

招待講演

## レーザー粉末床溶融結合法における結晶成長のデジタルツイン解析

Digital-twin analysis of crystal growth in laser powder-bed fusion process

○奥川 将行, 小泉 雄一郎, 中野 貴由(大阪大学)

Masayuki Okugawa, Yuichiro Koizumi, Takayoshi Nakano (Osaka Univ.)

## 1. はじめに

金属付加製造 (3D プリント、AM) では、従来の切削加工技術とは違い、材料を付加することによって部材を作製するため、形状を自在に制御することが可能となる。コンピュータによる構造最適化設計と組み合わせによって軽量化することや、溶接工程省略化によって製造プロセスを効率化することが期待される。

金属 AM では特に粉末床溶融結合法 (PBF) 型 AM の普及が進んでいる。PBF では、レーザーや電子ビームの照射によって金属粉末を溶融凝固するプロセスを繰り返して造形部材が作製される。金属材料の機械的特性は、その微細構造に大きく依存するため、近年ではプロセス条件の制御によって部材内での微細組織の制御することに注目した研究が盛んに行われている。

金属の PBF プロセスで得られる組織は凝固組織であり、凝固組織は一般に、固液界面での温度勾配  $G$  と凝固速度  $R$  の組み合わせにより決定されると考えられている。したがってその制御指針として、Hunt<sup>1)</sup>の柱状・等軸遷移 (CET) クライテリアに基づいた凝固マップを構築し (図 1)、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。しかしながら、PBF プロセスでは、特有の急速昇温溶融・急冷凝固条件のために、CET とは逆の組織形成が起こる場合がある。本発表では、これまでに取り組んできたステンレス鋼<sup>2)</sup>と Al-Si 共晶合金<sup>3,4)</sup>の組織形成の研究に関して紹介を行う。

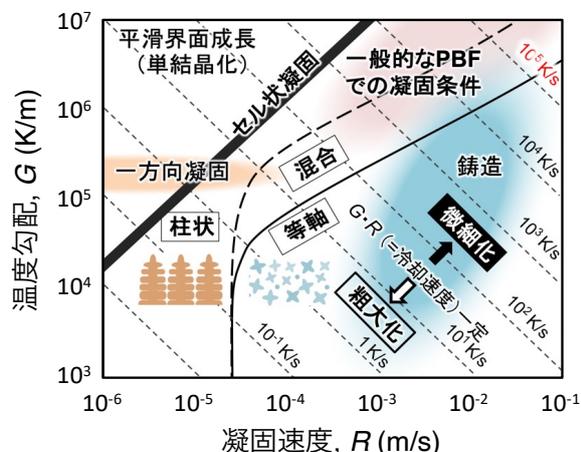


図 1. 凝固マップの例。Hunt の CET クライテリア<sup>1)</sup>では、高温勾配  $G$  および低凝固速度  $R$  では柱状晶が形成し、低  $G$  および高  $R$  では等軸晶組織が形成される。

## 2. 高速流動による逆柱状・等軸遷移

オーステナイト系 316L ステンレス鋼は、医療用インプラントや化学プラント、原子力発電所など広い分野で一般的に使用されている。近年では、さらなる応用範囲拡大を目的として、AM を適用することが提案されている。固相変態を示さないオーステナイト鋼では、凝固組織がそのまま部材組織となるため、凝固条件と微細組織との関係解明は特に重要となる。我々は、PBF プロセスでの凝固条件と微細組織との相関を明らかにすることを目的に研究を進めてきた。その際、PBF での固液界面における凝固条件の実測は現状不可能であるため、実験での微細組織解析と実験と整合した熱流体力学 (CtFD) シミュレーションを対比する、デジタルツイン的な解析によってその関係を明らかとしてきた。

316L ステンレス鋼に電子ビーム照射して形成された微細組織中の結晶粒のアスペクト比の、それと対応する CtFD シミュレーションによって推定した凝固条件に対するプロットを図 2(a) に示す<sup>2)</sup>。  $G = 10^5 - 10^8 \text{ K m}^{-1}$  および  $R = 10^{-3} - 10^0 \text{ m s}^{-1}$  の高温勾配および高凝固速度条件下で凝固が進展しており、その中でも高  $G$  の領域で等軸粒が多く、一般的な CET とは逆の傾向での組織形成が見られた。

電子ビーム照射溶融領域では、溶融池内の局所的な温度差によって表面張力に局所的な差が生じる。このような表面張力差がある場合には、マランゴニ効果によって流動が生じる。PBF では温度勾配  $G$  が大きく、結果として溶融地内部には最大流速  $300 \text{ mm s}^{-1}$  程度 (図 2(b)) の高速流動が生じ、凝固条件が柱状晶形成範囲であっても、高流速領域では流動による dendrite の分断やその移流によって等軸晶が形成されることが示唆される。現在は、これらの凝固条件を種々の合金に対して評価し、それらと得られる微細組織との相関をデータ科学的手法によって調べている。プロセス条件の最適化によって、PBF での微細組織制御による材料特性制御の最適化が可能となり、PBF の信頼性向上へと繋がることが期待される。さらには、ベイズ最適化などによる合金設計の最適化も組み合わせることで微細組織制御の可能範囲が拡大され、部材のさらなる高性能化へと繋がることが期待している。

## 招待講演

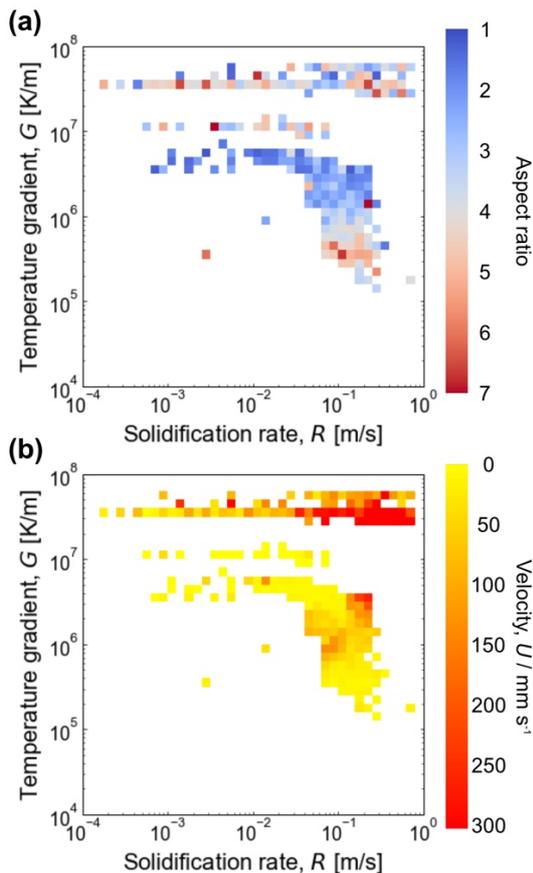


図2. (a) 316L ステンレス鋼の凝固マップ<sup>2)</sup>。CtFD 計算によって推定した凝固条件をアスペクト比によって色付けしている。高  $G$  領域で等軸晶が形成されており、CET クライテリアと逆の傾向を示す。(b) 凝固時の流速分布。金属 AM では最大流速  $300 \text{ mm s}^{-1}$  程度の流動が生じている。

### 3. PBF での高速昇温溶融による等軸微細化

最近では、PBF プロセスにおける特有の急冷速度だけでなく、凝固前の高速昇温溶融にも注目した研究を展開している。CET のクライテリアに従えば、ビーム照射によって形成する溶融池内で、凝固が開始する溶融池境界近傍では柱状晶が形成され易く、溶融池中央では等軸晶が形成され易いと予想される。しかし、Al-Si 共晶合金では溶融池境界近傍では等軸晶が形成される頻度が高く、溶融池中央では柱状晶が形成される頻度が高い。CET から予想される傾向とは真逆の組織形成の傾向を示す。

これに対して我々は<sup>3)</sup>、マルチフェーズフィールド (MPF) シミュレーションにより、PBF に特有の急速昇温溶融において、溶融池境界では液相中に図3に示す Si 結晶相の溶け残りが生じ、それを内在的な不均一核生成サイトとして等軸微細化が起こることを示し、これを溶融池境界近傍での等軸晶形成メカニズムとして提案している。これは、PBF に特有の急速冷却の凝固過程のみならず、従来は注目されてこなかつ

た高速昇温過程もまた組織形成に大きな影響を与えることを示し、溶融条件にまで目を向けることで、PBF における微細組織制御可能範囲のさらなる拡大およびその高性能化が期待される。

PBF によって製造された Al 合金部品は、比強度が高く、耐疲労性が高く、形状の自由度が高いため、自動車、オートバイ、飛行機、スペースプレーンなどの産業分野での実用化が進んでいる。これらの応用においては、微細な等軸晶組織が優れた特性を発現するため、不均一核生成サイトとして接種剤を導入することによって組織を微細化する手法が採用されている。しかしながら、接種剤である希土類元素は高価であり、粉末のコストを大幅に増加させているため、新たな結晶粒微細化 AM プロセスが求められている。我々は、Al 合金での内在的な不均一核生成サイトによる等軸微細化を、AM における新規微細化プロセス開発の潜在的な手がかりとして期待している。

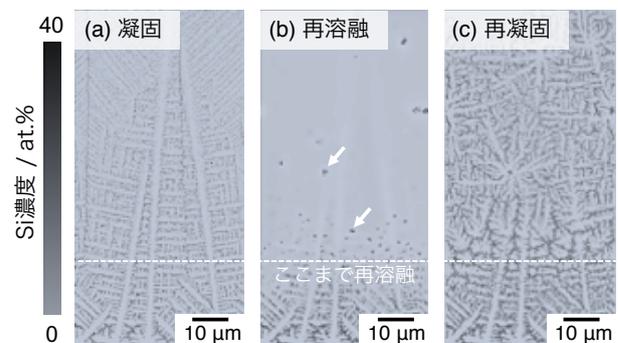


図3. MPF 法によって計算した Al-10mass%Si 共晶合金の溶融・凝固組織<sup>3)</sup>。(a) 液相から凝固した組織には柱状晶が形成した。(b) 再溶融させると、一部の Si (矢印) は融けずに残存し、(c) 再凝固させると、Si が不均一核生成サイトとなり、等軸晶となる。

これまで、PBF における Al-Si 合金の組織制御の指針を得ることを目的として、初期凝固条件、再溶融条件および再凝固条件が組織形成へ与える影響を MPF シミュレーションによって調査すると<sup>4)</sup>、Al-Si 共晶合金の PBF プロセスにおいて、温度勾配の大きな条件で凝固させた組織を高い昇温速度で再溶融を行い、急速な凝固速度の条件下で再凝固を行うことで、微細な等軸晶組織が形成されることが期待された。実際に MPF シミュレーションを行うと、微細な等軸晶組織の形成が予測された。内在的な不均一核生成は、新規な超微細化手法として期待される。

### 参考文献

- 1) J. D. D. Hunt: Mater. Sci. Eng. **65** (1984) 75.
- 2) Y. Miyata et al.: Crystals **11** (2021) 856.
- 3) M. Okugawa et al.: J. Alloys Compd. **919** (2022) 165812.
- 4) M. Okugawa et al: Materials, **15** (2022) 6092.