eモビリティを支えるレーザ

クラウス・クライン、ファルク・ナーゲル

調整可能なリングモードを搭載するファイバレーザによる銅溶接。

本稿では、Adjustable Ring Mode（ARM）技術を搭載し、高輝度のセンタービームを有する新しい種類のファイバレーザによる銅溶接試験で得られた、優れた結果を紹介する。この実験において、ARMを搭載する高輝度レーザは、卓越した溶接品質に加えて、さまざまな溶接速度において商用提供されているキロワットレベルのグリーンレーザよりも深い溶け込み深さを達成した。この結果は、この技術によってファイバレーザのコスト、信頼性、実用上のメリットのすべてが、銅溶接という要件の厳しい処理に適用できる可能性を示している。

eモビリティ製造

eモビリティ製造の急速な成長が、銅溶接ソリューションに対する需要の大幅な高まりを促進する、主要要因となっている。銅溶接の需要が高まっているのは、銅が他の金属と比べて、多くの望ましい電気的性質、熱特性、機械的性質、コスト上のメリットを備えるためである。

しかし、高い導電率と熱伝導率という、eモビリティに対して理想的な銅の性質は、従来のファイバレーザによる銅溶接を困難にする要因でもある。具体的に説明すると、銅はその電気的性質に基づき、ファイバレーザの近赤外波長に対して高い反射率を示す。また、その優れた熱伝導率により、材料を溶融して溶接処理を開始するために、大量のレーザエネルギーを入力することが必要になる。

その結果、従来のファイバレーザで銅を溶接するには通常、最初に材料を溶融するための非常に高い出力密度が必要になる。しかし、この「力任せな」やり方では、溶接処理は不安定になり、加工面の些細なばらつきに対して非常に過敏になってしまう。特に、局所的に表面が酸化していたり、表面構造が少し不均質であったりすると、プロセスが不安定になる可能性がある。それによって最終的に、溶接部の一貫性や表面品質が低下したり、ポロシティが生じたりする恐れがある。

固体グリーンレーザ

銅は、緑色域の吸収率が近赤外域よりも1ケタ近く高い。そのため、その波長で溶接処理を開始するほうが容易で、ファイバレーザよりも外因に影響されにくい安定した加工が行えると考えられている。その結果、高出力の固体グリーンレーザが、いくつかのメーカーによって活用されており、多くのメーカーによって評価されている状態にある。

しかし、高出力のグリーンレーザのeモビリティ製造への導入には、いく

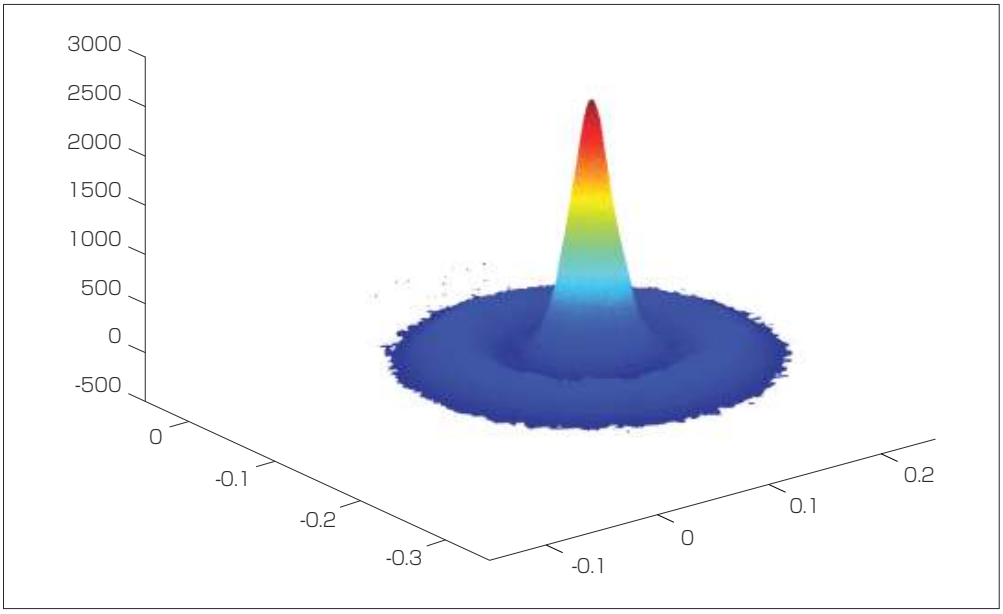

図1　加工面から1.5mm上を焦点としたARMレーザの加工面におけるビームプロファイル（中心1.5kW、リング2.5kW）。

つかの重大な実用上の問題が伴う。まず、赤外（IR）固体レーザ出力を緑色に変換するために用いられる周波数2倍化プロセスは効率が低く、数キロワットの出力レベルでかなりの量の廃熱が生成される。これにより、水冷ヒートシンクや大量の冷却水が必要になる。また、電力消費によって、運用コストも比較的高くなってしまう。

緑色光のビームデリバリにも、いくつかの問題が伴う。特に、ビームデリバリに用いられる標準的な光ファイバは、緑色光によってIRよりも簡単に暗くなるため、耐用年数が短くなる。緑色光用の特殊ファイバは、この問題を克服できるが、標準的なものよりもコストが高く、入手もしにくい。この暗くなる現象は、ファイバが長くなると増大する。そのため、現時点でファイバ長は10mまでに制限されており、それによって製造環境におけるファイバ配置の柔軟性が低下する。

HighLight ARMファイバレーザ

ファイバレーザは固体グリーンレーザよりも電気効率がはるかに高いため、消費電力が低く、生成される廃熱も少ない。従って、所有コストは低くなり、冷却も簡素化される。また、ファイバレーザは信頼性が非常に高く、そのIR出力は簡単にファイバ伝送可能である。このように、コスト、信頼性、実用上のメリットを他にはない形で併せ持つことから、ファイバレーザは多くの産業用途において選択されている。しかし、こうした望ましい性質を持つにもかかわらず、上述の問題が原因で、特に銅溶接には広く利用されていない。

米コヒレント社（Coherent）は数年前に、HighLightシリーズのARMファイバレーザを、従来技術では適切に対応できていなかった用途向けに提供開始した。一般的には、良好な溶接品質（スパッタやポロシティが少なく、亀裂が最小限）を得るために、出力の空間分布と加工面における出力密度を慎重に制御する必要のある処理が、そうした用途に当たる。典型的な例としては、亜鉛めっき鋼板のゼロギャップ溶接の他、パワートレイン部品のスパッタフリーでの溶接や、アルミニウム製ハングオンパーツをフィラーワイヤを使わずに亀裂なく溶接する処理が挙げられる。

これらのレーザに採用されている技術については、Industrial Laser Solutions誌の過去の記事で解説されている（http://bit.ly/ILS-ARM1とhttp://bit.ly/ILS-ARM2を参照のこと）。簡単に説明すると、センタースポットとそれを囲むリングの同心円状のレーザ光からなる出力ビームが活用されている。センターとリングの出力は個別にオンデマンドで調整、及び変調できるため、溶融プールの状態に応じた非常に慎重な制御が可能である。

この技術の最新イノベーションが、高い光強度と輝度を備えた低M2のセンタービームを生成する、ARMレーザである。高輝度のセンタービームによって、吸収率が比較的低い銅を簡単に溶融するために必要なエネルギーが供給される一方で、リングビームによってキーホールの安定化が促進されるため、銅溶接に特に有効である。その結果として、加工物の表面にばらつきがあっても、溶接処理が一貫した形で開始されて維持されるため、従来のファイバレーザにあった制約が克服される。

銅溶接の結果

コヒレント社は、高輝度のセンタービーム（直径：22μm）とリングビーム

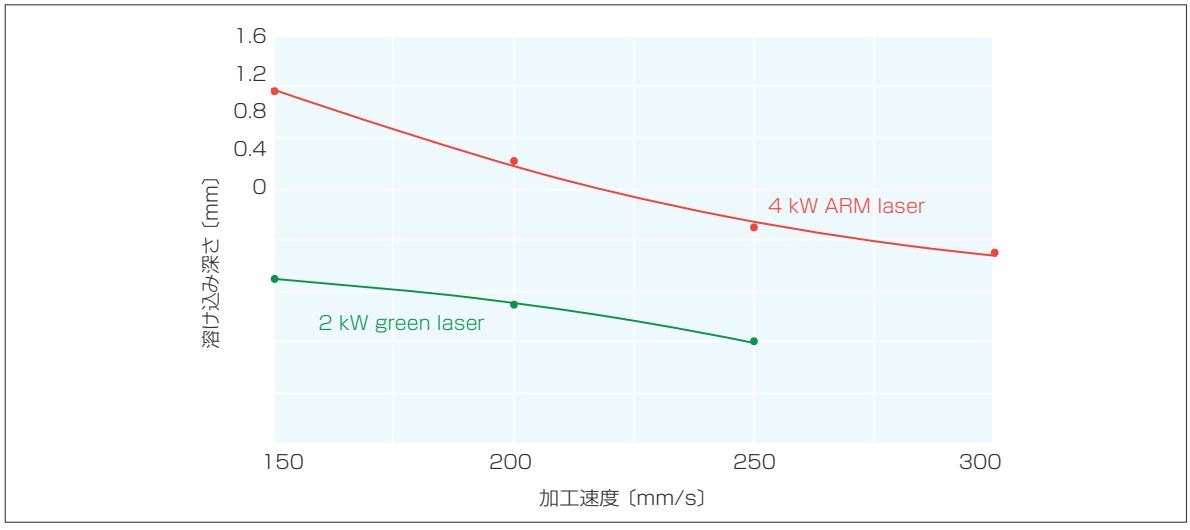

図2　厚さ2mmの銅の溶け込み深さでの、4kWの高輝度ARMレーザと2kWのグリーンレーザの加工特性比較。

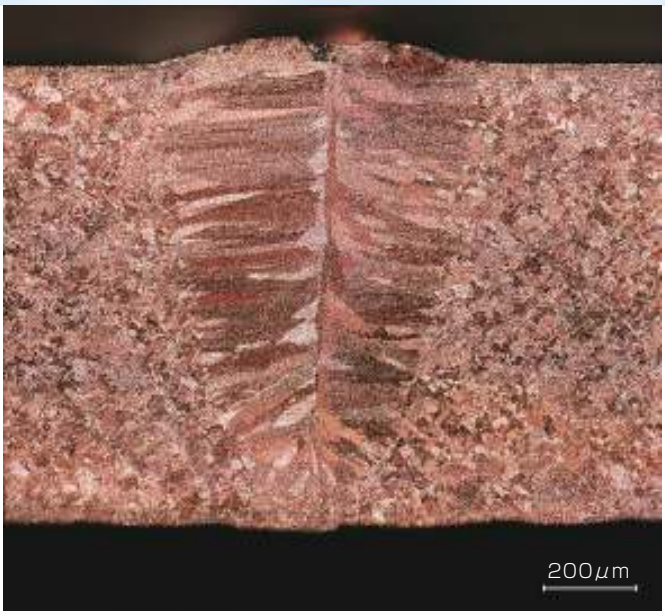

図3　高輝度赤外ARMレーザにより、出力3.5kW、溶接速度300mm/sで生成した銅溶接部の断面図。

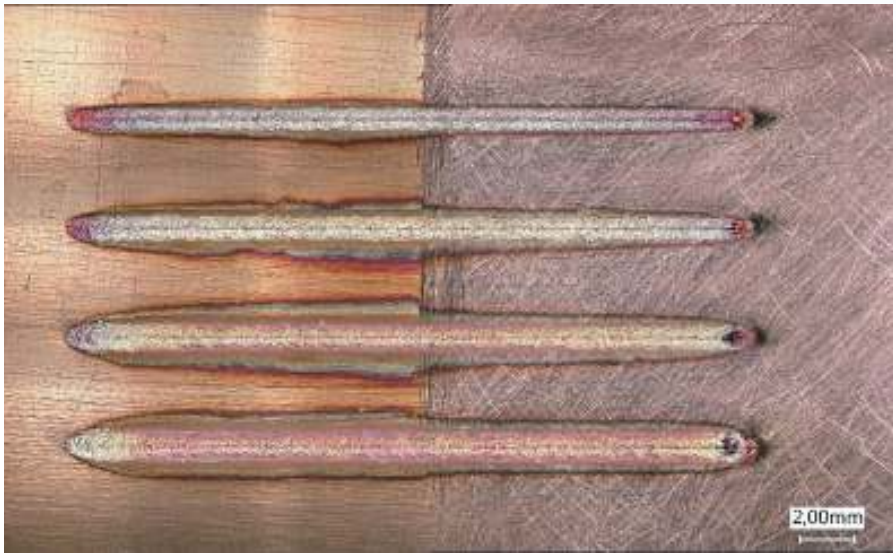

図4　4kWのARMレーザをさまざまな速度（上から順に300～150mm/s）での試験。銅表面の滑らかな部分でもざらついた部分でも、一貫した溶接ビードが得られた。

（内径：100μm、外径170μm）を備えるARMレーザを使用した一連の試験によって、銅溶接の評価を行った。レーザの集光には、倍率1.4倍のリモート加工ヘッドを使用し、シールドガスとして窒素を使用して、クロスジェットを適用した。溶接した材料は、純銅である。すべての試験において、レーザ出力は4kWで、センターは1.5kW、リングは2.5kWだった。初期試験では、加工面から1.5mm上をビームの焦点にした場合に、最適な結果（溶け込み深さ、スパッタ、表面品質のバランスが最良）が得られた。**図1**は、この条件のビームプロファイルを示したものである。

図2は、厚さ2mmの銅の溶け込み深さを、上述の条件下での速度の関数として示したグラフである。比較のために、2kWのグリーンレーザも同じ条件下で試験した（これは、現時点で入手可能な最高出力のグリーンレーザである）。IR ARMレーザは、広い範囲の溶接速度において、2倍の溶け込み深さを達成した。

図3は、溶接部の断面図である。最も重要な点は、この溶接部にボイド（空洞）がなく、均質な結晶粒生成と再結晶化、そして適切な溶け込み深さが示されていることである。

溶接結果が加工物の表面品質にどれだけ左右されるかについても調査した。表面の一部を滑らかに研磨し、別の一部にはざらつきを加えた状態で、連続溶接を行った。その結果（**図4**）、表面の仕上げ状態が変わっても、溶接品質に大きな違いはなく、安定したプロセスが得られることが明らかになった。

結論

本稿の試験結果は、コヒレント社の高輝度ARMレーザが、eモビリティにおける要件の厳しい銅溶接に対する、有効なソリューションであることを実証するものである。溶け込み深さと加工速度は、現在の製造要件に合致するか、それを上回っている。また、ARMレーザは、表面品質によって加工結果が左右されることがなく、ファイバレーザの銅への適用を制限する要因となっていたプロセスの不安定性の問題もない。卓越した信頼性と使いやすさに加えて所有コストが低いことから、非常に多くの産業用途で選択されてきたファイバレーザは今、銅溶接に対応する準備を整えた状態にある。

著者紹介
クラウス・クライン（Klaus Kleine）は、米コヒレント社（Coherent）のレーザアプリケーション担当ディレクター、ファルク・ナーゲル（Falk Nagel）は、独コヒレント・ロフィン社（Coherent-Rofin）の溶接エンジニア。e-mail: klaus.kleine@coherent.com URL: coherent.com

ILSJ