

技術資料



Technical Data

選択的レーザー溶融法の画像処理による 粉末床評価技術の開発

山田慎之介*, 高橋信幸*

Development of Evaluation Technique for Powder Bed Quality in SLM Process by Image Processing

Shinnosuke YAMADA and Nobuyuki TAKAHASHI

Synopsis

Recently, additive manufacturing (AM) has been attracting attention around the world because of its potential to manufacture complex structures without need for tooling. Selective laser melting (SLM) is one AM technique, which melts a thin layer of metal powder selectively using a high-power fiber laser from 3D-CAD models and manufactures the built parts by stacking melted layers. In the SLM process, the powder layer property is one of the key factors to determine the quality of built parts. It is well known that powder properties (e.g. powder size distribution, particle shape, flowability, density, and so on) influence the powder layer property. However, little quantitative information concerning the relationship between powder layer property and powder properties has been publicized. In this paper, we attempt to quantify the powder bed (PB) defects as an evaluation parameter with respect to powder layer property using image processing. Furthermore, we have investigated the effect of PB defects on powder flowability and the effect of built parts quality on PB defects. As a result, the following points were clarified:

- (1)The PB defects rate shows increase with increasing avalanche angle α of that powder.
- (2)The defects rate in the individual built part shows an increase with decreasing relative density in the built part.

1. はじめに

近年の、3Dプリンティングをはじめとする付加製造技術（AM：Additive Manufacturing、以下、AMという）の一つである金属3次元積層造形技術は、3D-CADデータから直接製品を製造可能といった特徴を有する。AM技術は切削、研削、切断などに代表される除去加工や、鋳造、鍛造、プレス、塑性加工などに代表される成形加工といった従来の機械加工プロセスでは不可能であった複雑形状を製造可能であることから、第3の加工法として国内外の製造業で注目されている。

金属AM技術としては、広義では粉末床溶融結合法

（PBF：Powder Bed Fusion、以下、PBFという）と指向性エネルギー堆積法（DED：Directed Energy Deposition）に分類され、PBF方式としては、電子ビーム溶融法（EBM：Electron Beam Melting、以下、EBMという）や選択的レーザー溶融法（SLM：Selective Laser Melting、以下、SLMという）がある。SLMは積層厚さ数十 μm 単位の粉末床に対して、微細レーザーを用いて、選択的に溶融焼結させ、その焼結層を積層させることで造形する方法である。

SLMはEBMなど他のAM技術と比較して精密部品を造形可能であり、適用先としては、従来に比べ軽量かつ複雑構造化が可能となったジェットエンジン用燃料噴

2017年5月24日 受付

* 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

射ノズルなどの航空宇宙部品やインプラント（人工関節、人工骨）や歯科補綴物など、個々の患者に合わせたカスタムメイド医療部品、3次元冷却配管を配置した高機能冷却金型部品など、さまざまな分野での適用が期待されている^{1)~4)}。

SLMにおいて、造形品質を決定する重要なファクターの一つとして、原料に用いられる金属粉末の粉体特性が挙げられる。粉体特性としては、粒度分布や粉末密度、粉末形状、流動性などに加え、レーザー吸収率、反射率といった光学特性、粉末の化学成分、他には熱伝導率といった熱物性などがある^{5), 6)}。この粉体特性が粉末床の状態に影響を与え、更にレーザー出力、レーザースポット径、走査速度、走査パターンといった光学条件や造形雰囲気、造形物形状、大きさ、配置、サポート有無などのプロセス要素により最終的な造形品質が決まる⁷⁾。

本研究では、粉体特性における流動性が粉末床状態におよぼす影響について着目した。粉体特性および粉末床に関連する報告として、Hengfengらは粒度分布、粒子形状および流動性が異なる3社のTi6Al4V粉末を用いて粉末床密度を測定している⁸⁾。しかしながら、いずれも製品粉末同士の比較であり、大きな差異は無く、粉末の流動性が粉末床品質におよぼす影響の解明には至っていない。加えて、粉末床密度は、粉末床の品質評価において重要なパラメータであるものの、あくまで粉末床全体の状態を反映したものであり、造形プロセスの解析やトレーサビリティの観点から、積層各層における個々の粉末床の状態に関して、その変化を定量的に把握する必要があると考えられる。

そこで本研究では、粉末床状態の新たな評価手法として、積層各層における粉末床の撮像画像に対して画像処理による定量評価技術の開発を行った。さらに、その有効性を検証するべく、流動性の異なる金属粉末を用いて造形テストを行い、粉末流動性と粉末床状態の関連性に関して調査を行った。

2. 画像処理による粉末床評価技術の検討

2.1 SLM装置

SLM装置としてはFig. 1に示すSLM280HL（独SLM Solutions社）を用いた。SLMプロセスは3D-CADデータをもとに作成された数十 μm 単位のスライスデータを用いて、Fig. 2に示すようにレーザーを選択的に照射し、焼結層を重ねることで造形する技術である。

SLM280HLの粉末供給方式としては、粉末タンクか

らリコータに粉末を定量供給し、リコータからベースプレート上に形成された粉末床に粉末を供給しながらゴムブレードでならし、粉末床を形成する。この1層分の粉末供給操作はスキージングと呼ばれ⁹⁾、タンクより供給された粉末をリコータに貯めることで、往復でのスキージングを可能としており、他メーカーの機種に比べ、造形速度が速いという利点がある。またSLM280HLでは、造形チャンバー内部上部に設置されているカメラで粉末床の状態を撮像し、Fig. 3に示すように異常と判断したときにはリコータ保護のためにスキージングを停止させるLayer control systemと呼ばれる機能を有している。本研究ではそのカメラで撮像された画像を用いて、粉末床状態の定量評価を検討した。



Fig. 1. SLM equipment SLM280HL.

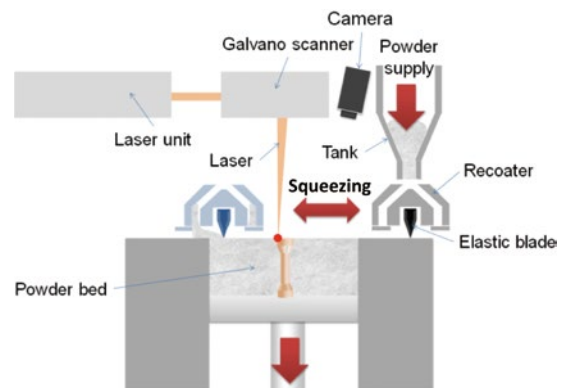


Fig. 2. Schematic diagram of build process in SLM280HL.

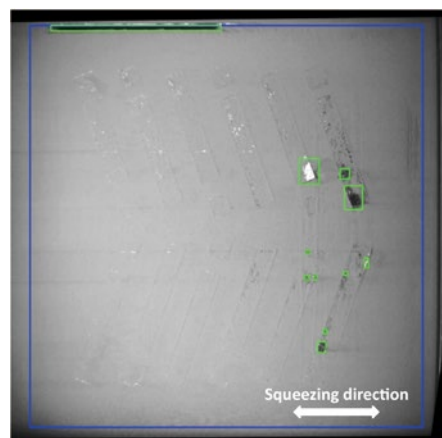


Fig. 3. Abnormal detection by Layer control system.

2. 2 画像処理による粉末床評価方法

スキージング時に見られる粉末床画像の代表例を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) は粉末が良好に供給された状態、Fig. 4(b) は粉末床がえぐられ凹んでいる状態、Fig. 4(c) は造形物の下層の金属面が露出した状態である。なお Fig. 5 に Fig. 4 で見られた粉末床の欠陥における模式図を示す。Fig. 4(c) に示すような造形物の下層の金属面が露出した状態は、Fig. 4(b) に示すような粉末床がえぐられ凹んでいる状態と同様に、粉末床がえぐられることで、直下に造形層がある場合に結果的に金属面が露出すると考えられる。

Fig. 4 に示すような粉末床画像に対して、画像処理による定量評価を試みた。画像処理には画像解析ソフトウェア ImageJ (アメリカ国立衛生研究所) を用いた。

装置の内部カメラで撮像された画像に対して Fig. 6 に示すように平滑化処理を行い、元画像から差し引くことで、欠陥部分を検出した。なお、粉末床のえぐれと金属面の露出に関しては輝度が異なるため、画像処理で明確に区別して検出可能であるが、先述のように本質的にはどちらも粉末床がえぐられて生じる異常と判断し、本研究では区別せずに欠陥として検出した。

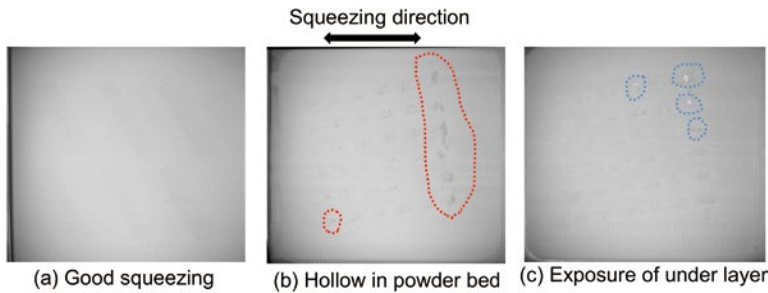


Fig. 4. Examples of powder bed images after squeezing.

3. 評価方法

3. 1 粉末評価

粉末流動性が粉末スキージング性におよぼす影響を評価するべく、流動性の異なる 4 種類の金属粉末を用いた。いずれもガスアトマイズ法により製作した粉末である。粉末の代表的な SEM 画像を Fig. 7 に示す。また粉末の諸特性を Table 1 に示す。なお、粒度分布および円形度は湿式粒子画像測定装置 (株セイシン企業: PITA-3) で測定し、粉末の嵩密度 ρ_B は粉体密度測定器 (株セイシン企業: KYT-4000) で測定し、粉末の真密度 ρ_P は自動湿式真密度測定器 (株セイシン企業: MAT-7000) で測定した。

流動性評価は Revolution Powder Analyzer (米 Mercury Scientific 社, 以下 RPA という) を用いて評価した。RPA の模式図を Fig. 8 に示す。RPA は SLM や EBM, また樹脂粉末による選択的レーザー焼結法 (SLS: Selective Laser Sintering) などの AM 用粉末の流動性評価に用いられる。評価パラメータである Avalanche angle α_p は回転式ドラム内での粉末の流動挙動を観察したもので、低速回転時に雪崩が生じるときの角度を α_p として測定し、通常、粉末流動性が良いほど、 α_p は低くなる^{5), 10)}。RPA による粉末流動性測定結果を Fig. 9 に示す。

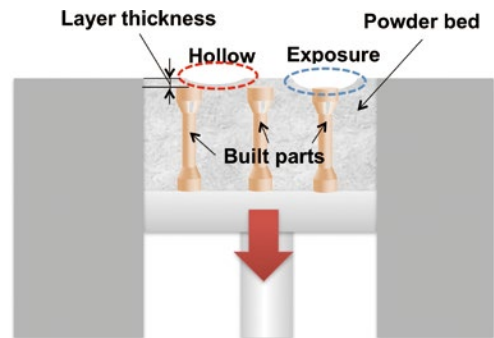


Fig. 5. Schematic diagram of powder bed defects.

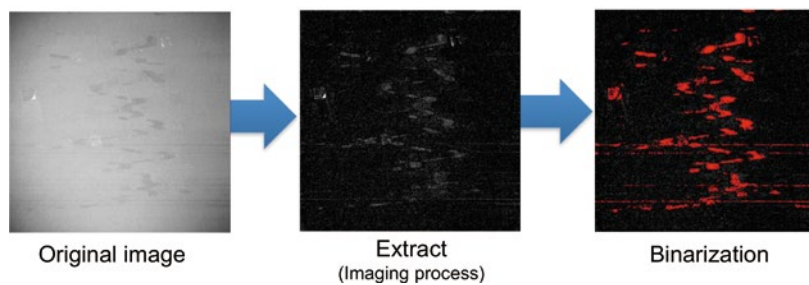


Fig. 6. Detection of powder bed defects by image processing.

Fig. 9より粉末 Aが最も流動性が良く、粉末 Dが最も悪い。また Table 1より、粉末 Aは粒度分布におけるメディアン径 D50付近の円形度が高い一方、粉末 Dが低く、流動性は粉末形状に起因していると考えられる。

3. 2 造形評価

造形テストは Fig. 9 に示す形状（幅 12 mm，奥行 12 mm，高さ 16 mm）で造形を行い，ベースプレート上（幅 280 mm，奥行 280 mm，高さ 20 mm）に高さ 4 mm の歯形形状のサポート材を造形した後，パーツ本体の造形を行った。加えて，ベースプレート 1 枚上に，造形条件の異なる複数（36 個）の造形物を配置し，更にスキージング方向に対し 10° 回転させて配置した。

SLM プロセスにおいて，レーザーの出力 P，走査速度 v，重ね幅 d および積層厚さ t をパラメータとし，単位体積当たりの入力エネルギー密度 E は (1) 式で定義される¹¹⁾。

$$E = \frac{P}{v \cdot t \cdot d} \quad (1)$$

E は造形物の密度と相関性があり，E が低くなると，造形物の密度は低くなるといわれている⁷⁾。本研究では Table 2 に示す条件で E を変化させ，造形物の相対密度 ρ/ρ_p 93.0 % ~ 99.5 % を得た。なお相対密度 ρ/ρ_p は造形物に対し JIS Z2501 に準拠してアルキメデス法による密度測定を行い，造形物の密度 ρ を測定し，粉末の粒子密度 ρ_p で割ることで算出した。また断面を切断し，空隙の状態を光学顕微鏡にて観察した。

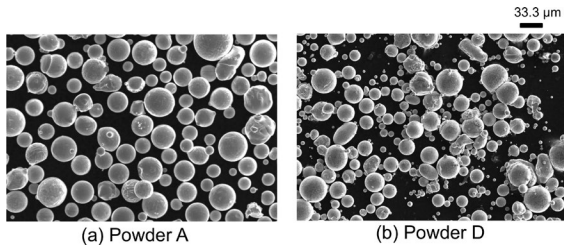


Fig. 7. SEM micrographs of powder.

Table 1. Powder property.

Powder		A	B	C	D
Particle size range		under 45 μm	under 45 μm	under 45 μm	under 45 μm
Particle size distribution (μm)	D10	14.28	13.74	16.09	17.44
	D50	28.29	31.59	33.47	34.31
	D90	46.41	47.41	51.24	52.85
Circularity (-)	D50	0.93	0.86	0.86	0.83
Density (g/cm ³)	Bulk density ρ_b	4.62	4.21	4.55	4.64
	Particle density ρ_p	7.67	7.78	7.76	7.98

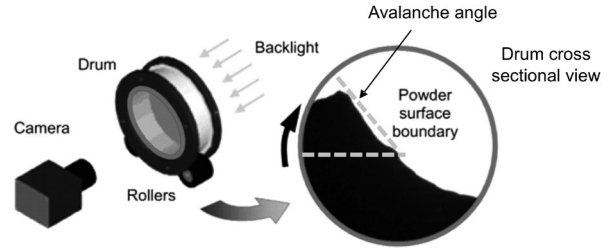


Fig. 8. Schematic diagram of RPA system¹⁰⁾.

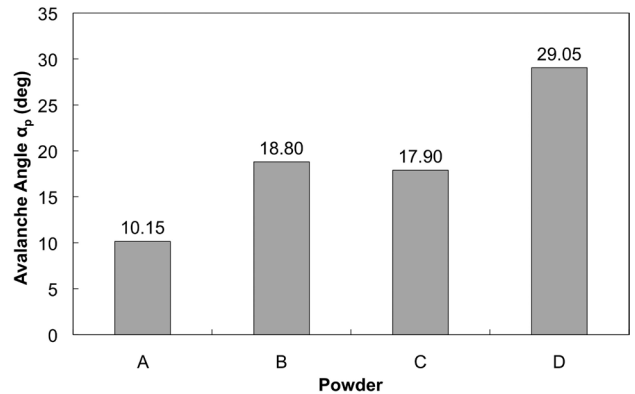


Fig. 9. Flowability of powder measured by RPA.

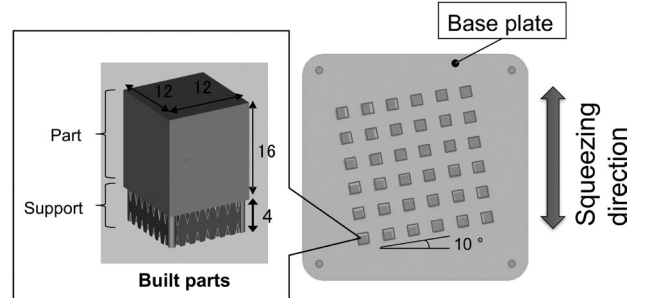


Fig. 10. The shape of built parts shape and placement.

Table 2. Build parameter and relative density of built parts.

Laser power, P (W)	150~255
Scan speed, v (mm/s)	400~1100
Hatching distance, t (mm)	0.09~0.15
Layer thickness, d (mm)	0.05
Energy density, E (J/mm ³)	30.9~83.3
Relative density, ρ/ρ_p (%)	93.0~99.5

3. 3 粉末床評価

積層各層における粉末床画像に対して，Fig. 6 に示す画像処理を行い，粉末床の状態を評価した。その結果を用いて，以下の観点から調査を行った。

(1) 粉末床品質におよぼす粉末流動性の影響調査

Fig. 11 に示すように，所定の測定エリア（幅 230 mm

×奥行 230 mm)における粉末床欠陥の割合を画像処理にて算出した。積層各層において同様の処理を行い、欠陥割合と粉末流動性の関連性を調査した。

(2) 造形品質におよぼす粉末床品質の影響調査

Fig. 12 に示すように、個々の造形物の形状を抽出し、その領域内での粉末床欠陥の割合を検出した。積層各層において画像処理を行い、造形物全体の欠陥割合を算出するとともに、造形物の相対密度 ρ/ρ_p との比較を実施した。また 3D 可視化を行い任意の断面形状を図示することで、実造形物の断面との比較を実施した。

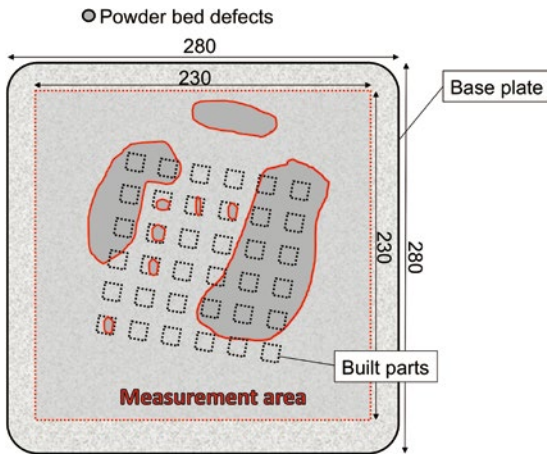


Fig.11. Schematic diagram of powder bed defects detection.

4. 結果および考察

4. 1 粉末床品質におよぼす粉末流動性の影響

積層各層における粉末床全体で検出した欠陥割合の推移を Fig. 13 に示す。なお、粉末 C に関しては Fig. 13(b) に示す粉末 B とほぼ同様の傾向が得られたため省略した。Fig. 13(a) (b) より、粉末 A および粉末 B ではサポートエリアの造形時に粉末床において欠陥が多く発生し、パー

ツエリアを造形時には低減されていく傾向がある。一般にサポートは造形中におけるパーツの変形防止のために付加され、後処理で除去しやすくするために歯形やメッシュ構造で作製される⁷⁾。本研究で用いたサポートは、歯形形状でかつ厚さ 150 μm 程度と非常に薄く、格子状に緻密に配列した設計であったため、サポートエリアのスキージング時にゴムブレードとサポートとの接触点が多く、粉末床の欠陥が増加した一方、パーツエリア造形時は面に対する造形となるため、接触点が減り、欠陥が低減されたと考えられる。また粉末 A のサポートエリアおよび粉末 B の全域において、欠陥割合が 2 層に分離してばらつく傾向が見られた。これは SLM280HL では往復でスキージングをしており、その行きと帰りで粉末床の品質が異なることを意味している。この要因として装置におけるアライメントのずれ（ベースプレートやゴムブレードの平行度や傾き）が考えられ、粉末流動性の低下によりそのばらつきは非常に大きくなる。Fig. 13(c) より、粉末 D に関しては、全域において粉末床欠陥が非常に大きく、ばらついており、積層高 5.5 mm（造形物部 1.5 mm）で Layer control system が起動し、造形が停止した。Fig. 14 に同一積層高さにおけるスキージング時の画像を示す。Fig. 14 より粉末 A と粉末 D で欠陥の割合が大きく異なるのは一目瞭然である。

パーツエリアにおける粉末床欠陥割合の平均値と流動性との関係を Fig. 15 に示す。なお粉末 D に関しては、途中で造形が停止したため、本来は値として扱うべきではないが欠陥割合が他の粉末に比べ非常に高く、流動性の影響を考える上で参考値として記載した。Fig. 15 より、 α_p と欠陥割合で相関が見られ、流動性が低下することで粉末床における欠陥が対数的に増加していく傾向があることが分かる。粉末の流動性試験としては、RPA の他にも安息角測定法 (ISO-4490) やホールフローメーターによる流動性測定法 (ASTM B213)、リング式せん断試験法 (ASTM D6773) などがあるが、いずれも静的環境下での試験であり、実際のスキージング時の粉末流動状態とは測定環境が異なる可能性が示唆されている。

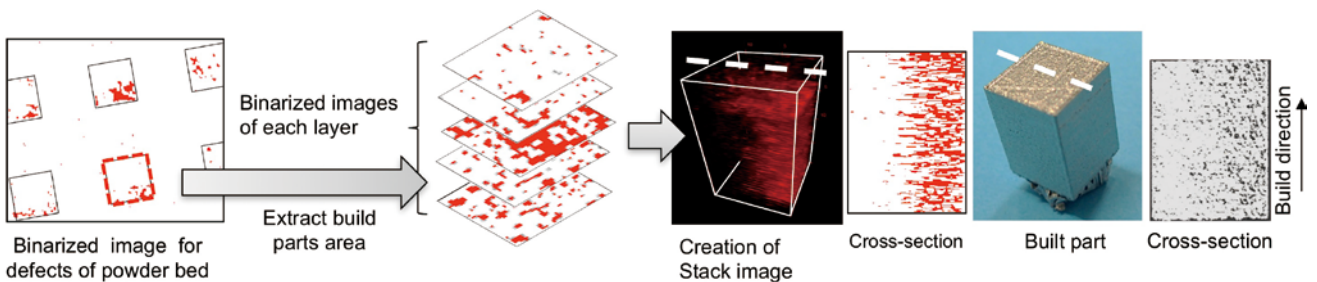
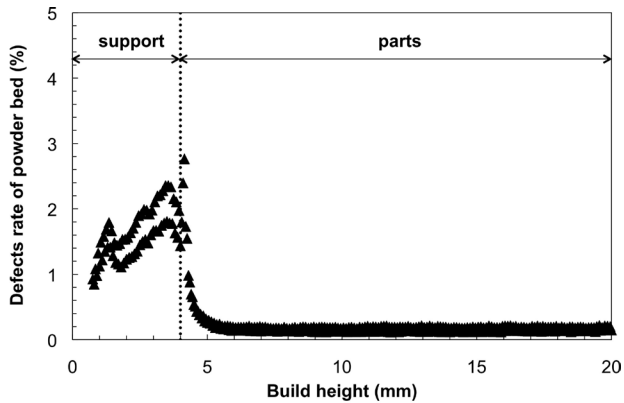
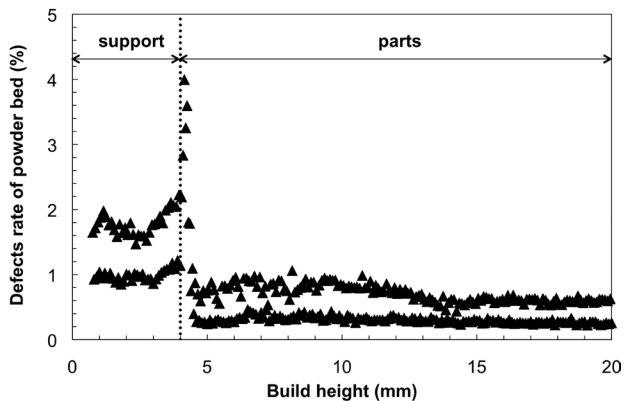


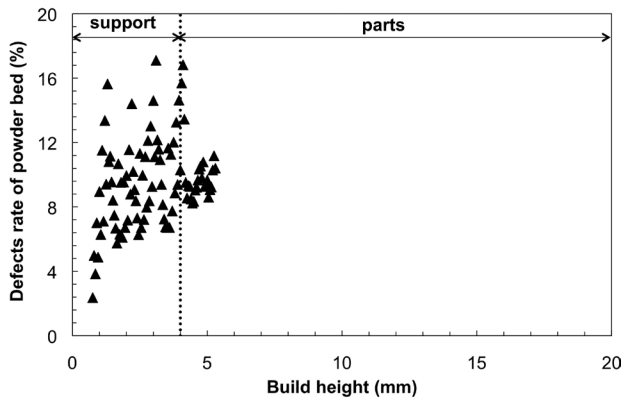
Fig. 12. Powder bed defects detection for individual built parts.



(a) Powder A



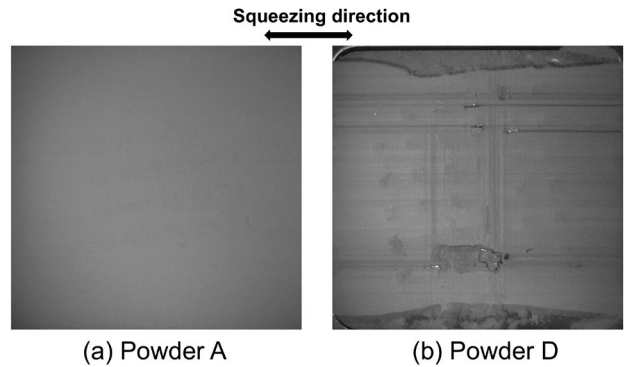
(b) Powder B



(c) Powder D

Fig. 13. Powder bed defects rate for each built layer.

一方 RPA は、動的状態での流動性を測定するため、スキージング時の粉末の動的流動状態に近い環境での測定が可能と考えられている^{5), 10)}。それゆえ、粉末床に発生した欠陥と粉末の流動性で一定の相関性が見られ、画像処理による粉末床評価は粉末床品質評価手法として有効な手法となり得ると考えられる。しかしながら、現時点で粉末 D が参考値であることを考慮すると、粉末床の状態におよぼす粉末流動性の影響を解明するためには、より一層のデータの充実が必要と考えられる。



(a) Powder A

(b) Powder D

Fig. 14. Images of powder bed (Build height 5.5mm).

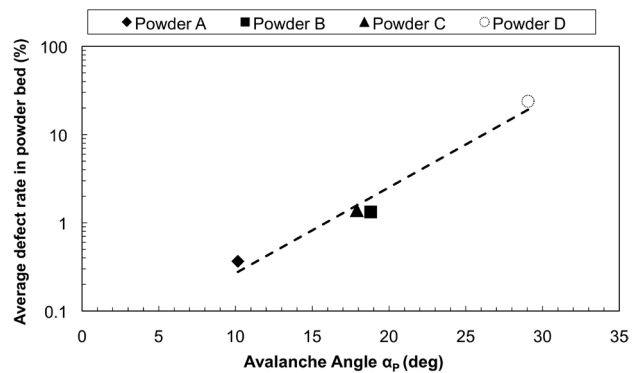


Fig. 15. Effect of powder flowability on powder bed defects rate.

4. 2 造形品質におよぼす粉末床品質の影響

粉末床欠陥が大きく発生していた粉末 B および粉末 C に関して、造形物における欠陥割合と造形密度の関係を調査した。その結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16 より、粉末 B および粉末 C では、欠陥割合が大きくなるほど造形密度が低くなっている。Fig. 17 に一例として粉末 B における 3D 積層画像による断面像と造形物の断面観察結果との比較を示す。Fig. 17 は Fig. 16 の傾向とよく一致しており、欠陥割合が低い造形物では実断面でも空隙が少ない一方、欠陥割合が大きい低造形密度の造形物においては比較的不規則形状かつ大きな空隙が多数発生していることが分かる。造形プロセスにおいて、低エネルギー密度では、融合不良による不規則な空隙欠陥が発生することが知られており⁷⁾、流動性の低い粉末では、粉末床欠陥の多さに象徴される充填性の悪さと低エネルギー密度による相互作用により、比較的の不規則形状かつ大きな空隙が生じやすく、低造形密度になったと考えられる。造形品質における粉末床品質とエネルギー密度の定量的な寄与度合に関して今後詳細に調査する必要があるが、粉末床欠陥を検出することで造形物の品質予測が可能となると考えられる。

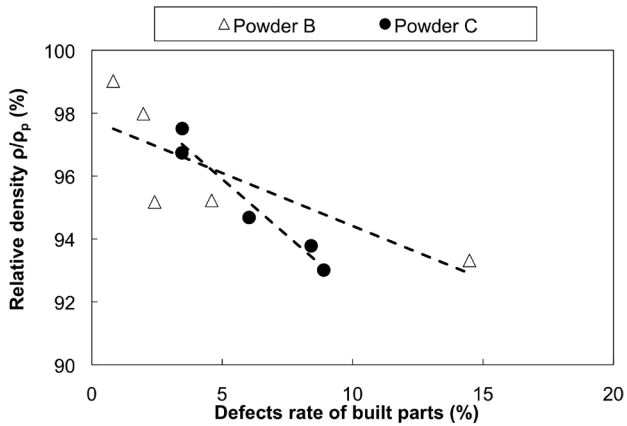


Fig. 16. Relationship between defects rate and relative density of individual built parts.

5. おわりに

本研究では、SLMプロセスにおけるスキージング時の粉末床の状態に関して、画像解析による定量評価技術の開発を行い、その有効性を検証するべく流動性の異なる粉末を用いて造形テストを行った。そして、(1)粉末流動性が粉末床品質におよぼす影響および(2)粉末床品質が造形物の品質におよぼす影響に関して、調査を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) Avalanche angle α_p と粉末床全体の欠陥割合は相関が見られ、 α_p が低いほど粉末床全体の欠陥割合は低減された。画像処理による粉末床評価技術は有効と考えられる。
- (2) 造形物領域において画像における欠陥割合が高いほど、造形物の空隙は増加する傾向が見られた。粉末床評価による造形品質の予測が可能と考えられる。

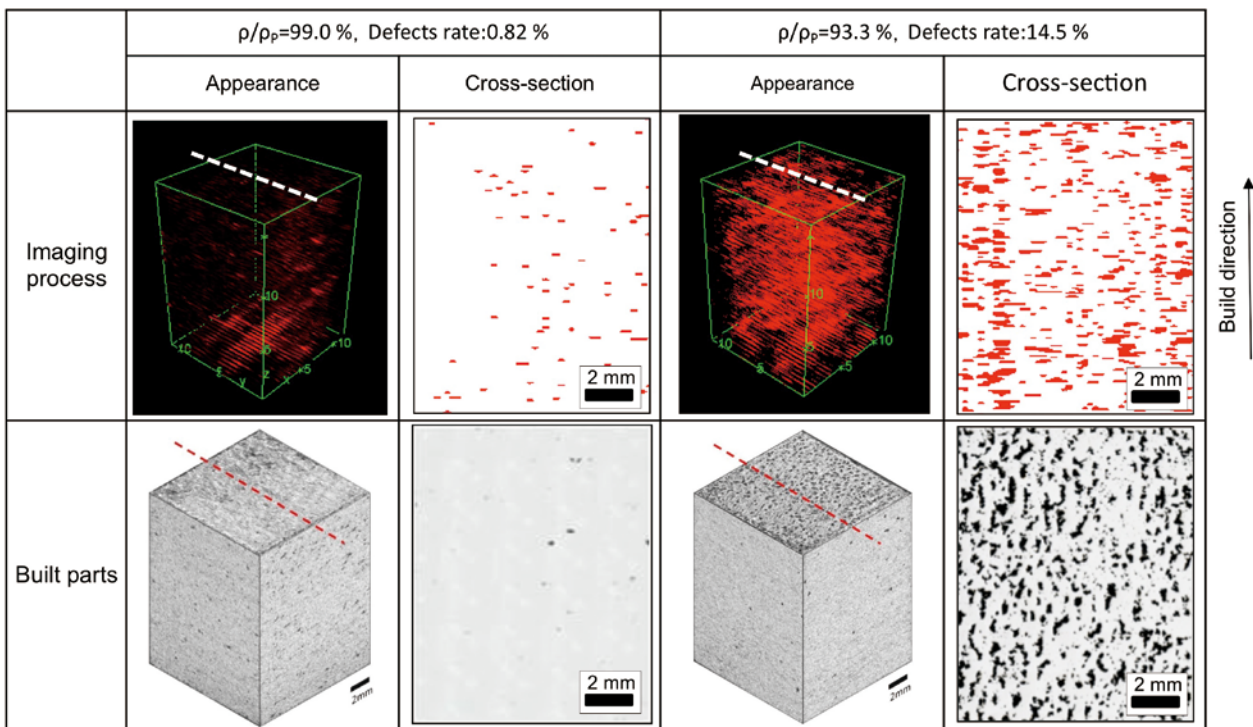


Fig. 17. Appearance and cross-section of both defects by imaging processing and built parts (Powder B).

(文 献)

- 1) 酒井仁史: 素形材, 54(2013), 2, 47.
- 2) 田村知子: 特殊鋼, 65(2016), 4, 33.
- 3) 酒井仁史: 特殊鋼, 65(2016), 4, 36.
- 4) 上本誠一, 阿部論: 型技術, 31(2016), 2, 54.
- 5) A. B. Spierings, M. Voegtlin, T. Bauer and K. Wegener: Progress in Additive Manufacturing, 1 (2016), 9.
- 6) 上田隆司: 粉碎, 58(2015), 11.
- 7) 技術研究組合次世代 3D積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM): ~設計者・技術者のための~金属積層造形技術入門, (株)ウィザップ, 2016.
- 8) Hengfeng Gu, Haijun Gong, J. J. S. Dilip, Deepankar Pal, Adam Hicks, Heater Doak and Brent Stucker: SFF Symposium 2014 proceeding, (2014), 470.
- 9) 天谷浩一, 前田敏男, 市村 誠, 矢野 宏: 品質工学, 19(2011), 6, 32.
- 10) A. Amado, M. Schmid, G. Levy and K. Wegener: SFF Symposium 2011 proceeding, (2011), 458.
- 11) A. Simchi: Materials Science and Engineering A, 428 (2006), 148.



山田慎之介



高橋 信幸