

# 青い光が拓く新たな純銅接合・3D プリンティング技術

Development of Copper Joining and Additive Manufacturing Technology using Blue Diode Laser

塚本 雅裕

Masahiro TSUKAMOTO

## 1. はじめに

近年、自動車の自動走行運転システムや音声認識等は IoT・AI・ビッグデータ活用により、目覚しく進化しており、今後もその進化は加速するものと思われる。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等、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。(Fig.1 未来の乗り物、AI 搭載自動走行車)

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ーである。モーター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である。また、モーター用純銅部品を高速高品質に作り出すための金属積層造形(3D プリンティング)技術も期待される。また、自動車産業だけではなく電気産業、宇宙産業等でも純銅のレーザー加工の要求は高い<sup>1) 2)</sup>。我々は、純銅加工には波長 450nm の青色半導体レーザーが適していると考え、同レーザーの優位性を示すと共に同レーザーを用いた加工システムの開発および純銅溶接、純銅の 3D プリンティングの基盤技術開発を進めている。

本報では、まず青色半導体レーザーの優位性を示し、3D プリンティング技術の一つであるレーザーメタルデ

ポジション (Laser metal deposition : LMD) の新方式について紹介する。次に新方式を適用した青色半導体レーザーを 6 台用いた LMD 装置の開発および当該装置による純銅コーティングの結果について報告する<sup>3)-8)</sup>。次に 100W 青色半導体レーザー開発および当該レーザーを 3 台用いた世界初青色半導体レーザー搭載複合加工機について紹介する。また、200W 青色半導体レーザーおよびレーザービームコンバイニング技術を駆使して開発した 1kW 青色半導体レーザーについて報告する。最後に選択的レーザー溶融法 (Selective laser melting : SLM) に基づく青色半導体レーザー搭載簡易 3D プリンターについて紹介する。

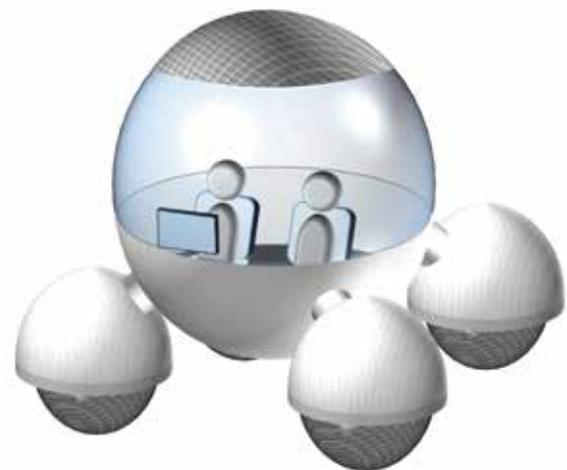


Fig.1 自動走行車(イメージ)

## 2. 青色半導体レーザー

### 2.1 純銅に対する光吸収率の波長依存性

一般的なレーザー溶接やレーザー切断などに用いられているレーザーは、波長  $0.8 - 1.08 \mu\text{m}$  の近赤外線レーザーである。純銅に対する光の吸収率は Fig. 2 に示すように近赤外線レーザーの波長域では 10% 以下<sup>9)</sup> と低い。そのため、当レーザーによる純銅の加工は困難である。しかしながら、波長が  $500\text{nm}$  以下になると急激に光の吸収率は増加し、波長  $400\text{nm}$  帯では吸収率が 60% に達する<sup>9)11)</sup>。つまり波長  $400\text{nm}$  帯のレーザーを使用することで、純銅の加工が容易に行なえる。そこで我々は、発振波長が  $450\text{nm}$  の青色半導体レーザーに着目し純銅加工を試みてきた。

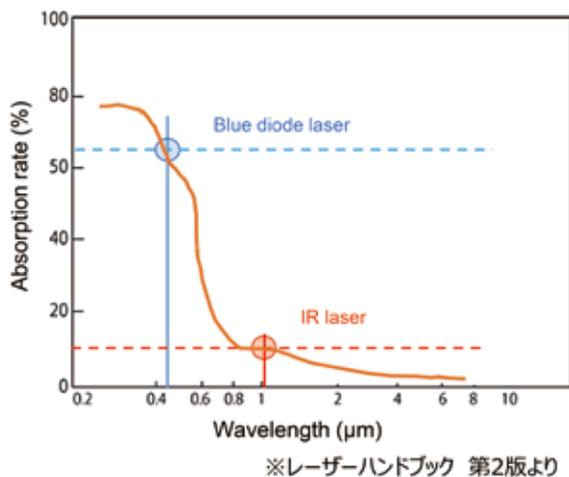


Fig. 2 純銅に対する光吸収率の波長依存性

### 2.2 LMD 技術

従来方式の LMD の模式図を Fig. 3 に示す。加工ヘッドの中心から高出力レーザーを照射し、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、数 kW 以上の高出力レーザーを必要とする。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ーコーティング技術の研究開発」(以下 SIP プロジェクト) では、従来方式 LMD のレーザーと粉末流の位置を置き換えたマルチビーム方式

(Fig. 4) を提案し、マルチビーム加工ヘッドを開発した<sup>12)</sup>。本方式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 (コーティング) 技術である。

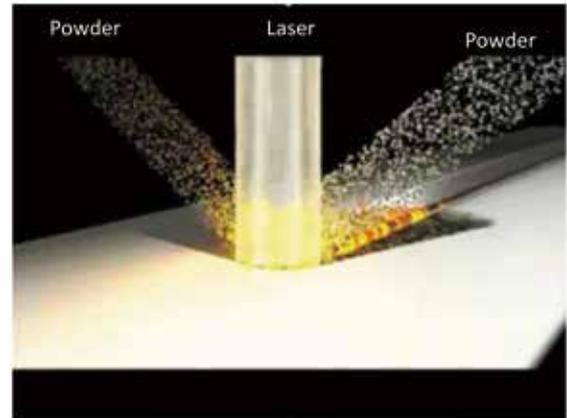


Fig. 3 従来方式のレーザーメタルデポジション

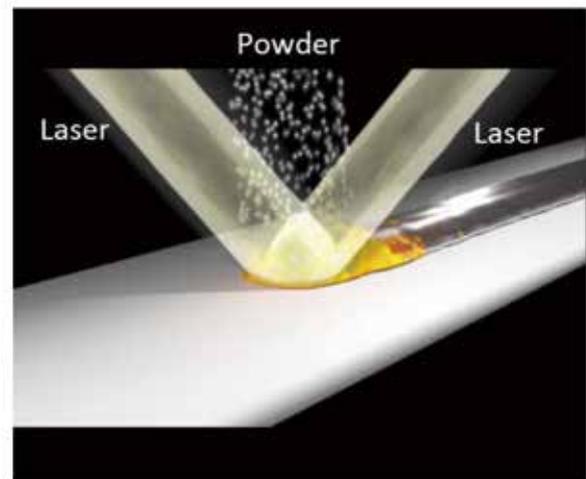


Fig. 4 マルチビーム方式によるレーザーメタルデポジション

### 2.3 マルチビーム方式 LMD 技術の開発

SIP プロジェクトにおいてマルチビーム方式を採用した LMD 装置を開発した。当装置では 6 本のレーザーを加工点で重畳することができる (Fig. 5)。開発当初、市販されていた青色半導体レーザーの出力は  $20\text{W}$  だった。しかし、6 台 (6 本) の  $20\text{W}$  青色半導体レーザーをマルチビーム加工ヘッドに搭載し、それぞれのビームを重畳すると、基板上で総出力、約  $100\text{W}$  を得ることが出来る。当該マルチビーム加工ヘッドを用いて純銅の皮膜形成を試みた<sup>13) 14)</sup>。粉末として、平均粒径が  $30 \mu\text{m}$  の純銅粉末を使用した。レーザー照射と粉末供給を同時に行うと、飛行中の純銅粉末が加熱され<sup>12)</sup>、基板上にて熔融

凝固して純銅皮膜が形成される。Fig. 6 に純銅の皮膜形成結果を示す。このようにラティス構造皮膜やスパイラル構造など皮膜形成だけでなく、純銅のパターニングができるようになった。

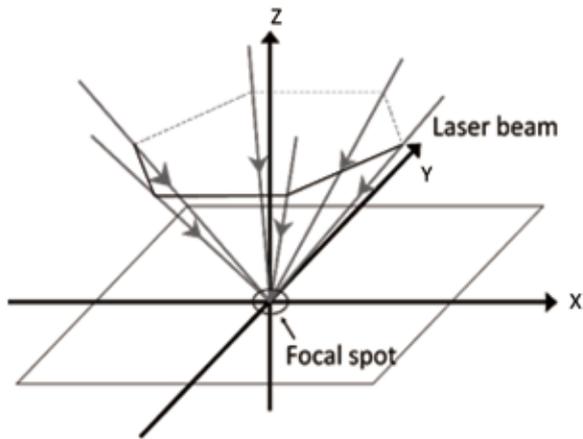


Fig. 5 6本のレーザービーム重畳

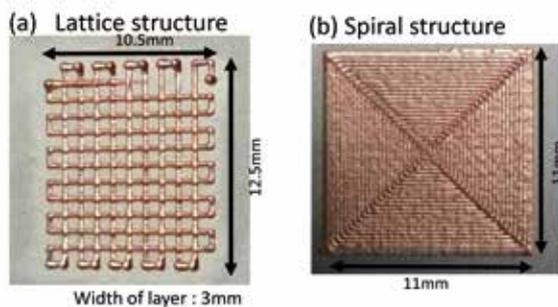


Fig. 6 6台の青色半導体レーザーを用いたマルチビーム方式LMD装置により形成された(a)純銅ラティス構造皮膜 (b)純銅スパイラル構造皮膜

### 3. 世界初 青色半導体レーザーを搭載した複合加工機の開発

純銅の皮膜形成や溶接には、 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$ のパワー密度が必要となる。20W 青色半導体レーザー1台では、出力、および達成されるパワー密度が低い。そこで、我々は、NEDO「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PJ)において、株式会社島津製作所と国立大学法人大阪大学接合科学研究所が日亜化学工業株式会社の協力のもと、青色半導体レーザーの高輝度・高出力化の研究開発を推進している。2018年にはコア径 $100 \mu\text{m}$ 、ファイバー端出力100Wの青色半導体レーザーを開発した。本レー

ザーは、ファイバー端でのパワー密度が $1.3 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ に達し、世界最高輝度を達成した。100Wの青色半導体レーザー3台をマルチビーム加工ヘッドに組み込み(Fig. 7)、世界で初めて当該加工ヘッドを搭載した複合加工機をNEDOレーザーPJ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。当該加工機では切削加工と付加加工が可能となった。Fig. 8に当該加工機の外観写真を示す。当該加工機では、従来加工が困難であった純銅材料の高効率・高品質溶接やLMDが可能となった。

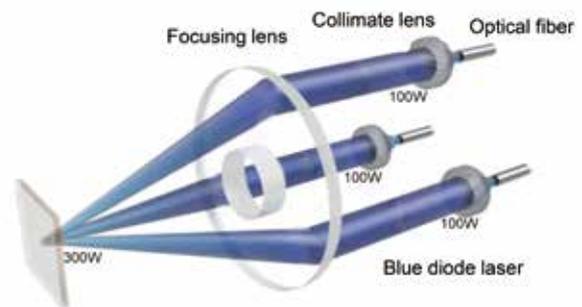


Fig. 7 青色半導体レーザーマルチビーム加工ヘッド。100W 高輝度青色半導体レーザーを3台搭載



Fig. 8 青色半導体レーザー搭載複合加工機

## 4. 更なる高輝度・高出力化にむけて

### 4.1 高輝度青色半導体レーザー光源の開発

前述した青色半導体レーザーの出力を 100W から 200W に増大させた。コア径は  $100\mu\text{m}$  なので、ファイバー端でのパワー密度は 2 倍の  $2.6 \times 10^6\text{ W/cm}^2$  となり、青色半導体レーザー光源単体としての世界最高輝度を更新した。本レーザーを用いて  $\phi 10\text{mm}$ 、厚み  $0.5\text{mm}$  の純銅パイプと SUS304 パイプの異種材料接合(突合せ溶接)を行い、高輝度青色半導体レーザーの効果を実証した。

### 4.2 コンバイニング技術による高出力化：1kW 青色半導体レーザー

5 台の 200W 青色半導体レーザー光源から出力されたレーザー光を 1 本の光ファイバーに結合するために、レーザービームコンバイニング技術を開発した。Fig. 9 に青色半導体レーザービームコンバイニング技術の模式図を示す。Fig. 9 に示しているように 1 本の光ファイバーから出力 1kW を達成した。高出力化と入力側の光ファイバーコアの小径化を両立したことにより、出力端における光ファイバーのコア径および NA はそれぞれ  $400\mu\text{m}$  および 0.20 である。高出力化・高輝度化によって、従来の青色半導体レーザー技術では難しいとされていた数 mm 厚の純銅積層のための LMD を始め、レーザー切断加工等の実現に向けて前進した。電気自動車(自動走行車)はもちろんのこと、高い精度が要求される航空・宇宙などの産業における加工での利用が見込め、今後の応用展開に期待が集まっている。



Fig. 9 1kW 青色半導体レーザービームコンバイニング技術の模式図

## 6. 波及効果

本プロジェクトで開発した 200W 高輝度青色半導体レーザーを選択的レーザー溶融 (Selective Laser Melting; SLM) 方式による簡易 3D プリンターに組み込み、純銅の積層造形を試みた。Fig. 10 に当該簡易 3D プリンターの (a) 外観写真および (b) 原理模式図を示す。パウダーベッド上のレーザー集光スポット径は  $100\mu\text{m}$  を実現している。X-Y ステージに取り付けたレーザー集光ヘッドを走査することで、パウダーベッド上の必要部分の純銅粉末を溶融凝固させ積層造形物を形成した (Fig. 11)。従来の近赤外線レーザーでは困難であった純銅の積層造形が可能となり、スマートモビリティ社会を構成する自動走行車等に必要の純銅部品製造の高精度技術開発へと繋がる。

純銅に対する光の吸収率が近赤外線の波長領域よりも

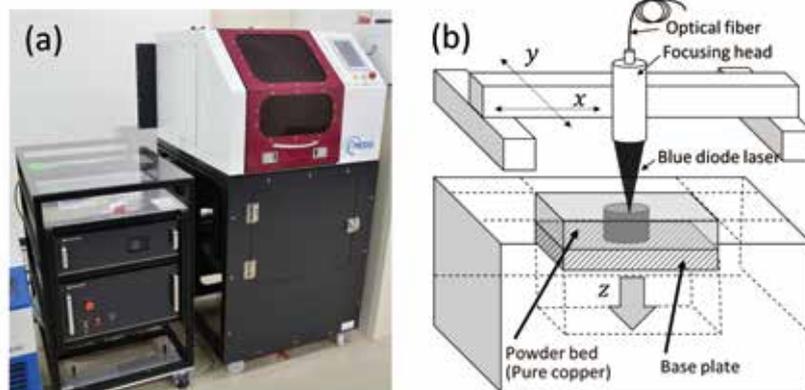


Fig. 10 100W 高輝度青色半導体レーザーを用いた SLM 方式による簡易 3D プリンター, (a) 外観写真, (b) 原理模式図

青色の波長領域において高いことを示してきたが、これは、他の金属材料に対しても同様である<sup>9)</sup>。つまり、青色半導体レーザーは、他の金属材料を加工する場合においても従来の近赤外線半導体レーザーより優位性を有する。今後、青色半導体レーザーの高出力化・高輝度化とともに低価格化が進めば、従来の近赤外線半導体レーザーが青色半導体レーザーに置き換わる日が近づく。



Fig. 11 簡易 3D プリンターでの純銅積層造形物

## まとめ

本報では、純銅に対する光の吸収率は波長が 500nm 以下になると急激に増加し、400nm 帯域の青色半導体レーザーは純銅の加工に適していることを示すとともに、青色半導体レーザーの高出力化・高輝度化およびその加工事例など、最新の青色半導体レーザーの開発状況について紹介した。青色半導体レーザーの出力が 1kW に達し、さらなる高出力化・高輝度化を進めていけば、従来は難しかった純銅厚板の溶接や純銅の高速 3D プリンティング等新たな加工技術開発・加工事例が増えていくと思われる。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり日亜化学工業株式会社 飛鳥慶太氏、岡内茂樹氏にご協力いただきましたことに感謝いたします。

本研究の一部は、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 革新的設計生産技術「高付加価値設計・

製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発」および国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の支援を受けて行われました。

## 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) Nakaaze, T., Tsukamoto, M., Sato, Y., Funada, Y., Tnigawa, D., Sengoku, M., Asano, K., Abe, N., 2016. "Development of 100W blue direct diode laser system for cladding of copper," Proc. of ICALEO'16, #508.
- 4) Sengoku, M., Tsukamoto, M., Asano, K., Higashino, R., Sato, Y., Funada, Y., Yoshida, M., Abe, N., 2017, "Experimental Investigation on Temperature Distribution of Molten Pool for Copper with Blue Direct Diode Laser Cladding", ICALEO2017 Technical Conference and digest Program, p119.
- 5) Higashino, R., Tsukamoto, M., Sato, Y., Abe, N., Asano, K., Funada, Y., Yoshida, M., Abe, N., 2017, "Effect of Laser Wavelength from Blue to IR on Pure Copper Film Formation by Laser Cladding", ICALEO2017 Technical Conference and digest Program, p116.
- 6) Asano, K., Sechi, Y., Sengoku, M., Masuno, S., Hara, T., Yoshida, M., Higashino, R., Sato, Y., Tsukamoto, M., 2018, "Laser metal deposition of pure copper on stainless steel with blue and IR diode lasers," Optics and Laser Technology Optics and Laser Technology 107, pp291-296
- 7) Higashino, R., Tsukamoto, M., Sato, Y., Abe, N., Shobu, T., Funada, Y., Yanashita, Y., Sakon, Y., Sengoku, M., Yoshida, M., 2018, "In-situ x-ray observation of molten pool dynamics while laser cladding with blue direct diode laser," Proc. of SPIE. PHOTONICS WEST.
- 8) Shibata, T., Tsukamoto, M., Sato, Y., 2019, "Effect of input energy on densification for pure copper fabricated by SLM with blue diode laser," Proc. of SPIE. PHOTONICS WEST.
- 9) レーザ学会, "レーザハンドブック" 第 2 版 オーム社 p830
- 10) Engler, S., Reiner R., Reinhart P., 2011, "Process studies on laser welding of copper with brilliant green and infrared lasers," Physics Procedia 12, pp.339-346.
- 11) Steen, W.M. & Mazumder, J., 2010 "Laser Material Processing," Springer, p90.
- 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, "金属の精密クラッディング

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) Asano, K. Tsukamoto, M. Funada, Y. Sakon, Y. Abe, N. Sato, S. Sengoku, M. Yoshida, M., 2018, “Copper film formation on metal surfaces with 100W blue direct diode laser system,” Journal of Laser Applications 30, 032602.
- 14) Sato, Y., Tsukamoto, M., Shobu, T., Funada, Y., Yamashita, Y., Hara, T., Sengoku, M., Sakon, Y., Ohkubo, T., Yoshida, M., Abe, N., 2019, “In situ X-ray observations of pure-copper layer formation with blue direct diode lasers,” Applied Surface Science 480, pp.861-867.

## 著者



### 塚本 雅裕

つかもと まさひろ

大阪大学接合科学研究所 接合プロセス研究部門レーザープロセス学分野 教授

#### <略歴>

1994年大阪大学大学院工学研究科, 博士後期課程修了 博士(工学)

同年4月より日本学術振興会特別研究員

同年11月より 大阪大学溶接工学研究所(現接合科学研究所) 助手

1996年~1998年 日本学術振興会海外特別研究員, 米国ローレンスリバモア国立研究所客員研究員

2006年8月より 大阪大学接合科学研究所講師

2012年2月より 大阪大学接合科学研究所准教授

2017年4月より 大阪大学接合科学研究所教授

内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP) 革新的設計生産技術「高付加価値設計・製造を実現するレーザーコーティング技術の研究開発(2014年度-2018年度)」研究開発責任者(プロジェクトリーダー)を務める。

現在, 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-2020年度)」にて高輝度青色半導体レーザー光源技術開発を推進中。

#### 【学会活動】

レーザープラットフォーム協議会会長, レーザ加工学会理事および編集委員長, レーザー学会上級会員, 溶接学会高エネルギーレーザー加工研究委員会委員長, スマートプロセス学会理事および編集委員会委員, 応用物理学会員。

#### 受賞

表彰年月日	表彰名称	表彰主催団体名
2004年 5月28日	業績賞・進捗賞	(一社) レーザー学会
2019年 5月31日	業績賞(論文賞)	(一社) レーザー学会

以下略