

図15 高出力ナノ秒レーザーによるヘアピン絶縁層除去

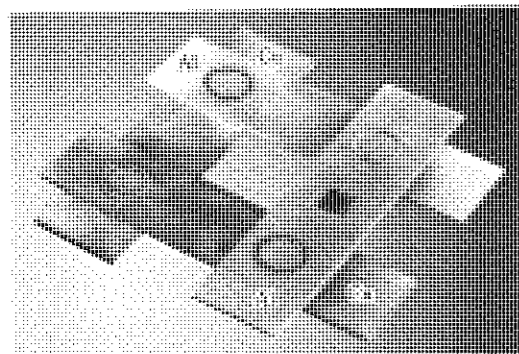
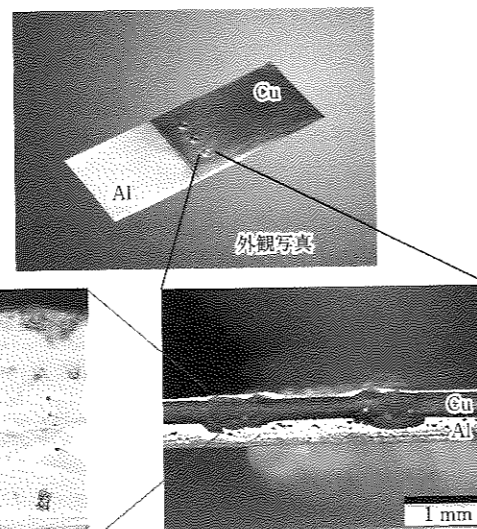


図16 銅とアルミの異材溶接

去する方法がとられていたがレーザーによる除去も注目されている。用いるレーザーは基本波の高出力ナノ秒レーザー TruMicro7000シリーズである。ナノ秒レーザーの基本波の仕様を表3に示す。レーザーによる絶縁層の除去は除去する厚さを精密に制御できるため、必要以上に厚く除去することがなく銅線への損傷もない。また、除去速度も機械的な方法と遜色ない。図15にナノ秒レーザーによる絶縁層除去の様子を全体の外観とレーザー照射時の拡大写真を示す。ヘアピンの表面が溶けることなく絶縁層のみ除去されていることが分かる。

6 アルミと銅の異材接合

リチウムイオン電池などの電極にはアルミと銅が用いられているため、アルミと銅の溶接の需要が多い。アルミと銅のレーザー溶接は以前から検討されており、アルミと銅の金属間化合物を少なくするために入熱の少ない高速溶接が有効とされている。トルンプではこの用途に2 kWシングルモードファイバーレーザー TruFiber2000を推奨している。図16にアルミと銅の溶接状態の写真を示す。本写真より重ね合わせの上/下の組み合わせがアルミ/アルミ、アルミ/銅、銅/アルミ、銅/銅のいずれでも良好な溶接が可能なが分かる。通常この溶接には接合面積を大きくするためにスキヤナによりワーク上



断面顕微鏡写真
図17 銅-アルミ溶接詳細

に照射されるレーザーをウォブリングさせながら走査させる手法が用いられる。図17に銅/アルミ溶接の詳細を示す。図より金属間化合物が少なく良好な溶接が行えていることが分かる。

7 おわりに

以上述べてきたようにE-Mobility製造工程へのレーザー加工の適用は銅部品を中心に大きな広がりを見せている。今後車の電動化や情報社会の高度化により電気を流し駆動するデバイスの使用量が増え、銅の加工需要が格段に増加する。このような加工に対して高品質な銅の加工ができるグリーンレーザーやビームプロファイル制御あるいはそれぞれのアプリケーションに適した短パルスレーザーなど、様々なレーザーが加工ツールとして使用されていくものと思われる。レーザーは自動化ラインへの適用性が高くネットワーク化も容易であるため、今後産業用生産ラインへの導入が加速していくものと期待される。

参考文献

- 窪田恵一、鷲尾邦彦：高出力YAGレーザーと最近の進歩、レーザー研究、28-11、(2000)、729。
- A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, H. Opower : Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers, Appl. Phys. B, 58, (1994), 365.
- 白川晃、植田憲一：高輝度高出力ファイバーレーザー、電気学会論文誌C, 124-7, (2004), 1367.
- 中村強：高出力・高ビーム品質グリーンレーザー、スマートプロセス学会誌, 9-2, (2020), 63.
- 中村強：レーザービームプロファイルの制御技術と加工への応用、レーザー加工学会誌, 27-2, (2020), 1.

青と近赤外のハイブリッドレーザーによる銅溶接技術の開発

松本 暢康・石毛 悠太
古河電気工業(株) 研究開発本部

1 はじめに

1.1 レーザ加工技術への注目

近年、持続可能な開発目標 (SDGs) の達成に向け、CO₂排出量の少ない電気自動車の導入に注目が集まっている。この電気自動車の製造プロセスにおいて、とく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り、これらに対し、既存工法では困難な加工を実現するソリューションとしてレーザー加工が注目されている。

レーザー加工特有の利点は非接触・局所加熱・高速・高精度・低ひずみなど多岐にわたる。加工に用いられるレーザー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 (1,070nm) で発振するファイバーレーザーは大出力、高ビーム品質、ファイバーデリバリー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。

1.2 当社のレーザー技術

当社では励起用半導体レーザーや特殊ファイバー等の開発技術を基盤として、ファイバーレーザーの高出力化や高ビーム品質化を実現してきた。現在製品化している1.5kWシングルモードファイバーレーザーにおいて、そのビーム品質を決定する主要因であるYbドープファイバーおよび伝送ファイバーのモードフィールド径はφ14 μmとなっており、光出力端における典型的なビーム品質はBPPで0.36 mm・mrad (M²=1.06)である¹⁾。大出力でありながら、良好な集光特性であるためφ20~30 μmの微小スポットに集光することが可能であり、溶込みの深いキーホールを容易に形成できる。その高いビーム

品質によって精密かつ深溶込みの加工が得られる。

一方でファイバーレーザーの波長域である赤外領域では図1に示すように銅に対する吸収率が低いため、加工時に溶融池やキーホールの形成が安定せず、スパッタやブローホール等の溶接欠陥が多く発生するという課題を持つ。これに対し、当社ではビームモード制御技術による銅加工ソリューションの提案を行ってきた^{2)~3)}。ただし、純銅溶接プロセスにおいては多くの場合、スパッタによる電気的短絡といった特有の課題を持ち、これを解決するには極めて高い加工品質が求められる。そこで、上記の要求を満たす加工技術の開発を進めてきており、次節ではその技術において重要となる可視光レーザーについて説明する。

1.3 加工用可視光レーザーとその課題

前述のファイバーレーザーとビームモード制御を組み合わせた技術の他に、溶接欠陥を抑制した銅加工に有効とされ、レーザー業界において開発が進められているのが銅

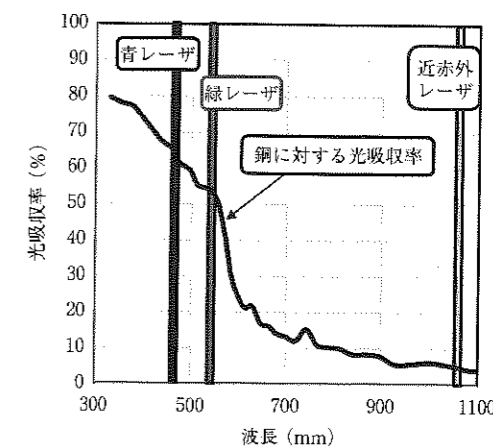


図1 波長に対する銅の光吸収率変化⁴⁾

への吸収率の高い青や緑などの可視光レーザーを用いた加工技術である。図1から分かるように、例えば450nmにおける銅の光吸収率は、1,070nm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できる。さらに、一般的に図2 (a) のような「熱伝導型」といわれる溶融モードとなるため溶接欠陥の原因となるスパッタやブローホールの形成を抑えた加工が可能である。

一方、例えば青色レーザーとして現在候補にあるのはGaN系青色半導体レーザーであるが、半導体レーザーはその発振原理からファイバーレーザーと同等のビーム品質を得ることが難しく、ビームデリバリーに用いる光ファイバーは、100 μ m~1mm程度のコア径を持つマルチモードファイバー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 μ 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、深溶け込みを得る図2 (b) のような「キーホール型」の溶接は苦手としている。とく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広がりやすく、溶込み深さへの課題は顕著である。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、より深い溶込みを得ようとする加工速度が極端に遅くなってしまふ。

1.4 Blue-IRハイブリッドレーザーの開発

当社では、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の最先端の素子技術に、当社の持つレーザーの高密度合波技術^⑤を組み合わせることで、金属加工向け高出力青色半導体レーザーを実現した。さらに、この青色半導体レーザー技術に、これまで当社で培ってきたファイバーレーザー技術および空間的ビーム制御技術を組み合わせることでBlue-IRハイブリッドレーザー技術を開発した。これによって銅加工において加工品質および溶込み深さ（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

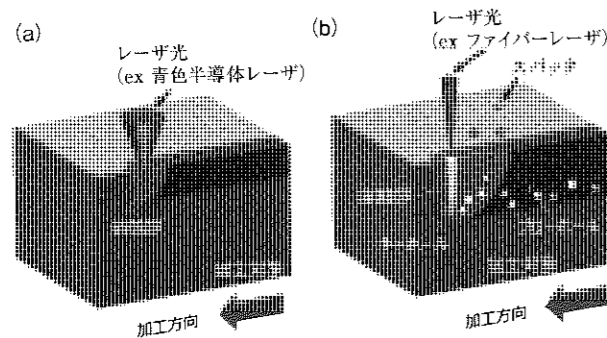


図2 レーザ加工における典型的な溶融モードの加工断面模式図 (a) 熱伝導型, (b) キーホール型

可能なレーザー加工技術を実現した。本加工技術の特性および加工事例について本稿にて紹介する。

2 Blue-IRハイブリッドレーザー概要

2.1 青色レーザー

当社はファイバーレーザー励起用の915nmレーザー半導体モジュールの設計技術を活用し、波長465nmの青色半導体レーザー発振器を開発した。この青色半導体レーザー発振器は、1,000時間の長時間駆動においてもレーザーを含むファイバーなどの光学部品の劣化もほとんど生じないことも確認している。また、前述のとおり、波長465nmの青色レーザーにおける純銅に対する光吸収率は波長が約1,070nmであるファイバーレーザーの10倍以上であり（図1）、純銅に対してエネルギー効率の高い加工が見込まれる。

2.2 Blue-IRハイブリッドレーザー

Blue-IRハイブリッドレーザーは、1,070nmシングルモードファイバーレーザーと、新規に開発した加工用青色半導体レーザー、二波長を合波する光学ヘッドからなる。図3にBlue-IRハイブリッドレーザー加工システムの構成例を示す。例えば図3のような構成では、それぞれの発振器から出射したレーザー光は光学ヘッド内部の光学系を通して同軸で加工対象へ照射され、溶接等の加工を実現する。

3 Blue-IRハイブリッドレーザーによる加工の特徴

一般にレーザー加工中に発生するスパッタやブローホー

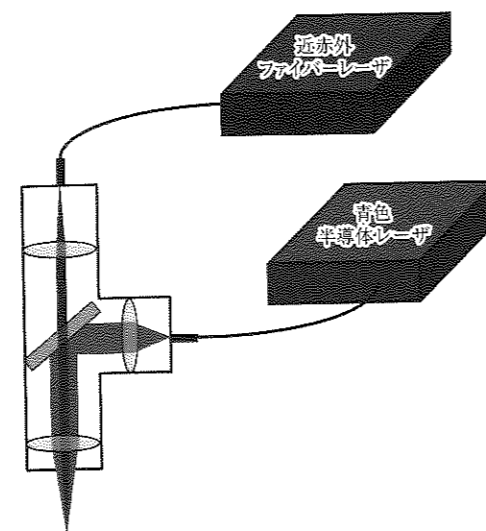


図3 Blue-IRハイブリッドレーザーの構成例

ルは、レーザー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^⑥。また、キーホールの形成によってレーザー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^⑦、溶融部でのキーホールの安定した形成は高品質加工を達成する上で重要な要因である。

図4にファイバーレーザーおよびBlue-IRハイブリッドレーザーでの銅加工のその場観察像を示す。図よりどちらもキーホールサイズに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ー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分かる。すなわち、吸収率の高い青色レーザーが加工前方にて安定溶融を起こすとともに、レーザー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ーレーザー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込みの両立を達成したといえる。

図5に擬似的に溶融断面を形成させ、高速度カメラにてレーザー加工時の溶融部のその場観察を実施した結果を示す。図より、Blue-IRハイブリッドレーザーによる純銅加工ではファイバーレーザーのときに比べ溶融部最下端の高さが安定しており、このことからキーホールが安定して形成されているといえる。

このように、Blue-IRハイブリッドレーザーは純銅の加工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ーでは各レーザー加工条件を個別に設定することで、様々な加工対象に

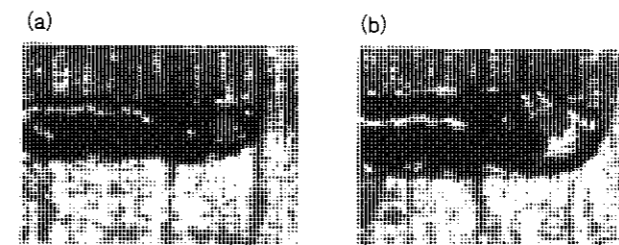


図4 純銅加工のその場観察像 (a) ファイバーレーザー, (b) Blue-IRハイブリッドレーザー

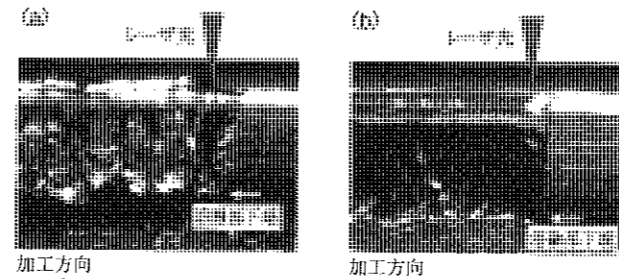


図5 純銅加工の擬似的な溶融断面のその場観察像 (a) ファイバーレーザー, (b) Blue-IRハイブリッドレーザー

応じた加工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ーを用いた加工事例

図6に純銅に対するファイバーレーザーのみ、およびBlue-IRハイブリッドレーザーによるビードオン加工結果をそれぞれ示す。加工条件は青色レーザーの有無以外はすべて同条件である。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ーを用いることで、ファイバーレーザーのみでの加工における課題であったビードの乱れやスパッタの発生を抑制し、高品質加工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ようなアスペクト比の高い深溶込みを実現している。

図7にBlue-IRハイブリッドレーザーによる純銅の重ね溶接断面写真を示す。ビードオン加工時の結果と同様、深溶け込みとブローホールのない高加工品質の両立を果たしている。

電池集電体の溶接を模擬し、銅箔50枚を2枚の銅板

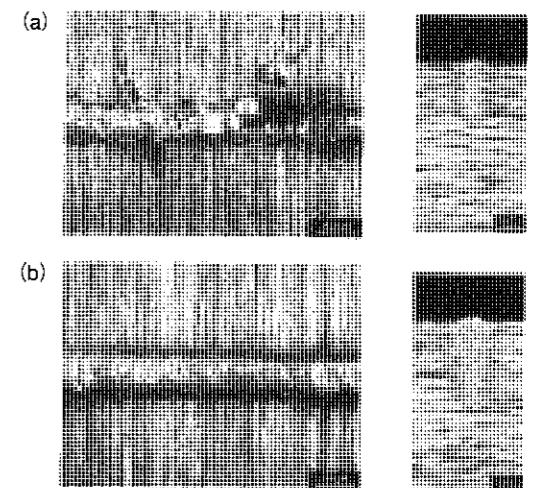


図6 ファイバーレーザーのみでの純銅のビードオン加工結果 (上) とBlue-IRハイブリッドレーザーによるビードオン加工結果 (下)

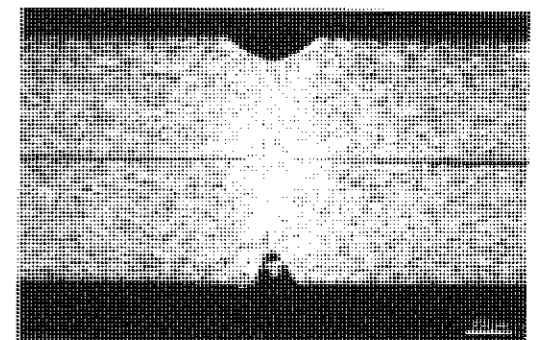


図7 Blue-IRハイブリッドレーザーによる純銅の重ね溶接断面写真

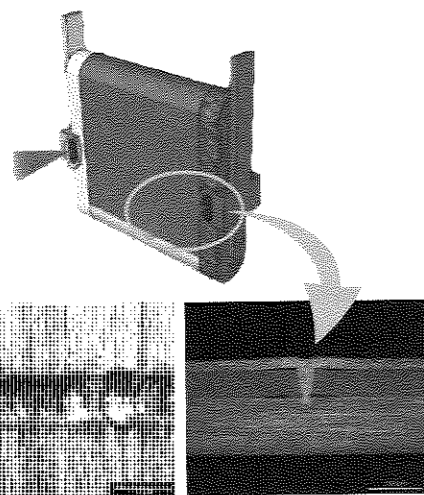


図8 車載バッテリー内部構造例(上段)および銅箔50枚と銅板2枚の重ね溶接結果(下段)

で挟み込んだ構造での重ね溶接結果を図8に示す。Blue-IR ハイブリッドレーザーの特徴である高品質加工と深溶け込みの両立によって、スパッタやブローホールといった欠陥のない良好な溶接を達成している。

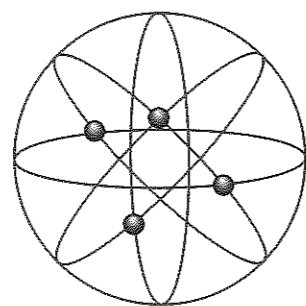
5 おわりに

当社では今後もレーザー加工における溶融現象の解明を

進めるとともに、電池やモータ用途をはじめとした様々な銅部材やアルミ部材、さらには異材溶接技術開発を進め、現象の物理的説明に裏付けられた最適な加工ソリューションをユーザーに提案していきたいと考えている。

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)
- 2) 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, Vol.67, No.11 (2019), 57-61
- 3) 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), 59-62
- 4) Spisz, Ernie W: National Aeronautics and Space Administration, (1969)
- 5) Yuta Ishige, Eisaku Kaji, Etsuji Katayama, Yutaka Ohki, Gábor Gajdásy, András Cserteg: 120W, NA_0.15 Fiber Coupled LD module with 125- μ m clad/NA 0.22 fiber by spatial coupling method, Proc. of SPIE, Vol.10514 (2018)
- 6) 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, Vol.48, No.7 (2020), 369-372
- 7) 岡本康寛: 銅の微細レーザー溶接における光吸収率と溶け込み深さの安定化に関する検討, (2015)



レーザーによる金属積層造形技術の現状 —設計から品質保証に至る— 一貫体制—

増尾 大慈

金属技研㈱ 技術本部 テクニカルセンター

1 はじめに

当社は金属に関する要素技術を受託加工という形でユーザーに提供しており、2013年から金属積層造形についても本格的に取り組みを始めた。一言に金属積層造形と言っても様々な影響因子があり、それらを理解した上で、本技術のメリットを活かした設計・品質管理を行うことが重要である。

本稿では、金属積層造形技術による新しいモノづくりのために留意すべき点や、そのソリューションとして提供しているサービス例を紹介する。

2 当社の概要

当社は1960年に理化学研究所の(旧)金属工学研究グループメンバーが研究の成果を実社会で活かすことを目的に設立された熱処理受託メーカーである。1970年代に当時としては珍しい真空熱処理炉を導入しBoeingスペックを取得する等、高い品質管理体制管理が求められる分野へ進出し、現在では熱処理に加え、ろう付、溶接、熱間等方圧加工法(Hot Isostatic Pressing: HIP)やホットプレスを用いた拡散接合による各種接合、粉末焼結、熱間成形、機械加工、積層造形など金属にまつわる様々な要素技術をユーザーに提供している。

ユーザーが要望する高い品質管理体制を軸として、設計・解析から分析・検査まで行う社内一貫生産を強みとし、自動車、航空・宇宙、エネルギー、液晶・半導体、電気・電子、医療等の幅広い業界からの受託依頼に対応している。

3 金属積層造形(Additive Manufacturing: AM) 事業立ち上げの経緯と実績

3.1 事業立ち上げの経緯

当社は金属のプロとして、常に金属に関わる新しい要素技術を取り入れることを信条としており、積層造形についても2001年より生産工程への適応検討を開始していた。当時、積層造形はRapid Prototypingとして注目された第二次ブームの最中であり、当社も粉末焼結積層造形(Selective Laser Sintering: SLS)方式の積層造形機を導入した。しかし、レーザー出力の低さから高密度の造形品とはならず、造形品内部の空間にブロンズを含有して高密度化を図る技術であったため、樹脂成型用試作金型等の用途にしか適応できなかった。

その後、照射熱源の技術革新に合わせて積層造形技術は著しく向上し、品質要求が高い航空・宇宙業界分野にも活用が期待されるレベルに到達する。それにより産業界の関心が急速に高まり、積層造形技術の第三次ブームが到来することとなった。当社も2013年に電子ビーム積層造形機(Electron Beam Melting: EBM)「Arcam A2X」、レーザービーム積層造形機(Selective Laser Melting: SLM)「EOSINT M280」を導入し、国内での本格的な受託生産を開始した。とくに熱処理知見からの造形品検証に生産開始直後から注力し、積層造形や後熱処理後の金属組織および強度変化、造形工程で発生する内部欠陥を除去するHIP処理検証等、量産部品適応に向けての知見蓄積を行ってきた。