

技術論文



Technical Paper

PBF-LB/M 用工具鋼粉末の粉末床品質に及ぼす 粉末せん断特性の影響

山田慎之介*¹, 山口 貢*², 古本達明*²

Effect of Powder Shear Property on PBF-LB/M Powder Bed Quality of Tool Steels

Shinnosuke YAMADA, Mitsugu YAMAGUCHI and Tatsuaki FURUMOTO

Synopsis

The Additive Manufacturing (AM) die & mold, which has conformal cooling channel manufactured by PBF-LB/M process, will deliver high performance in terms of improvement of thermal fatigue. In tool steel SKD61 for AM die & mold often occurs surface crack due to abnormal surface roughness that occur during the build process. In the process, powder bed (PB) quality influenced by powder properties is one of the key factors to determine the quality of built parts. However, in terms of quantitative relationship between PB quality and powder flow-ability, there are few reports. In this study, SKD61 powders with different flow-ability (powder shear properties) due to different particle shapes were prepared and the effect of shear properties on PB roughness was investigated using the evaluation machine specialized in powder recoat process. As a result, PB roughness has a good correlation with angle of internal friction, PB roughness and PB roughness stability corresponding to powder recoat speed change showed increase with increasing angle of internal friction. It was found that it is important for PB quality to control angle of internal friction influenced by particle shapes of mean particle diameter d_{50} or over.

1. 緒 言

近年、付加製造技術 (Additive Manufacturing: AM) の一つである 3 次元積層造形技術は新しいモノづくりの形態として脚光を浴びている¹⁾。金属材料を用いた AM 技術の一つとして、熱源にレーザーを用いたレーザー式粉末床溶融結合法 (PBF-LB/M) がある。PBF-LB/M は粉末堆積厚さ数十 μm 単位の粉末床に対して、微細レーザーを用いて、選択的に溶融凝固させ、その凝固層を積層させることで造形する方法である²⁾。PBF-LB/M はその設計自由度の高さから、複雑なニアネット構造化、最適形状による軽

量構造部品や一体部品の製造、内部冷却チャンネルの最適化が可能であり、航空宇宙産業や医療部品、金型部品など様々な分野で適用されている³⁾。

金型分野では、PBF-LB/M により金型のコアやキャビティの形状に沿った最適なコンフォーマル冷却水管を金型内部に設けることで冷却能力を確保し、金型寿命を向上させる研究がされている。PBF-LB/M を金型製作へ適用する時、材料粉末としてマルエージング鋼⁴⁾や熱間工具鋼⁵⁾を用いた報告が多くなされている。熱間工具鋼 SKD61 は、炭素含有量が 0.3 ~ 0.6 % と多いため高硬度であり、マルエージング鋼と比較して熱伝導率が大き

2022年 10月 13日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所, 工博(Dr. Eng., Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 金沢大学 設計製造技術研究所, 工博(Dr. Eng., Advanced Manufacturing Technology Institute, Kanazawa University)

く、低価格でコバルトを含有しない等の利点があるものの、PBF-LB/Mへ適用すると炭素含有量の多さに起因して造形中の急速加熱急速冷却サイクルにより脆性硬化マルテンサイト組織となり、造形プロセスに起因して割れが発生する等の不具合が生じることが報告されている⁹⁾。SKD61の適用に関しては、予熱温度を向上させることで造形時の割れの原因となる残留応力を低減させる等の対策が検討されている⁷⁾。また機械特性低下につながる造形物のポロシティや、応力集中によるき裂発生の起点となる造形物表面の粗さを抑制することも重要である⁸⁾。

一般的なPBF-LB/Mプロセスでは、造形品質(空隙、表面粗さ)を決定する重要なファクタの一つに粉末床の品質がある⁹⁾。粉末床は一般的なPBF-LB/M装置では造形チャンバの横に併設した供給層から粉末を供給し、リコータで粉末をならすことで形成され、リコータの走査条件や粉体特性により粉末床の品質は影響を受ける。粉末床品質は、流動性とかさ密度に影響を受け、またそれらに影響を及ぼす因子としては、粒度分布(PSD)、粒子形状や最大粒子径が挙げられる⁹⁾。特に粉末流動性が著しく悪い場合は、粉末床密度の低下を招き、造形欠陥の誘発を招くこととなる¹⁰⁾。

PBF-LB/Mでの粉末床形成に関しては、近年個別要素法(Discrete Element Method: DEM)での解析¹¹⁾による説明が進められており、リコータのリコートブレード前方で堆積した粉末粒子群が雪崩を伴う流動により、ブレード直下に流動し、粉末床を形成するとされている。またリコート時の粉末流動は、(i)粒子間の摩擦、(ii)粒子間のかみ合い、(iii)付着力(van der Waals力、静電気力および液架橋力)に影響を受け、特に粒子間の摩擦およびかみ合いは粒子形状に依存するとされている¹²⁾。したがってPBF-LB/Mプロセスでの粉末床形成に必要な金属粉末の流動性指標として、粒子間の摩擦力や付着力を正確に評価する必要がある。

PBF-LB/M用金属粉末の流動性評価法としては、安息角測定法(ISO-4490)やホールフローメータによる流動性測定法(ASTM B213/JIS Z2502)、粉体層せん断試験法(ASTM D6773/JIS Z8835)、回転ディスクの回転抵抗を評価する回転抵抗法や回転ドラム内の粉末雪崩を評価する回転ドラム法など様々な手法があるが²⁾、粉体層に圧縮荷重を負荷しながらせん断を行い、得られた垂直応力とせん断応力の関係から摩擦力および付着力を評価可能な粉体層せん断試験法¹³⁾が有効であると考えられる。

粉末床品質の評価方法としては、粉末床粗さや粉末床密度¹⁴⁾がある。先行研究では、Parteliらがローラータ

イプのリコータを用いた粉末床の表面粗さをDEMで解析し、粉末床の表面粗さがリコータの走査速度が速くなると悪化することを報告している¹⁵⁾。またYuasaらは粉末床に対してフリッジパターン投影による光学的3Dプロファイル測定から表面粗さを実験的に測定し、粉末床の表面粗さがリコータの走査速度増加により悪化すること、また回転抵抗法による動的流動性の低下とともに悪化することを報告している¹⁶⁾。ただし、PBF-LB/Mプロセス実機の粉末流動プロセスを考慮した場合、粉体層せん断試験法による粉末流動性(せん断特性)と粉末床品質を関連付けて定量的に評価した報告は少ないのが現状である。

本研究では、高品質な造形金型を造形するためのアプローチとして、工具鋼粉末のせん断特性が粉末床品質に及ぼす影響を明らかにするため、PBF-LB/Mプロセスで用いられるリコート走査ユニットを模擬した装置を製作し、ガス噴霧法および水噴霧法で作製された複数の工具鋼粉末を用いて、せん断試験法により評価したせん断特性がPBF-LB/Mプロセスでの粉末床の様相に及ぼす影響を調査した。

2. 金属粉末の流動性評価

2.1 金属粉末の流動性阻害要因

PBF-LB/Mプロセスでの粉体流動の阻害要因は主に粉体粒子間に生じる摩擦力と付着力である¹²⁾。Fig. 1に金属粉末が流動する際に阻害因子となる摩擦力および付着力と代表的な粒子形状の模式図を示す。摩擦力は、自重(粉体圧)もしくは外的に垂直応力が負荷された粉体層ですべり(流動)に必要な力であり、粒度分布や粒子形状に起因する。粒子形状では、一般的な①球状粒子のほか、②サテライト粒子(粗粒子に微粒子が付着結合したもの)や③凝集結合粒子(粒径が近い粒子が結合したもの)、④異形状粒子(粉碎形状粒子)などがあり、特に②～④の粒子形状の場合、粒子間のかみ合いに起因して、すべりに必要なせん断力が大きくなる。付着力は、粒子表面で生じる力であり¹⁷⁾、van der Waals力や静電気力、液架橋力がある。付着力は、分離力として重力の影響を受けるため、粒径が小さい(自重が小さい)微粉末では影響が大きく、凝集の原因となる一方、粒子径の増加に伴い粉末自体の自重が大きくなり、その影響は小さくなる。

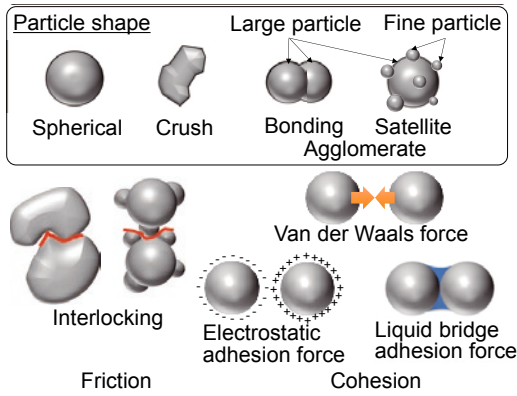


Fig. 1. Obstructive factors of powder flow in PBF-LB/M recoat process.*

2. 2 供試粉末

供試粉末として、4種類の粒度分布および形状が異なるSKD61粉末を準備した。粉末のSEM画像をFig. 2に示す。粉末A～Cはガス噴霧法により製造された球状粉末であり、粉末Dは水噴霧法により製造された異形状粉末である。粉末の酸素量は不活性ガス融解-赤外線吸収法で計測した。粉末A～Cは0.02～0.04%，粉末Dは0.15%であり、ガス噴霧法や水噴霧法で得られ

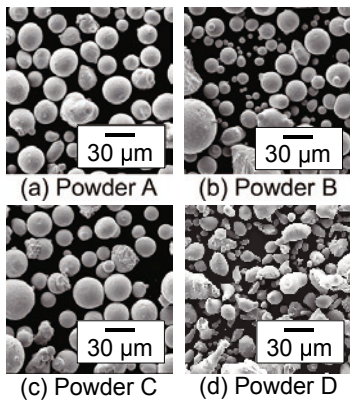


Fig. 2. SEM micrographs of powder.*

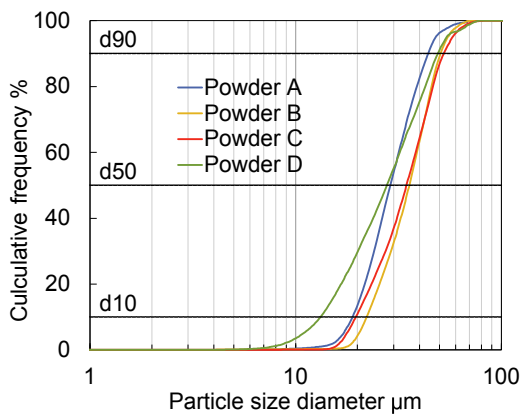


Fig. 3. Calculative powder size distribution.*

た粉末と同様の酸素含有量である¹⁸⁾。かさ密度は、JIS Z2504に基づく見掛け密度測定法で測定した。粉体の粒度分布および形状は画像式粒度分布測定装置 (Malvern Panalytical 社 Morphology G3) で評価した。測定粒子は10,000個とし、円形度は全測定粒子の平均値である平均円形度のほかにメディアン径d50付近±0.1%範囲内にある粒子の平均円形度をd50円形度(以下、d50円形度と表記)として算出した。Fig. 3は画像式粒度分布測定装置を用いて粉末の体積を基準として累積粒度分布を求めた結果である。Fig. 4は同装置により観察された粒子画像例であり、Fig. 5は画像から平均円形度およびd50円形度を評価した結果である。Fig. 3より、粒度の違いはあるものの、いずれもd50は30μm程度と一般的なPBF-LB/Mプロセスで用いられる粉末粒径であった。Fig. 4より、本研究で用いた供試粉末では多様な粒子形状を呈し、図中(a)に示すような球状粒子、図中(b)～(d)に示すような複数粒子が凝集結合したもの、図中(e)に示すような異形状のものが見られた。凝集結合粒子のうち図中(b)は粗粒子に微粒子が付着結合したサテライト粒子、図中(c)および(d)は比較的粒径が近い粒子が付着した凝集結合粒子である。Fig. 5より、いずれの粉末でも円形度は粒径の増加に伴い低下傾向を示し

Shape	(a) Spherical	(b) Agglomerate		(d) Crush
		(c) Satellite	(e) Bonding	
Image				
Circularity	0.99	0.90	0.72	0.43

Fig. 4. Examples of particle shape observed by image analysis.*

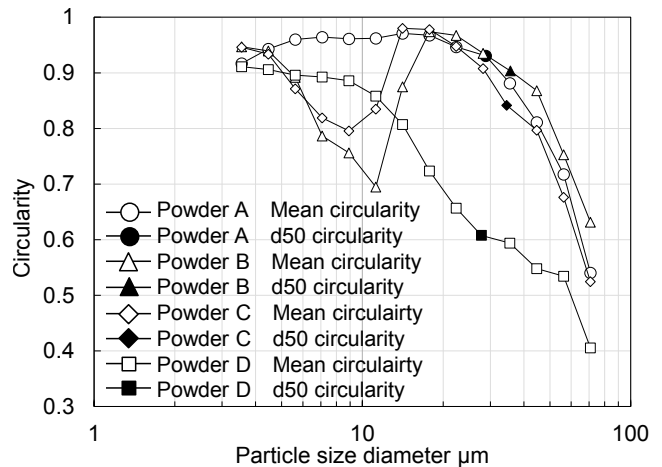


Fig. 5. Powder circularity.*

た、一般的には噴霧法で生成された粒子は Fig. 4(a) で見られるような球状粒子同士の衝突による凝集および付着により、凝集結合粒子¹⁹⁾やサテライト粒子²⁰⁾が生成するため、粒径の増加に伴い、円形度が低下する傾向を示す。ガス噴霧法に比べ水噴霧法のほうが急冷粉碎となるため異形状になりやすく、粉末 A に比べ粉末 D は円形度が低い結果となった。またガス噴霧法同士で比較した場合、粉末 A に比べ粉末 B および粉末 C は 10 μm 以下での円形度低下と粗粉領域での円形度低下が見られる。前者は 10 μm 以下の微粉が凝集していること、後者は微粉が粗粉に付着結合していることによるサテライト粒子増加および粗粉同士の結合による凝集結合粒子の増加を示唆している。Fig. 6 は各粉末の全体円形度および d50 円形度を測定した結果である。平均円形度に比べ、d50 円形度のほうが粉末間の大小を明確に示した結果となった。これは、特にガス噴霧粉の場合、Fig. 5 で示した通り、全体円形度は高円形度の微粉側の影響を顕著に受けるため、明確な差異は生じにくいと考えられる。一方、d50 円形度は凝集結合粒子主体の粗粉側を評価しているため、ガス噴霧粉でのサテライト粒子および凝集結合粒子の生成量の大小を形状差異として明確に示していると考えられる。Table 1 は各粉体特性調査結果をまとめた結果である。本研究で用いた各粉末はかさ密度が異なり、その要因としては Fig. 6 から分かるように d50 円形度の差異に起因していると推察される。

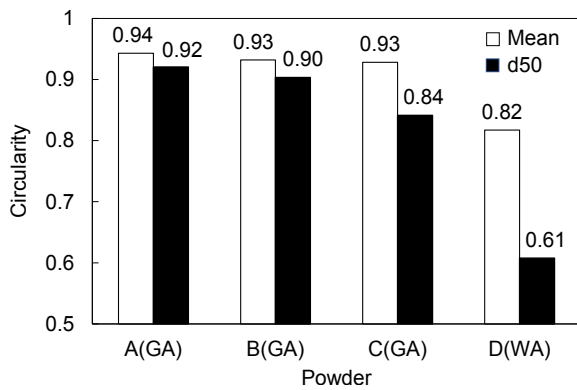


Fig. 6. Difference in mean circularity and d50 circularity. *

Table 1. Powder properties. *

Powder number		A	B	C	D
Material		JIS SKD61			
Product		GA	GA	GA	WA
Particle size range		+10/-45	+15/-45	+15/-45	-45
Bulk density g/cm ³		4.51	4.46	4.23	3.74
Particle size distribution μm	d10	18.9	22.2	19.6	13.3
	d50	28.8	35.7	34.5	27.8
	d90	44.2	50.6	52.6	48.5
	d90-d10	25.3	28.4	33.0	35.2
Mean circularity		0.94	0.93	0.93	0.82
d50 circularity		0.92	0.90	0.84	0.61

2. 3 セン断特性評価

供試粉末の流動性は Fig. 7(a) に示す回転セルによる粉体層せん断試験法 (Freeman Technology 社 FT4 Powder Rheometer) を用いた。せん断試験は JIS Z8835 に基づき、粉体層破壊包絡線を調査した²¹⁾。25 mm × 10 ml の測定セル容器に供試粉末を充填した後、24 mm のせん断セルを用いて、垂直荷重 9 kPa を付加し予備せん断を実施することで予圧密された粉体層に対して、所定の垂直応力 σ で加圧しながら、せん断セルを回転させ、横滑りが生じたときのせん断応力 τ を評価した。ここで垂直応力 τ は 3 ~ 7 kPa とした。Fig. 7(b) に得られた垂直応力 σ - せん断応力 τ 線図を示す。いずれの粉末でも垂直応力 σ とせん断応力 τ には線形関係があり、クーロン粉体として定義できる。クーロン粉体の場合、(1) 式に示す関係が成立する。

$$\tau = \sigma \cdot \tan\phi + C \quad (1)$$

ここで φ は内部摩擦角、C はせん断付着力である。内部摩擦角は粉体層に加圧した際のせん断抵抗の増加度合を角度として示すものであり、せん断付着力は粉体層に圧縮応力が負荷されていない状態で粒子間に生じる結合力すなわち付着力を示している。本研究では内部摩擦角およびせん断付着力を評価した。また本研究ではせん断付着力における静電気力および液架橋力の影響を排除するため、供試粉末に対してイオナイザを用いた除電を実施し、せん断試験では装置内の環境湿度を制御することで、25℃、3%RH 以下に統一して試験を実施した。Table 2 は各粉末のせん断特性評価結果である。内部摩擦角は d50 円形度が良好な粉末 A が最も低く、一方異形状の粉末 D が最も高い結果となった。また各垂直応力 σ でのせん断応力 τ も同様の傾向であった。これは粒子形状によるすべり性の差異に起因していると考えられ、d50 円形度が低いほど、流動を阻害するせん断抵抗が増加し、結果として内部摩擦角が増加したと考えられる。またせん断付着力は粉末 A ~ C に比べ粉末 D が最も低い値であった。一般に水噴霧粉は噴霧媒体に水を用いることから、不活性ガスを用いるガス噴霧粉よりも酸化が生じ、また酸化膜の構成物質の差異が生じる¹⁸⁾。本研究でも酸素含有量は粉末 A ~ C と粉末 D で大きく異なっており、いずれも酸化膜厚みやナノスケールでの粒子表面の凹凸(粗さ)、構成物質の差異に伴う Hamaker 定数の差異等により、van der Waals 力に変化が生じたと考えられる。またガス噴霧法により製造された粉末 A ~ C でのせん断付着力の差異は、微粉の凝集の影響が考えられる。Fig. 5 から分かるように、粉末 B および C

は粉末 A に比べて 10 μm 以下での円形度低下が顕著であり、付着性の高い微粉の生成および凝集が多く、せん断付着力に影響を与えたと考えられる。

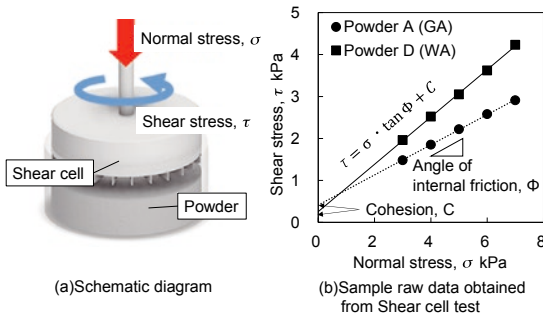


Fig. 7. Schematic of powder shear cell test. *

Table 2. Powder shear properties. *

Powder number	A	B	C	D
Angle of internal friction deg	19.8	21.3	22.4	29.4
Cohesion kPa	0.41	0.47	0.55	0.26
Shear stress, τ kPa				
σ = 3 kPa	1.48	1.62	1.75	1.96
σ = 5 kPa	2.22	2.49	2.62	3.05
σ = 7 kPa	2.91	3.17	3.43	4.23

3. 金属粉末の粉末床評価

3. 1 リコート評価装置

本研究では、Fig. 8 に示すような商用 PBF-LB/M 装置の粉末供給機構を模擬した試験装置を製作した。本装置は Fig. 8(b) に示すように粉末を供給するユニットと粉末を評価するエリアで構成されており、Fig. 8(c) に示すようなリコータを用いて粉末供給エリアから供給された粉末を評価エリア上に設置した SUS プレート (100 × 100 mm²) に供給し、粉末を敷き詰める構造になっている。リコートブレードには商用 PBF-LB/M 装置に用いられる Fig. 8 (d) に示すようなゴムブレードを使用した。粉末床の様相を確認するため、Fig. 8(e) に示すような評価エリア直上に 2100 万画素の観察用 CMOS カメラ (KEYENCE 社 CA-HF2100C) を設置し、粉末床の荒れを明確に観察するため評価エリアの側面に LED バー照明を配置し、粉末床上面からの観察を可能とした。実験条件として、リコータの厚さは PBF-LB/M プロセスで汎用的に用いられる積層厚を参考に 1 層 50 μm とし²²⁾、粉末供給量は 1 層 100 μm とした。リコータの走査速度は 50 ~ 300 mm/s で実施した。乾燥空気を導入し、25 °C、3 %RH 以下の環境下に統一し、リコータによる走査テストを実施した。各試験では 100 μm のプレリコートの後、試験を実施した。試験後の粉末床に対して、光学的な撮像画像による観察と後述する粉末床の微視的評価を実施した。

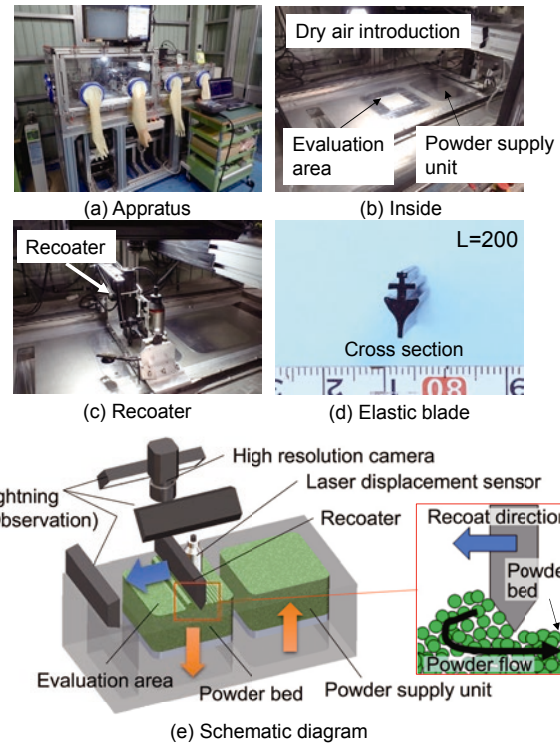


Fig. 8. Schematic of powder recoat machine. *

3. 2 レーザ変位計による微視的粉末床品質評価

本研究では供試粉末の d₅₀ が 30 μm 程度であることを考慮し、粉末床の様相を正確に測定するため、レーザスポット径 2 μm の非接触式レーザ変位計 (KEYENCE 社 CL-100N) を用いて、粉末床表面のプロファイルを 1 μm 間隔で測定した。Fig. 9 に示すように走査後の粉末床に対して、レーザ変位計を用いて測定された粉末床表面のプロファイルから、JIS B 0601 に示す算術平均粗さ Ra にて粉末床の粗さ評価を行った。粉末床表面プロファイルから、平均線方向の基準長さ分だけを抜き取り、粉末床面に対して垂直方向に z 軸をとり、粗さ曲線 z = f(x) としたときに、(2) 式にて粉末床表面の算術平均粗さ Ra (以下、粉末床粗さと表記) を算出した。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (2)$$

ここで x は検出位置、検出位置 x での平均線 \underline{m} からの偏差の絶対値、基準長さ L を 40 mm とし、カットオフ λ_c = 8 mm とした。

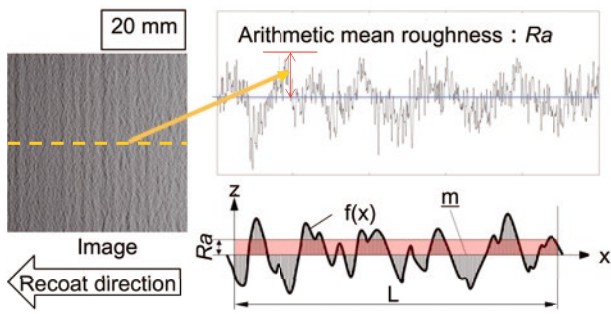


Fig. 9. Evaluation for powder bed roughness. *

4. 実験結果および考察

Fig. 10 は粉末 A および粉末 D を用いて走査速度 100 mm/s および 300 mm/s で得られた粉末床の光学観察画像の一例である。Fig. 10 から分かるように、いずれの粉末でも走査速度 100 mm/s に比べ走査速度 300 mm/s は荒れた様相の粉末床となった。また走査速度 100 mm/s では粉末 A および粉末 D で外観上大差が無いものの、走査速度 300 mm/s では粉末 A に比べ粉末 D のほうが粉末床は荒れた様相を呈していることが分かる。またいずれの観察画像で、発生間隔は異なるものの、走査方向に対して垂直方向での周期的な突起模様が生じている。これはリコート時にリコートブレード直下で圧縮荷重が粉末床に加わるため、ブレード通過後にその反発で突起を形成し、走査速度による影響を受け、突起模様の発生間隔に差異が生じたと考えられる。

Fig. 11 は各粉末での粉末床粗さに及ぼす走査速度の影響を調べた結果である。Fig. 11 から分かるようにいずれの粉末でも、粉末床粗さは走査速度を増加させることでほぼ線形的に増加する傾向を示した。これは Fig. 10 の光学観察画像で見られた走査速度増加による粉末床の荒れた様相と一致している。粉末床粗さは走査速度増加に伴い増加することが知られており¹⁶⁾、また DEM 解析により、走査速度増加に伴いリコートブレード前方に形成されるせん断領域の中心が低い位置に移動することで、ブレード直下での粉末質量流量が低下するとされている²³⁾。したがって走査速度増加により、粉末床に対する粉末供給量が低下し、充填性が低下することで粉末床粗さが増加したと考えられる。

Fig. 12 は走査速度 100 mm/s および 300 mm/s で走査した際の粉末床粗さに対する内部摩擦角を調査した結果である。Fig. 12 から分かるように粉末床粗さは、いずれの走査速度でも内部摩擦角が大きくなるにつれ増加している。特にガス噴霧粉ではいずれも内部摩擦角と粉末

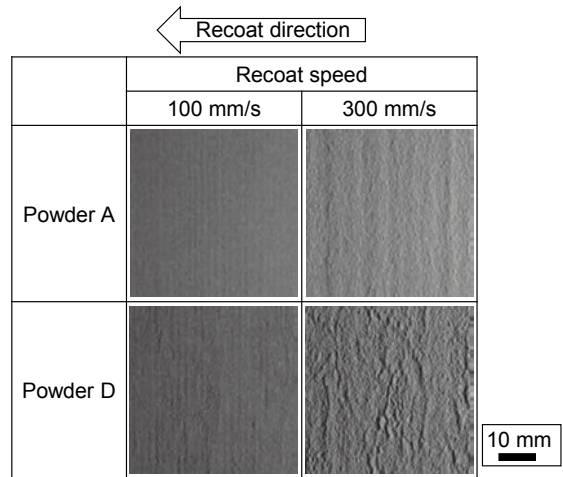


Fig. 10. Optical images of powder bed. *

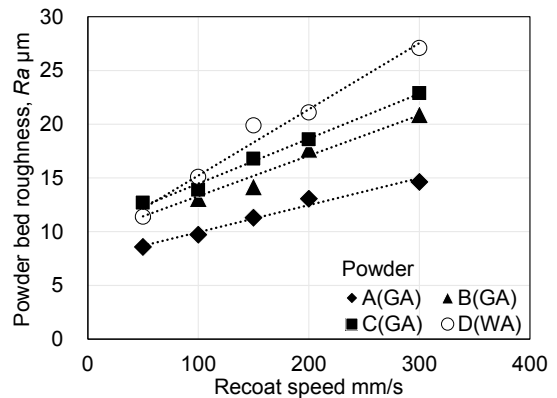


Fig. 11. Effect of recoat speed on powder bed roughness. *

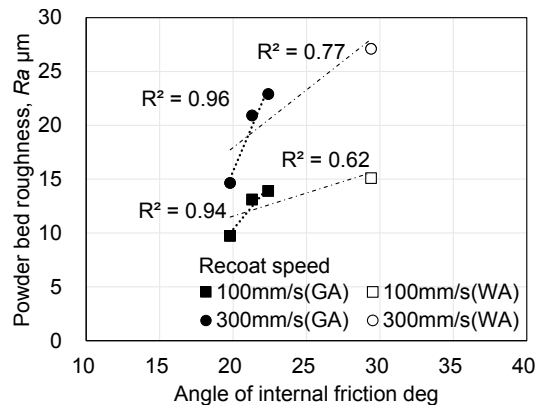


Fig. 12. Effect of angle of internal friction on powder bed roughness. *

床粗さの相関係数はいずれも 0.9 以上と非常に高い正の相関を示した。また水噴霧粉を含めた場合でも、内部摩擦角と粉末床粗さの相関係数は、走査速度 100 mm/s では 0.62、走査速度 300 mm/s では 0.77 と、走査速度増加に伴い高い正の相関を示した。これは内部摩擦角の増加により、リコートブレード前方での粉体層のせん断抵抗増加およびブレード直下での圧縮応力増加により、ブ

レード直下での粉末流動が妨げられ、十分な粉末床形成に必要な粉末供給量が不足し、粗な粉末床を形成しやすくなると考えられる。

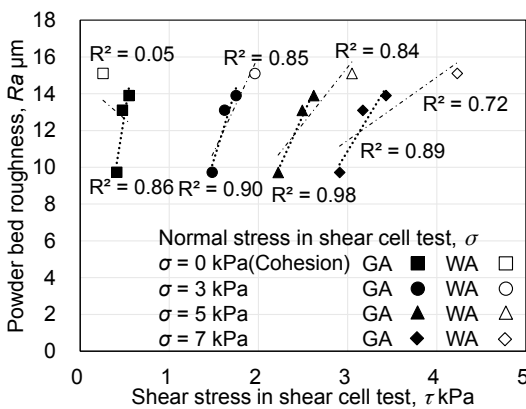
Fig. 13 はせん断試験法の各垂直応力でのせん断応力と粉末床粗さを走査速度 100 mm/s および 300 mm/s で調査した結果である。Fig. 13 (a) および (b) から分かるように、ガス噴霧粉ではいずれの走査速度でも粉末床粗さとせん断付着力は相関係数が高く、0.8 以上の高い正の相関を示したが、水噴霧粉を含めると相関関係は見られなくなった。垂直応力を負荷した際のせん断応力と粉末床粗さは、噴霧法を問わずいずれの走査速度でも相関係数が 0.7 以上の正の相関を示し、特に垂直応力 3 kPa および 5 kPa のせん断応力はいずれも噴霧法を問わず相関係数が 0.8 以上と非常に高い正の相関を示した。これはリコートプロセスでの粉体流動挙動ではリコートブレード前方の堆積粒子群でのせん断領域の形成²³⁾、ブレード直下の粉体層では圧縮が生じる²⁴⁾ ことが DEM 解析で知られており、本研究でも同様の傾向と見られ、ブレード直下での圧縮応力発生により質量流量が制限され、粉末床粗さに影響を及ぼすものと考えられる。ゆえに垂直応力を負荷した際のせん断応力と粉末床粗さに相関関係が

見られたと考えられる。ただし、リコート時の圧縮応力に関しては、リコートブレードの形状および材質に依存するため、装置に適したせん断応力を調査することが望ましいと考えられる。

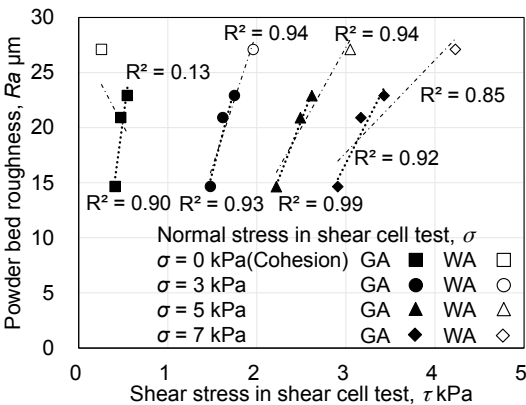
次に走査速度変化に対する粉末床粗さの安定性を評価するため、Fig. 11 で示した各粉末の走査速度と粉末床粗さの関係に対して、最小二乗法による回帰直線を求め、(3) 式に示す回帰直線の傾き(回帰係数)を走査速度の変化による粉末床粗さの変化率 Ra_R として定義した。

$$Ra_R = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(Ra_i - \bar{Ra})}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (3)$$

ここで v は走査速度、 n はデータ数、 i は i 番目のデータである。Fig. 14 は粉末床粗さ変化率 Ra_R に対する内部摩擦角の影響を調査した結果である。Fig. 14 から分かるように、噴霧法問わず粉末床粗さ変化率は内部摩擦角が大きくなるにつれ、線形的に増加し、内部摩擦角と粉末床粗さ変化率は相関係数 0.9 以上と非常に高い正の相関を示した。内部摩擦角は粉体層に加圧した際のすべり性に対する感受性であり、走査速度増加による粉体層へのせん断応力および圧縮応力増加に対する粉末床品質の安定性を示す指標であることを示唆している。Fig. 15 は粉末床粗さ変化率 Ra_R に対する d_{50} 円形度の影響を調査した結果である。Fig. 15 から分かるように、噴霧法を問わず粉末床粗さ変化率と d_{50} 円形度は相関係数 0.89 と高い正の相関を示した。これはメディアン径 d_{50} よりも大きい粒径の領域に含まれる凝集結合粒子や異形状粒子などの形状が悪い粒子を低減させることが、PBF-LB/M プロセスでの安定した粉末床を形成するために必要であり、そのためには噴霧プロセスの製造条件改善による凝集結合粒子の低減や、プラズマ球状化プロセス等の二次加工による粒子形状改善プロセスが有効と考えられる。



(a) Recoat speed 100 mm/s



(b) Recoat speed 300 mm/s

Fig. 13. Effect of shear stress on powder bed roughness. *

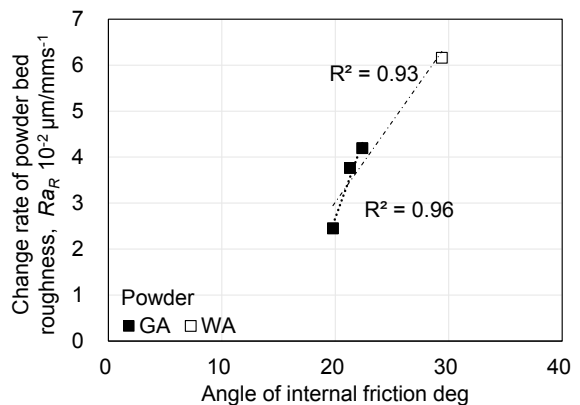


Fig. 14. Effect of angle of internal friction on change rate of powder bed roughness. *

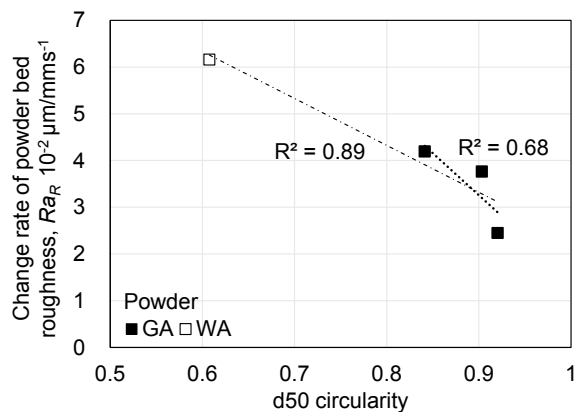


Fig. 15. Effect of d50 circularity on change rate of powder bed roughness. *

5. 結 言

本研究ではPBF-LB/M法での工具鋼粉末を用いた高品質金型造形の一環で良好な粉末床を形成するための定量知見を得る目的で、せん断特性の異なるSKD61粉末を用いて商用PBF-LB/M装置の粉末供給プロセスを模擬したりコート装置による粉末床品質の評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 粉末床粗さは、せん断試験法で計測された内部摩擦角と良好な相関性を示し、内部摩擦角が低いほど、粉末床粗さは低くなり、均一な粉末床を形成可能となる。
- (2) 粉末床粗さはせん断試験法による垂直応力を負荷した際のせん断応力と良好な相関性を示す。
- (3) 粉末の内部摩擦角が低いほど、粉末床粗さ変化率は低くなり、走査速度の変化に対する粉末床粗さは安定する。
- (4) 安定した粉末床品質を得るためには、メディアアン径d50以上の粗粉領域の円形度(d50円形度)の向上が重要である。そのためには噴霧プロセスの製造条件改善による凝集結合粒子の低減や、粉末二次加工による形状改善プロセスが有効である。

(文 献)

- 1) L. Yang, K. Hsu, B. Baughman, D. Godfrey, F. Medina, M. Menon and S. Wiener: *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*, Springer, 2017.
- 2) H. A. Abdel-Aal.: *Additive Manufacturing of Metals: Fundamentals and Testing of 3D and 4D Printing*, McGraw Hill, 2021.

- 3) J. Li, C. Duan, M. Zhao and X. Luo: *IOP Conf. Series: Earth Environmental Science*, 252(2019), 022306.
- 4) J. Piekło and A. Garbacz-Klempka.: *Materials*, 13(2020), 23, 5533.
- 5) M. Mazur, P. Brincat, M. Leary and M. Brandt: *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 93(2017), 881.
- 6) M. Narvan, K. S. Al-Rubaie and M. Elbestawi: *Materials*, 12(2019), 24, 2284.
- 7) N. Haghdadi, M. Laleh, M. Moyle and S. Primig: *J. Mater. Sci.*, 56(2021), 64.
- 8) R. Dörfert, J. Zhang, B. Clausen, H. Freiße, J. Schumacher and F. Vollertsen: *Addit. Manuf.*, 27(2019), 217.
- 9) A. B. Spierings, M. Voegtlin, T. Bauer and K. Wegener: *Prog. Addit. Manuf.*, 1(2016), 9.
- 10) L. Cordova, M. Campos and T. Tinga: *JOM*, 71(2019), 1062.
- 11) H. Chen, Q. Wei, S. Wen, Z. Li and Y. Shi: *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 123(2017), 146.
- 12) L. Cordova, T. Bor, M. Smit, M. Campos and T. Tinga: *Addit. Manuf.*, 32(2020), 101082.
- 13) R. Freeman: *Powder Technol.*, 174(2007), 1-2, 25.
- 14) S. E. Brika, M. Letenneur, C. A. Dion and V. Brailovski: *Addit. Manuf.*, 31(2020), 100929.
- 15) E. J. R. Parteli and T. Pöschel: *Powder Technol.*, 288(2016), 96.
- 16) K. Yuasa, M. Tagami, M. Yonehara, T. Ikeshoji, K. Takeshita, H. Aoki and H. Kyogoku: *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 115(2021), 3919.
- 17) 奥村鉄平, 関本光一郎: *電気製鋼*, 89(2018), 1, 13.
- 18) S. Hoeges, A. Zwiren and C. Schade: *Met. Powder Rep.*, 72(2017), 2, 111.
- 19) 関本光一郎, 奥村鉄平, 中川知可夫: *電気製鋼*, 88(2017), 1, 11.
- 20) D. Beckers, N. Ellendt, U. Fritsching and V. Uhlenwinke: *Adv Powder Technol*, 31(2020), 1, 300.
- 21) 日本工業規格 一面せん断試験による限界状態線(CSL)及び壁面崩壊線(WXL)の測定方法, 日本規格協会, (2016).
- 22) Kamsky G.V., Kolomiests A.A. and Popov V.V.: *REVIEW OF THE MAIN PRODUCTS OF 3D-MACHINES FOR METALS, CHARACTERISTICS*

OF THE ACHINES, AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT, International Research Journal, 8 (50) (2016), 3, 48.

23) W. Nan and M. Ghadiri: Powder Technol., 342 (2019), 801.

24) Q. Wu, C. Qiao, J. Wang, D. Yao, Y. Wu, W. Fan, M. Li, and X. An: Addit. Manuf., 49 (2022), 102477.

※本論文は「精密工学会誌」88 卷 (2022)10 号, pp.795-800 に掲載された論文 "PBF-LB/M 用工具鋼粉末の粉末床品質に及ぼす粉末せん断特性の影響" の内容を加筆修正し, 転載したものである。



山田慎之介



山口 貢



古本達明