

# Blue-IRハイブリッドレーザの特長と純銅加工技術

## – Blue-IRハイブリッドレーザによる銅の高品質溶接 –

### Features of Blue-IR Hybrid Laser and Copper Processing Technique

#### – High Quality Copper Welding by using Blue-IR Hybrid Laser –

金子 昌充<sup>\*1</sup>  
Masamitsu Kaneko

松本 暢康<sup>\*1</sup>  
Nobuyasu Matsumoto

繁松 孝<sup>\*2</sup>  
Takashi Shigematsu

#### 〈概要〉

銅材料のレーザ溶接において、近赤外ファイバレーザのみでの加工と比して、加工品質を大きく改善できるBlue-IRハイブリッドレーザを開発した。青色レーザによる銅材料への効率的な入熱とファイバレーザによる局所的な入熱とを組み合わせることで、ファイバレーザのみでは困難な溶融池の安定化を図り、スパッタやブローホールといった加工欠陥の発生を抑制しつつ、深い溶込みが得られる溶接方法を実現した。

## 1. はじめに

持続可能な開発目標 (SDGs) に掲げられているCO<sub>2</sub>削減目標達成のため、世界各国の新車販売台数に占める電気自動車比率の増加や、内燃機関自動車から電気自動車への移行を加速するための法令整備など、自動車の電動化に対する機運が高まり、各OEMでの取組が加速している。それに伴って、電気自動車の機構部品であるモータや電池など、銅部材を多用する製品の需要が高まると共に、製造工程の革新も求められている。また、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・自動化に対する希求が高まっており、非接触・局所加熱・高速・高精度・低歪みといった特徴を持ったレーザ加工は、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。

このような背景のもと、純銅のレーザ溶接に対する期待が高まっているが、ファイバレーザの基本波である1000 nm近傍での銅の光吸収率が低いこと、また熱伝導率が高いため局所的に熱が溜まりにくいことなどから、溶込みの安定性や溶接品質などに課題があった。これらの課題に対し、古河電工では純銅の高品質溶接を実現すべく、可視光半導体レーザと近赤外ファイバレーザを組み合わせたBlue-IRハイブリッドレーザを開発し、従来のファイバレーザのみでの溶接に比して、スパッタの発生を低減し安定した深い溶込みの得られる溶接技術を確立した。

## 2. 銅材料のレーザ溶接

### 2.1 近赤外ファイバレーザでの銅加工とその課題

図1に銅の光吸収率の波長依存性を示す。この図から分かるように、近赤外域における銅材料の光吸収率は4～5%と非常に低い。したがって、照射された光のほとんどは反射されるため、溶融状態を得るためには大きな入熱が得られるように非常にパワー密度の高い光を照射する必要がある。一方で、一旦溶融すると、その光吸収率は10～20%まで上昇し<sup>1), 2)</sup>、溶かすために使われていた光エネルギーは過剰なエネルギーとなって

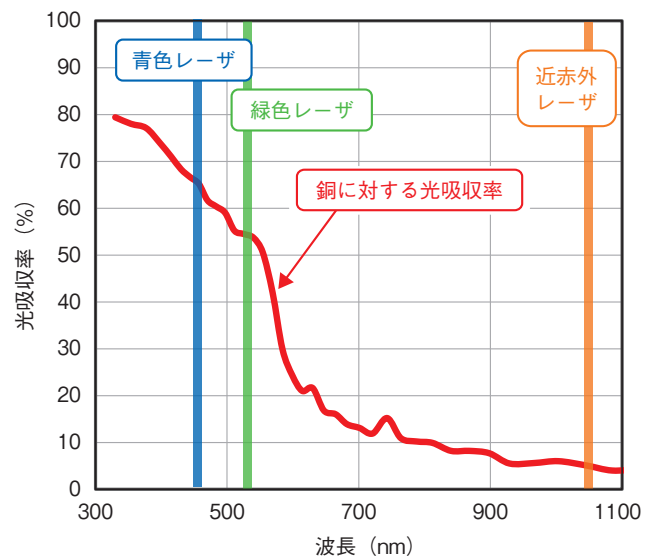


図1 銅の光吸収率の波長依存性  
Wavelength dependence of optical absorption for copper.

<sup>\*1</sup> 研究開発本部 インキュベータ統括部  
先進レーザ開発プロジェクトチーム

<sup>\*2</sup> 情報通信ソリューション統括部門 ファイナル製品事業部門  
産業レーザシステム部

加工点へ入射される。この過剰なエネルギーの投入によって溶融部では急激に温度が上昇し、銅の蒸発が生じ、その蒸発反跳力によってキーホールが形成されることとなる。このとき、金属蒸気の蒸気圧によってキーホールの形状が乱されることで、スパッタが発生すると考えられている。

また、銅の熱伝導率は400 W/mKと非常に大きいため、レーザ照射によって投入された熱量は、瞬時に周囲へと拡散していく。そのため、加工点での温度は乱高下を繰り返し、その結果、溶融状態は不安定となる。したがって、ファイバレーザのみで銅材料の加工を行った場合、深い溶込みが得られるものの、図2(a)に示すように表面のビードは乱れ、また図2(b)のように溶融深さが不均一な加工となる。

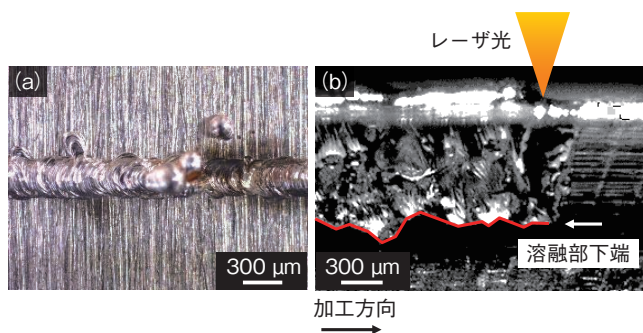


図2 IRレーザで加工した際の加工品質 (a)表面, (b)断面  
Processing quality by IR laser welding.  
(a) surface, (b) cross-section.

### 2.2 青色半導体レーザでの銅加工

図1から明らかのように、青色などの可視光レーザに対する銅の光吸収率は55~60%と、IRに対して著しく高い。そのため、IRよりも効率的な入熱が見込まれる。しかしながら、現状、ファイバレーザのように数十μm程度の微少なファイバコアへ入光することが難しく、結果としてビームスポットが広がり、熱伝導型溶融のモードが使われる。なお、可視光レーザでキーホール型溶融を得るためには、パワー密度を2~2.3 MW/cm<sup>2</sup>程度にする必要がある。

熱伝導型溶融の場合、表面で吸収された熱は等方的に伝導し、幅が広く浅い溶込みとなり、ファイバレーザでの加工のような深い溶込みを得ることは難しい。特に銅のような熱伝導率の高い材料では、吸収した熱エネルギーがワーク全体へと広がりやすく、溶込み深さへの課題はより顕著となる。図3に銅の加工における熱伝導型溶融とキーホール型溶融の模式図を示す。ここに示すように、可視光レーザでは安定だが溶融深さが浅い加工となり、ファイバレーザでは溶融深さは深いがスパッタやブローホールなどの欠陥を含む加工となる。

### 2.3 Blue-IRハイブリッドレーザでの銅加工

古河電工では、深い溶込みを得つつ品質の高い銅溶接を行うため、青色レーザとファイバレーザを組み合わせたBlue-IRハイブリッドレーザBRACE®を開発した(図4)。青色光源として、日亜化学工業(株)殿と共同開発したダイレクトダイオードレーザモジュールを搭載している。コンセプトは、青色レーザによる広範囲への効率的な入熱によって安定な溶融池を形成し、局所的な入熱の得意なファイバレーザで深い溶込みを実現するとい

うものである。このBlue-IRハイブリッドレーザと光学ヘッドあるいはガルバノスキャナを組み合わせる加工光学系を構築し、実際の加工が行われる。加工光学系の外観写真を図5に示す。

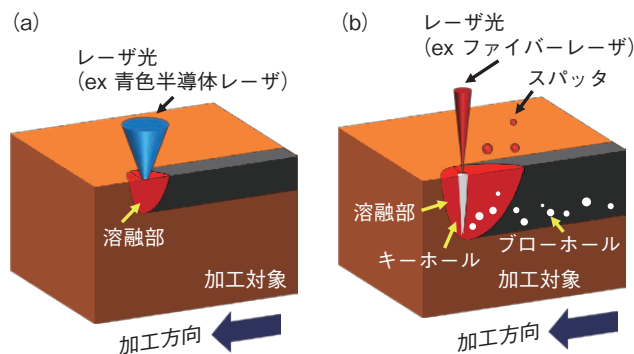


図3 銅の溶接加工の模式図  
(a)熱伝導型溶融, (b)キーホール型溶融  
Schematic drawings of the copper welding.  
(a) thermal conduction type, (b) keyhole type.



図4 Blue-IRハイブリッドレーザBRACE外観  
Blue-IR hybrid laser, BRACE.

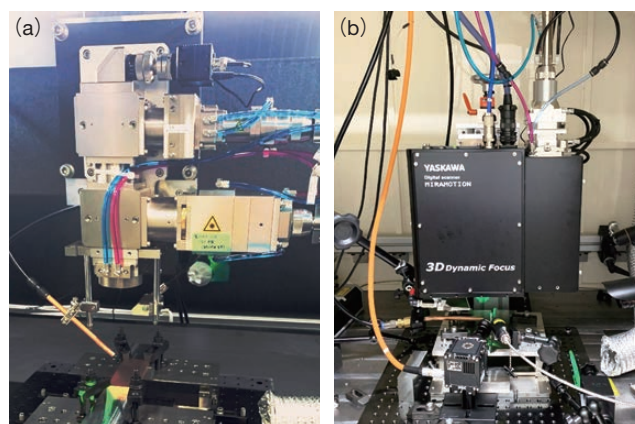


図5 レーザ溶接加工時の加工光学系外観 (a)光学ヘッド(レーザックス製), (b)ガルバノスキャナ(安川電機製)との組み合わせ  
Optical setup for laser welding combination with (a) an optical head (made by Laserx Inc.) and (b) a galvano scanner (made by YASKAWA Electric Corporation).



Blue-IRハイブリッドレーザによって銅のビードオンプレート加工を行った際の加工表面を図6に示す。図2(a)と比較すると明らかなように、乱れやスパッタ痕、ブローホールのない、非常に綺麗なビードが得られていることが分かる。図7は、銅板の端面にガラスを当てて端部近傍を加工し、擬似的に加工時の溶融断面を観察した結果のスナップショットである。ファイバレーザのみでの加工では図2(b)の様に溶融深さは不均一となるが、Blue-IRハイブリッドレーザでは安定な溶込みが得られており、溶融池下端深さがほぼ均一となっていることが分かる。

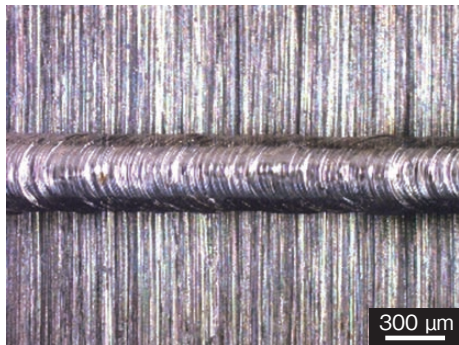


図6 Blue-IRハイブリッドレーザで銅板を加工した際の溶接ビード  
Welding bead on copper plate processed by Blue-IR hybrid laser.

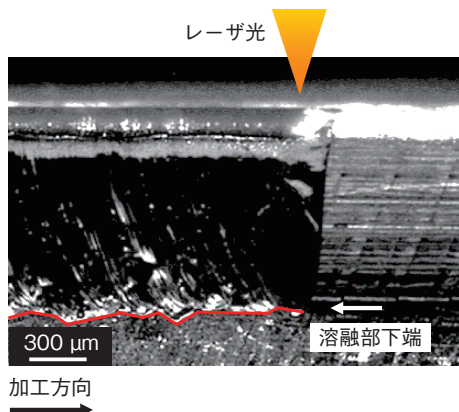


図7 Blue-IRハイブリッドレーザでの溶接加工断面のその場観察像  
The snapshot of in-situ observation of welding cross-section processed by the Blue-IR hybrid laser.

図8は加工時の表面溶融状態を高速度カメラで撮影した結果のスナップショットである。ファイバレーザでの加工と比較し、Blue-IRハイブリッドレーザでの加工においては、溶融幅が大きくなると共に溶融部の大きさも大きくなっていることが見て取れる。また、キーホール開口部について見てみると、開口部での反射光像の領域が大きくなっており、Blue-IRハイブリッドレーザでの加工において、キーホール開口径が広がっていることが分かる。このように開口部が広がることで、沸点よりも高温となって蒸発した銅のガスが抜けやすくなり、スパッタの低減に一役買っているものと考えられる。

図9は高速度カメラで撮影した加工時の溶融断面その場観察

映像を画像処理した結果であり、この図からファイバレーザでの加工とBlue-IRハイブリッドレーザでの加工の際の溶融池形状を推定することができる。図9(a)から分かるように、ファイバレーザでの加工では加工部先端から後端までが短く、鋭く深く溶融池が形成されている。一方で、図9(b)に示すBlue-IRハイブリッドレーザを用いた加工では、ファイバレーザでの加工によって形成される溶融池よりも長く尾を引いており、また溶融池前方部分も若干張り出し、溶融池全体が大きくなっていることが分かる。この様に溶融池が拡大することによって、キーホール内での材料の蒸発によって蒸発反跳力が発生した際に、その反跳力による湯流れの乱れを緩衝することができ、溶湯の安定化並びに溶融深さの均一性向上に繋がると考えられる。

以上のように、同軸照射された青色レーザの効果によって、溶融池が拡大し内部の熱対流が安定化すると共に、キーホール開口部の拡大によって金属蒸気をキーホール外へうまく排出し、キーホール内の蒸気圧を下げるができるため、Blue-IRハイブリッドレーザでの加工ではスパッタの発生が抑えられると共に安定した溶融池が得られ、高品質な加工ができる。

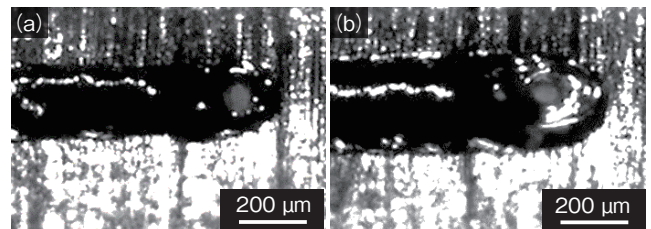


図8 高速度カメラで撮影した加工時の表面観察像  
(a)ファイバレーザでの加工、(b)Blue-IRハイブリッドレーザでの加工  
The snapshot of in-situ weld surface observation by high-speed camera.  
(a) fiber laser, (b) Blue-IR hybrid laser.

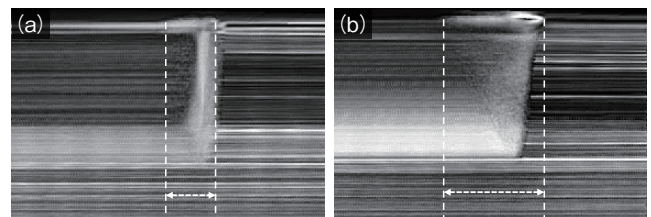


図9 加工断面のその場観察分析から得られた溶融池の断面形状  
(a)ファイバレーザでの加工の場合、(b)Blue-IRハイブリッドレーザでの加工の場合  
The cross-sectional shape of weld pool.  
(a) fiber laser, (b) Blue-IR hybrid laser.

図10に、ファイバレーザ及びBlue-IRハイブリッドレーザで、板厚2 mmの無酸素銅板を44 mmビードオンプレート加工した際に発生したスパッタの軌跡を可視化した写真を示す。なお、加工条件は、ファイバレーザ出力1 kW、青色レーザ出力150 W、加工速度200 mm/sである。図10(a)と図10(b)の比較から明らかなように、Blue/IRハイブリッドレーザでの加工では、スパッタの発生が大幅に低減しており、ファイバレーザでの加工に対して数分の一に抑えられている。

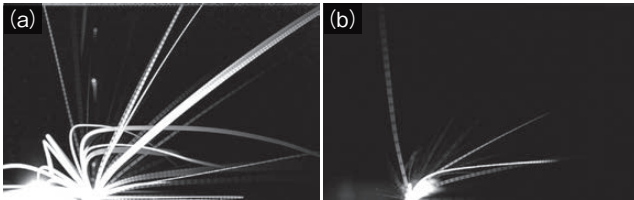


図10 銅の溶接加工時に発生するスパッタ軌跡の投影  
(a)ファイバレーザーでの加工, (b)Blue-IRハイブリッドレーザーでの加工  
Trajectories of spatter generated in copper welding.  
(a) fiber laser, (b)Blue-IR hybrid laser.

## 参考文献

- 1) Miller, J.C.: Optical Properties of Liquid Metals at High Temperatures, Phil. Mag., 20-168, (1969), 1115.
- 2) Yilbas, B.S., Danisman, K., Yilbas, Z.: Measurement of temperature-dependent reflectivity of Cu and Al in the range 30-1000°C, Meas. Sci. Technol., 2, (1991), 668.

## 3. おわりに

本稿では、銅材料のレーザー溶接について概説し、Blue-IRハイブリッドレーザーによって溶融池が安定化し、近赤外ファイバレーザーでの加工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。

古河電工では、今後も、レーザー加工における溶融凝固現象について理解を深め、その解明を進めると共に、電池やモータ用途をはじめとする様々な部材に対する溶接技術の開発を進め、現象の物理的説明に基づいた最適な加工ソリューションを顧客の皆様にご提案していきたい。