



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

凝固・結晶成長の追究 —3D/4D 定量データの可能性—

Exploration of Solidification and Crystal Growth
-Potential for 3D / 4D Quantitative Data-

鳴海大翔
Taka Narumi

京都大学
大学院工学研究科 材料工学専攻
助教

1 はじめに

金属合金の凝固過程では、固相の核生成、固相の成長、熱伝導、液相の流体運動、固相粒子の移動など影響を及ぼす因子が数多く存在します。また、これらの因子同士も影響を及ぼし合いながら凝固が進行するため、凝固過程を凝固後の組織から予測するのは容易ではありません。金属材料の凝固組織や鑄造欠陥の形成過程を実証的に理解する有力な手段の一つに時間分解・その場観察があります。近年、SPRING-8など第3世代の大型放射光施設から得られる硬X線領域の高輝度・高平行度の単色光を用いた透過イメージングにより、金属合金の凝固現象の時間分解・その場観察が可能となりました。さらに、時間分解トモグラフィ（4D-CT, 3D空間+時間=4D）と呼ばれる観察手法が開発され、金属合金の凝固現象の時間分解・三次元その場観察が可能となりつつあります。厚み100-200 μm の試料中の固液界面を二次元に投影する透過イメージングでは空間的に制約がありますが、4D-CTにはバルク試料中の凝固現象を現実の鑄造プロセスに即した条件でその場観察できる特長があります。そして4D-CTを用いたその場観察により、デンドライトの発達や相互作用、固液界面積や界面曲率、固相粒子や介在物の移動を定量解析することが可能になります。著者は、獲得された3D/4D定量データを活用することで、実証に基づいた凝固現象の体系化を目指しています。本稿では、はじめに4D-CTについて簡単にご説明した後、著者の研究内容についてご紹介させていただきます。

2 4D-CTを用いた凝固その場観察

X線トモグラフィ（Computed tomography, CT）は複数の方向から撮影した投影像（X線透過像）を用いて観察試料内部を

再構成する手法です。X線CTには非破壊で観察試料内部を可視化できる特長があり、人体内部の検査など医療用途で普及しています。なおX線CTを実用化したCormarkとHounsfieldは1979年にノーベル生理学・医学賞を受賞しています。また非破壊であることを活かして、医療に限らず工学、理学、考古学など幅広い分野でX線CTは利用されています。一般的にX線CTは光源・検出器または試料を180°回転させる間に撮影された投影像のデータセットから再構成を行います。投影像のピクセルサイズ、つまり三次元像のボクセルサイズが空間分解能の指標になります。高輝度の放射光による投影像を用いたX線CTの場合はボクセルサイズ（1 μm ）³の再構成が実現されています。X線CTの原理や技術の変遷については、九州大学 戸田裕之教授の著書¹⁾をご参照ください。

4D-CTの場合は光源・検出器または試料を連続的に回転させながら投影像を撮影し、180°回転ごとの時分割のデータセットから再構成を行います。180°回転にかかる時間、つまり回転速度が時間分解能の指標になります。その原理上、できるだけ高速で回転させて高速で投影像を撮影することで時間分解能を向上することが可能です。しかし、投影像を撮影する検出器の性能により撮影条件に制限があるため、実際には撮影する投影像の削減や露光時間の短縮が必要になります。投影像の枚数が不足すると再構成において情報不足になり計算の誤差が増大してアーティファクトと呼ばれるノイズが発生します。また、露光時間を短縮すると投影像のシグナル/ノイズ比（S/N比）が低下して再構成像にノイズが顕在化します。すなわち、データセットに含まれる投影像の枚数や質が再構成像の質に関係して、空間分解能に影響します。このように4D-CTは時間分解能と空間分解能がトレードオフの関係にあり、高輝度の放射光を用いた場合でも4D-CTの観察条件には制限があるのが現状です。高速撮影や広視野撮

影など、目的に応じた観察手法や画像解析を使い分ける必要があります。

固液共存域において形成されるマクロ偏析やポロシティは凝固過程において固相や液相が移動することで形成されます。凝固条件との関係や固液共存領域を均一な連続体として取り扱うモデルが提案されていますが、固相や液相の独立した運動に関する知見あるいはモデルの妥当性を検証できるデータを得ることは困難でした。そこで著者は、外力が負荷されている凝固組織における固相・液相の移動を4D-CTによってその場観察し、獲得された3D/4D定量データに基づいて固相や液相のダイナミクスを陽に取り扱った凝固モデルの確立や鑄造欠陥の形成機構の解明を進めています。次節から、SPRING-8の放射光の特長を活かして観察手法や解析技術を改良し、4D-CTにより金属合金の凝固現象を時間分解・三次元その場観察した結果についてご紹介させていただきます。

3 4D-CTを用いたAl-Cu合金中の等軸 dendraitの凝固その場観察²⁾

TiB₂を含む微細化剤を添加したアルミニウム合金は等軸晶組織が得られやすいため、等軸晶形成のその場観察にしばしば用いられています。アルミニウム合金に関する研究をご紹介しますが、鉄鋼材料に共通する凝固現象に着目していると考えていただければ幸いです。Al-Ti-B合金を添加したAl-Si合金の凝固過程のX線透過イメージング^{3,5)}から、凝固過程において等軸晶の浮上・沈降が起きることが確認されています。凝固過程に固相の浮上・沈降がおきると、固相の成長による潜熱の放出や溶質の分配によって温度場や濃度場が影響を受けます。すなわち等軸晶組織の形成に固相の移動が寄与している可能性があります。また、沈降晶帯（沈殿晶帯）

のように等軸晶が移動して集積するとマクロ偏析が形成されることが古くから指摘されていますが、金属合金の凝固過程における固相の移動に関する知見はありません。4D-CTにより等軸 dendraitの凝固過程をその場観察することでバルク試料中の固相の移動を定量化できると期待されますが、固相の移動を動的に観察するには移動速度を十分に測定できる時間分解能と空間分解能が必要です。例えば固相の移動速度が数10 $\mu\text{m/s}$ 以上の場合にはボクセルサイズ (10 μm)³で1 rps以上の回転速度が要求されます。従来の4D-CTでは再構成像の質を確保するために試料の回転速度は0.25 rps程度が最大でしたが、等軸晶形成を動的に観察するには時間分解能を高める必要があり、そのトレードオフとして再構成像にノイズが顕在化すると予想されます。

著者の所属する研究室では、フェーズフィールドモデルを活用した画像フィルター (Phase field filtering, PFF) を開発し、凝固組織形成の原理に基づいてノイズを除去できる画像処理手法の構築を進めています。結果の一例²⁾をFig.1に示します。ここでは、SPRING-8のBL28B2の白色X線のうち30 keV以上のエネルギーをミラーによりカットした連続X線を2 rpsで回転している試料に照射して、180°回転で撮影した200枚の投影像を用いて再構成しています。すなわち時間分解0.5 sでの4D-CTによるその場観察を行なっています。Fig.1 (a) はAl-Ti-B合金を添加したAl-15mass% Cu合金の固相率0.35における再構成像です。ボクセルサイズは (6.5 μm)³です。明るい領域と暗い領域はそれぞれ固相と液相を表しています。固相の存在を確認することはできますが、固液界面のトレースは困難であり、固相の抽出や追跡はできません。そこでPFFにより再構成像の質の改善を図りました。固相率0.35を拘束条件にフェーズフィールド計算がその固相率に収束する過冷度を与えたところ、Fig.1 (b) に示す断面像が得

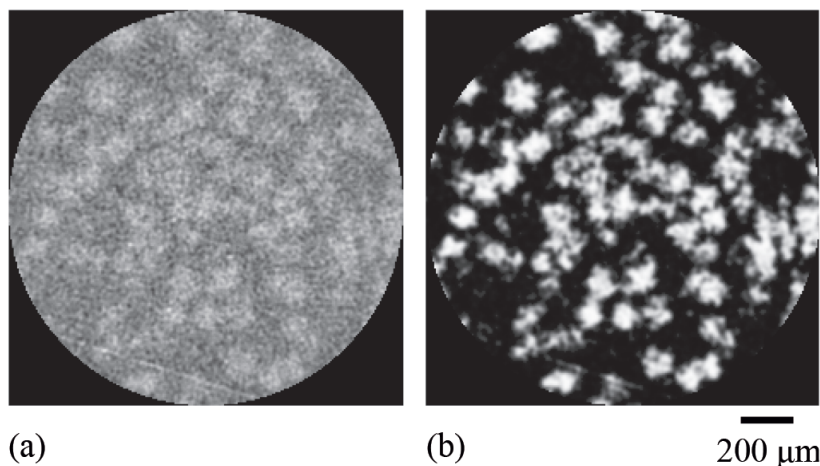


Fig.1 Reconstructed images of Al-15mass% Cu alloy at the solid fraction of 0.35; (a) raw data; (b) after PFF²⁾.

られました。ここで、液相と固相の秩序変数をそれぞれ0 (黒) と1 (白) と定義してグレースケールで表しています。2次アームまで判別可能な等軸 dendrait が獲得できていることがわかります。この結果を用いて秩序変数0.5を固液界面と定義して得られた固相の三次元像²⁾をFig.2に示しています。SPRING-8の高輝度の連続X線による4D-CTとPFFによる画像処理によって、0.5 s毎の等軸晶の核生成、成長、移動を評価できるようになりました。なおFig.2では、鉛直方向に1-2 K/mmの正の温度勾配が設けられており、液相から0.33 K/sの一定速度で冷却している過程を観察しています。固相の移動がない場合は、核生成の過冷度に先に到達する低温側の試料下部から高温側の試料上部に向かって進行波のように核生成と成長が起きて凝固が進行します³⁻⁵⁾。4D-CTによるその場観察から、固相粒子に浮力が働いて低温側の試料下部で核生成した等軸晶が浮上しながら成長し、高温側の試料上部から低温側の試料下部に向かって集積していることがわかりました。このような凝固現象はマクロな熱伝導のみを考慮したモデルでは再現できず、実際の casting プロセスで生じる

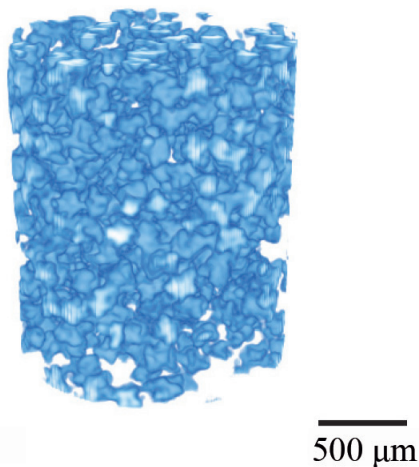


Fig.2 A 3D image of Al-15mass% Cu alloy after PFF at the solid fraction of 0.35²⁾. (Online version in color.)

重力や浮力による固相の移動が反映された凝固モデルが必要であることを示しています。なお、著者の所属する研究室のホームページ (<https://cast.mtl.kyoto-u.ac.jp/>) では観察結果の動画の一部がご覧いただけます。興味のある方はご参照ください。

時間分解0.5 s・ボクセルサイズ (6.5 μm)³⁾の4D-CTは高速撮影に分類されますが、急峻に温度が変化する casting プロセスや溶接・接合・付加製造などの溶融・凝固プロセスに即した条件でその場観察するには十分な時間分解能・空間分解能ではありません。関心のある現象に応じた条件でのその場観察と画像処理を行える汎用的なプラットフォームの構築が今後の課題です。

4 4D-CTと3DXRDを組み合わせた固液共存体の変形ダイナミクスの観察^{6,7)}

本節では、著者が注力している固液共存体の変形のその場観察についてご紹介させていただきます。高温の金属合金の固相と液相はそれぞれ粘弾性体力学と流体力学で記述されますが、固液共存域において固相と液相の混合体となった金属合金は粘弾性体力学や流体力学では記述できない特徴的な力学挙動を示します。そのため、固液共存域の金属合金を固液共存体と呼称しています。Fig.3は固液共存体の変形を表した模式図です。固液共存体をせん断変形すると、せん断方向にせん断応力が作用するだけではなく、せん断面の法線方向にも応力が作用します。その結果、固液共存体は膨張しようとしします。これは土質工学や地盤工学においてみかけの体積膨張 (Reynolds dilatancy) と呼ばれる現象と同一です。固液共存体の変形は凝固収縮や casting プロセスにおける外力 (重力や電磁気力) によって生じます。半溶融・半凝固 casting や遠心 casting に見られるバンド状偏析⁸⁻¹⁰⁾ は固液共存体の変形によって形成されるマクロ偏析の例です。みかけの体積膨張といっ

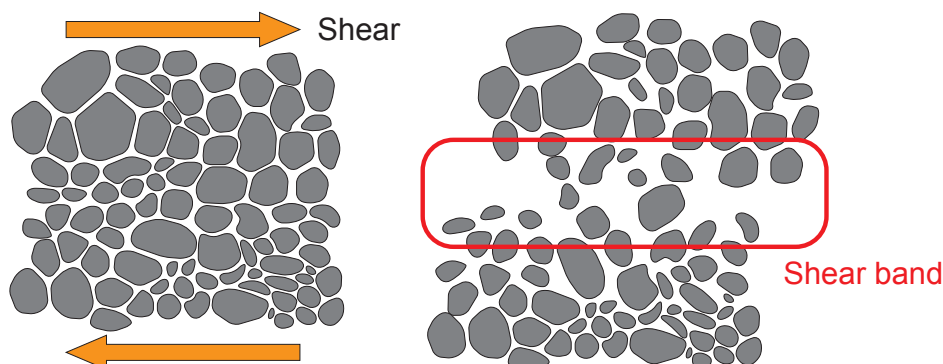


Fig.3 Schematic illustrations of semisolid deformation. (Online version in color.)

た固液共存体特有の現象とマクロ偏析の形成が関係していることがGourlayら⁸⁾によって明らかにされています。

固液共存体の変形を粒子スケールで考えると、固相粒子同士が物理的に接触して力が伝搬するとともに固相粒子間の斥力や摩擦力といった局所的な相互作用が働き、固相粒子が並進運動および回転することで固液共存体がマクロに変形します。その際、固相粒子は殆ど塑性変形しないので、「変形」と区別して固相粒子の「再配列 (rearrangement)」と呼びます。固相粒子の再配列によって固相粒子間の間隙が拡大した領域ができると、その領域のみかけ粘性抵抗が低下してさらに変形が集中し、せん断変形の局在化によってせん断帯 (shear band) が形成します。せん断帯に液相が供給されると凝固後の組織において偏析帯になり、液相が供給されなければ空隙 (ポロシティ) になります。しかし、固液共存体の変形機構の理解は限定的で、固相や液相の独立した運動が反映されている確立した物理モデルがないのが現状です。固相粒子の再配列、粒子間相互作用、液相の流体運動、固液間相互作用を組み込んだモデルは、粘弾性体力学や流体力学だけでは説明できなかった固液共存域における鑄造欠陥の形成機構に適用できる可能性があります。

固液共存体の変形における固相粒子の再配列を測定するため、4D-CTを用いた固液共存体の変形のその場観察が行われています。4D-CTの時間分解能と空間分解能により固相粒子の重心位置を追跡することで並進運動の定量解析が可能です。しかし、固相粒子の回転は固相粒子の形状から解析する必要があるため、固相粒子が塑性変形した場合は回転との切り分けが困難です。再配列の過程における固相粒子の結晶方位の変化が測定できれば、固相粒子の回転を形状の変化と独立して解析することができます。

バルク試料内部の結晶方位解析に三次元X線回折 (3DXRD) があります。3DXRDはPoulsenらが開発したX線回折を用いた多結晶組織の三次元観察手法です。X線CTと同じセットアップを用いて5-10 μm に絞った水平ビームを走査して試料の回折像を2次元検出器で撮影します。検出された回折スポットの形状と位置を実空間の固相粒子に個別に対応させることで、実空間上の多結晶組織に対して結晶方位を三次元マッピングします。3DXRDの原理はPoulsenの著書¹¹⁾にまとめられています。水平ビームを走査する3DXRDは関心領域全体にX線を照射する4D-CTよりも長い撮影時間が必要です。そこで著者らは3DXRDに4D-CTを援用して撮影時間を短縮した測定手法を構築しています^{6,7)}。具体的には、固液共存体の固相粒子の粒子径が100 μm 程度であることから、100 μm に絞った水平ビームを用いて3DXRD測定を行うことで測定時間を短縮します。そのトレードオフとして空間分解能が低下するため、回折スポットから三次元像を再構築す

ることが困難になります。そこで、4D-CTにより得られた再構成像を利用して固相粒子の三次元配置を決定し、3DXRDにより得られた回折スポットをそれぞれの固相粒子に対応させることで固相粒子の三次元方位マッピングを獲得します。Fig.4には一例として本手法で測定したAl-10mass% Cu合金の固液共存体中の固相粒子の三次元方位マッピング^{6,7)}を示しています。Fig.4では方位解析を検証するため樹枝状で比較的大きな粒子の観察をおこなっていますが、現在は粒径100-200 μm 程度の粒状品の観察も実現しており固液共存体の変形における固相粒子の再配列の定量解析が可能になりつつあります。4D-CTや3DXRDなどのX線イメージングにより組織スケールで固液共存体の変形ダイナミクスを理解し、マクロスケールの欠陥形成の描像を明らかにすることで、実証データに基づいた普遍性のある組織形成モデルの確立を目指しています。

実際の鑄片スケールでのマクロ偏析を再現するモデルに、固相粒子の再配列を陽に解かず固相粒子と液相の運動を平均したマクロスケールを用いた体積平均モデルがあります。離散的に振る舞う固相粒子の再配列を平均するマクロスケールのモデルを確立するには、一見すると無秩序に見える固相粒子の再配列に法則性を見出し、連続体として近似的に取り扱う操作が必要です。そのためには固相粒子の再配列の統計的なデータが必要であることから、スケールアップした試料の観察に向けて装置や観察手法の改良を進めています。Fig.4に含まれる固相粒子が50個程度であるのに対して、現在では 10^4 個オーダー程度の固相粒子の再配列の観察を実現しています。試料のスケールアップにより情報量が増大したことで、再構成したrawデータの段階でデータ容量が数テラバイトになっており、大容量データの処理方法や解析手法が今後の課題です。4D-CTと3DXRDを組み合わせた測定手法は高速化を図っていますが、直径2 mm、長さ3 mm程度の試料の1回の測定シーケンスに300 s程度を要します。つまり、固液

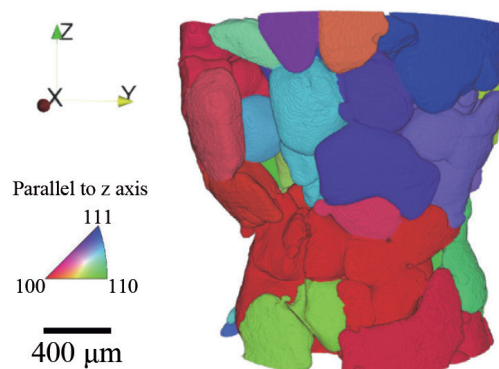


Fig.4 3D orientation map of solid grains in an Al-10mass% Cu alloy at the solid fraction of 0.78^{6,7)}. (Online version in color.)

共存体の変形を 300 s 毎に逐次的に観察しています。固液共存体の変形過程の動的な観察が今後の課題です。本節に関する研究テーマを選択した学生らと共に、観察装置や大容量データを前に日々頭を悩ませながら装置や解析手法の改良を進めています。

5 おわりに

著者は 2019 年 4 月より京都大学材料工学専攻 安田秀幸教授の研究室に助教として着任し、X 線イメージングその場観察に基づいた凝固現象の体系化を推し進めています。凝固後に観察される組織を合理的に説明できるモデルや組織予測シミュレーションが凝固・結晶成長の基盤原理に寄与してきたことは明白です。しかし、凝固組織を説明できる凝固過程が複数あることは珍しくなく、実際にどのような過程を経て形成された組織かと問われて、科学的根拠のある答えを示すことは簡単ではありません。今後、凝固・結晶成長を追究するには、現実を選択される組織形成の過程を明らかにし、実証データに立脚した科学的基盤の確立に取り組む必要があると考えています。「その場観察を行う意義はあるのか？」と反芻しながら研究を進めておりますが、いざ SPring-8 で測定したデータを解析してみると、従来の議論で整理できてしまうことも度々あります。先行研究の優れた洞察に感銘するとともに、著者の未熟さを思い知らされています。今後ともご指導・ご鞭撻を頂ければ幸いです。

著者は、学部 4 年生は東京大学マテリアル工学科 月橋文孝教授（現：東京大学名誉教授）・松浦宏行講師（現：東京大学マテリアル工学専攻 准教授）、大学院進学後は東京大学生産技術研究所 森田一樹教授（現：東京大学マテリアル工学専攻教授）・吉川健准教授のご指導のもと、主に高温融体と固相間の相平衡や固液界面カイネティクス、液相成長に関する研究を行ってきました。今後、X 線イメージング技術を活用し、精錬反応から凝固・組織形成に渡る研究にも展開できればと考えています。

本稿でご紹介させていただいた研究内容に関して、観察手法やデータ解析の問題点や改良点に関して適確なご指摘を頂いた SPring-8 のビームライン担当者の皆様に厚く御礼申し上げます。また、4 節の研究に対して日本鉄鋼協会「凝固過程の偏析・欠陥の 3D/4D 解析」研究会（主査：九州大学 宮原広郁教授）の委員の皆様よりご助言を頂いております。深く感謝申し上げます。

現在、鉄鋼材料のその場観察も進めており、オーステナイト系ステンレス鋼や高マンガン鋼の凝固および δ - γ 変態による γ 相の組織形成過程のその場観察や、X 線イメージングを用いた相変態の体積収縮率および冷却過程の線膨張係数の

汎用的な測定手法の開発に着手しています。また、日本鉄鋼協会「凝固過程の介在物生成・成長・変性」研究会（主査：東京大学 松浦宏行准教授）に参加させていただいております。鉄鋼材料のその場観察については、改めてご紹介させていただければ幸いです。

最後になりますが、本稿でご紹介させていただいた研究内容は安田秀幸教授ならびに研究室のスタッフ・学生の皆様のご協力により実現しています。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 戸田裕之：X 線 CT－産業・理工学でのトモグラフィー実践活用－，共立出版，(2019)。
- 2) 鳴海大翔，河原崎琢也，加藤勇一，森下浩平，安田秀幸：軽金属，70 (2020)，339，<https://doi.org/10.2464/jilm.70.339>
- 3) A. Prasad, S. D. McDonald, H. Yasuda, K. Nogita and D. H. StJohn : J. Cryst. Growth, 430 (2015)，122，<https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.06.024>
- 4) A. Prasad, E. Liotti, S. D. McDonald, K. Nogita, H. Yasuda, P. S. Grant and D. H. Stjohn : IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 84 (2015) 012014，<https://doi.org/10.1088/1757-899X/84/1/012014>
- 5) 安田秀幸，野北和宏：軽金属，71 (2021)，22，<https://doi.org/10.2464/jilm.71.22>
- 6) T. Narumi, T. Nakata and H. Yasuda : IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 861 (2020)，012065，<https://doi.org/10.1088/1757-899X/861/1/012065>
- 7) T. Narumi, T. Nakata, R. Kobayashi and H. Yasuda : ISIJ Int., 61 (2021)，1567，<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-650>
- 8) C. M. Gourlay and A. K. Dahle : Nature, 445 (2007)，70，<https://doi.org/10.1038/nature05426>
- 9) C. M. Gourlay, B. Meylan and A. K. Dahle : Acta Mater., 56 (2008)，3403，<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.03.020>
- 10) 姜一求，大中逸雄：鑄造工学，69 (1997)，119，<https://doi.org/10.11279/jfes.69.119>
- 11) H. Poulsen : Three-Dimensional X-Ray Diffraction Microscopy, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, (2004)。

(2022 年 1 月 20 日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

北海道大学 大学院工学研究院 教授

大野 宗一

放 射光X線イメージングによる凝固組織のその場観察結果を初めて見たときのことはとても印象深く覚えています。そのようなことができるのかと驚き、続いてその成果の新奇さに驚嘆しました。その後、今に至るまで何度も驚かされていますが、鳴海先生はこの最先端技術を駆使し、高温プロセス分野で嶄然として頭角を現している気鋭の若手研究者です。

铸塊の品質向上のためには凝固中の組織形成を理解することが必要です。ただし、凝固終了後の組織を“解剖”する従来のやり方では、このマルチフィジックス現象の全容解明はとても困難でした。放射光X線イメージングによるその場観察はその状況を打開する強力な手段となっています。その場観察は従来の薄膜試料の観察から大きく進歩し、4D-CTによるバルク中の組織観察や3DXRDによる方位解析まで可能になり、凝固科学がいよいよ加速度的に発展するという期待が膨らんでいます。鳴海先生はこの技術を速やかに体得し、観察結果と丁寧かつ真摯に向き合い、まさに記事に書かれているとおり“実証データに基づいた普遍性のある組織形成モデルの確立”を追究されています。鳴海先生の記事には、この“実証”という言葉が数回現れています。凝固科学において何かを実証することは通常容易なことではありませんが、それを可能とする高度な技術を巧みに操って活躍している研究者の意気込みを感じます。すでにこの分野で存在感を放っていますが、実証に基づいた重厚感ある研究成果をさらに積み重ねて凝固科学の分野を牽引する方になっていただければと、先生の研究活動を心から応援しています。特に、組織形成に対する私たちの理解を刷新するような、その場観察ならではの想定外で貴重な発見を大変楽しみにしております。

最後に話は変わりますが、今思い返してみると、私が鳴海先生くらいの年齢のとき、鉄鋼協会のヤングサイエントリストフォーラムで、分野が少し違う同世代の方々と一緒に過ごす機会に恵まれました。今では各分野の第一線で活躍する方々ばかりですが、当時は博士号を取ってからそう月日も経っていない頃でしたので、互いに肩の力を抜いて接し、少なくとも私はその出会いから大きな影響を受けてきたと思います。先輩からのエールや後輩からの刺激も大変貴重なものですが、同世代の研究者からの影響や切磋琢磨には格別なものがあります。鳴海先生にも既にそのような方々がおられるかもしれませんが、今後もそのような出合いを大切にして、益々活躍されることをお祈りします。

鳴海大翔先生とは、「凝固過程の偏析・欠陥の3D/4D解析」研究会および「凝固過程の介在物生成・成長・変性機構」研究会でご一緒しており、そのご縁で今回エール記事を書く機会を頂きました。初めてお会いしたのは2019年だったと思いますが、博士課程を修了してからあまり時間が経っていない頃で初々しく、またSPRING-8における実験の様子をお聞きして非常に真面目な方という印象を持ちました。若い先生が鉄鋼材料の凝固研究に取り組みられることを本当に嬉しく感じています。

日鉄ステンレス(株) 研究センター シニアフェロー

福元 成雄

鳴 海大翔先生とは、「凝固過程の偏析・欠陥の3D/4D解析」研究会および「凝固過程の介在物生成・成長・変性機構」研究会でご一緒しており、そのご縁で今回エール記事を書く機会を頂きました。初めてお会いしたのは2019年だったと思いますが、博士課程を修了してからあまり時間が経っていない頃で初々しく、またSPRING-8における実験の様子をお聞きして非常に真面目な方という印象を持ちました。若い先生が鉄鋼材料の凝固研究に取り組みられることを本当に嬉しく感じています。

“論より証拠”、“百聞は一見に如かず”ということわざがありますが、1980年代までの凝固・結晶成長の理論構築においてもその場観察は重要な役割を果たしました。透明有機物を用いた精密な可視化実験は数値解析と共にデンドライト成長の安定条件の解明に大きく貢献したと考えられます。また、近年の京都大学・安田秀幸先生のグループのご研究では、炭素鋼およびステンレス鋼においてマッシュ的変態により γ 相が生成することをX線イメージングその場観察で明らかにされ、可視化実験の新たな可能性を示されました。

今回ご紹介頂いた等軸デンドライトの凝固と固液共存体の変形はマクロ偏析などの铸造欠陥の発生挙動を推定

する上で重要な要素となります。マクロ偏析は製品の品質や製造性に大きな影響を及ぼし、後工程での改善が困難なために铸造工程での制御が極めて重要であり、従来から凝固組織制御や軽圧下などの技術開発が進められています。マクロ偏析は凝固時のミクロ組織形態やサイズの影響を大きく受けることが知られていますが、凝固組織のブリッジングや凝固収縮流が関与する複雑な現象で定量化するのは極めて難しい問題と考えられます。今回の内容でも4D-CTの観察や解析における手法の開発でご苦労されたことが述べられていますが、微細な凝固組織サイズの現象を正確に把握する上で重要な鍵になるでしょう。また現象の証明や理解にとどまらず、精緻な実験と解析を駆使されて固液共存体の変形における固相粒子の再配列をモデル化されることには大いに期待しています。組織写真を基に議論する我々技術者にとっても想像力を掻き立てるデータや指針になるでしょう。新しい取り組みで大きなチャレンジですが、固液共存体の物理モデル構築は更なる工業的な铸造欠陥の低減に繋がっていくはずです。

最後になりますが、鳴海先生の益々のご活躍を心から祈念します。