

ファイバレーザを用いた銅の高品質加工

High Quality Processing of Copper Using Fiber Lasers

松永啓伍*
Keigo Matsunaga村山太郎*
Taro Murayama

〈概要〉

ファイバレーザは高いビーム品質や高いパワー密度といった特長から、高速・低熱影響の加工が可能であるという特長を持つ。一方で、銅はファイバレーザの発振波長に対する反射率の高さや熱伝導率の高さから、安定した溶接が難しい材料である。古河電工ではレーザを高周波数で変調して照射する超高速パルス波形制御技術と、集光点でのビーム強度分布を精密に制御可能するビームモード制御技術を用いて、ファイバレーザによる銅材の高品質加工に成功した。

1. はじめに

カーボンニュートラル(脱炭素化)の実現に向け、温室効果ガスの削減に向けた活動が世界中で進められている。自動車業界においては、従来のガソリン車から電動車(xEV)にシフトする動きが加速している。xEVの普及には主要構成要素であるバッテリーの高容量化、モータの小型化が必須であり、その電極や巻線として使用される銅材の精密・高品質加工が求められている。

一般的に、ファイバレーザは高いビーム品質や高パワー密度といった特長から、被加工物に対して局所的に深い溶け込みを得ることができ、加工部周辺への熱影響を抑えた加工ができると言われている。しかし、銅はファイバレーザの波長である赤外光に対する反射率の高さや熱伝導率の高さから、安定した加工が難しい材料である。

古河電工ではバッテリーとモータの製造工程に注目し、銅材に対する革新的なレーザ加工技術の開発を進めてきた。本稿では、古河電工のファイバレーザ製品について紹介した後、バッテリーの電極に使用されている銅箔の切断加工に有効な超高速パルス波形制御技術と、銅材の重ね溶接や巻線の溶接に有効なビームモード制御技術について加工アプリケーション事例とともに報告する。

2. 古河電工のファイバレーザ紹介

ファイバレーザは、ビーム品質が高く数十 μm の非常に小さな径に集光することができるシングルモードファイバレーザと、そのシングルモードファイバレーザを複数台結合して大出

力にしたマルチモードファイバレーザに大別できる。古河電工では1.5 kWまでのシングルモードファイバレーザと12 kWまでのマルチモードファイバレーザをラインナップしており、加工対象の種類や板厚に合わせて使い分けが可能である。本章ではそれぞれのレーザの特長について説明を行う。

2.1 シングルモードファイバレーザ

古河電工製シングルモードファイバレーザの外観および光学構成をそれぞれ図1、図2に示す。ファイバレーザは、励起用レーザダイオードから発振した光をYbドープ光ファイバへと導波し、その前後に配置した反射率の異なるFBG(Fiber Bragg Grating)で共振させることで光増幅する。このように、ファイバレーザはすべての機能がファイバ内で完了することから、光軸調整が不要であり、高品質・高変換率・メンテナンスフリーという特長を有する。また、当社では通信分野で培われた高い部品品質と独自のコンバイナ構造により、従来のファイバレーザよりも小さい伝送ファイバコア径を実現し、より安定かつ高ビーム品質のファイバレーザを提供している。古河電工製シングルモードファイバレーザのコア径は $\phi 14 \mu\text{m}$ 、光出力端における典型的なビーム品質 M^2 因子は1.06、ビームパラメータ積BPP(Beam Parameter Products)は $0.36 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ である。 M^2 因子は理想的なガウシアンビームとのずれを示し、式(1)に示すようにレーザの集光特性を表す。

$$\omega = \left(\frac{4\lambda}{\pi}\right) \left(\frac{f}{D}\right) M^2 \quad (1)$$

ω : 集光スポット径 (μm)

λ : レーザの波長 (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

* 情報通信ソリューション統括部門 産業レーザシステム部

当社シングルモードファイバレーザの M^2 因子は理想的な gaussian ビームの1に近く、良好な集光特性を有している。この特性から、ビームを直径数十 μm に集光して高エネルギー密度を容易に得ることができるため、銅材やアルミ材など高反射材料の加工も可能となり、加工部周辺への熱影響が小さい高品質加工が可能である。

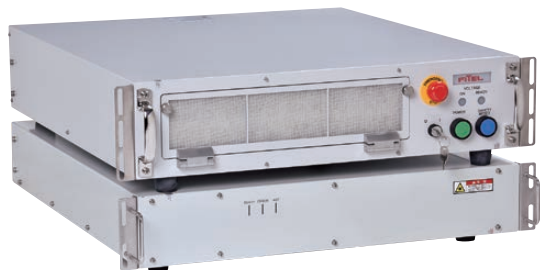


図1 シングルモードファイバレーザ外観
External view of single mode fiber laser.

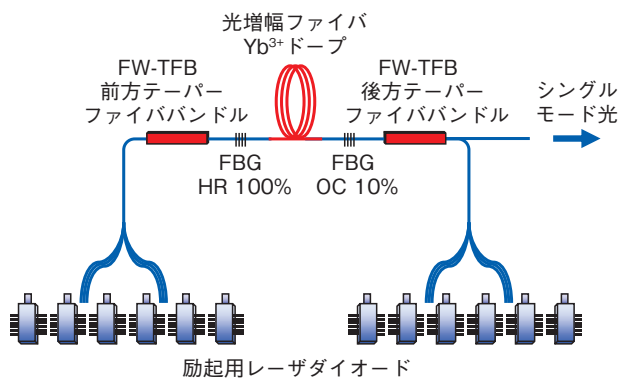


図2 シングルモードファイバレーザ構成
Constitution of single mode fiber laser.

2.2 マルチモードファイバレーザ

当社では、低損失・高効率なビームコンバイナ技術を活用し、1 kW シングルモードファイバレーザを結合したマルチモードファイバレーザを提供している。図3に当社12 kW マルチモードファイバレーザの外観を示す。当社ではコア径 ϕ 50 μm , 80 μm , 100 μm マルチモードファイバレーザをラインナップしている。それぞれの典型的なBPPは1.7 mm \cdot mrad ($M^2=5.0$), 3.0 mm \cdot mrad ($M^2=8.9$), 3.5 mm \cdot mrad ($M^2=10.3$)である。また、2021年度に18 kWのマルチモードファイバレーザを製品化予定であり、そのBPPは3.0 mm \cdot mradと、一般的な10 kW超ファイバレーザのビーム品質の4.0 mm \cdot mradと比較して25%良好な値となる。

これらのマルチモードレーザは2 mmを越える厚さの銅材の加工に最適であり、良好なビーム品質から高速領域での深い溶け込みを得られる。



図3 12 kW マルチモードファイバレーザ外観
External view of 12 kW multi-mode fiber laser.

3. 超高速パルス波形成制御技術

xEVの主要部品であるバッテリーには主にリチウムイオン電池が使用されている。リチウムイオン電池の電極集電体は銅箔(負極)とアルミ箔(正極)であり、図4に示すように製造工程においてはこの電極箔をロールtoロールでタブ形状に切断する必要がある。レーザを用いた切断加工では、従来のスリッターやプレスによる機械加工と比較して、刃物や金型などの消耗品の交換などのメンテナンスが不要で切断軌跡を容易に変更可能なことから、生産性の向上及び仕様変更のコスト削減が可能であり、切断工具を使用しない新しい加工方法として技術開発が進められている。しかし、電池の電極として使用されている銅箔は数 μm と非常に薄く熱容量が小さいため、レーザ切断時の熱により酸化やドロスなどが発生しやすく、加工品質の担保が難しいという課題がある。

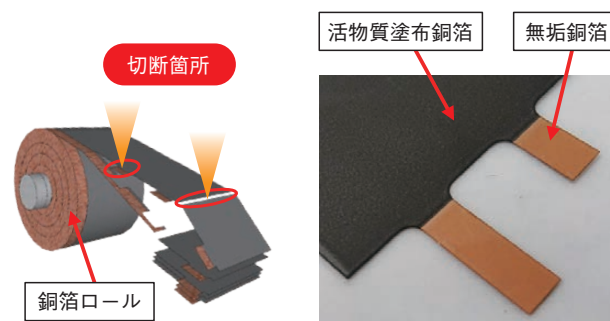


図4 電極箔の切断工程と切断したタブ形状の銅箔
Cutting process of electrode foil and tab-shaped copper foil.

図5に、ビームを50 μm 以下に集光したシングルモードファイバレーザを用いて、速度2 m/secの条件で厚さ8 μm の銅箔をレーザ切断した際のレーザ照射表面画像と切断断面画像をそれぞれ示す。図5を見ると、レーザ照射経路の内側に溶融した銅箔が固まったドロスが発生し、発生したドロスを中心に熱変

色していることがわかる。電極箔のドロスは電池として組み立てた際に短絡の原因となるため、ドロスの発生の問題を箔切断工程へのレーザ切断の導入のために解決する必要がある。

このようなレーザ加工による入熱を減少させる一般的な方法として、レーザの発振信号に変調を加え、連続発振レーザをパルス波形制御して照射する技術が使用される。しかし、従来のレーザは入力パルスに対するレーザ出力の立ち上がり時間が10 μsec以上であるため、50 kHz以下の繰り返し周波数が限界であった。繰り返し周波数が低い場合は、高速で加工する際にパルスが重ならず、連続して加工ができないという問題につながる。そこで、古河電工ではパルス応答性の改善を行い、パルス立ち上がり時間が数μsecと非常に短く、最大250 kHzの繰り返し周波数で変調が可能な超高速変調対応シングルモードファイバレーザの開発に成功した。従来のレーザ、超高速変調対応ファイバレーザの発振形態の違いと、それらのレーザを箔切断に適用した際の模式図を図6に示す。超高速変調対応ファ

イバレーザを用いることで、数十μmの微小なビーム径と数kWのピーク出力を保ったまま最適な投入熱量に制御することができ、最小限の熱影響で銅箔の切断が可能となる。実際に超高速変調対応ファイバレーザを用いて銅箔を切断した結果を図7に示す。図7のレーザ照射条件は、周波数数百kHzで変調していることを除いて図5の場合と同条件である。図5と図7を比較すると、ドロスの発生がなくなり、熱影響を大きく抑えることができていくことがわかる。このように超高速パルス制御技術を用いて投入熱量を制御することにより、銅箔の高品質レーザ切断が可能である。

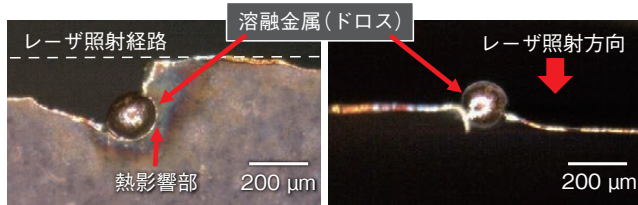


図5 レーザ切断した銅箔の表面画像と切断断面画像
Surface image and cross-sectional image of copper foil cut by laser.

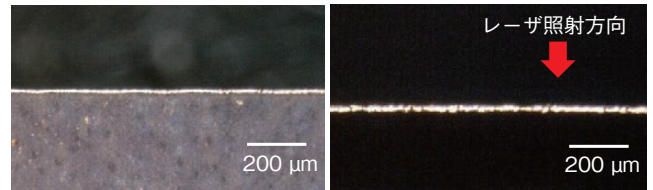


図7 超高速変調対応レーザで切断した銅箔の表面画像と切断断面画像
Surface image and cross-sectional image of copper foil cut by laser with ultrafast modulation.

4. ビームモード制御技術

銅は固体の状態では波長1070 nmのレーザ光の吸収率が約5%程度と非常に低く、温度の上昇によって溶融が始まると吸収率が大きく上昇するという性質がある。この性質から、初めの溶融のために高いレーザパワーが必要である一方で、図8(a)に示すように一度溶融が始まるとレーザ照射部に発生するキーホールを中心に局部的にエネルギーを吸収してしまうため、溶融池が安定せず、溶融金属が飛散するスパッタや巻き込んだ空気が溶融部に残留するブローホールと呼ばれる欠陥につながる。銅のレーザ溶接工程でこれらの溶接欠陥が発生すると、接合強度の低下やスパッタを除去する工程の増加を引き起こす。これら溶接欠陥は、ファイバレーザの銅溶接工程への適用に対する大きな課題となっていた。

そこで当社ではこの課題解決のため、レーザ集光点での強度分布を精密に制御可能なビームモード制御技術の開発を行っている。ビームモード制御技術とは図8(b)に示すように、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し、溶接の高品質化を図る手法である。当社のビームモード制御技術は、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任意の光強度分布に制御することが可能であり、従来のビームモード制御素子では実現できなかった高いレーザパワー耐性とビーム変換効率を備えている。当社の1.5 kWシングルモードレーザから12 kWマルチモードレーザまで、広い出力範囲のレーザを用いた加工に適用されており、加工材料に合わせたビームモードを使用することでレーザ溶接の高品質化が可能である。

本章では、このビームモード制御技術を銅板の溶接と巻線の溶接に適用した事例について紹介する。

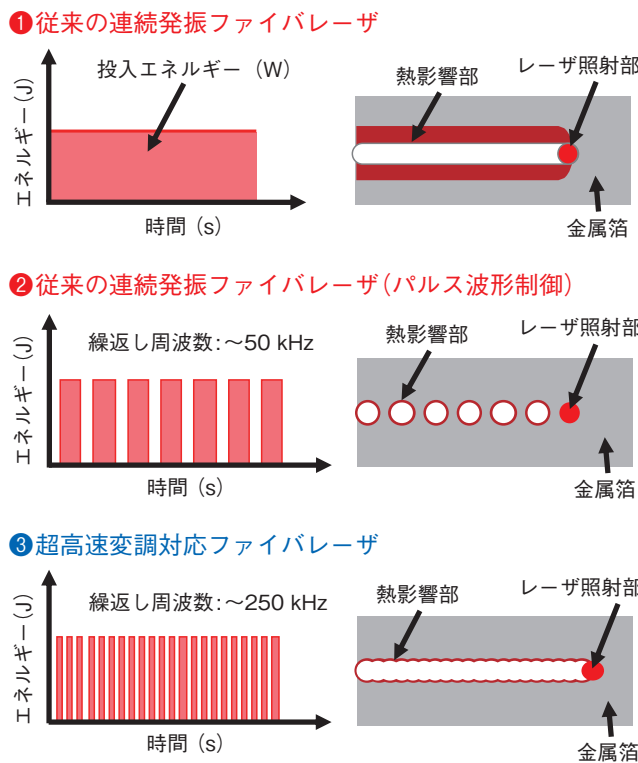


図6 レーザ発振形態の比較(左)とそれらのレーザの箔切断への適用(右)
Comparison of laser oscillation modes (left) and applying to foil cutting (right).

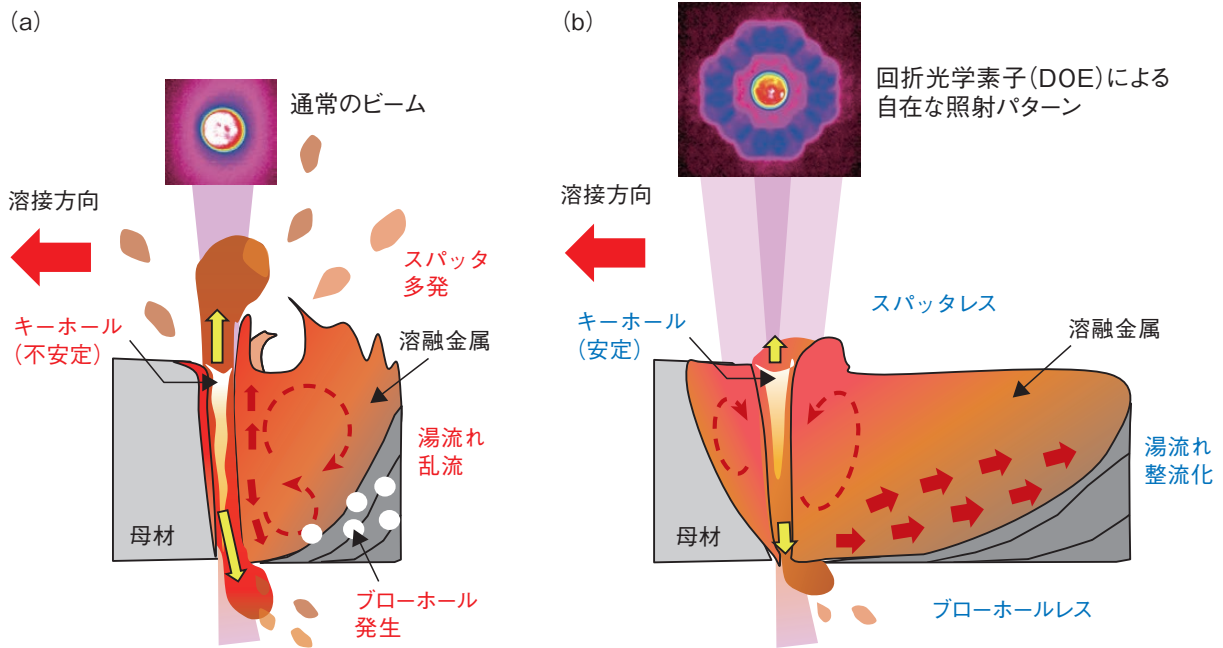


図8 (a) レーザ溶接時の欠陥の発生機構
 (b) ビームモード制御技術による溶接欠陥の抑制
 (a) Mechanism of defect generation during laser welding.
 (b) Suppression of welding defects by beam mode control technology.

4.1 銅板の高品質溶接

シングルモードファイバレーザはマルチモードファイバレーザと比較してビーム品質が良く、ビーム径 ϕ 20 ~ 30 μm まで小さく集光して照射することが可能である。この特長から、 10^8 W/cm^2 以上の高パワー密度が容易に得られ、高反射率の銅材の微細溶接に有効である。一方で、高速領域での溶接においては溶融池が細くなり、スパッタの発生や溶接強度の低下につながる。この課題を解決するためにレーザ光をデフォーカスしてビーム径を大きくして照射する方法や、溶接速度を低下させることで溶融池を拡大する方法がとられていた。しかし、デフォーカスでのレーザ照射は熱影響部の拡大やデフォーカス精度維持のため照射位置の高さ方向裕度低下につながり、溶接速度低下はサイクルタイムに直結することから、ジャストフォーカスかつ高速領域での加工条件の究明が必要とされていた。そこで当社では、シングルモードファイバレーザの溶接にビームモード制御技術を適用し、溶融池の安定化を目指した。

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、表面に集光点を設定してレーザ照射した際の溶接ビード外観を示す。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。図9(a)を見ると、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(穴)などの溶接欠陥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図9(b)では、ビードが安定し、溶接欠陥が発生していない高品質な溶接ができていることが確認できる。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 ϕ 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・加工の高品質化を達成した。

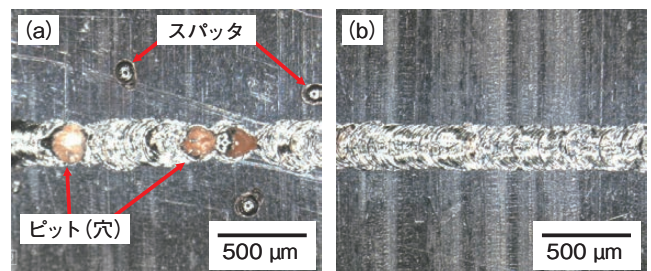


図9 レーザ溶接した純銅板表面
 (a) ビームモード制御なし
 (b) ビームモード制御あり
 Optical images of laser welding on the surface of pure copper plate.
 (a) Conventional focused beam.
 (b) With beam mode control technology.

4.2 巻線の高品質溶接

xEV用モータの小型・高出力化に向けて、図10に示すように従来の丸線と比較してモータ内の導体の占有率を高く巻くことができる平角線の使用が主流となっている。平角線の溶接は、従来TIG溶接が主流であるが、TIG溶接では溶接部以外で接地をとるために広範囲の被覆除去が必要となることや、溶接時間が長く熱影響が大きい、照射位置の精密操作ができないといった多くの課題があった。一方レーザ溶接は、非接触溶接であるため被覆除去は最低限で良く、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、レーザ溶接は短絡の原因となる溶接時のスパッタの発生や、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レーザにビームモード制御を適用し、銅平角線に対する溶接条件を最適化すること

で、溶接時間の大幅な短縮と溶接品質の改善に成功した。実際にモータに使用されている断面が1.5 mm × 3.1 mmの平角線2本のヘアピン溶接を行った際の透過X線写真を図11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溶接では図11(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11(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12に溶接時の様子を比較した写真を示す。図12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くことが分かる。上記溶接はレーザ照射時間0.1秒以下で可能であり、TIG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、平角線の端部溶接は熱が伝導する方向が一方しかないためレーザ照射時間が長いと被覆焼けが生じてしまうが、当社のレーザ溶接では加工時間が非常に短いため、図13のように熱可塑性樹脂であるPEEK(ポリエーテルケトン)樹脂被膜において剥離長が8 mmと短い場合でもレーザ溶接による被膜焼けは生じなかった。

被覆除去を最小限にすることは、コスト削減とモータの小型化に繋がり、溶接時間の短縮は生産性向上に繋がる。



図10 丸線と平角線のモータ内占有率差
Difference in occupancy rate between round wires and rectangular wires in the motor.

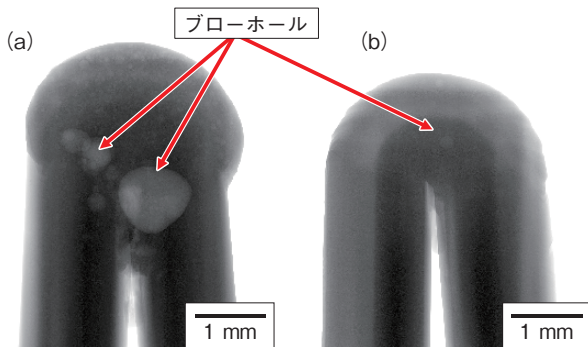


図11 ヘアピン平角銅線の透過X線画像
(a) ビームモード制御技術無し
(b) ビームモード制御技術有り
X-ray transmission images of hairpin rectangular copper wires.
(a) Conventional focused beam.
(b) With beam mode control technology.

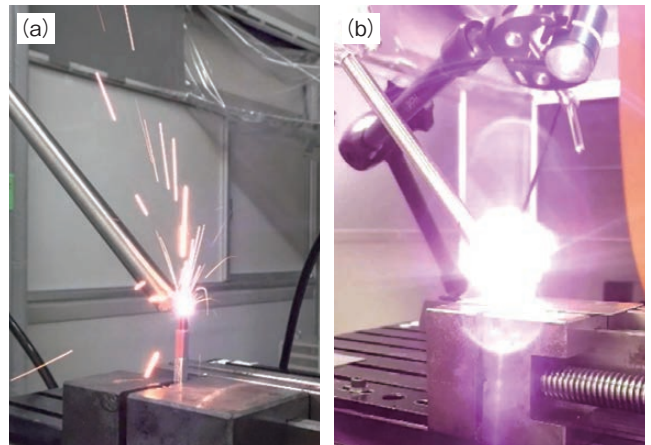


図12 平角銅線ヘアピン溶接時の様子
(a) ビームモード制御技術無し
(b) ビームモード制御技術有り
Hairpin welding of rectangular copper wires.
(a) Conventional focused beam.
(b) With beam mode control technology.



図13 剥離長8 mmのPEEK被覆付き平角銅線ヘアピン溶接部
Optical images of hairpin welding of PEEK resin coated rectangular copper wires with 8 mm stripping length.

5. おわりに

xEV用途を中心にバッテリーやモータの需要が増大している中、その主要材料である銅材の高速・高品質な加工技術が強く求められている。古河電工では、高いビーム品質を持つ各種ファイバレーザと超高速パルス制御・ビームモード制御といった固有技術を組み合わせた加工ソリューションを保有している。今後も更なる高出力・高品質なレーザの開発、加工技術の開発を推進し、お客様のそれぞれの課題にあった提案を行っていく。