

金属粉末熔融積層造形法における粉末供給効率向上のためのレーザノズル開発

慶應義塾大学 ○竹村志帆, ◎柿沼 康弘, 小池 綾, 佐藤洋平

要旨

三次元金属造形の方式である指向性エネルギー堆積法(DED)では粉末供給効率の低下が問題となっている。本研究は、DED におけるレーザノズルの改良による粉末供給効率向上を目的とした。レーザライトシート法による粉末分布計測ならびに積層実験による評価を行い、噴出ガス流量増加が粉末供給効率を低減させることを明らかにした。さらに、流体解析に基づいて粉末収束距離を評価し改良したレーザノズルを実験的に評価した。

1. 緒論

3次元CADデータを基に、金属材料を付加・附着させることで立体形状を造形する金属粉末熔融積層造形法は、多品種少量生産においては除去加工に比べ高い加工効率を得られ、また省資源である。その方式である指向性エネルギー堆積法は、図1に示すとおり、キャリアガスと共に金属粉末を供給しつつ、レーザを照射して材料を熔融・凝固させることで積層造形を行う。本手法では、キャリアガスに加え、レーザノズル内に跳ね返った金属粉末が侵入するのを防ぐためのシールドガスもメルトプール付近に向けて供給され、粉末供給プロセスにおいて2種類のガスが影響しあうことで、噴射された粉末が一定の割合で加工点に到達せず、粉末供給効率の低下が課題となっている。そこで本研究では、レーザノズルから噴出される金属粉末の分布測定ならびに粉末供給効率評価を実験的かつ解析的に行うことで、指向性エネルギー堆積法における粉末供給効率を向上することを目的とした。

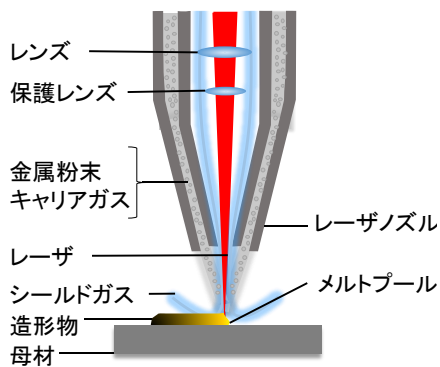


図1 指向性エネルギー堆積法

2. 粉末分布測定実験

図2に示したレーザライトシート装置を用いて、表1に示した粉末供給条件における、粉末の流れを撮影した。さらに、動画からグレースケールの時間平均画像を取得し、加工点位置における輝度値をグラフ化することで粉末分布を測定した(図3)。得られた粉末分布における半値幅を導出した結果を図4に示した。これより、キャリアガス流量4 l/min以下では、キャリアガス流量の増加に伴い、半値幅が減少する傾向がみられた。また、キャリアガス流量4 l/minにおいて最も半値幅が小さくなり、高い収束性が得られることがわかった。これは、キャリアガス流量の増加に伴い、粉末速度が増加したことで、抗力の影響を受けづらくなったことが要因であると考えられる^[1]。

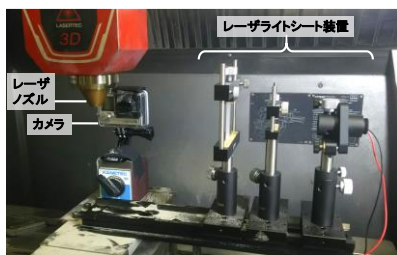


図2 レーザライトシート装置

表1 粉末供給条件

キャリアガス流量	[l/min]	2, 3, 4, 6, 8, 10
シールドガス流量	[l/min]	2, 4, 6
粉末供給量	[kg/min]	1.8×10^{-2}

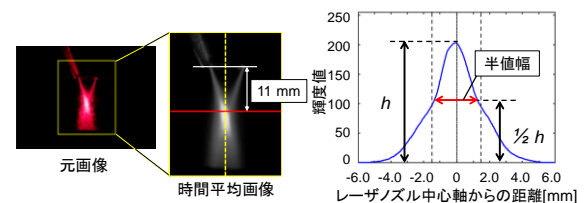


図3 粉末分布評価方法

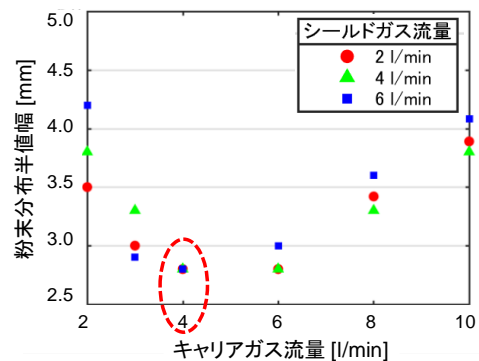


図4 粉末分布半値幅測定結果

3. 積層実験

表2に示した条件で単層造形を行った。造形物の断面積を求め、式(1)を用いて粉末供給効率 E_p の評価を行った。

$$E_p = \frac{AF\rho}{f_p} \quad (1)$$

なお、 A [mm²]は積層物断面積、 F [mm/min]はレーザヘッド送り速度、 ρ [kg/mm³]は金属粉末密度、 f_p [kg/min]は粉末供給量である。粉末供給効率を算出した結果を図5に示した。キャリアガス流量3 l/minにおいて高い粉末供給効率を得られ、キャリアガス流量4 l/min以上では、粉末供給効率が減少する傾向がみられた。収束性の評価とずれが生じた原因は、キャリアガス流量が大きいときのスパッタ(火花)発生と考えられる。キャリアガス流量3, 4 l/minでの積層時に飛散するスパッタの様子を図6に示す。キャリアガス流量の増加に伴い、スパッタが多く発生していることがわかる。また、シールドガス流量の増加に伴い、粉末供給効率が減少する傾向がみられるが、キャリアガスと比べ影響は少ない。よって、粉末供給効率向上のためには、キャリアガスおよびシールドガスの流量は少なくすることが有効である。特にキャリアガスに関しては、スパッタを抑制するためには流量を3 l/min以下に抑える必要があると考えられる。

表2 積層条件

キャリアガス流量	[l/min]	2, 3, 4, 6, 8, 10
シールドガス流量	[l/min]	2, 4, 6
レーザ出力	[W]	1600
レーザヘッド送り速度	[mm/min]	400
金属粉末密度	[kg/m ³]	8.44×10 ³
粉末供給量	[kg/min]	1.8×10 ⁻²

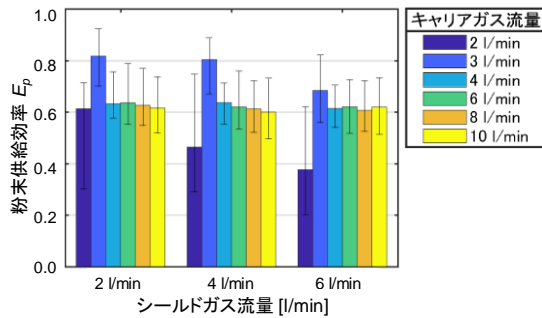
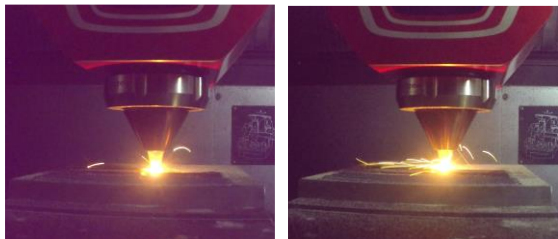


図5 粉末供給効率

(a) キャリアガス流量 3 l/min (b) キャリアガス流量 4 l/min
図6 積層時のスパッタの様子

4. 流体解析に基づくレーザノズル形状の再設計

スパッタを抑制した上で、高い収束性を実現するために、粉末収束距離の変更に基づき、レーザノズル形状の改良を行った。従来のレーザノズルの粉末収束距離が 13.0 mm であるのに対し、本研究では、8.0 mm 以上 11.0 mm 以下の範囲で 0.5 mm おきに粉末収束距離を変更したレーザノズルを設計し、流体解析により、粉末分布に対する粉末収束距離の影響を評価した。解析条件は表 3 に示したとおりである。

表3 解析条件

乱流モデル		$k-\varepsilon$ モデル
粒子密度 ρ_p	[kg/m ³]	8.44×10 ³
粒子径 d_p	[mm]	53-105
流体密度 ρ	[kg/m ³]	1.784
流体粘度 μ	[Pa·s]	2.22×10 ⁻⁵
粒子供給量	[kg/min]	18×10 ⁻³
キャリアガス流量	[l/min]	3, 4
シールドガス流量	[l/min]	2, 4, 6
粉末収束距離 l	[mm]	7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 13.0

四面体格子により分割された解析空間に対し、オイラー・ラグランジュ法を用いて流体解析を行い、加工点中心から 1.0 mm 以内に供給される金属粉末の割合を求めた結果を図 7 に示す。これより、従来レーザノズルに対し、粉末収束距離が 8.0 mm から 11.0 mm のレーザノズルでは収束性が向上した。これらの結果より、粉末収束距離 8.0 mm のレーザノズルを試作し(図 8)、粉末分布実験を行った。輝度値をグラフ化し、従来のレーザノズルと比較すると(図 9)、試作レーザノズルの方が加工点付近の輝度のピーク値が増加していることがわかる。これは、粉末密度が向上した影響であると考えられ、粉末収束距離の短縮が収束性向上に有効であると考えられる。

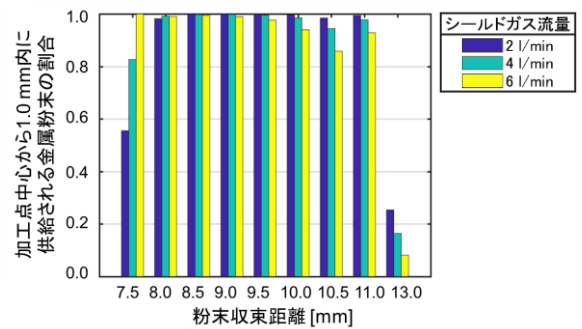
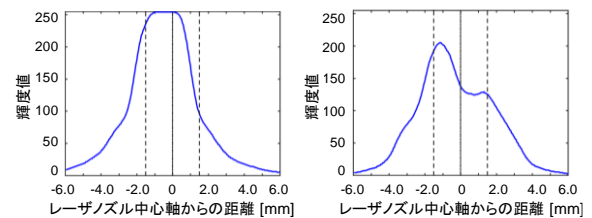


図7 粉末収束距離の収束性への影響



図8 試作したレーザノズル



(a) 試作レーザノズル (b) 従来レーザノズル

図9 輝度値分布図

5. 結論

本研究では、指向性エネルギー堆積法において、レーザノズルから噴出される金属粉末の分布測定ならびに粉末供給効率評価によりガス流量の影響を評価した。また、流体解析に基づいて形状を改良したレーザノズルの試作および粉末分布測定を行った。本研究で得られた知見を以下に要約した。

- ・ 粉末分布測定実験より、キャリアガス流量 4 l/min で最も高い収束性が得られた。
- ・ 積層実験より、粉末供給効率の低下にはスパッタの発生が影響しており、スパッタを抑制するためにはキャリアガス流量 3 l/min 以下にする必要があることが明らかになった。
- ・ 流体解析に基づいて試作したレーザノズルを用いた粉末分布測定実験を行い、粉末収束距離の短縮が収束性向上に有効である可能性を示した。

6. 参考文献

- [1] Hua Tan, Fengying Zhang, Rujun Wen, Jing Chen, Weidong Huang, Experimental study of powder flow feed behavior of laser solid forming, Optics and Lasers in Engineering, Vol.50 (2012), pp.391-398