

# High-speed laser metal deposition (HS-LMD)による 高硬度鋼コーティングの現象解析

慶應義塾大学 理工学部システムデザイン工学科  
教授 柿沼 康弘

(2021年度 一般研究開発助成 AF-2021213-B2)

キーワード：付加加工，レーザ金属積層，コーティング

## 1. 研究の背景・目的

加工分野において、金属 3D プリンティング技術の一つである指向性エネルギー堆積方式（Directed energy deposition 方式，DED 方式）が注目を集めている。DED 方式は、工作機械にレーザヘッド装置、パウダー供給装置などを取り付けることでレーザ金属積層造形できる技術である。図 1 (a)に示すように、レーザヘッドを走査しながら、レーザ照射により形成された熔融池に向け、金属粉末をキャリアガスとともにノズルより吹き付け、熔融・凝固し金属積層を行う。比較的大きな部品の金属積層に有利な特徴を有し、複雑な航空機部品の一体化製造が可能になる<sup>1)</sup>。

ドイツの Fraunhofer が DED 方式を応用した新たなコーティング技術として High-speed laser material deposition (HS-LMD もしくはドイツ語の略語で EHLA とも称される) を提案した。図 1 (b)にその概要を示す。部材を高速で回転させ、粉末焦点をデフォーカスすることにより粉末を事前に熔融し、熔融池形成を最小限に抑えて積層する方法である。これにより、従来よりも薄い金属膜を形成できることや熱影響層を抑えられるといった利点がある<sup>2,3)</sup>。一方で、HS-LMD には、詳細な現象解析がなされていないことや、コーティング層の機械特性が積層条件や部材位置によって変化すること、コーティング厚さの調整が困難であるといった課題がある。

そこで本研究では、HS-LMD プロセスの現象解析および形成される肉盛り層の特性を評価することを目的とする。自動車の回転部品（ファイナルピニオンギヤ）を HS-LMD によってコーティングすることで、複雑な形状をもつ部品においても熱処理なしで高強度な金属層を形成する手法を提案し、実験により性能を評価した。

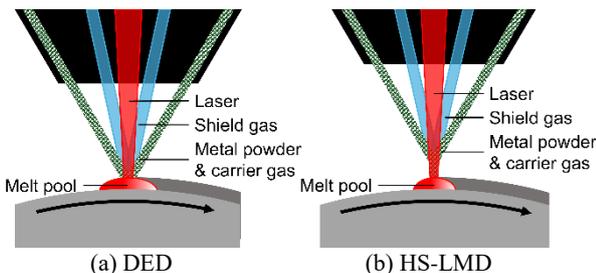


図 1 従来の指向性エネルギー堆積法 (DED) と High-speed laser metal deposition (HS-LMD)

## 2. 実験方法

ギヤへの HS-LMD の概略図ならびに実験装置の外観を図 2 と図 3 にそれぞれ示す。加工試験には 5 軸複合加工機 (Lasertec 65 3D, DMG 森精機製) を使用した。ギヤ端部を C 軸に固定し、A 軸を 90° 回転させ、C 軸回りに回転させながらレーザノズルを-Y 方向に走査させることで、HS-LMD を実現した。レーザノズルは回転中心の真上ではなく、X 軸方向にオフセットした。これは、歯底への不要なコーティングを避けることと、歯面に対するレーザの入射をより垂直に近くすることを目的としている。これによって、反射によるエネルギー損失を抑え、エネルギー吸収を高めることができる。図 2 は、ギヤのドライブ歯面（動力を伝達する側の歯面）へのコーティングを示しており、反対のコスト歯面（動力を受ける側の歯面）へコーティングするときは、レーザノズルを回転中心の真上から-X 方向にオフセットし、回転方向を逆にすることで実現できる。

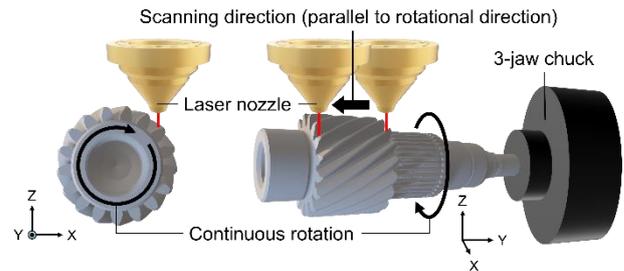


図 2 HS-LMD によるギヤ表面への金属積層

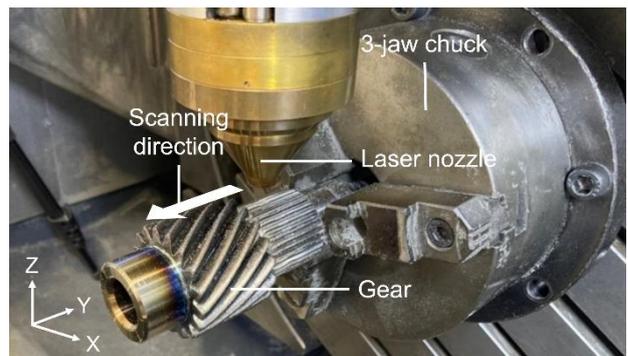


図 3 HS-LMD 実験の様子

### 3. 高速度カメラによるメルトプール撮影結果

#### 3.1 高速度カメラによるメルトプールの観察

HS-LMDによるギヤへのコーティング中の様子を、高速度カメラを用いて撮影した。結果を図4に示す。用いたカメラは3,000 frame/秒で撮影が可能である。レーザが1000 Wの条件では、メルトプールは形成されず、熔融された粉末やスパッタが表面に付着する様子が確認できた。入熱が不十分であり、粉末と母材の両方を熔融することができず、コーティング層は形成されなかった。レーザ出力が1600 Wの条件では、メルトプールは形成されたものの、ギヤ歯端部までは及んでいなかった。レーザ出力が2000, 3000 Wの条件では、良好に形成されたメルトプールがギヤ歯面上を移動し、隣の歯に移っていく様子が確認できた。また、歯面には液体の表面張力と表面の温度分布によって生じる、マランゴニ対流と呼ばれる流動も確認した。図4のような、メルトプール中心部付近で深部に潜るような流れをし、周縁部が中心部に向かうような挙動をする場合は、周縁部に比べ、中心部の温度が高くなっている状態である。回転中のヘリカルギヤのような、粉末焦点が時々刻々と変動する対象へのHS-LMDにおいても、粉末および母材が熔融され、メルトプールが形成されることで金属積層が可能であることがわかった。

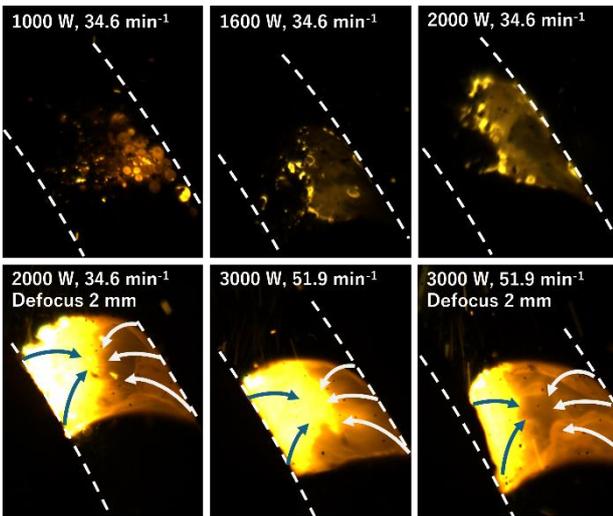


図4 HS-LMDにより形成されるギヤ歯面のメルトプール

#### 3.2 APCによるメルトプールの評価

本研究で用いた三次元積層造形装置に搭載されているThe adaptive process control (APC)を用いて、加工中のメルトプール温度とメルトプールサイズを測定した結果の一部(2000 W, 35 min<sup>-1</sup>)を図5に示す。メルトプールサイズは画像よりピクセル数をカウントして求めた。回転速度を35 min<sup>-1</sup>として1000 W, 1600 W, 2000 W, 2000 W (defocus 2 mm)の4条件について調べた結果、平均メルトプールサイズは順に2223 px, 7918 px, 10286 px, 9773 pxで、平均メルトプール温度は順に1437 °C, 1585 °C, 1625 °C,

1605 °Cであった。このことから、メルトプール温度が1600 °C付近まで上昇すると、マランゴニ対流が観察可能な十分なメルトプールが形成されると考えられる。また、デフォーカスによりメルトプール温度が低下したことから、熱影響部の抑制が期待できる。

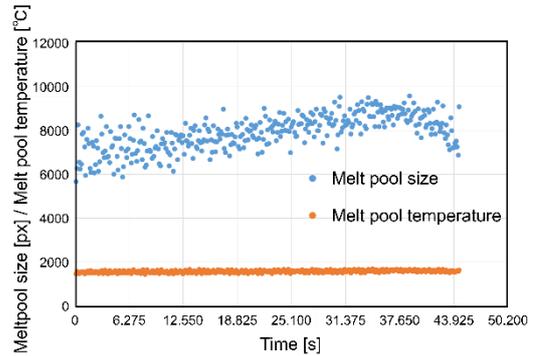


図5 HS-LMDによる金属コーティングにおけるメルトプールサイズと温度 (2000W, 35 min<sup>-1</sup>)

### 4. HS-LMDによりコーティングされたギヤ歯の評価

本研究で対象とするヘリカルギヤへのコーティングにおいて、レーザの照射位置は時々刻々と変動するため、最適なレーザノズル位置を理論的に断定するのは難しい。そのため、供給粉末の焦点を図6に示す6点で変化させ、コーティング試験を行った。1, 2, 4, 6はギヤの歯先円上の点であり、3, 5は4からZ軸上下方向にそれぞれ3 mmシフトさせた点である。表1にコーティング条件を示す。

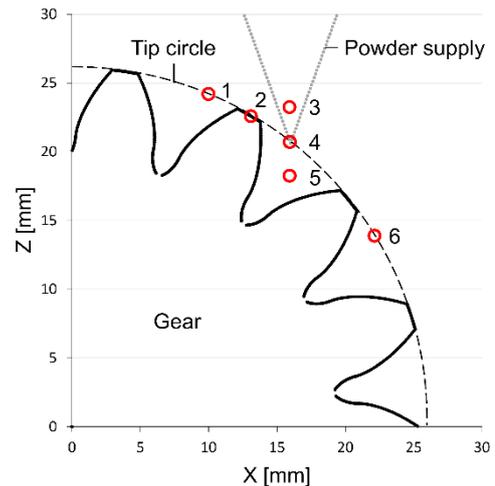


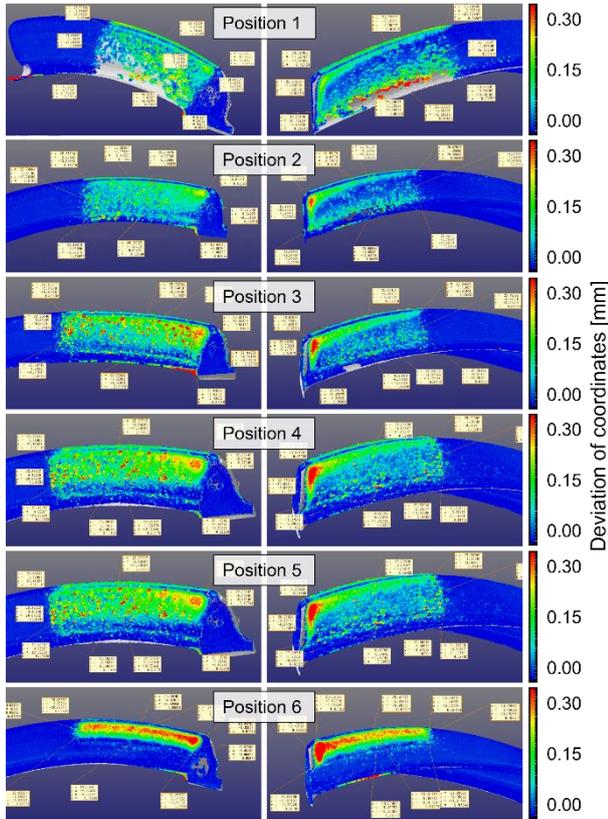
図6 粉末焦点位置

表1 金属積層条件

Laser power	1000 W
Feed rate	20 mm/min
Metal powder supply	18 g/min
Carrier gas supply	6.0 L/min
Shield gas supply	8.0 L/min
Rotational speed	35 min <sup>-1</sup>
Coating length	20 mm
Metal powder	Tool steel (Ferro 44)

#### 4.1 コーティング幅の評価

コーティング後のギヤ歯面に対し、三次元測定機を用いてギヤ歯面上の座標を測定した。未加工のギヤ歯を基準とし、差分をとったカラーマップを図7に、その結果から測定した歯たけ方向のコーティング幅を表2に示す。位置1のコーティング層は、歯たけと歯筋の両方向ともムラがあり、歯底に大きく肉盛りされている。位置2では有効かみ合い幅に肉盛りされているが、凹凸が多くみられ、肉盛りされていない部分が散見された。位置3~5では、歯底付近の肉盛りをさけつつ、比較的ムラなく肉盛りされている。



(a) ドライブ歯面 (b) コースト歯面

図7 三次元測定結果

表2 照射位置ごとのコーティング幅測定結果

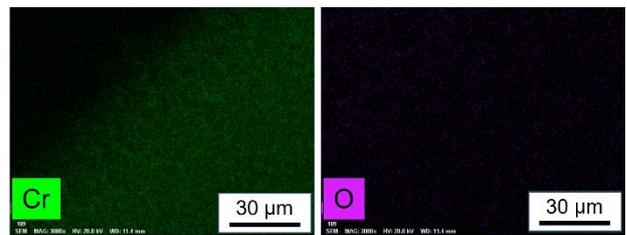
Irradiate position	Coating width [mm]	
	Drive side	Coast side
1	6.59	5.11
2	5.91	5.46
3	5.04	5.24
4	3.99	5.29
5	5.81	5.26
6	2.39	3.17

位置6では、コーティング層がギヤ歯先端にのみ形成されている。これは、レーザが隣の歯に遮断されてしまい、広い領域にコーティングすることが困難であったことが原因であると考えられる。また、コースト歯面において、歯先部分が赤くマッピングされているが、これは肉盛り量

が多いわけではなく、入熱による変形が起きているためであると考えられる。この測定結果に加え、歯面に対してのレーザの入射角と歯面照射位置からのデフォーカスが大きくなりすぎない点として、位置4（歯先円上： $x = 16, z = 20.6$ ）をギヤへのHS-LMDによるコーティングにおける最も適したノズル位置とした。

#### 4.2 コーティング層と母材境界の元素分析

図8にコーティング層と母材の境界付近におけるCrとOの元素マッピング結果を図8に示す。右下がコーティング層側、左上が母材側である。材料粉末に多く含まれるCrが、コーティング層側から母材側に行くにつれ徐々に減少し、組成がなだらかに変化していることがわかる。このことから、境界部が緻密に接合していると考えられる。また、Oのマッピングが薄く一様であることから、コーティングをする際に境界面で酸化が起きずに加工できていることがわかる。



(a) Cr

(b) O

図8 コーティング層と母材境界での元素マッピング分析結果

#### 4.3 コーティング層と母材内部の硬さ試験結果

マイクロビッカース硬さ試験機を用いて、コーティング層および母材内部の硬さを測定し、熱処理したギヤと比較した結果を図9に示す。従来の熱処理に比べ、硬さが大幅に低下した。HS-LMDによるコーティング層はそのままでは、ギヤ歯に要求される十分な硬化層を形成することが困難であることがわかった。また、コーティング層から母材内部に向かって徐々に硬さが低下している。急激な硬度差は内部残留応力が残ることがあり、歯の折損へとつながるため、この緩やかな硬度変化は耐折損性の観点から有意である。

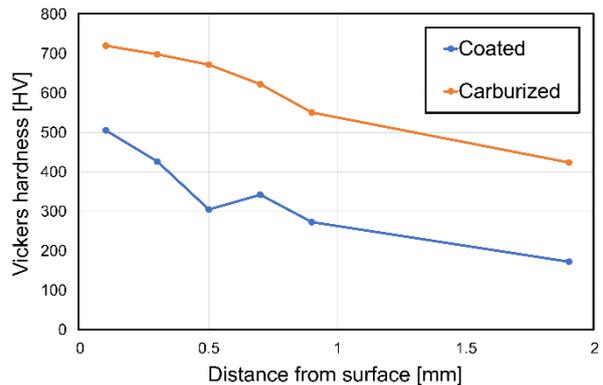


図9 マイクロビッカース硬さ試験結果

## 5. 結言

DED を用いた HS-LMD 方式によるギヤ歯面へのコーティング手法を提案し、そのプロセス及び造形結果を調べた。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) ヘリカルギヤのような複雑な形状においても、良好なメルトプールが形成されることがわかった。
- 2) レーザノズルの位置によって、コーティング層の付き具合や幅が異なることがわかった。回転中心から X 軸方向に適切なオフセットをとることで、歯面に良好なコーティング層を形成することができた。
- 3) コーティング層と母材境界では Cr 元素がなだらかに変化しており、緻密な接合が得られていると推測できる。また、コーティングする際に境界面で酸化が起きずに加工できていることがわかった。
- 4) 従来の熱処理に比べ硬さは劣るものの、表面から内部に向かい徐々に硬さが減少するため、耐折損性の観点からは望ましい特性であることを確認した。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の研究開発助成のもとで行われたもので、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Ahn, D. G., "Directed Energy Deposition (DED) Process: State of Art," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 8(2021), pp. 703–742.
- 2) Schopphoven, T., Gasser, A., Backes, G., "EHLA: Extreme High-Speed Laser Material Deposition: Economical and effective protection against corrosion and wear," *Laser Techik Journal* 14(2017), pp. 26–29.
- 3) Li, T., Zhang, L., Bultel, G.G.P., Schopphoven, T., Gasser, A., Schleifenbaum, J.H., & Poprawe, R., "Extreme High-Speed Laser Material Deposition (EHLA) of AISI 4340 Steel," *Coatings* 9(2019), 778.