

特集：レーザー溶接の最新技術動向 ～多様化するレーザー溶接技術～

青色レーザーを用いた銅溶接技術

株式会社 片岡製作所  
林 佳 佑

1. はじめに

レーザーを用いた溶接技術は広く事業化されており、多くは赤外線（以後 IR）発振器を搭載したレーザー溶接機が用いられている。しかしながら、電子部品の配線や現在普及が進んでいる電気自動車（Electric Vehicle、以後 EV）用のモータに用いられる銅の溶接に関しては、その IR 光の吸収率の低さから溶接には高出力のレーザー照射が必要となり、スパッタの発生が問題となっていた。

近年、青色半導体レーザーの高出力化が実現され<sup>1)</sup>、銅に対する吸収率の高さも相まって青色レーザー溶接が注目されている。特に、電装部品の溶接に対して大きな障害になるスパッタの発生を抑制できる技術として期待が高まっている。片岡製作所では高出力青色半導体レーザーを用いた溶接技術に着目し、スパッタを発生させずに様々な用途に適用できる青色レーザーと IR レーザのハイブリッド溶接技術を開発し、銅溶接システムとして製品化を行った<sup>2)</sup>。

本稿では IR レーザでの銅溶接と青色レーザー、ハイブリッドシステムでの溶接の違いを実際の溶接事例を交えて述べる。

2. 青色レーザーのメリット

レーザー加工において加工対象となる材料の光吸収特性は非常に重要である。これまでレーザー溶接に用いられてきた IR レーザは銅に対する吸収率が低いため、近年 EV 用途で注目されている銅の溶接に用いることは困難とされてきた。これは図 1 に示す通り、通常の IR レーザの波長である 1060 nm 近辺の銅の吸収率は 5%以下と非常に低いためである。これに対し、青色レーザーの波長である 450 nm 近辺の銅の吸収率は 65%程度と高く、銅溶接に適していると言える。しかし、溶接に必要な高出力の青色レーザーの実用化が課題であった。

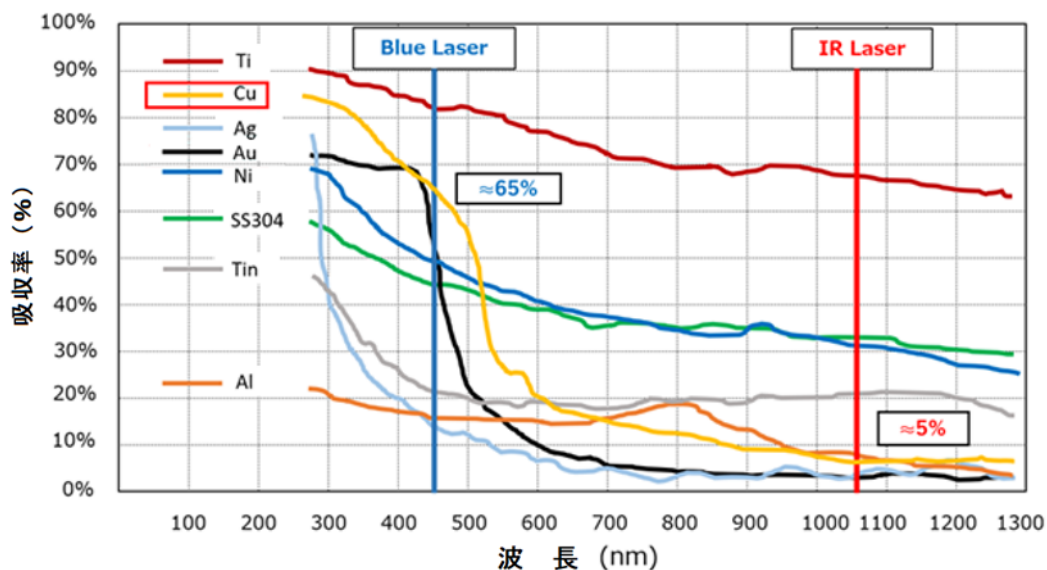


図 1 金属材料の光吸収特性グラフ(出展：NASA)

青色レーザーは、GaN 系の青色発光ダイオードの実現に端を発し、レーザーダイオードの開発・高出力化が精力的に進められ、近年では複数の青色レーザーダイオードからの光を重畳することによって、キロワット級の青色レーザー発振器が実用化されるようになった。

### 3. IR レーザを用いた銅溶接

銅に対する IR レーザの吸収率は 5%程度と低く、照射した光エネルギーのほとんどを反射する。そのようにエネルギー効率が極めて悪く、溶接に必要なエネルギーを得るためには数十キロワット級のレーザー出力が必要である。また、過剰なエネルギーが投入されることが原因で熔融状態が安定せず、急激な温度変化により突沸が起これ、スパッタが飛散するという問題が発生する。

図 2 に IR レーザを銅板に照射した際の表面状態の画像を示す。不安定な熔融状態に起因するビード形状の不均一やスパッタの痕跡が観察される。

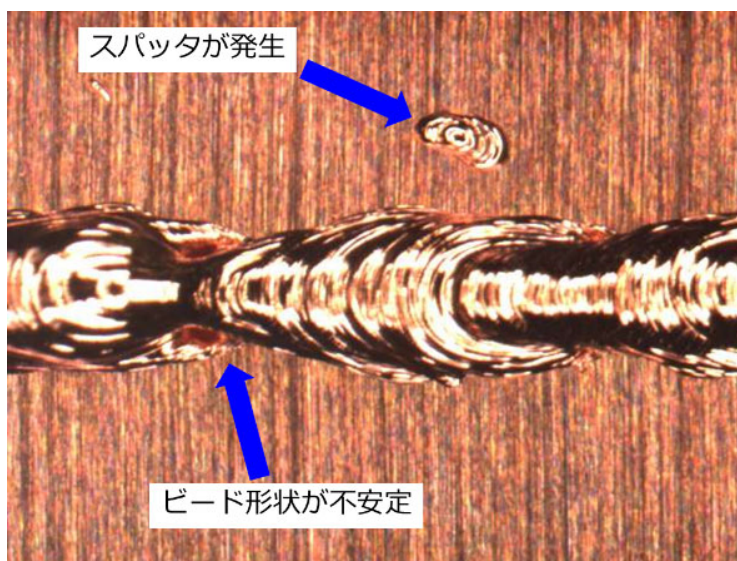


図 2 IR レーザを銅に照射した際の溶接ビード外観

### 4. 青色レーザーを用いた銅溶接

先に述べたように、銅に対する青色レーザーの吸収率は高く、投入したエネルギーを効率良く使用することが出来る。つまり、溶接に必要な投入エネルギーは IR レーザと比較して少なくて済むので、溶接状態を安定させることが可能となり、スパッタを抑制することが可能となる。

以下に当社で実施した銅材料に対する青色レーザーでの溶接実験結果を 2 つ紹介する。

#### 4.1 銅板に対するレーザー照射実験

最初に、厚さ 0.5 mm の銅板 1 枚に青色レーザーを照射し、表面ビードの状態や溶込深さの測定を行った。青色レーザーは最大出力 1 kW で集光径  $\phi 0.4$  mm のものを使用した。

溶接条件として青色レーザーの出力を 800 W に固定し、溶接速度を変化させた。また、溶接部の酸化を防ぐためのシールドガスとして、レーザー光と同軸で窒素ガスを吹きつけた。表面ビードの外観と断面マクロ組織を観察した画像を図 3 に示す。図 3(a) は溶接速度 50 mm/s、図 3(b) は溶接速度 30 mm/s にて溶接した結果である。

図 3(a)、(b) 上段の表面ビード写真から、IR レーザと比較して青色レーザーでは溶接状態が非常に安定していることが確認できる。また、溶接速度によってビード幅や溶込深さを制御することが可能である。

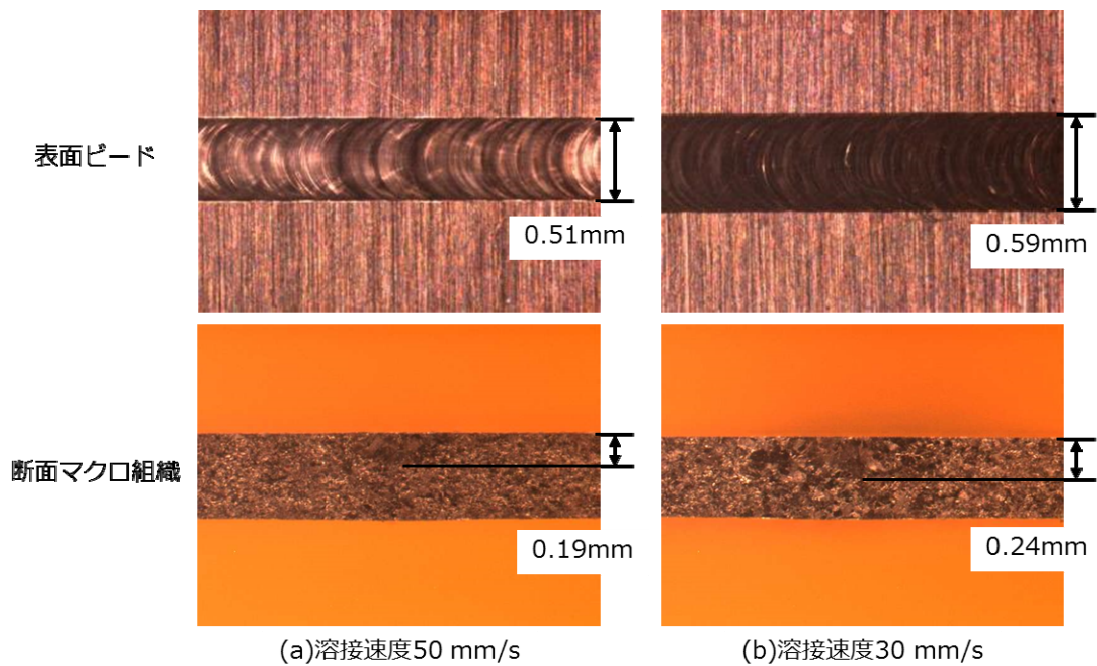


図3 厚さ0.5 mm銅板に対する青色レーザー溶接ビード外観及び断面マクロ組織

#### 4.2 銅箔の重ね合わせ溶接

次に厚さ0.01 mmの銅箔を30枚重ね合わせて貫通溶接を行った。レーザー溶接条件やシールドガスの種類は4.1で使用したものと同一である。溶接状態の観察写真を図4に示す。

図4(a)、(c)から分かるように、表面ビード、裏面ビードともに安定した溶接形状が得られている。薄い箔を溶接する場合、過剰な熱量を与えると溶断してしまうが、図4(b)、(d)に示すように、良好に溶接できていることが確認できた。

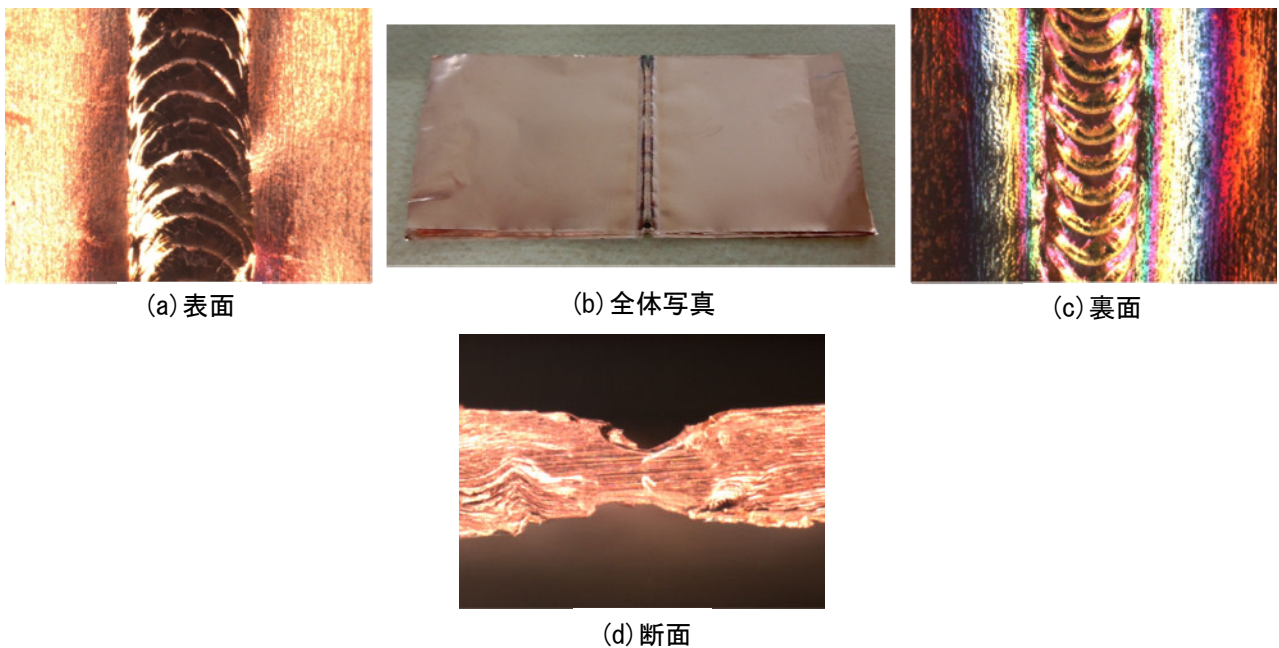


図4 厚さ0.01 mmの銅箔30枚重ねに対する青色レーザー溶接部の外観及び断面状態

## 5. ハイブリッドシステムを用いた銅溶接

### 5.1 ハイブリッドシステムとは

前項の結果より、青色レーザーによる銅溶接は良好な溶接状態を得られることが明らかになった。ただし、溶込深さは0.3 mm程度が限界であるため、電子部品関係やEVモータなど実際に本溶接手法が対象とする用途に対しては実用的な溶込深さとは言えない。溶込深さが浅いのは、高出力のファイバ伝送半導体レーザーでは集光径を小さくすることが難しく、エネルギー密度を高くすることができないためである。

一方、IRファイバレーザーは、近年の技術進歩により、高出力かつ小集光径のものが実用化されている。十分な溶込深さを得るにはIRレーザーを使用することが有効であるが、先に述べた通り、IRレーザー単体では熔融状態が不安定になりスパッタが飛散するという問題が生じる。

そこで熔融状態を安定させながら十分な溶込深さを得るために、青色レーザーとIRレーザーを重畳させるハイブリッドノズルを開発した。ハイブリッドノズルの構成を図5に、実際のノズル外観を図6に示す。使用する青色レーザーは上述と同様のもの、IRレーザーはマルチモードファイバレーザーの6 kW機を使用した。

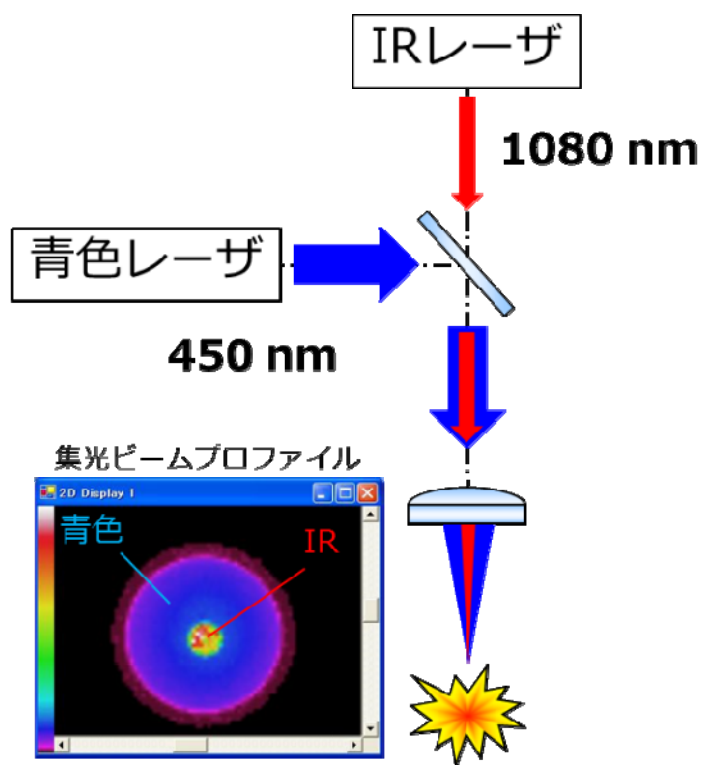


図5 ハイブリッドノズルの構成図

青色レーザー IRレーザー

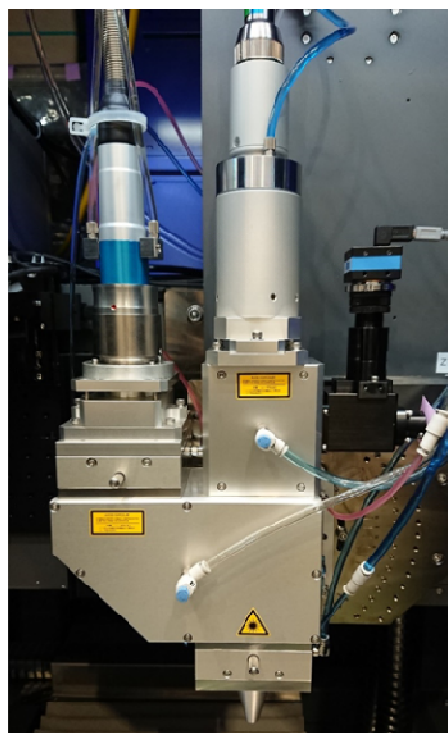


図6 ハイブリッドノズル外観

青色レーザーの光を反射しIRレーザーの光を透過するダイクロイックミラーを使用し、IRレーザーの光軸に青色レーザーの光を合わせることで青色レーザーとIRレーザーを同じ位置に集光させることが出来る。集光点では図5の挿入図に示すように小径のIRレーザーの周りを大径の青色レーザーが囲んでいる形となる。

### 5.2 ハイブリッドシステムによる溶接原理

金属材料は高温状態だと光吸収率が高くなる特性がある<sup>3)</sup>。ハイブリッドシステムは青色レーザーの照射により銅を加熱して高温にすることで、IRレーザーの吸収率を高めて安定した深い溶込みを実現するシステムである。

また、スパッタの発生原因のひとつとして銅の急激な温度変化が考えられる。図 5 に示す通り、ハイブリッドシステムは青色レーザーの集光径が IR レーザの集光径よりも大きいので、レーザーを走査させた際に IR レーザの前後に青色レーザーが照射されている。先行した青色レーザーにより予め銅の温度を高くすることで、IR レーザの高いエネルギーによる急激な温度上昇を防ぐことが可能となり、さらに後行する青色レーザーによって IR レーザによる熱が引いた後の急激な温度低下を防ぐことも可能となる。これらを予熱と徐冷と呼び、スパッタを発生させないための重要なポイントになる。

### 5.3 ハイブリッドシステムと青色レーザー及び IR レーザ単体の比較

図 7 にハイブリッドシステムで溶接した場合と、青色レーザー単体、IR レーザ単体で溶接した場合の溶接状態を比較した画像を示す。上段は溶接ビード外観、下段は断面マクロ組織である。使用した銅板は厚さ 0.3 mm と 1.0 mm を重ね合わせたものであり、溶接速度は同一でレーザーの出力を調整した。

青色レーザー単体では表面ビードは安定しているが、十分な溶込深さが得られず、IR レーザ単体では 0.6 mm の溶込深さを得られたが、表面ビードの状態が安定せずスパッタも発生した。

これらに対してハイブリッドシステムでは、IR レーザと同じ溶込深さ 0.6 mm になるようにレーザー出力を調整した場合でもビード形状が安定しておりスパッタの飛散も無いことが分かる。

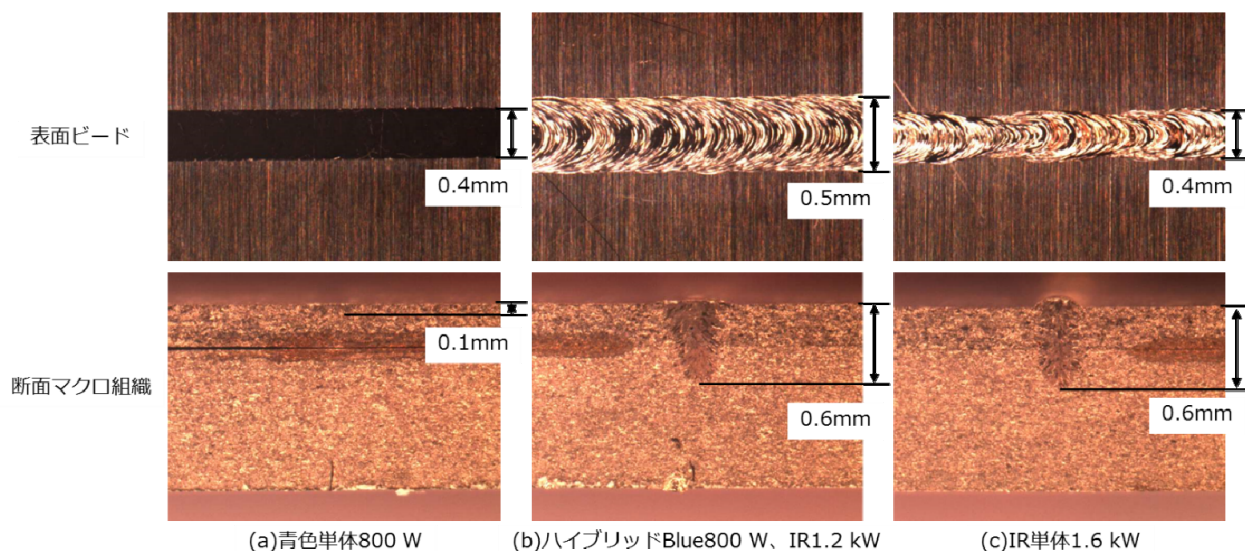


図 7 ハイブリッドシステムと青色レーザー単体、IR レーザ単体でのレーザー溶接ビード外観及び断面マクロ組織

注：(a)(b)(c)いずれも板厚 0.3mm と 1.0mm の重ね合わせ。重ね部の溶接ビード断面部と同じ色をしている所はエッチング液の染み出しによるもの。

### 5.4 深溶込み実験

次にハイブリッドでさらに溶込深さを得る実験を行った。図 8 に IR レーザの出力ごとの表面ビード外観、断面マクロ組織を示す。銅板の厚みは 2.0 mm のものを使用し、溶接速度と青色レーザーの出力条件は固定して IR レーザの出力のみを変化させた。

IR レーザ出力 5 kW では 1.7 mm まで溶込むことが確認できた。それぞれの表面ビードの状態を比較すると、ビード幅に関してはすべて 0.5 mm で安定していることが分かる。青色レーザーの集光径は  $\phi 0.4$  mm であり、その範囲が予熱効果により溶融しやすくなっているため、IR レーザによって溶融する領域も青色レーザーが照射されている 0.4 mm より少し広い領域となったと推測される。

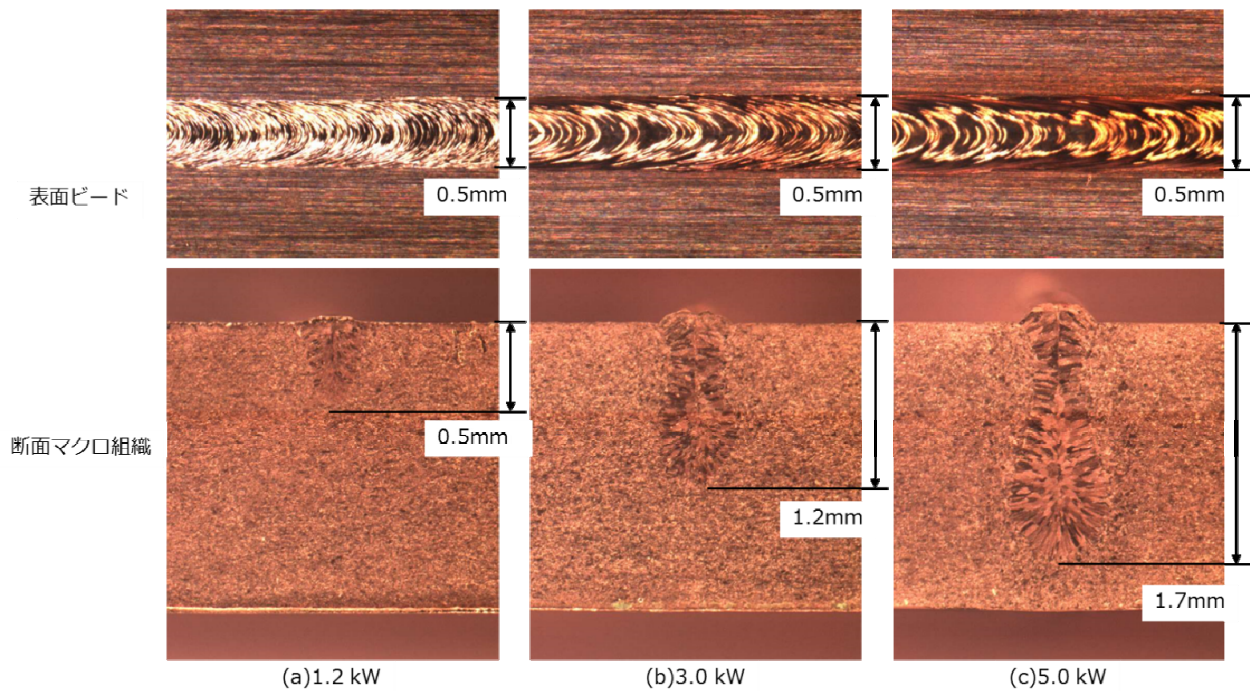


図 8 IR レーザ出力を変化させた場合の溶接ビード外観及び断面マクロ組織

### 5.5 ヘアピン溶接

ここまでは主に電子部品のバスバーなど、電氣的に接合する製品に用いられる重ね合せ溶接や突合せ溶接に適用できる事例を紹介してきた。最後にヘアピン溶接と呼ばれる、EV 用モータの導線に用いられる銅の平角線の溶接事例を紹介する。

ヘアピン溶接とは 2 本の銅平角線を突合せ、先端を玉状に熔融して接合する溶接方法である。図 9 にヘアピン溶接を行った銅平角線の外観図を示す。今回用いた銅平角線の断面サイズは  $3 \times 1.8$  mm である。

ハイブリッドシステムを用いており、レーザー照射時間は 0.35 秒で、その後レーザーを停止してから 0.13 秒かけて固化している。熔融玉は酸化すると脆くなって接合強度が落ちるため、窒素ガスを吹きつけて酸化を防いでいる。良好な溶接条件を見つけるためにはハイスピードカメラを用いて熔融状態を観察することも重要である。

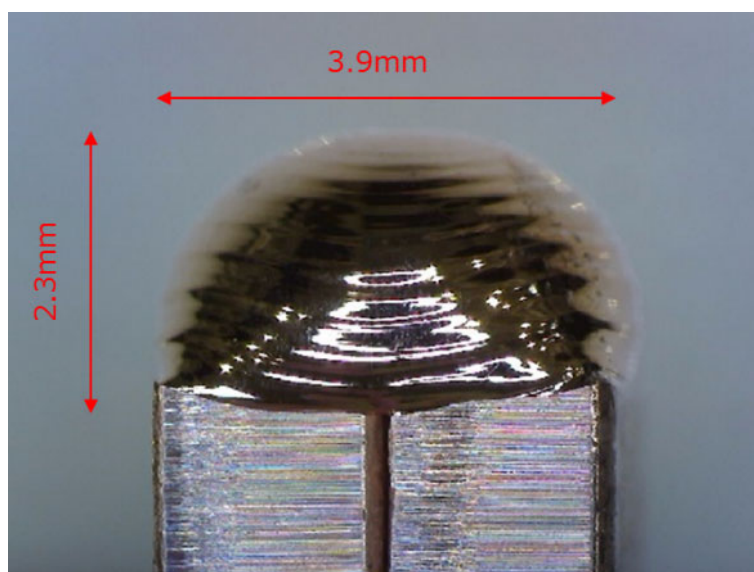


図 9 ヘアピン溶接外観

## 6. まとめ

これまでレーザー溶接が難しいと言われてきた銅溶接を可能とする高出力青色半導体レーザーを用いたレーザー溶接装置を開発した。さらに IR ファイバレーザーを青色レーザーに重畳したハイブリッドノズルを自社開発し、青色レーザーと IR レーザーのハイブリッド溶接システムを完成させた。

これにより、下記に示す各種銅溶接においてスパッタを発生させない溶接が可能であることを確認した。

- ① 青色レーザーを用いた溶込深さ 0.3 mm の安定した溶接
- ② ハイブリッドシステムを用いた溶込深さ 1.5 mm 以上の安定した溶接
- ③ 溶接時間 0.35 秒で良好なヘアピン溶接

片岡製作所ではこれらの技術を用いることで、電子部品や EV 用モータなど銅材料を用いたアプリケーションに対して高品質の溶接を実現することができ、要求仕様に応じたシステムを提供することが可能である。

## 参考文献

- 1) Markus Ruterger, Dr. Simon Britten, Laurens Schmid Trend of Kilowatt class Blue Laser and Direct LD development and the application, 第 94 回レーザー加工学会講演論文集, (2020) 117
- 2) 林佳佑：青色レーザーを用いた銅溶接技術, LMP シンポジウム 2021, (2021)
- 3) 中芝伸一, パルス Nd:YAG レーザーによるアルミニウム合金および銅の溶接メカニズムに関する研究, 岡山大学博士学位論文, (2014)

<略歴>

**林 佳 佑 (はやし けいすけ)**

2012 年 龍谷大学大学院 理工学研究科 修士課程修了

2012 年 株式会社 片岡製作所 入社 開発部 配属  
現在に至る