

## 金属 Additive Manufacturing における材質制御

大阪大学大学院工学研究科

マテリアル生産科学専攻 教授 小泉雄一郎

### 1. はじめに

筆者は学部時から1999年に本研究科マテリアル科学専攻で博士の学位を取得するまで転位論に基づく疲労破壊機構の研究に従事した後、知能・機能創成工学専攻の助手（1999～2009年）として特性改善のための材料組織制御の研究に従事した。2010年に東北大学金属材料研究所の准教授に着任してから、金属材料のAdditive Manufacturing (AM) プロセスと材料特性に関する研究を行ってきた。この度本研究科マテリアル生産科学専攻の材料設計・プロセス工学領域の教授を拝命し、同時に異方性カスタム設計・AM研究開発センター（センター長：田中敏宏工学研究科長、副センター長：中野貴由教授）でも研究活動を開始した。この場を借りて研究の一部を紹介させて頂く。

### 2. Additive Manufacturing (AM)

3Dプリント技術は、1980年代後半から2000年頃までは、形状確認のための試作を目的とした技術とされてきたが、21世紀に入った頃から、緻密な部材の製造が可能となり、鋳造、鍛造、焼結、切削等の従来の加工と同様に製造技術として認識されてきている。マシニングセンター等による除去加工と対比して、材料の付加による製造法であることを強調してAM技術と呼ばれている。従来の成形技術に比べ、形状の自由度が高く、CADから直接多様な形状の部材を製造でき、デジタルものづくりの中核技術の一つとされる。

AMで製造された金属部材の性能は、従来のプロセスで製造された部材のそれと大きく異なる場合が多い。従来材より劣る場合も、従来材より著しく高い性能を発現する場合もあり、それらを自在に制御しながら健全な造形を可能にするための、学術的基盤の構築を目下の研究課題としている。多々のAM技術のうち筆者が研究してきたものは粉末床溶融結合（Powder-Bed-Fusion: PBF）と呼ばれる。PBFでは敷き詰めた薄い粉末層をレーザービーム（LB）や電子ビーム（EB）により選択的に溶融結合させ、部材の水平断面の形状を有する緻密な層を形成し、それを下層と結合しながら積み上げることで3次元形状の造形物を得る。他の方式と比べ、形状の自由度と寸法精度の高さが特徴である。現職着任までEBを熱源とするPBFを、現在はAMセンターにてはLBを熱源とするPBFの研究にも従事している。以下では、PBF方式の金属AMで製造された金属材料の特徴とその制御に関する研究について紹介する。

### 3. PBFで3Dプリントされた金属材料の特徴

当然のことながら、PBF式の金属AMプロセスでは、粉末粒子を溶融凝固させて緻密体を得るため、ビームの出力、走査速度、走査間隔等のプロセスパラメータが、材料特性、粉末性状、造形物形状等に応じて最適化される。一般的造形条件でのPBFで製造された金属材料に共通する特徴として、(1)微細な凝固組織と(2)強い結晶配向がある。緻密化可能な範囲でこれらを制御するプロセス条件の最適化で形状と特性を同時制御する研究を展開している。

(1) 微細な凝固組織：緻密化を最優先した造形条件では冷却速度が $10^3 \sim 10^6 \text{K/s}$ と鋳造の約 $10^2 \text{K/s}$ に比べて1～4桁大きい。そのため凝固中の溶質再分配が生じ難く、凝固組織は微細になり凝固偏析も微小となる。例えば鋳造では $100 \mu\text{m}$ 程度間隔の凝固偏析を生じて均一化熱処理が困難な合金でも、PBFで製造すると偏析の間隔は $1 \mu\text{m}$ 程度となり得る。このとき均一化に要する熱処理時間は約 $1/10^4$ となる。1週間の熱処理を1分に短縮でき、鋳造から始まる従来製法では実用不能な材料でも、AMの適用で実用可能となる。事実、5種類以上の元素を当モル比に近い割合で合金化するHigh Entropy合金の研究では、AMの適用で偏析が解消され、海水淡水化用ポンプや石油掘削用ドリル等の過酷環境で要する強度と耐食性を兼ね備えた新材料が産み出された。

(2) 強い結晶配向：筆者がはじめて金属AMの研究で用いた人工関節用Co-Cr-Mo (CCM) 合金の研究では、EB走査方向を各層毎に90度回転させて造形すると単結晶状組織が得られ、力学特性が強い異方性を発現することを見出した。当初この単結晶状組織の形成は、先述の大冷却速度による微細組織形成と矛盾すると思われた。しかし

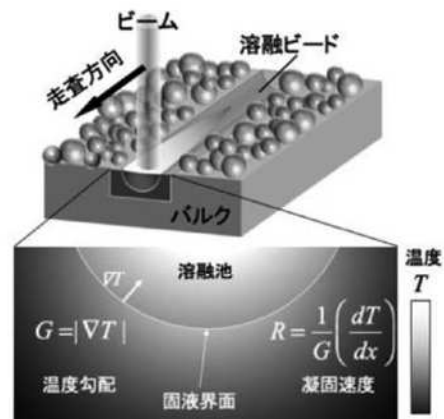


図1 PBFにおける凝固条件の模式図

この強い結晶配向は、凝固マップ（図2）で理解される。凝固マップは、固液界面における温度勾配（ $G$ ）、固液界面移動速度（ $R$ ）、結晶組織との関係を表す。高 $G$ -低 $R$ の組成的過冷の生じない条件では、平滑界面が安定で単結晶育成に適した条件となる。低 $G$ -高 $R$ の組成的過冷が大きい条件では樹枝状晶が形成される。さらに低 $G$ -高 $R$ の条件では、柱状-等軸遷移（Columnar-Equiaxed Transition: CET）により核生成頻度が上昇し等軸晶が得られ易くなる。一般的な鑄造の凝固条件は図2示すように大半が等軸晶形成の範囲、一部は柱状晶形成の範囲にある。また、等冷却速度（ $=G \cdot R$  [K/s]）の条件は両対数の凝固マップ上で傾き-1の直線上に分布する。ここで重要なのは、同じ冷却速度でも、高 $G$ -低 $R$ の条件では柱状晶、低 $G$ -高 $R$ の条件では等軸晶と得られる組織が異なることである。一般に高冷却速度では等軸微細粒が得られ易いと考えられているが、冷却速度が大きくても $G$ が大きければ、結晶配向が強い柱状晶で、かつ凝固偏析の間隔が極微細な、一見両立しない二つの特徴を兼ね備えた組織が得られる。

**4. AMにおける配向制御：** 上記のPBFにおける柱状晶組織の形成の原理を応用した配向の制御が可能となる。PBFで緻密体が得られる条件にて $G$ と $R$ の組み合わせを変えて結晶組織と材料特性を制御できる。例えば、通常一定とする走査線間隔をビーム出力や走査速度等に応じて変動させれば緻密化可能な条件範囲を広げ、高配向の柱状晶から無配向の等軸晶まで制御可能と期待される。CCM合金を通常の条件で造形すると、積層方向に $\langle 100 \rangle$ 方位が強く配向する。その強度は積層方向には十分高いが、他の荷重軸では規格値未満であった。その問題は低温安定な六方最密（HCP）相と高温安定な面心立方（FCC）相の間の相転移を活用した熱処理による結晶粒微細化・無配向化で解決された。しかし相転移による組織微細化が可能な合金系は限られており、多くの合金では凝固マップを活用した組織制御が重要である。

一般的なPBFの造形条件では凝固界面での $G$ が高く配向が強くなるが、低 $G$ となる条件で緻密体が得られれば、等軸微細粒組織を有し等方的に高強度を示す部材が得られ、一般的な工業製品と同様の特性を示し、かつ3Dプリントの自由成形性と構造最適化計算を活かした部材の製造

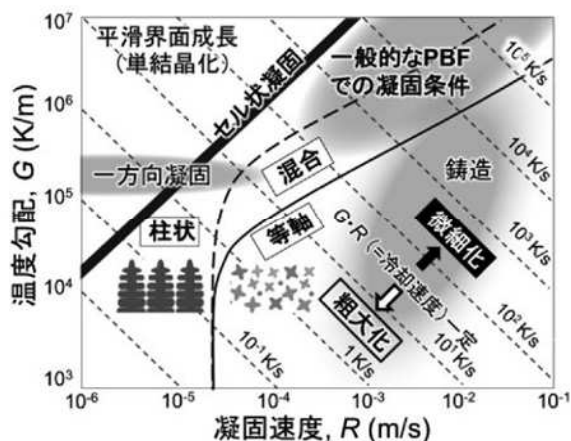


図2 金属AMにおける組織制御の指針（柱状・等軸遷移（Columnar-Equiaxed Transition: CET）に基づく凝固マップの例）

が可能となる。そのために我々は、ビームの走査間隔、走査速度、ビーム出力等の組み合わせで、緻密体が得られる範囲を広げ、凝固条件を多様に変えて造形中に凝固組織を自在に操るための研究に取り組んでいる。さらに溶融金属内の流速、固液界面移動方向等のパラメータを軸とする多次元空間での凝固マップ構築を、鉄鋼、ニッケル合金、チタン合金等種々の材料を対象に進め、各材料の物性、例えば、液相の表面張力温度依存性と溶融池表面での大きな温度勾配の効果で発現するマランゴニ対流に強く影響し、 $G$ と $R$ と組織の関係がCETによる予測と逆傾向を示す等、凝固マップ構築を通じて凝固現象の新たな側面を見出し、それを利用した特性制御の研究を進めている。

### 5. おわりに

AMプロセスは成形と同時に材質を制御するプロセスになる。さらに造形中にプロセス条件を変更し、部位毎の要求特性に応じた組織の造り分けも可能である。例えば人工股関節を製造する場合（図3左）、大腿骨に埋入するステム部は骨との力学的親和性を優先して弾性率の低い $\langle 100 \rangle$ 配向した単結晶状とし、曲げ荷重下での疲労強度が必要なネック部では等軸微細粒とすることで機能性と耐久性の両方の向上が可能となる。さらにガスタービン翼を製造する場合（図3右）、高温で遠心力を受ける翼部を $\langle 100 \rangle$ 配向した単結晶状としてクリープ強度を高め、タービンディスクと連結するダブテール部は多軸応力下での強度・靱性に優れた等軸組織にすれば、タービン翼の軽量化や長寿命化を通じて、省エネルギー、低炭素化に貢献できる。こうしたAM独自の高性能性部材の製造を実現し、高品質化による日本の競争力向上に繋げていきたい。その早期実現には、(I) 機械学習によるプロセス最適化、(II) AM用新合金の材料設計、(III) 造形中の検査・修復を可能とインプロセスモニタリング技術の開発が重要である。今後さらに複数の合金で構成される部材の一体製造が可能なAM、即ちマルチマテリアルAM技術へと展開したい。

末筆ながら、これまでご指導頂いてきた先生方、共同研究者の皆様、先輩・後輩諸氏、学生諸君、お世話になっている方々に深く感謝申し上げます。

(材料物性 平成7年卒 9年前期  
マテリアル科学 11年後期)



図3 形状・組織同時制御金属AM技術応用イメージ