

チタ TITANIUM JAPAN

July 2026 Vol.74 No.3

目 次

〈紹介〉	
北九州市へチタン製モニュメントを寄贈	宮本由紀子, 古本 卓也 … 1
〈研究報告〉	
Ti 合金の粉末床溶融結合型金属 3D プリントにおける粉末レーキ過程の個別要素法解析	奥川 将行, 小泉雄一郎, 中野 貴由 … 4
プロセスインフォマティクスを援用した	
ニア β 型 $\alpha+\beta$ チタン合金の熱間鍛造特性と材質の理解	松本 洋明 … 9
集合組織を有する圧延 Ti-6Al-4V の切削力と切りくず生成	田村 昌一 … 14
〈解説〉	
Ti 合金レーザー粉末床溶融結合 (LPBF) 材のクリープ変形挙動	御手洗容子 … 19
チタン合金の α 相に関する最近の研究動向: 変態の抑制機構と等温 α 相の生成	田原 正樹, 野平 直希, 原島 亜弥, 細田 秀樹 … 25
電子ビーム粉末床溶融法で造形したチタンアルミ合金のクリープ特性に及ぼすエネルギー密度および HIP 処理の影響	寛 幸次, 後閑 一洋, 水田 和裕 … 32
〈報告〉	
2025年10月に開催された ISO/TC79/SC11 SG1, WG5 会議, 第27回 SC11 年会および第32回 TC79 年次総会の報告	山田 眞, 萩原 益夫, 名取 敦 … 39
〈学会だより〉	
2026年春季講演大会報告 (日本金属学会・日本鉄鋼協会)	田村圭太郎 … 47
〈協会行事報告〉	
加工技術 WG 活動報告 企業相互訪問記録	三浦 實 … 51
2025年度 賛助会員部会 西日本支部 新年交流会報告 ~総会・講演~	57
2025年度 賛助会員部会 西日本支部 新年交流会報告 ~パネルディスカッション~	59
2025年度 冬季賛助会員総会・研修会報告	64
〈展示会情報〉	
Sea Japan 2026 出展報告 一船舶・海洋部会活動報告一	武智 勉 … 66
2026年海上技術安全研究所一般公開への協力 一船舶・海洋部会活動報告一	爲成 純一 … 69
〈事務局からの案内〉	
2025年度事業報告および2026年度事業計画	72
2026年3月~2026年5月中の主なニュース	78
金属チタン統計	80
スポンジチタンの生産量と出荷量・展伸材の出荷量の2025年月別推移	82
委員会報告	83
チタンに関係する催物紹介	84
筒井政博氏 (元専務理事) の逝去を悼む	85
〈編集後記〉	小林 純也 … 88



Ti 合金の粉末床溶融結合型金属 3D プリントにおける 粉末レーキ過程の個別要素法解析

Discrete Element Method Simulations of Powder Raking Process in Powder Bed
Fusion Type Additive Manufacturing of Ti Alloys



奥川 将行^{*1}
OKUGAWA Masayuki^{*1}



小泉雄一郎^{*2}
KOIZUMI Yuichiro^{*2}



中野 貴由^{*3}
NAKANO Takayoshi^{*3}

In powder bed fusion additive manufacturing, it is essential to understand how the powder raking process influences the quality of the resulting powder bed to ensure the production of highly reliable components. Traditionally, powder raking conditions have been set empirically, but recent research has aimed to optimize these conditions through computer simulations. This report presents our study of the powder raking process utilizing discrete element method (DEM) simulations.

Key words: *additive manufacturing, powder bed fusion, powder raking, discrete element method, computational thermal-fluid dynamics*

1. 粉末床溶融結合型金属付加造形における粉末レーキプロセス

近年,付加製造 (Additive manufacturing, AM) によって軽金属材料を造形する研究が盛んに行われている^{1)~5)}。金属造形では特に粉末床溶融結合型 (Powder-bed fusion, PBF) 型の AM が普及している。PBF では, **Fig. 1** に示すように, 造形用材料の粉末を, ブレードなどのスプレッダーで均一に造形面上に分布させて粉末床を形成し, それに対してレーザービームや電子ビームを, 造形物の水平二次元断面を掃引するように走査させながら照射し, 緻密化させたい部分の粉末を溶融凝固させる⁵⁾。粉末床の形成, 造形物の各高さ位置の水平断

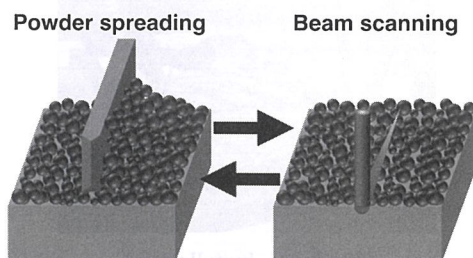


Fig. 1 Schematic illustrations of powder raking and heat source scanning in PBF-type AM process⁵⁾.

PBF 型 AM プロセスにおける粉末レーキおよび熱源走査の模式図⁵⁾。

面内にある粉末粒子の選択的溶融凝固, 造形プラットフォームの降下を, 数千~数万層にわたって下から順に行い, 造形層を積み重ねることで部材が製造される。PBF 型 AM では, 3 次元形状を制御できるだけでなく, 造形時のプロセスパラメーターを調節することによる材料組織の制御も可能である。このような利点があるにもかかわらず, 現状では PBF 型 AM 技術の適用は, 航空機部品, 医療デバイスなどの一部の製造, 自動車部品の

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻
大阪大学 3DPTec 統合センター
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
Department of Material and Manufacturing Science, and
3DPTec Integrated Center, Graduate School of Engineering,
Osaka University
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{*2} ^{*1}と同じ

^{*3} ^{*1}と同じ

一部の製造や試作のみに限られている⁵⁾。その理由の一つとして、特定の材料にて特定の部材を製造する場合にのみ、製造した部材の信頼性が保証されていないことが挙げられる。

PBF で作製される造形体の特性は、造形体に含まれる欠陥の有無ならびに欠陥の種類や分布、さらには、上述の材料組織によって決定される。これらは造形時の各種プロセスパラメータに大きく依存する。当然のことながら、このプロセスパラメータが適切でない場合、造形した部材中に欠陥が形成され特性は保証されない⁶⁾⁷⁾。PBF が適用されている部材製造においては試行錯誤による条件の最適化と造形部材の検査実績により特性が保証されている。しかしながら、AM の最大の特徴とされている自由形状のカスタム部材の多品種の少量生産を高い信頼性をもって実現するには、造形条件の最適化を試行錯誤によらずに行うことが求められる。プロセスパラメータのうち、照射ビームの出力、走査速度、走査経路など、粉末の熔融条件を決定するものについては、一度の造形実験にて複数の水準を試せることから、多くのデータが得られている⁸⁾。一方、粉末レーキによって形成した粉末床の充填率や重なりといった性状も、製造される部品の品質に大きく影響を与える¹¹⁾が、粉末床の性状の水準を変えることは容易ではない。粉末床の性状とビーム照射条件が適切な場合に初めて欠陥がなく十分な品質の部材が製造できる^{9)~11)}。したがって、PBF による部材製造における品質保証においては、粉末の特性や粉末床形成に関するプロセスパラメータが粉末床の性状に与える影響の理解も重要である。粉末床形成プロセスにはいくつかあるが、上述のようにブレードで粉末粒子を広げるレーキプロセスやローラーで粉末層上面を平滑に押し固めるスキージプロセスが一般的である。特に機構が簡易なレーキが用いられている例が多い^{12)~16)}。

レーキによる粉末床形成に関して、粉末床の形成過程における粉末床性状低下の原因を解明すれば、緻密で均一性の高い粉末床を安定的に形成するために必要な要件が明らかになると期待される。しかしながら、粉末床形成時の粒子挙動は、他の粉末粒子に隠れた箇所が生じている。そのため、計算機シミュレーションにより、各粉末粒子の運動や粉末粒子同士間の相互作用の解析が盛んに行われてきた。粉末の挙動の計算機シミュレーション手法として個別要素法 (Discrete Element Method : DEM) がある¹⁷⁾¹⁸⁾。DEM は、粒子間に働く粘弾性力、摩擦力、凝集力等を計算し、ニュートンの運動方程式を用いて各粒子の運動をシミュレートする手法である。DEM による PBF プロセスにおける粉末層形成過程の解析や最適化に適用する研究が報告されている¹⁹⁾²⁰⁾。PBF プロセスでの粉末レーキは、ブレードを用いる方法とローラーを使用する方法が主流となっている。これらのレーキ条件は経験的に決められてきたが、そのよう

な条件を計算機シミュレーションから最適化する取り組みが行われている。これまでにレーキ条件などのギャップとパウダーベッド性状の関係が検討されている。

本解説では、これまでに筆者らが取り組んできたブレード方式レーキでのプロセス条件と形成されるパウダーベッド性状の関係に関する研究例を紹介する²¹⁾²²⁾。実験と整合するように粒子間力を校正した DEM シミュレーションモデルを構築し、PBF プロセスにおける粉末レーキ挙動を調査した。また、より実際の PBF プロセスを想定したシミュレーションにも取り組み、DEM および数値熱流体力学 (CtFD) シミュレーションを繰り返した積層中の粉末レーキ挙動から熔融・凝固後の表面粗さが粉末の広がり挙動に及ぼす影響も調査した。

2. シミュレーション手法と粒子間力の校正²¹⁾

Fig. 2a に、Ti-6Al-4V 合金のガスアトマイズ粉末の走査型電子顕微鏡像を示す。ガスアトマイズ粉末には真球に近い形状の粒子が多く見られたが、大きな球形の粒子から一部分が飛び出るような形をしている粒子やサテライトを有した粒子も見られた。PBF プロセスに用いる粉末の粒径は数十マイクロメートルと小さいため、凝集力が粉末挙動に大きく影響する。

このような粒子挙動の DEM 法による再現性を担保するために、粉末落下実験との比較から粒子間力を校正した (Fig. 2b)。DEM シミュレーションには、Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS) ソフトウェア²³⁾を用いた。本研究では、粉末間の凝集力を Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 理論によって考慮した Hertz-Mindlin モデルを採用した。JKR 理論における法線方向の弾性力 F_n は、以下のように表される。

$$F_n = -4\sqrt{\pi\gamma E^* a^2} + \frac{4E^*}{3R^*} a^3 \quad (1)$$

ここで、 γ は表面エネルギー密度、 a は接触面の半径である。 E^* は有効ヤング率、 R^* は有効半径である。これらは次のように表される。

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \right)^{-1} \quad (2), \quad R^* = \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right)^{-1} \quad (3)$$

E , ν , R はそれぞれヤング率、ポアソン比、粒子半径である。本研究では粒子を真球と仮定してシミュレーションを行った。まず、実験で得られた安息角と合うように γ をフィッティングパラメータとして凝集力の推定を行った。結果として、 γ が 0.1 mJ/m^2 の場合に、粒子落下の実験での安息角を再現する結果を得られた。Meier らは²⁴⁾、粒子サイズ $14\text{--}72 \mu\text{m}$ の Ti-6Al-4V 合金粉末を用いた粉末落下実験および DEM シミュレーションを行い、 γ が $0.025\text{--}0.4 \text{ mJ m}^{-2}$ の範囲で実験の安息角を再現すると報告している。本研究で実験と安息角がよく合った γ はその範囲内にある。

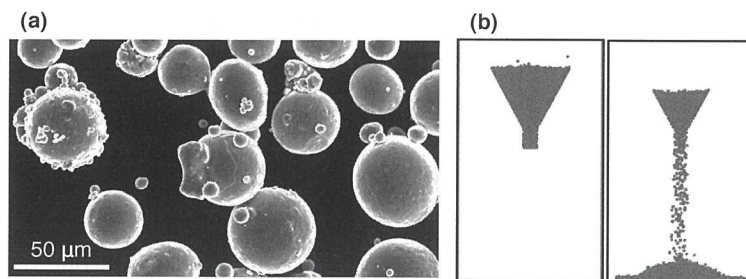


Fig. 2 (a) Scanning electron microscopy image of gas-atomized Ti-6Al-4V powder²¹⁾. (b) Snapshots of powder drop simulation.

(a) Ti-6Al-4V 合金のガスアトマイズ粉末の走査型電子顕微鏡像²¹⁾. (b) 粉末落下シミュレーションのスナップショット.

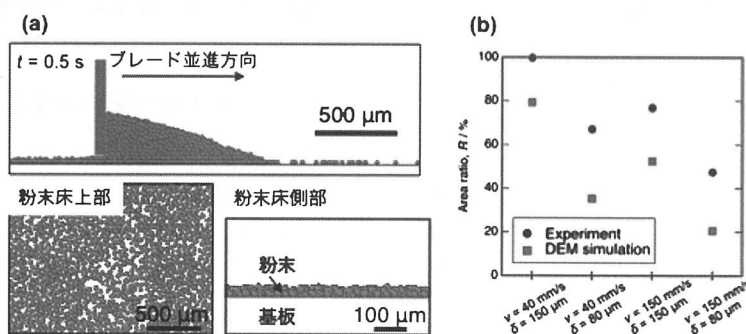


Fig. 3 (a) Snapshots of the powder raking simulation and the obtained powder bed model²¹⁾. (b) Area ratio of powder beds formed under various powder raking conditions of raking speeds v and gap height δ ²¹⁾.

(a) 粉末レーキシミュレーション過程および形成された粉末床モデルの可視化像²¹⁾. (b) ブレード並進速度 v およびギャップ高さ δ の異なる種々の粉末レーキ条件によって形成した粉末床の面積率²¹⁾.

3. 粉末レーキプロセスにおけるレーキ条件と形成される粉末床性状との関係²¹⁾

校正した粒子間力を用いて、レーキ過程のシミュレーションを行った。Fig. 3a に、粉末レーキシミュレーション過程および形成された粉末床モデルの可視化像を示す。粉末レーキ後には緻密に充填された粉末床が形成された。粉末レーキシミュレーションおよび実験を種々の粉末レーキ条件および異なる粒度分布でも行い、形成した粉末床の面積率を評価した結果を Fig. 3b に示す。粒子サイズが大きくなるとシミュレーションと実験のどちらでも面積率は低下した。また、レーキ条件の違うレーキプロセスでは、ブレード速度の大きい条件およびギャップ高さの大きい条件においてシミュレーションと実験の両方で形成される粉末床における粉末粒子の面積率は低下した。凝集力を校正したシミュレーションによって、粒度分布の違いおよびレーキ条件の異なるレーキ実験結果を定性的に再現することができたと考えられる。

しかしながら、形成された粉末床の面積率は DEM シミュレーションの方が実験よりもすべての条件で小さくなった。本研究では、粉末を完全な真球の粒子と仮定し DEM シミュレーションを行った。実際の粉末には、Fig. 2a に示したように、形のいびつな粒子や小さなサテライトが発生している粒子など、粒子の形が真球とは

遠いものが多く含まれている。加えて、シミュレーションでは壁面およびブレードの表面に存在する数 μm 単位の凹凸やその弾性変形は想定していない。これらの粒子形状の違いやブレードやプラットフォームの状態によって、シミュレーションと実験で形成された粉末床の違いが生じたと推察される。

定性的に粒子挙動を再現できる DEM モデルを用いて、粒子サイズ $10\ \mu\text{m}$ から $150\ \mu\text{m}$ の単分散粒子を使用した理想的な条件で、粒子サイズが粉末床性状へ与える影響を調べた。単分散粒子を用いたレーキシミュレーションにおいて、 $150\ \mu\text{m}$ という一定のギャップ高さに対して異なる粒子サイズの粉末をレーキさせると、粒子サイズ $90\ \mu\text{m}$ 以上の粉末では充填率が小さく、粒子の重ならない 1 層のみの粉末床が形成された。一方、粒子サイズが $80\ \mu\text{m}$ 以下の粉末では、粒子サイズが小さくなるほど充填率は大きく、また重なりが多い粉末床となった。 $80\ \mu\text{m}$ と $90\ \mu\text{m}$ の間にしきい値があることが推測される。そこで、粉末がブレードの下部を通過する際の粒子配列を調べたところ、レーキブレード近傍では粒子が正四面体配列および正三角形配列をしていることが示唆された。粒子がこれらの配列を成すときの高さ H は、粒子の直径を d として、正四面体では

$$H = \left(1 + \frac{\sqrt{6}}{3}\right)d \quad (4)$$

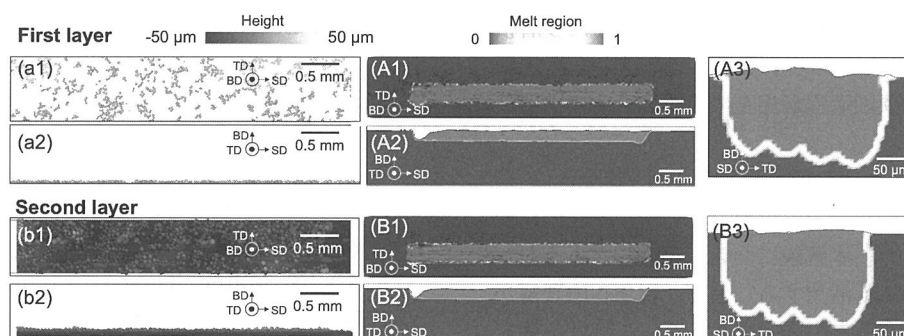


Fig. 4 (a1-b2) Powder beds formed by powder raking simulation and (A1-B4) melt region obtained by the four-track laser-beam scanning²²⁾.

(a1-b2) 粉末レーキシミュレーションで形成された粉末層および (A1-B4) 4トラックレーザービーム照射による溶融領域の可視化像²²⁾.

となり、正三角形型で

$$H = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)d \quad (5)$$

となる。ギャップ高さ $150\mu\text{m}$ のレーキブレードと造形プラットフォーム間を通り抜けるには、正四面体配列では $d=82.6\mu\text{m}$ 、正三角形配列で $d=80.4\mu\text{m}$ 以下である必要がある。粒子サイズがこの値より小さい場合には、レーキブレードと造形プラットフォームの間を2層分の粒子が通過できると推測される。したがって、本研究のレーキシミュレーションでは $80\mu\text{m}$ と $90\mu\text{m}$ の間で形成される粉末床の充填率に違いが見られたと考えられる。PBFにおけるレーキプロセスでは、ギャップ高さの $1/2$ よりも粒子サイズの小さな粉末を用いると、充填率の高い粉末床が形成することが経験的に知られている。本研究のDEMシミュレーションから、ギャップ高さが $1/2$ よりも大きい場合には正四面体配列または正三角形配列を成した2層分の粒子が通過可能であり、それが高密度な粉末床の形成に重要であることが示唆された。

4. 数値熱流体力学計算と連成させた積層プロセスシミュレーション²²⁾

実際のPBFプロセスでは、ビーム走査条件が表面粗さに影響を与えることが報告されており²⁵⁾、粉末レーキ挙動と溶融・凝固挙動は互いに影響し合っていると考えられる。しかしながら、溶融・凝固後の表面形状が粉末レーキ挙動に及ぼす影響は十分に明らかではない。PBFプロセスの最適化のための指針を得るには、粉末特性-粉末レーキ条件-レーザー走査条件の関係を明らかにする必要がある。本研究では、プロセス最適化の指針を特定するために、DEMと計算熱流体力学(CtFD)シミュレーションを連成させて、多層造形プロセスにおける粉末レーキ挙動を調査した。

DEM粉末レーキシミュレーションによって形成された粉末床に対して、4トラックのレーザービーム照射CtFDシミュレーションを行った。粉末レーキおよび

レーザー照射を繰り返して、多層造形プロセスにおける粉末レーキ挙動と溶融・凝固挙動の関係を調査した。第1層のDEM粉末レーキシミュレーションを行うと、Fig. 4a1およびFig. 4a2に示すように、粉末被覆面積率が低く不均一な粉末層が形成された。この粉末床へレーザー照射シミュレーションを行うと、粉末分布の不均一性を反映して溶融プールの形状・深さに顕著な位置依存性が生じた(Fig. 4A1-Fig. 4A3)。レーザー照射後モデル上に粉末レーキを行うと、Fig. 4b1およびFig. 4b2に示すように、第一層と比較してより密度の高い粉末層が形成された。一般的に、PBFプロセスでは、粉末床密度が100%よりも低くなるため、設定値とは異なるギャップ高さで粉末層が形成されていく。第一層のギャップ高さは設定値と同じであるが、第二層以降のギャップ高さは設定値よりも大きくなる。本研究では、第二層の粉末レーキ時の有効ギャップ高さは設定したギャップ高さの2倍程度であった。このような有効ギャップ高さの増加によって粉末層の被覆率が増加したと考えられる。このようにDEM-CtFD連成モデルを活用することで、有効ギャップ高さが積層数とともに非線形に増加し、粉末床密度および溶融・凝固挙動に累積的な影響を与える知見が得られた。積層過程も含めてシミュレーションを行うことで、粉末特性-粉末レーキ条件-ビーム照射条件を同時に最適化するための基盤ツールとして活用されることが期待される。

5. まとめ

本解説では、Ti合金のPBF型AMにおける粉末レーキプロセスのDEMシミュレーションに関する取り組みを紹介した。実験との比較により粒子間相互作用を校正したDEMシミュレーションによって粉末レーキ過程を調査することで、レーキブレード近傍では正四面体または正三角形の配列を粒子が形成しており、四面体または正三角形の配列をした粒子がギャップ高さを通り抜けるかどうかによって、形成される粉末床の性状が異なるこ

とが示唆された。また、CtFD 計算と連成させた多層積層プロセスシミュレーションによって、粉末レーキ過程と熱源照射溶融・凝固過程が相互に影響し合っていることが示された。

PBF プロセスにおける粉末レーキ過程の理解は、造形体の信頼性の担保において重要であるが、実験的に観察することが難しい。本解説において紹介したようなシミュレーション手法も活用することで、現象への理解が深まり、粉末特性-粉末レーキ条件-ビーム照射条件を同時に最適化するための基盤ツールとして活用されることが期待される。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(17H01329, 21H05018, 21H05193)、軽金属奨学会および JST-CREST ナノ力学 (JPMJCR2194) の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) T. Ishimoto, N. Morita, R. Ozasa, A. Matsugaki, O. Gokcekaya, S. Higashino, M. Tane, T. Mayama, K. Cho, H.Y. Yasuda, M. Okugawa, Y. Koizumi, M. Yoshiya, D. Egusa, T. Sasaki, E. Abe, H. Kimizuka, N. Ikeo, T. Nakano, *Acta Mater.* 286 (2025) 120709.
- 2) N. Takata, K. Minamihama, T. Miyawaki, Y. Cheng, M. Kato, *Nat. Commun.* 16 (2025) 11105.
- 3) P.V. Cobbinah, S. Matsunaga, Y. Toda, R. Ozasa, M. Okugawa, T. Ishimoto, Y. Liu, Y. Koizumi, P. Wang, T. Nakano, Y. Yamabe-Mitarai, *Smart Mater. Manuf.* 2 (2024) 100050.
- 4) M. Okugawa, Y. Ohigashi, Y. Furishiro, Y. Koizumi, T. Nakano, *J. Alloys Compd.* 919 (2022) 165812.
- 5) Y. Koizumi, T. Nakano, Y. Adachi, K. Morishita, K. Sato, Y. Toda, T. Ishimoto, T. Kimura, E. Jgle, A.C. To (Eds.), *Creation of Materials by Super-Thermal Field in Additive Manufacturing: Science of Neo-3D Printing*, Springer Singapore, Singapore, 2026.
- 6) S. Das, *Adv. Eng. Mater.* 5 (2003) 701-711.
- 7) J.-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, T.H.C. Childs: *CIRP Ann.* 56 (2007) 730-759.
- 8) O. Gokcekaya, T. Ishimoto, S. Hibino, J. Yasutomi, T. Narushima, T. Nakano: *Acta Mater.* 212 (2021) 116876.
- 9) F.-J. Gürtler, M. Karg, M. Dobler, S. Köhl, I. Tzivilsky, M. Schmidt, 25th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. An Addit. Manuf. Conf. SFF 2014, 2014: pp. 1099-1117.
- 10) Y.S. Lee, W. Zhang, 26th Solid Free. Fabr. Symp., 2015: pp. 1154-1165.
- 11) S. Ziegelmeier, P. Christou, F. Wöllecke, C. Tuck, R. Goodridge, R. Hague, E. Krampe, E. Wintermantel, *J. Mater. Process. Technol.* 215 (2015) 239-250.
- 12) Y. Zhao, Y. Koizumi, K. Aoyagi, K. Yamanaka, A. Chiba, *Mater. Today Proc.* 4 (2017) 11437-11440.
- 13) C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W.A. Wall, A.J. Hart, *J. Mater. Process. Technol.* 266 (2019) 484-501.
- 14) Z. Snow, R. Martukanitz, S. Joshi, *Addit. Manuf.* 28 (2019) 78-86.
- 15) W. Nan, M. Pasha, T. Bonakdar, A. Lopez, U. Zafar, S. Nadimi, M. Ghadiri, *Powder Technol.* 338 (2018) 253-262.
- 16) H. Chen, Q. Wei, S. Wen, Z. Li, Y. Shi, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 123 (2017) 146-159.
- 17) M. Markl, C. Körner, *Powder Technology* 330 (2018) 125-136.
- 18) C. O'Sullivan, *Particulate, Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective* (鈴木輝一 訳, 粒子個別要素法, 森北出版 2014年)
- 19) P.W. Cleary, M. L. Sawley, *Applied Mathematical Modelling* 26 (2002) 89-111.
- 20) Y. Zhao, Y. Koizumi, K. Aoyagi, K. Yamanaka, A. Chiba: *Materials Today, Proc.* 4 (2017) 11437-11440.
- 21) M. Okugawa, Y. Isono, Y. Koizumi, T. Nakano, *Raking Process for Powder Bed Fusion of Ti-6Al-4V Alloy Powder Analyzed by Discrete Element Method*, *Mater. Trans.* 64 (2023) MT-MLA2022010.
- 22) S. Mino, M. Okugawa, T. Nakano, Y. Koizumi, *Raking and Fusing Behaviors during Fabrication of Multiple-layers in Powder Bed Fusion: an Integrated Discrete Element and Computational Thermal Fluid Dynamics Study*, *J. Japan Soc. Powder Powder Metall.* 72 (2025) 16P-T6-11.
- 23) S. Plimpton, *J. Comp. Phys.* 117, 1 (1995).
- 24) C. Meier, R. Weissbach, J. Weinberg, W.A. Wall, A. John Hart: *Powder Technol.* 343 (2019) 855-866.
- 25) Y. Gui, K. Aoyagi, H. Bian, A. Chiba, *Detection, classification and prediction of internal defects from surface morphology data of metal parts fabricated by powder bed fusion type additive manufacturing using an electron beam*, *Addit. Manuf.* 54 (2022) 102736.