

ダイス鋼粉末の結合特性に関する研究

金沢大学 ○佐々木啓伍, 金沢大学 ◎古本達明, 田辺優弥, 橋本洋平, 小谷野智広, 細川晃

要旨

粉末床溶融結合法では、主にマルエージング鋼粉末が用いられるが、より汎用的な利用のために本研究ではダイス鋼粉末での造形を試みた。粒度分布が異なる複数のダイス鋼粉末を用い、異なるガス雰囲気下でライン状に一層のみ造形した結果、アルゴン雰囲気下においては低エネルギー密度でも連続的な造形物が得られることがわかった。また、造形物の幅は雰囲気や粒度分布によってはほとんど変化せず、エネルギー密度による影響が最も大きかった。

1. 緒言

金型製造では、金属 AM(Additive Manufacturing)のなかで、一般的に粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion:PBF)が用いられる。PBF法は、薄く堆積させた金属粉末にレーザーを照射し、粉末を溶融・凝固しながら層を重ねて立体形状を製作する手法である。PBF法の長所は、複雑形状の造形が容易で、迅速に金型が製造できることである。しかしながら、ダイス鋼粉末を取り扱った事例は少なく、PBF法の汎用的な利用に向けてその開発が求められている。ダイス鋼粉末を用いると、造形物内部に気孔が発生し、造形物の強度が低下することが報告されている¹⁾。気孔の発生は、粉末の溶解性が低いことが要因の一つであり、粉末のレーザー吸収率や熱伝導率などが溶解性に大きく影響を与える。本研究では、造形雰囲気や粉末の粒度分布を変化させてライン造形を行い、これらが粉末の溶融・凝固プロセスに及ぼす影響を調べたので、以下に報告する。

2. 実験概要

表1に実験条件を示す。本研究では、造形雰囲気および金属粉末の粒度分布が造形に及ぼす影響を調査するため、窒素とアルゴンの雰囲気下で造形を行った。造形は、表面をサンドブラスト加工した炭素鋼プレート上に行い、それぞれ50μmの厚さで堆積させてライン状にレーザーを照射した。使用レーザーは、ファイバレーザー(IPG photonics, YLR-300-AC-Y11)である。エネルギー密度が造形特性に及ぼす影響を調べるため、レーザー出力は150-300W、レーザー走査速度は10-3000mm/sで変化させた。得られた造形物は光学顕微鏡((株)キーエンス, VHX-1000)で観察し、連続的な造形物が得られる最小エネルギー密度を調べるとともに、造形物の幅を測定した。本研究で用いるレーザーのエネルギー密度 E [J/mm³]は次式で定義した

$$E = \frac{P}{F \cdot \Phi \cdot t} \quad (1)$$

ここで、 P [W]はレーザー出力、 F [mm/s]は走査速度、 Φ [mm]はスポット径、 t [μm]は堆積厚さである。

表2に使用した金属粉末の特性を示す。粉末の粒度分布は11-48μmと21-41μmの2種類である。図1(a)は粒度分布が11-48μm、図1(b)は粒度分布が21-41μmである粉末のSEM画像、図2は各粉末の粒度分布を比較している。粉末は、ダイス鋼のSKD61を用い、ガスアトマイズ法で製造された球状粉末を使用した。粉末の熱伝導率は、容器に充填された粉末の内部に設置された熱電対の出力が最大になるまでの時間から求められる。レーザー吸収率は、積分球内部に塗布された金属粉末にレーザーを照射し、検出素子がレーザーを受光した時のオシロスコープの出力をもとに求められる²⁾。表2より、粉末の熱伝導率は、空隙中に存在するガスの影響を受けて異なる様子が見られる。アルゴンガスは窒素と比較して熱伝導率が低いため、アルゴン雰囲気下では熱伝導率が窒素雰囲気下

の7割程度である。一方、粉末のレーザー吸収率は雰囲気ガスの影響が小さく、粒度分布で異なる様子が見られる。これは、粒径が小さな粉末が含まれるほど堆積粉末の表面粗さが相対的に大きくなるためである。このように、粉末の熱伝導率やレーザー吸収率は雰囲気や粒度分布によってそれぞれ特性が異なることがわかる。

Table 1 Experimental conditions

Laser irradiation	
Laser type	Yb:Fiber (CW)
Wavelength λ [nm]	1070
Laser power P [W]	150, 300
Spot size Φ [mm]	0.1
Scan speed F [mm/s]	10-3000
Scan length L [mm]	30
Layer thickness t [μm]	50
Atmosphere gas	N ₂ , Ar
Substrate	
Material	S50C
Size [mm] × [mm] × [mm]	200 × 150 × 10

Table 2 Specifications of metal powder

Material	SKD61	
Shape	Spherical	
Average particle diameter D_{50} [μm]	29.4	29.1
Particle size distribution D_{10} - D_{90} [μm]	11-48	21-41
Thermal conductivity in N ₂ atmosphere K_{N_2} [W/m · K]	0.179	0.168
Thermal conductivity in Ar atmosphere K_{Ar} [W/m · K]	0.124	0.121
Laser absorption in N ₂ atmosphere Ab_{N_2} [%]	38.6	43.5
Laser absorption in Ar atmosphere Ab_{Ar} [%]	37.6	42.1

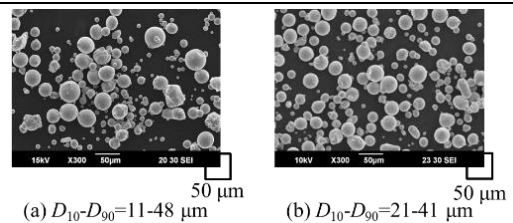


Fig.1 SEM images of SKD61 powder

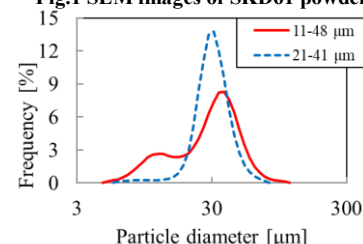


Fig.2 Particle size distribution

3. 実験結果および考察

図3は、エネルギー密度が 60 J/mm^3 の条件で得られた造形物を光学顕微鏡で観察した結果である。エネルギー密度が同じであっても、条件によって得られた造形物に違いが見られることがわかる。図3(a), 図3(c)の造形物は熔融金属が断続的に凝固しているのに対し、図3(b), 図3(d)の造形物は熔融金属が連続的な形状で凝固している。連続的な造形物が得られた条件は、粉末の溶解性が高いため造形に適していると考えられる。

図4は、各粉末で連続的な造形物が得られる最小エネルギー密度を比較した結果である。造形雰囲気の違いで比較すると、窒素雰囲気下で連続的な造形物が得られる最小エネルギー密度は 100 J/mm^3 であったのに対し、アルゴン雰囲気下では最小エネルギー密度が 60 J/mm^3 まで連続的な造形物が得られた。これは、前述したように、アルゴン雰囲気下の粉末は窒素雰囲気下の粉末と比較して熱伝導率が7割程度と小さく、その影響を受けてレーザー照射部周囲へ熱が伝わりにくくなり、粉末の溶解性が上がったためと考えられる。一方、粒度分布では連続的な造形物が得られる最小エネルギー密度に大きな違いはなかった。粒度分布が $21\text{-}41 \mu\text{m}$ の粉末のレーザー吸収率は粒度分布が $11\text{-}48 \mu\text{m}$ である粉末と比較して5%程度大きくなったが、その差は粉末の溶解性に影響を及ぼすほどの有意差ではないと考えられる。

図5は、各粉末でライン造形を行い、造形物の幅を比較した結果である。どの条件でも、レーザー走査速度が速くなると造形物の幅が小さくなり、また、レーザー出力 300 W に比べレーザー出力 150 W では造形物の幅が小さくなる傾向は同じであった。一方、造形雰囲気の違いを比較すると、アルゴン雰囲気下では窒素雰囲気下に比べわずかに造形物の幅が小さくなった。これは、アルゴン雰囲気下では粉末の熱伝導率が低く、それに起因して粉末凝集幅が狭くなったためと考えられる。また、粒度分布の違いを比較すると、粒度分布が $21\text{-}41 \mu\text{m}$ である粉末は粒度分布が $11\text{-}48 \mu\text{m}$ である粉末と比較して造形物の幅がわずかに小さくなった。これは、粒度分布が $11\text{-}48 \mu\text{m}$ である粉末に含まれる粒径の小さな粉末の影響と考えられ、これらの粉末の熱容量が小さくより広範囲に熱が伝わったためと考えられる。しかしながら、エネルギー密度と比較すると、造形雰囲気や粒度分布による違いは小さかった。

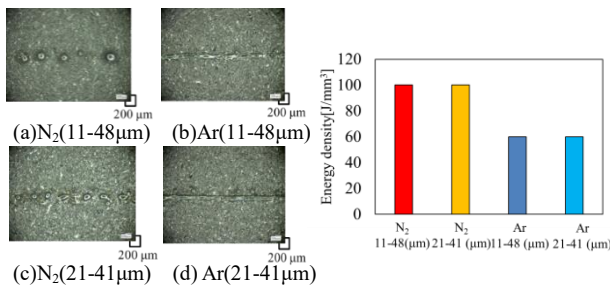
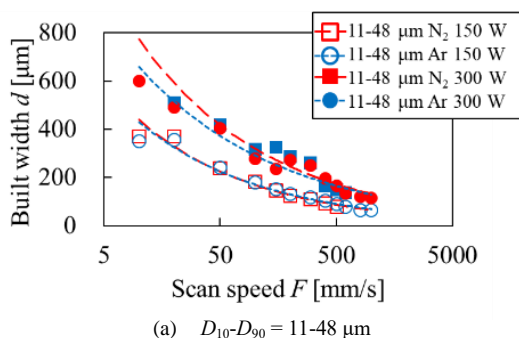
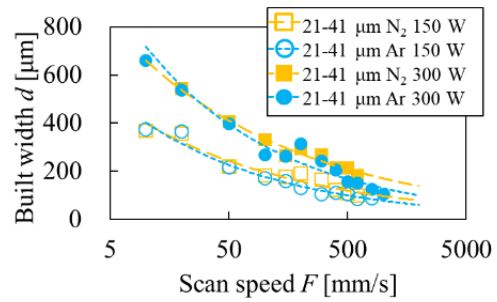


Fig.3 Images of built structure ($E=60 \text{ J/mm}^3$)

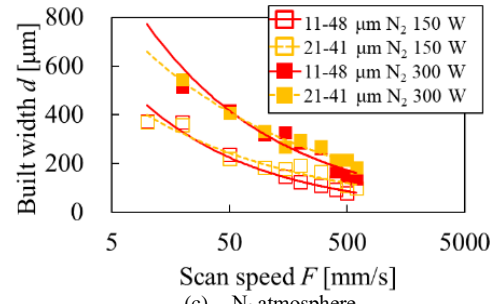
Fig.4 Comparison of minimum energy density



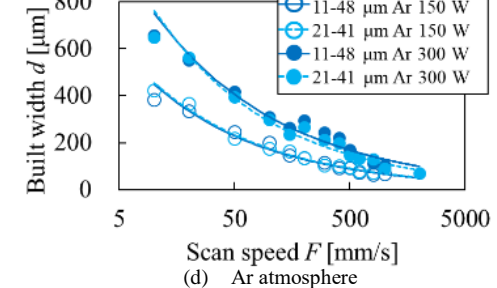
(a) $D_{10}\text{-}D_{90} = 11\text{-}48 \mu\text{m}$



(b) $D_{10}\text{-}D_{90} = 21\text{-}41 \mu\text{m}$



(c) N₂ atmosphere



(d) Ar atmosphere

Fig.5 Comparison of built width with gas atmosphere and particle size distribution

4. 結言

SKD61 粉末を用いて PBF 法によるライン造形を行い、造形雰囲気や粉末の粒度分布が造形特性に及ぼす影響を調べた。得られた結果を以下に要約する。

- (1) エネルギー密度が同じであっても、造形条件によって連続的な造形物または断続的な造形物が得られた。
- (2) 窒素雰囲気下では、アルゴン雰囲気下と比較して連続的な造形物が得られる最小エネルギー密度が小さくなり、また、造形物の幅もわずかに小さくなった。
- (3) 粒度分布が $21\text{-}41 \mu\text{m}$ である粉末は、粒度分布が $11\text{-}48 \mu\text{m}$ である粉末と比較して造形物の幅がわずかに小さくなった。
- (4) エネルギー密度による造形物の幅の違いと比較して、造形雰囲気や粒度分布による造形物の幅の違いは小さかった。

謝辞

本研究に用いた金属粉末試料は大同特殊鋼株式会社に提供頂きました。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Beal, V. E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens, P., Aharens, C. H.: Fabrication of x-graded H13 and Cu powder mix using high power pulsed Nd:YAG laser, Proc. of SolidFreeform Fabrication Symposium, (2004) 187.
- 2) Mazur, M., Brincat, P., Leary, M., Brandt, M.: Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 1.
- 3) 古本 達明, 上田 隆司, 細川 晃, 阿部 諭, Tomas H.C. CHILDS: 積層造形用金属粉末の各種物性測定に関する研究, 熱伝導率およびレーザー光吸収率の簡易測定方法の提案, 精密工学会誌, 73, 5, (2007), 558.