

高輝度青色半導体レーザーを用いた マルチビーム式 LMD による銅の造形



特集
接合科学研究所
産学連携シンポジウム

大阪大学接合科学研究所 接合プロセス研究部門 レーザプロセス学分野
多次元造形研究センター レーザ造形学分野

准教授 佐藤 雄二氏
教授 塚本 雅裕氏

1. はじめに

銅は熱伝導性、電気伝導性が高い材料であり、熱交換器や自動車用モータ等、様々な産業部品に用いられている。しかし純銅は難加工材料であるため加工形状が切削工具に依存してしまい限定的であった。そのため、自由度の高い銅の造形技術の開発が求められている。そこで3Dプリンタ技術の一つである Laser Metal Deposition (LMD) 法に注目した。LMD 法は、レーザー照射と同時に金属粉末を供給し、加工部で金属粉末を熔融凝固させて一層の皮膜を形成し、これを積層することで立体造形物を造形する方法である。一層毎に造形するため設計自由度が高く、従来の切削加工では困難であった形状の造形が可能となる。しかし、従来の LMD 法は薄板表面や微細な造形を試みると、熱ひずみや熱影響層が顕著に現れてしまい、品質の高い造形はできず、これが課題であった。特に高反射材料である銅は、LMD 法に用いられているレーザーの波長 $1\ \mu\text{m}$ の吸収率は僅か 10% と低いため、従来の LMD 法では高品質な皮膜を形成することが難しかった。そこで開発したのがマルチビーム LMD 法である。マルチビーム LMD 法は、複数本のレーザーを加工点で重畳し、そ

こに粉末を供給するので供給粉末と基板を均一に加熱することが出来る。この手法に銅に対する光吸収率が 60% と高い波長 450 nm の青色半導体レーザーを用い、青色半導体レーザー搭載マルチビーム LMD システムを開発した。本報では、マルチビーム LMD 法の紹介と本手法を用いて銅の 3D 造形について紹介する [1-5]。

2. マルチビーム LMD 法

マルチビーム LMD 法の加工ヘッド概略図を図 1 に示す。加工ヘッドは、ヘッドの中心に設置した口

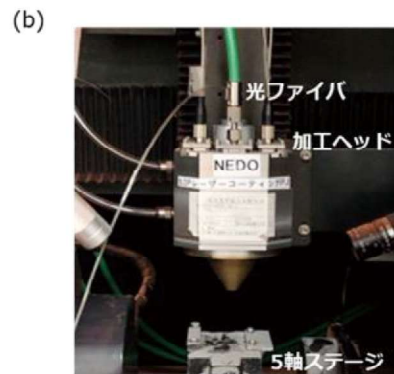
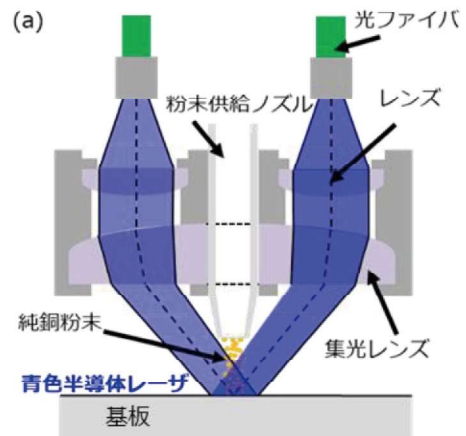


図1 (a)マルチビームLMD用加工ヘッド概略図、
(b)加工ヘッド外観



講師 佐藤 雄二氏

径 ϕ 0.4 mm のノズルから原料粉末を試料に面直に噴射供給するとともに、斜め方向から2本のレーザー光 (波長 450 nm、最大出力 100 W / 本) をノズルと同軸の位置で集光し、最大 200 W のレーザー光で造形を行う。このときの集光径は、 ϕ 0.5 mm である。上述のマルチビーム加工ヘッドおよびレーザー発振器、高精度粉末供給機を搭載したマルチビーム LMD 装置には、X 軸、Y 軸、Z 軸、傾斜、回転からなる 5 軸の位置決めステージが組み込まれており、その上に固定したワークを自動で移動させながら 3D 造形が可能となる (Fig.1 (b))。本報では、マルチビーム LMD 装置を用いて、ステージを Z 軸負方向に移動させて 3D ロッドの造形を行った。

3. 純銅の 3D ロッドの造形

造形材料には、純銅粉末 (山陽特殊製鋼社製) を用いた。図 2 に純銅粉末の SEM 像を示す。純度は、99.9% で平均粒子径は約 21 μ m の球状の粉末を用いた。本粉末を用いて 3D ロッド造形を行った。

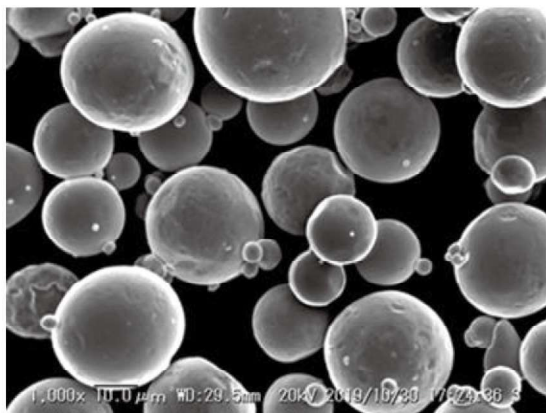


図 2 純銅粉末の SEM 像

図 3 にレーザー出力 40 W、レーザーのパワー密度 1.6×10^4 W/cm²、粉末供給量 37 mg/s、加工ヘッドの移動速度 4 mm/s における (a) 加工ヘッド上昇直後 (t=0 s)、(b) t=6s、(c) t=13s、(d) t=20s の純銅ロッド造形の造形過程を、(e) 造形したロッドの外観写真をそれぞれ示す。ロッドは加工ヘッドの上昇とともに造形され、局所的に粉末が溶融と凝固を繰り返して、3D ロッドが造形されていくのがわかる。長さ 100 mm の 3D ロッドは 20 秒で造形することが出来た。

図 4 は、純銅 3D ロッドの断面の顕微鏡像である。

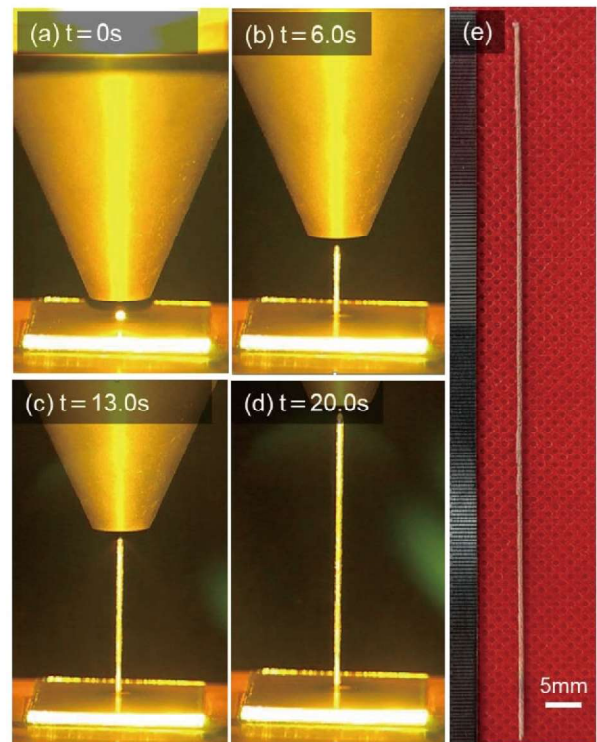


図 3 純銅の 3D ロッド造形
(a) t=0s、(b) t=6.0s、(c) t=13.0s、(d) t=20.0s、(e) 3D ロッド外観

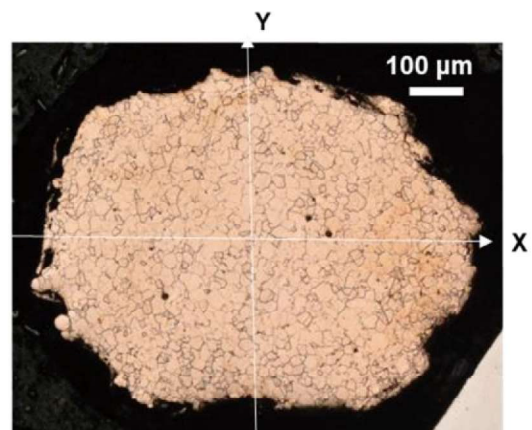


図 4 3D ロッドの断面顕微鏡写真 (エッチング後)

3D ロッドを造形方向と垂直に切断し、樹脂充填、研磨、過酸化水素アンモニウム溶液でエッチングを行った後、光学顕微鏡で断面を観察した。その結果、断面観察像から、緻密な層が形成されていることがわかる。3D ロッドは長辺 780 μ m、短辺 600 μ m と楕円状であり、レーザー集光径より大きい。そこで、造形部の挙動を、高速度ビデオカメラを用いて観察を行った。その結果、加工点に供給された粉末は溶融層にトラップされ、レーザーの照射、熱伝導によ

て溶融し、溶融層に溶け込んでいる様子が観察できた。また、ロッド造形部は、レーザ集光位置よりも $300\ \mu\text{m}$ にインフォーカスの位置にて造形されていることがわかった。そこで、集光位置から加工ヘッド側に $300\ \mu\text{m}$ インフォーカスした点 ($Z=-300\ \mu\text{m}$) でのビームプロファイルを測定した。図5に $Z=-300\ \mu\text{m}$ でのビームプロファイルを示す。この図5と図4の純銅3Dロッドの断面を重ねると断面形状が一致した。レーザのパワー密度が $1.6 \times 10^4\ \text{W}/\text{cm}^2$ の場合、粒径 $15\ \mu\text{m}$ 以下の粉末は飛行中に溶融するが、粒径の大きな粉末は未溶融の状態ですら溶融層内にトラップされる。トラップ後もレーザは照射され続けるので、レーザで追加熱されて溶融し、体積が増加する。

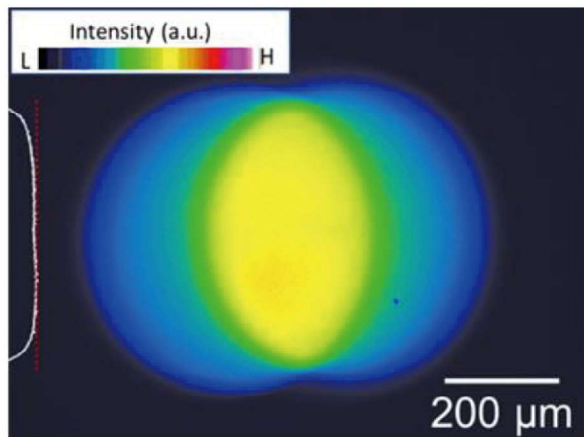


図5 $Z=-300\ \mu\text{m}$ の位置でのビームプロファイル

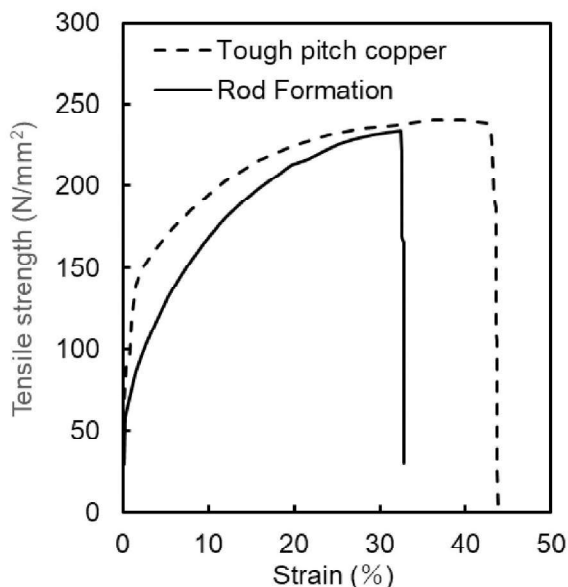


図6 3Dロッドの引張強度試験

本実験では、図2に示すように平均粒径 $21\ \mu\text{m}$ の粉末を使用した結果、約 $1/3$ の粉末が未溶融状態で溶融層に捕捉され、 $Z=-300\ \mu\text{m}$ の位置でロッドが形成されたものと考えられる。

図6に、純銅棒と $\phi 1.2\ \text{mm}$ のタフピッチ銅線の引張強度の測定結果を示す。 $\phi 1.2\ \text{mm}$ のタフピッチ銅線の最大引張強度は $243\ \text{N}/\text{mm}^2$ 、伸び率は 42% であったが、マルチビームLMDで造形した純銅3Dロッドは最大引張強度が $229\ \text{N}/\text{mm}^2$ 、伸び率は 30% と延性が低かった。次に3Dロッドの電気抵抗率を計測した。市販銅線の電気抵抗率は、 $1.7 \times 10^{-8}\ \Omega\text{m}$ に対し、3Dロッドの電気抵抗率は、 $1.84 \times 10^{-8}\ \Omega\text{m}$ となった。これは、ロッド表層部が酸化しており、これによって抵抗値が高く表れたと考えられる。

4. まとめ

本報では、高輝度青色半導体レーザを2台用いたマルチビーム式LMD法の概略と、当該装置を用いて、従来は皮膜形成が難しかった純銅の3D造形を試みた。従来のLMDに比べて微細で且つ高速に造形出来ることを実証した。さらに純銅の3Dロッドの断面形状は、加工点のビームプロファイルに依存することがわかり、任意の形状の造形を行う場合には、このビームプロファイルを制御することによって形状可変の造形が可能となることが示唆された。

本稿で紹介したマルチビームLMD技術は、従来のレーザクラディング法とは異なり、低入熱で微細かつ緻密な皮膜形成が出来るため、純銅だけでなく他の金属の造形や補修技術などに応用を期待している。

本稿がこれらの研究分野の一助となれば幸いである。

謝辞

本研究成果の一部は、NEDO「高輝度高効率次世代レーザー技術開発」ならびに科学技術振興機構研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラムA-STEPトライアウトJPMJTM20QFならびに科学研究費助成事業「基盤研究(C)」22K04776の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) Yuji Sato and Masahiro Tsukamoto, et al., Journal of Laser Micro/Nanoengineering 16 p.189-193 (2021)
- 2) Kazuhiro Ono, Yuji Sato et al., Journal of Laser Applications 33 042014 (2021)
- 3) Kazuhiro Ono, Yuji Sato, et al., Journal of Laser Applications 33, 012013 (2021)
- 4) Takahiro Hara, Yuji Sato, et al., Applied Physics A 26:418 (2020)
- 5) Yuji Sato, Masahiro Tsukamoto, et al., Applied Surface Science 480 pp.861-867 (2019)

