

特別
寄稿

短波長レーザによる銅加工技術の進展

- スマートカントリー構想における青色半導体レーザの役割 -

Advances in Materials Processing Technology of Copper Using Short Wavelength Lasers
- The Role of Blue Diode Lasers in The Smart Country Concept -大阪大学接合科学研究所教授
博士(工学)塚本 雅裕
Masahiro Tsukamoto佐藤 雄二 *1
Yuji Sato東野 律子 *2
Ritsuko Higashino阿部 信行 *3
Nobuyuki Abe舟田 義則 *4
Yoshinori Funada左 今 佑 *5
Yu Sakon大内 誠悟 *6
Seigo Ouchi浅野 孝平 *7
Kohei Asano東條 公資 *8
Koji Tojyo

〈概要〉

我が国の目指すべき「まちづくり」としてスマートカントリー構想「人にやさしく、人が集まれるまちづくり」を提案している。「人にやさしく」は、スマートモビリティの在る社会であり、「人が集まれる」はウイルスリスクを低減する公衆衛生環境を取り入れた安全安心な社会である。銅は、高電気伝導率と超抗菌性を有しているため両社会実現にとって、とても有用な材料である。青色半導体レーザの高出力化・高輝度化によって、銅の加工範囲が拡大してきた。本報では青色半導体レーザの優位性を示すとともに、NEDOレーザプロジェクトで開発した青色半導体レーザを適用した加工装置や銅加工事例を紹介する。

1. はじめに

我が国の目指すべき「まちづくり」としてスマートカントリー構想を提案している。スマートカントリー構想では、「人にやさしく、人が集まれるまちづくり」を中心に置いている。

「人にやさしく」については、スマートシティーやオープンシティーなどのコンセプトがすでに提案されており、自動走行運転システムが機能するスマートモビリティ社会が示されている。スマートモビリティ社会では、IoT環境下、私たちがAIに目的地を知らせるだけでルート案内はもちろんのこと、ビッグデータから引き出した搭乗者全員の個人情報から趣味嗜好、健康状態までをAIが把握し、目的地までの休憩場所の選定、好みのレストランへの案内など、全てをこなしてくれるだろう。このような世の中はそう遠くない未来に実現されるものと思われる。この自動走行を実現するAI搭載自動走行車のコアとなっているのはモータである。モータのコイルには電気伝導率の高い純銅材料が使用されているので、純銅の加工技術は必要不可

欠となる。また、高性能モータ用純銅部品を作り出す次世代の純銅加工技術として有望視されている技術の一つに積層造形技術(Additive Manufacturing, 以下AMと略す)がある。AMについて、図1に示した。AMは、3Dプリンタとも呼ばれる。図1(a)に示したように、AMは7つのカテゴリーを有している。金属のAMには、粉末床溶融結合方式と指向性エネルギー堆積方式が用いられる。レーザを導入した粉末床溶融結合方式および指向性エネルギー堆積方式をそれぞれSelective Laser Melting (SLM) およびLaser Metal Deposition (LMD) と呼ぶ(図1(b))。SLMは金属を敷き詰めてレーザを照射して金属造形する方式、3Dプリンティング(図1(c))であり、LMDは金属粉末供給とレーザ照射を同時に行い、金属造形する方式、3Dプリンティング(図1(d))である。図1(b)に示したようにLMDは、3Dプリンティング以外に補修とクラディング(皮膜形成)を含む。我々は、純銅加工には波長450 nmの青色半導体レーザが適していると考え、同レーザの優位性を示すと共に、同レーザを用いた加工システムの開発および純銅溶接に加

*1 大阪大学接合科学研究所准教授 博士(工学)

*2 大阪大学接合科学研究所特任研究員

*3 大阪大学接合科学研究所特任教授 博士(工学)

*4 石川県工業試験場機械金属部 副部長 博士(工学)

*5 株式会社村谷機械製作所 製造部 製品開発課 課長

*6 ヤマザキマザック株式会社 先行開発センタ HMT領域リーダー

*7 ヤマザキマザック株式会社 先行開発センタ 博士(工学)

*8 株式会社島津製作所 基盤技術研究所 先端分析ユニット副ユニット長

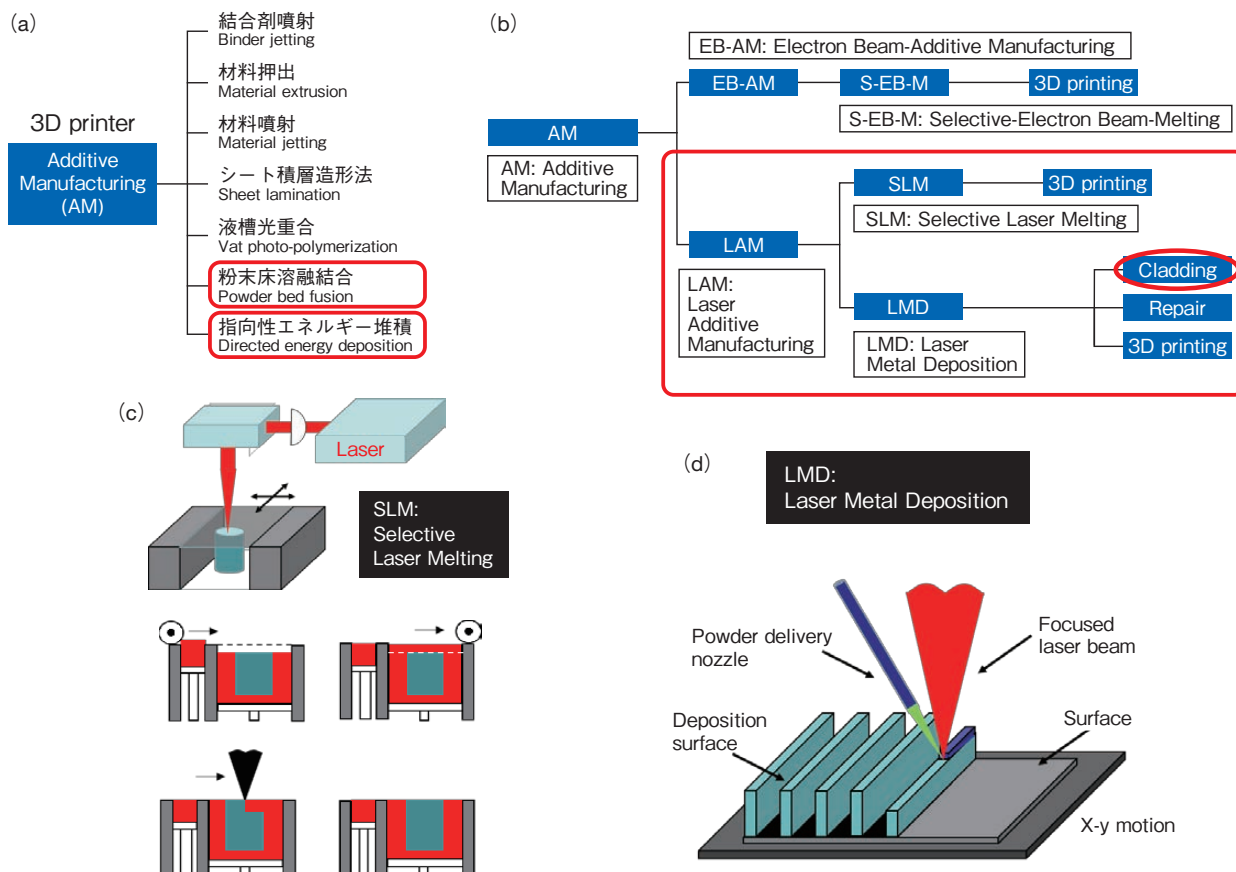


図1 (a) Additive manufacturing (AM) と7つのカテゴリー, (b) Laser additive manufacturing (LAM: レーザを用いたAM), (c) Selective laser melting (SLM: レーザを用いた粉末床溶融結合方式), (d) Laser metal deposition (LMD: レーザを用いた指向性エネルギー堆積方式)
 (a) Additive Manufacturing (AM) and 7 categories, (b) Laser Additive Manufacturing (LAM: AM using a laser.), (c) Selective Laser Melting (SLM: Powder bed fusion method using a laser.), (d) Laser Metal Deposition (LMD: Directed energy deposition method using a laser.)

えて、純銅のAM技術開発を進めてきた。自動車産業における純銅部材の必要性和AM技術を含めた純銅のレーザ加工について前述したが、当加工に対しては、自動車産業だけではなく、電機産業、宇宙産業などからの期待も大きい^{1), 2)}。

「人が集まれる」は、2年前のまち(社会)では、当たり前のことであった。しかしながら、現在は、当たり前ではない。昨年初来、世界的な流行となった新型コロナウイルス感染症は、現在も収束の気配を見せず、我々の生活様式を一変させている。我が国においても緊急事態宣言が4度発令され、社会経済活動に甚大な影響を及ぼし続けている。新型コロナウイルス感染症をはじめとするウイルス感染症が発生した場合に、迅速かつ的確な対応を可能とし、社会・経済活動への影響を最小限に留めることに貢献する技術開発が求められている。近年のウイルス感染症の動向をみると、当該ウイルスは、海外から持ち込まれる。海外からの人・物の流れを停止すれば、ウイルスの国内への侵入を阻止できる。しかしながら、人・物の流れをゼロにすることは、グローバル化の現代では、困難である。人体にウイルスが侵入した場合、それを撃退するのがワクチンである。今回の新型コロナウイルス感染症を終息させるためにワクチンが開発されているが、ワクチン開発には1年以上の時間を要することがわかった。「海外からの人・物の流れ阻止は無理」、「ワクチンは時間がかかる。」の状況から海外から来たウイルスが

人に感染する前の「公衆衛生環境」がウイルスを食い止める「最後の砦」であることがわかる。今回の新型コロナウイルス感染症が長期化していることから「ウイルスによるリスクを低減する公衆衛生環境」を構築することが、重要かつ急務であることがわかる。さらに考えておかなければならないことは、次のウイルス感染症「Next コロナ」の存在である。新型コロナウイルス感染症が終息した後でも、グローバル化によって様々なウイルスが海外から国内へ移入し、新たな感染症を引き起こす可能性を否定できない状況にあるからである。新たな感染症が広がる度に社会・経済活動に甚大な被害が出る。その被害を最小限に抑えるためにも「最後の砦」である「ウイルスによるリスクを低減する公衆衛生環境」構築が必要となる。国内には、紫外線、酸化チタン、銅³⁾、銀などの様々なウイルス不活化技術があり、それぞれの技術を適用することで「ウイルスによるリスクを低減する公衆衛生環境」を構築できると考えられる。しかしながら、大地震が起こった際は、別である。大地震が起きると、必ず停電が起きる。すると避難している屋内では、紫外線、紫外線レーザ、酸化チタン、可視光応答型酸化チタンが機能しなくなる。断水も同時に起こるので、手洗いうがいができなくなる。一気に公衆衛生状態が悪化する。もし、コロナ禍で大地震が起こったら、当感染症の急拡大・大流行(パンデミック)が生じ、多くの人が押し寄せる病院の病床数が足りなくなることは

言うまでもない。こういう状況こそ、光源を必要とせず、ウイルスを不活化する銅などによる部材が「最後の砦」である「ウイルスリスクを低減する公衆衛生環境」として大きな役割を果たす。銅を使って手すりや取手の部材を作る場合、ウイルス不活化と機械的強度、耐久性を求められるので、肉厚の大きい部材になってしまい、銅の使用量が増えるので生産コストが増大する。そこで、銅のコーティング技術が必要となる。銅のコーティングによって、銅の使用量が抑えられ、コストダウンに繋がる。コーティング方法には、メッキ、溶射およびレーザクラディングがある。機械的強度、耐久性に着目するとレーザクラディングが最も優れている。レーザクラディングは、図1 (b) からわかるようにAM技術のLMDに含まれる。

本報では、はじめに金属材料加工における青色や緑色の波長領域に発振波長のある短波長レーザの優位性を示し、海外メーカーによる青色半導体レーザおよび緑色レーザ開発状況を紹介する。次にNEDOプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(2016年度から2020年度)(以下NEDOレーザープロジェクト)における青色半導体レーザ開発について説明する。続いてNEDOレーザープロジェクトで開発した青色半導体レーザを適用した加工装置を示し、最後に、今後の展開として「青色半導体レーザー接合加工研究会」について紹介する。

2. 青色や緑色の波長領域に発振波長のある短波長レーザの優位性

現在、加工用の高出力レーザとしては主に波長0.8～1.06 μmのレーザが使われている。銅に対する光の吸収率を図2に示す。図2からわかるように近赤外線レーザの波長域では吸収率が10%以下⁴⁾と低いため、当レーザによる銅の加工は困難である。しかしながら、緑色の波長である500 nm帯以下になると急激に光の吸収率は増加し、波長400 nm帯では吸収率が60%に達する⁴⁾。波長400 nm帯のレーザを使用することで、銅の加工が容易に行えることになる。

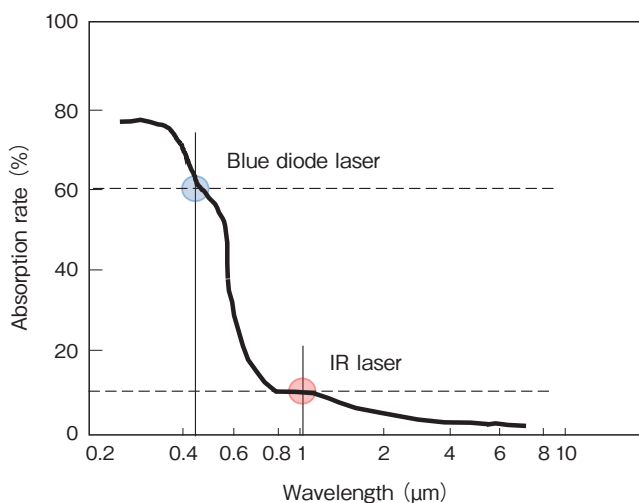


図2 銅に対する光の吸収率
Light absorption rate for copper.

3. 青色半導体レーザおよび緑色レーザ開発状況

3.1 海外メーカーによる開発

青色半導体レーザの製造メーカーとしては、Laserline, NUBURU, Coherent, BWT Beijing社などが挙げられる。

Laserline社⁵⁾のblueレーザは、波長445 nm, 出力2,000 Wでファイバコア径は600 μm, 強度は0.7 MW/cm²になり, BPPは60 mm·mrad, NAは0.2である。また, NUBURU社⁶⁾のAOシリーズでは, AO-650が, 波長450 nm, 出力650 Wでファイバコア径は400 μm, 強度は0.5 MW/cm²になり, BPPは<30 mm·mrad, NAは0.22である。なお, 別のラインナップのAIシリーズでは, AI-1500が, 波長~445 nm, 出力1.5 kWでファイバコア径は<125 μm, 強度は12.2 MW/cm², BPPは<11 mm·mrad, NAは0.22, が達成されているようである。Coherent社では, 200 μm径コアファイバから500 Wの高出力・高輝度を達成し, 更には大径ファイバにてkW級の出力も達成⁷⁾し, 強度1.6 MW/cm²を得ている。

近年, 中国の企業においても, 青色半導体レーザ開発, 及び, 青色半導体レーザを用いた加工技術の開発に取り組んでいる。BWT Beijing社では, 波長450 nm, 出力1,000 Wでファイバコア径330 μm (NA 0.22) を実現していることが報告された⁸⁾。また, UW社では, 波長455 nm, 出力1,000 Wでファイバコア径800 μm (NA 0.22) の製品化が行われている⁹⁾。

一方, 緑色レーザに関しては, TRUMPF社¹⁰⁾のTruDisk 3022が, 波長515 nm, 出力3,000 Wでファイバコア径は200 μm, 強度は9.6 MW/cm² (BPPは8 mm·mrad, NAは0.1) に, また, TruDisk 2021が, 波長515 nm, 出力2,000 Wでファイバコア径は100 μm, 強度は25.5 MW/cm² (BPPは4 mm·mrad, NAは0.1) に, さらに, TruDisk 1020が, 波長515 nm, 出力1,000 Wでファイバコア径は50 μm, 強度は50.9 MW/cm² (BPPは2 mm·mrad, NAは0.1) に達している。TruDisk 1020については, SLM型の積層造形装置に搭載されている。

3.2 NEDOレーザープロジェクトにおける青色半導体レーザ開発

NEDOレーザープロジェクトでは, 大阪大学接合科学研究所の研究開発グループとパナソニック株式会社の研究開発グループが異なるタイプの青色半導体レーザをそれぞれ開発してきた。

大阪大学接合科学研究所グループでは, 日亜化学工業株式会社協力のもと, 2018年には, コア径100 μm, NA 0.20, ファイバ端出力100 Wの青色半導体レーザを開発した。本レーザは, ファイバ端でのパワー密度が1.3 MW/cm²に達し, 世界最高輝度を達成した。さらに2020年には出力を100 Wから200 Wに増大させた。コア径は100 μmなので, ファイバ端でのパワー密度は2倍の2.6 MW/cm²となり, 青色半導体レーザ光源単体としての世界最高輝度を更新した。また同2020年には青色半導体レーザの出力500 Wを達成した。さらにコア径400 μmの光ファイバから出力1500 Wを得ることができた。ファイバ端でのパワー密度は, 1.2 MW/cm²である。

パナソニック株式会社のグループでは, ダイレクトダイオードレーザの波長合成技術を用いた高ビーム品質(波長400～450 nm, 出力135WでBPPは1.5 mm·mrad)な青色レーザ光源

(ファイバ出力は行っていない)の開発成果をPHOTONICS WEST 2020で発表した¹¹⁾。これらの成果を基に、NEDOレーザープロジェクトの最終年度である2020年度から環境省「革新的な省CO₂実現のための部材や素材の社会実装・普及展開加速化事業」にて、「パルス駆動機能搭載の高ビーム品質・高出力青色レーザ加工機の量産開発」を行っている。

4. NEDOレーザープロジェクトで開発した青色半導体レーザを適用した加工装置

4.1 世界初の青色半導体レーザ搭載ハイブリッド複合加工機

4.1.1 Laser metal deposition (LMD) 技術の開発

従来方式のLMDは加工ヘッドの中心から高出力レーザを照射し、母材表面に熔融池を形成してそこへ材料粉末をサイドから噴射投入することで皮膜を形成することができる。従来方式LMDでは熔融池の安定形成が重要であり、熔融池の安定形成のためには、数kW以上の高出力レーザが必要となる。そのため、精密部品への加工では、母材の歪みや希釈の影響が問題となる。内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「高付加価値設計・製造を実現するレーザコーティング技術の研究開発」(以下SIP 1期プロジェクト)では、従来方式LMDのレーザと粉末流の位置を置き換えたマルチビーム方式を提案し、マ

ルチビーム加工ヘッドを開発した。当加工ヘッドでは6台の青色半導体レーザを重畳し100 Wの出力を実現した¹²⁾。本方式(図3)は母材の歪みや希釈の影響が少ないため、小型で薄肉かつ高精度な製品に対応可能な皮膜形成を実現した。

4.1.2 200 W青色半導体レーザを搭載した複合加工機の開発

銅の皮膜形成や溶接には、0.1 ~ 1 MW/cm²のパワー密度が必要となる。そこで、NEDOレーザープロジェクトで開発した200 W青色半導体レーザ3台をマルチビーム加工ヘッド(図4)に組み込んだハイブリッド複合加工機(図4)を、NEDOレーザープロジェクト参画企業のヤマザキマザック株式会社とともに開発した¹³⁾。図4からわかるように、3ビームの中心軸

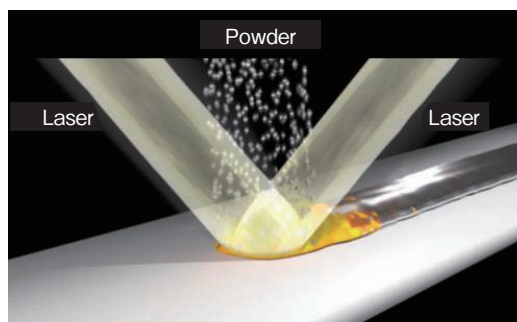


図3 マルチビーム方式によるLMD LMD using a multi-beam method.

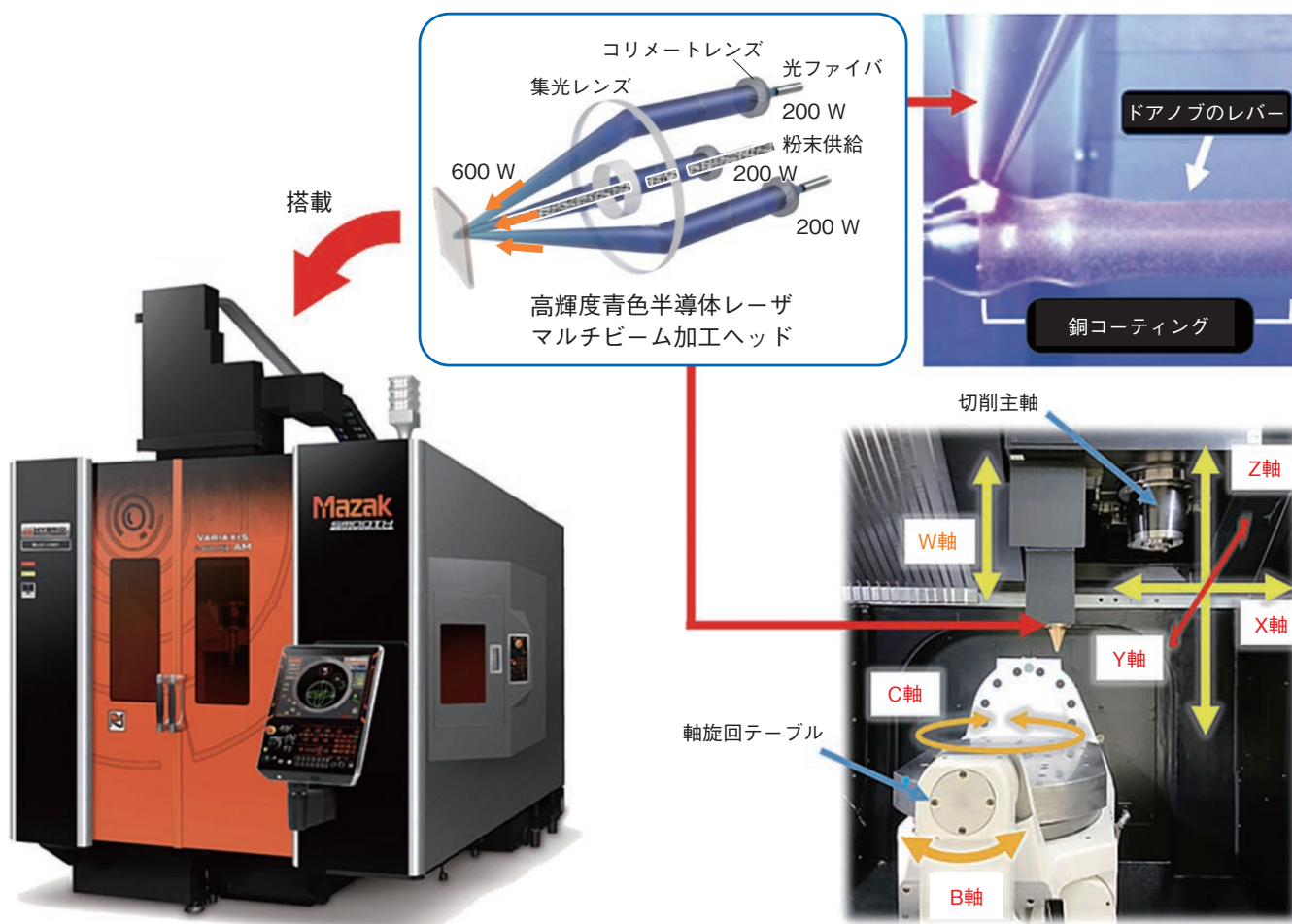


図4 200W青色半導体レーザ3台搭載マルチビーム加工ヘッドおよび加工ヘッドを組み込んだハイブリッド複合加工機 Multi-beam processing head equipped with three 200 W blue diode lasers and hybrid multi-function processing machine with a processing head.

に沿って銅粉末ビームが供給される。従来、マルチビーム重畳領域の出力が100 W程度であったが、NEDO レーザープロジェクトにおいて600 Wに増大したことで、レーザ集光スポットにおける高いパワー密度が達成でき、ステンレスやアルミニウムなどの金属材料への銅のコーティング速度が6倍以上に向上した。また複雑な形状の部品などに対し、銅の高速・精密コーティングが可能になった¹⁴⁾(図5)。

4.2 青色半導体レーザ搭載ガルバノスキャナ方式の SLM型3Dプリンタ

本プロジェクトで開発した200 W青色半導体レーザを搭載したガルバノスキャナ方式のSLM型3Dプリンタの開発を行った¹⁵⁾。図6にはガルバノスキャナ方式3Dプリンタの概略図、図7には外観写真をそれぞれ示す。パウダーベッド上のレーザ集光スポット径は250 μmである。ガルバノミラーの角度を制御し、所望の位置にレーザ光を集光することで、ステージ上の必要な部分の純銅粉末を熔融凝固させ積層造形を試みた(図8)。また、CADソフトを組み合わせることで微細な構造

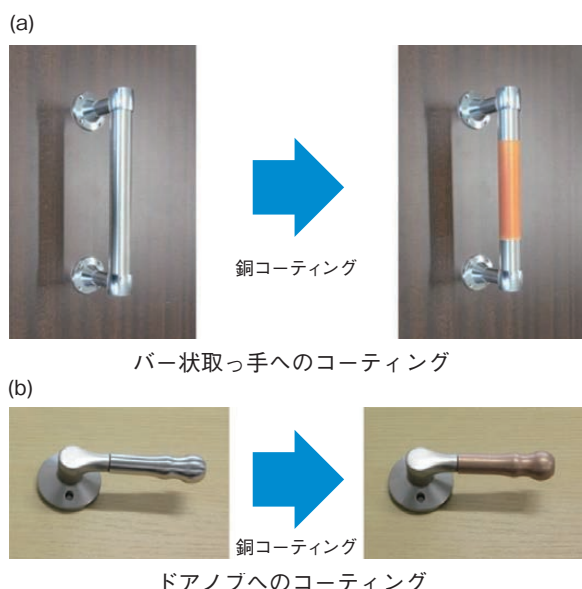


図5 青色半導体レーザを用いた銅の高速・精密コーティング (a)バー状取っ手へのコーティングと(b)ドアノブへのコーティング
High-speed and precise coating of copper using a blue diode laser. (a) Coating on the bar-shaped handles and (b) Coating on the doorknobs

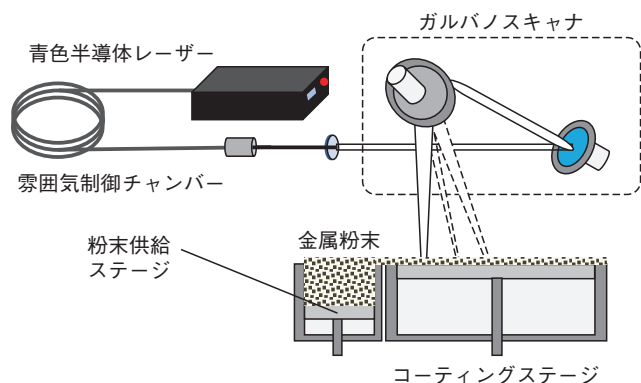


図6 青色半導体レーザを搭載したSLM型3Dプリンタの概略図
Schematic diagram of a SLM method 3D printer equipped with a blue diode laser.

を有する銅造形物を自在に積層造形することも可能になり、自動車用銅材部品や電子部品など高精度技術開発へと繋がるのが期待される。

4.3 青色半導体レーザと近赤外線ファイバレーザ(古河電気工業製)を組み合わせたハイブリッド溶接装置

200 W青色半導体レーザを出力1.5 kW近赤外線ファイバレーザと組み合わせたハイブリッドレーザシステムを構築した。本システムでは200 W青色半導体レーザを出力1.5 kW近赤外線ファイバレーザと組み合わせたものを2ペア使用した。図9にハイブリッドレーザ照射光学系のセットアップ図を、図10には外観写真を示す。ダイクロイックミラーを用いてそ

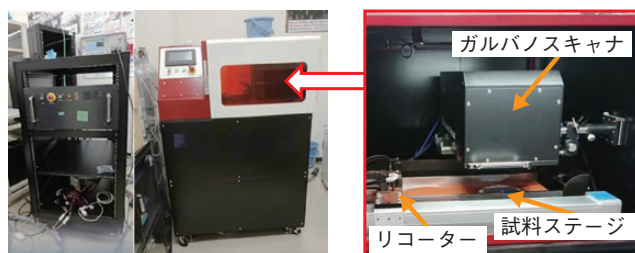


図7 青色半導体レーザを搭載したSLM型3Dプリンタの外観写真
External appearance photograph of a SLM method 3D printer equipped with a blue diode laser.

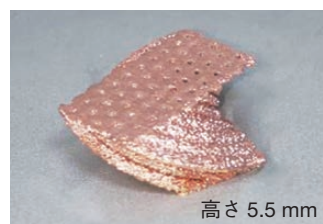


図8 青色半導体レーザを搭載したSLM型3Dプリンタを使った純銅の積層造形物
Pure copper laminated molding using a SLM method 3D printer equipped with a blue diode laser.

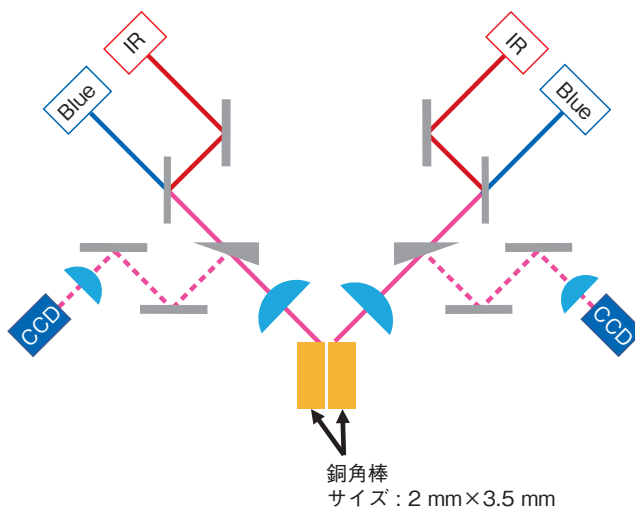


図9 青色半導体レーザと近赤外線ファイバレーザを組み合わせたハイブリッドレーザ照射光学系のセットアップ図
Setup diagram of a hybrid laser irradiation optical system that combines a blue diode laser and a near-infrared fiber laser.

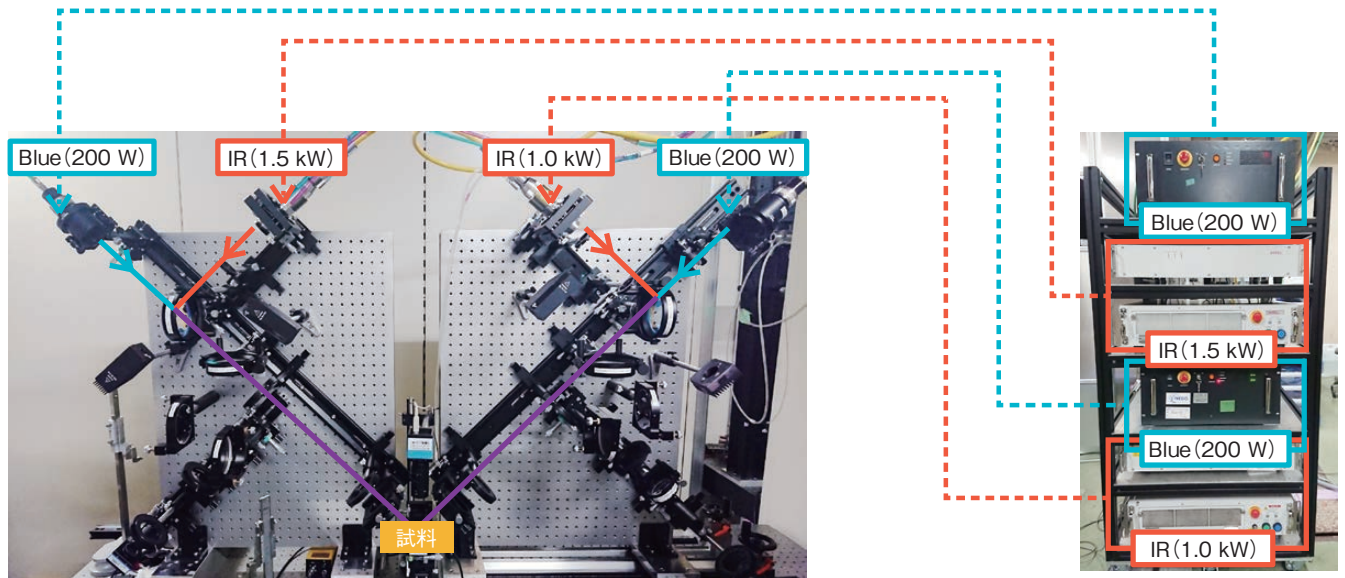


図10 青色半導体レーザと近赤外線ファイバレーザを組み合わせたハイブリッドレーザ照射光学系のセットアップ外観写真
Setup photograph of a hybrid laser irradiation optical system that combines a blue diode laser and a near-infrared fiber laser.

それぞれのレーザを同軸に重畳させ、平凸球面レンズを用いて加工点に集光した。この時の集光スポット径は、1.5 kW近赤外線レーザが60 μm 、200 W青色半導体レーザが200 μm である。本システムを適用することで、モータコイル製造に必要な純銅角線の高速溶接が可能になった(図11)。

4.4 3台の500 W青色半導体レーザを搭載した マルチビーム溶接装置

NEDOレーザプロジェクトで開発した青色半導体レーザの実践的評価を行うために溶接実験を行ない、出力200 Wにおいて厚さ200 μm の純銅基板への貫通溶接を達成した。しかし、当出力では純銅基板の板厚を大きくしていくと投入熱量が足りないために溶け込みは小さくなってしまい、溶接能力には限界があった。そこで、厚板溶接を実現するために出力500 Wの青色半導体レーザを3台用いたマルチビーム加工ヘッドを開発した。当加工ヘッドの外観写真を図12(a)に示す。500 W青色半導体レーザを加工点で3ビーム重畳し、重畳位置で計測した最高出力は1.5 kWとなった(図12(b))。3台の青色半導体レーザそれぞれの集光スポットと重畳したスポット画像を図13に示す。1点に集光したビーム径は300 μm となり、3本のビームが1点に重畳されていることが確認できる。本加工ヘッドを用いてビードオン溶接を行ったところ、出力1,000 Wにおいて1 mm厚の銅板を貫通溶接させることができた(図14)。銅板溶接が可能になることで自動車の部品やIC部品、モータ、コイルなどの材料など様々な分野での利用が可能になると考えられる。

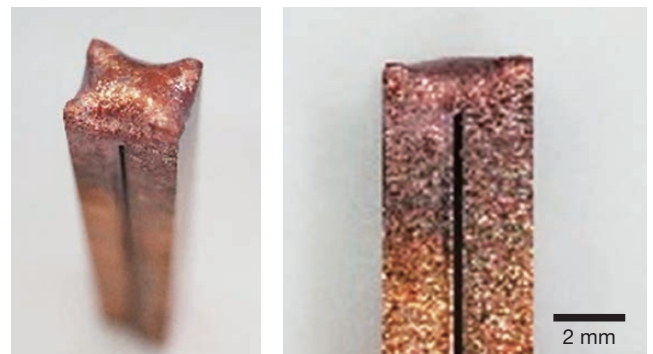


図11 青色半導体レーザと近赤外線ファイバレーザを組み合わせたハイブリッドレーザシステムを用いた純銅角線の高速溶接
High-speed welding for a pure copper square wire using a hybrid laser system that combines a blue diode laser and a near-infrared fiber laser.

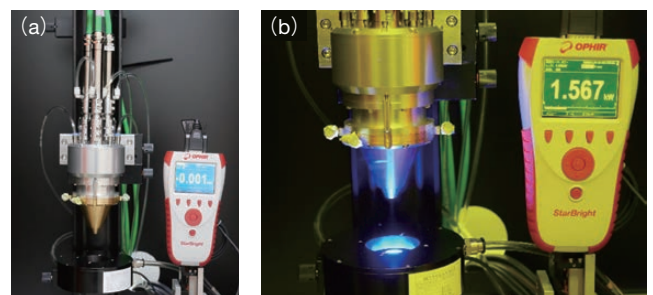


図12 500 W青色半導体レーザを3台用いたマルチビーム加工ヘッドを開発
(a)加工ヘッド (b)レーザ出力
Multi-beam processing head using three 500 W blue diode lasers has been developed.
(a) Processing head (b) Laser output

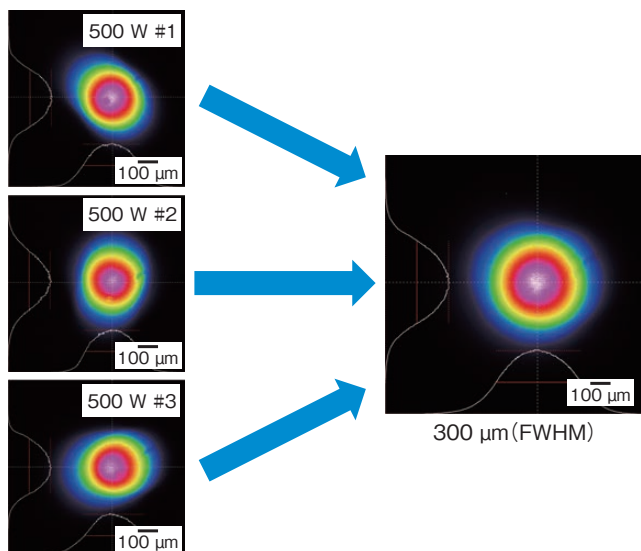


図13 500 W青色半導体レーザーを3台重畳したビームプロファイル
Beam profile superimposed with three 500 W blue diode lasers.

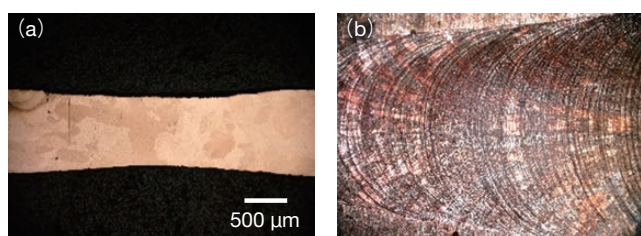


図14 マルチビーム加工ヘッドを用いたビードオン溶接実験結果
(出力1,000 W)
(a) 進行方向に対して垂直方向の断面写真 (b) 表面写真
Bead-on welding experiment results using a multi-beam processing head (output 1,000 W)
(a) Cross-sectional photograph in the direction perpendicular to the scanning direction of the laser focused spot (b) Surface photograph

5. 今後の展開:「青色半導体レーザー接合加工研究会」

NEDOレーザープロジェクトで開発した青色半導体レーザーの社会実装を加速するために「青色半導体レーザー接合加工研究会」を2020年12月1日に設立した¹⁶⁾。幹事会員は、古河電気工業株式会社、株式会社島津製作所、日亜化学工業株式会社と大阪大学(接合科学研究所)、一般会員は、2021年8月1日現在、21社である。幹事会員から選出された代表理事によって理事会が構成され、当研究会は運営される。一般会員に対し青色半導体レーザーおよび加工に関するセミナーを定期的に行うとともに、必要に応じて一般会員から技術相談を受ける。当研究会幹事会員は、主に、青色半導体レーザーを用いた銅の溶接およびAM技術に関する研究に取り組む。

6. おわりに

本報では、青色半導体レーザー開発および青色半導体レーザーを搭載した加工装置開発状況について、スマートカンントリー構想「人にやさしく、人が集まれるまちづくり」における青色半導体レーザーの役割とともに説明した。青色半導体レーザーの高出力化・高輝度化が進み、加工適用範囲が拡大している現状から、スマートカンントリー構想が示すスマートモビリティ社会やウイルスリスクを低減する公衆衛生環境を取り入れた安全安心な社会実現のために、青色半導体レーザーによる銅加工技術は有用な技術となり得る。本報の最後に紹介した「青色半導体レーザー接合加工研究会」を起点とした今後の研究開発に期待したい。

参考文献

- 1) Kano, M., Suzuki, K., Matsuyama, H., Sato, S., Yamaguchi, M., Ninomiya, R., Nakahara, Y., 2000, "New Copper Alloy Powder for Laser-Clad Valve Seat Used in Aluminum Cylinder Heads," SAE Technical Paper 2000-01-0396.
- 2) Kawasaki, M., Takase, K., Kato, S., Nakagawa, M., Mori, K., Nemoto, M., Takagi, S., Sugimoto, H., 1992, "Development of Engine Valve Seats Directly Deposited onto Aluminum Cylinder Head by Laser Cladding Process," SAE Technical Paper 920571.
- 3) <http://www.jcda.or.jp/center/tabid/69/Default.aspx>
- 4) レーザー学会, "レーザーハンドブック" 第2版 オーム社 pp.830.
- 5) <https://www.laserline.com/en-int/ldm-blue-diode-laser/>
- 6) <https://nuburu.net/products/>
- 7) 水谷, Coherent社高輝度青色半導体レーザーの開発と動向, 溶接学会2021年度春季全国大会フォーラム, (2021), F-9.
- 8) Xiaohua Chen他, kW-level high brightness blue diode laser, Proc. SPIE LASE, 11668, (2021), 116680I-1.
- 9) <https://uw-j.co.jp/blue-laser-product/>
- 10) https://www.trumpf.com/ja_JP/products/laser/ディスクレーザー/グリーンの波長を持つtrudisk/
- 11) <https://news.panasonic.com/jp/press/data/2020/01/jn200129-1/jn200129-1.html>
- 12) 浅野孝平, 塚本雅裕, 舟田義則, 左今佑, 森本健斗, 佐藤雄二, 升野振一郎, 原隆裕, 西川宏: 金属の精密クラディングのためのマルチレーザービーム照射法の開発 The Review of Laser Engineering, Vol.46, No.10 pp.604-613.
- 13) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 「従来比6倍速で銅コーティング可能な青色半導体レーザー複合加工機を開発—細菌・ウイルスリスク低減による公衆衛生環境実現への活用に期待—」.
- 14) NEDOプレスリリース: https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101324.html
- 15) 塚本雅裕, "青色半導体レーザーによる積層造形と溶接技術", OPTRONICS (2021) No.4, p.94-98.
- 16) http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/work/topics_210408.pdf