計算機シミュレーションを用いた Additive Manufacturing プロセス最適化予測

Optimization of Additive Manufacturing Process Utilizing Computer Simulation

小 泉 雄一郎*
Yuichiro KOIZUMI

Key Words: Additive Manufacturing, Solidification, Phase-Field Method, Shape Optimization, Computational Thermal-Fluid Dynamics

1. 緒 言

デジタルものづくりの中核に位置づけられる Additive Manufacturing (AM) 技術において計算機は不可欠である¹⁾。まず AM 技術は計算機援用設計 (Computer Aided Design: CAD) による部材の設計を出発点とする。その CAD データから直接、鋳型の作製を経ずに、最終形状の部材が得られる。AM 装置のステージ、ノズル、エネルギービーム等も計算機により制御される。このように AM プロセスは計算機と密接な関係をもつ。さらに AM プロセス中の種々の現象の計算機シミュレーションがプロセスの最適化に有用と期待されている。事実、AM プロセスの最適化のための計算機シミュレーションの研究が世界中で展開されている。AM プロセス中に発現する種々の現象の理解を目的とした基礎的なものから、造形精度を一定の範囲に納める応用的なものまで、様々な計算機シミュレーションがなされている²⁾。一方、現状では、試行錯誤的に実験を繰り返して最適な造形条件を経験的に決定しているのも事実である。AM プロセスの潜在能力を引き出し、革新的製造プロセスとして確立するために計算機シミュレーションに寄せられる期待は大きい。本稿では、そのような AM プロセス最適化のための計算機シミュレーションやその活用についての世界の動向を俯瞰するとともに、筆者らの取り組みについて紹介する。

2. AM に関する計算機シミュレーション

AM に関する計算機シミュレーションには種々のものがある。部材の設計自体のためのシミュレーション、造形空間中の複数の部材の配置を決定するためのシミュレーション、支持部材 (サポート) 設計のためのシミュレーション、熱応力による残留ひずみの解析シミュレーションをはじめとして、原材料となるワイヤーや粉末の供給プロセス、レーザービーム (LB) や電子ビーム (EB) によりそれらを溶融結合させる過程、溶融した材料が凝固する過程での結晶成長や相変態による組織形成のシミュレーションまで、様々な階層のシミュレーションがある。健全な造形物を得るため

に最適化すべきプロセスパラメータが多く、計算機シミュレーションの果たす役割は大きい。以下では、個々のシミュレーションについて、特に筆者が扱っている粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion : PBF) 方式の金属 AM プロセスを中心に概説する。

2.1 設計・レイアウト

AM 工程の原点となる CAD での部材設計は、計算機支援製造 (Computer Aided Manufacturing: CAM) を代表するマシニングセンター等での切削加工では勿論、鋳造、鍛造等においても一般的である。AM では製造できる形状の自由度が高く、切削加工や型成形では工具のアクセス、材料流動、成形後の離型等の制約により不可能な形状の部材の製造が可能である。そのため、1990 年代に発達したトポロジー最適化に象徴される有限要素法 (Finite Element Method: FEM) による応力解析シミュレーション等に基づく構造最適化による設計が AM の登場とともに改めて注目され、Altair 社 Hyper Works・OptiStruct³⁾、Quint 社の OptiShape⁴⁾ 等のソフトウェアが市販されており、CAD ソフトのモジュールとしても開発されている。従来、構造最適化により特性発現に最適な部材の設計ができて、従来技術では上記の制約で製造は不可能な場合が多かった。AM 技術によりほぼ任意形状の部材の製造が可能となったことで構造最適化計算の有用性が著しく増している⁵⁾⁻¹⁸⁾。Fig. 1 は筆者らのセル格子多孔体の構造最適化の例である⁵⁾。単位胞のモデル (Fig. 1 (a)) に一軸荷重下での応力分布を FEM により評価し、局所応力の最大値を減少させて強度を向上させると同時に構造全体のヤング率を 2/3 に減少 (Fig. 1 (b))、または 3/2 に上昇 (Fig. 1 (c)) させるべく構造最適化を行った。最適化後のセル格子多孔体を実際に、生体医療用 Co-Cr-Mo 合金の電子ビーム積層造形で造形したもの (Figs. 1 (d), (e), (f)) は、概ね設計通りの特性を示したものの、ばらつきが大きかった。その理由としては、最適化計算において材料特性が等方と仮定したことがある。実際には結晶配向が存在することで特性に異方性が存在し、造形中の結晶配向性制御

* 大阪大学大学院 工学研究科 マテリアル生産科学専攻 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

の必要性が明確となった。

さらに高機能な最適化ソフトの開発が、企業¹³⁾、大学^{14),15)}、等によって進められている。例えば、カスタムフィットのインプラントの設計ではX線CTやMRI等で得られた患者の骨の3次元形状データに基づきインプラントを設計するシミュレーション技術が開発されている。AMでは、同じ部材を製造する場合でも、造形時間や造形精度が造形物の配置や向きに依存する。特に、下方から支持する部分のない、いわゆるオーバーハングとなる部位では、造形物の下面での欠陥が形成され易い。そのためオーバーハング部分でのサポートと呼ばれる支持部材が同時に造形することで欠陥形成を抑制して造形後にサポートが切除されることが多い。そのようなサポートの設計を自動的に設計するようなシミュレーションも開発されている^{16),17)}。造形部材の形状や方向をなるべくサポートを必要としないように最適化するシミュレーションもなされている¹⁷⁾。

2.2 熱ひずみ解析・予測

次節に記すように熱応力の解析による残留応力を予測し、その影響を最小にすることを加味したレイアウトの最適化を行うシミュレーションの開発も進められている。特に金属AMでは、サポートが熱応力による部材の変形を抑制することも重要である。サポートには、熱拡散を促進して温度分布の均一性を高めて熱応力を抑制したり、熱応力による変形そのものを機械的に抑制したりする役割がある。造形中の部材の温度分布から各部位の熱膨張ひずみを計算して熱応力を予測し、実験的な試行錯誤を極力少なくしてサポートを最適設計するためのシミュレーションが行われている。FEMを中心とした各種シミュレーションソフトが、各社から提供されている¹⁸⁾⁻²³⁾。中でも大手企業のソフトよりも高速なシミュレーションの実行が可能なソフトウェアの開発販売やクラウドサービスを行っていた3DSIM社(米国ユタ州)が2017年に大手解析ソフトウェア会社ANSYSに買収されたことは、AM関連シミュレーション技

術開発競争の激しさを象徴している²²⁾。

2.3 粉末流動プロセス

金属AMプロセスの中で最も導入例の多いPBFプロセスでは、粉末の流動の理解・予測・制御も重要である。経験的には、真球度が高く、粒度分布の狭い粉末が均一な粉末層の形成に適しているとされているが、その理由についてはあまり理解されていない。それは、粉末床形成時の粉末の挙動が多くの他の粉末粒子に埋没した箇所で生じておりその観察が困難で、実験的に挙動を捉え難いことに起因している。そのような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²⁴⁾⁻²⁹⁾。DEMは、粒子間に働く粘弾性力、摩擦力等を計算し、ニュートンの運動方程式に従って各粒子の運動を数値解析する手法である。土砂の流動、粉末のボールミル、サイロ充填、混合²⁵⁾、サブマージアーク溶接におけるスラグ粒子の挙動²⁷⁾の解析等の種々の研究にも用いられている。これを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筆者らの例を含め報告されている^{26),29)}。Fig. 2は、PBF-EBでの粉末層形成過程を想定して、粉末粒子サイズと同程度の深さの凹みにレーキにより粉末粒子を充填する過程のシミュレーションのスナップショットである²⁹⁾。Fig. 3は、粉末の流動性を支配する摩擦力を仮想的に変えた場合の粉末層の充填度合いの変化を調べた例である。摩擦力が小さく流動性の大きい場合(Fig. 3(a))

Fig. 2 Snapshots for powder bed generation (after Zhao et al.²⁹⁾).

Fig. 1 (a, b, c) Unit cell models and (d, e, f) cellular lattice porous structures: (a, d) before optimization, and after optimization for changing Young's modulus to (b, e) $2/3 E_0$ and (c, f) $3/2 E_0$, respectively. The colors indicate the von Mises stress under compression to a strain of 2×10^{-5} in the z-direction (after Koizumi et al. 2016)⁵⁾.

Fig. 3 Powder layer patterns with different flowability represented by corresponding powder repose angle: (a) high flowability; (b) medium flowability; (c) low flowability; (d) high magnified image of layer pattern with high flowability (after Zhao et al.²⁹⁾).

には比較的均一に粉末粒子が分散して充填されるのに対し、摩擦力の増大とともに、粉末粒子の分布に粗密が顕著となり、粉末粒子の存在しない広い領域が形成されることが示されている (Fig. 3(b), (c))。これらは、実際、粒子が球状ではなかったり、サテライト粒子が付着した粉末では流動度が低く、粉末層の形成が困難なことに対応しており、粉末性状からの粉末床形成能の予想に DEM が有効であることを示している。

2.4 粉末熔融プロセス

PBF 方式の金属 AM プロセスにおいては、LB や EB により金属粉末が熔融し、形成された融液が流動して緻密化し、それが凝固するという過程が繰り返される。融液の不足や流動の不安定により、凝固後に空隙が残り欠陥となる。そのような欠陥の形成を予測・回避するための計算機シミュレーション (Fig. 4) が、いくつかのグループから報告されている。ドイツの Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) の Körner らのグループでは、格子ボルツマン法による熱流体力学計算 (Computational thermal Fluid Dynamics: CtFD) により緻密化の予測を行っている³⁰⁾⁻³⁵⁾。計算コスト低減のため局所的な熔融挙動、微小領域の粉末層一層については 3 次元シミュレーションを行い、多層の造形物の緻密化については造形体を 2 次元で表現し熱源のみ 3 次元とした近似モデルで行い、緻密化が得られる条件範囲を示すプロセスマップを作成している。一方、米国の Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) の Khairallah^{36),37)} らは、スーパーコンピュータを用いてレーザー PBF プロセス中の粉末の熔融挙動を、造形物中の欠陥の原因となる Balling、Denudation、Spatter 等の現象を再現するとともに、その発現機構を解析し、表面張力差による流動 (Marangoni 流)、蒸発反力 (recoil pressure) 等の影響が大きいことを示した。

2.5 凝固結晶成長プロセス

上記のような緻密化の予測のためのシミュレーションは、気孔等の欠陥の形成の予測とその回避のために有用である。しかしながら造形体の特性はマクロな欠陥だけでなくミクロな内部組織に強く依存し、組織が従来プロセスで得られるものと異なれば特性も異なる。十分な特性が得られなければその造形体は使用できない。逆に、従来プロセスよりも優れた特性を示す場合もあり、それを活かした材料の開発、特に特定の方向に優れた強度を示すことを活用した異方性材料の開発も活発である³⁸⁾⁻⁴⁵⁾。一般的な部材の強度設計においては、特に従来プロセスで等方的材料が得られる場合、材料が等方的な特性を示すことを前提に設計される。そのため、AM プロセスにおいても等方的な特性を発現する等軸組織を得るための条件の探索がなされている。その一方で、結晶配向を積極的に活用して単結晶状の組織を得ることで、弾性率が骨のそれに近い人工関節用インプラント⁴³⁾ や、耐クリープ特性に優れたタービンの翼⁴⁵⁾

Fig. 4 Example of computational thermal fluid dynamics (CtFD) simulation of melting powder particles in PBF-EB process.

Fig. 5 Typical solidification map for microstructure control based on the Hunt's columnar equiaxed transition (CET).

等の製造を目指した研究が行われている。

金属の PBF プロセスで得られる組織は凝固組織である。凝固組織は一般に、固液界面での温度勾配 (G) と固液界面移動速度 (R) の組み合わせにより決定されと考えられる。Hunt⁴⁶⁾ の柱状・等軸遷移理論 (Columnar-Equiaxed Transition: CET) に基づいた凝固マップ (Fig. 5) を構築し、それに基づき、組織を予測あるいは、所望の組織が得られる条件を導出することが提案されている⁴⁷⁾⁻⁵¹⁾。凝固マップの構築やそれに基づく造形条件最適化による組織制御を行う上で計算機シミュレーションは不可欠である。CET に基づく組織制御に計算機シミュレーションが必要な理由としては、凝固マップを構成する 2 つの軸、すなわち凝固組織の支配因子とされる固液界面での G と R の評価が実験的には困難であることがある。高速度の赤外線カメラや二色法等の遠隔での温度測定法により、熔融池の表面における温度分布を測定することは可能である。しかしながら、凝固組織を決定

する固液界面での温度分布の時間変化の測定は現時点では不可能である。そのため、測定可能な表面の温度分布の時間変化が実験と整合する計算機シミュレーションにより評価することが不可欠である。

固液界面での G と R の評価のためのシミュレーションに用いる計算手法としては FEM シミュレーションが最も一般的である⁴⁸⁾⁻⁵¹⁾。LB や EB からの入熱による昇温と熱拡散による冷却とを熱伝導方程式を解くことで、温度分布の時間変化を求めることができる。各時間における温度 $T = T_m$ (T_m : 融点) の等値面における温度の空間微分として G を求めることができる。一方、 R については、直接的には、 $T = T_m$ の等値面を追跡し、速度を求めることで可能である。実際には融点直上の温度から融点直下の温度での冷却速度 dT/dt [K/s] を評価し、 G [K/m] と R [m/s] と dT/dt [K/s] の関係

$$G \cdot R = dT/dt \quad (1)$$

から

$$R = dT/dt / G \quad (2)$$

と R を間接的に求められる。このような方法によって評価された G と R と得られる組織との関係を凝固マップとしてデータベース化しておけば、造形パラメータ ($P, V, \dots$) から計算機シミュレーションにより凝固条件 (G, R) を導出し、その凝固条件から凝固マップを参照して組織を予測するという手順で、造形条件から組織の予測が可能となる。

このような順問題解析データを多量に蓄積しておけば、(i) 所望の組織が得られる凝固条件を探索し、(ii) 次にそのような凝固条件が発現する造形条件を探索する、という手順で逆問題的に所望の材料組織が得られる造形条件を導出できる。さらに、材料組織と材料特性の関係のデータベースから (iii) 所望の材料特性を発現する材料組織の導出と併せることで、所望の材料特性を発現する部材を造形するためのプロセスパラメータが決定され、形状と材料特性を同時に制御する AM 技術が確立できると期待される。

筆者らは次のような手順で実験と計算機シミュレーションの組み合わせで凝固マップを作成する研究を進めている。

- (I) 造形用の LB や EB を種々の条件 (出力 P 、走査速度 V) でバルク金属に照射して溶融凝固を生じさせ、得られた組織を観察する。その一方で、
- (II) 同じビーム条件の溶融凝固過程の計算機シミュレーションを実行し、移動する固液界面に沿った G と R の分布を逐次評価することでビード内全体の凝固時の G と R の分布を評価する。そして、
- (III) 溶融ビード内の各位置での G と R の値の対に対応する点を G - R 平面上に印し、対応する位置で実験的に観察される組織によってそれらの点を分類して同じ組織が得られる領域を区分する。

さらに最近は、上述の FEM の代わりに CtFD により温度分布変化を解析することで、 G 、 R に加えてマランゴニ効

果に起因する流速が凝固組織に強く影響することが見出されている⁵²⁾。その影響の大きさを支配する表面張力や粘度およびそれらの温度依存性といった融体物性のデータ、造形用材料毎に測定することの必要性が高まっている。

2.6 組織形成プロセス

上記の手法では凝固組織のデータを実験観察により取得するが、それをセルオートマトン (Cellular Automaton: CA) 法やフェーズフィールド (Phase-Field: PF) 法等の組織形成の計算機シミュレーションにより行う研究も行われている⁵³⁾⁻⁵⁷⁾。AM プロセスを想定した結晶組織形成 PF 法によるシミュレーションは Gong ら⁵³⁾ によって行われた。Gong らは Ti-6Al-4V 合金に EB を照射した際の温度分布変化を FEM により求め、その温度分布変化の下でのデンドライト成長を想定したシミュレーションを行った⁵³⁾。造形条件の違いによる温度分布変化の違いの凝固組織への影響を示したが、調査した凝固条件は比較的凝固速度の小さい条件であった。また Ti-6Al-4V 合金の凝固は液相からの β 相の成長でありその後に α 相の析出が続くため、凝固挙動が組織や

Fig. 6 Simulated molten pools: (a, c) Case with Marangoni effect, (b, d) Case without Marangoni convection. (a, b) Bird's eye view, (c, d) longitudinal and vertical cross-section. (after Zhao et al.⁵²⁾).

Fig. 7 FEM analysis combined phase field simulation for predicting microstructure. (a) FEM simulation for melt track, (b) temperature distribution on a longitudinal cross section, (c) temporal change in temperature at the top and bottom of melt region, (d) temperature distribution of simulation domain for phase field, (e) solidification with columnar equiaxed transition (after Shimono et al.⁵⁵⁾).

材料特性に及ぼす影響が大きく、この計算の意味はあまり明確でない。Gong ら⁵³⁾ 自身も、より高い冷却速度での条件でのシミュレーションの必要性を指摘している。最近、ドイツ・アーヘンの Access 社、RWTH Aachen University, Fraunhofer Institute for Laser Technology (ILT) のグループは、Inconel 718 合金の PBF プロセス中の凝固を想定して、 $G = 2 \times 10^7$ K/m, $R = 0.04$ m/s、冷却速度 8×10^5 K/m の非平衡度の高い凝固が、デンドライトを形成せずにセル状凝固となることを同グループで Access 社の開発した PF シミュレーションソフト MICRESS と Ni 基合金用熱力学データを用いた研究で示している⁵⁴⁾。但し、PBF プロセスにおける凝固速度が $10^3 \sim 10^7$ K/s と大きく凝固組織が微細（例えばセル状凝固のサイズが $1 \mu\text{m}$ 以下）と微細であり、差分格子のサイズをサブミクロン以下にしなければならず、ビード長手方向垂直断面での 2 次元シミュレーションに限定しても溶融池全体の凝固組織を模擬することは PF シミュレーションの計算コストが比較的大きくなり困難なため、溶融池の一部を想定した一方向凝固のシミュレーションがなされている⁵³⁾⁻⁵⁵⁾。

一方、界面偏析などの微細組織には注目せずに溶融池全体の凝固組織を結晶方位分布レベルで模擬する凝固シミュレーションとして FEM とセルオートマトン (Cellular Automaton: CA) と温度分布変化の評価とを組み合わせた CAFE 法が鋳造組織シミュレーションで用いられている。これを応用した AM プロセスにおける凝固組織シミュレーションが米国 Carnegie Mellon 大学の J. Beuth らのグループや Northwestern 大学の W.K. Liu と G.J. Wagner らのグループ⁵⁶⁾ によってなされている。Northwestern 大学のグループではさらに kinetic Monte-Carlo 法と CA を組み合わせた 3 次元シミュレーションにより溶融池内の凝固組織の再現をした。ドイツ・FAU の Körner らは、格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method: LBM) を用いた CtFD によって温度分布変化を計算し、その結果 CA 法を組み合わせる PBF における組織形成のシミュレーションを行っている⁵⁷⁾。

以上のような、AM プロセス中に発現する諸現象を物理モデルに基づき予測するシミュレーションを行い、適切なプロセス条件を見つけることが可能である。しかしながらそれは実験を行うよりも膨大な時間を要することもあり。一方で機械学習を用いて内在する物理を関知せずに最適条件を探索する手法の有効性も示され始めている⁵⁸⁾。今後は、そうした機械学習の活用と、物理モデルに基づいた予測を組み合わせたプロセスの最適化技術の開発が重要となる。

現在、大阪大学工学研究科異方性カスタム設計・AM 研究開発センターでは、Fig. 8 に示すようなコンセプトにより、実験と計算を組み合わせた順問題と逆問題のアプローチで、必要な特性からプロセスを最適から導く技術の開発を、特に異方性の制御による、生体インプラント材料⁵⁹⁾をはじめとする高機能材料創出を主眼として鋭意進めている。

Fig. 8 Concept map of process parameter optimization for desired material property of additively manufactured metal parts.

3. 結言

本稿では AM プロセスのプロセス最適化予測に関する計算機シミュレーションについて、金属の PBF 方式の AM プロセスに焦点を当てて解説した。モデルの設計における構造最適化シミュレーションから、造形物のレイアウトやサポートの設計に始まり、造形プロセスにおける熱ひずみや気孔などの欠陥の形成を予測する FEM 解析をベースにしたプロセス最適化については、一部商用ソフトも存在する。しかし金属材料の特性に強く影響する結晶配向や結晶粒径については、凝固条件から予測する手法が提案され、各国で研究が進められているのが現状である。所望の材料特性を発現するように材料組織を制御しながら造形条件を最適化する技術については開発途上である。開発の促進には AM プロセス中の溶融凝固挙動を再現するための融体物性パラメータや、凝固条件と組織との関係を示す凝固マップなどのデータを蓄積するとともに、非平衡度の高い凝固現象の理解とそれに基づく予測を可能とすることが必要である。また実験データおよび順方向のシミュレーションデータを蓄積し、そのデータに基づいて、所望の特性からそれを発現する組織、その組織を生成する造形条件を、逆問題として導出する技術の開発が求められる。そうした技術の開発を目指したプロジェクトが、内閣府が主導する戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第二期課題「統合型材料開発システムマテリアル革命」における、逆問題マテリアルインテグレーション (MI) の中で進められている。

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、科学研究費補助金 (18H03834, 17H01329, 15K14154, 26289252, 23360299)、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構 (TRAFAM)、内閣府 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 第一期課題「革新的設計生産技術・三次元異方性カスタマイズ化

設計・付加製造拠点の構築と地域実証」の支援により行われたものであり、本稿の執筆は第二期 SIP「統合型材料開発システムマテリアル革命」での調査活動として行われた。本稿の執筆に際し、大阪大学工学研究科異方性カスタム設計・AM 研究開発センターならびに東北大学金属材料研究所千葉研究室の関係の皆様にお世話になりました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker.: Additive manufacturing technologies. New York: Springer, 2014.
- 2) W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y., Williams, C. B. Chen, and P. D. Zavattieri.: Computer-Aided Design, **69** (2015) 65-89.
- 3) Altair 社 Hyper Works, OptiStruct: <https://altairhyperworks.jp/product/optistruc>
- 4) Quint 社 OptiShape http://www.quint.co.jp/pro/ots/ots_fnc.htm
- 5) Y. Koizumi, A. Okazaki, A. Chiba, T. Kato, A. Takezawa: Addit. Manuf. **12** (2016) 305-313.
- 6) A. Takezawa, K. Yonekura, Y. Koizumi, X. Zhang, M. Kitamura: Addit. Manuf., **22** (2018) 634-64.
- 7) A. Takezawa, X. Zhang, Y. Koizumi: Comp. Mater. Sci. **159** (2019) 202-209.
- 8) A. Takezawa, Y. Koizumi, M. Kobashi: Addit. Manuf., **18** (2017) 194-202.
- 9) X. Wang, P. Zhang, S. Ludwick, E. Belski: A.C. To, Addit. Manuf. **20** (2018) 189-198.
- 10) A. Takezawa, M. Kobashi.: Composites B: Eng., **131** (2017) 21-29.
- 11) L. Cheng, J. Liu, X. Liang: A.C. To, Comp. Methods Appl. Mech. Eng., **332** (2018) 408-439.
- 12) R. K. Chen, Y.A. Jin, J. Wensman, A. Shih: Addit. Manuf., **12** (2016) 77-89.
- 13) 3D Systems, Geomagic®FreeForm® <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-freeform>
- 14) i-plants systems Volume Extractor 3.0 <http://www.i-plants.jp/hp/products/ve3/>
- 15) M.E. Biancolini, P.P. Valentini. Int. J. Interactive Design Manuf. (IJIDeM) **12.4** (2018) 1223-1234.
- 16) A.T. Gaynor, J.K. Guest: Struct. Multidiscip. O., **54** (2016) 1157-1172.
- 17) J. Liu, A.T. Gaynor, S. Chen, Z. Kang, K. Suresh, A. Takezawa, L. Li, J. Kato, J. Tang, C. C. L. Wang, L. Cheng, X. L. A.C. To: Struct. Multidiscip. O., **57** (2018) 1-27.
- 18) K. Zeng, D. Pal, H.J. Gong, N. Patil, B. Stucker: Mater. Sci. Tech., **31** (2015) 945-956.
- 19) ESI, <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-manufacturing/additive-manufacturing>
- 20) Additive Works, <https://additive.works/>
- 21) Abaqus, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/trends/digital-additive-manufacturing/>
- 22) Ansys, <https://www.ansys.com/products/structures/additive-manufacturing>
- 23) MSC Software, Simfact Additive: <https://www.mssoftware.com/ja/product/simufact-additive>
- 24) M. Markl, C. Körner: Powder Technology **330** (2018) 125-136.
- 25) 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)
- 26) P.W. Cleary, M. L. Sawley: Applied, Mathematical Modelling **26** (2002) 89-111.
- 27) H. Komen, M. Shigeta, M. Tanaka, M. Nakatani, Y. Abe: Welding in the World **62** (2018) 1323-1330.
- 28) E. J. R. Parteli: AIP Conference Proceedings **1542** (2013) 185-188.
- 29) Y. Zhao, Y. Koizumi, K. Aoyagi, K. Yamanaka, A. Chiba: Materials Today, Proc. **4** (2017) 11437-11440.
- 30) C. Körner, E. Attar, P. Heintl: J. Mater. Proc. Tech. **211** (2011) 978-987.
- 31) M. Markl, R. Ammer, U. Ljungblad, U. Rüde, C. Körner: Procedia Computer Science **18** (2013) 2127-2136.
- 32) M. Markl, R. Ammer, U. Rüde, C. Körner: Int. J. Adv. Manuf. Technol. **78** (2015) 239-247.
- 33) C. Körner, A. Bauereiß, E. Attar: Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. **21** (2013) 085011.
- 34) R. Ammer, M. Markl, U. Ljungblad, C. Körner, U. Rüde: Comp. Math. Appl. **67** (2014) 318-330.
- 35) A. Bauereiß, T. Scharowsky, C. Körner: J. Mater. Process. Tech. **214** (2014) 2522-2528.
- 36) W. King, A. T. Anderson, R. M. Ferencz, N. E. Hodge, C. Kamath, S.A. Khairallah: Mater. Sci. Tech. **31** (2015) 957-968.
- 37) S.A. Khairallah, A.T. Anderson, A. Rubenchik, W.E. King: Acta Mater. **108** (2016) 36-45.
- 38) S.-H. Sun, Y. Koizumi, S. Kurosu, Y.-P. Li, H. Matsumoto, A. Chiba: Acta Mater. **64** (2014) 154-168.
- 39) S.-H. Sun, Y. Koizumi, S. Kurosu, H. Matsumoto, T. Saito, K. Yamanaka, Y.-P. Li, A. Chiba: Acta Mater. **86** (2015) 305-318.
- 40) S.-H. Sun, Y. Koizumi, T. Saito, K. Yamanaka, Y.-P. Li, Y. Cui, A. Chiba: Addit. Manuf. **23** (2018) 457-470.
- 41) S.-H. Sun, K. Hagihara, T. Nakano: Mater. Design **140** (2018) 307-316.
- 42) S.-H. Sun, T. Ishimoto, K. Hagihara, Y. Tsutsumi, T. Hanawa, T. Nakano: Scripta Mater. **159** (2019) 89-93.
- 43) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, S.-H. Sun, T. Nakano: Scripta Mater. **132** (2017) 34-38.
- 44) K. Hagihara, T. Nakano, M. Suzuki, T. Ishimoto, Suyalatu, S.-H. Sun: J. Alloys Comp. **696** (2017) 67-72.
- 45) M. Todai, T. Nakano, T. Liu, H.Y. Yasuda, K. Hagihara, K. Cho, M. Ueda, M. Takayama: Addit. Manuf. **13** (2017) 61-70.
- 46) J.D. Hunt: Mater. Sci. Eng. **65** (1984) 75-83.
- 47) S. Bontha, N.W. Klingbeil, P.A. Kobryn, H.L. Fraser: Mat. Sci. Eng. A **513-514** (2009) 311-318.
- 48) J. Gockel, J. Beuth: Solid Freeform Fabrication Proceedings, Austin, TX, (2013) 12-14.
- 49) J. Gockel, J. Beuth, K. Taminger: Addit. Manuf. **1-4** (2014) 119-126.
- 50) X. Ding, Y. Koizumi, D. Wei, A. Chiba: Addit. Manuf. **26** (2019) 215-226.
- 51) B. Schoinochoritis, D. Chantzis: K. Salonitis. Proc. of Instit. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manuf. **231** (2017) 96-117.

- 52) Y. Zhao, Y. Koizumi, K. Aoyagi, K. Yamanaka, D.X. Wei, A. Chiba: Addit. Manuf. **26** (2019) 202-214.
- 53) X. Gong and K. Chou: JOM **67** (2015) 1176-1182.
- 54) G. Boussinot, M. Apel, J. Zielinski, U. Hecht, and J.H. Schleifenbaum: Phys. Rev. Applied **11** (2019) 014025.
- 55) Y. Shimono, M. Oba, S. Nomoto, Y. Koizumi, A. Chiba: Proc. of Solid Freeform Fabrication Symposium (2017) 1048-1057
- 56) Y. Lian, S. Lin, W. Yan, W.K. Liu, G.J. Wagner: Comp. Mech. **61** (2018) 543-558.
- 57) A. Rai, M. Markl, C. Körner: Comp. Mat. Sci. **124** (2016) 37-48.
- 58) K. Aoyagi, H. Wang, H. Sudo, A. Chiba: Addit. Manuf. **27** (2019) 353-362.
- 59) T. Nakano, T. Ishimoto: KONA Powder and Particle Journal **32** (2015) 75-84.

代表者メールアドレス

小泉雄一郎 ykoizumi@mat.eng.osaka-u.ac.jp