学術変革領域「超温度 3DP」の研究背景・体制・活動状況

小泉雄一郎[*1)]　中野貴由[*1)]　石本卓也[**]　足立吉隆[****]
木村禎一[*****]　森下浩平[******]　戸田佳明[*******]　佐藤和久[********]
超　研[*2)]　松垣あいら[*2)]　奥川将行[*3)]

* 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻；1)教授　2)准教授　3)助教
** 富山大学学術研究部都市デザイン学系；教授
*** 名古屋大学工学研究科；教授
**** 財団法人ファインセラミックスセンター材料技術研究所
***** 九州大学大学院工学研究院；教授
****** 物質材料研究機構マテリアル基盤研究センター；主任研究員
******* 大阪大学超高圧電子顕微鏡センター；教授
Research Background, Structure, and Activities of the Academic Transformation Area "Super-Temperature 3DP"; Yuichiro Koizumi, Takayoshi Nakano*, Takuya Ishimoto**, Yoshitaka Adachi***, Yoshikazu Kimura*****, Yoshiaki Toda******, Kazuhisa Sato*******, Ken Cho*, Aira Matsugaki* and Masayuki Okukawa*(*School of Engineering, The University of Osaka, Suita. **Aluminium Research Center, University of Toyama, Toyama & Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, The University of Osaka, Suita. ***Department of Materials Design Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University, Nagoya. ****Fine Ceramics Center Materials Technology Research Institute, Nagoya. *****Graduate School of Engineering, Kyushu University, Fukuoka. ******National Institute for Materials Science (NIMS), Tsukuba. *******Research Center for Ultra-High Voltage Electron Microscopy, Suita)
2025年 8 月26日受理[doi:10.2320/materia.64.756]

1. はじめに

学術変革領域研究(A)「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」では，金属付加製造(Additive Manufacturing: AM)において発現する超温度場(10^7 K/m 以上の温度勾配)を基軸とした新しい結晶成長現象や材料機能創成の学理の体系化を目指してきた．本領域は，2021年度の発足以来，4 年間にわたり計画研究・公募研究の密な連携のもと研究を推進しており，異分野融合的な枠組みの中で多くの成果を挙げている．研究成果は，他の記事に記す．本稿では，総括班としての領域運営方針と取り組み状況について概説する．

2. 領域の学術的背景と研究体制

(1) 学術的背景

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溶融結合(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 で高速移動しながら原料粉末に照射され，溶融・凝固による材料の付加が繰り返される．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．

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．高温度勾配(G)，高凝固速度(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)の発現が予言され，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．

(2) 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共通試料の造形・配布，新規材料設計の指導，研究内容の調整などを行い，連携強化と円滑な領域研究を推進してきた．具体的には，**図 1** に示す体制によって各計画研究の連携を推進してきた．

計画研究では，A01-a「超温度場デジタルツイン科学」にて，3DP 中の溶融凝固を高速度カメラでのその場観察するとともに項目 A02「その場・観察・分析」の各班のデータと整合した熱流体力学(Computational thermal－Fluid Dynamics: 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フェーズフィールド(PF)計算を行っ

図１　学術変革領域研究(A)「超温度場材料創成学」の連携体制図．金属付加製造における超温度場を基軸に計画研究・公募研究が密に連携している．(オンラインカラー)

ている．必要なパラメータは，A01-b と連携したデータ同化や分子動力学(MD)計算で評価している．

A01-b 班「超温度場材料インフォマティックス」では機械学習を用いて，A01-a 班が示すプロセス-組織の関係および A03が評価する組織-特性-性能の関係を用いて，プロセス-組織-特性-性能の関係の定量予測を行っている．また，A01の PF 計算の移動度データのデータ同化による導出を行っている．A02では，A02-a 班「超温度場結晶成長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「超温度場格子欠陥アナリシス」による先端分析にてA03「超越的材料創成」で作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している．それらのデータは，A01班に提供されるとともに A03班に還元されている．各計画研究班による綿密かつ有機的な連携に基づき，超温度場材料創成学の学術基盤が構成されている．

3.　領域の活動内容の記録

(1)　領域キックオフミーティング

2021月10月11日オンラインにて，キックオフミーティングを開催し，領域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した．

(2)　総括班定期ミーティング(月２回@オンライン)

概ね２週間に一度，総括班メンバーならびに計画研究代表者および研究分担者が Web ミーティングで，連携研究のための情報交換，領域運営の調整，意見交換を行った．これにより上記の共通試料が選定され，阪大金属 AM センターから提供されるとともに，各計画研究班同士および公募研究班との共同研究により，金属 3DP における超温度場での結晶成長による材料創成の連携を推進した．

図２　2023年年度末報告会での集合写真．(オンラインカラー)

(3)　年度末報告会(図２)

毎年３月に開催(2022年オンライン，2023年富山，2024年阪大中之島(図２)，2025年阪大箕面，2026年大阪〈予定〉)．計画研究・公募研究の進捗を２日間にわたり報告し，達成度の確認や班間の意見交換・集約，方向性の調整を行ってきた．統括班評価者からの助言や激励を受け，領域全体の研究加速に資している．

(4)　ディスカッションミーティング(オンライン，各２～３時間)

毎年，状況に応じた方針で，各計画研究班の持ち回り担当で議論している．各年の方針・開催日(担当班)は下記のとおり：

2021年度「相互理解・連携推進」：2/18(A01a)|2/21(A01b)|2/22(A02a)|2/24(A02b・A03a)|3/4(A03b・A03c)

2022年度「連携加速」：5/26(A01a)|6/30(A01b)|7/29(A02a)，8/26(A02b)|9/30(A03a)|10/28(A03b)|11/25(A03c)

2023年度「中間目標到達」：4/21(A01a)|5/19(A01b)|6/30(A02a)|7/21(A02b)|8/25(A03a)|10/20(A03b)|12/22(A03c)

2024年度「国際化」：7/12(A01)|8/23(A02)|10/18(A03)

2025年度「最終総括」：6/5(A01)|8/2(A02)|10/14(A03)

(5)　超温度場夏の学校：電子顕微鏡スクール

2022年８月17～19日および2024年８月28～30日，大阪大学超高圧電子顕微鏡センターにて，計画研究 A02-b「超温度場格子欠陥アナリシス」(代表：佐藤和久准教授(阪大))の主要ツールである透過電子顕微鏡(TEM)観察および元素分析について，スタッフを講師とする座学と実習のスクールを開催し，若手研究者・大学院生が，原理と操作法を習得した．その結果，A02-b との連携による TEM 解析に基づく研究成果が多数得られている．

(6)　超温度場夏の学校：データ科学スクール

2022年９月５～７日および2024年９月５～６日名古屋大学にて，計画研究 A01-b「超温度場材料インフォマティックス」代表の足立教授らを講師としてデータ科学スクールを開催し，材料組織の特徴量抽出やニューラルネットワーク，ベイズ推定，遺伝的アルゴリズム，AI による画像認識などを

各自のPCを用いて実習した．他の計画研究代表者・分担者や若手研究者・大学院生も参加し，データ科学の実践的活用を通じて連携研究が進展し，新たな研究展開やスキル獲得につながった．

⑺　公募研究キックオフミーティング

2022年8月10日（第一期）および2024年5月15日（第二期）に，大阪大学での対面とオンラインのハイブリッド形式にて，公募研究キックオフミーティングを開催し，領域研究の方針と公募研究者の研究計画を確認し，計画研究との連携を図った．また，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．さらに，領域内連携推進部門の阪大金属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．

⑻　一般公開シンポジウム

2021年1月26日にオンラインで産学異分野連携シンポジウムを開催し，社会課題解決に資する研究推進の方向性を得た．また，2022年10月26日にもオンラインで公開シンポジウムを開催し，領域の取り組みを広く対外的に発信した．

⑼　本会の公募テーマシンポジウム

本会秋期講演大会の公募テーマシンポジウムとして，2022年秋「Additive Manufacturingの材料科学」2023年秋「Additive Manufacturingの材料科学II：超温度場材料創成学」，2024年秋・2025年秋には「超温度場材料創成学II・III：Additive Manufacturingによる材料科学の新展開」を開催した．本シンポジウムは，2017年春期講演大会にて当時の第4分科（現在第7分野）生体材料分野主催で初開催され，2021年まで毎年開催されていた「医療福祉のためのAdditive Manufacturingの材料科学I～IV」を引き継ぎ，第6分野と第7分野の共同提案で，コロナ禍明け初の対面開催の講演大会にて初開催した．

⑽　国際会議・国際シンポジウム

2023年11月16～17日には国際会議Creation of Materials by Super-Thermal Field（CMSTF）2023を主催し，海外連携を推進した．直前に開催された本会講演大会では，AMをテーマとした国際セッションが，領域代表を日本側代表として開催され，領域参画者の講演も含め公募シンポジウムと並行開催した．

2025年12月8～13日は日本MRS主催の国際会議Material Research Meeting（MRM）2025（横浜）にてCMSTF2025を開催予定である．さらに，本領域の活動終了後となるが，2026年4月26日～5月1日に，米国Materials Research Society（MRS）の2026 Spring Meeting（ハワイ）にてシンポジウムCreation of Materials by Super-Thermal Field in Additive Manufacturingを開催予定である．

⑾　本会欧文誌，和文誌での特集号の発行

Materials Transactionsにて特集号[1]を企画し，2023年6月に発行した．領域の研究成果の論文13報を掲載した．そのうち2報の論文（筆頭：孫飛 特任准教授（名大），柳玉恒特任助教（阪大））が，本会の論文賞を受賞した．2024年9月には，同特集に掲載された論文を和文に翻訳したものを，本会会誌にて，特集「超温度場材料創成学」[2]を発行した．

4.　若手研究者の育成に係る取組状況

⑴「超温度場 夏の学校」スキルアップ型スクール

上記の電子顕微鏡スクール（3.⑸参照，**図3**（a）），データ科学スクール（3.⑹参照，図3（b））を通じ，大学院生・博士研究員が実践的なスキルを習得した．講義だけでなく実習・演習形式を重視し，受講者には修了証を発行．異分野間のグループワークにより，学際的な視点や領域横断的な課題解決能力も涵養された．こうした教育活動は，研究スキルの習得にとどまらず，世代・所属機関を超えたネットワーク形成にも寄与し，領域全体の人材育成基盤の強化に繋がっている．

⑵「超温度場 夏の学校」若手研究交流会

超温度場 夏の学校の一環として毎年開催されてきた若手研究交流会（図3（c））では，大学院生やポスドクが他機関の若手研究者と直接議論を交わし，研究の深化とネットワーク形成を図ってきた．毎回，基調講演，研究発表・討論，優秀発表表彰を通じて，学術的刺激と成長の機会を提供している．2023年9月24-25日に神戸で開催した初回は，コロナ禍明け直後の対面開催として30名が参加．超温度場や金属3DPを

図3　超温度場夏の学校の様子（a）電顕スクール，（b）データ科学スクール，（c）若手研究交流会．（オンラインカラー）

焦点とした議論や他大学の発表に刺激を受けた参加者が，博士後期課程への進学を後押しする契機となった．2024年10月11–12日には大津で合宿形式開催され交流も深まった．活発な討論と表彰を通じて若手の意欲向上に寄与した．

2025年9月20–21日には，金属学会直後に札幌の合宿施設で開催し，基調講演には研究協力者の北大 大野宗一教授およびJFCC井田駿太郎主任研究員を招聘．これまでの集大成として実施され今後の学術的発展や連携の継続に向けた意義ある機会となる．形成された連携と相互理解は，領域終了後も継続的に活かされ，人材育成の成果として位置づけられる．

⑶ 日本MRS年次大会(MRS–J)シンポジウム開催

「巨大温度勾配での結晶成長による材料創成と実験・計算融合科学」と題して，若手人材育成部門と若手研究者が主体となり，基調講演の依頼も含めて運営し実施された．基調講演が，千葉晶彦 名誉教授(東北大)，安田秀幸教授(京大)，招待講演が，木村禎一 主席研究員(JFCC)，渡邊誠 構造材料研究センター副センター長(NIMS)，さらに領域の若手研究者に鈴木飛鳥 准教授(名大)，小笹良輔 助教(阪大)，奥川将行 助教(阪大)によって行われた．

⑷ 若手人材育成活動の成果

⒜ 若手研究者・学生の国内・国際学会発表・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(2024年6月現在)に昇る．若手研究者により，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．

⒝ 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は，5名が文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した．また，国際・国内学会においても論文・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，若手研究者のポテンシャルの高さが結実するとともに，学生の成長も目覚ましく，今後さらに発展が期待される．

5. 国際交流・国際連携推進

⑴ 国際会議CMSTF2023(3.⑽参照)

2023年11月15～17日に大阪で開催した本領域主催の国際会議CMSTF2023には，109名が参加(講演37件，ポスター32件)し，多数の若手研究者が発表を行い，海外研究者との連携の端緒となった．大学院生には国際会議初参加者も多く，英語での議論を通じて研究意欲を高め，その後の国際会議への参加も増加した．基調講演者としてはEric Maire教授(INSA Lyon, France)，Eric Jägle教授(Univ. of the Bundeswehr Munich, Germany)，Peter Voorhees教授(Northwestern Univ., USA)を招待講演者，Albert To教授，Jörg Wiezorek教授(共にUniv. of Pittsburgh, USA)，Wentao Yan教授(National Univ. of Singapore)，Pan Wang博士(A*Star, Singapore)を迎えた．加えて，千葉晶彦教授(東北大学)と領域代表が基調講演を，各計画研究代表者も招待講演を行った．これを契機に国際交流と連携が進展し，国際共同研究，リモート会議での議論，若手研究者の海外渡航，新規国際シンポジウムの企画にも繋がった．

⑵ 国際シンポジウムCMSTF2025(in MRM2025)

2023年に独自開催したCMSTFを，MRS–Jの国際会議MRM2025の一つのシンポジウムCMSTF2025として提案し採択され，ポスター発表を含む63件(口頭35件，ポスター28件)と，35シンポジウム中8番目(口頭では6番目)に講演数の多いシンポジウムとなった．2025年12月8日～12日のMRM会期中の12月9日～11日に開催予定である．多数の聴講を期待している．

さらに，CMSTF2023の招待講演者であった，Alber To教授，Eric Jägle教授に加え，Olga Zinovieva講師と企画し2026年4月26日～5月1日にHonoluluで開催される2026 MRS Spring Meetingに提案したシンポジウムが採択され，MF02 Creation of Materials in Additive Manufacturingとして開催される予定である．領域終了後だが，同年6月の事後評価で報告する予定である．

6. 広報・アウトリーチ

広報部門，産学異分野連携部門によるアウトリーチ活動を行った．

⑴ 領域Webページ

領域Webページ[3]にて一般の方へも本領域の研究を紹介し，研究成果を発信している．なお，Webページの作成については，ロゴの作成と併せて，採択直後に文部科学省からの指示を受けて作成したものである．

⑵ ニュースレター(図4)

ニュースレターを年二回発行し，各方面に発送するとともに，Webでも公開している．これまで，Vol. 1：創刊号・計画研究紹介，Vol. 2：第一期公募研究紹介，Vol. 3：計画研究成果紹介，Vol. 4：研究設備特集，Vol. 5：第一期公募研究成果特集，Vol. 6：第二期公募研究紹介，Vol. 7：若手研究者特集を発行し，現在，Vol. 8を編集中である(図4)．

⑶ 学会誌，学会報での情報発信(3.⑾参照)

本会の欧文誌[1]，和文誌[2]での特集ならびに本会報特集に加え，スマートプロセス学会[4]，日本ガスタービン学会[5]，日本溶射学会[6]，日本鉄鋼協会[7][8]，日本AM学会[9]などの会報，学会誌，欧文誌の解説においても，本領域の取り組みや研究成果を紹介してきた．

図 4　超温度場材料創成学のニュースレター表紙．（現在 Vol. 8 編集中）（オンラインカラー）

(4)　一般公開シンポジウム（3.(8)参照）

産学異分野連携部門では，2022年 1 月26日と10月26日に，一般，産業界，異分野に向けた公開シンポジウムをオンラインで開催し，それぞれ100名超，198名（うち企業70名超）の参加があった．基礎から産業応用に関する多様な質問が寄せられ，企業，異分野研究，一般からの参加により充実したアウトリーチを実現した．

(5)　学会内シンポジウム（3.(9)参照）

本会講演大会で秋には，2022年度より公募シンポジウムを開催し，企業研究者による講演もあり，産業界との意見交換も進めてきた．2025年 9 月 1 日～3 日には，東京都立産業貿易センターにて開催された日本 AM 学会にて，本領域のシンポジウム「超温度場材料創成学：AM における超急冷凝固結晶成長の科学」を開催した．

(6)　物性科学領域横断研究会

物性科学に関連する学術変革領域が一同に会する研究会で，2007年に 4 つの特定領域の合同研究会として始まり，その後も新学術領域，学術変革領域が参画して毎年開催されている．当領域は2021年度より参加している．2025年度は本領域が主催し，2.5次元物質科学および1000テスラ超強磁場科学の協力を得て，東京大学物性研にて2025年11月27～28日に開催予定である．

7.　お　わ　り　に

本領域は発足から 4 年間，計画研究・公募研究が密接に連携し，3DP を中心とした超温度場による材料創成の学理構築と応用展開に取り組んできた．領域終了までの期間においても，これまで培ったネットワークと成果を最大限に活かし，未解明課題の解決と新たな研究展開を加速させる．領域の活動が今後にも活かされるようよう，国際共同研究や若手研究者育成の枠組みを継続的に発展させ，国内外での新規プロジェクトや学会活動へと発展させることを目指す．こうした取り組みにより，領域の知見と人的ネットワークが今後も持続し，更なる発展に寄与することを確信している．

本稿の内容は，日本学術振興会　科研費学術変革領域研究（A）「超温度場 3DP（領域番号21A202）」の総括研究「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」（21H05192）として行われた．総括班評価者，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），新家光雄先生（大阪大学・特任教授），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），「超温度場材料創成学」参画者をはじめとする関係各位の皆様に大変お世話になりました．ここに記し，心より感謝の意を表す．

文　　献

（1）Y. Koizumi (Guest ed.): Mater. Trans., **64**(2023), 1098–1193.
（2）小泉雄一郎（編）：日本金属学会誌，**88**(2024), 145–215.
（3）超温度場材料創成学 Web ページ．（2021）．http://www.mat.eng.osaka-u.ac.jp/super3dp/.
（4）小泉雄一郎，奥川将行，柳　玉恒，中野貴由：スマートプロセス学会誌，**14**(2025), 200–207. ibid., **12**(2023), 180–187.
（5）小泉雄一郎，奥川将行，石本卓也，趙　研，安田弘行，中野貴由：日本ガスタービン学会誌，**50**(2022), 84–89.
（6）小泉雄一郎，奥川将行，柳　玉恒，中野貴由：溶射，**60**(2023), 11–24.
（7）奥川将行，柳　玉恒，小泉雄一郎：ふぇらむ，**27**(2022), 853–861.
（8）Y. Koizumi and M. Okugawa: ISIJ Int., **62**(2022), 2183–2196.
（9）小泉雄一郎，足立吉隆，佐藤和久，森下浩平，戸田佳明，石本卓也，木村禎一，中野貴由：AM フューチャー，**1**(2025), 195–198.