

# まわ 断 エンジンア!

## Blue-IR ハイブリッドレーザによる 純銅の高品質溶接\*



松本 暢 康\*\*

High Quality Pure Copper Welding by Blue-IR Hybrid Laser\*

by MATSUMOTO Nobuyasu\*\*

**キーワード** レーザ加工, ファイバレーザ, 青色ダイレクトダイオードレーザ, 純銅溶接, 溶接品質

### 1. はじめに

近年、先進国を中心とした少子高齢化の深刻化を背景に工場の省人化・自動化が進められている。そのような動きにおいて、非接触・局所加熱・高速・高精度・低ひずみなどの特徴を持つレーザ加工は生産の高効率化を実現するソリューションとして注目を集めている。加工に用いられるレーザ光源はその発振原理によって波長やビーム品質は様々であるが、中でも近赤外の波長(1070nm)で発振するファイバレーザは大出力、高ビーム品質、ファイバデリバリ可能な使いやすさ等の特徴から、生産ラインへの導入が急速に進んでいる。

また、一方で持続可能な開発目標(SDGs)に掲げられているCO<sub>2</sub>排出量ネットゼロ達成に向けて、電気自動車の導入に注目が集まり、活発な技術開発が進められている。この電気自動車の製造プロセスにおいて、特に重要となるのがバッテリーやモータ等に用いられる純銅の溶接技術である。

上記のような背景から、純銅部材のレーザ溶接技術への需要が高まっている。本稿では、純銅のレーザ溶接における課題と、課題解決に向け古河電工が新規開発したBlue-IRハイブリッドレーザによる純銅の高品質溶接について概説する。

### 2. 古河電工の加工用レーザ技術

#### 2.1 ファイバレーザ溶接技術

弊社では励起用半導体レーザや特殊ファイバ等の技術を基盤として、ファイバレーザの高出力化や高ビーム品質化を実現してきた。現在、近赤外の波長(1070nm)で発

振するシングルモードファイバレーザ1.5kW、マルチモードファイバレーザ12kWまでを製品化している。弊社は、通信分野で培われた高い部品品質と独自コンパイクナ構造により、各出力において従来のファイバレーザよりも小さなファイバコア径を実現し、より安定且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。

シングルモードファイバレーザは、ファイバコア径 $\phi 14\mu\text{m}$ 、光出力端における典型的なビーム品質はBPPで $0.36\text{mm}\cdot\text{mrad}$  ( $M^2=1.06$ )と $M^2$ が1に近く良好な集光特性を有している<sup>1)</sup>。

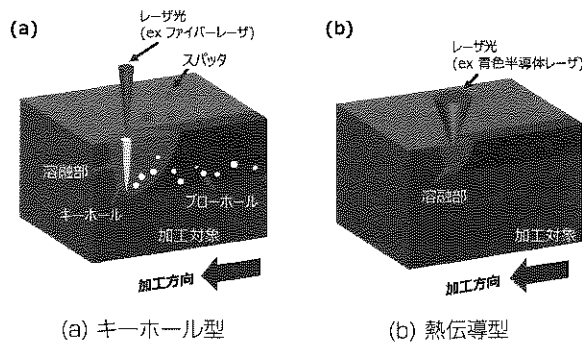
また、マルチモードファイバレーザのファイバコア径はレーザ出力毎にラインナップを取り揃えており、ファイバコア径 $\phi 50\mu\text{m}$ で出力4kW、 $\phi 80\mu\text{m}$ で出力9kWおよび $\phi 100\mu\text{m}$ で出力12kWまで対応している。ファイバコア径 $\phi 50\mu\text{m}$ 、 $\phi 80\mu\text{m}$ および $\phi 100\mu\text{m}$ のマルチモードファイバレーザの典型的なビーム品質は、BPPで $1.7\text{mm}\cdot\text{mrad}$  ( $M^2=5.0$ )、 $3.0\text{mm}\cdot\text{mrad}$  ( $M^2=8.8$ )および $3.5\text{mm}\cdot\text{mrad}$  ( $M^2=10.3$ )である。

このようなファイバレーザにおけるビーム品質の高さは、より高いパワー密度での加工を可能とする。その結果、加工対象において局所的な加熱によって溶融・蒸発を起こし、蒸発反張力などに起因する鋭い空隙(キーホール)を形成する。これにより、図1(a)のようにレーザ加工特有の鋭く深い溶け込みのいわゆる「キーホール型」の溶接を実現する。

一方で、ファイバレーザのような近赤外光によって銅を溶接する場合、この波長領域における銅の光吸収率は5%程度と非常に低く(図2)、銅の溶融を起こすには、より高密度エネルギーの照射が必要となる。一方、ひとたびキーホールを形成すると、照射されたレーザ光がキーホール内部で多重反射を起こすことにより光吸収率が大きく変化することも報告されており<sup>2)</sup>、このようなプロセス中の吸収率の急激な変化が溶融池の湯流れやキーホールの形成を不安定にし、溶接欠陥の発生につながると考

\*原稿受付 2020年12月18日

\*\* 古河電気工業株式会社 Furukawa Electric Co., Ltd.



(a) キーホール型

(b) 熱伝導型

図1 レーザ加工における典型的な溶融モード

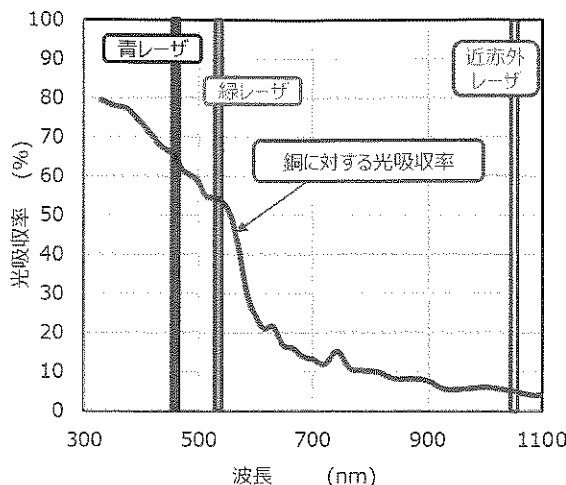


図2 純銅の光吸収率の波長依存性

えられている。そのため、ファイバレーザによる銅の安定溶接は難題とされてきた。

上記課題に対し、弊社では銅溶接における入熱制御という観点から、ビームモード制御技術<sup>3,4)</sup>の開発を進めてきた。さらに、近年では入熱の制御性の高さから、可視光レーザによる純銅溶接に注目が集まっている。これについて次節で述べる。

## 2.2 加工用可視光レーザとその課題

前述のように、近赤外領域のレーザでは難しいとされてきた銅の高品位溶接を実現するための解決策として開発が進められているのが、銅への吸収率の高い青や緑などの可視光レーザを用いた溶接技術である。図2からわかるように、例えば450nmにおける銅の光吸収率<sup>5)</sup>は、1070nmと比較して約10倍以上高い値をもち、非常に効率よく入熱することが可能である。

一方、青色レーザとして現在候補にあるのは、例えばGaN系青色半導体レーザが挙げられるが、半導体レーザは半導体基板と平行に作られた活性層から光を出射する発振構造であり、ファイバレーザと同等のビーム品質を得ることが難しく、ビームデリバリに用いる光ファイバは、100 $\mu$ m～1mm程度のコア径を持つマルチモードファイバを用いるのが通例である。そのため、例えば集光ビーム径を100 $\mu$ m以下の微小スポットに集光し、高いパワー密度によってキーホールを形成することで深溶け込みを

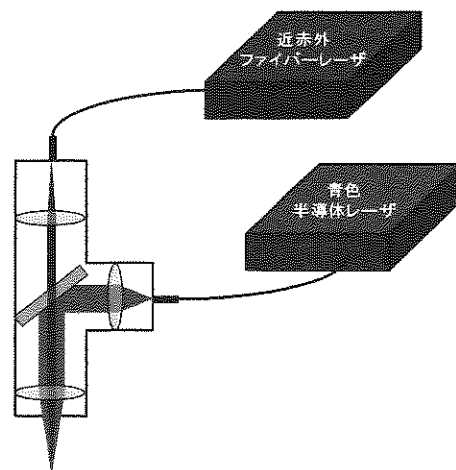


図3 Blue-IRハイブリッドレーザの構成例

得る図1(a)のような「キーホール型」の溶接は苦手としている。特に熱伝導率の高い銅などの金属材料では、吸収した熱エネルギーがワーク全体へと広がりやすく、溶け込み深さへの課題は顕著となる。そのため、溶接可能な加工対象の厚さも他の金属に比べ限定的である。また、同じ加工出力で、より深い溶け込みを得ようとする加工速度は極端に遅くなってしまふといった課題が挙げられる。

## 2.3 Blue-IRハイブリッドレーザの開発

弊社は、GaN系の発光デバイスを世界で初めて実用化したことで知られる日亜化学工業株式会社の最先端の光半導体素子技術に、当社の持つレーザの高密度合波技術<sup>6)</sup>を組み合わせ、金属加工向け高出力青色ダイレクトダイオードレーザを実現した。また、高い加工品質・深い溶け込み、加工速度の両立を目指し、この青色ダイレクトダイオードレーザ技術に、これまで弊社で培ってきたファイバレーザ技術<sup>1)</sup>および空間的ビーム制御技術<sup>3,4)</sup>を組み合わせることでBlue-IRハイブリッドレーザ技術を開発した。図3に1kWシングルモードファイバレーザと150W青色半導体レーザとを組み合わせたBlue-IRハイブリッドレーザの加工システム構成例を示す。

これによって銅溶接において溶接品質および溶け込み深さ(または加工速度)を両立するといった、これまでにないソリューション提案が可能となるレーザ溶接技術を実現した。さらに、日亜化学工業と共同開発した青色レーザダイオードモジュールによって得られるレーザ光は、開口数(NA)が0.22と小さく、その結果、従来青色レーザでの適用は難しいとされてきたガルバノスキャナによる溶接が実現可能となる。本溶接技術の特性および加工事例について次章以降で紹介する。

## 3. Blue-IRハイブリッドレーザでの銅溶接

レーザ加工中に発生するスパッタやブローホールは、レーザ照射部に生成するキーホールとその周辺の溶融金属の湯流れが大きく影響するといわれている<sup>7)</sup>。また、先に述べたように、キーホールの形成によって光吸収率が

大きく変化するため<sup>2)</sup>、入熱コントロールの観点においても、溶融部でのキーホールの安定した形成が高品質溶接を達成する上で重要な要因となる。

図4にファイバレーザおよびBlue-IRハイブリッドレーザでの銅加工時の表面その場観察像を示す。キーホールサイズはどちらの加工においても大きな変化がないのに対し、溶融池サイズはBlue-IRハイブリッドレーザのほうがキーホールを中心に広がりを持っていることがわかる。すなわち、吸収率の高い青色レーザによる効果で、加工方向前方にて安定溶融を生じさせるとともに、レーザ照射点を中心に溶融池を広げる役割を果たし、加えて高ビーム品質であるファイバレーザ由来のキーホールが安定して形成されることで高品質加工と深溶け込みの両立を達成したといえる。

加工時の溶融断面をその場観察するため、図5に示すようにワーク端部にガラスを張り付け、ワーク-ガラス境界部にレーザを照射し、側面から高速度カメラで撮影することで溶融部の擬似的な断面を観察した。図6に観察結果のスナップショットを示している。図より、Blue-IRハイブリッドレーザによる純銅加工ではファイバレーザのみでの加工に比べ、溶融部最下端の高さが安定しており、上述したキーホールの安定した形成が達成できていることを確認することができる。このように、Blue-IRハ

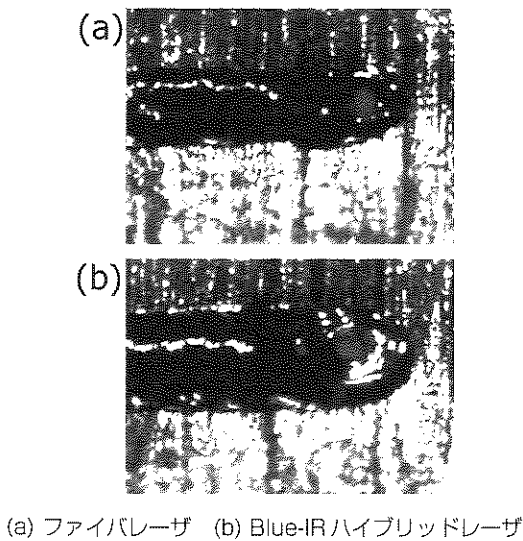


図4 純銅加工のその場観察像

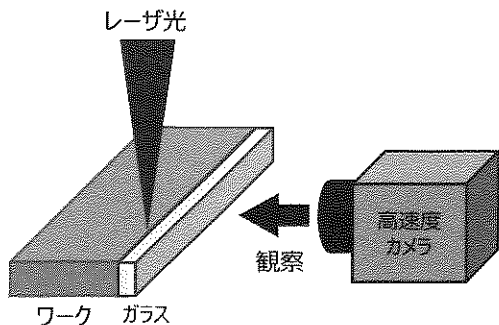
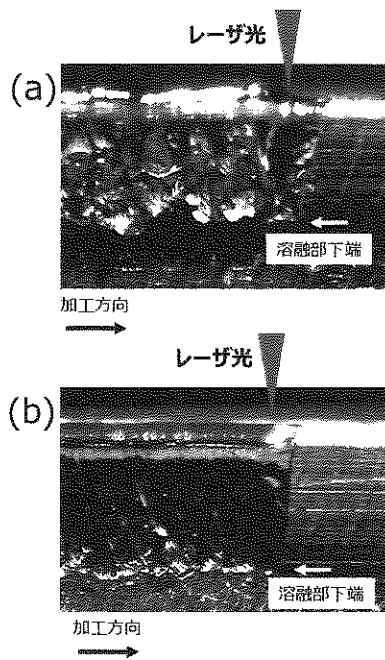


図5 溶融池の疑似断面観察概略図

イブリッドレーザは純銅の溶接に対する最適なソリューションの提供が可能であるといえる。さらにBlue-IRハイブリッドレーザでは各レーザ加工条件を個別に設定することで、様々な加工対象に応じた溶接ソリューションの提供が可能であるという利点を持つ。

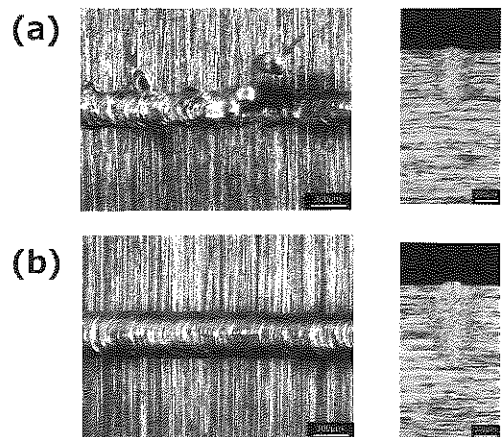
#### 4. Blue-IRハイブリッドレーザでの加工事例

図7に、ファイバレーザ並びにBlue-IRハイブリッドレーザで板厚2mmの純銅板材にビードオン溶接した結果を示す。青色レーザの有無以外の溶接条件はすべて同条件としている。ビード表面写真から明らかなように、Blue-IRハイブリッドレーザを用いることで、ファイバレーザのみでの溶接における課題であったビードの乱れやスパッ



(a) ファイバレーザ (b) Blue-IRハイブリッドレーザ

図6 純銅加工の溶融断面のその場観察



(a) ファイバレーザ (b) Blue-IRハイブリッドレーザ

図7 純銅のビードオン加工結果

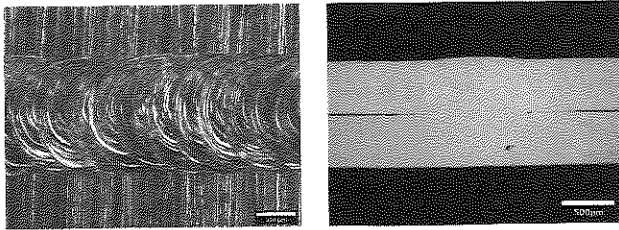


図8 Blue-IRハイブリッドレーザーによる銅板重ね溶接例

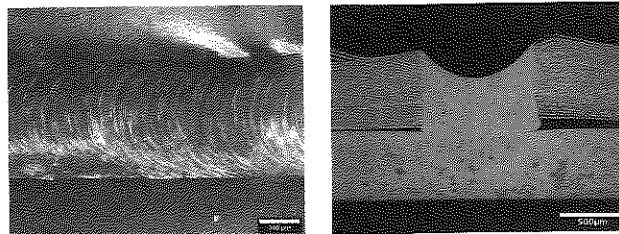


図9 Blue-IRハイブリッドレーザーによる箔・集電体溶接例

タの発生を抑制し、高品質溶接が得られることがわかる。さらにワーク断面写真より、可視光レーザー単体では得られないアスペクト比の高い深溶け込みを実現していることも明らかである。

さらに、前述したように本溶接技術に用いている青色ダイレクトダイオードレーザーは、従来技術に比べ集光性がよいことから、これまで青色レーザーでは難しいとされてきたガルバノスキャナを適用できるため、より自由度の高い溶接が実現可能となる。図8にBlue-IRハイブリッドレーザーによる板厚0.5mm純銅板材の重ね溶接断面写真を示す。ビードオン溶接時の結果と同様、深溶け込みと高い溶接品質の両立を果たしているのに加え、十分な溶接幅が得られていることもわかる。

リチウムイオン電池製造工程における集電溶接工程においても、従来技術に代わり、深い溶け込みに強みのあるレーザー加工の適用に注目が集まっている。一方で、集電溶接工程にファイバレーザーを適用した場合、急激な局所入熱により箔の破れのほか、スパッタやブローホールが発生が課題となる。特に導電部である本加工対象は、スパッタが予期しない箇所に付着することで電氣的短絡を引き起こす可能性があり、特に注意が必要である。

図9に集電部を模擬した50枚の銅箔と1枚の銅板の積層体を、Blue-IRハイブリッドレーザーを用いて溶接した結果を示す。表面および断面写真からわかるとおり、十分な溶接幅を確保しつつ、スパッタやブローホールなどの溶接欠陥の発生を抑制した高品質溶接を実現していることがわかる。

## 5. 結 言

本稿では、近赤外ファイバレーザーと青色ダイレクトダイオードレーザーを組み合わせることで、ファイバレーザー使用時に発生するスパッタなどの溶接欠陥を抑制しつつ、深い溶接深さが得られることを報告した。

今後も、レーザー加工における溶融凝固現象に対する理解を深め、その解明を進めるとともに、電池やモータ用途をはじめとする様々な銅部材やアルミ部材に対する溶接技術、更には異種金属の溶接技術などの開発を進め、現象の物理的説明に基づいた最適な溶接ソリューションを皆様にご提案していきたい。

## 参考文献

- 1) 安岡知道, 茅原崇, 西井諒介, 松永啓伍, 繁松孝: 高ビーム品質ファイバレーザー溶接とビームモード制御技術による加工欠陥抑制, 古河電工時報 第138号, (2019), 25.
- 2) Okamoto, Y., Nishi, N., Nakashiba, S., Sakagawa, T. and Okada, A.: Smart laser micro-welding of difficult-to-weld materials for electronic industry, Proc. of SPIE, 9351, (2015), 935102.
- 3) 茅原崇, 田邊猛, 安岡知道, 繁松孝: 溶接欠陥を抑制するファイバレーザー溶接技術の開発, 溶接技術, 67, 11, (2019), 57.
- 4) 安岡知道, 茅原崇, 酒井俊明, 繁松孝: ビームモード制御技術によるスパッタ低減, 第90回レーザー加工学会論文集, (2018), 59.
- 5) Spisz, Ernie W.: National Aeronautics and Space Administration, (1969).
- 6) Ishige, Y., Kaji, E., Katayama, E., Ohki, Y., Gajdáty, G. and Cserteg, A.: 120W, NA\_0.15 Fiber Coupled LD module with 125- $\mu$ m clad / NA 0.22 fiber by spatial coupling method, Proc. of SPIE, 10514, (2018), 105140M.
- 7) 吉田勝, 久場一樹, 宮田淳二, 上野彰大: レーザー学会産業賞を受賞して -次世代レーザービーム溶接機(LBW)(スパッタ抑制技術搭載モデル)-, レーザー研究, 48, 7, (2020), 369.