

技術寄稿文

新方式レーザー DED 技術と 青色半導体レーザー開発

国立大学法人 大阪大学 接合科学研究所
教授 塚本 雅裕



塚本 雅裕氏 略歴

- 【生年月日】 1965年10月11日
- 【最終学歴】 1994年 3月大阪大学大学院 工学研究科
博士後期課程修了。博士（工学）
- 【主要経歴】
 - 1994年 4月 日本学術振興会特別研究員
 - 1994年11月 大阪大学接合科学研究所助手に着任。講師、准教授を経て2017年 4月教授に就任。
 - 1996年 9月～ 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
 - 1998年 8月 国立研究所客員研究員
 - 2014年度～ 内閣府 SIP革新的設計生産技術「高付加価値設計・製造
 - 2018年度 を実現するレーザーコーティング技術の研究開発」のプロジェクトリーダーを務めた。
 - 2016年度～ NEDOプロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー
 - 2020年度 技術開発」にて純銅の溶接・3D造形等次世代レーザー加工のための高輝度青色半導体レーザー光源技術開発を推進
 - 2020年12月 青色半導体レーザーの社会実装を目的とする「青色半導体レーザー接合加工共創コンソーシアム」を設立した。
 - 現在 NEDO 経済安全保障重要技術育成プログラム（K-Program）/ 高度な金属積層造形システム技術の開発・実証「高付加価値設計・製造を実現する統合型レーザー金属積層造形技術の研究開発（2024年度～2028年度）」のプロジェクトリーダーを務めている。

1. はじめに

我が国が伝統的に強みを有する鋳造、鍛造等の従来工法に比べ、積層造形（Additive Manufacturing : AM）技術は、金属部品の軽量化、高機能化、カスタムメイドおよびリードタイムの短縮が可能な「新たなものづくり基盤技術」の一つとして期待されている。

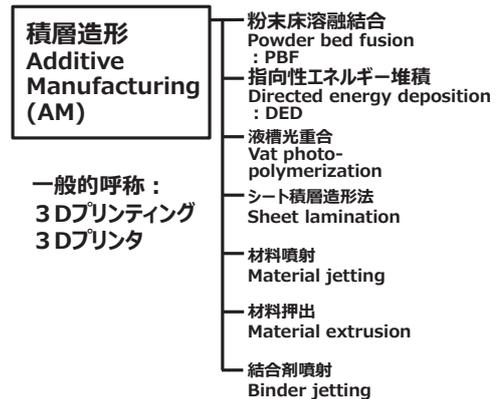


図 1. 積層造形(Additive Manufacturing : AM)技術

図 1 に示したように AM(一般的呼称: 3D プリンティング、3D プリンタ) は、7つのカテゴリーに分けることができる。レーザー等の熱源を用いた AM を PBF (Powder Bed Fusion : 粉末床溶融結合) および DED (Directed Energy Deposition : 指向性エネルギー堆積) と呼ばれている。図 2 にレーザーを用いた AM (LAM) と PBF および DED の関係を示す。図 2 が示すように、PBF および DED は、それぞれクラッディング、補修、3D プリンティング (積層造形) の適用技術を有する。図 3 (a) および (b) には、レーザーを用いた PBF および DED の工程の概略図をそれぞれ示す。PBF では、粉末を敷き詰めたパウダーベッドにレーザーを集光照射し、選択的に熔融凝固を施し

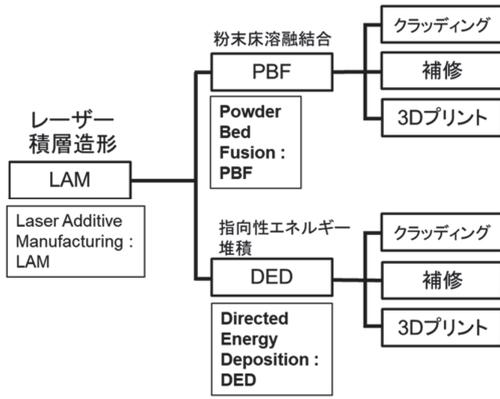


図2. Laserを用いた Additive Manufacturing (LAM)、Powder Bed Fusion (PBF) および Directed Energy Deposition (DED)

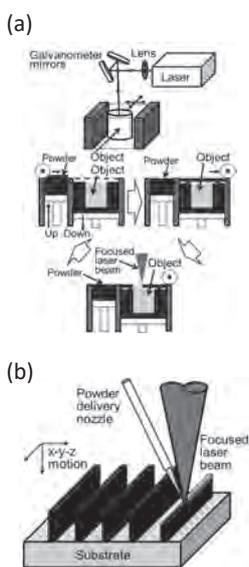


図3. (a)PBF および(b)DED プロセスの概略図

積層する。DEDでは、レーザーの集光部に金属の粉末やワイヤーを供給することで積層する。

PBF 及び DED に用いられるレーザーは、従来、近赤外線ファイバーレーザーや半導体レーザーであるが、青色半導体レーザーの両積層技術への導入が期待されている。青色半導体レーザーの純銅に

対する吸収率が従来の近赤外線ファイバーレーザーや半導体レーザーの場合より約6倍高い¹⁾ことから、青色半導体レーザーは、LAMを含む純銅加工に有用なレーザーであることがわかる。純銅は、電気伝導率および熱伝導率が高いことから、CO₂ 排出量削減に有効な電気自動車等のモーター、バッテリー、パワーデバイスおよび熱交換器等に必要な材料である。つまり、純銅および青色半導体レーザーは、温室効果ガス排出を実質ゼロにするカーボンニュートラル社会²⁾ 実現に貢献する材料およびレーザーであることが分かる。

本稿では、新方式レーザー DED 技術開発と青色半導体レーザー開発と AM への導入展開について紹介するが、いずれの技術開発も図4に示した大型プロジェクトの下、推進してきた。新方式 DED は、主に

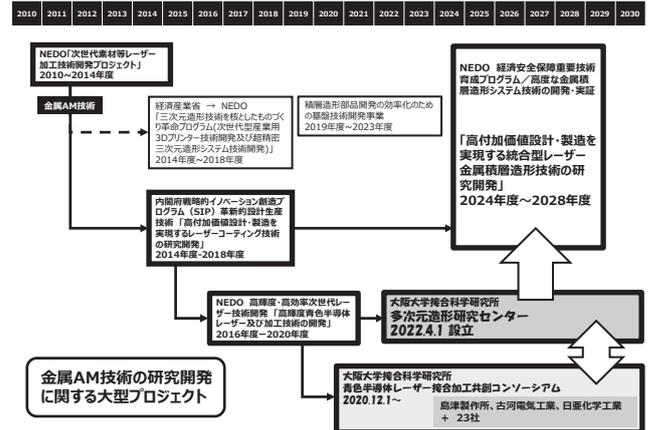


図4. レーザーを用いたAM技術の研究開発を推進する大型プロジェクト

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「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 - 2018 年度)」にて開発を行った。青色半導体レーザー開発については、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (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)」(以下、NEDO レーザープロジェクトと略す)にて進められた³⁾。

2. 新方式 DED 開発

2.1 溶射、従来方式 DED および新方式 DED

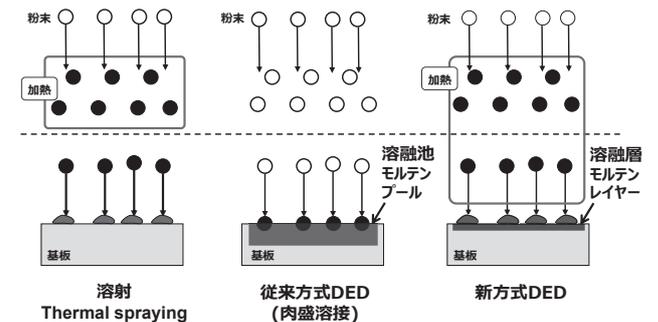


図5. (a)溶射、(b)従来方式DED および(c)新方式DEDの原理概略図

図5 (a)、(b) および (c) に、左から溶射、従来方式 DED および新方式 DED をそれぞれ示した。図4 (a) に示した溶射では、飛行中の粉末は、加熱され溶融滴になる。溶融滴は、基板に到達し冷却固化され積層 (皮膜形成) される。溶接プロセスではないので、接合強度は溶接に比べて弱い。図4 (b) に示した従来方式の DED では、基板表面に溶融池形成が必須と

なる。溶融池に粉末が飛び込むことで、溶接が生じる。本方式では、溶融池維持のために kW 級のレーザー出力を必要とする。溶融池は、熱源となり、基板の歪みや周辺に熱影響部を形成する。また、粉末に機能性材料を用いる場合（レーザークラディング）は、溶融池にて基板材料との希釈、つまり、機能性材料の損失が生じる。図 4 (c) に示した新方式 DED 法では、飛行中の粉末を溶融滴にし、基板表面には溶融層（極小化した溶融池）を形成することで、粉末と基板の高効率な溶接を実現するプロセスである。本方式では、溶融池を必要としないので、数百 W 級程度のレーザー出力で DED プロセスを実行可能である。レーザーによって加熱される飛行中の粉末が、基板表面において、空間的に均一な温度分布になることが、新方式 DED の鍵となる。

2.2 新方式 DED：マルチビーム照射方式

図 6 (a) および (b) に従来方式 DED であるシングルビーム照射方式および新方式 DED であるマルチビーム照射方式を示す。シングルビーム照射方式は、一つのレーザーが基板に照射され、周辺から粉末（粉末ビーム）が供給される。マルチビーム照射方式では、レーザーと粉末ビームの位置が逆となる。これらの違いによって何がかわるのか、図 7 (a) および (b) を用いて説明する。図 7 (a) および (b) が示すように、粉末は、レーザービーム内を通過し基板に到達する。通過中にレーザーによって粒子は加熱される。レーザービーム内を通過する距離によって温度上昇が比例する場合、シングルビーム照射方式では、図 7 (a) が示すように、到達した粉末の温度分布は不均一となる。よって、粉末と基板を溶接するためには、基板表面における十分な溶融池形成が必須となる。溶融池形成には、出力 kW 級のレーザーが通常使用されており、高品質な皮膜を形成するためには、安定な溶融池の保持が重要と

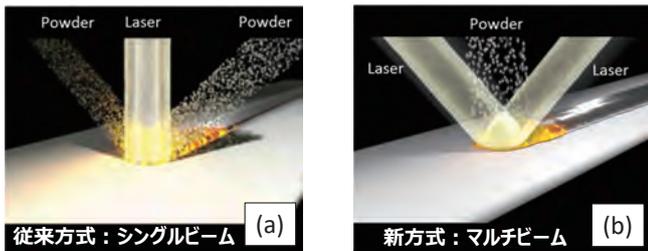


図 6. 従来方式 DED：シングルビーム照射方式
および新方式 DED：マルチビーム照射方式

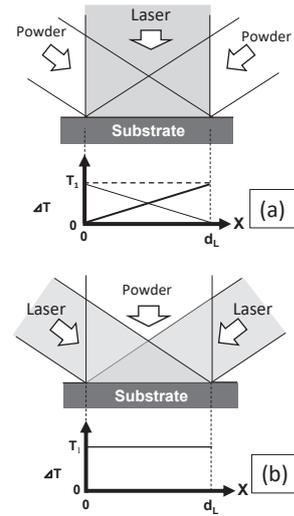


図 7. 従来方式 DED：シングルビーム照射方式および
新方式 DED：マルチビーム照射方式におけるレーザー加熱による粉末の温度上昇の空間分布

なる。マルチビーム照射方式は、図 7 (b) が示すように基板に到達する材料粉末それぞれの実効的な加熱距離が等しくなり、到達時の粉末の空間温度分布が均一となる⁴⁾。これによって、十分な溶融池形成を必要とせず、基板の表層が溶融（溶融層が形成）していれば、材料粉末と基板の溶接が実行されることとなる。

2.3 近赤外線半導体レーザー搭載マルチビーム照射方式 DED 装置の開発

図 8 (a) に近赤外線半導体レーザーを搭載したマルチビーム照射方式 DED ヘッドを示した。複数本 (2 本～6 本) の近赤外線半導体レーザーが光ファイバーによって、当 DED ヘッドに取り付けられている。図 8 (b) には、ノズル先端から出射されるレーザービームを示した。図 8 (c) は、当加工ヘッドによるギアの補修（製造）動画から得た写真である。本動画は、当加工ヘッドによって、ギア補修（製造）などの金属の精密 3D 造形が可能になることを示している。

3. 高出力・高輝度青色半導体レーザー開発

3.1 青色半導体レーザーの高出力・高輝度化

筆者は NEDO レーザープロジェクトにて、日亜化学工業の協力を受け、島津製作所とともに青色半導体レーザーの高出力化および高輝度化に取り組んできた。複数の青色半導体レーザー素子からのレーザー光を独自のビームコンバイニング技術で光ファイバーに結合し、高出力と高輝度を両立させた青色半導体レー

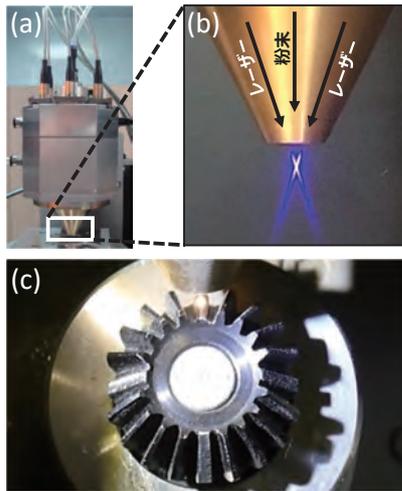


図 8. (a)近赤外線半導体レーザーを搭載したマルチビーム照射方式 DEDヘッド、(b)ノズル先端から出射されるレーザービームおよび(c)当加工ヘッドによるギアの補修(製造)動画から得た写真

ザーを開発した。2016年度には空間多重および偏光多重方式を用いた独自のコンバイニング技術を用いて、光ファイバーコア径 $100\ \mu\text{m}$ 、出力 $100\ \text{W}$ の青色半導体レーザー光源を開発した。一般に、金属表面を十分に熔融させるには $1.0 \times 10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$ 以上のパワー密度が必要とされる。パワー密度は、(レーザー出力 (W)) / (レーザービームの断面積 (cm^2)) で求められる。加工点 (溶接位置) においては、(レーザー出力 (W)) / (レーザー集光スポットの面積 (cm^2)) となる。多数のレーザー素子からの発熱を専用水冷システムを用いて放熱し、さらに光ファイバー入射側に QBH コネクタを採用し、最も光耐性が要求される光ファイバー入射端面の輝度を緩和した。集光スポット径が $100\ \mu\text{m}$ の時、レーザー強度 $1.3 \times 10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$ を達成し、従来の青色半導体レーザーでは実現できなかった銅の熱伝導溶接が可能となった⁵⁾。しかしながら、純銅粉末を用いた LAM における純銅の熔融・積層を実現するためにはさらなる高出力化、高輝度化が必要であった。そこで、さらに高出力化・高輝度化を実現するために、2018年度には出力、輝度ともに従来機の 2 倍となる出力 $200\ \text{W}$ の青色半導体レーザーを開発した^{6, 7)}。

また、LAMに加えて、電気自動車で用いられるリチウムイオン電池の銅電極やモーターの巻線溶接に要求される厚さ $1\ \text{mm}$ 級の銅部材加工を実現するためには、 $1.0 \times 10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$ 以上のレーザー強度を保ちつ

つ $1\ \text{kW}$ を超える出力が求められる。2019年度は前年度までの結果を光学設計にフィードバックすることで、高密度コンバイニング技術を向上させ、光ファイバーコア径 $200\ \mu\text{m}$ の $500\ \text{W}$ 青色半導体レーザーを開発することができた。そして 3 台の $500\ \text{W}$ 青色半導体レーザーからの出力光を 1 本の光ファイバーに結合するビームコンバイナ開発を進めた結果、2022年度にコア径 $400\ \mu\text{m}$ の光ファイバーから $1.5\ \text{kW}$ の青色半導体レーザー出力を得ることができた⁵⁾。

3.2 新方式 DED：マルチビーム照射方式への青色半導体レーザーの導入

青色半導体レーザー搭載マルチビーム照射方式 DED 装置の開発を行った。図 8 (a) に示した新方式 DED 加工ヘッドには、開発した出力 $100\ \text{W}$ から $500\ \text{W}$ までの青色半導体レーザーを搭載することができる。これによって、加工に適したパワー密度を実現できるので、効率的かつ高速な新方式 DED が実行できる⁷⁾。さらに、CAM システムおよび 5 軸ステージ (xyz 軸、傾斜、回転) を搭載することで、平板に対する純銅皮膜形成だけでなく、円管や円筒など環状形状の基材に対しても純銅皮膜形成可能な装置となった。図 9 (a)、(b) および (c) には、ステンレス製の円管、長尺バーおよびドアノブに純銅皮膜形成の結果をそれぞれ示した⁸⁾。

図 10 (a)、(b) および (c) に、マルチビーム照射方式 DED によるロッド造形実験における $t=0\ \text{s}$ 、 $t=13\ \text{s}$ および $t=25\ \text{s}$ 時の結果をそれぞれ示した⁹⁾。基板に材料粉末を皮膜形成する際は、基板表面の Y 軸方向に掃引するが、ロッド造形の際は、Z 軸方向に掃引する。純銅粉末でロッド造形を試みる場合、前述した青色半導体レーザーが適している。本実験では、青色半導体レーザーを 2 ビーム使用した。それぞれの出力は、 $20\ \text{W} \sim 30\ \text{W}$ であり、図 10 (a)、(b) および (c) が示すように、直径 $900\ \mu\text{m}$ 、長さ $100\ \text{mm}$ のロッドが、約 25 秒で形成された。今後、青色半導体レーザーの出力を上げることで、直径数 mm の純銅ロッド造形、さらに青色半導体レーザーの空間強度分布制御を行うことで、数 mm × 数 mm の純銅角柱の造形が期待される。

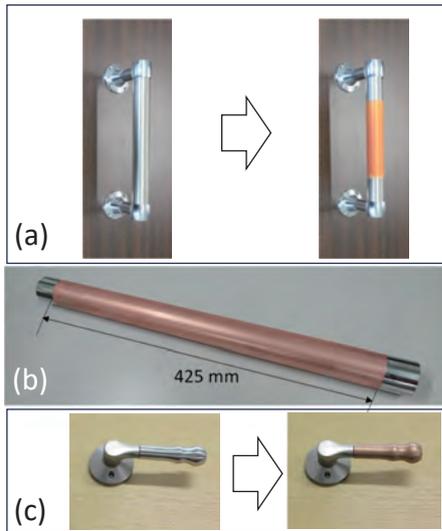


図9. 新方式DED：マルチビーム照射方式による
(a) 取っ手（円管）、(b) バーおよび
(c) ドアノブへの純銅クラッディング

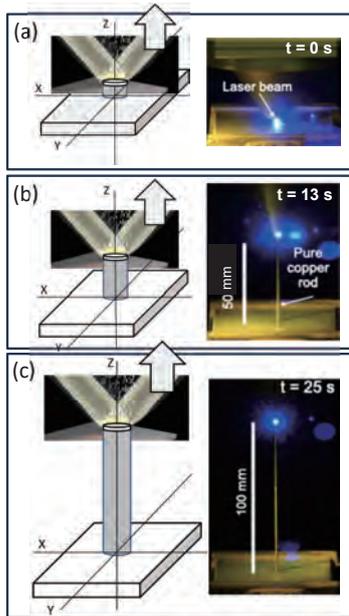


図10. マルチビーム照射方式DEDによるロッド造形の概略図および本方式による純銅ロッド造形 (a)t=0 s、(b)t=13 s、(c)t=25 s

4. おわりに

本稿では、はじめにAMおよび新方式DEDについて紹介した。次に、新方式DEDであるマルチビーム照射方式の優位性、マルチビーム照射方式DED装置開発および新方式DEDの適用例について示した。さらに純銅はじめ各種金属に対し吸収率の高い青色半導体レーザーの開発および新方式DEDであるマルチビーム照射方式DED装置への導入および純銅ロッド

造形について紹介した。

マルチビーム照射方式DED装置は、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「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 - 2018年度）」にて開発され、現在販売されている。青色半導体レーザー開発および新方式DEDへの導入は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（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）」にて進められた。本プロジェクト終了後、青色半導体レーザー・加工技術装置・システムの社会実装を加速していくために「青色半導体レーザー接合加工共創コンソーシアム」を2020年12月に大阪大学接合科学研究所内に創設した（図2）。本コンソーシアムは、幹事会員である大阪大学接合科学研究所、島津製作所、古河電気工業、日亜化学工業と一般会員24社（2025年4月現在）から構成されている。本コンソーシアムの活動を通じ、LAMによって部品・部材を製造する場合の課題やそれらを解決するために必要な研究開発を明確化することができた。また、大阪大学接合科学研究所では、次世代AM技術の研究開発中核拠点として、同研究所内に「多次元造形研究センター」を2022年4月に設立した。

現在、筆者らのグループは、「多次元造形研究センター」を中核拠点として、上述したSIP、NEDOレーザープロジェクトや青色半導体レーザー接合加工共創コンソーシアムの活動を通じて得られた成果をベースに、現在、経済安全保障重要技術育成プログラム（通称：K Program）の「高度な金属積層造形システム技術の開発・実証（2024年度～2028年度）」に参画し、「高付加価値設計・製造を実現する統合型レーザー金属積層造形技術の研究開発」を実施している（図2）。本プロジェクトでは、造形技術、金属粉末、設計技術などの要素技術を一体的に開発し、統合型金属積層造形システムとして確立させるとともに、新たに開発されたレーザーDEDおよびPBF実機による実証を行い、品質保証の規格化、認証基準の策定などを行うことで、最適地であるオンサイトで高機能な部品を製造し、納期短縮を実現する生産プロセスの確立を目指している。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、日亜化学工業（株）小崎 徳也氏、飛鳥 慶太氏にご協力いただきましたことに心より感謝申し上げます。

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「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 - 2018年度）」および新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）プロジェクト「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。NEDO IoT 推進部（当時）の皆様には、本プロジェクト期間中にご助言・ご協力賜りましたことに心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) https://www.env.go.jp/earth/2050carbon_neutral.html
- 3) <https://www.youtube.com/watch?v=uwk0XGKf-vg>
- 4) 森本健斗、佐藤雄二、竹中啓輔、水谷正海、東條公資、林良彦、安積一幸、阿部信行、塚本雅裕、レーザー加工学会誌、Vol29、No.1（2022）pp. 23-30.
- 5) S. Fujio, Y. Sato, K. Takenaka, R. Ito, M. Ito, M. Harada, T. Nishikawa, T. Suga, M. Tsukamoto: Welding of pure copper wires using a hybrid laser system with a blue diode laser and a single-mode fiber laser, Journal of Laser Applications 33 (4) (2021) 042056, <https://doi.org/10.2351/7.0000502>.
- 6) K. Takenaka, Y. Sato, K. Tojo, M. Tsukamoto: Development of SLM 3D printing system using Galvano scanner for pure copper additive manufacturing by 200 W blue diode laser, Proc. Lasers in Manufacturing Conference 2021, (2021), 717 -731.
- 7) K. Takenaka, Y. Sato, K. Ono, Y. Funada, M. Tsukamoto: Pure copper layer formation on stainless-steel and aluminum substrate with a multibeam laser metal deposition system with blue diode laser, Journal of Laser Application 33, (2021), 042033, <https://doi.org/10.2351/7.0000485>.
- 8) Y. Takazawa, K. Ono, Y. Morimoto, K. Takenaka, K. Morimoto, Y. Sato, M. Heya, M. Tsukamoto: Formation of pure copper layer by LMD method with blue diode lasers for antibacterial and virus inactivation, Proc. SPIE, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXVII, (2022), 11988-40.
- 9) Y. Sato, K. Ono, K. Takenaka, K. Morimoto, Y. Funada, Y. Yamashita, T. Ohkubo, N. Abe, M. Tsukamoto: Fabrication of Pure Copper Rod by Multi-beam Laser Metal Deposition with Blue Diode Lasers, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering 16 (2021), 189-193.

図の説明

- 図1 積層造形(Additive Manufacturing : AM)技術
- 図2 Laserを用いた Additive Manufacturing (LAM)、Powder Bed Fusion (PBF) および Directed Energy Deposition (DED)
- 図3 (a) PBF および (b) DED プロセスの概略図
- 図4 レーザーを用いた AM 技術の研究開発を推進する大型プロジェクト
- 図5 (a) 溶射、(b) 従来方式 DED および (c) 新方式 DED の原理概略図
- 図6 従来方式 DED：シングルビーム照射方式および新方式 DED：マルチビーム照射方式
- 図7 従来方式 DED：シングルビーム照射方式および新方式 DED：マルチビーム照射方式におけるレーザー加熱による粉末の温度上昇の空間分布
- 図8 (a) 近赤外線半導体レーザーを搭載したマルチビーム照射方式 DED ヘッド、(b) ノズル先端から出射されるレーザービームおよび(c) 当加工ヘッドによるギアの補修（製造）動画から得た写真
- 図9 新方式 DED：マルチビーム照射方式による (a) 取っ手（円管）、(b) バーおよび (c) ドアノブへの純銅クラッディング
- 図10 マルチビーム照射方式 DED によるロッド造形の概略図および本方式による純銅ロッド造形 (a) t=0 s、(b) t=13 s、(c) t=25 s