

令和 3 年 8 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01329

研究課題名(和文) 金属用3Dプリンタで形状だけでなく内部組織を自在に制御するための材料科学

研究課題名(英文) Materials Science for controlling not only external shape but also internal microstructure in metal 3D printing

研究代表者

小泉 雄一郎 (KOIZUMI, Yuichiro)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：10322174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,200,000円

研究成果の概要(和文)：金属3Dプリンタの主流である粉末床溶融結合(Powder Bed Fusion: PBF)型付加製造(Additive Manufacturing: AM)にて、部材の形状だけでなく材料特性を決定する結晶組織形成の支配因子を、実験と数値シミュレーションを組み合わせで調べた。具体的には、金属粉末を溶融結合させるための電子ビームやレーザービームの出力と走査速度、そして走査線の間隔の組み合わせにより、造形部材の結晶粒組織を高配向の単結晶状にしたり、低配向の多結晶にしたりするための学術的指針を、PBFプロセス特有の凝固条件の発現とその条件での結晶成長挙動と合金の物理化学的特徴との相関に基づいて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、金属用3Dプリンタ(3DP)で形状だけでなく内部組織を制御することで、材料特性をも制御しながら部材を製造するための科学として大きな重要性を持つ。例えば、溶融凝固で得られる結晶組織は従来、センチメートルサイズの溶融領域での凝固が注目されてきたが、本研究では金属3DPで重要な1mm以下の微小領域での凝固現象を明らかにした。その結果、溶融領域が一桁小さく、冷却速度が100万度/秒と非常に大きいことを見出した。この成果は、新しい金属結晶成長の基礎学理として学術的に意義が高いと同時に、3DPによる高性能な部材の安定的な製造のための基礎的知見として、実用・社会的にもその意義は極めて大きい。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the factors for controlling the microstructures, that determine the material property, in the parts built by powder bed fusion (PBF) type additive manufacturing (AM), which is the major metal 3D printers (3DP). Beam scanning tests, microstructure observation, process monitoring, and numerical simulations revealed the essentials of microstructure formation in PBF. For instance, the crystal grain structure of the built parts is found to be modified variously from a highly oriented single crystal-like ones to isotropic polycrystals by appropriate combinations of beam power, scanning speed, and the scanning line intervals of electron beam or laser beam for fusing metal powder. Very fine cellular crystals are formed owing to the very high cooling rate. The correlation between the unique solidification conditions and the microstructures has been found to be greatly affected by the fluid flow along solid-liquid interface depending on the physical properties of the alloys.

研究分野：材料設計・プロセス工学

キーワード：凝固マップ 熱流体力学シミュレーション 柱状 等軸遷移(CET) 粉末床溶融結合(PBF) 高速二色温度分布解析 フェーズフィールド法 アディティブマニュファクチュアリング セル状凝固

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3D プリンタ(3DP)、積層造形、付加製造(Additive Manufacturing: AM)などと呼ばれる技術が、革命的製造法として注目されている。中でも、電子ビーム(EB)やレーザービーム(LB)で金属粉末を選択的に溶融凝固させる粉末床溶融結合(Powder Bed Fusion: PBF)型 AM 技術は、緻密な成形体を得易く、造形条件の変更で材料組織までも制御できる。代表者および分担者らは生体用 Co-Cr-Mo 合金の EB 積層造形で<100>方位に配向した単結晶状組織を得られることを見出した。同様の現象を Ni 基超合金(IN718)でも確認し、単結晶タービン翼が製造できる可能性をも見出した。一方、多くの構造用金属材料には、AM でも等軸微細粒組織を求める場合が多い。その要求への応えとして、柱状-等軸遷移(Columnar-Equiaxed Transition: CET)に基づく「温度勾配(G)と凝固速度(R)と組織の関係」を示す凝固マップの活用が提案されている。しかしながら、凝固マップが整備されている合金は少なく、多くの合金で凝固マップの整備が必要である。また緻密化だけを目的として最適化された造形条件では、固相変態する一部の合金を除いては、等軸化は困難である。そこで我々は、種々のビーム照射条件で得られる組織と G と R との関係から、結晶配向、粒径、粒形状の情報も含めた凝固マップを整備すれば、PBF 型金属 AM で広く活用できる普遍的な情報、すなわち AM における組織制御の地図となると考えた。加えて、PBF 型金属 AM では、鑄造や溶接などの他の溶融凝固プロセスと比較して、「溶融領域が 1 mm 以下と微小である」、「粉末の溶融にともなう流動が複雑」、「熱源移動が高速」といった特徴があると考えられ、それらに由来した特有の凝固現象の理解が重要となる。こうした PBF 型金属 AM における溶融凝固現象の研究は、溶融凝固現象そのものについての新しい知見として高い学術的意義をもつと同時に、金属 AM で形状だけでなく内部組織(材料組織)をも制御することにより、必要に応じて材料特性を制御する造形を現実にする可能性があり、材料工学、産業技術の発展に寄与すると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、PBF 型金属 AM における内部組織制御の指標となる学術的基礎を構築することを目的とする。具体的には、人工関節用 Co-Cr-Mo 合金、耐熱・耐食 Ni 基合金などの主要合金にて、PBF 型 AM 特有の凝固条件を含んだ広い条件の凝固マップ作成を指針とし、それに必要な実験手法、計算手法を開発するとともに、それらを用いて、PBF 型金属 AM 特有の凝固挙動を解明し、金属 AM における材料特性制御の指針とすることを目的とする。

3. 研究の方法

種々の条件での EB や LB の照射で発生する温度分布の時間変化を、高速度カメラと 2 色法を用いたプロセスモニタリング実験と数値熱流体力学(Computational thermal Fluid Dynamics: CtFD)シミュレーションにより評価し、そこから導出される G と R の値と凝固組織との関係を凝固マップの形式で整理する。また、 G と R 以外の凝固組織への影響因子として重要な融液の流動の影響や、凝固組織の定量的な情報も含む凝固マップを作成する。下記の点にも注目し、PBF 型金属 AM 特有の凝固現象の機構を解明し、凝固結晶成長分野の知見とする。具体的には下記のとおり。

(1) 微小領域での凝固現象:

PBF 型 AM では 1 mm 以下の微小領域での凝固が繰り返される。そのため定常に近い状態では等軸晶となる凝固条件でも、核生成前に凝固が完了し等軸粒が得られないなど、定常状態を仮定した従来の CET の臨界条件からのずれが生じると予想される。その効果を定量的に評価すべく、 G と R の評価が容易なバルクへの EB や LB の照射により形成される凝固組織の解析と、CtFD シミュレーションによる凝固条件の解析の結果を組み合わせて、凝固条件と組織の関係を凝固マップの形式で整理した。

(2) 微粉末粒子溶融の影響:

PBF 型 AM では微粉末粒子を溶融凝固させるため、粉末の溶融で生じた融液の流動や、粉末粒子未溶融部からの結晶成長など、鑄造や溶接では生じない現象が生じる可能性がある。本研究では、これらが凝固組織に及ぼす影響を明らかにすべく、粉末への EB や LB の照射で形成される組織を解析し、粉末の溶融に伴う複雑な融液の流動の凝固への影響を検討・考察した。

(3) 高速熱源移動の影響:

PBF では通常熱源を数百 mm/s から 1 m/s 程度の高速で移動させる。本研究ではこうした特殊な熱源による特有の溶融凝固現象とその機構を明らかにすべく、超高速熱源移動も含む広範な造形条件での溶融凝固挙動を調べ、等軸粒組織の形成に有効な因子を探索した。

(4) Adaptive Offset(AO)法による造形実験:

広範囲のプロセス条件、凝固条件での PBF を可能とする Adaptive Offset(AO)法を用いた造形を行うとともに、これらの結果を総括し、PBF 型金属 AM で単結晶状組織、柱状晶、等軸晶を作り分けるための学術的基礎を構築する。これらにより、単結晶・多結晶一体成形タービン翼の造形や高性能人工関節創製などへの指針を示した。

4. 研究成果

(1) 微小領域での凝固現象: 凝固マップ作成のためのバルクへの EB 照射と凝固組織解析

ビーム照射による溶融凝固挙動を計算機シミュレーションで再現するために、**図 1** に示す様に、実験とシミュレーションの差が生じ難い単純な条件として、粉末を置かないバルク材に種々の条件で、EB や LB を照射する実験とその際の溶融凝固挙動の CtFD シミュレーションを行った。このようなシミュレーションで得られる溶融領域の形状が、実験で観察される溶融領域の形状と一致するように、不確定性のあるエネルギー吸収率やビーム径の調整とシミュレーションを繰り返した。シミュレーションに必要な合金の融体物性には文献値やデータベースの値を用いるとともに、Co-Cr-Mo 合金の物性値を、研究分担者福山らが測定した。実験との整合が確認されたシミュレーション結果を解析することで、凝固条件(固液界面の温度勾配(G)、凝固速度(R))を評価するとともに、各位置での結晶組織を観察し、凝固条件と組織との関係性を評価した。**図 2** は、SUS316L 鋼(以下 316L 鋼)への EB 照射の CtFD シミュレーションで形成された溶融領域中の凝固直前の流速の分布(**図 2a**)と、対応する位置(左右対称を仮定)の実測した結晶方位分布(**図 2b**)の比較である。溶融領域形状はよい一致を示した。流速は最大 300 mm/s にも達し、流速の大きい箇所では等軸的結晶粒の頻度が高くなる傾向があることが示唆された。

図 3 は、Co-Cr-Mo 合金と、316L 鋼の凝固マップすなわち凝固条件と結晶組織の関係性を評価するために作成した散布図である。CtFD シミュレーションにて凝固界面を追跡し、 R と界面上の温度勾配(G)を逐次評価して、 G - R 平面上にプロットしたものである。実行した各ビーム条件でのシミュレーションの結果を全て重ねて表示しており、各点は、対応する位置で観察された結晶組織によって色分けされている。凝固マップ上で、柱状晶の発現を表す点(赤)と等軸晶を表す点(青)が混在した。また驚くべきことに、これらの凝固条件は、鋳造や溶接など従来の溶融凝固プロセスでの凝固条件と結晶組織との関係を表す凝固マップが対象としてきた凝固条件の範囲を逸脱している。

さらに、一般的な CET による等軸化の傾向に反して、高 G の領域で等軸粒発現が多い。このことは、マランゴニ効果による融液の流動による dendrite の溶断やその移動の影響を示唆している。これ以外にも、304 鋼(以下 304 鋼)、 β 型 Ti 合金、Ni 基合金に対して、同様の実験と CtFD シミュレーションと組織観察を行い、合金種やビームの種類の影響を調べた。例えば、304 鋼と 316L 鋼とでは、304 鋼の方が多結晶化し易い傾向を示した。これは 304 鋼で固相線-液相線温度差の大きいことと理解された。また、LB を用いた場合、キーホールと呼ばれる溶融池の凹みが生じ易く溶け込みが深くなるとともに、昇温に対して EB 照射ではジュール発熱の寄与があるのに対して、熱伝導による昇温が主体となることに由来すると考えられる高 G 、高 R の凝固条件の発現が多くなることなどが見出された。

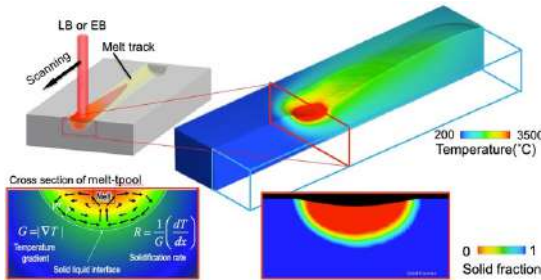


図 1. 金属バルクへの PBF 型 AM 用ビーム照射の模式図と CtFD シミュレーション実施例。右上:316L 鋼への EB 照射の例(ビーム中心の軌跡の片側のみ表示。色は温度を表す)。右下:溶融領域の断面の固相率分布例。固相率分布から固液界面位置を特定し、温度勾配を評価した。

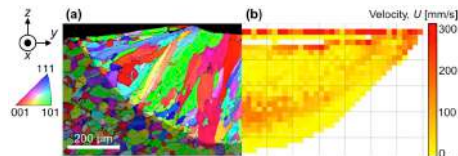


図 2. (a)実測した結晶方位分布(色は結晶方位を表す)。(b) 対応する CtFD シミュレーションで得た溶融領域(色は固液界面通過直前の融液の流速)、316L 鋼の例。流速の大きい部分で、等軸粒が観察される傾向があり、組織形成への流速の影響が示唆された。(Y. Miyata et al. Crystals 11 (2021) 856.)

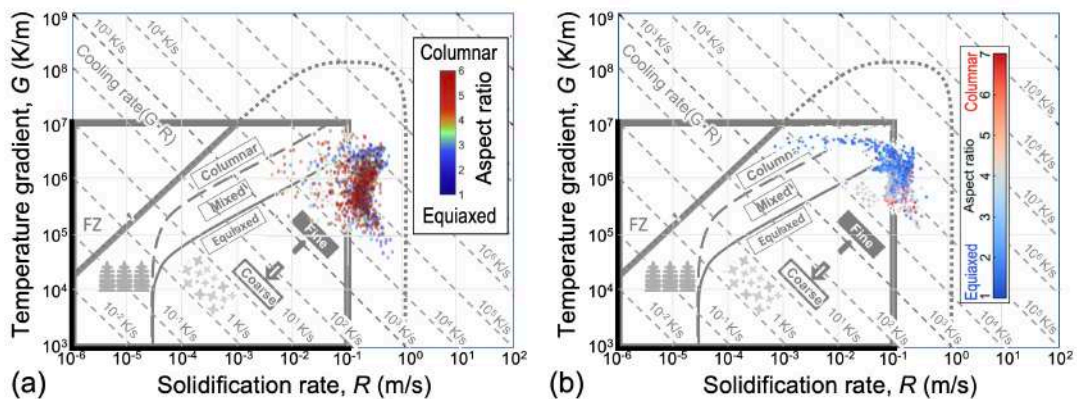


図 3. EB の照射による溶融凝固で発現する温度勾配と凝固速度の G - R 空間へのプロット。グレーの背景は Ni 基合金に対して提案されている凝固マップ。(a) Co-Cr-Mo 合金、(b) SUS316L 鋼。実測されて結晶粒のアスペクト比によって 点は色分けされている。多くの点が従来の凝固マップの範囲(太枠)を逸脱しており、等軸化傾向も逆転している。(Co-Cr-Mo 合金のデータ: Y. Zhao et al. Additive Manufacturing 26(2019)202-214. SUS316 鋼のデータ: Miyata et al. Crystals 11 (2021) 856.)

(2) 粉末床モデルの作成とその溶融凝固シミュレーション：

PBF 型 AM プロセスシミュレーションのため、粉末粒子層生成モデル作成から開始した。個別要素法 (Discrete Element Method: DEM) を用いて、レーキプロセスによる粉末床形成のシミュレーションを行った。レーキ過程のシミュレーションの前に Hall 流動度計による粉末落下実験とシミュレーションを行った。堆積した粉末の安息角を実験と計算で整合するよう粒子間摩擦力の調整のみで再現した場合、粉末粒子が広がり難くなったのに対して、凝集力を考慮したモデルではより実際の粉末床に近いものが得られた (図 4)。この粉末床モデルに(1)で示したのと同様のビーム照射のシミュレーションを行った (図 5)。

走査線単位長さ当りの入熱エネルギーが小さい場合、粉末粒子の溶融で形成される液滴が合体し大きな粒子を形成する **Balling** 現象が生じた。エネルギー密度が大きい場合には、粉末粒子の溶融で生成した液滴の流動により流速が大きくなる場合があるものの、凝固界面近傍の流動に対する顕著な影響は認められなかった (図 6)。但し、粒子が部分的に溶融した後に凝固に転ずる場合は、粉末粒子未溶融部からの結晶成長の影響は無視できない。また、粉末粒子の局所加熱による突沸の影響やマクロなエネルギー吸収への影響も重要である。図 7 は、粉末床へのレーザー照射過程のその場観察結果と CtFD シミュレーションの比較である。図 7a は自発光像であり、図 7b は、二色法により評価した温度分布である。粉末の影の部分と温度が測定範囲外の部分が黒く表示されているが、後方 (左) に融点近傍の表面温度分布が表示されている。このような表面温度分布まで再現するよう CtFD シミュレーション高精度化する (図 7c) ことで凝固条件の推定が可能となる。

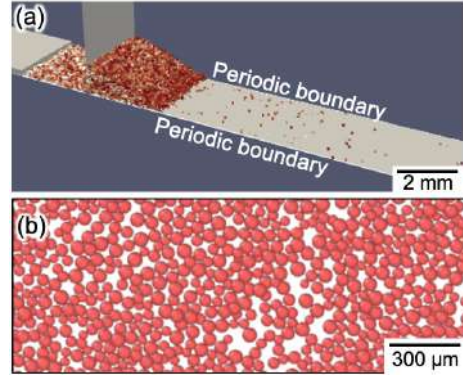


図 4. 粉末床形成過程の個別要素法 (Discrete Element Method: DEM) シミュレーションの例. (a) 粉末レーキ過程のスナップショット, (b) DEM シミュレーションで生成した粉末床モデル. このモデル作成からも粉末粒子間相互作用 (凝集力と摩擦力) など学術的知見が得られた。

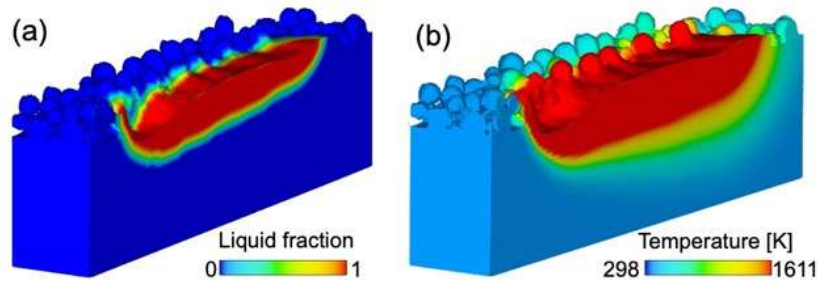


図 5. PBF の粉末床を模したモデルでのビーム走査による溶融凝固過程の数値熱流体力学 (CtFD) シミュレーションの例 (レーザー照射の例). (a) 液相率分布. (b) 温度分布.

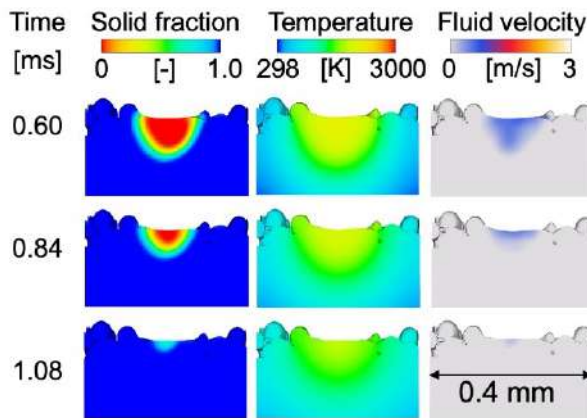


図 6. 粉末床モデルでのビーム照射による溶融凝固挙動. 温度勾配は 0.1mm で 1000°C 程度と 10^7 K/m 級であることが温度分布画像により示されている. 流速も最大で 1m/s 程度にもおよびることが CtFD シミュレーションで示された。

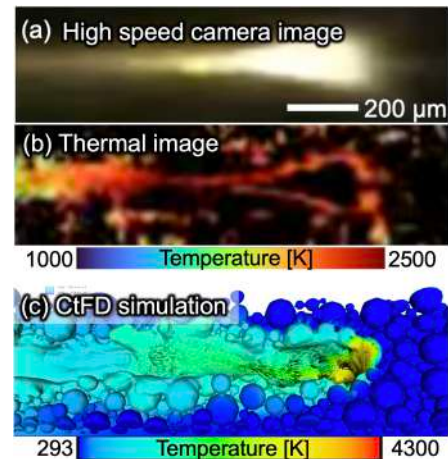


図 7. PBF プロセスモニタリングと CtFD シミュレーション. (a) 高速度カメラ画像, (b) 二色法温度画像 (レンジ外は黒く表示している), (c) CtFD シミュレーション.

(3) 高速熱源移動による結晶成長

PBF では通常熱源を数百 mm/s から 1m/s 程度の高速で移動させる。それに伴い、特殊な凝固条件が発現する。本研究では、そのような環境での結晶成長をフェーズフィールド法にてシミュレーションし組織を予測するためのモデルを構築した。比較的従来の凝固プロセスに近い凝固条件にて、柱状等軸遷移 (Columnar Equiaxed Transition) に従って組織が変化するように、核生成頻度、界面移動度を決定したフェーズフィールドモデルで凝固組織形成のシミュレーションを行った場合、温度勾配 G が 10^7 K/m と大きく、凝固速度の小さい条件では、柱状 (Columnar) 組織が形成され、 G が同じで R を 1 桁下げた場合には、周期的に等軸晶の割合が増える混合組織が形成された。 R を固定して G を 10^5 K/m にまで低下させると、全体が等軸晶からなる組織となった。いずれの場合においても粒界には溶質の偏析が認められた。ここで注意すべきは、フェーズフィールドシミュレーションで得られる組織や溶質偏析は、モデルの解像度に依存することである。同じ凝固条件でも、差分格子のサイズを $0.025 \mu\text{m}$ (25 nm) にまで小さくし、1 つの結晶粒程度の大きさの計算領域にてシミュレーションを行うと、さらに微細な組織が形成されることを見出した。このことは、凝固条件としてはセル成長の条件にあるが、冷却速度 ($G \cdot R$) が 10^6 K/s と大きいためにセルサイズが $1 \mu\text{m}$ 以下にまで小さくなったものと理解される。これまで結晶方位分布に注目してきたが、セル同士の結晶方位は同一であるため、後方散乱電子線回折 (EBSD) などを用いた結晶方位マップによる組織評価だけではこのような組織は検出されない。実際高倍率での電子顕微鏡観察では、シミュレーションでしめされたものと同様のセル組織の存在が示唆されている。こうした微細な濃度変調は、析出やスピノーダル分解と類似の距離スケールを有すことから、偏析元素の種類により原子サイズ差による格子定数変調や析出物形成による強化が期待される。一方、脆化や局所的融点低下の原因にもなりうる。本研究は、PBF によって初めて実現可能な新たな組織制御の可能性をも見出すことに繋がった。

この成果は、さらに高い凝固速度で発現する絶対安定性など未開拓な凝固条件の領域での組織制御の道を開いたと言え、新規フェーズフィールドモデル開発も含め、学術的發展にも大きく貢献することに繋がる成果である。

(4) アダプティブオフセット (AO) 法による組織制御

実際の造形物の組織制御のため AO 法を用いて設定した条件で造形を行った (図 8)。AO 法の適用により、より広範囲の条件での造形が可能となった。走査線間隔を大きくすることで、低配向性の結晶粒組織が得られた。これは、溶融領域内の位置によって、凝固界面に移動方向が大きく変化し、温度勾配方向への優先成長方位である $\langle 100 \rangle$ 方位が特定方向には配向しなくなったためと考えられる。今後はさらに粉末の改良も含め、より広い凝固条件での造形を可能とする技術の開発と並行して、先述の未開拓の凝固条件での造形などにより、さらに配向性の高い単結晶や、より微細な結晶粒組織を有する合金の造形などが可能となると期待される。

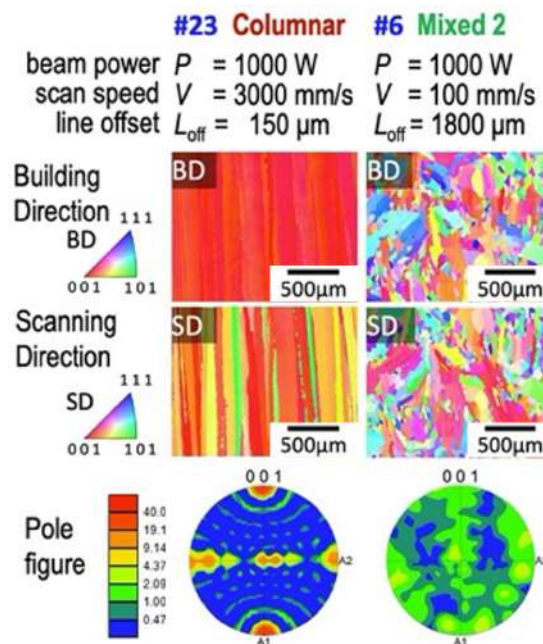


図 8. AO 法を適用して、PBF-EB で造形した IN718 合金の結晶方位マップと極点図。走査速度 (V) と走査線間隔 (L_{off}) の組み合わせによる組織の制御が可能である。(X. Ding, et al. Materials Science & Engineering A 764 (2019) 138058.)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wei Daixiu, Anniyaer Ainiwaer, Koizumi Yuichiro, Aoyagi Kenta, Nagasaki Makoto, Kato Hidemi, Chiba Akihiko	4. 巻 28
2. 論文標題 On microstructural homogenization and mechanical properties optimization of biomedical Co-Cr-Mo alloy additively manufactured by using electron beam melting	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 215 ~ 227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2019.05.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Miyata Yuichiro, Okugawa Masayuki, Koizumi Yuichiro, Nakano Takayoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Inverse Columnar-Equiaxed Transition (CET) in 304 and 316L Stainless Steels Melt by Electron Beam for Additive Manufacturing (AM)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 856 ~ 856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst11080856	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Zhao Yufan, Koizumi Yuichiro, Aoyagi Kenta, Yamanaka Kenta, Chiba Akihiko	4. 巻 50
2. 論文標題 Isothermal phase transformation behavior in a Co-Cr-Mo alloy depending on thermal history during electron beam powder-bed additive manufacturing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science & Technology	6. 最初と最後の頁 162 ~ 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmst.2019.11.040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okugawa Masayuki, Izumikawa Daichi, Koizumi Yuichiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Simulations of Non-Equilibrium and Equilibrium Segregation in Nickel-Based Superalloy Using Modified Scheil-Gulliver and Phase-Field Methods	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 2072 ~ 2078
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.MT-MA2020005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhao Yufan, Koizumi Yuichiro, Aoyagi Kenta, Yamanaka Kenta, Chiba Akihiko	4. 巻 381
2. 論文標題 Thermal properties of powder beds in energy absorption and heat transfer during additive manufacturing with electron beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 44 ~ 54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.powtec.2020.11.082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 OKUGAWA Masayuki, MIYATA Yuichiro, WANG Lei, NOSE Kazufumi, KOIZUMI Yuichiro, NAKANO Takayoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Melting and Solidification Behavior of 316L Steel Induced by Electron-Beam Irradiation for Additive Manufacturing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Smart Processing	6. 最初と最後の頁 208 ~ 213
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7791/jspmee.10.208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ding Xiao, Koizumi Yuichiro, Wei Daixiu, Chiba Akihiko	4. 巻 26
2. 論文標題 Effect of process parameters on melt pool geometry and microstructure development for electron beam melting of IN718: A systematic single bead analysis study	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 215 ~ 226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2018.12.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhao Yufan, Koizumi Yuichiro, Aoyagi Kenta, Wei Daixiu, Yamanaka Kenta, Chiba Akihiko	4. 巻 26
2. 論文標題 Molten pool behavior and effect of fluid flow on solidification conditions in selective electron beam melting (SEBM) of a biomedical Co-Cr-Mo alloy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 202 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2018.12.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sun Shi-Hai, Koizumi Yuichiro, Saito Tsuyoshi, Yamanaka Kenta, Li Yun-Ping, Cui Yujie, Chiba Akihiko	4. 巻 23
2. 論文標題 Electron beam additive manufacturing of Inconel 718 alloy rods: Impact of build direction on microstructure and high-temperature tensile properties	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 457 ~ 470
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2018.08.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wei Daixiu, Koizumi Yuichiro, Chiba Akihiko, Ueki Kosuke, Ueda Kyosuke, Narushima Takayuki, Tsutsumi Yusuke, Hanawa Takao	4. 巻 24
2. 論文標題 Heterogeneous microstructures and corrosion resistance of biomedical Co-Cr-Mo alloy fabricated by electron beam melting (EBM)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 103 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2018.09.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KOIZUMI Yuichiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Optimization of Additive Manufacturing Process Utilizing Computer Simulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Smart Processing	6. 最初と最後の頁 132 ~ 138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7791/jspmee.8.132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小泉雄一郎	4. 巻 59
2. 論文標題 1.デジタルものづくり時代の材料設計とプロセス ~金属Additive Manufacturingを中心に~	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 大阪冶金学会誌	6. 最初と最後の頁 67-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KOIZUMI Yuichiro, YAMANAKA Kenta, AOYAGI Kenta, CHIBA Akihiko	4. 巻 7
2. 論文標題 Current status of Metal Additive Manufacturing and Microstructure Control of Metal Parts in Powder Bed Fusion (PBF)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Smart Processing	6. 最初と最後の頁 216 ~ 222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7791/jspmee.7.216	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小泉 雄一郎	4. 巻 584
2. 論文標題 金属3Dプリントにおける材料組織制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 TECHNO NET (大阪大学工業会誌)	6. 最初と最後の頁 2-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhao Yufan, Koizumi Yuichiro, Aoyagi Kenta, Yamanaka Kenta, Chiba Akihiko	4. 巻 4
2. 論文標題 Characterization of powder bed generation in electron beam additive manufacturing by discrete element method (DEM)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Today: Proceedings	6. 最初と最後の頁 11437 ~ 11440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matpr.2017.09.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wei Daixiu, Koizumi Yuichiro, Takashima Taiyo, Nagasako Makoto, Chiba Akihiko	4. 巻 6
2. 論文標題 Fatigue improvement of electron beam melting-fabricated biomedical Co?Cr?Mo alloy by accessible heat treatment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Research Letters	6. 最初と最後の頁 93 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21663831.2017.1396506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Koizumi, S.-H. Sun, X. Ding, T. Takashima, S. Kurosu, Y. Zao, D.x. Wei, H. Wang, K. Aoyagi, K. Yamanaka, A. Chiba,	4. 巻 1
2. 論文標題 How to Control Mechanical Properties of Metals (Biomedical Co-Cr-Mo alloy) 3D-Printed by Electron Beam Melting (EBM)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceeding of Int. Conf. on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS) 2017,	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計36件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yuichiro KOIZUMI, Masayuki OKUGAWA
2. 発表標題 Computer Simulations for Microstructure Control in Powder Bed Fusion (PBF) type Additive Manufacturing (AM)
3. 学会等名 The 2st Global Forum on Smart Additive Manufacturing , Design and Evaluation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Koizumi
2. 発表標題 Solidification Condition and its Effects on Microstructure in Metal-Powder Bed Fusion Processes
3. 学会等名 TMS Annual Meeting (TMS 2021), (Symposium: Additive Manufacturing: Materials Design and Alloy Development III; Super Materials and Extreme Environments) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuichiro Koizumi, Yuta Ohigashi, Kenji Saito and Takayoshi Nakano
2. 発表標題 Solidification of Alloys in Powder Bed Fusion (PBF) type Additive Manufacturing
3. 学会等名 Thermec ' 2021 (International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉雄一郎
2. 発表標題 金属Additive Manufacturing (AM) における材質制御を指向した合金組成及びプロセス最適化のための計算機シミュレーション
3. 学会等名 令和2年度 大阪大学「物質・材料科学研究推進機構」、「大阪大学大学院工学研究科 Techno-Research Arena 『先読みシミュレーション』」合同フォーラム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小泉 雄一郎、奥川 将行、朱 伝奇、斉藤 賢士、渡辺 まどか
2. 発表標題 フェーズフィールド法による組織形成プロセスの再現・予測・理解
3. 学会等名 日本金属学会2021年春季第168回講演大会[基調講演]
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大東佑汰, 奥川将行, 小泉雄一郎
2. 発表標題 フェーズフィールド法によるAl-Si合金の付加製造における溶融・凝固組織形成過程の解析
3. 学会等名 軽金属学会 第138回春期大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 泉川大智、奥川将行、小泉雄一郎
2. 発表標題 多元系合金における界面偏析のフェーズフィールド解析
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥川将行、大東佑汰、小泉雄一郎
2. 発表標題 Al-Si合金の付加製造中溶融凝固挙動のフェーズフィールド解析
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 磯野佑輔、奥川将行、小泉雄一郎
2. 発表標題 粉末床溶融結合法でのレーキ過程における粉末粒子の挙動の個別要素法による解析
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2020年度秋季大会(第126回講演大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥川将行、小泉雄一郎
2. 発表標題 分子動力学法によるAl-Si合金の平衡および非平衡液体の構造解析
3. 学会等名 日本軽金属学会第139回秋期大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉雄一郎
2. 発表標題 金属付加製造における溶融凝固の計算機シミュレーションと組織制御
3. 学会等名 一般社団法人日本溶接研究委員会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉雄一郎
2. 発表標題 3Dプリントにおけるサイバーフィジカルシステム(CPS)とデジタルモノづくり
3. 学会等名 大阪大学 大学院工学研究科 テクノアリーナ インキュベーション部門:連携融合型 デジタル造形工学(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉雄一郎
2. 発表標題 金属付加製造における凝固結晶成長
3. 学会等名 日本金属学会第6分野(材料プロセッシング)研究会2020年度研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田雄一郎、福井潤也、奥川将行、小泉雄一郎、中野貴由
2. 発表標題 付加製造用電子ビーム照射によるSUS304鋼およびSUS316L鋼の溶融凝固挙動
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第180回秋季講演大会 学生ポスターセッション
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前田 拓海、小泉 雄一郎、奥川 将行、川端 弘敏、中野 貴由、石本 卓也、木村 恒太、孫 世海
2. 発表標題 付加製造用レーザービーム照射によるTi-15Mo-5Zr-3Al合金の溶融凝固の熱流体力学解析と組織
3. 学会等名 日本金属学会2021年春季第168回講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 磯野 佑輔、奥川 将行、小泉 雄一郎
2. 発表標題 粉末床溶融結合法でのレーキ過程における粒子サイズの影響の個別要素解析
3. 学会等名 日本金属学会2021年春季第168回講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yufan ZHAO、Yuichiro KOIZUMI、Kenta AOYAGI、Kenta YAMANAKA、Akihiko CHIBA
2. 発表標題 Effects of Powder Layer and Particle Size Distribution on Fusion Process during Powder Bed Fusion with Electron Beam
3. 学会等名 日本金属学会（2019年春季講演大会（第164回））
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚 誠、高橋 侑希、小泉 雄一郎、趙 宇凡、千葉 晶彦、福山 博之
2. 発表標題 静磁場印加電磁浮遊法を用いた溶融 Co-Cr-Mo 系合金の熱伝導率測定
3. 学会等名 日本金属学会（2019年春季講演大会（第164回））
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大東 佑汰、小泉 雄一郎
2. 発表標題 フェーズフィールド法を用いたAl合金の付加製造(AM)における溶融凝固挙動の研究
3. 学会等名 日本金属学会2019年春季講演大会（第164回）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小泉 雄一郎
2. 発表標題 デジタルものづくり時代の材料設計とプロセス~ 金属Additive Manufacturingを中心に ~
3. 学会等名 平成30年度 大阪冶金会講演会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋侑希, 大塚 誠, 小泉雄一郎, 趙宇凡, 千葉晶彦, 福山博之
2. 発表標題 静磁場印加電磁浮遊法を用いた溶融 Co-Cr-Mo 系合金の垂直分光放射率および定圧モル熱容量測定
3. 学会等名 日本金属学会講演大会秋期講演大会(第163回)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yufan ZHAO, Yuichiro KOIZUMI, Kenta AOYAGI, Akihiko CHIBA
2. 発表標題 Grain Morphology and Texture Formation in a Co-Cr-Mo Alloy Fabricated by Electron Beam Melting
3. 学会等名 日本金属学会講演大会秋期講演大会(第163回)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉雄一郎
2. 発表標題 Additive Manufacturing における材料組織制御と計算機シミュレーションの活用 (依頼講演)
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 高温プロセス部会 平成30年度 特別講演会 「製鉄プロセスにおける新たな物理学的視点、固体・粉体の力学と数値シミュレーション-」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉雄一郎
2. 発表標題 3Dプリントにおける材質制御のための熔融金属の流動解析
3. 学会等名 FLOW-3D Japan Users Conference 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichiro Koizumi
2. 発表標題 Microstructure Control of Biomedical Co-Cr-Mo Alloy Fabricated by Electron Beam Powder Bed Fusion (EB-PBF) (依頼講演)
3. 学会等名 The 16th Discussion Meeting on Thermodynamics of Alloys (TOFA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichiro Koizumi, Xiao Ding, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba
2. 発表標題 Numerical Simulation of Multi-Pass Electron Beam (EB) Scanning Process for Controlling Microstructure of Alloy 718 in EB-Powder Bed Fusion (EB-PBF)
3. 学会等名 MS 1108 Modeling and Simulation for Additive Manufacturing in the 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCMXIII) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yufan ZHAO, Yuichiro KOIZUMI, Kenta AOYAGI, Kenta YAMANAKA and Akihiko CHIBA
2. 発表標題 Investigation of Solidification Conditions in Electron Beam Melting using Computational Thermal-Fluid Dynamics Simulation
3. 学会等名 MS 1108 Modeling and Simulation for Additive Manufacturing in the 13th World Congress on Computational Mechanics (WCCMXIII) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Takahashi, Makoto Ohtsuka, Yuichiro Koizumi, Yufan Zhao, Akihiko Chiba, Hiroyuki Fukuyama
2. 発表標題 Density Measurement of Co-Cr-Mo Melt with Electromagnetic Levitation Technique in Static Magnetic Field
3. 学会等名 Twentieth Symposium on Thermophysical Properties (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yufan Zhao, Yuichiro Koizumi, Kenta Aoyagi, Kenta Yamanaka, Daixiu Wei, Akihiko Chiba
2. 発表標題 Molten Pool Behavior and Solidification Microstructure of Co-Cr-Mo Alloy in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing
3. 学会等名 Minisymposium: Modeling and Simulation in Additive Manufacturing, The 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM14) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuichiro Koizumi, Yushi Ohno, Yufan Zhao, Akihiko Chiba,
2. 発表標題 Solidification Analysis of Ni Based Superalloy Melted by Electron Beam for Additive Manufacturing
3. 学会等名 Minisymposium: Modeling and Simulation in Additive Manufacturing, The 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics (USNCCM14)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 笠松 初香, 植木 洸輔, 上田 恭介, 小泉 雄一郎, 魏 代修, 千葉 晶彦, 成島 尚之
2. 発表標題 積層造形法により作製したCo-Cr-Mo合金の組織微細化と析出物
3. 学会等名 日本金属学会2018年春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 魏 代修, 千葉 晶彦, 小泉 雄一郎
2. 発表標題 Microstructure homogenization and mechanical property improvement of electron beam melting fabricated biomedical CoCrMo alloy
3. 学会等名 日本金属学会2018年春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋 侑希, 大塚 誠, 小泉 雄一郎, 趙 宇凡, 千葉 晶彦, 福山 博之
2. 発表標題 Co-Cr-Mo系合金の液相線温度と熔融状態における密度の評価
3. 学会等名 日本金属学会2018年春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 趙 宇凡, 小泉 雄一郎, 青柳 健大, 山中 謙太, 千葉 晶彦
2. 発表標題 Solidification Conditions in Molten Pool with Dynamic Fluid Flow in Electron Beam Melting of Co-Cr-Mo Alloy
3. 学会等名 日本金属学会2018年春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青田 昇哉, 佐々木 信之, 小泉 雄一郎, 山中 謙太, 千葉 晶彦, Damien Fabrigue, Eric Maire
2. 発表標題 電子ビーム積層造形されたCo-Cr-Mo合金の組織と気孔への炭素量の影響
3. 学会等名 日本金属学会2018年春季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉 雄一郎,
2. 発表標題 電子ビーム積層造形した金属材料の凝固組織解析
3. 学会等名 ものづくりマッチング2017 3Dプリンタによるものづくりエボリューション(招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 萩原恒夫、京極秀樹、田中浩也、藤井雅彦、小泉雄一郎、奥川将行ら	4. 発行年 2021年
2. 出版社 NTS 出版	5. 総ページ数 380
3. 書名 3Dプリンタ用 新規材料開発 (監修 萩原 恒夫)	

1. 著者名 Takayoshi Nakano, Fujio Tsumori, Yuichiro Koizumi, Naoyuki Nomura, Soshu Kirihara et al.	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 183
3. 書名 Multi-dimensional Additive Manufacturing, (Editors:Soshu Kirihara, Kazuhiro Nakata, " Chapter 3. Selective Electron Beam Melting" を執筆)	

1. 著者名 小泉雄一郎(共著)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日本溶接協会	5. 総ページ数 11
3. 書名 多次元アディティブマニュファクチュアリング (1.3節「電子ビーム積層造形の原理」を執筆)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪大学大学院工学研究科材料エネルギー理工学講座 材料設計・プロセス工学領域（小泉研究室）
<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp3/MSP3-HomeJ.htm>
 大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 材料設計・プロセス工学領域 小泉研究室
<http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/msp3/MSP3-HomeJ.htm>
 東北大学金属材料研究所 千葉研究室
<http://www.chibalab.imr.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	千葉 晶彦 (Chiba Akihiko) (00197617)	東北大学・金属材料研究所・教授 (11301)	
研究分担者	山中 謙太 (Yamanaka Kenta) (30727061)	東北大学・金属材料研究所・准教授 (11301)	
研究分担者	青柳 健大 (Aoyagi Kenta) (90636044)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	
研究分担者	福山 博之 (Fukuyama Hiroyuki) (40252259)	東北大学・多元物質科学研究所・教授 (11301)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	奥川 将行 (Okugawa Masayuki) (70847160)	大阪大学・博士(工学)・助教 (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	成島 尚之 (Narushima Takayuki) (20198394)	工学研究科・博士(工学)・教授 (11301)	
連携研究者	安田 秀幸 (Yasuda Hideyuki) (60239762)	京都大学・工学博士・凝固機構検討 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関