スポット間の距離が短い場合は、接合部で電流が分散されるため、強力な接合部を生成できない可能性がある。この理由から、打点数と接合部間距離には限界があり、それによってパーツ間の接合強度と車体の剛性が抑えられる。レーザ溶接は、電流分散を考慮する必要がないため、スポット溶接の欠点を補う方法として利用されている。

亜鉛めっき鋼板をレーザ溶接する場合、鋼板の融点（1500℃以上）と亜鉛の沸点の間に差があることから、重ね溶接は難しい[1]。その温度差によって、周囲の溶融金属が吹き飛ばされ、溶接欠陥が生じる。この問題を解決するために、重ね合わせた鋼板の間に0.1～0.2mm程度の隙間を開けて金属蒸気を逃す経路を設けることにより、適切な接合状態を確保することが行われる[2]。

図1　6kWのマルチモードファイバレーザ「FEC6000M」の外観図。

しかし、固定治具によって製造工程やパーツ形状が制約されるため、0.1～0.2mmの隙間を精密に制御して、溶接品質を安定化させる処理は複雑である。本稿では、ファイバレーザ溶接によってさまざまな亜鉛めっき鋼板を溶接する、新しい接合技術を紹介する。

高いビーム品質とビームモード制御を備えたファイバレーザ

古河電気工業は10年以上前から、半導体レーザ、光ファイバ、そして同社が光通信分野に適用してきた融着技術を基に、産業用高出力ファイバの開発と販売を行っている。同社のファイバレーザ製品の標準的なビーム特性は、M^2が最大1.5kWのシングルモードで約1.06、ビームパラメータ積（Beam Parameter Product：BPP）が4kWで約1.7mm mrad、6kWで約3.0mm mradである（**図1**）。これらのファイバレーザは、独自構造を持つコンバイナ、安定したパーツ品質、ファイバコア径によって、優れたビーム品質を備えている。このビーム品質によって、高いパワー密度のレーザ光を一点に集光できるため、深い溶込み深さを達成することができる。

図2は、6kWのマルチモードファイバレーザで、さまざまな材料をビードオンプレート溶接した場合の溶込み深さを示したものである。溶接速度が

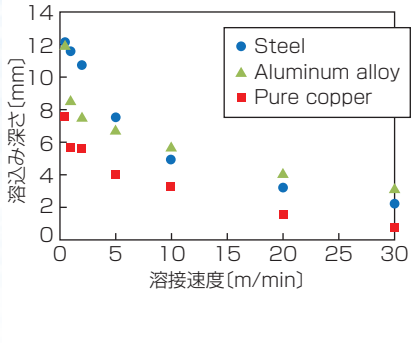

図2　6kWのマルチモードファイバレーザによる、鋼鉄、アルミ合金、純銅に対するビードオンプレート溶接の溶込み深さ。

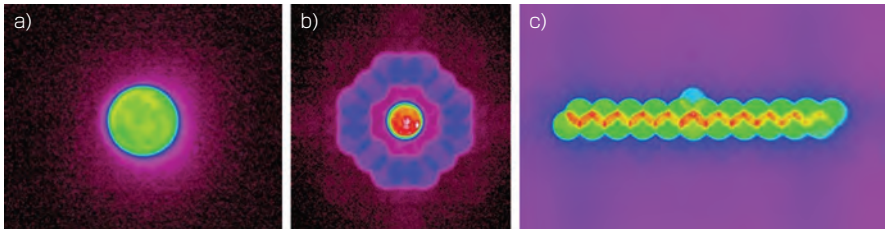

図3　従来型のシングルスポット(a)、センターとリングからなる形状(b)、ライン形状(c)のビームモード。

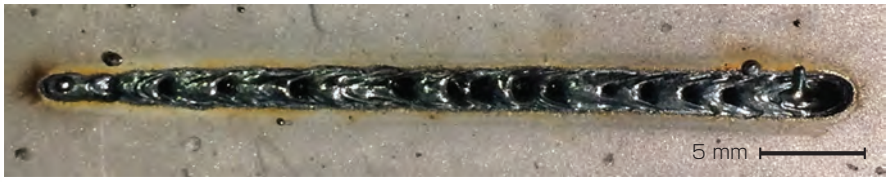

図4　従来型のシングルスポットビームで、出力電力3 kW、溶接速度1.5m/minで、厚さ1mmの亜鉛めっき鋼板を隙間ゼロで重ね溶接した結果。

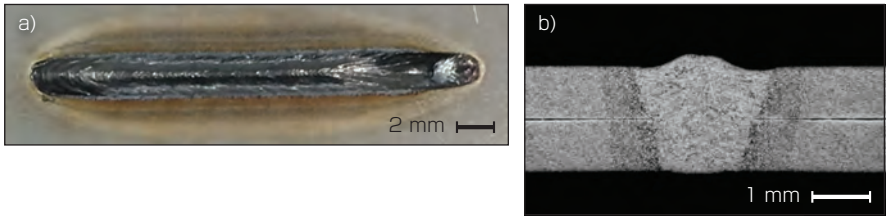

図5　LC³Wで、出力電力3kW、溶接速度1.5m/minで、厚さ1mmの電気亜鉛めっき鋼板を溶接した場合の溶接ビードの様子(a)と断面図(b)。

0.5m/minの低速領域では、溶込み深さは鋼鉄とアルミニウムで約12mm、純銅で7.5mmだった。溶接速度が10mm/minの比較的高速な領域では、鋼鉄とアルミニウムで約7mm、純銅で約4mmの溶込み深さが得られた。

この高いパワー密度は、溶接の高速加工と低消費電力に寄与するが、必ずしもすべての加工で好ましい結果が得られるとは限らない。一点に集光されたレーザビームは、加工点において材料の急激な温度変化と溶融池内の激しい対流を引き起こし、溶融池の安定性が低いと、スパッタやブローホールなどの溶接欠陥につながる。したがって、視覚的な検査とスパッタを除去する処理が必要である。多くの生産工程でファイバレーザが使われるため、このような溶融欠陥を抑制する技術には高い関心が寄せられている。

古河電工は古河電子と共同で、対象材料に対するパワー密度を精密に制御することのできる、ファイバレーザのためのビームモード制御技術を開発した。この技術は光学構成が非常にシンプルであるため、ガルバノスキャナを含えいかむ加工ヘッドに簡単に搭載できる。また、各点に割り当てられるエネルギー分配比は自由に設計できるため、組み合わせは無限である(**図3**)。ここで用いられるビームモード制御用光学部品は、数キロワットのレーザ出力に対する十分な耐性を備えており、従来のレンズと同じように取り扱うことができる。

亜鉛めっき鋼板の隙間ゼロでの溶接

古河電工は、亜鉛めっき鋼板を隙間ゼロで連続的に溶接可能なレーザ技術「LC³W®」(Laser Continuous, Close Contact Welding、エル・シー・キューブ・ウェルディング)を開発した。**図4**は、

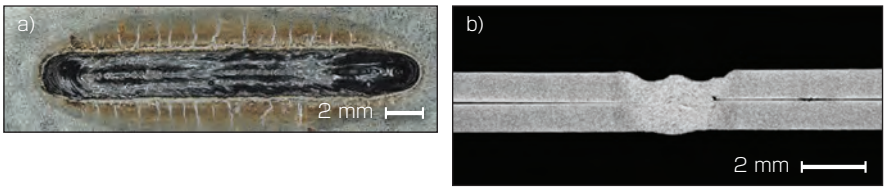

図6　LC³Wで、出力電力4kW、溶接速度1.5m/minで、厚さ1mmの非合金化溶融亜鉛めっき鋼板を溶接した場合の溶接ビードの様子(a)と断面図(b)。

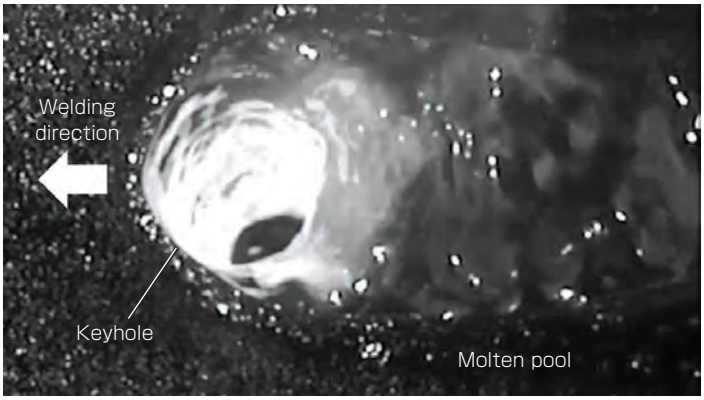

図7　LC³Wによって形成されるキーホールの高速度カメラ画像。

従来のシングルスポットビームで亜鉛めっき鋼板を溶接した場合の溶接ビードの様子である。溶接条件は、レーザ出力3 kW、溶接速度1.5m/minだった。この結果から、2枚の亜鉛めっき鋼板の重ね合わせ部分からの亜鉛蒸気によってスパッタが発生し、ボイド(空洞)の原因となったことが推察できる。

LC³W®は、特殊なビームモードとガルバノスキャナによるビーム振動により、数種類の亜鉛めっき鋼板を隙間なく重ねて溶接するのに有効であることが実証されている。**図5**は、レーザ出力3kW、溶接速度1.5m/minで、厚さ1mmの電気亜鉛めっき鋼板(めっき付着量：20g/m²)の重ね溶接を行った場合の溶接ビードと断面図の様子である。

図6は、レーザ出力4kW、溶接速度1.5m/minで、厚さ1mmの溶融亜鉛めっき鋼板(めっき付着量:60g/m²)の重ね溶接を行った場合の溶接ビードと断面図の様子である。それぞれの亜鉛めっき鋼板に対し、LC³W®の効果を明確に示すために、溶接速度を一定に保った。どちらの結果も、安定したビード外観が達成可能であることを示しており、溶接断面図に致命的なボイドは見られなかった。LC³W®は、めっきの付着量と種類に応じてビームモードとビーム振動条件を変更することにより、溶融池の挙動を正確に制御する。

図7は、LC³W®のキーホールの高速度カメラ画像である。放出される亜鉛蒸気によって溶融池に大きな穴が開けられている。ビームモードとビーム揺動条件が適合しない場合、亜鉛蒸気の逃げ道が十分に確保されず、溶融池の飛散が生じる。また、過剰な熱エネルギーが亜鉛めっきに残ると、新しい亜鉛蒸気が溶接領域内部に生成されて、ボイドが形成される。したがって、亜鉛蒸気の逃げ道を設け、レーザの入力エネルギーを制御することが重要である。

特に合金化溶融亜鉛めっき鋼板は、電気亜鉛めっき鋼板や非合金化溶融亜鉛めっき鋼板と比べてプロセスウィンドウが非常に狭い。そのため、鋼板の厚さと亜鉛めっき量に応じて溶接条件を精密に調整する必要がある。古河電工はアプリケーションラボにおいて、こうした材料を含めた最適な溶接条件の研究に取り組んでいる。

その他の応用分野

古河電工は、ファイバレーザの高いビーム品質によって形成されるビームモード、レーザ出力、加工速度と対象材料を適合させることによって、これまでは難しかった加工に成功している。例えば、ステンレス鋼と純銅では加工特性はまったく異なる。ステンレス鋼は、レーザ光の吸収率が高く、1μmのファイバレーザで比較的簡単に加工できるのに対し、純銅は、レーザ光の吸収率が10%未満で熱伝導率が高いために、レーザ加工が非常に難しい材料だからである。加工特性が異なる材料に対し、焦点に形成されるビームモードの配置形状、距離、エネルギー分配比を自由に変更できることが望ましい。同じ材料であっても、求められる溶込み深さや加工速度が異なる場合

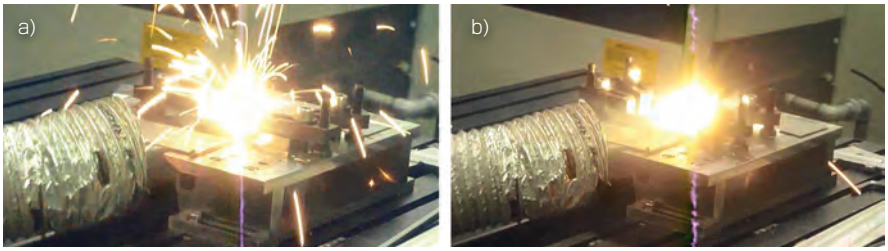

図8　従来のシングルスポットビーム(a)とモード制御技術(b)による、ステンレス鋼のビードオンプレート溶接時のスパッタの様子。

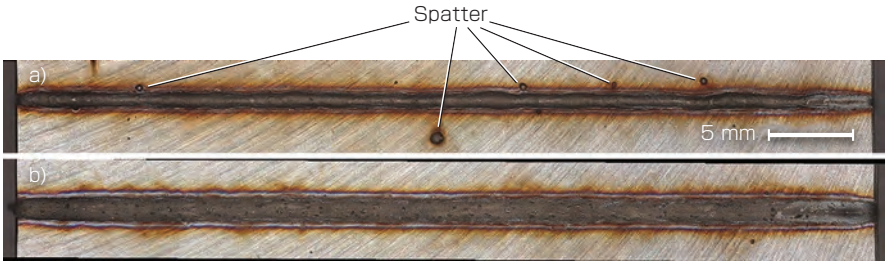

図9　従来のシングルスポットビーム(a)とビームモード制御技術(b)による、ステンレス鋼の溶接ビードの様子。

図10　従来のシングルスポットビーム(a)とビームモード制御技術(b)による、純銅の溶接ビードの様子。

は、条件に合った形状にビームモードを変更する必要がある。

図8は、ステンレス銅に対する従来型のシングルスポットビームによるビードオンプレート溶接と、ビームモード制御技術によるビードオンプレート溶接を示している。**図9**は、その溶接ビードの様子である。従来型のシングルスポットでは多くのスパッタが発生しているのに対し、ビームモード制御を適用した場合はスパッタの発生が劇的に抑制されている。溶接ビードを比べても、シングルスポット溶接では、スパッタの付着と不安定な溶接ビードが見てとれるが、ビームモード制御を適用した場合は、スパッタの付着が抑えられ、ビード形状が安定しているのがわかる。純銅溶接に対して、同社のファイバレーザが実現する高パワー密度を活用して、ステンレス鋼とは異なるビームモードを適用し、材料へのエネルギー吸収の高効率化を図った。その結果、ステンレス鋼と同程度に安定した溶接ビードを形成することができた(**図10**)。

古河電工のビームモード制御技術は、ビームモード設計の自由度によって応用分野を拡大している。例えば、この技術は、接合が難しい材料の溶接、広い領域の焼結、複数箇所の同時穴あけに適用されている。生産ラインに導入する際には、顧客の材料、用途、加工条件、タクトタイム(顧客の平均要求時間)に合わせてビームモードを最適化することが必要である。これに向けて、日々開発を進めている状況にある。

古河電工は、高い信頼性と高いビーム品質を備えた産業用ファイバレーザを提供している。また同社は、加工技術や周辺技術によって顧客にソリューションを提案していきたいと考えている。

参考文献

(1) M. Uchihara, J. Jpn. Weld. Soc., 77, 8, 10–18 (2008).
(2) S. Yang et al., Weld. J., 92, 197–204 (2013).

著者紹介

茅原崇、西井諒介、安岡知道、繁松孝はすべて、古河電気工業に勤務。e-mail: takashi.kayahara@furukawaelectric.com
URL: www.furukawa.co.jp/en

ILSJ