

超温度場材料創成学：AMを中心とした巨大ポテンシャル勾配による新材料創製

大阪大学 小泉 雄一郎^{1)*}

九州大学 森下 浩平³⁾

物質材料研究機構 戸田 佳明⁵⁾

ファインセラミックスセンター 木村 禎一⁷⁾

名古屋大学 足立 吉隆²⁾

大阪大学 佐藤 和久⁴⁾

富山大学 石本 卓也⁶⁾

大阪大学 中野 貴由¹⁾

1. はじめに

AMプロセス、中でも金属の粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion: PBF) では、電子ビーム (EB) やレーザー (LB) による局所的急速加熱・冷却により特有の微細組織が形成され材料特性に強く影響する。そのため結晶配向や微細組織の制御が造形精度や造形速度の向上と並び重要な研究課題となっている。大阪大学異方性カスタム設計・AM研究開発センター (センター長：中野貴由、副センター長：安田弘行) では、PBFによる部材形状と結晶配向の制御で、材料機能の最大化を図り、医療・航空宇宙・エネルギー分野における技術革新を目指した研究を推進している。同センターについては本誌創刊号にて紹介されている^[1,2]。同センターのプロジェクトは、SIP「革新的設計生産技術」(2014～2018年度)に始まり、近畿経済産業局「Kansai-3D 実用化プロジェクト」(2019年度)、第2期 SIP「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」(2018～2022年度)へと展開され、現在、CREST「カスタム力学

機能制御学の構築～階層化異方性骨組織に学ぶ～(2021～2026年度、代表：中野貴由)^[2]、学術変革領域「超温度場材料創成学」(2021～2025年度、代表：小泉)などが進行中である。

本稿では「超温度場材料創成学」について紹介する。

2. 超温度場材料創成学の概要

「超温度場材料創成学」は、2021年度に文部科学省の科学研究費学術変革領域研究 (A) に採択された16の課題の一つで、正式名は「超温度場材料創成学：巨大ポテンシャル勾配による原子配列制御が拓くネオ3Dプリント」(略称「超温度場3DP」)である。

本領域では、金属AM、特にPBF型AMで用いられるLBなどによる局所加熱にて発現することが見出された、1000万K/m以上にもおよぶ大きな温度勾配を「超温度場」と定義し、超温度場での未知現象を解明し、超温度場での原子配列制御を基に新材料を創成する学術的基盤を、「超温度場材料創成学」として構築することで社会に貢献することを目指している。

AM技術は一般に、(i) CADから直接部材を製造可能、(ii) 従来加工では困難な複雑形状部材を製造可能、(iii) 切削と比べた高い材料使用効率、などを特徴とすると認識されている。さらに、PBF型AMでは単結晶状材料の製造が可能であるという他の成形法にはない特徴を有する。本

¹⁾ 大阪大学 大学院工学研究科 教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²⁾ 名古屋大学 大学院工学研究科 教授

³⁾ 九州大学 工学研究院 教授

⁴⁾ 大阪大学 超高压電子顕微鏡センター 准教授

⁵⁾ 国立研究開発法人物質・材料研究機構 マテリアル基盤研究センター 主幹研究員

⁶⁾ 富山大学 学術研究部都市デザイン学系 教授

⁷⁾ ファインセラミックスセンター 材料技術研究所 主席研究員

Creation of Materials by Super-Thermal Field: Scientific Basis for New Materials via Gigantic Potential Gradients

Yuichiro KOIZUMI, Yoshitaka ADACHI, Kohei MORISHITA, Kazuhisa SATO, Yoshiaki TODA, Takuya ISHIMOTO, Teichi KIMURA, Takayoshi NAKANO

Keywords: Powder Bed Fusion, Modeling, Super-Thermal field, additive manufacturing, digital twin, rapid solidification, phase transformation

* 連絡著者：小泉 雄一郎

2025年6月20日受付 2025年6月20日受理

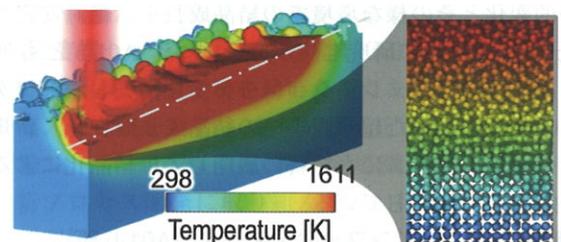


図1 AMプロセス中の超温度場における結晶成長。

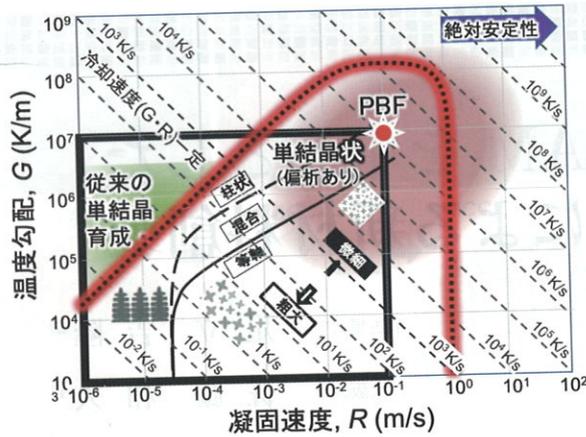


図2 従来の溶融凝固プロセスの凝固マップと、PBFなどで発見する超温度場域を含む拡張凝固マップ^[6]

領域ではその特徴を、図2に示す「温度勾配(G)–凝固速度(R)–凝固組織」の関係を表す凝固マップを指標に、従来の凝固プロセスでは発見が稀であった、冷却速度 $> 10^6$ K/s, $R > 1$ m/s の高速凝固に特有の現象を、絶対安定性の発見、非定常性、流動の影響を含めて解明することを目指している。

この目標の達成に向けて、その場観察などの実験と、数値シミュレーションやデータ科学を活用した計算手法とが連携する体制を整え研究を展開している。さらに、得られた知見を基に、偏析を制御した単結晶のAMなど新技術の創出につなげるべく研究を進めている。対象は金属や合金に限らず、セラミックス・半導体・有機結晶にも展開しており、知見の普遍化を目指している。

3. 超温度場材料創成学の研究体制

本領域は、A01 デジタル研究基盤、A02 先端計測観察、A03 新材料創成の3項目からなる。各項目は2または3、合計7つの計画研究が存在する。各計画研究班が有機的に連携するために、大阪大学異方性カスタム設計・AM 研究センターを中心に全国の大学・研究所の研究者が参画する体制で遂行している。以下には、各計画研究の概要を記す。

(1) A01 デジタル研究基盤

a) 超温度場デジタルツイン材料科学 (A01-a 班)

本研究では、プロセスモニタリングおよび実験と整合させた計算機シミュレーションにより、実測困難な超温度場の動的変化とその様な環境での結晶成長を、絶対安定などの発見に注目して研究している。また、A01-b とも連携し、結晶成長シミュレーションモデルを構築し、デジタルツイン科学を用いた超温度場での結晶成長研究を、新規な合金やセラミックスにも材料に展開し、単結晶化による新材料創成にも挑戦している。

b) 超温度場材料インフォマティクス (A01-b 班)

316L ステンレス鋼の PBF-LB に焦点を当て「プロセス–

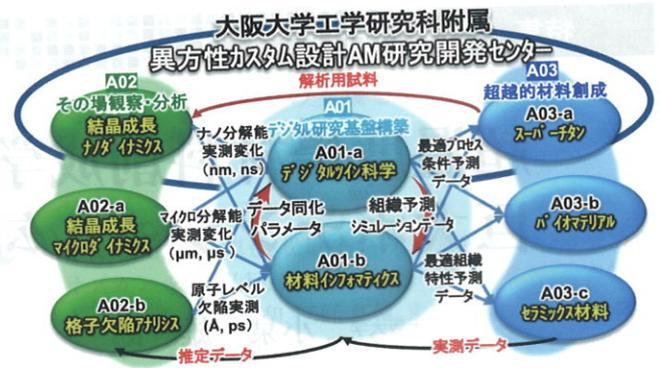


図3 超温度場材料創成学の計画研究班間連携体制。

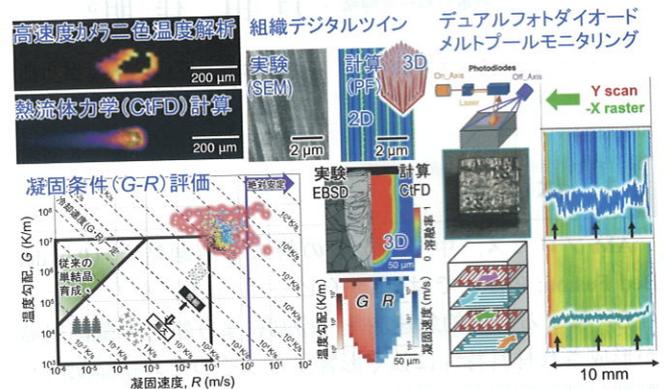


図4 高速度カメラ・二色温度法によるモニタリングと熱流体力学計算による温度勾配と凝固速度の評価。

組織–特性」の関係を実験・計算データの人工知能による解析法を構築するとともに上記関係の新たな記述子を発見し、他の各班と連携し進め、以下の成果を得た。

- (i) 複数のAIの連成による「プロセス–組織–特性」関係の抽出および元画像のマッピングの全自動化。
- (ii) PBF-AM材の3断面2D画像から3D組織を生成する敵対的生成ネットワークを構築。
- (iii) 約25 nm周期の変調構造を発見。
- (iv) 非平衡凝固の高速予測のため、熱力学データを学習したNNを活用し、非平衡PFモデルを開発。現在は、これらをTi基合金に展開し、より汎用的なAMプロセス最適化の枠組みの構築を目指す研究を展開している。

(2) A02 その場観察・解析

a) 超温度場結晶成長マイクロダイナミクス (A02-a 班)

本班では、PBF-LBにて発生する超温度場下における材料挙動、特にLBによる金属粉末の溶融・凝固にて、数十～数百μmの溶融池内外で生じる急速現象を、放射光X線によるμmスケールでのその場観察にて解明する。これまでに、PBF-LBと同等のLB走査速度での現象を高時間分解で観察することに成功し、凝固モデルの検証を可能とした。スパッタ発生機構、溶融池内液体金属の流動、さらに隣接走査線間や積層間における材料同士の相互作用についても新たな知見を得た。今後は、これらの実証的成果をもとに、超温度場下での急速溶融・凝固および欠陥形成の

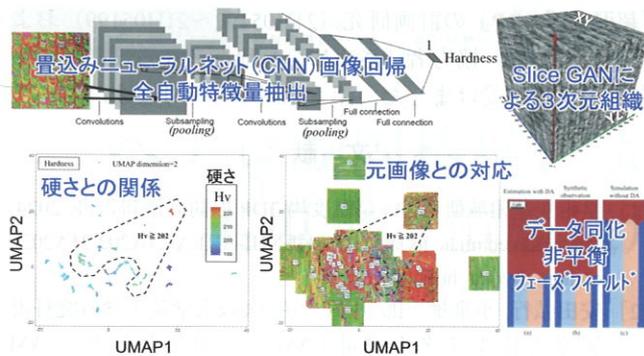


図5 CNN 画像回復の構造 (左上), CNN 画像回復による全自動特徴量抽出 (+ 次元圧縮) と (左) 硬さとの関係, (右) 元の IPF 組織との関係

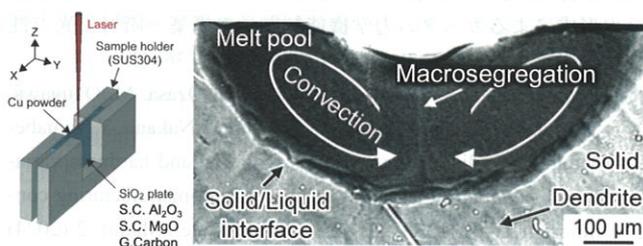


図6 LB 照射による溶融流動凝固挙動の X 線透過その場観察の例 (SPring-8)

マイクロダイナミクスを体系化し、AM プロセスの高度化につなげていく。

b) 超温度場格子欠陥アナリシス (A02-b)

本班では、PBF-LB で形成される材料組織、格子欠陥、内部ひずみを高精度に評価し、AM 材の高性能化に資する情報を得ている。これまで、超高压透過電子顕微鏡 (TEM)、中性子回折、陽電子消滅などの先端分析により、SUS316L 鋼と β -Ti 合金の PBF-LB 材に対して、

- (i) 微細組織・溶質偏析、三次元構造観察手法を確立。
- (ii) X 線・中性子回折により、表面および内部の残留応力三次元分布を評価。
- (iii) 陽電子消滅法により、格子欠陥を同定し、材料種により欠陥密度のプロセス条件依存性が異なることを発見した。これらの成果は、AM 技術の高性能化に向けた材料設計の基盤となる。

(3) A03 超越的材料創成

a) 超温度場スーパーチタン創成科学 (A03-a)

本班では、疲労特性と耐熱強度を兼ね備えたチタン材料の開発を目指して PBF-LB による結晶配向と組織制御、特性評価を進め、以下の成果を得ている。(i) near- α 型チタン合金：独自開発した耐酸化 Ti-6Al-4Nb-4Zr 合金の PBF-LB 条件と熱処理条件と組織の関係および組織と特性の関係を解明し、 β/α 層状組織の制御で、疲労強度を維持したクリープ寿命の大幅向上の可能性を示した。(ii) near- β 型チタン合金^[3,4]：Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金の PBF-LB にて、LB 照射条件と組織の関係を解析し、 β 母相を単結晶様か

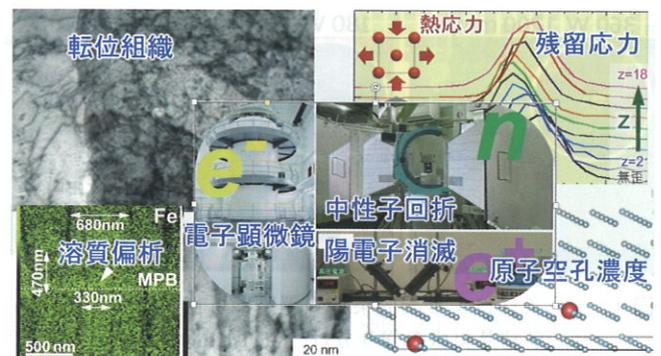


図7 透過電子顕微鏡による転位と溶質分布解析。陽電子消滅法による原子空孔密度の評価 (e+), 中性子回折装置を用いた残留応力の三次元分布測定 (n)。

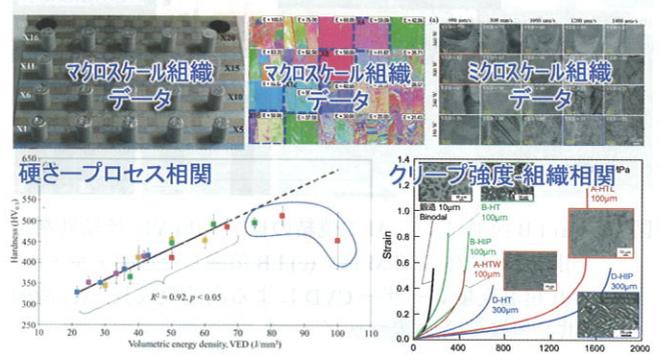


図8 チタン合金の PBF-LB による組織制御と特性向上。(P.V. Cobbinah et al.^[2,3] CC-BY ライセンスによる複製)

ら多結晶までの制御と、 α 相の形成を制御可能であることを示した。また (iii) 組織自由エネルギー法による析出挙動の迅速予測計算も可能とした。

b) 超温度場バイオマテリアル創成 (A03-b)

本班では、PBF-LB で形成される超温度場を活用し、骨バイオマテリアルの形状・材質制御による高機能化を目指している。 β 型チタン合金を対象に、A01-a 班と連携して超温度場下での単結晶化の支配因子を解明し、シミュレーションに基づくプロセス設計指針を確立した (図9)^[5]。A03-a 班との協働では、Ti-Cr-Al 系における in-process alloying により、均質な単結晶様組織と組成依存のヤング率制御を実現し、低ヤング率の高機能材料を創出した。さらに、チタン合金表面の周期微細構造が間葉系幹細胞の高配列化と骨分化誘導を引き起こすことを確認し、生体との能動的相互作用機能を付与した。以上より、計画通りバルク・表面両面から高機能化の基盤を構築した。

c) 超温度場セラミックス創成科学 (A03-c)

本研究では、超温度場を用いた新たなセラミックス製造プロセスの創出を目指して、(i) 超温度場 LB 焼結、(ii) 超温度場レーザー CVD、(iii) 超温度場微粒子スプレーの 3 つの新プロセス開発に取り組んだ。LB 焼結では LB 加熱の助剤開発により短時間での緻密化に成功し、レーザー CVD では Al_2O_3 -YAG 共晶膜や秩序構造膜の高速エピタキ

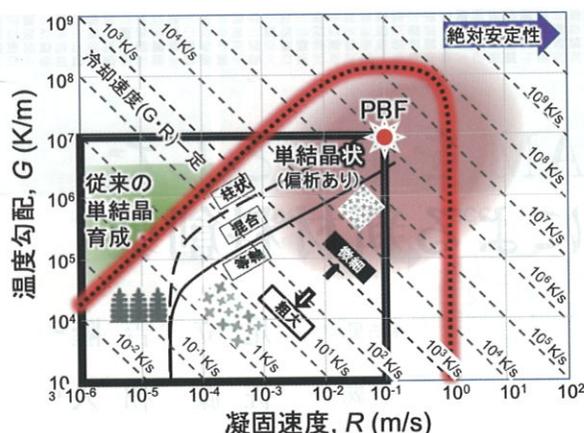


図2 従来の溶融凝固プロセスの凝固マップと、PBFなどで発現する超温度場域を含む拡張凝固マップ^[6]

領域ではその特徴を、図2に示す「温度勾配(G)–凝固速度(R)–凝固組織」の関係を表す凝固マップを指標に、従来の凝固プロセスでは発現が稀であった、冷却速度 $> 10^6$ K/s、 $R > 1$ m/s の高速凝固に特有の現象を、絶対安定性の発現、非正常性、流動の影響を含めて解明することを目指している。

この目標の達成に向けて、その場観察などの実験と、数値シミュレーションやデータ科学を活用した計算手法とが連携する体制を整え研究を展開している。さらに、得られた知見を基に、偏析を制御した単結晶のAMなど新技術の創出につなげるべく研究を進めている。対象は金属や合金に限らず、セラミックス・半導体・有機結晶にも展開しており、知見の普遍化を目指している。

3. 超温度場材料創成学の研究体制

本領域は、A01 デジタル研究基盤、A02 先端計測観察、A03 新材料創成の3項目からなる。各項目は2または3、合計7つの計画研究が存在する。各計画研究班が有機的に連携するために、大阪大学異方性カスタム設計・AM研究センターを中心に全国の大学・研究所の研究者が参画する体制で遂行している。以下には、各計画研究の概要を記す。

(1) A01 デジタル研究基盤

a) 超温度場デジタルツイン材料科学 (A01-a 班)

本研究では、プロセスモニタリングおよび実験と整合させた計算機シミュレーションにより、実測困難な超温度場の動的変化とその様な環境での結晶成長を、絶対安定などの発現に注目して研究している。また、A01-bとも連携し、結晶成長シミュレーションモデルを構築し、デジタルツイン科学を用いた超温度場での結晶成長研究を、新規な合金やセラミックスにも材料に展開し、単結晶化による新材料創成にも挑戦している。

b) 超温度場材料インフォマティクス (A01-b 班)

316L ステンレス鋼のPBF-LBに焦点を当て「プロセス–

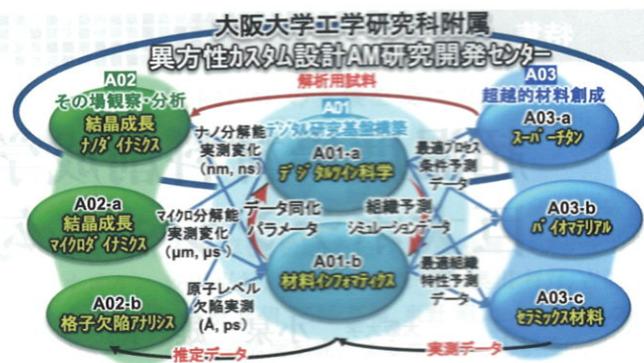


図3 超温度場材料創成学の計画研究班間連携体制。

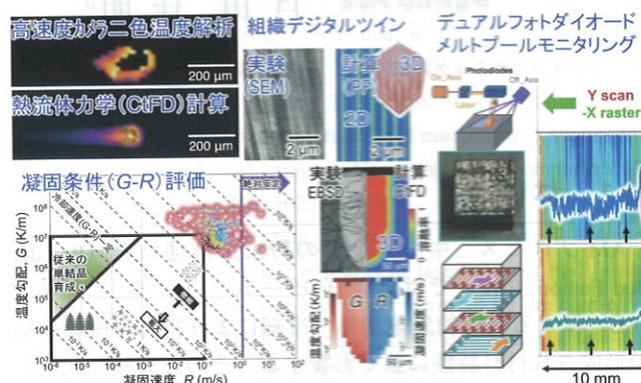


図4 高速度カメラ・二色温度法によるモニタリングと熱流体力学計算による温度勾配と凝固速度の評価。

組織–特性」の関係を実験・計算データの人工知能による解析法を構築するとともに上記関係の新たな記述子を発見し、他の各班と連携し進め、以下の成果を得た。

- (i) 複数のAIの連成による「プロセス–組織–特性」関係の抽出および元画像のマッピングの全自動化。
- (ii) PBF-AM材の3断面2D画像から3D組織を生成する敵対的生成ネットワークを構築。
- (iii) 約25 nm周期の変調構造を発見。
- (iv) 非平衡凝固の高速予測のため、熱力学データを学習したNNを活用し、非平衡PFモデルを開発。現在は、これらをTi合金に展開し、より汎用的なAMプロセス最適化の枠組みの構築を目指す研究を展開している。

(2) A02 その場観察・解析

a) 超温度場結晶成長マイクロダイナミクス (A02-a 班)

本班では、PBF-LBにて発生する超温度場下における材料挙動、特にLBによる金属粉末の溶融・凝固にて、数十～数百 μm の溶融池内外で生じる急速現象を、放射光X線による μm スケールでのその場観察にて解明する。これまでに、PBF-LBと同等のLB走査速度での現象を高時間分解で観察することに成功し、凝固モデルの検証を可能とした。スパッタ発生機構、溶融池内液体金属の流動、さらに隣接走査線間や積層間における材料同士の相互作用についても新たな知見を得た。今後は、これらの実証的成果をもとに、超温度場下での急速溶融・凝固および欠陥形成の

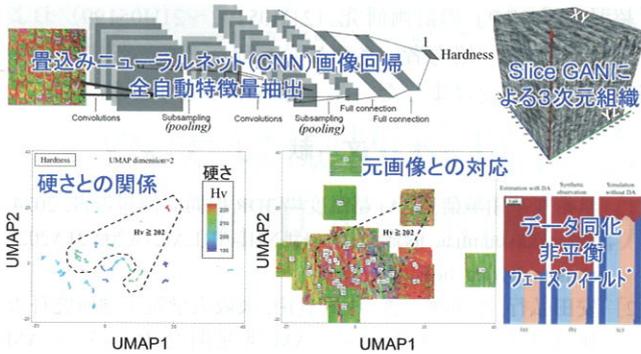


図5 CNN 画像回帰の構造 (左上), CNN 画像回帰による全自動特徴量抽出 (+ 次元圧縮) と (左) 硬度との関係, (右) 元の IPF 組織との関係

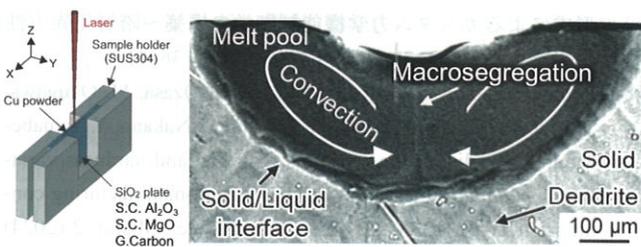


図6 LB 照射による熔融流動凝固挙動の X 線透過その場観察の例 (SPring-8)

マイクロダイナミクスを体系化し, AM プロセスの高度化につなげていく。

b) 超温度場格子欠陥アナリシス (A02-b)

本班では, PBF-LB で形成される材料組織, 格子欠陥, 内部ひずみを高精度に評価し, AM 材の高性能化に資する情報を得ている。これまで, 超高压透過電子顕微鏡 (TEM), 中性子回折, 陽電子消滅などの先端分析により, SUS316L 鋼と β -Ti 合金の PBF-LB 材に対して,

- (i) 微細組織・溶質偏析, 三次元構造観察手法を確立。
- (ii) X 線・中性子回折により, 表面および内部の残留応力三次元分布を評価。(iii) 陽電子消滅法により, 格子欠陥を同定し, 材料種により欠陥密度のプロセス条件依存性が異なることを発見した。これらの成果は, AM 技術の高性能化に向けた材料設計の基盤となる。

(3) A03 超越的材料創成

a) 超温度場スーパーチタン創成科学 (A03-a)

本班では, 疲労特性と耐熱強度を兼ね備えたチタン材料の開発を目指して PBF-LB による結晶配向と組織制御, 特性評価を進め, 以下の成果を得ている。(i) near- α 型チタン合金: 独自開発した耐酸化 Ti-6Al-4Nb-4Zr 合金の PBF-LB 条件と熱処理条件と組織の関係および組織と特性の関係を解明し, β/α 層状組織の制御で, 疲労強度を維持したクリープ寿命の大幅向上の可能性を示した。(ii) near- β 型チタン合金^[3,4]: Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金の PBF-LB にて, LB 照射条件と組織の関係を解析し, β 母相を単結晶様か

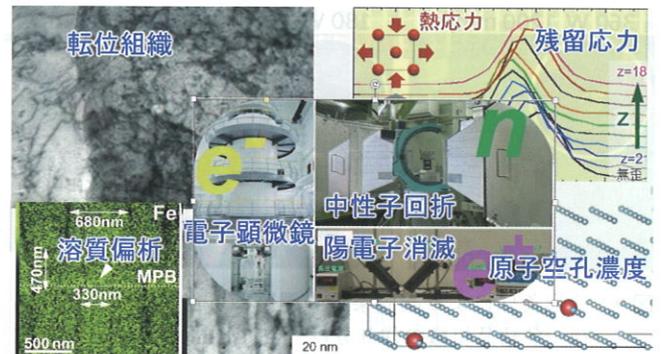


図7 透過電子顕微鏡による転位と溶質分布解析, 陽電子消滅法による原子空孔密度の評価 (e+), 中性子回折装置を用いた残留応力の三次元分布測定 (n)。

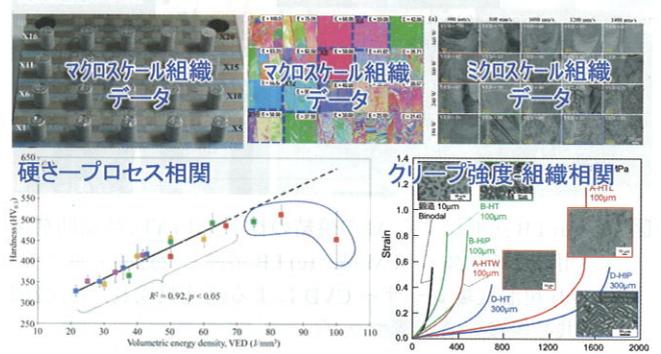


図8 チタン合金の PBF-LB による組織制御と特性向上。(P.V. Cobbinah et al.^[2,3] CC-BY ライセンスによる複製)

ら多結晶までの制御と, α 相の形成を制御可能であることを示した。また (iii) 組織自由エネルギー法による析出挙動の迅速予測計算も可能とした。

b) 超温度場バイオマテリアル創成 (A03-b)

本班では, PBF-LB で形成される超温度場を活用し, 骨バイオマテリアルの形状・材質制御による高機能化を目指している。 β 型チタン合金を対象に, A01-a 班と連携して超温度場下での単結晶化の支配因子を解明し, シミュレーションに基づくプロセス設計指針を確立した (図 9)^[5]。A03-a 班との協働では, Ti-Cr-Al 系における in-process alloying により, 均質な単結晶様組織と組成依存のヤング率制御を実現し, 低ヤング率の高機能材料を創出した。さらに, チタン合金表面の周期微細構造が間葉系幹細胞の高配列化と骨分化誘導を引き起こすことを確認し, 生体との能動的相互作用機能を付与した。以上より, 計画通りバルク・表面両面から高機能化の基盤を構築した。

c) 超温度場セラミックス創成科学 (A03-c)

本研究では, 超温度場を用いた新たなセラミックス製造プロセスの創出を目指して, (i) 超温度場 LB 焼結, (ii) 超温度場レーザー CVD, (iii) 超温度場微粒子スプレーの 3 つの新プロセス開発に取り組んだ。LB 焼結では LB 加熱の助剤開発により短時間での緻密化に成功し, レーザー CVD では Al_2O_3 -YAG 共晶膜や秩序構造膜の高速エピタキ

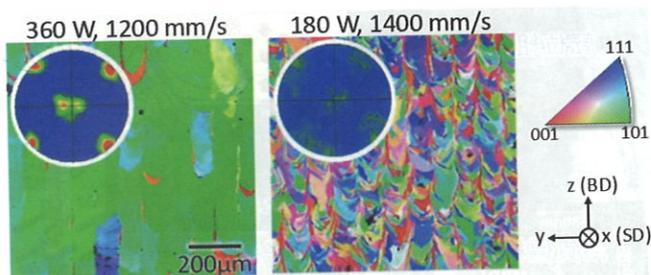


図9 造形条件による凝固条件の調整で可能になった単結晶様/多結晶組織の作り分け。(T. Ishimoto et al.^[7] CC-BY ライセンスによる複製)

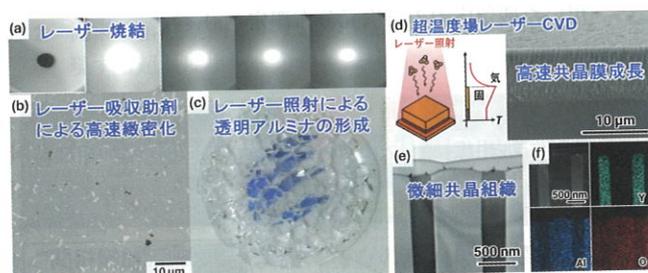


図10 (a) LB 照射による Al の焼結の様子, (b) YF₆ 焼結助剤を用いた焼結体の SEM 像, (c) LB 溶融した透明アルミナ. (d) 超温度場レーザー CVD による高速膜成長, (e) 微細共晶組織, (f) 元素マップ.

シャル成長を実現した. 微粒子スプレーでは 10^9 K/s の冷却速度が確認され, 応力制御下での厚膜化条件を確立した. これらの成果により, セラミックス分野における超温度場の実用性と学術の有効性が示され, 今後の結晶成長学理構築に繋がる基盤が整った.

4. おわりに

以上, PBF-LB による 316L ステンレス鋼の特性発現機構の解明と, それに基づく耐熱スーパーチタンやバイオマテリアル用チタン合金の開発, さらに金属からセラミックスへの展開と, 超温度場材料創成学の構築に向けた成果を紹介した. 紙面の都合で割愛したが, 単結晶化と成形性が課題であった物質 (Fe-Al 超弾性合金など) の AM による単結晶化と形状付与による材料創成についても成果が得られつつある. さらに材料種を超えて超温度場での結晶成長制御因子を探求し, 材料科学・物性物理・応用工学の統合的学問体系の構築につながる.

ここで紹介した以外にも, 公募研究 (各 16 件, 計 32 件) が本領域の研究を多様なものとしている. これらの研究活動を通じ, 国内外の研究者との交流, 未来を担う若手研究者の育成にも取り組んでいる. 詳細は領域の Web ページ^[5], 論文特集号等を参照いただきたい.

謝 辞

本稿で紹介した研究は科研費学術変革領域研究 (A)

「超温度場 3DP」の計画研究 (21H05192~21H05199) およびその分担者, 協力者, さらに公募研究者ならびに, 関係各位の支援を受けました. 深く感謝申し上げます.

文 献

- [1] 学術変革領域研究 (A) 超温度場 3DP 中間評価報告書, 2024. https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-AREA-21A202/21A202_chukan_hyoka_hokoku_ja.pdf.
- [2] 安田弘行, 小泉雄一郎, 中野貴由, 大阪大学院工学研究科附属異方性カスタム設計・AM 研究開発センター, AM フューチャー, **1**, (2025), 29-32.
- [3] 中野貴由, まてりあ, 本多記念講演: 異方性材料デザインにより材料を主役に~耐熱性金属間化合物から, 骨組織, 金属 3D プリンティングによる生体材料まで~, **64** (2025) 317-330.
- [4] 中野貴由, 石本卓也ら, 金属 3D プリンティングの特異界面形成によるカスタム力学機能制御学の構築~階層化異方性骨組織に学びつつ~, まてりあ, **63** (2024) 36-41.
- [5] P.V. Cobbinah, S. Matsunaga, Y. Toda, R. Ozasa, M. Okugawa, T. Ishimoto, Y. Liu, Y. Koizumi, P. Wang, T. Nakano, Y. Yamabe-Mitarai, Peculiar microstructural evolution and hardness variation depending on laser powder bed fusion-manufacturing condition in Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Smart Mater. Manuf. **2** (2024) 100050.
- [6] P.V. Cobbinah, S. Matsunaga, Y. Toda, R. Ozasa, T. Ishimoto, T. Nakano, T. Ito, Y. Yamabe-Mitarai, On the Enhanced Creep Performance in Ti6246 Achieved Through Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Processing. Metall. Mater. Sci. **56** (2025) 2057-2073.
- [7] T. Ishimoto, R. Suganuma, T. Nakano, Tailoring the crystallographic texture of biomedical metastable β -type Ti-alloy produced via laser powder bed fusion using temperature-field simulations, Mater. Lett. **349** (2023) 134835.
- [8] 超温度場材料創成学 Web ページ. <https://www-mat.eng.osaka-u.ac.jp/super3dp>
- [9] 小泉雄一郎ら編, 特集「超温度場材料創成学」日本金属学会誌, 2024 年 9 月号
- [10] Y. Koizumi (edit.), Special issue on Creation of Materials by Super-Thermal Field, Materials Transactions, **64** (2023) 1098-1193.



小泉 雄一郎 足立 吉隆 森下 浩平 佐藤 和久



戸田 佳明 石本 卓也 木村 禎一 中野 貴由