

領域略称名：超温度場3DP
領域番号：21A202

令和6年度
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」
に係る中間評価報告書

「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」

領域設定期間

令和3年度～令和7年度

令和6年6月

領域代表者 大阪大学・工学研究科・教授・小泉 雄一郎

目 次

研究組織

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	3
3	公募研究	6

研究領域全体に係る事項

4	研究領域の目的及び概要	9
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	11
6	研究の進展状況及び主な成果	13
7	研究発表の状況	27
8	研究組織の連携体制	32
9	若手研究者の育成に係る取組状況	33
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	34
11	研究費の使用状況・計画	35
12	今後の研究領域の推進方策	36
13	総括班評価者による評価	38

研究組織

(令和6年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

1 総括班及び総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	21H05192 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3DPの運営	小泉 雄一郎	大阪大学・大学院工学研究所・教授	9
A01-a 計	21H05193 超温度場デジタルツイン科学：プロセスモニタリングとシミュレーションの融合	小泉 雄一郎	大阪大学・大学院工学研究所・教授	2
A01-b 計	21H05194 超温度場材料インフォマティクス：ビッグデータからの法則発見と最適化予測	足立 吉隆	名古屋大学・大学院工学研究科・教授	2
A02-a 計	21H05195 超温度場結晶成長マイクロダイナミクス：透過X線その場観察	森下 浩平	九州大学・工学研究院・准教授	1
A02-b 計	21H05196 超温度場格子欠陥アナリシス：先端分析材料科学	佐藤 和久	大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・准教授	3
A03a 計	21H05198 超温度場スーパーチタン創成科学：超温度場を利用した耐熱チタン合金の新組織設計と特性改善	戸田 佳明	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	4
A03-b 計	21H05197 超温度場バイオマテリアル創成科学：生命機能を操る3DP超温度場材料の創成	石本 卓也	富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授	3
A03-c 計	21H05199 超温度場セラミックス材料創成科学：超温度場を利用したセラミック製造プロセスの新展開	木村 禎一	一般社団法人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	4
総括班及び総括班以外の計画研究 計 8 件（廃止を含む）				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

総括班

研究項目：X00

研究課題名：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 3DP の運営

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	小泉 雄一郎	大阪大学・大学院工学研究所・教授	領域統括部門 国際連携部門
分担	中野 貴由	大阪大学・大学院工学研究所・教授	領域内研究連携部門
分担	森下 浩平	九州大学・工学研究院・准教授	若手人材育成部門
分担	木村 禎一	一般社団法人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	異分野学会連携部門
分担	石本 卓也	富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授	領域内研究連携部門
分担	戸田 佳明	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	広報部門
分担	佐藤 和久	大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・准教授	若手人材育成部門
分担	足立 吉隆	名古屋大学・大学院工学研究科・教授	異分野学会連携部門
分担	奥川 将行	大阪大学・大学院工学研究所・助教	領域統括部門 事務局
合計 9 名			

計画班

研究項目：A01-a

研究課題名：超温度場デジタルツイン科学：プロセスモニタリングとシミュレーションの融合

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	小泉 雄一郎	大阪大学・大学院工学研究所・教授	研究の統括、実験・フェーズフィールドシミュレーションの実施
分担	奥川 将行	大阪大学・大学院工学研究所・助教	透過型電子顕微鏡観察実験・分子動力学シミュレーションの実施
合計 2 名			

研究項目：A01-b**研究課題名：超温度場材料インフォマティクス：ビッグデータからの法則発見と最適化予測**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	足立 吉隆	名古屋大学・大学院工学研究科・教授	研究の統括、マテリアルズインフォマティクス
分担	山中 晃徳	東京農工大学、工学(系)研究科(研究院)・教授	データ同化
合計 2 名			

研究項目：A02-a**研究課題名：超温度場結晶成長マイクロダイナミクス：透過 X 線その場観察**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	森下 浩平	九州大学・工学研究院・准教授	研究の統括、透過 X 線その場観察、超急速溶融・凝固、結晶成長挙動解明
合計 1 名			

研究項目：A02-b**研究課題名：超温度場格子欠陥アナリシス：先端分析材料科学**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	佐藤 和久	大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・准教授	研究の統括、透過電子顕微鏡法による微細組織解析・組成分析、超温度場下での凝固組織形成解明
分担	趙 研	大阪大学・大学院工学研究科・准教授	中性子回折法による残留応力解析
分担	水野 正隆	大阪大学・大学院工学研究科・准教授	陽電子消滅法による格子欠陥解析
合計 3 名			

研究項目：A03-a**研究課題名：超温度場スーパーチタン創成科学：****超温度場を利用した耐熱チタン合金の新組織設計と特性改善**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	戸田 佳明	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	研究の統括、スーパーチタン合金のクリープ特性評価および金属組織との関係解明、理想析出形態を有する合金組成や熱処理条件探索のための計算モデルの構築

分担	御手洗 容子	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	スーパーチタン合金の組成の検討、積層造形プロセスー組織形成過程ー高温特性の関連解明
分担	中野 貴由	大阪大学・大学院工学研究科・教授	スーパーチタン合金の積層条件の検討、積層造形プロセスー組織形成過程ー高温特性の関連解明
分担	松永 哲也	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授	スーパーチタン合金の高温特性評価および金属組織との関係解明
合計 4 名			

研究項目：A03-b

研究課題名：超温度場バイオマテリアル創成科学：生体機能を操る 3DP 超温度場材料の創成

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	石本 卓也	富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授	研究の統括、超温度場を用いたバイオチタン合金の材質制御・高機能化、造形物解析
分担	上田 正人	関西大学・化学生命工学部・教授	バイオチタン合金の表面機能化
分担	松垣 あいら	大阪大学・大学院工学研究科・准教授	バイオチタン合金の表面制御、 <i>in vivo</i> 、 <i>in vitro</i> 生体機能性解析
合計 3 名			

研究項目：A03-c

研究課題名：超温度場セラミックス材料創成科学：超温度場を利用したセラミック製造プロセスの新展開

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	木村 禎一	一般社団法人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	研究の統括、レーザ焼結に基づく新規セラミック製造プロセスの確立
分担	篠田 健太郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域、主任研究員	超温度場微粒子スプレーによる超温度場創出と結晶成長解明
分担	伊藤 暁彦	横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授	超温度場化学気相析出における結晶成長挙動解明
分担	吉川 健	大阪大学・大学院工学研究科・教授	固液界面構造その場観察
合計 4 名			

3 公募研究

研究項目 [1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	22H05286 軽元素固溶による粉末の熔融・凝固特性制御と造形組織形成ダイナミクスの解明	令和4年度 ～ 令和5年度	刈屋 翔太	大阪大学・接合科学研究所・助教	1
A01 公	22H05283 超温度場 3D プリント解析のための高精度・高速原子モデリング手法の構築	令和4年度 ～ 令和5年度	新里 秀平	大阪大学・基礎工学研究科・助教	1
A01 公	22H05281 超温度場の非定常凝固が生み出す不均一組織記述子の創出	令和4年度 ～ 令和5年度	鈴木 飛鳥	名古屋大学・工学研究科・助教	1
A01 公	22H05282 AM組織制御のための高性能 phase-field 計算法の構築	令和4年度 ～ 令和5年度	高木 知弘	京都工芸繊維大学・機械工学系・教授	1
A01 公	22H05277 ナノ秒パルス場加熱型3次元プリンターによるデジタルツイン科学の開拓	令和4年度 ～ 令和5年度	中山 忠親	長岡技術科学大学・工学研究科・教授	1
A02 公	22H05271 非接触浮遊法を用いた広温度範囲での高精度融液熱物性測	令和4年度 ～ 令和5年度	安達 正芳	東北大学・多元物質科学研究所・講師	1
A02 公	22H05292 超高压電子顕微鏡法によるナノスケールデンドライト形成・成長のその場 3D 観察	令和4年度 ～ 令和5年度	永瀬 丈嗣	兵庫県立大学・工学研究科・教授	1
A02 公	22H05274 非平衡組織を有する AM チタン合金のその場中性子回折を用いた組織・結晶塑性解析	令和4年度 ～ 令和5年度	山中 謙太	東北大学・金属材料研究所・准教授	1
A03 公	22H05288 レーザ粉末床溶融結合による航空用チタン含有ハイエントロピー合金の創製と高機能化	令和4年度 ～ 令和5年度	小笹 良輔	大阪大学・工学研究科・助教	1
A03 公	22H05280 レーザ指向性エネルギー堆積法による WC-HEA 超硬合金の超温度場材料開発	令和4年度 ～ 令和5年度	國峯 崇裕	金沢大学・機械工学系・准教授	1
A03 公	22H05273 積層造形法を活用した炭素強制固溶による高力学機能スーパーチタンの創製	令和4年度 ～ 令和5年度	周 偉偉	東北大学・工学研究科・准教授	1

A03 公	22H05276 超温度場 3DP による超準安定 β チタン合金の創出と基礎物性解明による機能性の開発	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	田原 正樹	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授	1
A03 公	22H05291 超温度場・3D プリントによるバイオマテリアルの高機能化のための組織制御指針の構築	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	多根 正和	大阪公立大学・大学院工学研究科・教授	1
A03 公	22H05272 超温度場環境を実現する高レーザ吸収球形多孔質セラミックス粒子の創成と積層造形	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	野村 直之	東北大学・工学研究科・教授	1
A03 公	22H05279 レーザ局所加熱によるガラスセラミックス系全固体電池の無加圧界面構築	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	本間 剛	長岡技術科学大学・工学研究科・教授	1
A03 公	22H05290 金属/セラミックス複合粉体を起点とした超温度場と $\text{SiC}/\text{Al}_4\text{SiC}_4$ 相の創成	令和 4 年度 ～ 令和 5 年度	松本 洋明	香川大学・創造工学部・教授	1
A01 公	24H00994 超温度場における結晶組織成長メカニズム解明に向けた原子モデリング	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	新里 秀平	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教	1
A01 公	24H00993 金属 3D プリンターのデンドライト/セル組織予測の高性能 3 次元計算手法開発	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	坂根 慎治	京都工芸繊維大学・機械工学系・助教	1
A01 公	24H00982 結晶塑性解析による超温度場下の残留応力予測と力学特性解析	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	白岩 隆行	東京大学・大学院工学系研究科・講師	1
A01 公	24H00990 超温度場サロゲートモデルの構築とそれに基づくプロセス・材料設計指針	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	鈴木 飛鳥	名古屋大学・工学研究科・助教	1
A01 公	24H01002 CALPHAD 法を援用したアルミニウム合金の急冷凝固過程における非平衡晶出挙動評価	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	徳永 辰也	九州工業大学・大学院工学研究院・教授	1
A02 公	24H01008 積層造形材料のナノスケール濃度変調の解析と強化メカニズム解明への展開	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	佐々木 泰祐	国立研究開発法人物質・材料研究機構・グループリーダー	1
A02 公	24H00991 Quantitative elucidation of dislocation network structure strengthening in additive manufactured steel	令和 6 年度 ～ 令和 7 年度	孫 飛	名古屋大学・工学研究科・特任准教授	1

A02 公	24H01004 二次イオン質量分析法による超温度場凝固に固有の帯状変調組織の実証	令和6年度 ～ 令和7年度	仲村 龍介	滋賀県立大学・工学部・教授	1
A02 公	24H01007 その場中性子回折を用いた Ni 基超合金積層造形体の階層的多相組織のダイナミクス解析	令和6年度 ～ 令和7年度	森 真奈美	仙台高等専門学校・総合工学科・准教授	1
A02 公	24H01000 レーザー照射により誘起される超高温相のその場観察と物理量定量化	令和6年度 ～ 令和7年度	田中 学	九州大学・工学研究院・准教授	1
A03 公	24H00980 高レーザー吸収球形多孔質セラミックス粒子の組成最適化と緻密セラミックス積層造形	令和6年度 ～ 令和7年度	野村 直之	東北大学・工学研究科・教授	1
A03 公	24H00986 金属 3DP による等温 α'' 相の相分解を利用した $\alpha+\beta$ 型チタン合金の創製	令和6年度 ～ 令和7年度	田原 正樹	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授	1
A03 公	24H01005 超温度場での特異な組織形成を利用した生体材料の高機能化のための材料設計指針の構築	令和6年度 ～ 令和7年度	多根 正和	大阪大学・工学研究科・教授	1
A03 公	24H00987 酸化物系全固体電池におけるレーザー超温度場で誘起する界面形成機構の理解	令和6年度 ～ 令和7年度	本間 剛	長岡技術科学大学・工学研究科・教授	1
A03 公	24H00999 金属/セラミックス複合粉体に由来した温度場生成と結晶配向制御	令和6年度 ～ 令和7年度	松本 洋明	香川大学・創造工学部・教授	1
B01 公	24H01001 ミリ波による「超温度場」形成と触媒反応制御	令和6年度 ～ 令和7年度	椿 俊太郎	九州大学・農学研究院・准教授	1
公募研究 計 32 件 (廃止を含む)					

[1] 公：公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

研究領域全体に係る事項

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

研究目的: 金属 3D プリント(3DP)で発見された、電子ビーム(EB)やレーザー(LB)の照射による局所加熱で発生する超温度場での熔融・凝固における「超高速エピタキシャル成長」などの特異な結晶成長のメカニズムを、**絶対安定性**などの特異現象の発現に注目し、高度なその場観察実験と、それらと高精度に整合させた、熱流体力学(CtFD)計算、フェーズフィールド(PF)計算、分子動力学(MD)計算などによる数値シミュレーションで解明する。さらに、それらが産むプロセス-組織-構造-性能相関のビッグデータを人工知能により解析し、3DPによる高質単結晶化などの新規材料創成に資する**超温度場材料創成学**を構築し、材料学に大きな変革をもたらす。

学術的背景・学問分野に新たな変革や転換をもたらす点

3D プリント(3DP)とも呼ばれる付加製造(AM)は、任意形状部材の製造だけでなく、特異な結晶成長を誘発し材料特性を制御できることが見出された。代表的な金属 3DP の一種である粉末床熔融結合(PBF)では、局部を加熱する電子ビーム(EB)やレーザービーム(LB)が走査速度 0.1~10 m/s で高速移動する原料粉末に照射され、熔融凝固による材料の付加が繰り返される(図 4-1)。PBF の凝固条件は、温度勾配 10^7 K/m、凝固速度 1 m/s など、従来プロセスとは大きく異なることが、実験と計算により見出された(図 4-2)。

これらの凝固条件は、既存の凝固マップの範囲から逸脱する未開拓領域である。高 G 高 R 側では、固液間の溶質分配がなく凝固界面が平滑化する**絶対安定性**(absolute stability)の発現が予想され、従来の一方向凝固よりも優れた単結晶製造法となる可能性がある。一方、絶対安定性が発現する凝固条件よりも低 G 低 R 側で、結晶粒超微細化が期待される。これらの条件での凝固挙動解明は、単結晶化から微細粒化まで、自在に材料特性を制御する 3DP の基礎科学として材料学に大きな転換・変革をもたらすと期待される。

これまでの学術の方向を大きく変化させる点: 超温度場での結晶制御は、単結晶化がボトルネックである材料の実用化の糸口となり、新材料創成を可能にし、以下のような学術の変革の要素を有する。

1. 超温度場(温度勾配 10^7 K/m 以上)での結晶成長には、従来の結晶成長の常識の延長線上にはない現象が数多く存在する。
2. 従来なかった最先端の実験手法でそれらの現象を解明する。
3. 数値計算、データ科学により効率的な解析や予測を可能とする。これらはこれまでの材料創成の学術の方向を大きく変化させる。

これまでの学術の体系を大きく変化させる点:

材料種の枠を超えた体系化: 超温度場での結晶成長をこれまでの金属からセラミックス、半導体、有機物へと材料種の枠を超えて展開、細分化し、学術の体系に大きな変革をもたらす。例えば、常識的には異種材料と認識される金属とセラミックスを、LB 照射で発熱が表層に集中する系と表界面に発熱が集中する系、EB 照射で帯電しない系(金属)と帯電する系(セラミックス)と系統的に捉え、超温度場を基軸に、材料種の枠を超越した体系化を図る(図 4-3)。

機械と材料の枠を超えた体系化: 3DP の自由成形性と特性と単結晶化との組み合わせで新規機能製メタマテリアルの部材の製造が可能となり。機械と材料の境界を超えた学術の変革をもたらす。



図 4-1. (a) 粉末床熔融結合(PBF)型金属 3D プリント(3DP)による単結晶育成。 10^7 K/m 程度(従来の単結晶育成では 10^5 K/m)の超温度場下での結晶成長では、瞬間的だが 1 m/s 程度の高速結晶成長を繰り返すため偏析がない結晶育成が可能である。

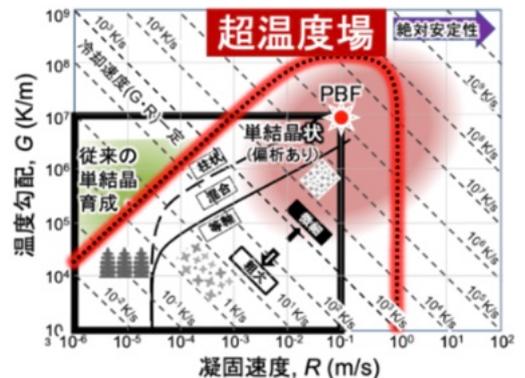


図 4-2. 拡張凝固マップ。太枠内が既存の凝固マップ。PBF の温度勾配(G)と凝固速度(R)は既存の範囲を超え、絶対安定性に注目し未開拓領域を探索する。

	金属	セラミックス
電子ビーム	入射光 ↓ 1-10μm浸透	散乱 ↑ 反射 ↓ 表面で発熱
レーザー	散乱 ↑ 反射 ↓ 1 nm程度浸透	内部へ透過 ↓ 粒界で発熱

図 4-3. EB 及び LB 照射による発熱と超温度場の形成。金属では EB は数 μ m 浸透するのにに対し、LB は浸透せず発熱する。逆にセラミックスでは、EB は浸透せず極表面で発熱するのにに対し、LB は透過して界面や欠陥等で発熱をするといった点に着目する。

物理と材料の枠を超えた体系化:LB や EB の照射による超温度場での結晶成長制御の自由度が高く、単結晶化法としても大きな可能性を秘めており、3DP に限らず凝固・結晶成長の学術にも大きな変革をもたらす。

創成する新興・融合領域:超温度場での原子配列形成の機序を、結晶の結合様式、量子ビームの種類などの枠を超えて統一的に解明し、新材料創成の指針を示す研究領域こそが、本領域が創成する新興・複合領域である。

領域設定期間終了後に期待される成果 単結晶育成は、新物質の物性・構造解析など、基礎物質科学研究の出发点となる。単結晶育成を起点に勃興した分野には、高純度 Si 単結晶による半導体産業、Ni 基超合金単結晶化によるタービンプレードの飛躍的性能向上、SiC 単結晶によるパワエレ半導体開発、磁歪センサーやアクチュエータ等枚挙に暇がない。本領域の成果は、単結晶化と成形性の課題も解決すると期待される。単結晶の育成が実用化を阻んでいる材料に、強磁性形状記憶合金 (Ni₂MnGa 等)、逆位相境界擬弾性合金 (Fe₃Al 等) など多くの例がある。

当該学問分野の強い先端的な部分の発展・飛躍的な展開

当該学問分野の強い先端的な部分:領域代表の小泉らは、生体用 Co 合金の 3DP にて、三方向に<100>配向した単結晶状材料の製造に成功した。計画班代表の石本らはチタン合金のレーザ 3DP にて<100>配向に加え<110>配向に成功した。それらの論文は 3DP による単結晶化の先駆的研究として合計 400 件以上引用されている。さらなる高品質単結晶化や特異な結晶配向制御法を検討し、<111>配向にも成功した。さらなる制御のため実験と計算を融合したデジタルツイン科学による凝固条件と凝固組織との関係を解析する手法を構築している。

その発展・飛躍的な展開:金属材料で発見された 3DP の超温度場による結晶成長を、結合様式が異なり物性の大きく異なる結晶性材料であるセラミックス、半導体、金属有機構造体などに展開し、超温度場による特異な結晶成長を高度に制御するための学術を発展させる。さらに、共有結合性の半導体に対する EB や LB 照射による超温度場の形成と結晶成長を中心に、新発見に基づく新材料創成により材料科学の飛躍的展開が期待される。

全体構想

3DP は当初は Rapid Prototyping と呼ばれ、単なる形状確認のための試作技術であった。1990 年代後半の 2 次ブームから 3DP と呼ばれ、2009 年には機能性を有した製品を製造する技術としての付加製造 (Additive Manufacturing: AM) へと大きく発展し、2013 年頃からの 3 次ブームは一過性ではなく、現在でも高機能化と用途拡大が拡大している。こうした中、本領域では、以下の体制 (図 4-4) にて超温度場と超温度場下での結晶成長の特殊性に注目した新材料創成の学術の転換を展開する。

A01 デジタル研究基盤では A01-a 超温度場デジタルツイン科学にて、3DP 中の熔融凝固を高速度光学カメラでのその場観察を行うとともに、A02 その場観察分析のデータと整合した熱流体力学計算、それから得られる温度勾配下での結晶成長のフェーズフィールド計算を行う。A01-b 超温度場材料インフォーマティクスでは機械学習を用いて、A01-a が示すデータや A03 超越的材料創成が取得する組織-特性-性能の関係を用いて、プロセス-組織-特性-性能の関係を定量予測を行う。

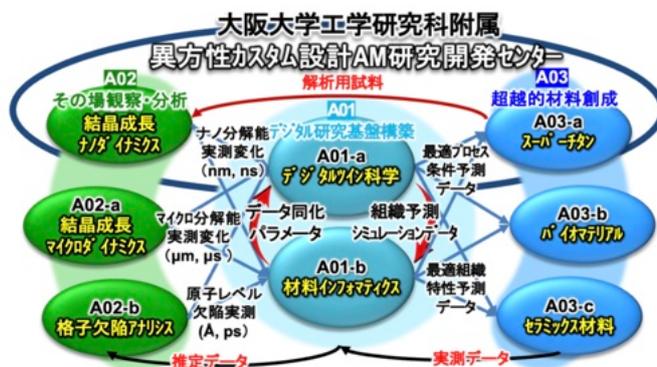


図 4-4. 超温度場材料創成学の計画研究体制。

A02 その場観察分析では、A02-a 超温度場マイクロダイナミクス(放射光透過法 X 線)にて、マイクロスケールの時間・空間分解能にて超温度場下での結晶成長の動的データを得るとともに A02-b 超温度場格子アナリシスにて A03 超越的材料創成で精製された材料のサブナノからナノスケールの欠陥および元素分布データを取得する。それらのデータは、A01 に提供されるとともに A03 に還元される。

A03 超越的材料創成では、A03-a 超温度場スーパーチタン創成科学にて耐熱チタン合金、A03-b 超温度場バイオマテリアル創成科学にて生体用チタン合金、A03-c 超温度場セラミック材料創成科学にて構造材料・機能性材料としてのセラミックスを対象として、超温度場での結晶成長と組織形成を軸に新材料創成する。

一方で、真に社会に役立てるためには、データ科学や応用に近い実践的研究が必要である。さらに、従来の凝固プロセスの範囲を超えた超温度場での原子配列形成として結晶成長を再考するとともに、EB や LB による超温度場と物質との相互作用を、原子間結合様式の点から議論することで、従来金属を中心に研究が進展してきた 3DP 材料科学をセラミックス等にも展開し、3DP 周辺の学術体系を一新する。これらが、本学術変革領域「超温度場材料創成学」の全体構想である。

5 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

「審査結果の所見」としていただいたコメント(斜体部分)

「本研究領域は、電子ビームやレーザービームによる局所加熱で発生する超温度場を利用して、単結晶化や結晶方位制御を行うことを目的としている。従来のバルク状単結晶の作製法と異なり、高い成長速度で単結晶化できること、しかも三次元プリント(3DP)造形技術を利用するため多様な形状へ適応できることから新規性の高い研究となっている。偏析のない均一な特性を有する材料創製が期待できる造形技術であり、また、金属や合金のみではなく、セラミックス、半導体、金属有機構造体など種々材料への展開も秘めており、挑戦的な研究である。

一方で、本研究領域には超温度場を利用した結晶制御に対する新しい学理の構築が期待される。各計画研究間の緊密な連携を図り、領域総体としていかにそれを構築できるかが重要な課題となる。」

「留意事項」としていただいたコメント(斜体部分)

- ・ 本研究領域の目的達成のためには、領域内の各計画研究の緊密な連携が必要であり、総括班を中心に、有機的なつながりを一層促進するための工夫が求められる。
- ・ 本研究領域は、超温度場を利用した3DPを単結晶作製や結晶方位制御に適用するユニークな材料工学的研究であるものの、研究の方向性、すなわち3DP技術を深化させるのか、新規材料創製を目指すのか(あるいは両方)を明確に設定する必要がある。

上記の「審査結果の所見」にて課題として指摘いただいた「各計画研究間の緊密な連携を図り、領域総体としていかにそれを構築できるか」と、「留意事項」の一つ目の「総括班を中心に、有機的なつながりを一層促進するための工夫」については、以下の取り組みにより対応している。

計画研究間の緊密な連携、総括班を中心に有機的なつながりを一層促進するための工夫

(審査結果の所見に記されていた課題と留意事項の一つ目への対応)

(1) 領域全体キックオフミーティング(2021年10月11日実施@オンライン)

超温度場3DPキックオフミーティングを開催し、領域全体の運営方針と計画研究の方針について、各計画研究代表者と研究分担者、研究協力者と共有し、連携研究を推進できた。

(2) 総括班定期ミーティング(原則月2回各2時間実施@オンライン)(64回実施2024年6月26日)

2週間に一度計画研究代表者ならびに研究分担者がWebミーティングを開催し、連携研究遂行のための情報交換、領域運営方針の共有を行った。特に領域の研究の開始時には、共通試料として316Lステンレス鋼(SUS316L鋼)を選定し、試料を共有し一つの材料に対して計算、実験の両方から多面的なアプローチにより連携研究を推進した。とりわけ、総括班の領域内連携推進部門を通じて大阪大学異方性カスタム設計AM研究開発センターが共通試料の供給を進めるとともに、各計画研究班同士や公募研究班との共同研究により、金属3DPプリントにおける超温度場での結晶成長に注目した新材料創成のための連携研究を推進している。

(3) 年度末報告会(2022年3月@オンライン, 2023年3月@富山県民会館, 2024年3月@大阪大学)

各計画研究の進捗について各計画研究の進捗状況を毎年2日間にわたって報告し会い、その後の情報交換会にて、連携研究についての打ち合わせを行っている。統括班評価者にも参加いただいております。共通試料を設定しての連携推進を奨励していただき、連携研究のさらなる動機付けとなっている。

(4) ディスカッションミーティング(4月~12月に月1回程度実施@オンライン, 各2~3時間)(21回実施)

領域が開始した2021年度は2月~3月に集中的に、2年目以降の2022年度と2023年度には月一度のペースで計画研究班が順に、研究進捗を報告し情報共有と議論を行い、緊密な連携を推進した。具体的には以下の日程でオンライン開催した。(2024年度6月までは各班内にて開催し、7月より全体で開催)

2021年度: 2/18(A01a)、2/21(A01b)、2/22(A02a)、2/24(A02b、A03a)、3/4(A03b、A03c)、

2022年度: 5/26(A01a)、6/30(A01b)、7/29(A02a)、8/26(A02b)、9/30(A03a)、10/28(A03b)、11/25(A03c)

2023年度: 4/21(A01a)、5/19(A01b)、6/30(A02a)、7/21(A02b)、8/25(A03a)、10/20(A03b)、12/22(A03c)

(5) 超温度場夏の学校 電子顕微鏡スクール(2022年8月17~19日実施@大阪大学)

計画研究A02-b「超温度場格子欠陥アナリシス」(代表:佐藤准教授(阪大))の主研究ツールであり連携研究の要となる透過電子顕微鏡観察(TEM)および元素分析について、大阪大学超高压電子顕微鏡センタースタッフを講師として、若手研究者、大学院生らが、セミナーおよび実習にて原理・操作法を習得した。その結果、A02-

bと連携によるTEM解析に基づく研究成果が多数得られ始めている。(2024年8月にも実施予定)

(6) 超温度場夏の学校 データ科学スクール(2022年9月5~7日実施@名古屋大学(ハイブリッド))

計画研究 A01-b「超温度場材料マテリアルインフォマティクス」(代表:足立教授(名大))が研究で用いているデータ科学手法を、足立教授らを講師として、若手研究者、大学院生ら(他の計画研究代表者、分担者も含む)にセミナー形式で実習も交えて指導し、データ科学の活用を通じた連携を推進した。各計画研究班および公募研究でもデータ科学を取り入れることを通じて連携研究が進んでいる。(2024年9月にも実施予定)

(7) 公募研究キックオフミーティング(2022年8月10日@大阪大学(ハイブリッド), 2024年5月15日)

公募研究キックオフミーティングを、大阪大学で対面とオンラインのハイブリッドにて開催し、公募研究者に領域研究の方針を説明するとともに、公募研究者の研究計画について情報共有を行い、計画研究との連携を図りました。シンポジウム形式の発表と質疑応答に加え、各計画研究班と公募研究者の連携打ち合わせ会議を実施した。また、領域内連携推進部門の大阪大金属 AM センターの見学会も開催し、連携研究の要となる金属 3D プリント装置についての情報共有と相互理解を推進した。(2024年5月15日には第二期公募研究にて実施)

(8) その他、データの共有、研究活動の公開(公開会議、特集号、国際会議)を通じた連携の推進など

その他、共通データサーバを設置して、資料やディスカッションの動画の共有や、以下に示すシンポジウムの開催により、領域の取り組みの対外発信を通じて、領域の総体としての研究を推進した。産学異分野連携シンポジウム(2021年1月26日実施@オンライン)、日本金属学会公募シンポジウム(2022年9月21~23日実施@福岡工業大学)、公開シンポジウム(2022年10月26日実施@オンライン)。また、2023年11月には国際会議を主催で開催し、海外との連携の開始を推進した。(2025年12月にはMRMにて国際シンポジウム実施予定)さらに、国内14の学会が共同刊行する英文学術誌 Materials Transactions にて特集号を企画し、2023年6月発行された領域の研究成果の論文を発信した。互いの研究についての造詣を深める機会となった、

留意事項の二つ目に記されている「研究の方向性」については、以下のように示す。

3DP 技術を深化させるのか、新規材料創製を目指すのか(あるいは両方)の明確な設定

回答:超温度場における新しい結晶成長の科学の研究を展開し、そこで得られる知見を基に新材料創成するすなわち「3DP 技術の深化と新規材料創製の両方を目指す」(図 5-1 参照)。具体的な方向性は以下のとおり。

領域全体の共通の研究の方向性は「超温度場での結晶成長を活用した新規材料創製」としながらも、研究の方向性は、技術状況の違いと対象とする材料によって下記のように設定している。

- (1) **金属・合金材料**に関しては、既存の装置を用いつつ、従来全く認識されてこなかった超温度場の概念の導入により、3DP 技術の深化と新規材料創製の両方を目指す。
- (2) **セラミックス材料**に関しては、装置開発も含めた 3DP 技術の深化と新規材料創製の両方を目指す。
- (3) **領域全体**としては、(1)、(2)の両方により超温度場での結晶成長を体系化することを目指す。

金属・合金材料の 3DP 技術として主流である粉末床溶融結合 (Powder Bed Fusion: PBF) 式 AM の基本技術は成熟し、産業界での技術開発の動向は、高形状精度化と大型化が主な方向性となっている。一方で、PBF 型金属 3DP で発現する超温度場下での結晶成長は、他の方法ではなし得えない材料組織と材料特性を可能とする、従って本領域では、新規材料の創製目指した研究を、金属 3DP 研究の方向性としている。

一方、セラミックス用 3DP 技術の現時点での主流は、バインダーと混練した粉末を成形した後に従来の焼結技術で材料全体を加熱して緻密化する技術であり超温度場は形成されない。また、金属材料の 3DP の主流である PBF をそのままセラミックスに適用することはできない。

従って、セラミックス材料にて超温度場での結晶成長を発現させる 3DP 技術の開発、すなわち装置開発も含めた 3DP 技術の深化を目指す。領域全体では、金属材料の 3DP における超温度場の形成ならびに結晶成長と、セラミックス材料の新規プロセスによる超温度場の形成ならびに結晶成長を、レーザーや電子ビームなどの熱源と物質・材料との相互作用と超温度場の形成、物質・材料の物理的性質と凝固挙動の関係を体系的に理解し、超温度場での結晶成長による新材料創製の学理を構築する。

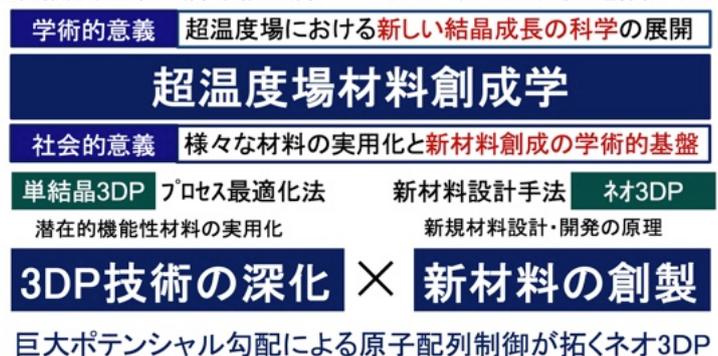


図 5-1. 超温度場材料創成学が目指している研究の方向性。

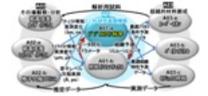
6 研究の進展状況及び主な成果

- (1) 及び (2) について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。
(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)
- (1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか
- (2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。)

研究項目 A01 『超温度場材料創成学のデジタル研究基盤構築』

計画研究 A01-a

「超温度場デジタルツイン科学プロセスモニタリングとシミュレーションの融合」



(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

領域設定期間内：3D プリント(3DP)で発生する超温度場下の熔融・凝固プロセスのモニタリングと、それと整合したシミュレーションによるデジタルツイン科学を実践する。Fe 基合金、Ti 基合金など合金種間の共通点と相異点を解明し、セラミックス、半導体などでの超温度場の生成と結晶成長を明らかにする。さらには、超温度場における高速エピタキシャル成長の限界がどこにあるのか、それを利用した単結晶育成が可能であるかを明らかにする。特に超温度場下での高速結晶成長では、絶対安定性(Absolute Stability)を発現させることによる無偏析化の可能性も探索する。

中間評価実施時まで：超温度場下での凝固現象を、Fe 基合金、Ti 基合金を中心とする金属材料および Al_2O_3 、 ZrO_2 などのセラミックス材料を対象として明らかにする。特に、材料種ごとの超温度場の形成、さらには超温度場下での結晶成長を、デジタルツイン科学を駆使して解明する。

中間評価実施時までの進展：計画していた各合金、各セラミックスにおける超温度場下での凝固現象のその場観察およびシミュレーションを実施し、材料種毎の超温度場条件の解明に成功した。さらには、計画を前倒しし、中間評価後に予定していた半導体材料での超温度場条件解析の足掛かりを既に獲得している。

(2) 本計画研究で得られた成果及び本計画研究と連携している公募研究で得られた成果

【計画研究班の成果】

① 各種材料の 3DP で生じる超温度場のデジタルツイン解析

種々のステンレス鋼および Ti 合金を対象として、レーザービーム(LB)照射によって形成された熔融ビードにおける微細組織と凝固条件の関係を実験と数値熱流体力学(CtFD)計算を組み合わせたデジタルツイン解析によって解明した。さらに、CtFD 計算の妥当性検証のために、ハイスピードカメラを用いた LB 照射熔融ビード形成実験のプロセスモニタリングにも成功した。形成された熔融池断面形状および微細結晶組織を、走査型電子顕微鏡/電子後方散乱回折(SEM-EBSD)によって解析すると、いずれの合金でも凝固中の固液界面の移動方向に沿った柱状晶が形成されていた。実験観察された熔融領域形状再現する CtFD 計算によって超温度場条件を評価したところ、従来理論で想定されていた範囲外の超大な温度勾配かつ急速な凝固速度条件、超温度場での高速エピタキシャル成長の発現が示唆された(図 6A01a-1 左)。このようなデジタルツイン解析によって得られた超温度場条件における高速結晶成長のモデリングにも成功した(図 6A01a-1 右)。フェーズフィールド(PF)計算を CtFD 計算と連成させることで実験組織をより高い定量性で予測可能と期待される。

さらには、3DP プロセスの適用による高機能化が期待されるセラミックス材料(Al_2O_3)にも同デジタルツイン解析を適用し、3DP 用ビーム照射による熔融・凝固過程の解析を A03-c 班(セラミックス材料)と連携して実施した。

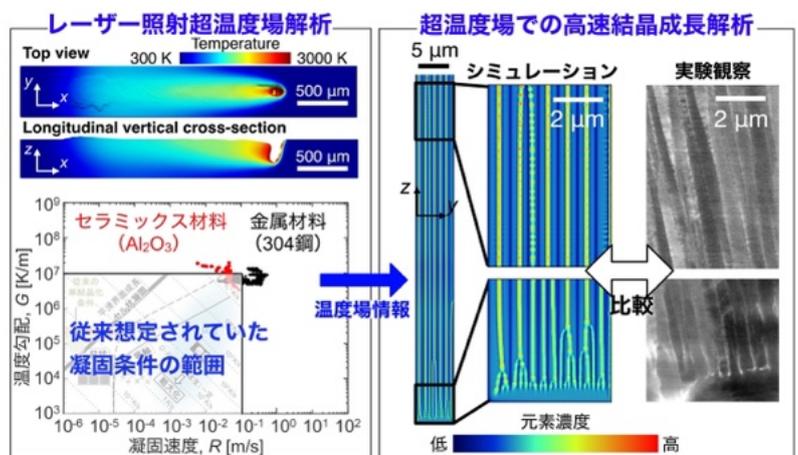


図 6A01a-1. 超温度場における結晶成長のデジタルツイン解析。熱流体力学計算によって得られた超温度場条件を用いたフェーズフィールド計算により、3DP に特有のセル組織形成を予測。(Addit. Man. 2024)

セラミックス材料にビーム照射した際にも超温度場での凝固が生じることが示唆され、セラミックス材料でも金属と同様に、形状制御だけでなく、超温度場の制御による単結晶化の可能性を示すことに成功した。

② 絶対安定を利用した無偏析単結晶造形

デジタルツイン解析に基づき 3DP における超温度場を制御することで、Fe 基および Ni 基合金における単結晶育成に成功した。例として、本領域で共通試料としているオーステナイト型ステンレス鋼 (SUS316L 鋼) の結晶組織を **図 6A01a-2a** に示す。SUS316L 鋼の造形体では、中心部分で高配向な単結晶に近い組織が形成できることを示した。さらに、インプロセスモニタリングにより、X 方向が<100>方位、Y および Z 方向が<110>方位に配向するメカニズムとして、チャンバー内の Ar ガス流でヒュームがレーザー進行方向に流れてレーザーを遮るためであることがデュアルフォトダイオードの検出データから示された。

さらに、Fe-Al 系および Fe-Cr-Co 系の Fe 基機能性合金では、バルク材へのレーザービーム照射実験およびそれと整合した CtFD 計算により、熔融池断面大部分の凝固速度が絶対安定の臨界速度を超越して、レーザーPBFによる無偏析単結晶材の造形の可能性が示唆された。加えて、レーザー出力、走査速度、走査線間隔、粉末床厚さ、基板温度などプロセス条件を最適化して Fe-Al 合金および Fe-Cr-Co 合金の単結晶材を育成し、**A02b 班との連携**によって詳細な原子レベルでの解析を実施した。両合金とも単結晶造形体ではセル組織および溶質偏析は見られず (**図 6A01a-2b**)、超温度場での急速結晶成長により絶対安定性が発現し無偏析単結晶の造形が得られた可能性が高いと期待される。

【公募研究班の成果】

① 超温度場 3DP 解析のための高精度・高速原子モデリング手法の構築

超温度場における材料内部や材料表面・界面での原子運動の詳細とその背景の物理の解明のために原子運動を高精度かつ高速に解析可能な原子モデリング手法を構築した。具体的には、空孔拡散解析のための高速動的モンテカルロ法と、ニューラルネットワーク (**図 6A01a-3**) を用いて 3DP 用 Ni 基合金の原子間ポテンシャルの構築に成功した。さらに、凝固後の拡散による結晶内部の原子配列、化学秩序形成の予測や創製した材料の高精度な変形解析が可能であることを示した。【新里】

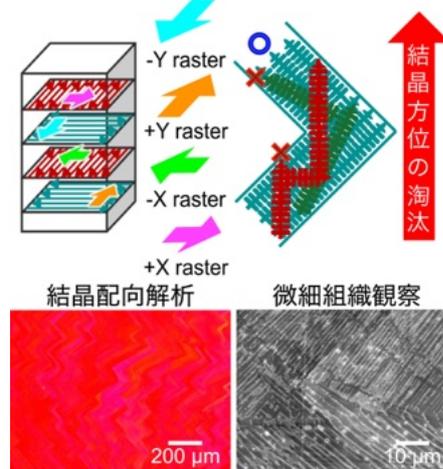
② 3D プリント組織制御のための高性能 Phase-Field 計算法の構築

PBF 型金属 3DP では、ビーム走査条件の組合せが無限にあり、温度や流動の極めて厳しい条件下で凝固組織が形成されることから、数値シミュレーションによる材料組織予測が必須である。本研究では、メソスケールの材料組織予測において最も強力な PF 法を用いて全ての界面を表現し、熔融池内の流動と温度の分布によって影響を受ける材料組織予測法と、様々なスキャンストラテジーに対応する組織予測法基盤の開発に成功した (**図 6A01a-4**)。本研究で開発した手法を基盤として、高精度な材料組織予測が数値シミュレーションのみで達成可能となり、金属 3DP のデジタルツイン構築の進展への大きな寄与が期待される。【高木】

③ ナノ秒パルス場加熱型 3DP によるデジタルツイン科学の開拓

新たな超温度場形成を伴う金属 3DP 技術として、ナノ秒パルス通電による材料の熔融と堆積について、ナノ秒パルス電源の開発から実施した。Al-Mg-Si 合金を用いた実験では、印加電圧 1 kV までパルス通電による熔融により金属を堆積させられることを示した。それ以上の印加電圧では **図 6A01a-5** (2.0 kV の例) に示すように基板も熔融・昇華が生じることが明らかになった。パルス通電型の熔融システムの構築における印加電圧の精密な重要性が示された。【中山】

(a) 3DPでの単結晶育成 スキャン条件最適化



(b) 無偏析単結晶育成 スキャン条件 + 合金組成最適化

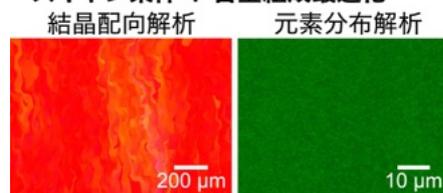


図 6A01a-2. (a) スキャンストラテジー最適化による単結晶化 (SUS316L 鋼). (*Mater. Trans* 2023 (領域特集号)), (b) 合金種と組成の選択での無偏析単結晶化にも成功した (Fe-Al 合金での例).

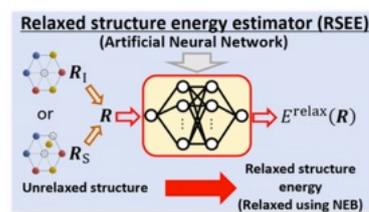


図 6A01a-3. ニューラルネットワークを用いた高速動的モンテカルロ法の構築。

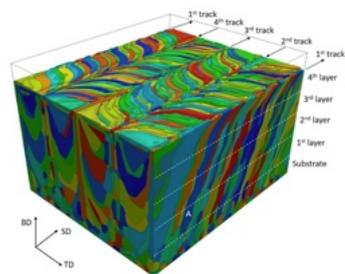


図 6A01a-4. 新たに構築した種々のレーザースキャンストラテジーでの微細組織予測が可能なフェーズフィールドモデル。

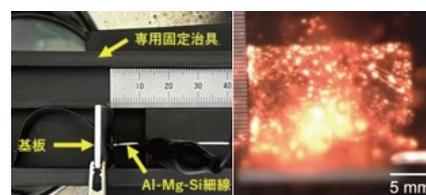
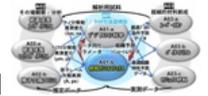


図 6A01a-5. アルミニウム合金への 2.0kV でのパルス通電加熱の様子。



研究項目 A01 『超温度場材料創成学のデジタル研究基盤構築』

計画研究 A01-b「超温度場材料インフォマティクス:ビッグデータからの法則発見と最適化予測」

(1)何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

領域設定期間内: 目的に応じたレーザ積層造形プロセスを、実験結果およびシミュレーション結果をデータサイエンスで統合することにより最適化する手法を Fe 基合金および Ti 基合金を対象に構築する。

中間評価までの目標: プロセス—組織—特性間を関連付ける記述子を設計する。

中間評価実施時までの進展: (成果 1) 畳み込みニューラルネットワーク(CNN)とニューラルネットワーク(ANN)の連成モデルを用いて、共通試料 SUS316L 鋼を対象にプロセス—組織(EBDS 逆局点図などのカラー画像を含む)—特性を関連付ける新しいネットワーク構造を提示した(論文 1 報、投稿中 1 報)。ここでは、材料組織の特徴量抽出はコンピュータが全自動で行うとともに、その特徴量の理解のために特徴量の次元圧縮マップ上に元組織を上書き表示する作業を完全自動で行うシステムを構築した。(成果 2) 異方性の強い積層造形材の 3D 組織を垂直な 3 断面上の 2D 組織像からバーチャル生成する敵対的生成ネットワーク構造を構築した(論文 2 報)。(成果 3) 組織パターン以外の微視的特徴量を把握する一環で、共通試料の積層造形 SUS316L 鋼に間隔 25 nm の変調構造が存在することを透過電子顕微鏡により発見した(論文 1 報)。(成果 4) 超温度場での非平衡凝固過程を理解するために、熱力学データをニューラルネットワーク化した高速非平衡フェーズフィールド(PF))シミュレーションモデルを構築した(論文 1 報)。今後、これらの成果を Ti 合金にも対象を拡充して進める。

(2)本計画研究で得られた成果及び本計画研究と連携している公募研究で得られた成果

【計画研究班の成果】

① 3 枚の二次元断面像からの高解像度三次元像の Big-volume SliceGAN による生成

垂直な 3 面の二次元像のみから高解像度で内部を含む三次元像を生成する敵対的生成ネットワーク(SliceGAN およびその改良版の Big-volume sliceGAN)を SUS316L 鋼 L-PBF 材に適用し、特殊な装置を使うことなく妥当な三次元像をバーチャルに生成する事に成功した([図 6A01b-1](#))。

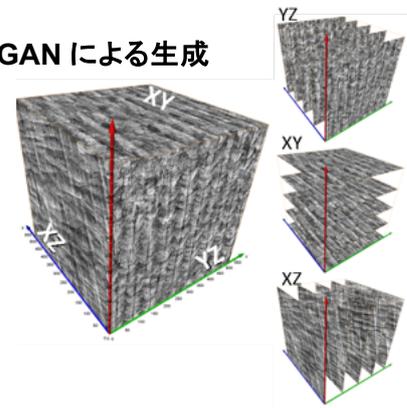


図 6A01b-1. Big-volume SliceGAN による SUS316L 鋼 L-PBF 材の Virtual-3D 組織。

② CNN 画像回帰による EBSD_OIM マップからの硬度直接推定

組織と特性を関連づけるには、組織の特徴量抽出が必要であるが、二値化処理が困難な単相組織や複雑な組織の場合にはその特徴量抽出が従来方法(材料工学的・数学的特徴量抽出)では困難な場合がある。共通試料である SUS316L 鋼 L-PBF 材も、組織と特性(硬度)を関連づける新たな手法開発が求められる。

そこで、畳み込み CNN ([図 6A01b-2](#))を用いて、画像から特性を推定する新たな画像回帰モデルを構築し、EBSD_OIM 像のカラーマップから硬度を高精度で推定することに成功した([図 6A01b-3](#))。組織解析のみで、機能解析を行うことなく、高精度な機能推定を可能とする基盤が構築できた。

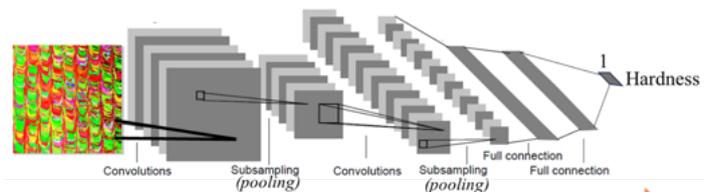


図 6A01b-2. CNN 画像回帰の構造。

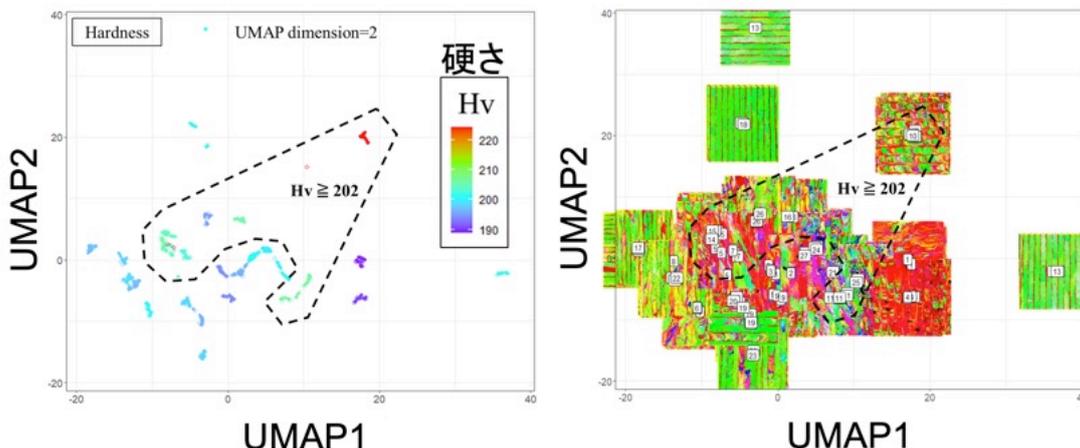


図 6A01b-3 CNN 画像回帰による全自動特徴量抽出(+次元圧縮)と(左)硬度との関係、(右)元の IPF 組織との関係。

③ 316L ステンレス鋼の階層的構造解析による組織記述子の解明

特徴的な積層造形材の特性を理解するためには、上に述べた組織レベルでの特徴量抽出に加えて、より微視的な構造の解明が不可欠である。本研究では、X線回折、EBSD、透過型電子顕微鏡(図 6A01b-4)、二圧子法(図 6A01b-5)を用いて、階層構造の解明を目指した。

その結果、数ナノオーダーでの**変調構造の存在**を初めて見出すとともに、セル間での偏析、熔融池境界での合金元素量の低下などを明らかにした。これらの微視組織と、②で述べた組織特徴量の総合的な結果として、一般のステンレス鋼に比べて硬くなっていることが明らかとなった。

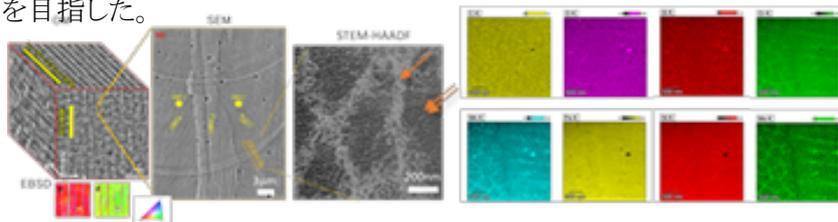


図 6A01b-4 階層構造解析結果と変調構造間隔、転位セルサイズ、転位密度に及ぼすレーザ走査速度の影響。(A02-a との連携研究)

④ データ同化を導入した非平衡マルチフェーズフィールド法による凝固組織形成シミュレーション

非平衡マルチフェーズフィールド法を用いて、SUS316L 鋼の積層造形時の凝固組織形成を再現・予測する数値シミュレーション方法を構築し、さらにアンサンブルカルマンフィルタなどのデータ同化手法を用いて、物性値やパラメータを実験データから逆推定することで、凝固組織シミュレーションを高精度化することを目指している。

これまでに、SUS316L 鋼を想定した Fe-C-Cr-Mn-Mo-Ni 合金での凝固組織形成シミュレーションにおいて、状態図計算ソフトウェア Thermo-Calc のデータに基づく凝固組織形成シミュレーションを実施するために、ニューラルネットワークによる計算高速化を行った。局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)を導入し、**凝固組織形態からパラメータを逆推定**する技術を開発した。この開発したデータ同化技術を数値実験(双子実験)により実証した。図 6A01b-6a に示すように、データ同化により推定した凝固組織は、擬似観測データ(図 6A01b-6b)とよく一致し、データ同化を用いない場合には大きく乖離することがわかる(図 6A01b-6c)。凝固組織形態の推定と同時に、界面モビリティのパラメータ(フェーズフィールドモビリティ)を逆推定することが可能であることを示した(図 6A01b-6d)。この結果として、図 6A01b-7 に示すように、溶質濃度分布の推定精度が向上することも明らかにした。今後は、積層造形時の凝固過程をその場観察した結果をデータ同化することで、物性値やパラメータを実験データから逆推定できる基盤の構築を目指す。

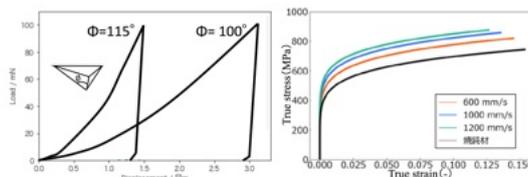


図 6A01b-5. 積層造形した 316L ステンレス鋼の SS 曲線の二圧子法による推定。

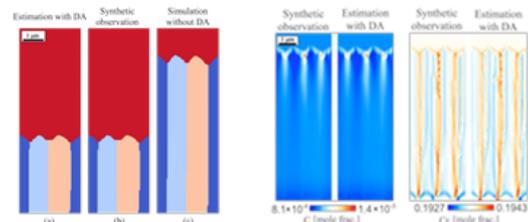


図 6A01b-6. 凝固組織形成シミュレーション結果。(a) 擬似観測データ、(b) LETKF に基づくデータ同化による推定結果、(c) データ同化なしの結果、(d) データ同化による溶質濃度分布の推定結果。

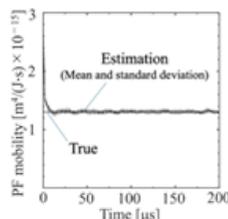


図 6A01b-7 LETKF に基づく界面モビリティ推定結果。

【公募研究班の成果】

① **組織と力学特性をつなぐ記述子の導出**: レーザ積層造形 Al-Si 合金材を対象に、造形まま材および熱処理材の組織とその不均一性をパーシステントホモロジー(図 6A01b-8)で定量評価し、強度や延性の異方性と相関する記述子を導出した。また、レーザ積層造形のプロセスパラメータの最適化を目指して、熱拡散を考慮する造形指標にハッチ距離の影響を取り入れることに成功した。【鈴木】

② **固相変態を示す α 型チタン合金での [0001] 配向化**: α 型チタン合金の LPBF による結晶配向制御は従来困難とされてきたが、造形条件の最適化により、[0001] 配向に成功した(図 6A01b-9)。これは超温度場での固相変態による結晶配向制御の先駆的研究であり超温度場材料創成学の可能性を大きく広げた。【刈屋】

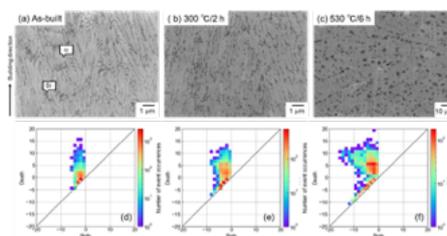


図 6A01b-8. Al-Si 合金の L-PBF 材のおよび熱処理材の組織とパーシステントホモロジー図。



図 6A01b-9. 固相変態による [0001] 配向粒成長過程のその場観察結果。

研究項目 A02 『超温度場材料創成学のその場観察・分析』

計画研究 A02-a 「超温度場結晶成長マイクロダイナミクス:透過 X 線その場観察」



(1)何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

領域設定期間内: 金属粉体へのレーザー照射・走査により付与された超温度場が引き起こす現象を、放射光 X 線を用いてマイクロスケールでその場観察することにより、熔融池スケール(数十～数百 μm オーダー)での急速溶解・急速凝固現象、すなわち、熔融池スケールで生じる急速凝固速度や凝固形態の変化、周辺組織・粉体との相互作用を実証的に明らかにする。そのために、「①その場観察手法の確立・発展」を進めるとともに、「②巨大ポテンシャル勾配下における急速溶解・急速凝固のマイクロダイナミクス」、「③隣接走査列間・積層間のマイクロダイナミクス」、「④超温度場における欠陥形成のマイクロダイナミクス」を明らかにすることで、「⑤超温度場における急速溶解・急速凝固・欠陥形成のマイクロダイナミクスの体系化」を果たす。

中間評価実施時まで: 高速レーザー走査に伴う急速な現象の高時間分解観察の達成および①～④における熔融凝固の基本現象を獲得する。

中間評価実施時までの進展: 金属 3DP と同程度のレーザー走査速度とそれによる熔融・凝固現象および熔融地周辺における相互作用を高時間分解で観察することに成功しており、それにより従来凝固モデルと実証的データの比較検討、スパッタ発生機構、熔融池内液相流動の影響、等が明らかになりつつある。

(2) 本計画研究で得られた成果及び本計画研究と連携している公募研究で得られた成果

【計画研究班の成果】

① 実証的データを獲得するためのその場観察手法の確立・発展

本領域の開始時には 70 W ファイバーレーザーと集光光学系を一体化したレーザー照射システム全体を電動スライダで駆動していたため、その走査速度は数十 mm/s 程度と遅かったため、急速溶解・急速凝固を議論するために ms オーダーでのパルス照射を代用してきた。さらに、撮像速度は 200 fps が限界であった。2021 年度に高速度カメラが SPring-8 に導入され 200 fps での撮像が可能となった。500 W ファイバーレーザーおよびガルバノスキャナを 2022 年度に本計画班にて導入し、観察装置として組み上げ(図 6A02a-1)、2023 年度からは実際の PBF-LB プロセスと同様の m/s オーダーのレーザー走査と数万 fps の時間分解能が記録可能になった。光学系の改良で空間分解能でも $1 \mu\text{m}/\text{pixel}$ から最高 $0.44 \mu\text{m}/\text{pixel}$ への向上に成功した。2024 年度には現象のイメージングと同期した温度場の時分割測定と回折測定を可能にするべく改良を進めている。

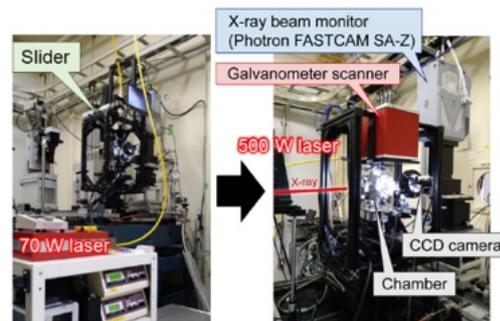


図 6A02a-1. レーザ急速溶解・急速凝固現象その場観察装置の改良。

② 巨大ポテンシャル勾配での急速溶解・凝固のマイクロダイナミクス

Al-Cu 合金をモデル合金とし、バルク体への種々の出力・時間でのスポットレーザー照射による凝固速度を実測した。さらに組織観察から初晶率を評価することで実測値のみによる凝固速度と初晶率の関係を獲得した。これをデンドライトの定常成長を仮定して同関係を導く GK モデルと比較した結果、大きな乖離が存在した。そこで熔融池の液相線からの溶質拡散を凝固後の元素分布から仮定して解析した結果、良い傾向の一致を示した。したがって、PBF-LB のような急速プロセスでは、液相中の濃度分布がその後の組織形成に影響を及ぼすこと、さらに熔融池サイズが小さいがために凝固の初期・終末トランジェントも影響することを明らかにした。PBF-LB と同様の走査速度を実現するガルバノスキャナを用いた 400W、1.0 m/s でのレーザー走査では、長くテールを引く熔融池とその中に存在する広範な固液共存域を実証的に示した。さらに母相の共晶組織に由来する溶質元素の濃化域は熔融池内で数十 μm 程度しか動けずに凝固することを明らかとした(図 6A02a-2)。このような液相内に溶質分布が残存する現象を固相内に著しい溶質分布を有する Ni 基超合金を例にスポット照射によって検討した結果、熔融池中央に他の領域と濃度の異なる偏析帯が形成され(図 6A02a-3)凝固後にも保存されることが明らかとなった。

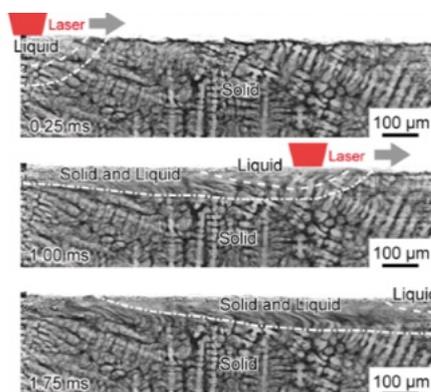


図 6A02a-2. Al-15mass%Cu 合金の 400W、1 m/s でのレーザー走査による急速溶解・急速凝固の様子。

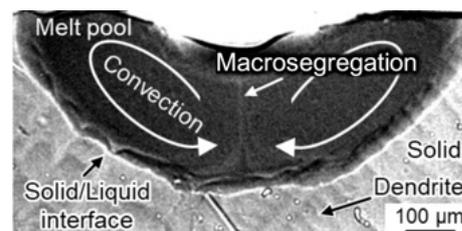


図 6A02a-3. Ni 基超合金(CMSX-4 相当組成)のレーザースポット照射中の液相流動に起因するマクロ偏析帯の形成。

そこで TaC 粒子をトレーサーとして液相流動を確認した結果、熔融池周辺ではマランゴニ流により液相が攪拌されることで溶質濃度が均一化されるのに対し、熔融池中央では液相流動の弱い領域が形成され、既造形層とこの領域との位置関係に由来するものであることが明らかとなった。通常の PBF-LB では凝固組織が小さく、溶解前組織の影響は受けにくいことが予想されるが、使用する原料粉末内の溶質分布が特に共晶系合金では無視できないことを示唆している。純金属粉末を用いたその場合合金化においても混合不良は観察から明らかとなっており、熔融プロセスおよびスキャンストラテジーの重要性が示された。

③ 隣接走査列間・積層間のマイクロダイナミクス

A01-a 班、A03-b 班で議論されているスキャンストラテジーによる単結晶状組織について、その場観察を行いながら熔融凝固を繰り返し、複数の熔融池を重ねていく過程で粗大結晶粒の形成過程を実証的に示した。さらに、銅粉末を例に、濡れに伴い熔融池全体が隣接ビード側へと移動することで熔融池 1 個分の空間が形成される、すなわち欠陥のトリガーとなりうることを実証的に示した。

④ 超温度場における欠陥形成のマイクロダイナミクス

Ti 合金の特に顕著な液相表面の激しい揺動に着目した。エネルギー付与により合金の蒸発が生じるとその反力で液相が凹む。その過程で表面形状の急激な凹みが突発的に生じると、液相の一部が上方に跳ね液滴化するとともに蒸発流に乗り加速しながら飛散することを実証的に示した(図 6A02a-4)。これは 3DP 造型体に生じる欠陥の一種であるスパッタの形成原理の解明に相当する。また、金属粉末へのレーザー照射により熔融池が形成される際、Cu では熔融池が粉末を引き寄せるのが顕著なのに対し、他の合金系では熔融初期とその後で熔融池の成長の様式が異なることが示唆された。粒子画像追跡法(PIV)によりその速度の変化を実測し(図 6A02a-5)、観察画像から推定した粒子質量を基に移動現象の運動方程式を整理することで粉末に作用する力を定量的に評価した。

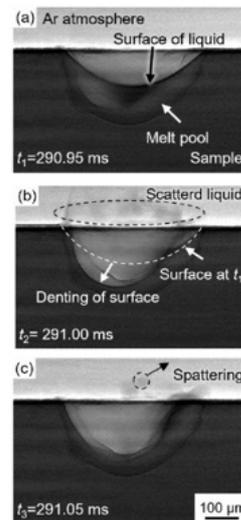


図 6A02a-4. Ti-6Al-4V 合金へのレーザー照射によるスパッタ挙動の X 線透過その場観察例。

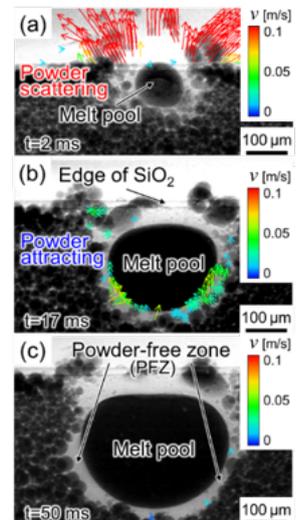


図 6A02a-5 銅粉末へのレーザー照射時の飛散と熔融池への粉末の移動. X 線透過その場観察例。

これにより熔融池形成過程で熔融池に引き寄せられる粉末に数~数十 nN の力が作用することが明らかになるとともに、その力は熔融池との距離の 2 乗に反比例すると示唆された。この力の起源として熔融池へのレーザー照射に伴う熱電子の放出による熔融池の正の帯電に伴うクーロン力と想定しており、今後検証を進める。

【公募研究班の成果】

① 非接触浮遊法を用いた広温度範囲での高精度融液熱物性測定: Ti 合金は金属 3DP で多用される合金系であるが、そのプロセスシミュレーションに必要な高温融液物性値は、反応性の高さから圧倒的に不足している。本研究では無容器プロセスである電磁浮遊法を用い、Ti-Nb 合金の表面張力を広範な温度域で、A01-a 班の計算の高精度化に資する実測値を獲得した(図 6A02a-6)。【安達】

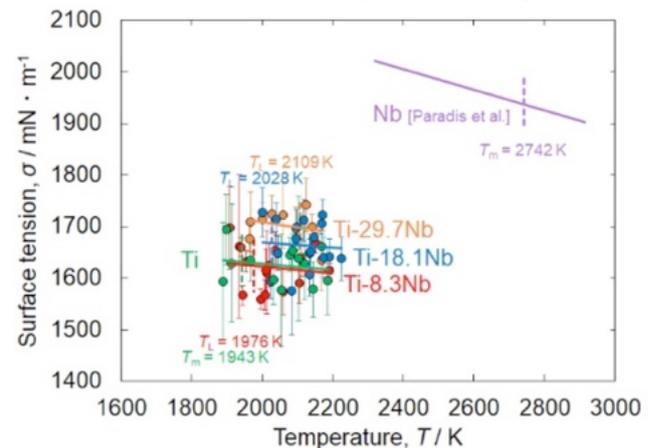


図 6A02a-6. 非接触浮遊法で得た Ti-Nb 合金融液の表面張力の温度依存性。

② 超高压電子顕微鏡法によるナノスケールデンドライト形成・成長のその場 3D 観察: 急速凝固中の結晶成長を議論する上でナノスケールでのデンドライトの議論が不可欠である。本研究では凝固現象とアモルファス相の結晶化を対応させ、超高压電子顕微鏡法を用いて三次元ナノスケールデンドライトの成長を動的に捉えることに成功した(図 6A02a-7)。その結果、高速成長 3D その場観察を達成し、2D 解析との併用により 9.6 nm という、従来の報告値よりもさらに小さなデンドライトの先端曲率半径を実証した。【永瀬】 (A02-b との連携)

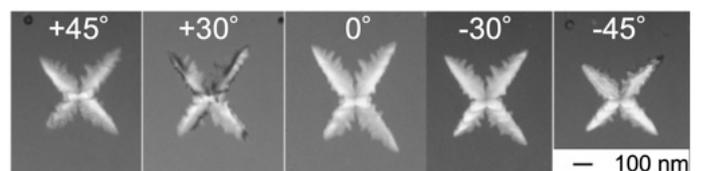


図 6A02a-7. 3D 構成用ナノスケールデンドライトの傾斜像例。

研究項目 A02 『超温度場材料創成学のその場観察・分析』

計画研究 A02-b 「超温度場格子欠陥アナリシス: 先端分析材料科学」

(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

領域設定期間内: 先端分析手法(超高压電子顕微鏡法、中性子回折法、陽電子消滅法)を駆使した「形態、歪、空孔」の複合的・統一的解析(超温度場格子欠陥アナリシス)を行うことにより、粉末床溶融結合(PBF)により形成される合金の3次元組織・組成、応力場・歪場、格子欠陥を明らかにして、3Dプリントプロセスの体系化に資する材料組織学を構築することが領域設定期間内の研究目的である。

中間評価実施時まで: 上記の目的を達成するために、共通試料である SUS316L 鋼 LPBF 材について、(1) 透過電子顕微鏡法と付属分析手法を用いた微細組織と溶質偏析の解明、ならびに3次元構造解析のための画像取得条件探索、(2) X線回折法と中性子回折法による表面、内部残留応力の3次元分布の評価、(3) 陽電子消滅法による格子欠陥の同定、を中間評価実施時までの目標としている(図 6A02b-1)。

中間評価実施時までの進展: 計画通り完了した。



図 6A02b-1. 主要装置。電子、中性子、陽電子。

(2) 本計画研究で得られた成果及び本計画研究と連携している公募研究で得られた成果
【計画研究班の成果】

① 透過電子顕微鏡法と付属分析手法を用いた SUS316L 鋼 LPBF 材の微細組織と溶質偏析の解明

特異な結晶配向 CLM (Crystallographic Lamellar Microstructure) を有する SUS316L 鋼 LPBF 材の YZ 面(レーザー走査方向を X、造形方向を Z)の透過電子顕微鏡による微細組織解析を行った(A01-b 班と連携)。溶融池内部のセル境界(主層と副層間のラメラ境界ならびに転位セル壁)に **Cr、Mo が濃化**(Cr: 1 wt%、Mo: 1~2 wt%) し、溶融池境界(MPB)直上にて **Cr、Mo 濃度が低下**(0.5 wt%) していることを明らかにした。凝固偏析の傾向は修正 Scheil-Gulliver 計算結果と一致する(A01a 班との連携)。電子エネルギー損失分光(EELS)測定を行い、**凝固偏析により Cr、Fe の化学状態(価数)は変化しない**ことを明らかにした。これは本合金の**高い耐食性を反映**している。さらに、ラメラ境界ならびに転位セル壁に沿って、**ナノサイズの球状介在物(Mn-Si-O)**が分布していた。このような微細な介在物は**孔食には寄与しない**ことが指摘されているが、上記の EELS 測定結果はこれを裏付けるものである。STEM-EDS 元素マップを詳細に解析すると、MPB 直上でのセル間隔の広がり(冷却速度低下を示唆)やセル状組織の欠如が判明した(図 6A02b-2)。MPB 直上では温度勾配が大きく、凝固速度が小さいことから、局所的に**平滑界面成長**が生じたと考えられる。電顕組織解析により**超温度場での凝固に関する微視的特徴**が明らかになった。凝固過程の直接観察を目指し、急速加熱ホルダー(10³ K/s)を用いた**電顕内その場観察**の準備を進め、試料形状等について検討を行った(A01-a 班との連携)。さらに、造形体の**3次元構造解析**に向け、超高压電子顕微鏡にて連続傾斜像撮像を行い、最適試料形状や観察条件に関する知見を得た。

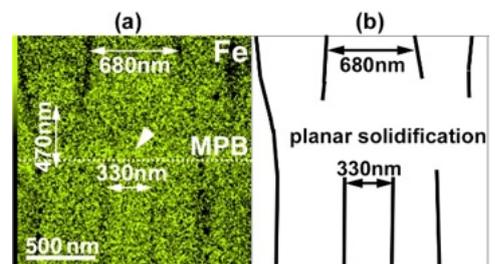


図 6A02b-2. 溶融池境界近傍での (a) Fe マップと (b) セル境界を表す模式図。

② 中性子回折法による SUS316L 鋼 LPBF 材の内部残留応力の解析と残留応力形成機構の解明

J-PARC TAKUMI における中性子回折実験により、LPBF 製 SUS316L 鋼角柱材の内部に形成された残留応力の3次元分布を解析した。その結果、**超温度場が形成される LPBF での残留応力の生成機構は、溶接とは全く異なり、降伏応力にも迫るほど大きな圧縮残留応力が形成されることを世界で初めて明らかとした**(図 6A02b-3)。一般的に溶接では引張の残留応力が形成されることから、これは驚くべき事実である。溶接では溶融部の幅が数十 mm にも達するため、その周囲の温度勾配は最大でも 10⁵ K/m 程度にとどまる。そのため、溶融部周囲に生じる圧縮応力は非常に小さく、残留応力形成への寄与は小さい。一方で、LPBF における溶融部の幅は 100~300 μm 程度と極めて微小であるため、その周囲には溶接よりも 1~2 桁も大きな温度勾配(10⁶~10⁷ K/m)が形成され、溶接よりも圧倒的に大きな圧縮応力が生じる。加えて、LPBF では3次元的にレーザー走査を繰り返すことから、この溶融部周囲に形成される圧縮応力が逐次積算され、極めて大きな圧縮残留応力へと発達する。さらに、 σ_z のみが投入エネルギー密度(ED)の増加に伴い降伏応力程度まで顕著に発達することを見出した(図 6A02b-3a と b を比較)。

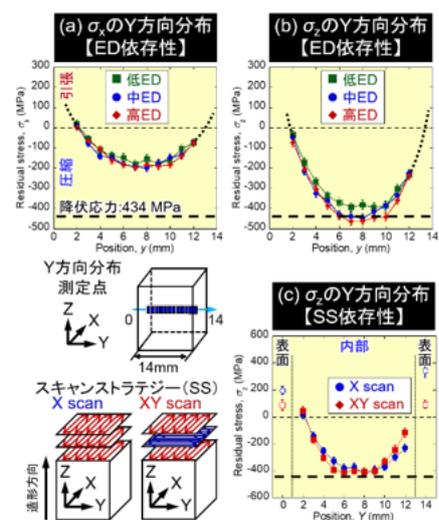


図 6A02b-3. 中性子回折法により解析した内部残留応力の Y 方向分布. (a) σ_x の (b) σ_z の投入エネルギー密度依存性. (c) σ_z のスキャンストラテジー依存性。

A01-a 班との連携により熔融池およびその周囲の温度分布、温度勾配、冷却速度等を CtFD 解析した結果、この σ_z の強い異方性は、熔融部周囲の超温度場が特に Z 方向に大きな広がりを持つために生じることを世界に先駆けて解明した。これらに加え、当初の計画を前倒して内部残留応力の三次元分布に及ぼすスキャンストラテジー (SS) の影響を調査した。従来、積層毎にレーザー走査方向を 90° 回転させる XY スキャンの方が同じ方向の走査を繰り返す X スキャンよりも表面残留応力は小さく知られてきたが、内部残留応力は SS によらず同程度にまで発達することを世界で初めて実験的に示した (図 6A02b-3c)。これは、造形体表面と内部における温度勾配の差異に起因するものであるが、cm オーダーの造形体内部の結晶学的情報をも取得可能な中性子回折法でしか得ることのできない知見であり、学術的のみならず工学的にも非常に重要な発見である。今後、これまで明らかとしてきた超巨大な温度勾配によって形成される残留応力の特異性 (強い異方性の形成、表面/内部の差異) に着目することで、『3DP 材における残留応力の形成・発達を制御し、有効活用する』という新たな切り口の力学特性向上法の確立、さらには応力誘起相変態の発生制御やそれに基づく新奇な組織制御法の確立への道が開かれると期待される。

③ SUS316L 鋼および Ti-15Mo-5Zr-3AlLPBF 材の陽電子消滅法による格子欠陥の同定

LPBF 法で作製した SUS316L 鋼および Ti-15Mo-5Zr-3Al について陽電子寿命測定により格子欠陥の解析を行った。図 6A02b-4 に積層造形時の走査速度に対する陽電子寿命の変化を示す。SUS316L 鋼では完全結晶の陽電子寿命 104 ps よりも 50 ps 程度長く、走査速度が速くなると陽電子寿命が長くなるが、Ti-15Mo-5Zr-3Al では完全結晶の陽電子寿命 144 ps と同程度であることから、SUS316L 鋼には空孔型欠陥が導入されるが、Ti-15Mo-5Zr-3Al には導入されないことを明らかにした。導入された空孔型欠陥種の同定ならびに定量評価を行うため、陽電子寿命測定により 1 時間の等時焼鈍による格子欠陥の回復過程の解析を行った。図 6A02b-5 に走査速度 400 mm/s 造形材における等時焼鈍により得られた陽電子寿命の 3 成分解析における相対強度を示す。その結果、空孔に加えて約 150 ps の転位の寿命値に相当する欠陥成分が含まれていることを明らかにした。等時焼鈍温度が高くなると、空孔成分の相対強度は低下し 523 K で空孔は回復した。空孔成分の減少の影響で、転位成分の相対強度は 523 K までは上昇するが、空孔が回復した 523 K 以上では転位成分の相対強度は低下し、873 K でも完全には回復しなかった。図 6A02b-6 に示すように空孔濃度は走査速度の増加とともに高くなる傾向を示し、1400 mm/s で 23.9 atppm であった。この空孔濃度は融点直下の空孔濃度に匹敵する。また、転位密度も同様の傾向を示し、1400 mm/s で $4.5 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ であった。この転位密度は電子顕微鏡観察から見積もった値と同程度である (A02b 班内共同研究)。このように造形時の走査速度と空孔濃度および転位密度との定量的な関係を明らかにした。

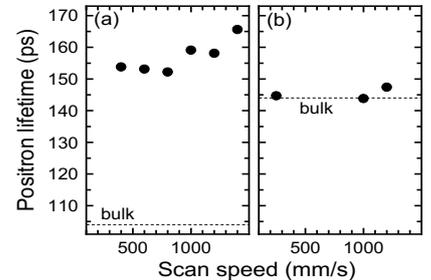


図 6A02b-4 (a) 316L 鋼、(b) Ti-15Mo-5Zr-3Al における陽電子寿命と走査速度の関係。

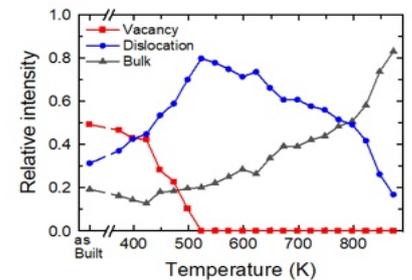


図 6A02b-5 400 mm/s 造形材における等時焼鈍による相対強度の変化。

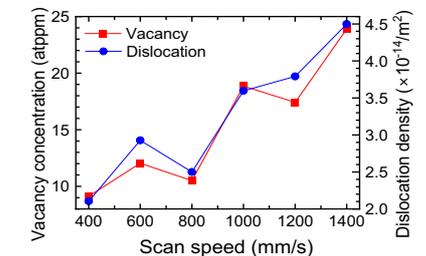


図 6A02b-6 316L 鋼における空孔濃度と転位密度の走査速度との関係。

【公募研究班の成果】

① 非平衡組織を有する電子ビーム金属 3DP 材のその場中性子回折測定を用いた組織・結晶塑性解析

電子ビーム積層造形 (EB-PBF) を用いて作製した Ti-6Al-4V 合金を対象に研究を行い、引張特性および組織形成に及ぼす造形条件の影響について調査した。

造形体の引張特性は電子ビームの電流値および走査速度に依存して変化した。中性子回折測定は J-PARC の iMATERIA (BL20) にて行い、Rietveld Texture 解析により β 相分率は大きく変化しないものの、旧 β 相の一方向凝固と $\beta \rightarrow \alpha'$ マルテンサイト変態、 α' マルテンサイトにおけるナノ β 相の析出に基づく集合組織形成がエネルギー密度に依存して変化することを明らかにした。また、Ni 基超合金にも対象を広げ、EB-PBF で作製した Alloy 718 において γ 相の粗大柱状晶組織と準安定な金属間化合物である γ'' 相の集合組織、相分率、格子定数を Rietveld Texture 解析を用いてバルク材料のその場引張測定データに基づく決定に成功した (図 6A02b-7)。【山中】

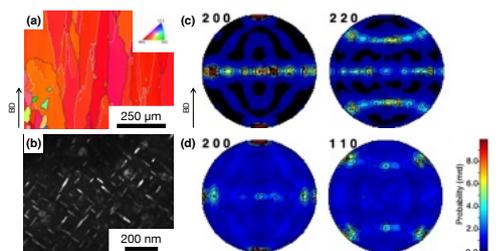
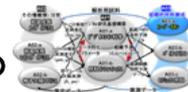


図 6A02b-7. EB-PBF を用いて作製した Alloy 718 の (a) IPF map、(b) γ'' 相の分布を示す TEM 暗視野像、中性子回折測定により求めた (c) γ 相および (d) γ'' 相の極点図。

研究項目 A03 『超温度場を活用した超越的材料創成』

計画研究 A03-a 「超温度場スーパーチタン創成科学: 超温度場を利用した耐熱チタン合金の新組織設計と特性改善」



(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

領域設定期間内: 粉末床熔融結合型レーザービーム/電子ビーム積層造形による超温度場を利用して、 β 相(体心立方構造)の過飽和固溶体状態にしたチタン合金を製造し、積層造形プロセスや熱処理により α 相(六方最密構造)や第三相を適切に形成させて、従来プロセスでは作製できない新しいチタン合金の組織を創成し高温特性の向上を図る。

中間評価実施時まで: 粉末床熔融結合型レーザービーム積層造形にチタン合金組成-積層条件-組織形成過程の関連を解明する。

中間評価実施時までの進展: チタン合金組成-積層条件-組織形成過程の関連を解明でき、一部のチタン合金では、超温度場を利用することにより、従来プロセスでは作製できない新しいチタン合金の組織を創成し高温強度の向上に成功した。

(2) 本計画研究で得られた成果及び本計画研究と連携している公募研究で得られた成果

【計画研究班の成果】

① near- α 型チタン合金の高温特性向上

耐酸化性に優れた開発合金である near- α 型 Ti-6Al-4Nb-4Zr (mass%) の粉末から、粉末床熔融結合型レーザービーム積層造形装置を用い、レーザーパワーやスキャン速度を変えて冷却速度の異なる積層造形体を作製した。そして、積層造形材に異なる条件の熱処理を施すことで組織形成過程を明らかにし、これらの組織がクリープ特性に与える影響について調べた。その結果、クリープ寿命(図 6A03a-1)は粒径や溶融池サイズに依存し、その変形機構は粒界すべりが優先的に起こること、冷却速度の違いによる組成分配や等軸 α 相の有無がクリープ寿命に影響を及ぼすことを明らかにした。そして、等軸 α 相の生成を抑制し、組成分配を十分に行った β 相/ α 相層状組織のクリープ特性が優れていることを見出し、この組織を用いることで疲労強度を損なわずに高温クリープ強度を大きく向上できた優れた新規スーパーチタン合金の創製が可能であることが示された。

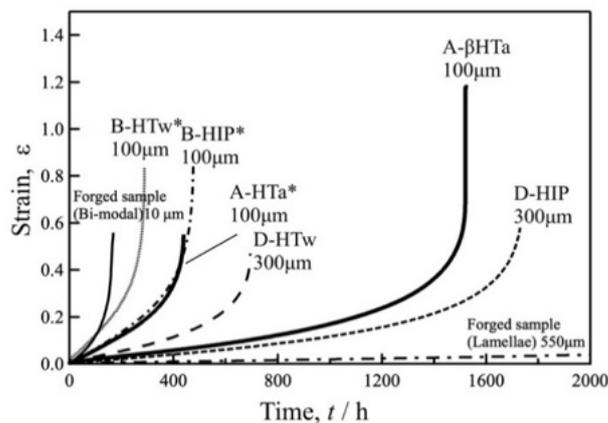


図 6A03a-1 異なる積層条件および熱処理を施した積層造形材(A-, B-, D-)と鍛造材の 600°C で 137 MPa におけるクリープ曲線。

② near- β 型チタン合金の新組織設計

実用材としてジェットエンジン圧縮機に使われている near- β 型 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (mass%) 合金の粉末から、粉末床熔融結合型レーザービーム積層造形装置を用いて、レーザーパワーやスキャン速度を変えて積層造形体を作製し、これらの組織観察を行うことで積層条件と微細組織の関係について実験的に調べた。また、シングルスキャンレーザー照射実験と熱流体力学によるシミュレーションを行い、積層造形中の組織形成過程を解明した(図

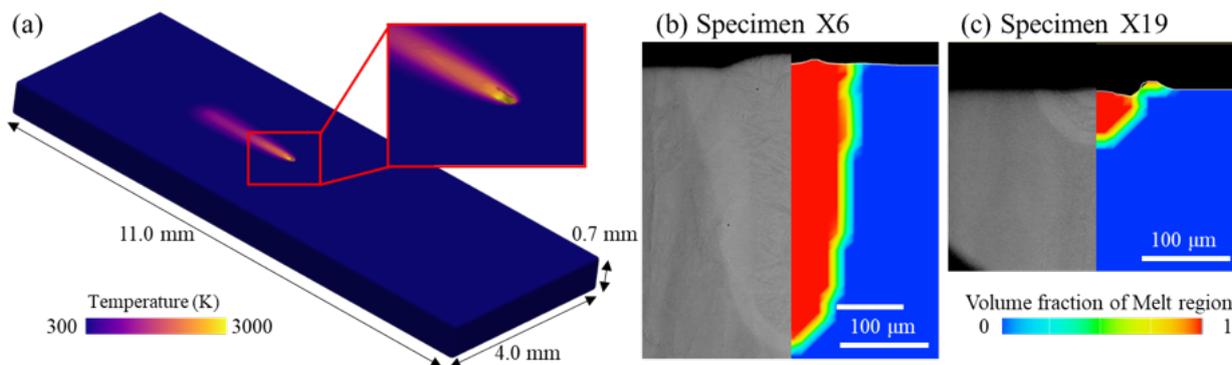


図 6A03a-2 シングルスキャンレーザー照射に対する熱流体力学シミュレーションによる (a) 温度分布、(b) VED が高い場合と、(c) VED が低い場合の溶融池断面形状の計算結果。(A01-a との連携研究)

6A3a-2、A01-a 班と連携)。その結果、一方向凝固的な組織、単結晶のような組織、多結晶組織等、積層条件により β 相の結晶粒組織を様々に制御し(図 6A3a-3)、高温特性を改善できる可能性を見出した。さらに、全て

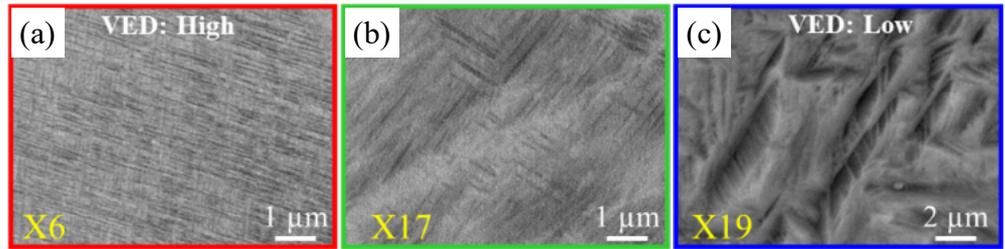


図 6A03a-3 VED が (a) 83 J/mm³、(b) 38 J/mm³、(c) 25 J/mm³ の条件で積層造形した Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金の組織。

の積層条件において積層造形材に典型的な溶融池形態が観察され、冷却中に溶融池内に α 相が生成した。そして、積層造形の体積エネルギー密度 VED が低いほど形成される α 相のサイズが大きくなり、通常の積層造形されたチタン合金で観察される組織と傾向が異なる特異な組織が観察された。VED が高い場合は転位密度が高くなることにより、 α 相の核生成サイトが増加し、微細な α 相が生成したと考えられる。

③ 組織自由エネルギー法による迅速な析出予測

積層造形したチタン合金の高温特性向上に最適な析出形態を得るために、合金組成・積層条件・熱処理条件を計算で効率的に探索できると便利である。そこで、チタン合金の析出予測における組織自由エネルギー法の有用性を調査した結果、 β 型チタン合金 Ti-13V-11Cr-3Al 合金の β 相過飽和固溶体における α 相と TiCr₂ 相の等温析出曲線図を、少ない入力パラメータで迅速に再現できることを示した。

【公募研究班の成果】

① レーザ粉末床溶融結合による航空用チタン含有ハイレントロピー合金の創製と高機能化: 優れた高温特性をもつことが期待される Ti-Nb-Mo-Ta-W 系ハイレントロピー合金は、元素偏析に伴う特性の低下が懸念されていた。そこで、原子半径差が最も小さくなる 4~6 族元素の組み合わせ、かつ固相線と液相線の温度差が最小となる組み合わせから、偏析が生じにくく BCC 構造の固溶体が形成しやすい合金として、非等量 TiNbMoTaW 合金を設計した。铸造法により作製したこの開発合金は、既報の等量 TiNbMoTaW 合金よりも元素偏析の抑制に成功し、走査型透過電子顕微鏡観察により B2 型金属間化合物を析出せずに BCC 単相であることを明らかにした(A02-b 班との連携)。また本開発合金は、室温で約 1200 MPa、800°C で 700 MPa 以上の降伏応力を示し、優れた高温強度を有することが示された。さらにこの開発合金の铸造材はデンドライト-インターデンドライト組織を形成した一方、レーザを用いた超温度場の急冷凝固により作製された開発合金は微細なセル組織を形成した(図 6A3a-4)。加えて、レーザ粉末床溶融結合(L-PBF)法により合金粉末を用いた造形を行うことで、積層造形条件に応じて異なる結晶集合組織を得た。これより、L-PBF 法で作製された本ハイレントロピー合金は優れた特性を発揮することが期待される。【小笹】

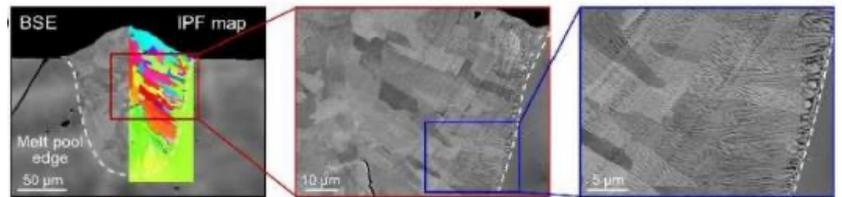


図 6A03a-4 L-PBF 法による TiNbMoTaW 合金造形体の微細なデンドライト組織。

② 積層造形法を活用した炭素強制固溶による高力学機能スーパーチタンの創製: 新規チタン合金の開発に加え、高温安定性の優れたセラミックス系強化材を導入したチタン基複合材料(TMC)の研究開発も進められている。本研究では、負に帯電した酸化グラフェン(GO)を、静電気力によって正に帯電した Ti-15Mo-5Zr-3Al (Ti1553)合金粉末の表面に均一に付着させ、流動性や粉末サイズおよび粒度分布を変化させることなくGO/Ti1553複合粉末を得た。さらにL-PBFプロセスの最適化を経て、緻密なGO/Ti1553積層造形体の製造に成功した。微細構造の観察からGO/Ti1553の造形体は完全に β 相で構成されており、GOシートの残留や炭化物の析出は確認されなかった。0.2 mass% GOの添加により、Ti1553合金の引張強度が992 MPaから1166 MPaに増加した(図 6A3a-5)。これは炭素または酸素原子の固溶強化と結晶粒微細化に起因していると考えられる。さらに1123 Kでの熱処理により、TiC粒子がチタン母相に析出した。これらの結果から、L-PBF法を活用して超温度場での炭素強制固溶により高機能チタン基材料の開発が可能であることを明らかにした。【周】

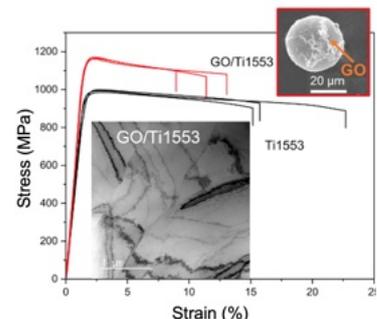


図 6A03a-5 Ti1553とGO/Ti1553造形体の引張応力-ひずみ曲線。

研究項目 A03 『超温度場を活用した超越的材料創成』

計画研究 A03-b 班 「超温度場バイオマテリアル創成科学：生体機能を操る 3DP 超温度場材料の創成」



(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

領域設定期間内：骨バイオマテリアルの創成に対し、3DP でのみ生み出すことが可能な超温度場を駆使した材質面での高機能化の基礎を、「バルク」、「表面」の両観点から築くことである。これは、世界的に盛んに実施されている、3DP が可能とする高い形状の自由度を活かしたバイオマテリアルの研究・開発とは一線を画す新奇のコンセプトと言える。

中間評価実施時まで：「バルク」：力学的な高機能化を指向した相安定性制御と単結晶化のための 3DP 超温度場支配因子の解明とシミュレーションモデル構築および力学的評価による機能検証、「表面」：細胞制御のための表面構築と *in vitro* 細胞実験による機能検証、

中間評価実施時までの進展：計画通り完了した。これは領域内での計画研究—公募研究間、さらには研究計画班間(特に、A01a, A03a 班)での綿密な連携の結果と言える。これまでの具体的な成果を以下に示す。

(2) 各計画研究、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果

【計画研究班の成果】

① 単結晶化のための 3DP 超温度場支配因子の解明とシミュレーションモデル構築

結晶集合組織制御のための 3DP 超温度場支配因子解明のため、A01-a 班との連携によりレーザー走査下での温度場シミュレーションモデルを構築、レーザー条件—超温度場下での凝固挙動—形成される結晶集合組織の関連性を明らかにした(図 6A03b-1)。材料として骨バイオマテリアルとして期待される β 型チタン合金を用いた。

単結晶/多結晶をレーザー条件により明確に作り分けることに成功した。さらに、単結晶/多結晶を得るための超温度場凝固条件を明らかにし(図 6A03b-1(e))、それを実現するためのレーザー条件設計指針をシミュレーション結果の統計解析に基づき確立した。具体的には、単結晶組織を得るための高 *G*・低 *R* 条件の実現には、高出力・低走査速度が必要であることを明らかにした。こうした配向化は、ヤング率の異方性を生み、高配向化した場合には、配向度に対応して<001>に低ヤング率を示すことから、生体骨への応力遮蔽を抑制するバイオマテリアルが期待される。

② 力学的な高機能化を指向した相安定性制御と単結晶化、力学的評価による機能検証

超温度場による大きな温度勾配は、マランゴニ対流による熔融金属の高速攪拌を生じる。これを駆使することで、*in process alloying* (純金属粉末の混合物を原料とし、レーザー照射による熔融中に合金化)が可能となる。*in process alloying* は、合金組成設計の自由度を著しく向上するため、組成によって相安定性と結果としての機能性を敏感に変化するチタン合金において極めて有用

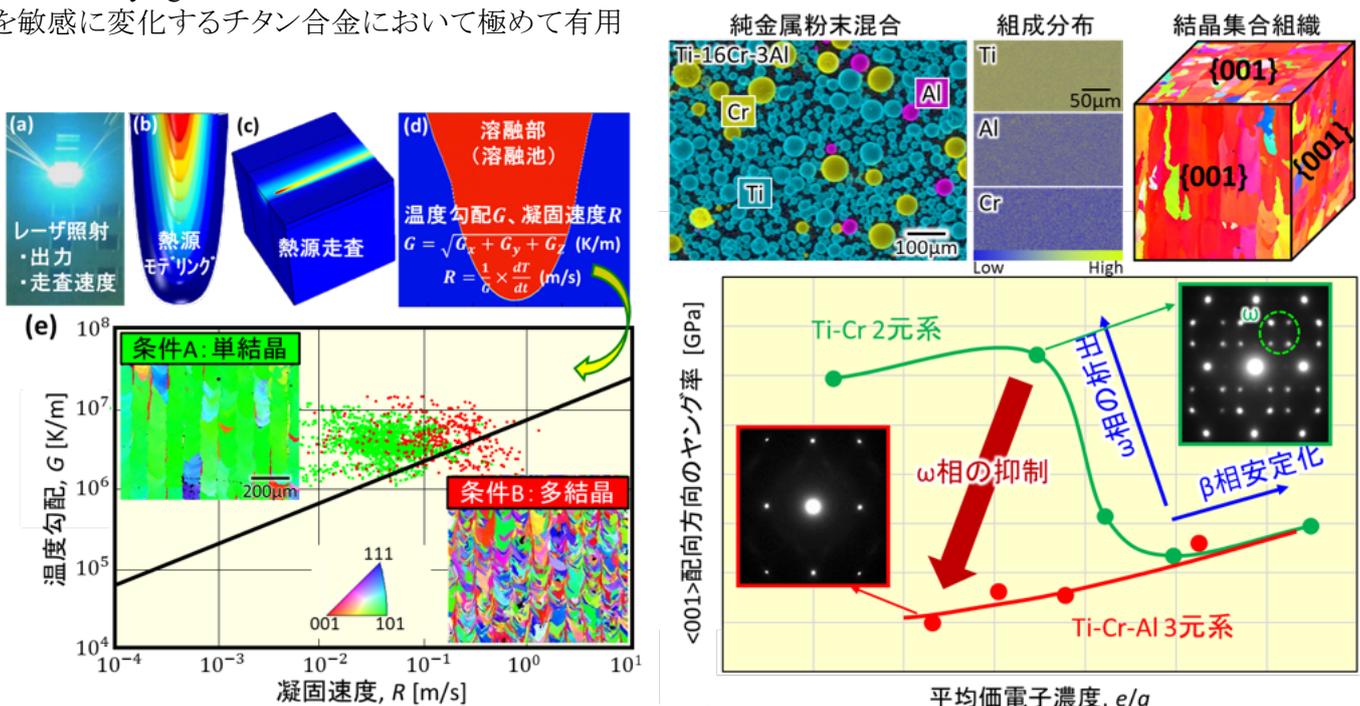


図 6A03b-1. 3DP 超温度場支配因子の解明のための温度場シミュレーションモデルの構築と凝固条件予測、ならびに結晶集合組織との関係。

図 6A03b-2. 超温度場を駆使した *in process alloying* による合金化と結晶集合組織形成(図 6A03b-1)の同時実施。組成に基づく相安定性の変化と力学的機能性(低ヤング率化)。

であり、同じくチタン合金をターゲットとする A03-a 班との連携により実施した。

Ti-Cr-Al 系において、粉末の融け残りなくマクロに均一な組成の造形体を得ると同時に、[図 6A03b-1](#) での知見に基づき<001>が高配向化した単結晶様組織を獲得することに成功した ([図 6A03b-2 上](#))。組成に依存して構成相が変化し、Ti-Cr 二元系では、低 Cr 側から $\alpha'+\beta$ 相、 β 相と、主な構成相が変化した。<001>優先配向方向でのヤング率は組成 (平均価電子濃度 e/a) に依存して顕著に変化し、極小値が存在した ([図 6A03b-2 下](#))。Cr 濃度の低下は β 相不安定性の増大による ω 相の析出、Cr 濃度の増大は β 相の安定化によりそれぞれ、ヤング率上昇を来した。in process alloying による Al の添加は、 β 相の不安定性を維持しつつ ω 相を抑制し、Ti-Cr-Al 三元系にてさらにヤング率が低減され、骨バイオマテリアルとしての高機能化に成功した。なお、ヤング率解析は、計画研究—公募研究間連携の成果である。

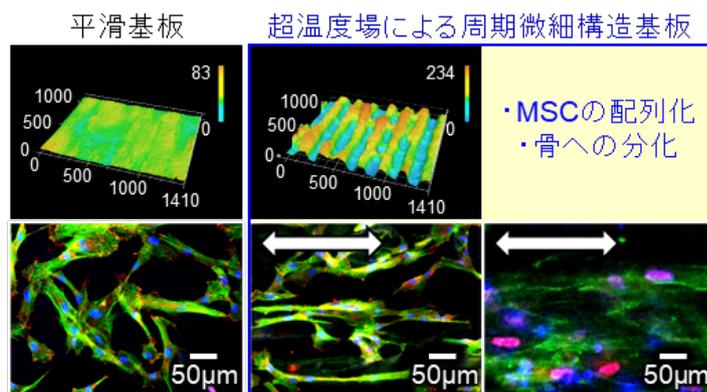


図 6A03b-3. チタン合金表面に形成した精緻な周期微細構造のレーザ顕微鏡画像と周期構造上での MSCs の高配列化、MSCs の骨分化(赤色の発色)(右下)。

③ 細胞制御のための表面構築と in vitro 細胞実験による機能検証

生体との界面を形成し直接的に生体組織への働きかけを担うバイオマテリアル表面において、チタン合金表面に形成した、生体骨の異方性を模倣した細胞サイズオーダーの精緻な周期微細構造が、間葉系幹細胞 (Mesenchymal Stem Cells: MSCs) を、その周期構造に沿って高配列化させ、さらに、骨へと分化方向を制御することを見出した ([図 6A03b-3](#))。すなわち、超温度場により形成された周期微細構造は、高機能化骨を誘導するための細胞制御機能を発現することが明らかとなり、本計画班では、超温度場により、生体組織への働きかけを可能とする仕組みを導入することに成功しつつある。

【公募研究班の成果】

① **力学的評価によるバルクの機能検証：低弾性率化のための組織制御指針の構築**：超温度場で創成される異方的な微細組織および特異な相安定性に依存する低対称な弾性特性を精密に計測するため、上述の Ti-Cr および Ti-Cr-Al 合金造形体に対し、レーザドップラー振動計による振動モード解析と共鳴超音波スペクトロスコーピーを組み合わせた手法による 3 次元弾性率解析を行い、レーザ 3DP の超温度場で創成される異方的な結晶配向等の微細組織が生体用 Ti 合金の弾性特性および弾性異方性に与える影響を明らかにした。加えて、Ti-Cr および Ti-Cr-Al 合金の異方的な弾性特性を、inverse Voigt-Reuss-Hill 近似を用いて解析することにより、造形体を構成する単結晶の弾性特性を明らかにし、バイオマテリアルの低ヤング率化 (高機能化) のための組織制御指針を明確にした。【多根】

② **力学的評価によるバルクの機能検証～超準安定 β チタン合金の創出と超弾性発現～**：レーザ 3DP による超温度場を駆使し、従来法では実現できなかった「超」準安定 β 相を有する新規 β 型チタン合金の創出を図り、従来のチタン合金の常識を超える機能特性 (巨大超弾性回復歪み、超低弾性率化など) の発現を目指した。こうした機能性は、 β 相の安定性が低いほど向上が見込める。上述の in process alloying により、Ti-Cr-Sn 三元系合金を、組成を調整しつつ作製した。組成分析の結果、造形体は室温で超弾性を発現するマルテンサイト変態温度を有していることが示され、実際、室温での圧縮試験の結果、明瞭な超弾性挙動を示すことが明らかになった ([図 6A03b-4 左](#))。デジタル画像相関 (DIC) 法により超弾性変形の詳細な解析を行ったところ、得られた形状回復歪みは格子定数および結晶配向から計算される予測値と良い一致を示した ([図 6A03b-4 右](#))。【田原】

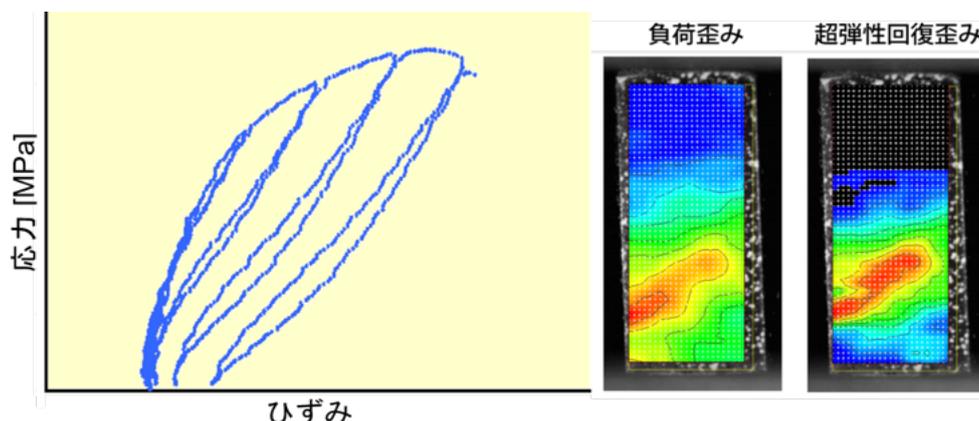
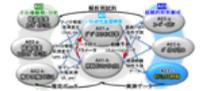


図 6A03b-4. 超弾性挙動を示す応力-ひずみ曲線 (圧縮試験) と、DIC 法により解析した負荷時のひずみならびに超弾性回復ひずみの分布。

研究項目 A03 『超温度場を活用した超越的材料創成』

計画研究 A03-c 班「超温度場セラミックス材料創成科学:超温度場を利用したセラミック製造プロセスの新展開」



(1) 何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までどこまで研究が進展しているのか

領域設定期間内：レーザを用いた種々のセラミックス製造プロセスについて、レーザ照射下で生じる特異な温度場を明らかにするとともに、金属材料における超温度場と、セラミックスに代表される結晶性無機材料における超温度場の類似点および相違点を明らかにし、超温度場を利用したセラミックス製造プロセスの創出と超温度場プロセス現象に立脚したプロセスの高度化を図る。

中間評価実施時まで：種々のセラミックス製造プロセスにおける超温度場の解明と、各プロセスでの微構造形成過程に及ぼす超温度場の影響の定性的理解

中間評価実施時までの進展：計画研究では、① 超温度場レーザ焼結、② 超温度場レーザ CVD、③ 超温度場微粒子スプレー、の3つの新プロセスを対象として、新奇なプロセス現象の解明とその学理構築を目的に研究を実施した。セラミックスへのレーザ照射では、局所的レーザ照射によって熱応力破壊や溶融凝固による非晶質化などの発現が予測されたため、**実用プロセスに超温度場が活用できるのかが本計画班の大きな懸念点であったが、レーザ焼結では 10^3 K/m 程度の急激な温度勾配、レーザ CVD では $10^6 \sim 10^9$ K/m 程度の温度勾配が発生すると推定でき、超温度場と呼べる特異な温度場が生じていることがわかった。**また、微粒子スプレーでは、 10^9 K/s 程度の冷却速度、1 m/s 程度の凝固速度が観測され、**金属に匹敵する超温度場が生じていることが明らかとなった。**このような研究の進展により、レーザ照射下での短時間焼結や高速成膜が「超温度場」に起因することがわかり、**超温度場の学理がセラミックス材料にも拡張できることを示すことができた。**研究期間後半では超温度場下における無機結晶材料の結晶成長メカニズムを中心とする学理の構築を目指す。

(2) 本計画研究で得られた成果及び本計画研究と連携している公募研究で得られた成果

【計画研究班の成果】

① **超温度場レーザ焼結における超温度場の発生とレーザ焼結助剤の開発:**セラミックス原料圧粉成形体の光特性および焼結後の微構造を詳細に調べ、成形体の構造に由来するレーザ吸収によって局所的な発熱が生じていることを明らかにした。また、得られた知見を基に、**レーザ焼結助剤を新規開発し、レーザ吸収および粒界における液相形成を促進することで、緻密な焼結体が短時間で容易に得られることを明らかにした(図 6A03c-1)。**

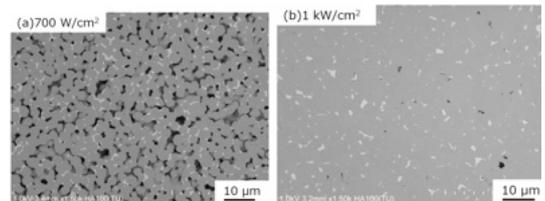


図 6A03c-1. レーザ焼結助剤を添加した LB 焼結アルミナ. (a) 700 W/cm² LB で得られた多孔体 (b) 100W/cm² で得られた緻密体.

② **超温度場レーザ CVD における気相からの共晶組織膜の形成と表面近傍での温度場の推定:**レーザ CVD における単結晶厚膜の高速エピタキシャル成長、nm オーダーの秩序構造を有する**特異構造コーティングの形成に成功した。**また、気相から直接共晶組織膜を形成することにも成功し(図 6A03c-2)、Lu₃Al₅O₁₂ (LuAG)-Al₂O₃ 系、Y₃Al₅O₁₂ (YAG)-Al₂O₃ 系共晶の相関係を解明した。このガーネット相に Ce³⁺や Eu³⁺イオンを微量添加し、固体照明向け混色発光蛍光体層や高分解能 X 線撮像向けシンチレーションスクリーンとして優れた特性を付与できることを実証した (J. Am. Ceram. Soc. 2023, プレスリリース 2023 年 6 月)。また、GAP (GdAlO₃) および GAG (Gd₃Al₅O₁₂) の高速エピタキシャル成長、GAP-Al₂O₃ 系における秩序構造の形成を実現した。

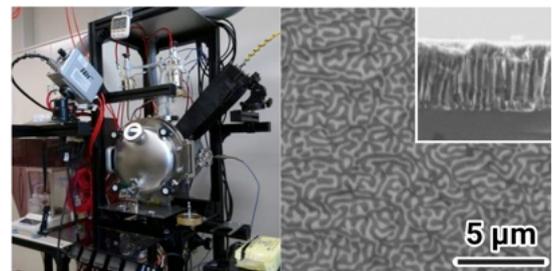


図 6A03c-2. レーザ CVD (開発装置) による共晶膜の微構造(アルミナ-ガーネット系).

③**超温度場微粒子スプレーコーティングにおける超温度場の推定と応力制御厚膜化指針の構築:**

微粒子スプレープロセスにおける超温度場の把握のため、セラミック薄膜へレーザ照射時の加熱冷却曲線の測定を行った結果、 10^9 K/s にも及ぶ冷却速度が観測された(図 6A03c-3)。また、超温度場を活かした微粒子熱エネルギーと運動エネルギーの独立制御により、応力状態をコントロールし、緻密セラミック厚膜の形成条件を見出した。

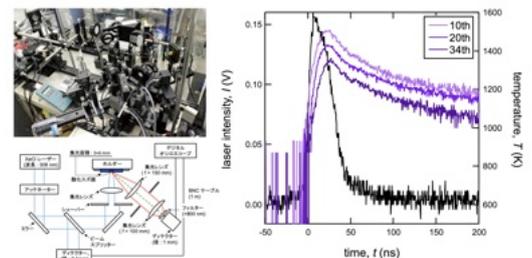


図 6A03c-3. ナノ秒放射温度計測装置による微粒子スプレーにおける凝固速度の計測例.

【公募研究班の成果】

① **レーザ指向性エネルギー堆積法による WC-HEA 超硬合金の超温度場材料開発**：WC-Co 超硬合金の機械的性質の向上を目的として、CrMnFeCoNi 系ハイエントロピー合金(HEA)を金属層とする新材料を開発した。マルチビームレーザ型指向性エネルギー堆積法(L-DED)によって WC-HEA 超硬合金を造形し、結晶相を詳細に検討した。開発材は、WC-Co 超硬合金粉末を使用した造形材と比較して、200 HV 以上の高い硬度を示した(図 6A03c-4)。【国峯】

② **超温度場環境を実現する高レーザ吸収球形多孔質セラミックス粒子の創成と積層造形**：独自に開発した凍結乾燥パルス圧力印加オリフィス噴射法(Freeze-Dry Pulsated Orifice Ejection Method; FD-POEM)により気孔を積極的に導入した積層造形用球形セラミックス粉末を創製し、高いレーザ吸収性と高い断熱性を両立させ、緻密なセラミックス積層造形体を作製した。FD-POEM 法により作製した Al_2O_3 -40mol% ZrO_2 (AZ40) 多孔質粒子を用いてレーザ積層造形を行い、熔融したセラミックス皮膜を調べた。AZ40 多孔質粒子は 40~80 W 程度の低出力でも十分に熔融することが判明し、低レーザ出力の方が膜厚、組成分布とも均質で緻密な AZ40 皮膜を形成できることを示した(図 6A03c-5)。【野村】

③ **レーザ局所加熱によるガラスセラミックス系全固体電池の無加圧界面構築**：酸化物ガラス中に添加した遷移金属イオンの光誘起—無輻射緩和による発熱を利用し、固体電池を構成する材料の局所的な熔融凝固と微構造の変化、および電気化学的特徴を明らかにした。正極活物質でリン酸を含有しない NaFeO_2 へのレーザ照射による熔融凝固では、レーザ光の走査に対して異方性のある結晶成長と固体電解質基板との接合を達成した(図 6A03c-6)。インピーダンスを評価したところ粒界抵抗が低下しており、熔融凝固による緻密化が固体電池の作製に有効であることを示した。【本間】

④ **金属/セラミックス複合粉体を起点とした超温度場と $\text{SiC}/\text{Al}_4\text{SiC}_4$ 相の創成**：L-PBF にて、 Al-10Si-0.35Al (wt%) - SiC (0~20vol%) 複合体を基盤に、高レーザ吸収率 (η) の SiC 粒子 ($\eta = 0.78$) の Al 粉体 ($\eta = 0.1$) への複合化、(ii) 複合粉体間での特異な温度場生成、(iii) 複合体の緻密化と非平衡 Al_4SiC_4 の生成、(iv) 多量の $\text{SiC}/\text{Al}_4\text{SiC}_4$ セラミックス相を含有する Al 複合体の創製、を行った。 SiC 量を変化(5~20vol%)した複合体にて、「緻密・良質な造形体を得るためのプロセス条件」、「 SiC 粒子界面から特異に生成する Al_4SiC_4 相の生成形態」、「複合粉体 (AlSi10Mg/SiC) における η 値ギャップによる粒子界面における特異超温度場(固相が高温な固液界面)での特異な組織変化(α - Al 晶の結晶配向、粒子界面近傍での無配向・等軸 Al 晶の生成)を見出した(図 6A03c-7)。【松本】

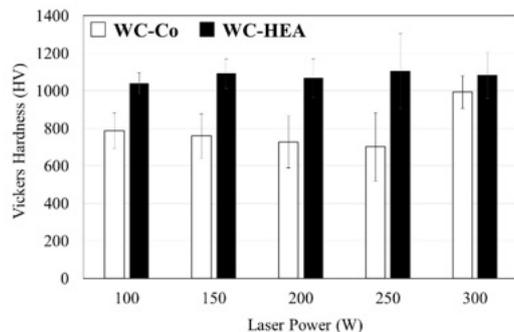


図 6A03c-4. L-DED による WC-Co および開発材 WC-HEA の硬度。

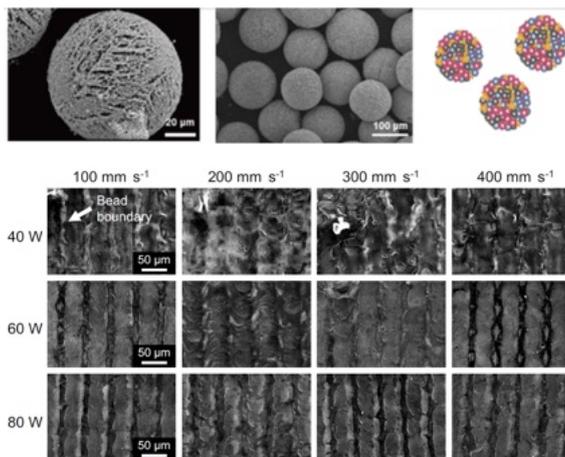


図 6A03c-5. FD-POEM で製造した多孔質粒子(上)と FD-POEM 粒子を用いた AZ40 被膜の表面 SEM 像。

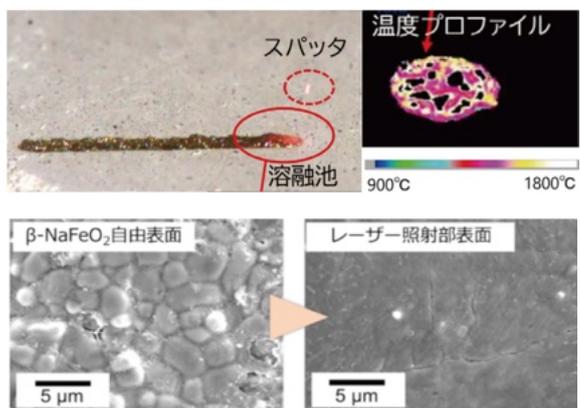


図 6A03c-6. NaFeO_2 へのレーザ照射のその場観察による熔融池の温度プロファイル(上)と、レーザ照射前後の NaFeO_2 の表面微構造変化の SEM 像。

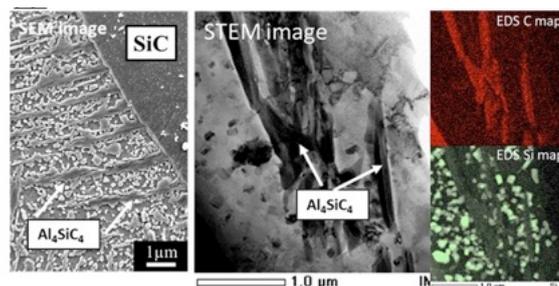


図 6A03c-7. LPBF によって形成された $\text{SiC}/\text{Al}_4\text{SiC}_4$ 複合材料の微構造。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和6年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

1) 研究成果の発表の状況の概要

領域研究を開始からこれまでに公表した学術的成果概要を具体的数値とともに以下に示す。

① **学術雑誌論文**：総数は188編である。そのうち超温度場に直接関連する学術論文（直接関連論文）が56編、本領域研究に間接的に関連する論文（間接関連論文）が132編ある。本領域研究はバックグラウンドの異なる研究者が多く、その大半が領域研究開始時に3Dプリントや関連のレーザー照射、電子ビーム照射された材料に関する研究経験がなく、新規に研究を開始することとなった。そのため論文の投稿にいたるまでに時間を要しているが、多くの成果が得られており、論文投稿数も増加してきている（表6-1）。

② **領域内連携研究の成果**：領域内の異なる研究チーム間の連携・共同研究によって生み出された研究成果、超温度場に直接関連する学術論文35.7%、国内・国際学会発表23.6%、受賞38%に上り、連携・共同研究が着実に進展している。

表 6-1. これまでの学術的成果の統計データ。

業績種別		件数	領域内複数研究室間の連携研究
学術論文	直接関連論文	56編	20編 (35.7%)
	間接関連論文	132編	24編 (18.1%)
解説・総説		24編	14編 (58.3%)
著書		10件	1件 (10.0%)
学会発表 (一般講演・ポスター発表)	国際	113件	30件 (26.5%)
	国内	272件	61件 (22.4%)
基調講演・招待講演	国際	34件	9件 (26.5%)
	国内	57件	21件 (36.8%)
受賞		56件	20件 (35.7%)
特許		8件	0件 (00.0%)

2) 本研究領域により得られた研究成果の学術雑誌論文、学会発表、書籍による発表の状況（研究項目毎）

（研究代表者：二重下線、研究分担者：一重下線、corresponding author：左に*印、若手研究者：太字）

【研究項目 A01】『超温度場材料創成学のデジタル研究基盤構築』

計画研究(A01-a 班、A01-b 班)

- 1) 【若手】【領域内連携】 Yuheng Liu, Madoka Watanabe, *Masayuki Okugawa, Takashi Hagiwara, Tsubasa Sato, Yusuke Seguchi, Yoshitaka Adachi, Yoritoshi Minamino, *Yuichiro Koizumi, Resolving the Long-standing Discrepancy in Fe₃Al Ordering Mobilities: A Synergistic Experimental and Phase-field Study, *Acta Mater.*, 273, (2024), 119958.
- 2) 【若手】 Kengo Sawai, Ta-Te Chen, Fei Sun, Toshio Ogawa, *Yoshitaka Adachi, “Image regression analysis for linking the microstructure and property of steel,” *Results Mater.*, 21, (2024), 100526.
- 3) 【若手】【領域内連携】 Masayuki Okugawa*, Kenji Saito, Haruki Yoshima, Katsuhiko Sawaizumi, Sukeharu Nomoto, Makoto Watanabe, Takayoshi Nakano, *Yuichiro Koizumi, Solute Segregation in a Rapidly Solidified Hastelloy-X Ni-based Superalloy during Laser Powder Bed Fusion Investigated by Phase-field and Computational Thermal-fluid Dynamics Simulations, *Addit. Manuf.*, 84, (2024), 104079.
- 4) 【若手】【領域内連携】 Yusuke Seguchi, *Masayuki Okugawa, Chuanqi Zhu, Akinori Yamanaka, Yuichiro Koizumi*, Data Assimilation for Phase-field Simulation of Microstructure Formation of Eutectic Alloy, *Comput. Mater. Sci.*, 237, (2024), 112910.
- 5) 【若手】【国際連携】 Chuanqi Zhu, Yusuke Seguchi, Masayuki Okugawa, Chunwen Guo, *Yuichiro Koizumi, “Influences of Growth Front Surfaces on the Grain Boundary Development of Multi-crystalline Silicon during Directional Solidification: 2D/3D Multi-Phase-Field Study,” *Materialia*, 27, (2023), 101702.
- 6) 【若手】【領域内連携】 Yuheng Liu, Kazufumi Nose, Masayuki Okugawa, *Yuichiro Koizumi, Takayoshi Nakano, “Fabrication and Process Monitoring of 316L Stainless Steel by Laser Powder Bed Fusion with μ -Helix Scanning Strategy and Narrow Scanning Line Intervals,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1135-1142.
- 7) 【若手】 Yuheng Liu, Masayuki Okugawa, Kenji Saito, Daichi Izumikawa, Chuanqi Zhu, Yusuke Seguchi, *Yuichiro Koizumi, “Phase-Field Modeling of Spinodal Decomposition in Fe-Cr-Co Alloy under Continuous Temperature-changing Conditions,” *ISIJ Int.*, 63, (2023), 1245-1250.
- 8) 【若手】【領域内連携】 Keiya Sugiura, Toshio Ogawa, *Yoshitaka Adachi, Fei Sun, Asuka Suzuki, Akinori Yamanaka, Nobuo Nakada, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, Yuichiro Koizumi, “Big-Volume SliceGAN for Improving a Synthetic 3D Microstructure Image of Additive-Manufactured TYPE 316L Steel,” *J. Imaging*,

- 9, (2023), 90-96.
- 9) 【領域特集号】Masahito Segawa, *Akinori Yamanaka, “Multi-Phase-Field Simulation of Non-Equilibrium Solidification in 316L Stainless Steel under Rapid Cooling Condition,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1160-1168.
 - 10) 【若手】【領域内連携】Masayuki Okugawa, Yuta Ohigashi, Yuya Furishiro, *Yuichiro Koizumi, Takayoshi Nakano, “Equiaxed Grain Formation by Intrinsic Heterogeneous Nucleation via Rapid Heating and Cooling in Additive Manufacturing of Aluminum-silicon Hypoeutectic Alloy,” *J. Alloys Compd.*, 919, (2022), 165812.
 - 11) 【若手】【領域内連携】Keiya Sugiura, Toshio Ogawa, *Yoshitaka Adachi, Fei Sun, Asuka Suzuki, Akinori Yamanaka, Nobuo Nakada, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, *Yuichiro Koizumi, “Hourly Work of 3D Microstructural Visualization of Dual Phase Steels by SliceGAN,” *Adv. Theory Simul.*, 5, (2022), 2200132.
 - 12) 【基調講演】Yuichiro Koizumi, Masayuki Okugawa, Yuheng Liu, Takayoshi Nakano, “Digital Twin Science of Powder Bed Fusion Metal Additive Manufacturing and Creation of Materials by Super-Thermal Field,” MRM2023/IUMRS-ICA2023 Grand Meeting, December 11-16, 2023, Kyoto, Japan.
 - 13) 【基調講演】Yoshitaka Adachi, Fei Sun, Kazuhisa Sato, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, *Yuichiro Koizumi, “Potential microstructural descriptors of additive-manufactured 316L stainless steel,” The 11th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM11), Korea.

公募研究

- 1) 【領域特集号】*Tomohiro Takaki, Yuki Takahashi, Shinji Sakane, “Multi-Phase-Field Framework for Epitaxial Grain Growth in Selective Laser Melting Additive Manufacturing with Multi-Track and Multi-Layer,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1150-1159.
- 2) 【若手】Mai Kunieda, *Asuka Suzuki, Naoki Takata, Makoto Kobashi, “Introducing Hatch Spacing into Deposited Energy Density toward Efficient Optimization of Laser Powder Bed Fusion Process Parameters,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1099-1106.
- 3) 【若手】*Asuka Suzuki, Yusuke Sasa, Makoto Kobashi, Masaki Kato, Masahito Segawa, Yusuke Shimono, Sukeharu Nomoto, “Persistent Homology Analysis of the Microstructure of Laser-Powder-Bed-Fused Al–12Si Alloy,” *Materials*, 16, (2023), 7228-1-7228-15.
- 4) 【基調講演】【若手】Asuka Suzuki, Yusuke Shiba, Hiroyuki Ibe, Naoki Takata, Makoto Kobashi, “Machine-learning assisted process parameter optimizations for laser powder bed fusion of WC/Co composites,” The International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS Processing, Fabrication, Properties, Applications (Thermec2023), 2023年7月3-7日, Vienna, Austria.

【研究項目 A02】『超温度場下の結晶成長のその場・精密分析』

計画班(A02-a 班、A02-b 班)

- 1) 【領域内連携】*Masataka Mizuno, Kazuki Sugita, Kousuke Do, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, Hideki Araki, “Stability of Vacancies in β -type Ti-15Mo-5Zr-3Al Alloy Fabricated via Laser Powder Bed Fusion,” *Addit. Manuf. Lett.*, 7, (2023), 100162.
- 2) 【領域内連携】*Kazuhisa Sato, Shunya Takagi, Satoshi Ichikawa, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, “Microstructure and Solute Segregation around the Melt-Pool Boundary of Orientation-Controlled 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Laser Powder Bed Fusion,” *Materials*, 16, (2023), 218-218.
- 3) 【若手】【国際連携】【領域内連携】Sung-Hyun Park, Ozkan Gokcekaya, Ryosuke Ozasa, Ken Cho, Hiroyuki Y. Yasuda, Myung-Hoon Oh, *Takayoshi Nakano, “Microstructure Evolution of Gas-atomized β -solidifying γ -TiAl Alloy Powder during Subsequent Heat Treatment,” *Crystals*, 13, (2023), 1629.
- 4) 【若手】【国際連携】【領域内連携】Sung Hyun Park, Ryosuke Ozasa, Ozkan Gokcekaya, Ken Cho, Hiroyuki Yasuda, Myung-Hoon Oh, *Takayoshi Nakano, “Effect of Cooling Rate on Powder Characteristics and Microstructural Evolution of Gas Atomized β -solidifying γ -TiAl Alloy Powder,” *Mater. Trans.*, 65, (2023), 1-6.
- 5) 【基調講演】Kohei Morishita, Shunsuke Adachi, Ketaro Uesugi, Hideyuki Yasuda, Hirofumi Miyahara, “Synchrotron X-ray imaging of rapid melting and rapid solidification phenomena of metallic materials under Super-Thermal Field,” The 1st International conference on Creation of Materials by Superthermal Field 2023 (CMSTF2023),
- 6) 【基調講演】【領域内連携】佐藤和久, 高木空, 市川聡, 石本卓也, 中野貴由, “透過電子顕微鏡による SUS316L 鋼 LPBF 材の微細組織解析,” 溶接学会 第253回溶接冶金研究委員会, 2023年5月31日, 大阪大学東京ブランチ.

公募班

- 1) 【若手】【領域内連携】*Fei Sun, Yoshitaka Adachi*, Kazuhisa Sato, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, Yuichiro Koizumi, “Delineating the Ultra-Low Misorientation between the Dislocation Cellular Structures in Additively Manufactured 316L Stainless Steel,” *Materials*, 17, (2024), 1851.
- 2) *Takeshi Nagase, Tomoyuki Terai, Mitsuaki Matsumuro, Mamoru Takemura, “Alloy Design and Solidification Microstructure Analysis in Fe–P–C–Ag Immiscible Metallic Glass,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1982-1990.
- 3) 【若手】【領域内連携】*Fei Sun, Toshio Ogawa, Yoshitaka Adachi*, Kazuhisa Sato, Shunya Takagi, Goro Miyamoto, Asuka Suzuki, Akinori Yamanaka, Nobuo Nakada, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, Yuichiro Koizumi, “Modulated Structure Formation in Dislocation Cells in 316L Stainless Steel Fabricated by Laser

Powder Bed Fusion,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1143-1149.

- 4) 【若手】*Kenta Yamanaka, Manami Mori, Yusuke Onuki, Shigeo Sato, Akihiko Chiba, “Dislocation Density of Electron Beam Powder Bed Fusion Ti-6Al-4V Alloys Determined via Time-Of-Flight Neutron Diffraction Line-Profile Analysis,” *Metals*, 13, (2023), 86.

【研究項目 A03】『超温度場を活用した超越的材料創成』

計画班(A03-a 班、A03-b 班、A03-c 班)

- 1) 【若手】【領域内連携】*Aira Matsugaki, Tadaaki Matsuzaka, Toko Mori, Mitsuka Saito, Kazuma Funaoku, Riku Yamano, Ozkan Gokcekaya, **Ryosuke Ozasa**, Takayoshi Nakano*, “PBF-LB Fabrication of Microgrooves for Induction of Osteogenic Differentiation of Human Mesenchymal Stem Cells,” *Int. J. Bioprinting*, 10, (2024), 406-416.
- 2) 【若手】Yuki Akedo, Eishi Kubota, Mohammed Shahien, Masato Suzuki, Jun Akedo, Takayasu Fujino, *Kentaro Shinoda, “Effect of Convergent-Divergent Nozzle on Fine Particle Velocity in Low-Pressure Induction Plasma Jet in Plasma-Assisted Aerosol Deposition,” *Plasma Chem. Plasma Process.*, 44, (2024), 583-600.
- 3) *Teiichi Kimura, Satoshi Suehiro, Kazuo Sadaoka, Tomomichi Nasu and Kousuke Uoe, “Direct Laser Sintering of Bulk Alumina Using 1070 nm Fiber Laser,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1183-1187.
- 4) 【若手】**Shogen Matsumoto**, Shunsuke Kurosawa, Daisaku Yokoe, Teiichi Kimura, *Akihiko Ito, “Growth and Scintillation Properties of Ce³⁺:LuAG-Al₂O₃ Chemically Deposited Eutectics,” *Opt. Mater.*, 138, (2023), 100000.
- 5) 【若手】Yuri Mitsuhashi, **Shogen Matsumoto**, *Akihiko Ito, “Chemical Vapor Deposition of Ordered Structures in YAG-alumina Eutectic System,” *J. Am. Ceram. Soc.*, 106, (2023), 5140-5146.
- 6) 【若手】Yuri Mitsuhashi, **Shogen Matsumoto**, *Akihiko Ito, “High-Speed Epitaxial Growth of Terbium- and Europium-Doped Yttrium Aluminum Perovskite Thick Film Phosphors Using Laser-Assisted Chemical Vapor Deposition,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1107-1111.
- 7) 【若手】Kosuke Sanami, *Mohammed Shahien, Atsushi Yumoto, Jun Akedo, Kentaro Shinoda, “Evaluating the Mechanical Properties of Dense Hybrid Aerosol Deposition Alumina Coatings Using the Nanoindentation Method,” *J. Therm. Spray Technol.*, 32, (2023), 729-736.
- 8) 【若手】【領域内連携】Tomoki Kuroda, Haruki Masuyama, Yoshiaki Toda, Tetsuya Matsunaga, Tsutomu Ito, Makoto Watanabe, **Ryosuke Ozasa**, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, Masayuki Shimojo, *Yoko Yamabe-Mitarai, “Microstructure Evolution and High-Temperature Mechanical Properties of Ti-6Al-4Nb-4Zr Fabricated by Selective Laser Melting,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 95-103.
- 9) 【領域内連携】*Yoko Yamabe-Mitarai, Takashi Inoue, Tomoki Kuroda, Sae Matsunaga, Yoshiaki Toda, Tetsuya Matsunaga, Tsutomu Ito, **Ryosuke Ozasa**, Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, “Creep behavior of Ti-6Al-4Nb-4Zr Fabricated by Powder Bed Fusion Using a Laser Beam,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1175-1182.
- 10) 【領域内連携】Takuya Ishimoto, Ryoya Suganuma, *Takayoshi 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.
- 11) 【領域内連携】*Masato Ueda, Chang Ting Hsuan, Masahiko Ikeda, Takayoshi Nakano, “Design of Titanium Alloys Insensitive to Thermal History for Additive Manufacturing,” *Crystals*, 13, (2023), 568.
- 12) 【若手】**Shogen Matsumoto**, Taiga Watanabe, *Akihiko Ito, “Photo- and Radioluminescence Properties of Eu³⁺-doped Y₂O₃ Thick Film Grown by Chemical Vapor Deposition,” *Sens. Mater.*, 34, (2022), 669-675.
- 13) 【若手】**Shogen Matsumoto**, *Akihiko Ito, “High-throughput Production of LuAG-based Highly Luminescent Thick Film Scintillators for Radiation Detection and Imaging,” *Sci. Rep.*, 12, (2022), 19319.
- 14) *Akihiko Ito, **Shogen Matsumoto**, “Chemically Vapor Deposited Oxide-based Thick Film Scintillators,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 62, (2022), 10612.
- 15) 【著書】中野貴由, “テクノロジー・ロードマップ 2024-2033,” 全産業編, 日経 BP, (2023), 466-469.
- 16) 【著書】中野貴由, 桐原聡秀, 近藤勝義, 西川宏, 田中学, “デジタル化時代の Additive Manufacturing の基礎と応用,” 一般社団法人 スマートプロセス学会, リブプロ社 (2022).
- 17) 【基調講演】【領域内連携】Takuya Ishimoto, Takayoshi Nakano, “Crystallographic texture control by metal powder bed fusion,” The 3rd Asia-Pacific International Conference on Additive Manufacturing (APICAM2023), 2023 年 6 月 21 日, Sydney, Australia.

公募班

- 1) 【若手】**Masafumi Hiratsuka**, *Tsuyoshi Honma, Takayuki Komatsu, “Laser-Induced Melting and Crystal Growth of Sodium Ion Conductive β-NaFeO₂,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1188-1193.
- 2) 【若手】Yu Zhang, Mingqi Dong, *Weiwei Zhou, *Naoyuki Nomura, “Microstructure and Mechanical Property of MXene-added Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1169-1174.
- 3) Yorihiro Yamashita*, Mitsuki Nakamura, *Takahiro Kunimine*, Yuji Sato, Yoshinori Funada, Masahiro Tsukamoto, “Effects of WC Ratios on Bead Size and Crack Initiation in Forming WC-Co Cemented Carbides by the Laser Metal Deposition,” *J. Laser Appl.*, 35, (2023), 042010-1-042010-7.

- 4) 【若手】 Y. Yanase, H. Miyauchi, Hiroaki Matsumoto, K. Yokota, “Hierarchical Analysis of Phase Constituent and Mechanical Properties of AlSi10Mg/SiC Composite Produced by Laser-Based Powder Bed Fusion,” *Mater. Trans.*, 64, (2023), 1125-1134.
- 5) 【若手】【国際連携】 DongKeun Han, Wan-Ting Chiu, Masaki Tahara, *Volodymyr Chernenko, Senentxu Lanceros-Mendez, Hideki Hosoda*, “Framework of Magnetostrain Responsive Ni–Mn–Ga Microparticles driving Magnetic Field Induced Out-of-plane Actuation of Laminate Composite,” *Sci. Rep.*, 13, (2023), 7160.
- 6) 【若手】 *Wan-Ting Chiu, Motoki Okuno, Masaki Tahara, Tomonari Inamura, Hideki Hosoda, “Fundamental Investigations of the Deformation Behavior of Single-Crystal Ni–Mn–Ga Alloys and Their Polymer Composites via the Introduction of Various Fields,” *Appl. Sci.*, 13, (2023), 8475.
- 7) 【若手】 *Wan-Ting Chiu, Yui Watanabe, Masaki Tahara, Tomonari Inamura, Hideki Hosoda, “Investigations of Shape Deformation Behaviors of the Ferromagnetic Ni–Mn–Ga Alloy/Porous Silicone Rubber Composite towards Actuator Applications,” *Micromachines*, 14, (2023), 1604.

3) 本研究領域により得られた研究成果に基づく産業財産権

- 1～2) 木村禎一, 末廣智, アルミナ焼結体の製造方法, PCT/JP2022/030322 (2022/8/8), 台湾=111130541 (2022/8/15)
- 3～6) 木村禎一, 末廣智, レーザー焼結用アルミナレーザー吸収体, EP=21761327.2(2022年8月24日), 韓国=10-2022-7029274(2022/8/24), 中国=202180016903.7 (2022/8/25), 米国=17/802395 (2022/8/25)
- 7～8) 木村禎一, 末廣智, レーザー焼結用ジルコニア粉末、及び、レーザー焼結によるジルコニア焼結体の製造方法

4) 本研究領域により得られた研究成果の発表のために主催したシンポジウム(主要4件)

- 1) 超温度場材料創成学の国際会議 The 1st International conference on Creation of Materials by Superthermal Field 2023(講演数: 39件, ポスター発表: 33件)(Osaka, Japan), 2023年11月15日-17日.
- 2) 日本金属学会 秋期大会公募シンポジウム「Additive Manufacturing の材料科学 II: 超温度場材料創成学」, (富山大学)2023年9月19-22日. 基調講演8件(本領域の各計画研究の推薦者7名+ゲスト)、応募講演:34件
- 3) 超温度場材料創成学公開シンポジウム(オンライン)2022年10月26日(水)(参加者:198名(大学関係:116名、企業・国立研究所等:82名)講演者:本領域の各計画研究代表者7名+ゲストスピーカー1名)
- 4) 超温度場材料創成学第1回 産学・異分野連携シンポジウム(オンライン)2022年1月24日.

5) 本研究領域により得られた研究成果の発表のために企画した学術雑誌論文特集号(3件)

- 1) Special Issue: Creation of Materials by Superthermal Field, *Materials Transactions*, Vol. 64, No.6 (2023), Guest Editor: Yuichiro Koizumi, published in June 2023
- 2) Special Issue "Materials Formed under Extreme Conditions in Additive Manufacturing: Creation of Materials by Super-Thermal Field," *Materials*, Guest Editors: Yuichiro Koizumi, Takayoshi Nakano, Yoshitaka Adach, Kouhei Morishita, Kazuhisa Sato, Yoshiaki Toda, Tei-ichi Kimura, Albert To, published in August 2023.
- 3) 特集号:「超温度場材料創成学」, 日本金属学会誌, Vol. 88, No.9 (2024). 2024年9月発行予定.(上記1)に掲載された論文の和文翻訳版)

6) 本研究領域参画する研究者の受賞(総計:115件) ※注 太字は若手研究者、波線は公募研究者の氏名を表す。

研究業績に授与される賞(16件)(次頁に記す発表賞などを含むその他の賞99件)

- 1) 中野貴由, 第49回井上春成賞, 井上春成賞委員会, 2024年5月31日
- 2) 小泉雄一郎, 奥川将行, 柳玉恒, 研究進歩賞, 粉体粉末冶金協会, 2024年5月21日.
- 3) 御手洗容子, 軽金属功績賞, 軽金属学会, 2024年5月10日
- 4) 松垣あいら, 令和6年度文部科学大臣表彰, 若手科学者賞, 2024年4月17日
- 5) 周偉偉, 令和6年度文部科学大臣表彰, 若手科学者賞, 2024年4月17日
- 6) 田原正樹, 令和6年度文部科学大臣表彰, 若手科学者賞, 2024年4月17日
- 7) 中野貴由, 粉生熱技術振興賞, 谷川熱技術振興基金 2023年11月8日
- 8) 山中晃徳, 日本機械学会 計算力学部門 業績賞, 日本機械学会, 2023年10月26日
- 9) 小笹良輔, 令和4年度学術奨励賞, 公益財団法人 日本材料学会
- 10) 高木知弘, 川井メダル, 日本計算工学会, 2023年5月23日
- 11) 中野貴由, 市村学術賞貢献賞 市村清新技術財団, 2023年4月17日
- 12) 山中謙太, 令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰, 若手科学者賞
- 13) 周偉偉, 研究進歩賞, 粉体粉末冶金協会, 2023年3月20日
- 14) 山中謙太, 第2回東北大学材料科学世界トップレベル研究拠点賞, 2022年10月1日
- 15) 山中謙太, 日本金属学会第19回村上奨励賞 2022年9月1日
- 16) 中野貴由, 軽金属功績賞, 軽金属学会, 2022年5月27日

本研究領域により得られた研究成果発表に対する受賞(56件) [内若手関連受賞41件] (計50件まで記載)

- 17)【若手】Cheng Chen, 田原正樹, 金奕霖, 野平直希, 海瀬晃, CHIU, 小笹良輔, 石本卓也, 小泉雄一郎, 中野貴由, 細田秀樹, 優秀ポスター賞, 第174回日本金属学会秋期大会, 2024年3月12日.
- 18)【若手】松野真樹, 森下浩平, 宮原広郁, 日本鉄鋼協会・日本金属学会・軽金属学会2024年度合同学術講演会, 口頭発表優秀賞(指導学生の受賞), 2024年06月01日.
- 19)【若手】松野真樹, 森下浩平, 宮原広郁, 日本鑄造工学会, 学生優秀講演賞(指導学生の受賞), 2024年5月25日.
- 20)【若手】Y.-S. Kim, 小笹良輔, 佐藤和久, 中野貴由, マテリアルデザイン研究会, 優秀ポスター発表賞, 2023年12月18日.
- 21)【若手】Y.-S. Kim, 小笹良輔, 佐藤和久, 中野貴由, 第6回日本金属学会第7分野講演会, 優秀ポスター賞, 2023年12月23日.
- 22)【若手】済藤天斗, 柳玉恒, 泉川大智, 奥川将行, 小泉雄一郎, 佐藤和久, 中野貴由, 日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部鉄鋼プロセス研究会・材料化学研究会, 優秀発表賞, 2023年12月12日.
- 23)【若手】Tsubasa Sato, Daichi Izumikawa, Yuheng Liu, Masayuki Okugawa, Kazuhisa Sato, Hiroyuki Y. Yasuda, Takayoshi Nakano, Yuichiro Koizumi, The 11th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM11), Poster Award, 2023年11月21日.
- 24)【若手】稲垣洵希, 陳達徳, 孫飛, 足立吉隆, 小川登志男, 奥川将行, 小泉雄一郎, 中野貴由, 日本鉄鋼協会第186回秋季講演大会, 学生ポスターセッション優秀賞, 2023年9月20-22日.
- 25)【若手】稲垣洵希, 陳達徳, 孫飛, 足立吉隆, 小川登志男, 奥川将行, 佐藤和久, 小泉雄一郎, 中野貴由, 石本卓也, 日本鉄鋼協会2023年秋季(第186回)講演大会 学生ポスターセッション優秀賞, 2023年09月21日.
- 26)【若手】藤江清花, 伊藤暁彦, 応用物理学会 極限的励起状態の形成と量子エネルギー変換研究グループ 第3回研究会, 講演奨励賞, 2021年10月.
- 27)【若手】伊藤暁彦, SENDAI NEW PUBLIC, リアルテックファント賞, 2022年3月.
- 28)【若手】松本昭源, 伊藤暁彦, 応用物理学会 極限的励起状態の形成と量子エネルギー変換研究グループ 第6回研究会, 講演奨励賞, 2022年6月.
- 29)【若手】山井大誠, 伊藤暁彦, 第22回次世代先端光科学研究会, 若手奨励賞, 2022年6月.
- 30)【若手】松本昭源, 黒澤俊介, 吉川 彰, 伊藤暁彦, 第35回 日本セラミックス協会 秋季シンポジウム, 優秀発表賞, 2022年9月.
- 31)【若手】中嶋航平, 伊藤暁彦, 第35回 日本セラミックス協会 秋季シンポジウム, 奨励賞, 2022年9月.
- 32)【若手】敷地愛莉, 伊藤暁彦, 第17回セラミックフェスタ in 神奈川, 優秀賞, 2022年12月.
- 33)【若手】松本昭源, 黒澤俊介, 伊藤暁彦, 第70回応用物理学会春季学術講演会, 第54回(2023年)春季応用物理学会講演奨励賞, 2023年3月.
- 34)【若手】出口結美子, 伊藤暁彦, 応用物理学会 極限的励起状態の形成と量子エネルギー変換研究グループ 第11回研究会, 講演奨励賞, 2023年6月.
- 35)【若手】出口結美子, 伊藤暁彦, 第36回日本セラミックス協会 秋季シンポジウム, 優秀発表賞, 2023年9月.
- 36)【若手】橋本優花, 伊藤暁彦, 第36回 日本セラミックス協会 秋季シンポジウム, 奨励賞, 2023年9月7日.
- 37)【若手】今井菜摘, 黒澤俊介, 松倉大佑, 山路晃広, 伊藤暁彦, 第18回セラミックフェスタ in 神奈川, 奨励賞, 2023年12月.
- 38)【若手】Yu Zhang, Mingqi Dong, Weiwei Zhou, Naoyuki Nomura, 日本金属学会2023年春期講演大会, 日本金属学会優秀ポスター賞, 2023年03月07日.
- 39)【若手】堀尾尚平, 小笹良輔, 佐藤和久, 奥川将行, 小泉雄一郎, 中野貴由, 日本金属学会2023年秋期(第173回)講演大会, 第41回優秀ポスター賞, 2023年09月20日.
- 40)【若手】Young Seong Kim, 小笹良輔, 中野貴由, マテリアルデザイン研究会, Development of refractory high entropy alloy with suppressed elemental segregation, 2023年12月18日.
- 41)【若手】済藤天斗, 柳玉恒, 泉川大智, 奥川将行, 小泉雄一郎, 佐藤和久, 中野貴由, 令和5年度 日本金属学会・日本鉄鋼協会 関西支部 材料化学研究会・鉄鋼プロセス研究会, 学生発表会 優秀発表賞, 2023年12月12日.
- 42)【若手】百歩明, 小笹良輔, 石本卓也, 永瀬丈嗣, 中野貴由, 2023年度スマートプロセス学会学術講演会, 学術奨励賞, 2023年12月26日.
- 43)【若手】Cheng Chen, 田原正樹, 金奕霖, 野平直希, 海瀬晃, Wang-Ting CHIU, 小笹良輔, 石本卓也, 小泉雄一郎, 中野貴由, 細田秀樹, 第174回日本金属学会春期大会, 優秀ポスター賞, 2024年03月12日.
- 44)【若手】瀬口侑右, 朱伝奇, 奥川将行, 山中晃徳, 野本祐春, 小泉雄一郎, 第52回結晶成長国内会議, 講演奨励賞, 2023年12月4日.
- 45)【若手】中村弘和, 奥川将行, 小泉雄一郎, 中野貴由, 粉体粉末冶金協会 2023年度秋季大会, 優秀講演発表賞, 2023年10月20日.
- 46)【若手】瀬口侑右, 朱伝奇, 奥川将行, 山中晃徳, 野本祐春, 小泉雄一郎, 令和5年度 超温度場夏の学校 若手研究交流会, 最優秀発表賞, 2023年9月25日.
- 47)【若手】澤泉克彦, 奥川将行, 小泉雄一郎, 中野貴由, 日本金属学会2023年秋期講演大会, 第41回優秀ポスター賞, 2023年9月22日.
- 48)伊藤暁彦, リアルテックファント賞, SENDAI NEW PUBLIC, 2022年3月22日.
- 49)【若手】大賀輝昌, 伊藤暁彦, 第16回セラミックフェスタ in 神奈川, 奨励賞, 2021年11月.
- 50)【若手】中嶋航平, 伊藤暁彦, 第16回セラミックフェスタ in 神奈川, 優秀賞, 2021年11月.

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

領域連携体制

領域内連携については、総括班の領域内連携推進部門を通じて大阪大学異方性カスタム設計 AM 研究開発センターの協力を得て、領域の研究者に対して共通試料の造形・配布、新規材料設計指導、研究内容調整などを行い、連携強化と円滑な領域研究を推進している。具体的な連携の内容は、図 8-1 に示す連携体制によって各計画研究の連携を推進している。連携研究は表 8-1 の共著論文数及び図 8-2 に示す通りである。

計画研究では、A01-a デジタルツイン科学にて、3DP 中の熔融凝固を高速度光学カメラでのその場観察するとともに A02 その場・観察・分析各班のデータと整合した CtFD シミュレーション、それから得られる温度勾配下での結晶成長の PF 計算を行う。必要なパラメータは、必要に応じて、分子動力学(MD)計算で評価する。

A01-b 材料インフォマティクスでは機械学習を用いて、A01-1 が示すプロセス-組織-性能の関係を用いて、プロセス-組織-性能-性能の関係の定量予測を行う。また、A01 の PF 計算の移動度データを山中がデータ同化により導出し MD の評価値を検証する。A02 では、A02-a マイクロダイナミクス(放射光透過法 X 線)にて、マイクロスケールの時間・空間分解能にて超温度場下での結晶成長の動的データを得るとともに A02-b 先端分析にて A03 超温度場材料創成で精製された材料のサブナノからナノスケールの欠陥および元素分布データを取得する。それらのデータは、A01 に提供されるとともに A03 に還元される。



図 8-1.超温度場材料創成学]の連携体制図。

表 8-1. 連携研究の数(2024年6月現在)。

原著論文(直接関連)

項目	計A01	計A02	計A03	公A01	公A02	公A03
計A01		4	9	0	4	0
計A02	4		8	0	4	2
計A03	9	8		0	4	6
公A01	0	0	0		0	0
公A02	4	4	4	0		0
公A03	0	2	6	0	0	

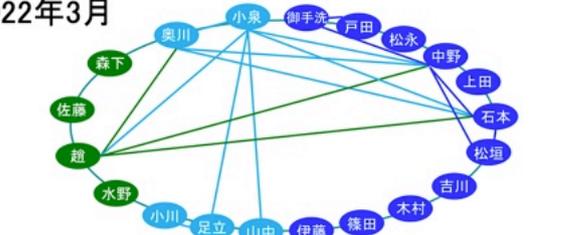
基調講演・招待講演

項目	計A01	計A02	計A03	公A01	公A02	公A03
計A01		4	10	2	3	0
計A02	4		9	2	3	0
計A03	10	9		2	3	4
公A01	2	2	2		0	0
公A02	3	3	3	0		0
公A03	0	0	4	0	0	

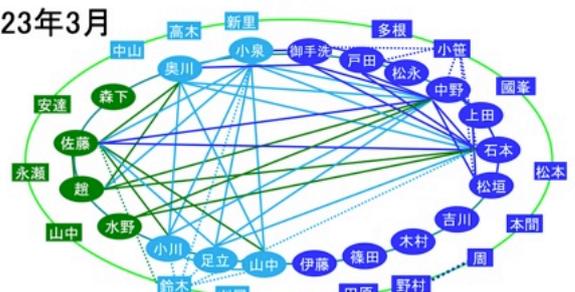
学会発表

項目	計A01	計A02	計A03	公A01	公A02	公A03
計A01		27	50	3	8	8
計A02	27		45	2	10	11
計A03	50	45		2	9	21
公A01	3	2	2		2	0
公A02	8	10	9	2		2
公A03	8	11	21	0	2	

2022年3月



2023年3月



2024年3月

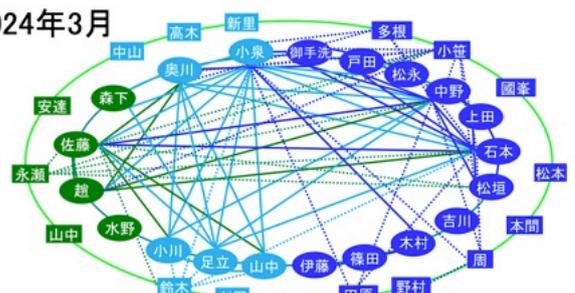


図 8-2.超温度場材料創成学]参画研究者間の連携相関図。

9 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

(1) 本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義

本研究領域で定義する「若手研究者」とは、本領域に属する 39 歳以下の研究者(大学教員および研究員・民間研究職員・国立研究開発法人職員など)および大学院生・学部4年生とし、将来に亘り本分野での日本のプレゼンスを維持・発展させるために必須の人材(延べ 89 名(若手研究者の割合:69.5%))である。

(2) 若手人材育成部門の若手研究者育成に係る活動

世界を先導する若手研究者・技術者を排出するために数々のスキル獲得セミナー(夏の学校)や、主体的な研究討論の機会とネットワーク醸成の為の研究会(若手研究交流会)、研究技術を理解・習得するための研究体験実習等を実施した。若手海外研究派遣プログラムは公募制とし公募段階である。以下にいくつかの事例を示す。

① 若手研究者「夏の学校」による新規スキルの獲得と領域内連携

電子顕微鏡スクール: 2023年8月17-19日、大阪大学超高压電子顕微鏡センター、参加者:6名(定員)

佐藤和久准教授(A02-b 班研究代表者)が所属する大阪大学超高压電子顕微鏡センターにて、座学と実習を交えた初学者・中級者向けの電子顕微鏡スクールを開催し、電顕スキルを獲得した。



データ科学スクール: 2023年9月5-7日、名古屋大学、参加者:31名

足立吉隆教授(A01-b 班研究代表者)らを講師としてデータ科学スクールを開催し、3日間にわたって、材料組織の特徴量をいかにして抽出するのかという内容から、ニューラルネットワークやベイズ推定、遺伝的アルゴリズム、AIを用いて画像認識による組織の自動認識等を各自のコンピュータを用いて実習した。各機関にてデータ科学的アプローチによる新たな研究の展開例も始めている。若手研究者の新たな研究スキル獲得の機会となった。

若手研究交流会: 2023年9月24-25日、神戸、参加者:30名

若手研究者や学生による計 20 件の研究発表と討議が基調講演 2 件とともに行われた。特に学生にとっては「超温度場」、「金属 3D プリンティング」に焦点を絞ったイベントは初めての経験であり、他大学の報告に刺激を受けるとともに討議を通して自らの研究に対する理解を深めた。貴重な経験が博士課程後期進学を後押しした。

超温度場材料創成学の国際会議 CMSTF2023: 2023年11月15-17日、大阪、参加者:109名

本領域主催による国際会議「The 1st International Conference on Creation of Materials by Super-Thermal Field 2023」では多くの若手研究者による口頭発表もなされ、海外研究者との連携の端緒となった。また、大学院生の中には初めて国際会議を経験した者も多く、海外からの参加者らとの英語での議論を通じ、研究意欲を高めた。

(3) 若手人材育成活動の成果

① 若手研究者・学生の国内・国際学会発表および基調・招待講演

本領域にて進めている超温度場を基軸とした各機関での研究および連携研究に、多くの若手研究者・学生が参画しており、研究成果が若手研究者や学生自身により、国内学会・国際学会等で精力的に発表されている。発表件数は延べ 381 件に昇る。若手ながら、基調講演や招待講演を行うなど、学協会でのプレゼンスを高めている。

国内・国際学会発表数
国際学会: 76 件 招待講演: 1 件 基調講演: 1 件
国内学会: 305 件 招待講演: 2 件 基調講演: 5 件
文部科学大臣表彰者
山中謙太(東北大学) 周偉偉(東北大学) 松垣あいら(大阪大学) 田原正樹(東京工業大学)

② 若手研究者・学生の受賞

本領域研究に参画する若手研究者から 4 名もの文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞者がある。他にも国際・国内学会における論文・講演賞を多数受賞(論文賞:3 件、国際学会:10 件、国内学会:50 件)するなど、稀有な人材の結集にくわえて学生の成長も目覚ましく、本領域の若手研究者のポテンシャルの高さを示している。

③ 若手研究者の異動・昇進

本領域研究に参画する若手研究者らが、その研究業績が評価され、研究員、助教、講師などから准教授へと昇進した。(さらに、若手の定義からは外れるが 40 歳代前半の研究者ら 3 名を含む 5 名が教授として昇進・異動したことも、若手の育成の一環となる。

若手研究者の異動・昇進	
松永哲也(A03-a 分担)	NIMS 主幹研究員→JAXA 宇宙研・准教授
周偉偉(A03-a 公募)	東北大・助教 →東北大・准教授
市川修平(A01-a 協力)	大阪大・助教 →大阪大学・准教授
孫飛(A01-b 協力・A02 公募)	名古屋大・特任講師→同大・特任准教授
刈屋翔太(A01-b 公募)	大阪大学・特任助教→同大・助教→講師

10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

AM 技術は「3D プリンター」として一般に広く認知され、産業界でも多くの企業が試用し、一部企業では実製品製造に用いるなど次世代ものづくり技術としての期待は大きい。本領域研究では AM で生じる超温度場での特異な結晶成長の解明とそれによる材料創成を主眼とするが、学術情報発信に留まらず、社会的期待に応えるべく、一般や産業界向け情報発信にも取り組んできた。これまで、以下のようなアウトリーチ活動で、一般からの反響が研究者にも研究意欲向上の機会となることを強く認識した。今後もアウトリーチを継続し拡大していく。

1) 領域 Web ページ・ニュースレター発行: 領域 Web ページ(図 10-1)にて一般の方にも本領域の研究を紹介し、研究成果を発信している。ニュースレター(図 10-2)を年二回発行し Web でも公開している。

2) 公開シンポジウム(一般向け)】2022 年 1 月 26 日にオンラインで開催した産学異分野連携シンポジウムは、関連学会、業界団体、領域メンバーによるメールマガジン等を通じて広く参加者を募り、当日は 100 名以上の参加があった。また、2022 年 10 月 26 日にオンライン開催した公開シンポジウムでは 198 名の参加があり、うち 70 名以上は企業からの参加者であった。いずれのシンポジウムでも基礎的な質問から産業応用の可能性に関する専門的な質問まで様々な質問があり、多様な属性(一般市民、企業、異分野研究者)の方々の参加によって、充実したアウトリーチ活動を進めることができた(図 10-3)。

3) 展示会出展・ニュースレター配布 毎年 1~2 月に東京ビッグサイトで開催されている Nanotech 展(3D プリンティング展併催)、領域メンバー所属機関の一般公開等にて領域研究に関するプレゼンテーションやポスター発表を積極的に進めている。来場者にニュースレターを配布し、領域 Web ページでの情報発信についても紹介している。参加者の関心は高く 2023 年 2 月の Nanotech 展では、ニュースレターでは足りず、急遽コピーして配布した。展示会には、主に関東圏からの中・高校生の参加も増えており、ものづくりへの興味を持ってもらうべく、分かりやすい説明を心がけながら対応している。

4) 研究施設一般公開: 大阪大学の AM センターや超高压電子顕微鏡センターの見学会では、講演等による口頭での技術紹介に続けて実際に装置やサンプルを目にすることで、本領域の研究により開発している最新技術をより身近に感じてもらえ取り組みを進めた。表 10-1 に主なイベントを記す。

5) プレスリリース 現在まで、7 件のプレスリリース、新聞発表を行い Web での二次発信を含め計 30 件掲載された。2024 年 5 月のプレスリリースでは、Web ニュースのサイエンス部門アクセスランキングで月間一位となるなど注目を集めた。

【新聞】原子配列をも制御する積層加工、日刊工業新聞、2022 年 2 月 18 日。

【新聞】阪大、3D 造形アルミ合金の微細化メカニズム解明 車・航空宇宙向け応用、日刊工業新聞 2022 年 7 月 8 日。

【WEB】アカデミア・研究領域から生まれる事業創造の成果発表会で受賞者 4 名決定!ビジネス創出支援プログラム「SENDAI NEW PUBLIC」(株サムライインキュベート、2022 年 3 月)。

【WEB】透明セラミックス結晶の高効率製造 ~ 高分解能 X 線撮像装置への応用に期待、横浜国大 2022 年 11 月。

【新聞】共晶体を気相合成 ガーネット-サファイア 膜厚制御が容易に、日刊工業新聞、2023 年 6 月。

【新聞】積層造形ニッケル基超合金、元素分布予測で高度化 阪大が新技術、日刊工業新聞、2023 年 4 月。

【WEB】鉄×アルミ化合物の原子配列の規則化過程を予測可能に、阪大/名大プレスリリース、2024 年 5 月 29 日。



図 10-1. 超温度場 3DP 領域 HP.



図 10-2. 超温度場 3DP ニュースレター.



図 10-3. 公開シンポジウムチラシと展示会.

表 10-1. 一般向けアウトリーチイベント開催リスト

開催日	主なイベント名
2022 年 1 月 24 日	超温度場材料創成学 産学・異分野連携シンポジウム
2021 年 12 月 7~10 日	第 6 回セラミックスシヤパン(高機能セラミックス展)
2022 年 7 月 15 日	第 33 回 JFCC 研究成果発表会
2022 年 9 月 8 日	第 5 回 JFCC 先端技術セミナー
2023 年 7 月 21 日	第 34 回 JFCC 研究成果発表会
2022 年 10 月 3 日	大阪大学 AM センター・超高压電子顕微鏡センター見学会 (参加者: 高校生対象)
2022 年 10 月 26 日	超温度場材料創成学公開シンポジウム(名称変更)
2022 年 12 月 7-9 日	第 7 回セラミックスシヤパン(高機能セラミックス展)
2022 年 5 月 11~13 日	第 7 回関西セラミックスシヤパン(高機能セラミックス展)
2022 年 5 月 3-4 日	いちょう祭施設公開(大阪大学)
2022 年 7 月 22 日	大阪大学超高压電子顕微鏡センター見学会
2023 年 10 月 4-6 日	第 8 回セラミックスシヤパン(高機能セラミックス展)
2023 年 11 月 11 日	産総研一般公開 2023 in つくばセンター(ラボツアー)
2023 年 5 月 17-19 日	第 8 回関西セラミックスシヤパン(高機能セラミックス展)
2023 年 5 月 1 日	いちょう祭施設公開(大阪大学)
2023 年 9 月 27 日	大阪大学超高压電子顕微鏡センター見学会
2024 年 1 月 31 日 ~2 月 2 日	第 23 回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 (nanotech 2024)
2024 年 5 月 2 日	いちょう祭施設公開(大阪大学)

11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

使用状況:

計画班経費は、設備費、物品費、旅費等として使用している。コロナ禍、半導体不足による流通の遅延のために装置納期の長期化による年度の繰り越しはあったが、概ね研究当初に計画した通りに執行している。主要設備としては例えば、A01-a 班は EB 溶融モニタリングシステム開発、A01-b 班は高速ワークステーション、A02-a 班は高出力ファイバーレーザーस्कヤンシステム導入 (SPing-8 BL47XU にて、PBF-LB 式の金属 3DP と同様の条件でのレーザー照射による溶融凝固過程の X 線透過その場観察を実施) した。A02-b 班は陽電子寿命測定用計測機器、A03-a 班はクリープ試験用加熱炉、A03-b 班は超微小高度計を導入した。同装置計の導入で当初の弾性率評価に加え局所的強度分布の評価が実施できた。A03-c ではレーザー焼結装置等を開発した。

総括班経費は、共通設備導入・保守・運用費用、若手人材育成費、領域内報告会会議費等として使用している。コロナ禍のための延期はあったが、オンラインも活用して、種々の領域内イベントや異分野連携・国際連携シンポジウムの開催を行ってきた。2022 年度には産学・異分野連携シンポジウムを開催し、活発な議論を通して、異分野・産学の垣根を超えた課題共有が行われた。さらに 2023 年度には本領域で独自に企画した国際会議 CMSTF2023 を主催し、クオリティの高い 52 件の発表がなされ、海外の研究者からも高い評価を受けた (13. 総括班評価者による評価に記載)。若手研究者の育成にも十分に力を入れており、ナノレベル解析技術やデータ科学活用に関するセミナーを開催している。その活動の一環として若手研究者研究成果会を開催し、各研究機関を超えた若手研究者間の活発な交流とディスカッションを推進した。

使用計画:

計画研究班経費は、当初に計画した通りの設備費、物品費、旅費等として、交付額と必要な額とを加味して、執行していくことを予定している。総括班経費も当初の計画通りの執行を予定している。より充実した国際連携、若手人材育成となるように種々のイベントを予定している。具体的には、2025 年度に開催する国際会議開催準備、現在公募中の若手研究者の海外派遣も進めている。

研究費の効果的使用の工夫

各計画班および総括班経費を有効的に活用するために、使用用途に関する綿密な打ち合わせを総括班会議にて毎年度初めに行なっている。また、AM センターの毎週の定例会議にて、金属 3DP 装置の利用状況を議題として挙げて試料造形の優先度に関して議論しており、合金系や実験の種類を整理して、効率的に実験試料を作製している。一方、領域内での連携強化のために、領域メンバーのみがアクセス可能な共通データサーバを設置した。共同研究時の研究データの受け渡しや各計画班が企画したディスカッションミーティング録画を共通データサーバにてオンデマンド配信しており、各自が直面している学術的問題の意識の共有を推進している。また、2 週間毎に行っている総括班会議資料の蓄積にも利用しており、円滑な総括班運営のために活用している。

設備等の活用状況

領域内での研究設備の共同活用は、大阪大学異方性カスタム設計・AM 研究開発センター (金属 AM センター、共用設備: レーザービーム PBF 装置、電子ビーム PBF 装置)、大阪大学超高压電子顕微鏡センター (共用設備: TEM、SEM、FIB 装置) を中心として、若手研究者 (3 名) を配置して進めている (図 11-1)。特に、大阪大学金属 AM センターでは、各計画研究班・公募研究班において必要な金属 3DP を用いた試料作製を行い、連携を加速化させている。さらに、領域の基盤的考えである超温度場を領域研究者がその場観察するためのハイスピードカメラを利用可能なサポート体制を整えている。

また、より共同利用をしやすい環境づくりのために、新しい研究者が参画したタイミング等で、センター設備の見学会や装置の原理も含めた使用のための講義をそれぞれの機関が主導して実施している。さらには、実際の装置使用者が機器の取り扱いの説明するニュースレターの特集号を作成するなど、装置で測定可能な実例を示すことで、共同利用しやすい体制を整えている。これまでに、共同利用設備を利用したことで新たな連携が生まれ、その成果は学術論文としても成果として発表している。

以上のように、研究費は効率的に使用され、共有できる設備・知的資源は有効に活用されている。



図 11-1. 領域内での研究設備の共同活用実績。これらの研究設備を利用した成果論文は Acta Materialia 誌や Additive Manufacturing 誌などに 18 報掲載されている。

12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点からの研究領域の推進方針

超温度場材料創成学の構築を目指して、本領域で行ってきた研究成果により、超温度場と定義した 10^7 K/m を超える巨大な温度勾配での結晶成長について多くの知見を見出すとともに、それに必要な実験手法、計算手法を確立し、優れた材料も創出してきた。これらの研究を通じて、超温度場材料創成学に構築へと大きく前進するとともに新たな発想・展開も生まれてきた。今後の研究の推進方針は大別すると以下の3つ観点で大別できる。

- (1) **超温度場における結晶成長の知見の体系化の推進**: これまでの研究により見出されてきた知見を基にして、これまでに確立してきた計算、実験、データ科学手法を活用したデータの拡充と並行して、研究手法の高度化も含む未知現象の解明も進め、超温度場での結晶成長の特殊性と一般性とを整理して学術的知見として確立する。
- (2) **超温度場での結晶成長解明から材料創成への推進**: これまでの研究で例えば、絶対安定性発現の条件が合金組成から予想可能なことが確認され、単結晶育成可能な合金の設計指針となることが示されてきた。今後は、これまでに得てきた知見を基に、新規材料の創成に重点をおいたフェーズの研究への移行することを推進する。
- (3) **超温度場を形成する熱源-物質の新たな展開の推進**: 量子ビームと物質との相互作用による超温度場発生とその計測を発展させる。新たな熱源としてはマイクロ波を対象とし、物質側として、金属材料やセラミックスで展開してきた研究を、半導体、分子性結晶などへも研究を展開し、熱源との相互作用の異なる系へ拡張を諮る。

今後実施する公募研究の役割 今後実施する公募研究は、上の研究推進に貢献する研究と位置づけられる。特に研究項目 A01～A03 の公募研究は関連の計画研究と連携し領域の研究の推進することを推奨する。一方、研究項目 B01 は超温度場材料学の対象範囲を拡張する役割を担う。以下に各公募研究の役割を簡潔に記す。

- A01 超温度場における結晶組織成長メカニズム解明に向けた原子モデリング**
新里 秀平 (大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教) 第一期公募研究者
原子シミュレーション技術を用いた超温度場下での結晶組織発達に潜む物理の解明に寄与するとともに、超温度場 3D プリントにおいてプロセス設計に資する原子論的知見を提供する。
- A01 金属 3D プリンターのデンドライト/セル組織予測の高性能 3 次元計算手法開発**
坂根 慎治 (京都工芸繊維大学・機械工学系・助教) 第二期より新規参画 (第一期と関連)
流体強連成急凝固 PF モデルの大規模 3D 計算により、A02-a 班の実験観察と直接比較可能なシミュレーションを実行し、A01-b 班のデータ同化と連携し高温物性の推定にも寄与する。
- A01 結晶塑性解析による超温度場下の残留応力予測と力学特性解析**
白岩 隆行 (東京大学・大学院工学系研究科・講師) 第二期より新規参画
A02 の実測と整合する残留応力予測で A01-a 班のデジタルツイン科学の構築に貢献しながら A01-b 班の材料インフォマティクスに学習データを提供し、A03 班に特性を向上の指針を示す。
- A01 超温度場サロゲートモデルの構築とそれに基づくプロセス・材料設計指針**
鈴木 飛鳥 (名古屋大学・工学研究科・助教) 第一期公募研究者
デジタルツイン構築と非定常温度場シミュレーションのサロゲートモデルにより、解析高速化と材料創製を進展させプロセス条件と材料特性の関係を示し領域研究の推進に貢献する。
- A01 CALPHAD 法を援用したアルミニウム合金の急凝固過程における非平衡晶出挙動評価**
徳永 辰也 (九州工業大学・大学院工学研究院・教授) 第二期より新規参画
化合物晶出挙動の理解と材料組織制御を通じて新規材料の創出を促進し、熔融池挙動の予測を可能にして研究領域の推進に寄与する。
- A02 積層造形材料のナノスケール濃度変調の解析と強化メカニズム解明への展開**
佐々木 泰祐 (NIMS・スピントロニクス材料研究センター・グループリーダー) 第二期より新規参画
3 次元アトムプローブ解析により A02 先端分析のナノスケールの組織解析を通じて、超温度場下での結晶成長で形成される材料の特性発現機構の理解を深め、領域研究の推進に貢献する。
- A02 Quantitative Elucidation of Dislocation Network Structure Strengthening in Additive Manufactured Steel**
孫 飛 (名古屋大学・工学研究科・特任講師) A01-b 班 研究協力者
超温度場での結晶成長と物性への高速冷却の影響を、特有の転位ネットワーク構造に焦点を当て、明らかにし、金属 AM の材料設計とプロセス制御による望ましい構造と特性の獲得に貢献する。

- A02 二次イオン質量分析法による超温度場凝固に固有の帯状変調組織の実証**
仲村 龍介(滋賀県立大学・工学部・教授)第二期より新規参画
二次イオン質量分析法の測定領域・空間分解能・組成分解能を活かした溶質分布解析により A02 班の先端分析の立場から、A01 班へのデータの提供により領域の研究推進に貢献する。
- A02 その場中性子回折を用いたNi基超合金積層造形体の階層的な多相組織のダイナミクス解析**
森 真奈美(仙台高等専門学校・総合工学科・准教授)第二期より新規参画
EB-PBF 発生する超温度場で結晶成長した Ni 基超合金のひずみおよび格子欠陥挙動を、塑性変形中のその場中性子回折実験での明らかにすることで A02 の先端分析科学の推進に貢献する。
- A02 レーザ照射により誘起される超高温相のその場観察と物理量定量化**
田中 学(九州大学・工学研究院・准教授)第二期より新規参画
LB 照射によるプラズマ相の発光・吸光現象を用いたイメージングとその定量解析で、気相側の超温度場と濃度場を計測し、A02-a の透過 X 線で発見された現象を解明する役割を担う。
- A03 高レーザ吸収球形多孔質セラミックス粒子の組成最適化と緻密セラミックス積層造形**
野村 直之(東北大学・工学研究科・教授)第一期公募研究者
独自の POEM 法で粉末の構造を制御し LB 吸収効率を高め、A03 セラミックスでの超温度場の形成と溶解・結晶成長の研究を推進するとともに A01 のデジタルツイン科学の推進に貢献する。
- A03 金属 3DP による等温 α 相の相分解を利用した $\alpha + \beta$ 型チタン合金の創製**
田原 正樹(東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授)第一期公募研究者
超温度場を用いた新規チタン合金の創成により、特に A03 に直接貢献する。新合金作製と超温度場の組み合わせで超微細 α/β ラメラ組織を創出し領域研究全体の推進に大きく貢献する。
- A03 超温度場での特異な組織形成を利用した生体材料の高機能化のための材料設計指針の構築**
多根 正和(大阪公立大学・大学院工学研究科・教授)第一期公募研究者
超温度場と 3D プリント技術を用いた生体用 Ti 合金の微細組織と弾性特性の相関関係の解明による低弾性率化プロセスと組織制御指針の確立に弾性論の立場からの貢献する役割を担う。
- A03 金属/セラミックス複合粉体に由来した温度場生成と結晶配向制御**
松本 洋明(香川大学・創造工学部・教授)第一期公募研究者
金属-セラミックス複合粉体から超温度場形成を利用した非平衡 Al_4SiC_4 相の多量製造を緻密化により従来は不可能だった組織制御を実現し領域の超温度場材料創成学の構築に貢献する。
- A03 酸化物系全固体電池におけるレーザ超温度場で誘起する界面形成機構の理解**
本間 剛(長岡技術科学大学・工学研究科・教授)第一期公募研究者
レーザによる局所加熱によるガラスの特異な結晶化を用いた新プロセスを開発することで、酸化物全固体電池の開発に寄与するとともに領域での学理構築と社会実装に貢献する。
- B01 ミリ波による「超温度場」形成と触媒反応制御**
椿 俊太郎(九州大学・農学研究院・准教授)第二期より新規参画
研究項目 B01「領域に新たな展開をもたらす研究」としてマイクロ波やミリ波など LB や EB とは異なる超温度場生成による触媒反応などにより超温度場材料創成学の学理構築に貢献する。

国際的なネットワークの構築の計画： 昨年開催した国際会議 Creation of Materials by Super-Thermal Field 2023 およびそのサテライトセミナーにより海外研究者との関係が深まった。この関係を維持して、国際セミナーの開催、若手研究者の海外武者派遣を推進する。また、2025 年には、本領域主催の第 2 回目の国際シンポジウム Creation of Materials by Super-Thermal Field 2025 を MRM(パシフィコ横浜、2025 年 12 月 8 日～13 日)のシンポジウムとして開催する。CMSTF2023 に参加した主要海外研究者を含めたオーガナイズングコミッティーを組織することでネットワークを強固にし、さらにその主要メンバーもつネットワークを活用し、より多くの海外研究者へとネットワークを拡げることを計画している。また、それに向け国内外で研究成果発表を推進し、世界でのプレゼンスを高めるとともに国際会議への参加を呼びかけ本研究領域を中心とした国際ネットワークの確立を推進する。

13 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

総括班評価者による評価コメント

岡田益男 先生（東北大学未来科学技術共同研究センター・シニアリサーチフェロー）

本学術変革領域の目的は、金属 3D プリントという電子ビームなどの局所加熱で発生する超温度場での熔融・凝固における「超高速エピタキシャル成長」などのメカニズムを、放射光 X 線透過イメージングなどの高度なその場観察実験と熱流体力学計算、分子動力学計算等の数値シミュレーションで解明し、3DP による高品質単結晶化などの新規材料創成に資する超温度場材料創成学を構築することである。また、本領域の特長は、超高温温度場での 3DP プロセスのシミュレーションやその場観察班や結晶成長の制御による新材料開発等の班から構成され、共通試料として 316L 鋼を指定するなど運営が有機的に運営されていることである。

その結果、従来の金属材料の溶解鋳造過程の解像度の高い直接観察が困難であったこれまでの歴史を根本的に覆す結果が得られ、例えば温度勾配 10^7 K/m、凝固速度 1 m/s という極めて特殊な環境での結晶成長の直接観察に成功し、生体用 Co 合金を三方向に<100>配向した単結晶状材料の作製に成功するなど、今後 3DP が様々な材料の単結晶化法としての可能性を示唆したことは特筆に値する。様々な材料の 3DP の溶解鋳造過程の直接観察結果による、様々な材料の結晶制御、単結晶化など今後の展開が期待される。公募研究においても、複合材料や電池材料といった挑戦的な研究において優れた成果が得られている。

各学会におけるセミナー・講演会で数多くの若手研究者の活躍が顕著にみられ将来が期待される。その結果、本領域の研究成果は、2024 年 6 月現在で、学術雑誌論文 188 報（直接関連論文 56 報、間接関連論文 132 報）、学会発表 385 件、書籍・図書 10 件、特許出願・取得 8 件に達し、ホームページやニュースレター等で発信されている。以上のように本領域研究は設定目的に対して期待以上の成果があり、今後の展開が期待される。

新家光雄 先生（大阪大学大学院工学研究科・特任教授）

3D プリントに関係するプロジェクトは他に存在するが、3D プリントでの結晶成長を学術的に深く掘り下げ、材料科学の高度な専門知識と研究スキルと知見を持つ研究者を集めて領域を構成している点は他の研究プロジェクトには見られない。この特徴により、優れた研究を展開することに繋がっている。10 年前より 3D プリント技術開発が盛んであるが、本領域は、国内の 3D プリント学術研究でトップを走る研究プロジェクトであることに疑う余地はない。世界的にも、超温度場での結晶成長に注目して、セラミックスにも展開する本領域の研究は他に類を見ないものとなっている。この利点を活かして、3D プリントでの新材料創成の研究として世界で確固たる地位を確立されることが期待される。そのためにも、超温度場材料創成学としての学問体系の構築を主眼とした研究推進を継続していただきたい。主要ターゲットとしているチタン合金の研究では、汎用的な Ti-6Al-4V 合金に留まらず、耐熱構造材料としての特性に特化した Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo 合金をスーパーチタンの候補として研究が展開されており、疲労やクリープといった構造材料として優れた特性の獲得に成功している。生体材料としての Ti 合金の研究も順調に進み、超温度場での表面修飾が生体親和性に及ぼす影響など興味深い結果が得られている。公募研究では、超温度場での非平衡凝固を活かした相安定性と弾性率との関係の基礎研究、相安定性の制御による超弾性材料の創成、酸化グラフェン修飾にてレーザー吸収率を高めた粉末の開発等により、材料創成グループの計画研究だけでなく、領域全体の研究に大きく貢献しており、多数の研究者が参画する学術変革領域研究の利点を活かした研究が展開されている。今後のさらなる発展が期待される。

高梨弘毅 先生（日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター・センター長）

本領域の中心的研究対象である 3D プリントについては専門外であるが、3D プリントで発現する超温度場での熔融凝固が超急冷による非平衡化や絶対安定性による無偏析単結晶化をもたらすことなど、本領域で注目している物理現象は基礎的な視点からも応用上の視点からも大変興味深く、研究の進展に大いに注目している。阪大 AM センターを中心として領域内連携研究が推進され、ディスカッションミーティング等で活発に議論され、多くの成果が得られているという点では当初の期待を上回っている。領域外との連携、特に海外との連携は、領域開始当初にはコロナ禍があったため、やや遅れているが、2023 年度に国際会議を主催し 100 名以上の参加者を得たことを契機に海外研究者との交流が進んでおり、今後の国際連携研究の推進が期待される。2025 年にも MRM で本領域主催の国際シンポジウムが計画されており、それに向けて国際連携を推進し、本領域が 3D プリント分野の学術研究の世界拠点になることを期待したい。若手人材育成の取り組みとして、夏の学校、スクール、若手研究会が盛んに開催されている点も高く評価される。新聞等での発信が増加している点も素晴らしい。なかでも構造材料としても磁性材料としても優れた特性を示し、90 年前から研究されてきたアルパーム Fe₃Al を取り上げた研究には、特に注目している。類似の構造をもつホイスラー合金など L2₁ 規則合金への展開により 3D プリントを専門しない機能性材料研究者にも注目され、本領域の研究のさらなる拡大・発展に繋がることを期待する。

海外研究者（本領域で主催した国際会議に出席）の評価コメント

Prof. Eric Maire（フランス リヨン国立応用科学院（INSA-Lyon）材料工学/科学研究所・ディレクター）

I am writing this comment in favor of the project entitled "creation of materials by super-thermal fields (CMSTF)," gathering a group of excellent researchers in Japan. The group aims to elucidate the mechanism of the unique crystal growth that occurs during processes involving super thermal fields, which are generated by extreme local heating by electron beams or lasers in metal 3DP. I happened to know of this initiative while attending the last CMSTF2023 conference in Osaka, and I am following their inspiring progress. I personally participate in France in a number of research groups and initiatives to organize our forces in the research field of additive manufacturing. I can testify that none is as efficient and productive as CMSTF.

The planned research is very well adapted to the challenges of this rapidly developing field of research. Actions in this regard are cleverly planned. These include top notch methods as diverse and complementary as simulations using artificial intelligence and advanced applications in the fields of titanium, biomaterials, and ceramics. On a personal basis, I particularly appreciate the planned characterization using time-resolved X-ray imaging, and being an international expert in the field, which I know is a very challenging target.

The achievements so far are impressive, with many papers published in the field and an assonating conference demonstrating the first results of the group and confronting these to high-level research of competitors from around the world. The research proposed is progressing well so far and will lead to important breakthroughs, allowing us to unlock some blocking points in our knowledge and accelerate the use of this technology for producing future applications in everyday life.

Prof. Eric Jägler（ドイツ ミュンヘン連邦大学 材料科学研究所・教授）

The project "CMSTF" is an excellent effort to bring cutting-edge methodologies from basic materials science to the manufacturing science of additive manufacturing (3D printing). The wide range of experimental and computational tools employed in research centers across Japan includes high-resolution microscopy, X-ray imaging, neutron diffraction, positron annihilation, digital twin modelling, high-fidelity fluid dynamics, phase-transformation simulations, and big data approaches. Another unique feature of the CMSTF is the clear focus of the program on a specific set of problems in the larger research area of additive manufacturing, that is, the exploitation of the very high thermal gradients presents in beam-based AM methods.

This impressive combination of expertise from many different fields, combined into a coherent research program aimed at improving the performance of various metallic, ceramic, and bio-based materials, is an important endeavor in the Japanese research landscape. It combines scientific excellence with a clear application-driven focus and is rapidly establishing itself in a short list of very successful additive manufacturing research clusters worldwide. I wish that the CMSTF team continued to succeed in their scientific mission!

Prof. Albert To（米国 ピッツバーグ大学 ANSYS Additive Manufacturing 研究所・ディレクター）

The "Creation of Materials by Super Thermal Field (STF)" is a fascinating highly collaborative research project in Japan that aims to elucidate unique crystal growth mechanisms. The project investigates the underlying crystal growth mechanisms in STF using advanced experimental techniques and computational modeling, with the goal of fabricating single crystals via 3D printing, heat-resistant titanium alloys, biomaterials manipulation, and ceramic materials. The overarching theme of the various projects in the bigger program seems to be on developing digital twins, in which the modeling is updated in real-time based on the latest experimental measurements, to simulate the process and microstructure as close to reality as possible. The digital twin area is in its infancy in the research community, and obviously, the STF program is at the forefront of world-leading research.

I had the great pleasure attending the 1st International Conference held for this project where I saw many presentations. I was particularly impressed by the presentations on creation of single crystal using laser powder bed fusion and artificial intelligence for process-structure-property correlation analysis. Both of these topics are current state-of-the-art in the world. I was also highly impressed by the high level of collaboration among the investigators from many different institutions who contributed to different aspects of the project. I look forward to seeing new research results in future conferences for this project.