

# 指向性エネルギー堆積法を応用した回転式コーティング技術の基礎的研究

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科 ○佐藤孝亮, ◎小池 綾

## 要旨

金属積層造形法の一つである指向性エネルギー堆積法は、金属コーティング技術への応用が期待されるものの、内部欠陥や低造形精度といった課題を抱えている。本研究は、指向性エネルギー堆積法において被膜対象を高速回転させながら造形を行うことで、高品質な金属コーティング技術の確立を目指す。造形パラメータによる表面幾何形状、希釈率、硬さの変化を評価し、それぞれの項目における最適造形条件を求めた。

## 1. 結論

金属造形ができる 3D プリンタの一方式である指向性エネルギー堆積法 (DED: Directed Energy Deposition) は、図 1 に示すようにレーザーによって母材上にメルトプールを形成し、同時にキャリアガスによって金属粉末を噴射し、熔融・凝固させて積層造形を行う。DED は造形形状の自由度が高いことなどから、医療分野や航空宇宙分野において応用が広まりつつある。また DED は補修工程や被膜工程など、新たな応用可能性も活発に議論されている。本研究では DED の新たな応用技術として、被膜対象を高速回転させながら造形を行う金属コーティング技術の確立を目指す。DED で形成した金属コーティングの高品質化を目指して、造形パラメータの違いによる、造形物の表面粗さ、真円度、希釈率、硬さの変化を評価した。また、得られた結果から各評価項目に対する最適造形条件を求めた。

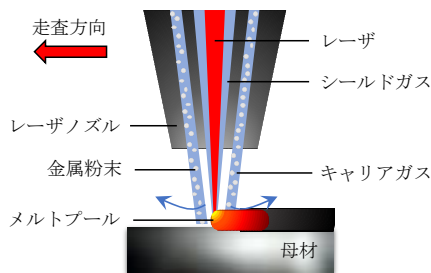


図1 指向性エネルギー堆積法

## 2. 実験方法

本研究では表面の平坦化、希釈率の低減、硬さの向上を目的に、図 2 のように母材を高速回転させながら積層造形を行った。また造形物の例を図 3 に示す。先行積層物との重なり合いの割合を示すオーバーラップ率や、メルトプールへの入熱量の違いによる被膜の特性の変化を評価するため、レーザーヘッド送り速度、回転数、そしてメルトプールサイズを一定にするレーザー出力制御(LOC)の有無といった条件を変えて造形した。積層条件を表 1 に示す。

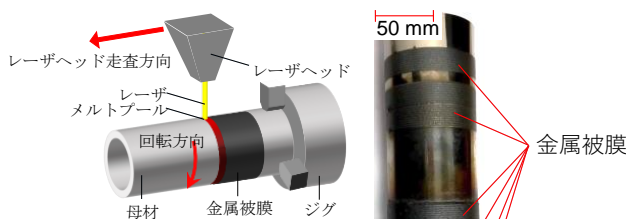


図2 造形方法の概略



図3 造形物

表1 積層条件

レーザー出力	W	1600, LOC
粉末供給量	g/min	18
キャリアガス流量	l/min	6
シールドガス流量	l/min	8
レーザーヘッド送り速度	mm/min	10, 20
回転数	min <sup>-1</sup>	3.56, 10, 20, 30, 40
積層幅	mm	10
積層数	-	1, 4
金属粉末	-	Inconel 625
母材	-	SUS304 円筒部材
母材直径	mm	89.3

## 3. 特性評価

### 3.1 表面粗さ

図 4 に造形物の表面粗さ(最大高さ Rz)と 1 回転あたりのレーザーヘッド送り量の関係を示す。オーバーラップ率が増加することで隣り合うトラック同士の間隔が小さくなり、表面形状はより平坦になる<sup>1)</sup>が、1.00 mm/rev 以下では大きくなっている。これは先行積層物が再加熱される頻度が増えて酸化が促されたことで表面粗さが大きくなったと考えられる。また、回転数 40 min<sup>-1</sup> ではメルトプールサイズの縮小によりメルトプールに十分に粉末が供給されず、造形物が形成されなかった部分があったことや、メルトプールサイズのばらつきが大きくなったことで造形物厚さの変動が大きくなり、表面粗さが大きくなったと考えられる。回転数 40 min<sup>-1</sup> におけるメルトプールサイズの時間変化を図 5 に示す。表面粗さに対して、回転数 40 min<sup>-1</sup> 以外の条件では、1 回転あたりのレーザーヘッド送り量以外の影響は見られないため、表面粗さに対する支配的なパラメータはレーザーヘッド送り量と考えられる。

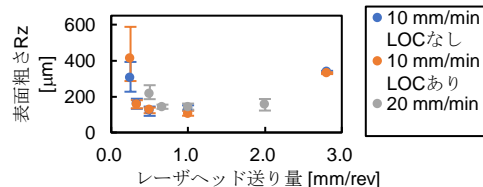


図4 表面粗さ

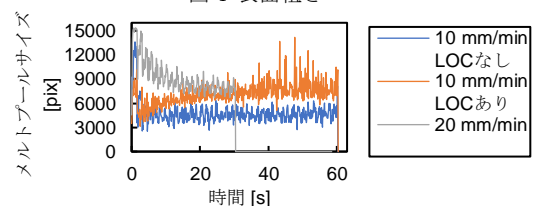


図5 40 min<sup>-1</sup> のメルトプールサイズ

### 3.2 真円度

図6に造形物の真円度と回転数の関係を示す。LOCを適用することでメルトプールサイズのばらつきが小さくなった条件では真円度が小さくなったことから、メルトプールサイズが安定していると真円度も小さくなると考えられる。また、同じ回転数では、レーザーヘッド送り速度が低い条件において真円度が小さくなったため、オーバーラップ率が大きいほど真円度が小さくなると考えられる。

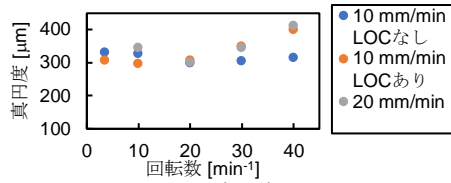


図6 真円度

### 3.3 希釈率

図7に造形物を母材の回転方向と垂直に切断した際の断面図を示す。希釈率は造形物に対して母材の成分が混ざり込んでいる割合を示すもので、図7に示した層厚  $A$ 、溶け込み深さ  $B$  を用いて以下の式のように求められる。

$$(\text{希釈率}) = \frac{B}{A+B} \quad (1)$$

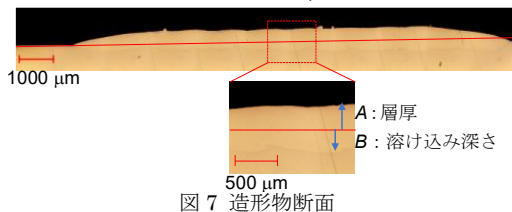


図7 造形物断面

図8に希釈率の測定結果をまとめる。回転数が増加することで、希釈率が低下した。これは、母材とノズルの相対速度が高くなることでメルトプールへの入熱量が低下し、溶け込み深さが小さくなったことや、オーバーラップ率が増加し、先行積層物の再溶融にエネルギーが消費され、母材の溶融に使われるエネルギーの割合が減少したためと考えられる。送り速度で比較した場合、送り速度が低い条件において希釈率が低いことから、オーバーラップ率が大きいほど希釈率が低くなると考えられる。また、LOCを適用することでレーザー出力が大きくなった条件では、希釈率が高くなる傾向があった。

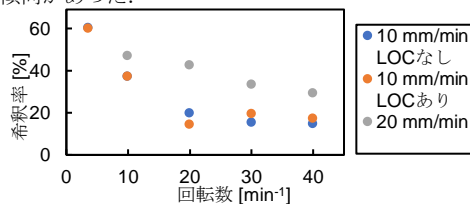


図8 希釈率

### 3.4 元素分析

図9に造形物内部のニッケルと鉄の質量比を示す。レーザーヘッド送り速度 10 mm/min、回転数 40 min<sup>-1</sup>、LOC適用においてニッケルの含有量は減少しているが、これは加熱頻度が増加したことや、LOC適用によりレーザー出力が増加したことで炭化物が析出したためと考えられる。それ以外の条件では、回転数が増えるほど、また同じ回転数ではレーザーヘッド送り速度が低いほど、造形物内部のニッケルは割合が増え、鉄の割合は減る傾向があった。このことから、希釈率によって造形物の純度を評価することは妥当と考えられる。

### 3.5 硬さ

図10にナノインデンテーション硬さ試験の結果を示す。金属造形物は、凝固時の冷却速度が高いほど結晶粒径が微細化し硬くなる<sup>2)</sup>。そのため、回転数が大きいほどメルトプールへの入熱量が

減少したことで細粒化し、硬くなったと考えられる。一方で、回転数 30, 40 min<sup>-1</sup>では硬さが低下しているが、これはオーバーラップ率が増加することで造形物が再加熱される頻度が増加し、結晶が粗大化したためと考えられる。また、LOCを適用することでメルトプールの温度が高くなったことで冷却速度が低くなり、結晶が粗大化したことで硬さが低くなったと考えられる。

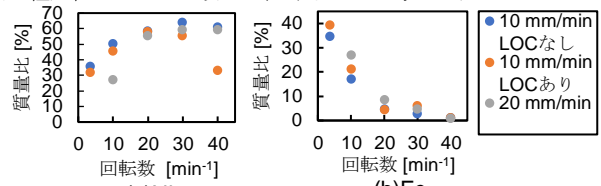


図9 造形物内部の質量比

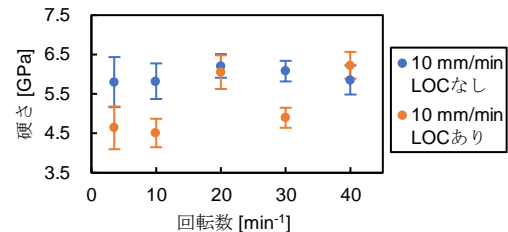


図10 ナノインデンテーション硬さ

## 4. 最適造形パラメータ

特性評価の結果から、応答曲面法によって最適造形パラメータを同定した。表面粗さは1回転あたりのレーザーヘッド送り量を評価変数として2次の近似曲面を求め、最適造形条件を求めた。また、回転数 40 min<sup>-1</sup>ではメルトプールサイズが縮小し、他の条件とは異なりコーティング層が形成されない結果となり、外れ値となると考えられたため、回転数 40 min<sup>-1</sup>の実験結果は除いて最適化を行った。真円度と希釈率は、1回転あたりのレーザーヘッド送り量、回転数を評価変数として2次の近似曲面を求め、最適造形条件を求めた。硬さはサンプル数が少なく信頼性に欠けると考えられたため、本研究における造形結果に基づいて最も良いと思われる条件を選定した。得られた表面粗さ、真円度、希釈率に対する最適造形条件と、硬さの最良と思われる条件を表2に示す。

表2 最適造形パラメータ

	送り量 mm/rev	回転数 min <sup>-1</sup>	レーザー出力 W
表面粗さ	1.07	(任意)	(任意)
真円度	0.345	29.0	1600
希釈率	0.268	37.4	1600
硬さ	0.500	20.0	1600

## 5. 結論

指向性エネルギー堆積法において、母材を高速回転させ、レーザーヘッド送り量を小さくすることで、表面幾何形状、成分希釈、硬さに優れた金属被膜を作製できることを示した。また、各評価項目に対する支配的な造形パラメータを明らかにし、最適造形条件を決定した。

## 6. 参考文献

- [1] C. Li, R. White, X.Y. Fang, M. Weaver, Y.B. Guo, Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment, *Materials Science & Engineering A*, 705, (2017) 20-31.
- [2] I. Hemmati, V. Ocelik, J. Th. M. De Hosson, The effect of cladding speed on phase constitution and properties of AISI 431 stainless steel laser deposited coatings, *Surface & Coatings Technology*, 205, (2011) 5235-5239.