

# 金属系材料の3次元積層造形技術の基礎

小泉雄一郎<sup>\*1)</sup> 千葉晶彦<sup>\*2)</sup> 野村直之<sup>\*\*</sup> 中野貴由<sup>\*\*\*</sup>

## 1. はじめに

3Dプリンター、積層造形、アディティブマニュファクチャリング等と称される一連の技術が、設計から生産までの期間の大幅な短縮、一品一品のサイズ・形状が異なる部材を大量生産するマスカスタマイゼーション、部材形状の複雑さに依存しない製造時間とコストなどを可能とする革新的製造技術として注目されている<sup>(1)</sup>。積層造形技術は、造りたい3次元体の2次元スライス形状に沿って材料を結合させた層を形成し、それを積み上げて結合していくことで3次元形状をもつ造形体を得る技術であり、一般には3Dプリンターとして知られる。これまでは、鑑賞、3次元形状確認の支援、製品を製造する前の試作等を目的とした造形に用いられ“Free Form Fabrication”や“Rapid Prototyping”と呼ばれてきたが、最近では、材料を逐次付加して3次元形状を得て工業製品等の実用部材を製造する種々の技術と併せて Additive Manufacturing (AM, 付加製造) 技術と総称され世界中で注目されている。AM 技術では、鋳造、切削、塑性加工といった従来の成形加工技術では実現が不可能あるいは極めて困難な形状でも成形が可能である。そのため例えば、設計上は最高の部材性能を得るために最適とわかっているも工程上の制限により実現しなかった形状に材料を成形することが可能である。加えて、従来と同じ形状の部材を製造する場合でも、(i)材料消費の歩留まりがよい。(鋳造では押し湯や溶湯の流路で凝固して廃棄される部分、切削加工では切削粉として廃棄される部分があるのに対し、AM では実部材と少量の支持部材を構成するのに必要なだけの材料のみが消費され、材料の消費を最小限に留めることができる。)、(ii) 部品の在庫をなくせる。(造形用の材料と CAD データがあればいつでも部材を製造できるため、金型を用いた大量生産の場合のように予備部材の在庫をもつ必要がない。)、(iii)輸

送時間・エネルギー・コストの縮減(現状では大工場で製造された部材が各地の組立工場に輸送されているものを、各地に造形装置を置き原料のみを貯蔵しておけば、データを転送して造形することにより現地で必要な部材を必要なだけ製造でき、輸送の時間、エネルギー、コストが抑えられる。)などの利点があり、製造業界で強い関心を集めている。

しかしながら現状で実用化されている製品は、装飾品などの形状や外観が重要で大きな耐荷重を必要としない用途や、破損しても深刻な問題とならない用途などに限られ、広い用途で従来製法を代替するには至っていない。金属材料のポリマーやセラミックスに対する最大の優位性である強靱性を活かした用途での金属積層造形の実用化には高い耐久性の保証が求められる。さらに言えば、積層造形体の強度や機能が従来製法で得たものより優れる場合も多く<sup>(2)</sup>、積層造形プロセス特有の組織形成を活用し、優れた材料が得られることも期待されている。そのような優れた特性を再現性よく発現させ積層造形の可能性を十分に発揮させるためには、造形条件-組織-特性-性能の相関に関する知見を蓄積し、造形物の特性の支配因子を解明し、特性保証の指針を確立することが必要である。そのためにはまず、現在の金属積層造形プロセスの基本的原理とその中で生じる物理現象を正しく理解することが不可欠であり、金属学の各分野の専門家の参画と協力体制の構築が望まれる。本稿では、そのような協力の機会となることを期待して、金属系材料の積層造形技術の基礎について紹介する。

## 2. 付加製造(AM)技術の種類と金属積層造形

国際標準化機構による用語定義(ISO 52900)では、AM 技術は、3Dモデルデータから部材を製造するために材料を結合するプロセスと定義され、以下の7つのカテゴリー、即ち、Binder Jetting (BJT, 結合剤噴射)、Directed Energy

\* 東北大学金属材料研究所；1)准教授 2)教授(〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)

\*\* 東北大学大学院工学研究科；准教授

\*\*\* 大阪大学大学院工学研究科；教授

Fundamentals of Metal 3D Printing Technologies; Yuichiro Koizumi\*, Akihiko Chiba\*, Naoyuki Nomura\*\* and Takayoshi Nakano\*\*\* (\*Tohoku University, Sendai. \*\*Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai. \*\*\*Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita)

Keywords: additive manufacturing, 3D-printing, powder bed fusion (PBF), directed energy deposition (DED), electron beam melting (EBM), selective laser melting (SLM)

2017年9月11日受理[doi:10.2320/materia.56.686]

Deposition (DED, 指向性エネルギー堆積), Materials Extrusion (MEX, 材料押出), Material Jetting (材料噴射, MJT), Powder Bed Fusion (PBF, 粉末床溶融結合), Sheet Lamination (SHL, シート積層), Vat Photo-Polymerization (VPP, 液槽光重合)に分類されている。尚, 括弧内のアルファベット3文字の頭字語は, 2017年8月現在ISOにて検討されている略称であり, 他分野で用いられている略称との混同を避けるため2語からなる用語でも3文字で表されている。略称の後の和語は, ISO52900 (Additive Manufacturing, Terminology)に対応する日本工業規格(JIS)の用語として提案されているものである。これらのうち金属材料に適用されているのは, BJT, DED, PBF, である。1990年代にはBJTの金属積層造形が主流であり, 現在でも活用されているが, 最近の主流はDED, PBFとなっている。以下に, これら2つの積層造形法の基礎的原理と特徴を解説する。尚, 「積層造形」という用語は日本で普及しておりAMと同じ意味で用いられている。しかしAMは積層を前提としてはおらず, ISO52900でも「ほとんどのAMでは層を形成する」と説明されており, 「積層造形」は「AM」のうちの層を形成するタイプのものを指す。一方, “manufacturing”には, 試作や形状確認ではなく「(製品を)製造する」という意味が込められており「製造」と訳すとその意味が保たれるので「付加製造」が“AM”が持つのとほぼ同じ意味をもつ。(因みに中国語でAMを表す用語は「増材製造」である)。ただし, 現在のAM技術の殆どが積層技術であり, 本稿で扱う技術も全て層を重ねるものであること, また現状普及している用語であることから, 「金属積層造形」の語を用いて解説する。

### 3. 指向性エネルギー堆積法(DED)

DEDでは, 材料を付加したい部分に, ワイヤーの繰り出しや粉末の噴射により造形用材料を供給しながら高エネルギービームを照射することで, 下地材料もしくは下地材料と付加する材料の両方を溶融させ造形物を構成するための材料を堆積させる(図1)。これを, 材料堆積位置が造形物形状に沿って連続的に移動するように材料供給デバイスとビーム源を基材に対して相対的に移動させて行うことで立体的造形物を

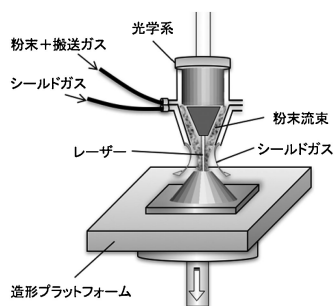


図1 指向性エネルギー堆積方式の金属積層造形プロセスの模式図。

得ることができる。多くのDEDでは, ビームにレーザーが用いられ, 材料は粉末として供給される。粉末は不活性ガスの流束によって搬送される。その他にも, エネルギービームに電子ビームやプラズマアークを用い, 材料がワイヤーとして供給されるものがある。ほとんどのDEDでは, 基材にビームが照射されて溶融池が形成され, その溶融池に金属粉末やワイヤーが注入され材料が付加される。これらのDED方式の積層造形は, レーザ肉盛り(Laser Cladding)としてタービン翼や金型などの高付加価値の金属部材の補修に用いられてきた技術を応用したものである。一部の粉末は空中でレーザー照射を受け溶融した状態で付加される。最近, その現象を積極的に利用して, 粉末を空中で溶融させて基材に付加する方式のDEDも開発されている。

DED方式の造形装置は, 国内外の装置メーカーから市販されており各社で改良や新技術の開発が続いている。切削加工を行うマシニングセンターに組み込み, DEDで付加した材料を研削して仕上げる装置も複数のメーカーから販売されている。また既存のマシニングセンターにDED機能を追加するデバイスも存在する。DEDは, 後述するPBFと比べ, 使用できる粉末の許容範囲が広い。さらに, 粉末搬送過程で複数種の粉末を混合できるため, 混合比率を変化させながら造形することで, 傾斜機能材料も製造できる。

造形用材料をワイヤーとして供給するタイプのものや, 熱源をレーザーではなくアークプラズマや電子ビームとしたものも存在する。ワイヤー供給式の造形精度はあまり高くないが, 供給材料のほぼ100%が造形物に使用され, 粉末を用いる場合に比べて材料消費の歩留まりがよく, 気孔生成の確率も低いことから, 精度よりも緻密さが重要な用途で有用である。電子ビームを用いるDEDは, 真空雰囲気で行う必要があり搬送ガスが使えないため, 材料供給は必然的にワイヤー供給式となる。このタイプのものに米国Sciaky社のElectron Beam Additive Manufacturing (EBAM)がある。アーク溶接を応用したWire Arc Additive Manufacturing (WAAM)は, 溶接装置とトーチ位置制御ロボットで構成される。造形用材料をアーク生成の電極とするMetal Inert Gas (MIG)溶接が可能な場合は, アークの中心から材料が供給される。チタン合金など, 造形用材料を消耗電極にするとアークが不安定となる場合には, 非消耗タングステン電極でアークを発生させ造形用材料のワイヤーを脇から供給するTungsten Inert Gas (TIG)溶接が用いられる。

これらのDED方式の積層造形では, 必要な部分にだけ材料を供給すればよく, 積層厚さは後述するPBF方式の積層造形に比べて大きいこと等から, 造形速度が速く, 大型部材の造形に適している。例えばEBAMでは5m以上の部材の製造がなされている。

### 4. 粉末床溶融結合法(PBF)

微細な構造を有する部材の造形にはPBFが適する。PBFでは, 造形プラットフォーム(Build Platform)と呼ばれる平

らな金属板の上に原料粉末が敷き詰められ、粉末床 (Powder Bed) と呼ばれる粉末の層が作られる。その層に対し、レーザあるいは電子ビームを、造形物の2次元スライス形状に沿って走査しながら照射することで粉末粒子が溶融して緻密化された材料の層が形成される。一層分の走査が完了すると、造形プラットフォームが積層厚さ分だけ下降し、そこに新たに粉末層が形成される。その新しい粉末層に対して、一層上の高さの2次元スライス形状に沿ってビームが走査され、層内の粉末粒子が結合されて緻密化されるとともに下層にも結合される。これを繰り返して3次元造形物を得ることができる。この基本的な機構は Texas 大学 Austin 校にて開発された。最初はポリマーの粉末を炭酸ガスレーザで加熱して造形がなされたが、ビームの高出力化等により金属にも適用されるようになった。当初、粉末粒子は溶融せずに焼結されるに留まっていたため、この方式は“Selective Laser Sintering (SLS)”等と呼ばれ、造形物は気孔を多く含むものであった。後に、ファイバーレーザや電子ビームといった高出力のビームを用いて粉末粒子を完全に溶融させて造形することで、気孔率の低い造形物が得られるようになり、レーザを用いたものは“Selective Laser Melting (SLM)”，電子ビームを用いたものは“Electron Beam Melting (EBM)”と、「溶融」を明示する名称で呼ばれるものが登場した。尚、論文等では、EBMをSLMに対応させ、Laserを意味するLをElectron Beamを表すEBに置き換えた“SEBM”も用いられる。さらにビームの種類にかかわらず、“Melting”よりもよりプロセスの特徴を反映し、溶融だけでなく凝固、結合までを意味する“Fusion”を用いて、Powder Bed Fusion (PBF)と呼ぶことがASTMで決定されISOでも合意された。さらに用いるビームの種類や材料を表す頭字語と組み合わせ、例えば金属レーザ積層造形をLB-PBF-M (LB: Laser Beam, M: Metal)等と称することも提案されているが未だ普及はしていない。本稿では、レーザ積層造形と電子ビーム積層造形を意味する略称として、広く普及している“SLM”と“EBM”を用いて解説する。

### (1) PBFにおける金属粉末の溶融凝固

PBFでの原料粉末には通常ガスアトマイズ粉が用いられる。これは、粉末を供給する過程および平坦で均一な粉末層を形成する際に高い流動性が要求されるためである。ガスアトマイズ粉は、水アトマイズ、粉碎、化学反応等で得られる粉末に比べ真球度が高く流動性が高くPBFに適している。ガスアトマイズにより球状粒子を得るのが難しい場合には、個々の粉末粒子を後処理で再び溶融凝固させて真球に近づけるプロセスも開発されている。最近では、ガスアトマイズに用いられるガスが気泡として粉末粒子内に存在し、それが造形物中に残存することが、造形条件を最適化しても無くせない欠陥の原因となることが見出された。そのため、遠心力で溶融金属液滴を飛散させて粉末を得るプラズマ回転電極法で製造された粉末が、気泡を含まない粉末として関心を集めている<sup>(3)</sup>。

粉末粒子に照射されたビームは、ビーム種、波長、エネルギー、材料、粉末形状、粉末表面状態により決まる吸収率で粉末粒子に吸収され温度が上昇し融点以上に達すると溶融が生じる。生成した融液は、周囲の粉末粒子および既にビームが照射され溶融凝固した部分の再溶融で生成した融液と結合するとともに、流動して側面や下層と融合する。ビーム出力と走査速度が適切であれば幅が粉末粒子の数倍～数十倍に走査方向に伸張した溶融池を形成し、溶融池は走査速度と同じ速度で移動する。溶融池のサイズ・形状が安定して移動すると連続したビードが形成される。隣接するビードが結合するような走査線間隔でビーム走査を繰り返すことで、2次元スライス形状をもつ緻密層が形成される。ビーム出力や走査速度が不適切だと、気孔や亀裂等の欠陥が生じる。以下ではSLMとEBMの特徴を熱源の違いに関連づけて説明する。

### (2) レーザ積層造形 (SLM)

SLM(図2(a))は、レーザを熱源とするPBF方式のAM技術である。金属積層造形で最も多く、ドイツを中心に各国のメーカーから多数の装置が販売されており、国内にも複数のSLM装置メーカーがある。現在多く用いられているレーザは出力約400W～1kWのファイバーレーザである。発生したレーザは、ガルバノスキャナーによって走査される。造形には粒子径10～40μm以下と後述のEBMに比べ微細な粉末が使用される。用いる粉末粒子が小さいと、PBFで造形が安定する積層厚さも小さくなる。積層厚さが小さいと造形速度も遅くなるがその分だけ造形物の表面粗さを小さくすることができ、微細な構造の造形も可能となる。研究レベルでは、平均粒子径10μm以下の粉末を用いて造形した例もある<sup>(4)</sup>。

レーザの走査で材料が連続的に溶融凝固するという意味で、SLM中の溶融凝固はレーザ溶接中のそれと類似するが、両者の間にはいくつかの大きな違いがある。バルクの接合を目的とするレーザ溶接では突き合わされた接合面全体を溶融させるための深い溶け込みが必要となる。したがってレーザ溶

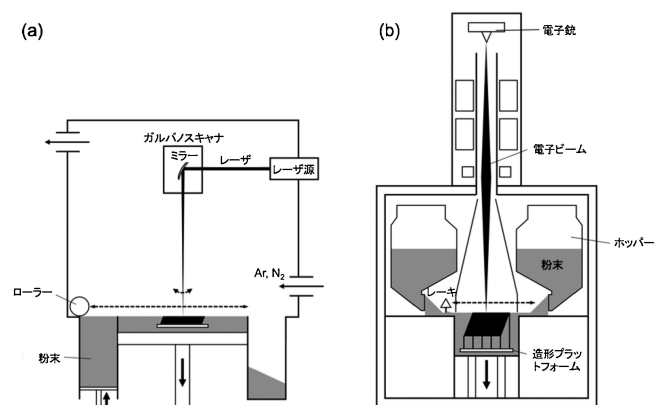


図2 粉末床溶融結合(PBF)方式の金属積層造形装置の模式図。(a)レーザ積層造形(SLM)，(b)電子ビーム積層造形(EBM)。

接では、高エネルギーのレーザーによる金属の蒸発とその反力で溶融池が凹み、そこにさらにレーザーが照射されることで「キーホール」と呼ばれる深い空洞を形成し深い溶け込みを得ている。一方、SLMでは粉末粒子1~2個分の厚さの粉末層と緻密なバルク部分の表面を、凝固後に空隙が生じない程度に溶融させるため、ビームの単位走査距離当りの入熱量はレーザー溶接の場合に比べて大幅に小さい。こうした違いは、凝固速度、温度勾配、溶融池内の流動などに影響し、凝固組織を通じて材料特性にも影響すると考えられる。

### (3) 電子ビーム積層造形(EBM)

EBM(図2(b))は、基本的にはSLMのレーザーを電子ビームに置き換えたものと言え、両者の間には共通点が多いが、ビームの性質の違いに由来した違いがある。特に重要な違いとして真空中で造形することによる酸化の抑制が挙げられ、その他、吸収効率、走査速度、粉末への要求特性等が異なる。これらの違いが、造形速度や造形物の材料組織、特性、表面粗さなどの違いに繋がる。

EBMの電子ビームは、電子顕微鏡や電子ビーム溶接と同様の電子銃で生成される。即ちタングステンあるいはLaB<sub>6</sub>、CeB<sub>6</sub>等で構成される陰極の加熱で発生する熱電子が加速されビームとなる。電子ビームは磁界コイルにより収束・偏向され粉末に照射される。現行のEBMで用いられる加速電圧は60 kV、ビーム電流は1~100 mAで、低出力型の電子ビーム溶接のそれらと同等である。電子顕微鏡と比べると、加速電圧は走査電子顕微鏡(1~30 kV)と透過型電子顕微鏡(100~1000 kV)で用いられるものの中にある。照射電流は、電子顕微鏡で用いられる10<sup>-12</sup>~10<sup>-7</sup> Aと比べて、10<sup>5</sup>~10<sup>10</sup>倍程大きい。したがって電子顕微鏡ではビーム径が1 nm程度であるのに対し、EBMのビーム径は10<sup>5</sup>倍程度大きく約0.1~1 mmと、造形に用いられる粉末粒子サイズと数倍となっている。

EBMに用いる粉末の粒子径は分級により40~150 μm程度に調整される。SLMと同様に粉末の流動性が必要であり、形状は真球に近く、サイズの分布が単分散である粒子が望ましい。EBM用の粉末粒子がSLM用のものよりも大きい理由にはいくつかあるが、造形後の粉末回収における粉塵爆発の回避が最も重要である。粒子径の大きな粉末を用いることで、現状では造形物の表面がSLMで得られるものよりも粗くなる。大きな粉末粒子を用いることには、粉塵爆発を避けること以外にも、積層厚さを大きくし、造形速度を大きくできる利点もある。EBMでは粉末層形成後に、粉末を予備加熱する。予備加熱後の粉末粒子同士は弱く結合しており、造形直後の造形物周囲の粉末粒子は、ヘラで搔くと崩れる程度の強度で固まっている。その固まりは、同じ造形用粉末を圧縮空気で噴射されることで解砕される。その際、粉末粒子同士の衝突で発熱し爆発が生じる恐れがあり、粉末粒子が小さいほどその危険性は増す。この粉塵爆発の避けることが、EBMにて粒子径の大きな粉末が使用される理由の一つとなっている。解砕された粉末は再度分級され再利用され

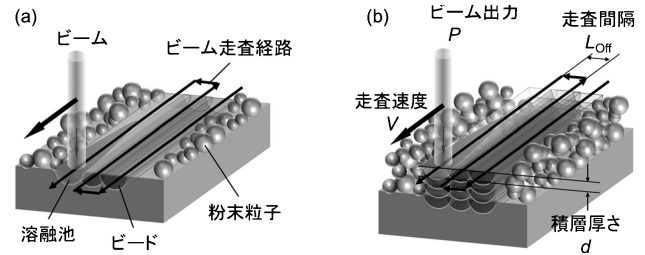


図3 PBFプロセスの模式図。(a)第一層目の形成、(b)積層の過程と投入エネルギー密度を決めるパラメータ。

る。電子ビームは磁界コイルで走査されるため、レーザーガバナミラーで走査されるSLMよりビーム走査速度を10<sup>3</sup>倍以上大きくすることも可能である。予備加熱はこの高速走査機能を用いて行われている。さらにこの高速走査を活用し、凝固挙動を制御することによる組織制御を目指した研究が国内外で展開されている。

## 5. 金属積層造形物の特徴

積層造形された金属部材は、造形プロセスの種類、造形条件、造形物サイズ・形状等により異なる性質を持つが、いくつか共通点がある。まず、従来の粉末冶金製品即ち焼結部材に比べ積層造形体の気孔率が低い。これは、焼結では粉末粒子間の空隙が閉空孔となり気孔が残り易いのに対し、積層造形では粉末粒子を完全に溶融させるので粒子間にも融液が充填し易いためである。ただし、例えばPBFでは、ビーム出力が小さい、走査間隔が大きい等、造形条件が不適切であると気孔率は焼結体のそれよりも高くなる<sup>(5)</sup>。適切な条件の指標として単位体積当たりの入熱エネルギー密度(ビーム出力/走査速度/走査線間隔/積層厚さ)が用いられる(図3)。入熱エネルギー密度は、実際、緻密化条件の指標となるが、同じエネルギー密度でも低出力のビームを小さい走査間隔で照射すると、Ballingと呼ばれる融液が合体し大きな粒が形成される現象により欠陥が生じることなどを考慮する必要がある。

もう一つの特徴は結晶配向である。積層造形では基本的に積層方向への温度勾配が大きくその方向への凝固界面の移動が支配的となり、それを反映した結晶配向が生じ易い。筆者らの研究<sup>(5)~(7)</sup>を含むいくつかの研究で立方晶結晶金属における造形方向への〈100〉配向が認められている。DEDの一種であるLaser Metal Forming (LMF)<sup>(8)</sup>の研究では、エピタキシャル成長が生じる条件がHunt<sup>(9)</sup>の提案した柱状等軸遷移(Columnar-Equiaxed Transition, CET)理論で示されており、単結晶タービン翼修復等への応用が期待されている。

## 6. おわりに

金属積層造形の基礎として、現在主流の金属積層造形法であるDED方式とPBF方式の造形装置の基本原理とその特徴について解説した。CADデータからの直接造形や自由形状の成形が可能であることでよく知られる金属積層造形は、金属材料学の観点からは、造形過程特有の結晶成長挙動に由来した結晶配向性の制御による材料特性制御が注目されており、それを活用した単結晶タービン翼や、力学的生体親和性の高いインプラント創成を目指した研究が展開されている。本稿では、金属積層造形に焦点を絞って解説したが、AM技術の適用範囲は、ポリマー、セラミックスは勿論、細胞を造形用材料としたバイオ3Dプリンティングに至るまで多岐にわたる。そのような広範な材料を対象としたAM技術に関わる議論の場として、2017年3月には本会講演大会で、公募シンポジウム「医療・福祉のためのAdditive Manufacturingの材料科学」が開催され、最新の研究に関する講演と多数の聴講者を得て、活発な議論がなされた。同シンポジウムは、2018年3月大会でも、継続開催される予定である。2017年3月の第一回シンポジウムの基調講演者による記事を中心とした小特集が、2018年4月発行の本誌に掲載される予定である。詳細はその小特集を参照されたい。

本稿で紹介した内容の一部は、TRAFAM(技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構)、ならびに内閣府が主導するSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「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」(管理法人:NEDO)の協力を得て実施されたものである。

## 文献

- (1) 設計者・技術者のための金属積層造形技術入門, 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構, (2016).
- (2) T. Fujieda, H. Shiratori, K. Kuwabara, T. Kato, K. Yamanaka, Y. Koizumi and A. Chiba: Mater. Lett., **159** (2015), 12-15. など.
- (3) W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff and S. S. Babu: Int. Mater. Rev., **61** (2016), 315-360.
- (4) A. Streek, P. Regenfuss and H. Exner: Proc. the 25th Annual SFF Symposium, (2014), 377-389.
- (5) A. Takaichi, T. Nakamoto, N. Joko, N. Nomura, Y. Tsutsumi, S. Migita, H. Doi, S. Kurosu, A. Chiba, N. Wakabayashi, Y. Igarashi and T. Hanawa: J. Mech. Behav. Biomed. Mat., **21** (2013), 67-76.
- (6) S. H. Sun, Y. Koizumi, S. Kurosu, Y. Li, H. Matsumoto and A. Chiba: Acta Mater., **64** (2014), 154-168.
- (7) T. Ishimoto, K. Hagihara, K. Hisamoto, S. H. Sun and T. Nakano: Scri. Mater., **132** (2017), 34-38.
- (8) M. Gäumann, C. Bezencon, P. Canalis and W. Kurz: Acta Mater., **49** (2001), 1051-1062.
- (9) J. D. Hunt: Mat. Sci. Eng., **65** (1984), 75-83.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

小泉雄一郎

1999年 大阪大学大学院工学研究科博士課程修了

1999年10月 大阪大学大学院工学研究科助手(2007年4月より助教)

2007年3月 マサチューセッツ工科大学客員研究員(2008年3月迄)

2010年4月- 現職

専門分野: 材料強度, 材料組織, Additive Manufacturing, 計算科学

◎実験と計算機シミュレーションを組み合わせた手法による合金・プロセス設計を用いた耐熱材料や生体材料の開発の研究に従事。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★



小泉雄一郎

千葉晶彦

野村直之

中野貴由