

日本MRS ニュース

|||||| やあ こんにちは |||

“学生に科学を...”



いしがき たかまさ
石垣 隆正 氏

いしがき たかまさ
法政大学生命科学部 環境応用化学科・教授 石垣 隆正

筆者は、2009年に、つくばにある物質・材料研究機構から、法政大学に移りました。今年度いっぱい定年ですが、今感じていることを書き連ねた拙文にお付き合いください。

研究所から大学に移り、研究所時代忘れていたことを実感しました。大多数の学生は科学を生業とするために勉強しているわけではないことです。典型例を示します。毎年やってくる卒論の仕上げの季節、添削作業を行って心に引かなかったことがありました。卒論の最後のページは謝辞ですが、感謝の対象には教員も含まれますので、ここに手を加えるつもりもなく読んでいました。多数の学生が先輩の書きっぷりにならって同じように書いています。気になったのは、私に対して『研究の進め方、装置の操作方法、プレゼンテーション技法など、様々なご助言とご指導を頂きました。』というところです。確かにゼミで学生のプレゼンテーションにコメントをしていますが、私は技法を教えているつもりはありません。操作方法と技法を教えてもらったことだけに感謝されているのかという気持ちにもなりました。

気を取り直して考え直しました。操作方法、プレゼンテーション技法という用語は、最近よく使われるスキルアップに対応した用語だと思えます。“スキルアップのために勉強したい”という表現がよく使われます。さらに思いつくことがあります。近年、コミュニケーション能力の有無や優劣が、人物評価の中で重要視されるようになりました。企業の人事担当者も、コミュニケーション能力という語を口にする人が多いと思えます。このコミュニケーション能力が、饒舌で自らの優秀性や正当性を主張することであれば、スキルアップは重要なものかもしれません。したがって卒論の謝辞における学生の記述に結びつくのかと、納得しました。

当然のことですが、科学においては会話だけがコミュニケーションツールではありません。科学的思考を表現するためには、数式、化学反応式、実験結果の表現が重要ですし、その表現の根底には科学的論理の積み重ねがあります。先頃、私は、その謝辞で、“研究の進め方”の次に“まとめ方”という言葉を入れて、方法、技法という言葉を除くという余計なお世話をしました。

大学に籍を置き、研究環境はだいぶ変化しました。幸い、マイクロ・ナノテクノロジー研究センターという理系三学部の電気・機械・バイオ・化学を専門とする教員が構成員であり、学際的な研究を行う研究センターに加わる機会を得ました。当研究センターは、文部科学省の「私立大学学術研究高度化推進事業」ハイテク・リサーチ・センター整備事業に採択されたのを受けて、2003年度に設立されました。2003年度から5年間のハイテク・リサーチ・センター整備事業に続き、2008年度からは、文部科学省の「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」に採択された「マイクロ・ナノテクノロジーによる細胞内部操作技術と生体機能模擬技術の開発」により5年間の研究プロジェクトを遂行しました。私は、この2番目のプログラムの2年目から加わりました。

2013年度に「グリーンテクノロジーを支える次世代エネルギー変換システム」をテーマとした研究が、前プロジェクト同様、「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」により採択され、2017年度まで遂行しました。この後、文科省の同様の事業が消滅しましたので、研究センターのプロジェクトが学内予算によるものになり、2018年度より学内研究プロジェクト、「グリーンソサエティーを実現する3D先端材料プロセス」を4年間遂行し、2022年度から「ポストコロナの持続可能な社会実現に資する3D先端材料プロセス」が進行中です（3Dは3次元と読み換えてください）。

異なった内容に見える2つの話題について書いてきました。後者の研究センターに関しては、私は、グリーンテクノロジープロジェクトが開始した2013年度からセンター長を仰せつかり、2023年度まで努めました。当研究センターは、センター構成員全体で行う学際的なプログラム運営を特徴としていますので、この継続は重要であると考えます。前者に関しては、この拙文のタイトルである“学生に科学を...”がすべてです。科学を生業とすることを目的としているだけでなく、たとえ、学生がスキルアップ指向であろうとも、学生には科学することを体験して大学を巣立ってほしいと思います。科学的思考を経験した人材の広がりなしには、当研究センターの進行プログラムでもめざしている“持続可能な社会実現”はおぼつかないと思えます。

目次

- 01 やあ こんにちは
“学生に科学を...”
石垣 隆正
- 02 研究所紹介
熊本大学 半導体・
デジタル研究教育機構
半導体部門 基礎分野長
野口 祐二
- 04 研究トピックス
ブラックコヒーレント
X線回折イメージング法
によるナノ結晶非破壊
3次元イメージング
大和田 謙二
- 07 追悼 堂山 昌男 先生
日本 MRS 元会長
高井 治
- 08 ご案内
- 10 To the Overseas
Members of MRS-J
- 10 編集後記

■研究所紹介

熊本大学 半導体デジタル研究教育機構紹介 —半導体エコシステムの形成へ向けて—

熊本大学 半導体・デジタル研究教育機構 半導体部門 基礎分野長 のぐち ゆうじ 野口 祐二

TSMC の進出に伴い、熊本大学では半導体やデジタルに強い人材の育成を本格化させている。また、国と県からの支援を受けて、本学は三次元構造をもつ半導体デバイスの開発プロジェクトを推進している。本稿では、当機構および所属教員の研究内容について紹介する。

1. 機構の構成

本機構は「デジタル化を牽引するイノベーション人材の育成」および地域における喫緊の課題である「半導体人材育成」に対応するため、総合情報統括センター、教授システム学研究センターおよび先端科学研究部附属半導体研究教育センターに分散していた研究者を集約し、7名の新規教員を採用して、令和5年4月に設置された。

本機構は二つの部門から構成される(図1)。半導体部門では、基礎研究からシステム応用および次世代に向けた先端研究までを網羅する研究開発プロジェクトを推進している。総合情報学部門は、AI・データサイエンスの基盤となる数理的研究を、教育・社会学、経済金融、医療、理工農等へ幅広く応用するための文理横断型研究を展開している。

半導体部門は、基礎分野(新規教員1名)、応用分野(新規教員4名)および先端分野(新規教員2名)から構成される。加えて、半導体プロセス評価共同研究分野には2名の特任教授が所属している。また、クロスアポイントメント制度を利用して他の大学・研究機関・企業から5名の教員を雇用している。総合情報学部門は、データサイエンス分野、コンピュータサイエンス分野および教授システム学分野から構成される。

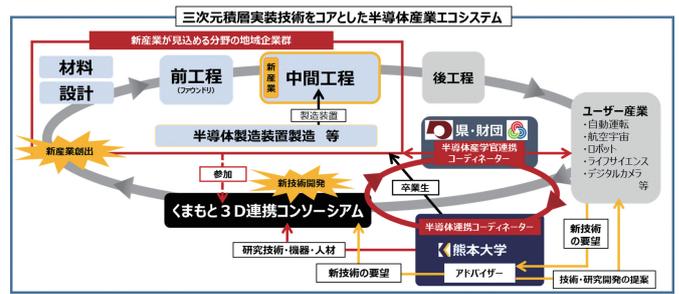


図2 三次元積層実装技術をコアとした半導体産業エコシステム

3. 研究紹介 1

— 三次元積層半導体デバイス向け実装技術開発 —

半導体集積回路(IC: Integrated Circuit, LSI: Large Scale Integration)では、プロセスノードの微細化に加えて、銅配線技術導入による金属配線の低抵抗化や、CMP (Chemical Mechanical Polishing) による多層配線技術を駆使することで、低消費電力化・動作速度の高速化を両立させているだけでなく、回路面積の小型化により製造費用を引き下げている。

近年、AI用やデータセンター用半導体の需要が急速に高まっている。とりわけ通信にかかる消費電力の削減が急務となっている。しかし、従来のプロセスノード微細化による低消費電力化は限界に達しつつある。半導体を積層することで、低消費電力化を試みる研究開発が世界規模で実施されている。例えば、高性能計算向けの汎用GPU (Graphics Processing Units) の並列処理能力は、内蔵メモリ (DRAM: Dynamic Random Access Memory) との通信性能に大きく依存するため、HBM (High Bandwidth Memory) と呼ばれる積層構造のメモリチップを縦方向の伝送線路で接続している。このような既存の積層技術は、メモリのような単一の回路のみを対象としており、異種チップの混載については手つかずとなっている。

本機構では、青柳昌宏卓越教授を中心に、メモリだけでなく制御用の論理回路や信号処理を行うアナログ回路やセンサ回路など、異なる機能を持つLSIチップを自由に組み合わせて積層することで、既存技術では達成できない低消費電力化と高機能化の両立を目指す技術研究開発を行っている(図3)。通信距離の縮小と超並列バスの形成および異種チップの集積化により、プロセスノード縮小以外の手法により低消費電力化と高機能化の実現を目指している。

半導体・デジタル研究教育機構

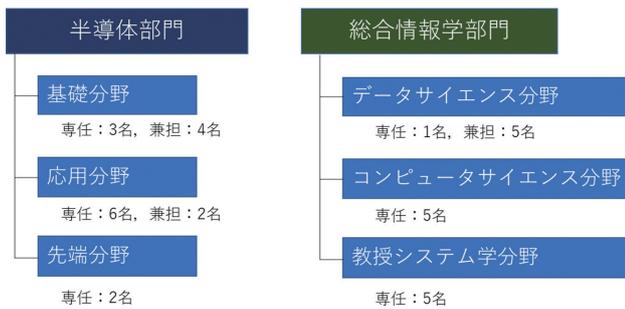


図1 熊本大学 半導体・デジタル研究教育機構の組織図

2. 内閣府地方大学・地域産業創生交付金事業

熊本県と熊本大学が申請した半導体関連プロジェクト(図2)が採択され、令和5年度からスタートした。現在の平面構造をもつ半導体を三次元化する積層実装産業(中間工程)を確立することで、既存の前工程や装置製造産業の優位性を生かして、設計分野を牽引するだけでなく、新産業を創出する。また、熊本周辺に半導体関連企業が集積している強みを生かして、産官学が連携する「くまもと3D連携コンソーシアム」を中心に、事業成果を県内外のユーザー産業へ展開し、研究成果をビジネスに結び付けるエコシステムの形成も目指している。

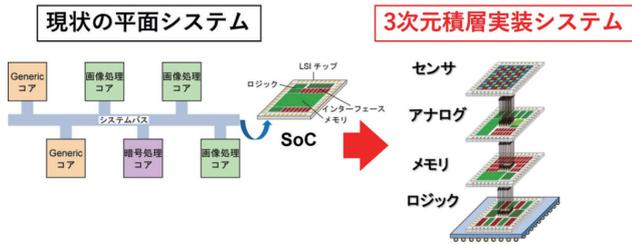


図3 三次元積層実装システム例

極小ピッチかつ高アスペクト比を実現する Through Silicon Via 加工技術（チップに小さな穴を開けて上下のチップを電極で接続する技術）や複合素材を用いた機械・熱応力耐性を持つ電極材料の研究に加えて、熱収縮や変形によるチップ間信号配線の電気特性変動評価（図4）により、材料・物性・システム等の複数視点から研究を行い、自由度のある三次元積層半導体デバイスの実現に向けた実装技術研究を行っている。

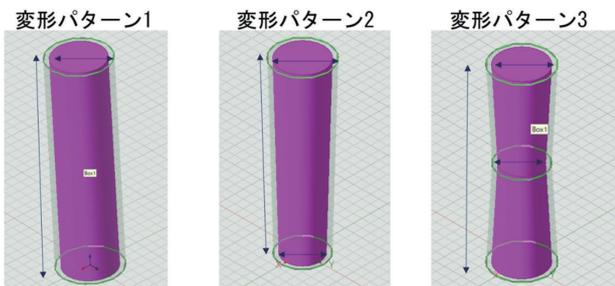


図4 作製過程における形状変化を考慮した積層チップ間信号配線の電気特性評価例

4. 研究紹介 2

一二次イオン質量分析装置による半導体デバイス分析一

二次イオン質量分析装置（SIMS）は、固体材料の表面分析手法としては最も感度が高い。微量（ppm～ppb）の不純物を検出できるだけでなく、nmスケールでの深さ方向分析や、 μm オーダーでの3次元マッピング（同位体を含む）が可能である。AMETEK製のSIMS（IMS 7f-Auto）は国内に7台のみ納入され、大学では本学にのみ設置されている（図5）。2017年度から運用を開始し、2023年度迄の利用者数は学外22団体、学内12研究室（半導体関連の占有率：学外68%、学内83%）、平均稼働率10日/月である。熊本県と熊本大学の申請により、前述の地域産業創生プロジェクトに採択され、当該装置の需要は益々高まってきている。

具体的には積層した半導体チップの深さ方向分析により、蓄熱によって化合物形成に寄与する元素、信号不良の要因となる元素、亀裂の要因となる元素等を特定することに活用されている。これまでの測定事例、利用料、利用形態、技術相談等の情報は以下<http://www.hashishin-lab.jp/content/files/SIMS/D-SIMS_vol2.pdf>を参照されたい。

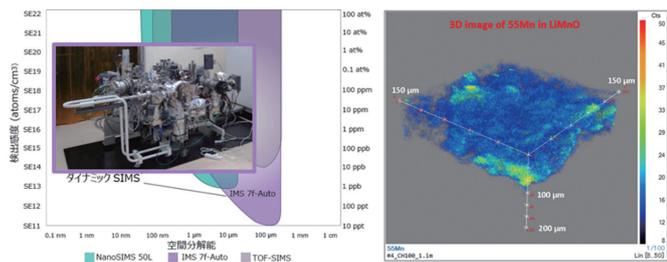


図5 SIMS（IMS 7f-Auto、AMETEK製）の外観および分析例

研究紹介 3

一フェリ誘電体を用いたセラミックスキャパシタの開発一

電子機器において、半導体と積層セラミックスキャパシタ（MLCC）は一体となって搭載されている。最近のスマートフォンには1千個、電気自動車には5千個のMLCCが使われている。MLCCの誘電相には強誘電体であるチタン酸バリウム（ BaTiO_3 ）のセラミックスが使われている。誘電体層を「より薄く」「より小さく」「より正確に」製造することで、体積当たりの容量を極限まで上げている。しかし、 BaTiO_3 セラミックは、DCバイアスで電場（ E ）下で誘電率が大きく減少するという課題を抱えている。このため、今後の市場ニーズを満たすには、新しい誘電体材料の開発などのパラダイムシフトが必要であることが、業界の共通認識になっている。

我々が世界に先駆けて発見したフェリ誘電体は、 BaTiO_3 を凌駕する誘電特性を示す（図6）。 BaTiO_3 セラミックは、自発分極（ P_s ）と垂直方向に大きな比誘電率（ $\epsilon_r \approx 3,000-4,000$ ）を示す。一方、 P_s と並行方向の ϵ_r は非常に小さい（300-400）。 E が大きくなると P_s が回転して、 $E//P_s$ のドメインの体積割合が大きくなり、マクロな ϵ_r は大きく減少する。

我々が開発したビスマス系フェリ誘電体は、up・downの双極子モーメントを持ち、その差に相当する P_s は小さい。低 E 領域において、フェリ誘電相の ϵ_r （ $\approx 4,000$ ）が使える。 E が20-30 kV/cmを超えると、up・downがup・upに変化し、強誘電相が誘起される。その最大の特徴は、誘起された強誘電相の ϵ_r が2,000-3,000と極めて大きいことである。このフェリ誘電体の誘電特性を利用することで、 BaTiO_3 が抱える課題が克服され、革新的なMLCCが開発されることが期待される。

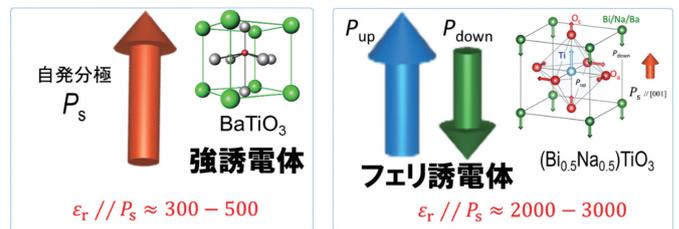


図6 強誘電体とフェリ誘電体の特徴とその比誘電率（ ϵ_r ）

おわりに

TSMCの熊本工場は、今年中に稼働する。加えて、TSMC第二工場も熊本に建設されることが決まり、日本政府は総額で最大1.2兆円を補助することを決めている。半導体で沸いている熊本の本学に半導体デジタル研究教育機構が設置され、研究体制は整いつつある。また、工学部に半導体デバイス工学課程が設置され、今年度の4月に新入生を迎えている。国と県の支援を受けて様々なプロジェクトを推進している本機構のミッションは、熊本ならではの半導体産業の創出と高度人材の育成である。近い将来、我々に問われるのは、次のフェーズまでに、どのような成果を挙げたかであろう。本機構の構成員の我々は、研究教育に邁進し日々ベストを尽くすしかない。

■ 連絡先



熊本大学 半導体・デジタル研究教育機構 教授
野口 祐二
〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪2丁目39-1
熊本大学 黒髪南キャンパス
総合研究棟 9階 911室
ynoguchi@cs.kumamoto-u.ac.jp

■ 研究トピックス

ブラッグコヒーレント X 線回折イメージング法による
ナノ結晶非破壊 3 次元イメージング

量子科学技術研究開発機構 関西量子科学研究所 放射光科学研究センター おおだ けんじ 大和田 謙二

1. はじめに

この場をお借りし、ナノ結晶を非破壊で3次元可視化する技術—放射光コヒーレント X 線を用いた「ブラッグコヒーレント X 線回折イメージング (Bragg coherent X-ray diffraction imaging, Bragg-CDI) 法」を紹介させていただきます。

放射光は加速器から発せられる指向性の強い電磁波で、兵庫県西播磨にある大型放射光施設 SPring-8 (スプリングエイト) では硬 X 線が利用可能です。放射光硬 X 線を用いた粉末 X 線構造解析は実際に利用される先生方も多いことと思います。次に「コヒーレント」の意味合いについて紹介します。カオス光源である蓄積リング型光源の場合、小さな発光点 (光源) からの光を遠方で見れば波面の揃った領域が実用可能なサイズになります。我々はこの波面のそろった領域をうまく切り出して「コヒーレント」な X 線を実現し、利用しています。切り出す操作は光子数の減少につながりますが、強い指向性のおかげで“実用可能な光子数”が得られます。現状では高々 0.1% 程度とされています。「なーんだ」と思われる方もいらっしゃるかもしれませんが、硬 X 線領域で可干渉な光を利用できることがそもそも画期的なことであり、SPring-8 をはじめとする世界の先端放射光源で 20 年近くコヒーレント X 線利用法の研究開発が進められてきました。我々もその流れの中で、物質科学に資することを念頭に置き、かれこれ 20 年近くコヒーレント X 線利用研究を行ってまいりました。

2. サイズ効果

我々は誘電体などに見られるサイズ効果^[1-5]に興味を持っています。同一環境下では定数であるはずの物性値に試料サイズ依存性が見られることがあり、サイズ効果と呼ばれています。図 1 に示すように、強誘電体チタン酸バリウム (BaTiO₃) ナノ結晶においてはその誘電物性にサイズ依存性が見られ、さらには、試料の作成者ごとに性質のばらつきが出る^[4,5]など、その起源について古くから議論がなされてきました。

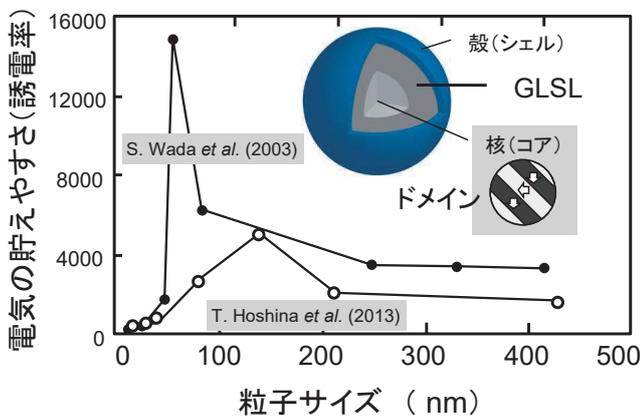


図 1 BaTiO₃ の誘電率の粒子サイズ依存性

従来の X 線構造解析で得られる平均情報としての原子位置や温度因子のみでは不十分であり、ナノ結晶一粒における nm~ μ m に及ぶ大域構造、つまり、サイズや粒子形状、内部の構造 (ひずみやドメイン、欠陥等)、焼結粒子の場合はその粒界の効果、を知り、そのうえで物性と対応させることが重要と考えられます。ナノ結晶一粒を可視化する技術として我々は Bragg-CDI 法 [6, 7] に注目しました。Bragg-CDI 法は原子のならびに敏感なブラッグ回折を利用したイメージング法であり、ひずみを感度良く検出できます。2018 年度から導入を開始し、2022 年度には文部科学省マテリアルリサーチインフラ (ARIM) 事業の下で共用化を達成しました。

本稿では我々が開発を行ってきた Bragg-CDI 法の BaTiO₃ ナノ結晶等への適用状況^[8-13]について紹介し、高度化を含む今後の展望について紹介します。X 線を用いるメリットは、非破壊でその場計測が可能であるという点が挙げられますので、その場計測やオペランド計測を志向した試料環境の整備状況についても併せて紹介します。

3. ブラッグコヒーレント X 線回折イメージング (Bragg-CDI) 法

量子科学技術研究開発機構 (QST) は SPring-8 のビームライン BL22XU に Bragg-CDI が実施可能な専用装置を設置しました^[8]。CDI 法は平面波 (コヒーレント X 線) を試料に照射して得られる独特のコヒーレント X 線回折パターンを丁寧に収集し、位相回復計算を行うことで試料像を得る手法です。試料から出てくる回折波動場の振幅と位相を計測できれば、そのフーリエ変換が試料像となります。平面波照明はこのフーリエ像が試料像である事を担保します。ところが、我々が実際の計測で得ることが出来るのは回折波動場の振幅の二乗、いわゆる回折強度のみであり、回折波動場の位相情報は失われています。そこで計算によって位相を回復させるわけです。計測や計算には気を付けるべきポイントがいくつかありますが、ここでは割愛いたします。参考文献をご参照ください。

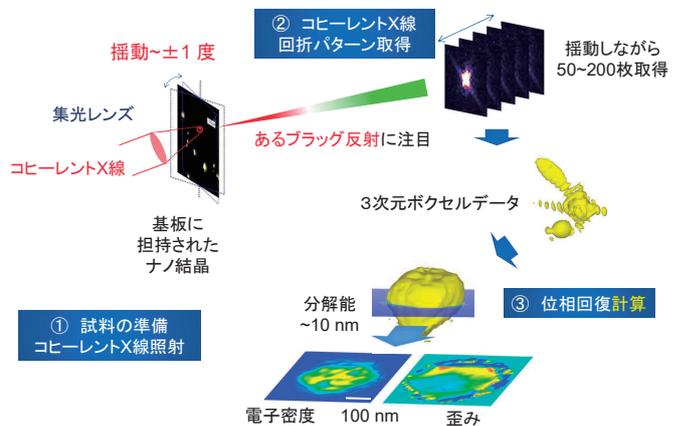


図 2 Bragg-CDI 法の流れ

CDIには小角散乱ベースのCDIとブラック回折ベースのCDIがあり、後者を特にBagg-CDIと呼びます。前者が密度コントラストに由来するイメージングであるのに対し、後者は先にも述べましたが原子の並びに由来するイメージングです。Bragg-CDI法においては電子密度に相当する散乱振幅情報だけではなく原子位置の平均位置からのずれ(ひずみ)に相当する位相情報が得られ、結晶の非一様性を議論することが可能です。3次元像を得るうえで透過型を基本とする手法は180度試料を回転させることが求められますが、回折に注目するBragg-CDI法では結晶角を数度回転させれば3次元情報を容易に得ることができ、この点が、測定窓が限られ試料の動きに大きく制限のかかるその場計測に大変有利に働きます。

図2に実験から実像を得るまでの流れを示します。①X線の波面を乱さない窒化シリコン薄膜基板に結晶を分散持し、実験装置に搭載します。放射光源から得られるコヒーレントX線(8 keV、波長0.1549 nm)を2 μ m程度まで集光し結晶に照射します。②結晶からの回折線を、光子計数型2次元X線検出器などを用いて、結晶を ± 1 度程度揺動させて取得します。得られたデータを3次元ボクセルデータ化します。③位相回復計算を実施し、結晶の3次元実像を得ます。この際、散乱振幅(電子密度に相当)と位相(ひずみに相当)が得られます。

Bragg-CDI法は米国の放射光施設(Advanced Photon Source: APS)や欧州の放射光施設(European Synchrotron Radiation Facility: ESRF)にて開発が進められ、主に触媒や半導体分野で利用がなされてきています^[6,7]が、国内で実施できる施設はこれまでに存在しておりませんでした。

4. MEMS ヒーティングシステム

ここでは温度変化装置について紹介します。非一様な構造が材料特性に及ぼす影響を調べるには、その場計測、つまり試料環境を変化させてその構造変化を調べることが極めて有効です。QSTにおけるBragg-CDI法の場合、2 μ mの集光X線を100 nmレベルの結晶に照射するため、温度などの試料環境を変化させたときに発生するドリフトは計測試料を見失うことにつながり致命的となります。これまでに放射光X線計測で用いられてきた加熱ステージではドリフトが大きく不十分であるため、我々は電子顕微鏡分野で利用されているMEMSヒーティングシステムを放射光X線回折実験用に変更し導入しました(NHB-5100, NORCADA Inc.)^[10]。当ヒーターは窒化シリコン薄膜基板にパターンニングされたヒーターが中心部200 μ mぐらいの領域を局所的に加熱するもので、真空環境であれば室温から1100 $^{\circ}$ Cまで制御が可能です。応答性も非常によく、目的の温度へ迅速(1秒以内)に到達します。遠隔操作が可能であり温度変化の自動計測が可能です。我々のBaTiO₃を用いた実験では室温から120 $^{\circ}$ Cの相転移を経て300 $^{\circ}$ C程度までの計測において、注目する試料を見失うことなく追跡することが出来ました。ドリフトは、仕様上は10 nm/hr以下となっていますが、結晶は基板に載せているだけであり、相転移や熱膨張で結晶自身が動くため、Bragg-CDI計測環境下における正確なドリフト量の見積もりは困難です。

5. 孤立一粒子のイメージング

ここでは室温で実施した孤立一粒子のイメージングの結果を紹介します[9]。図3に40 nmから500 nmサイズまでの粒子内で観測された粒子の一断面におけるひずみ(位相)分布を示します。40 nm結晶は角型のパラジウム結晶であり、それ以外は不定形

状かつサイズ違いのBaTiO₃結晶です。ひずみ量に相当する位相は赤から青まで色の強さで表現し、平均原子位置からのずれ量を示します。位相 2π は格子定数(a)分のずれに相当します。例えば500 nm BaTiO₃粒子の色分布は、 $-\pi/2$ 程度変位した領域(赤)と $+\pi/2$ 程度変位した領域(青)が接し、すべり面を形成していると考えられます。一方、赤色から青色まで白を経由して緩やかに変化する場合も応力場を捉えており、200~300 nmの粒子ではそのような状況と考えられます。40 nmパラジウム結晶も同様ではありませんでした。40 nm結晶の実験の際、試料のドリフトが激しく、これを抑えるために試料持持後の金蒸着により試料を基板に固定しました^[9](2021年当時)。しかし、物理的な固定は試料に不必要な応力を付加する可能性があり好ましくないため、現在では固定材不要で実験ができるようにしています^[14]。

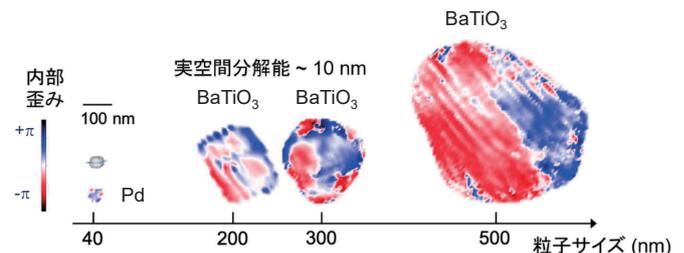


図3 40 nm ~ 500 nm サイズ粒子のイメージング結果

6. セラミクス中一粒子のイメージング

セラミクスの様に多数粒子中に埋もれた一粒子のイメージングも可能となっています^[11,12]。図4は300~400 nmサイズのBaTiO₃粒子が焼結されたセラミクスを5 μ m程度まで砕いて得られた粒子中に存在するナノ結晶一粒子のイメージングの結果です。5 μ m程度のセラミクス粒子の中にはナノ結晶が5000粒程度存在していますが、我々はこの中の一粒に注目し、先に紹介したMEMSヒーティングシステム^[10]を用いて常誘電-強誘電相転移($T_c \sim 120^{\circ}$ C)を明瞭に観測しました。

ドメイン由来のひずみがないと考えられる300 $^{\circ}$ C(常誘電相)において回復された粒子形状は、セラミクス特有の石垣様な積み重なりを反映した粒界の構造を示しました。断面位相図を見ると、300 $^{\circ}$ Cにおいても粒界からの影響を受けていると考えられる応力分布が複数見られました。BaTiO₃は常誘電-強誘電相転移に伴いドメインを形成しますが、40 $^{\circ}$ Cで解析されたドメイン同士が接続する起点は、ちょうど300 $^{\circ}$ Cで観測された赤領域から青領域に大きく変化する領域(すべり面)であることを示唆する結果が得られました。

これらの結果は、多数粒子中にある一粒子のイメージングがその温度変化も含めて可能であることを示しています。また、セラミクスにおける粒界の効果を構造ひずみの観点から調べることも可能としています。これらはセラミクスの示す重要な特性(誘電特性や圧電特性)の解明において重要な知見を与えるものと期待します。

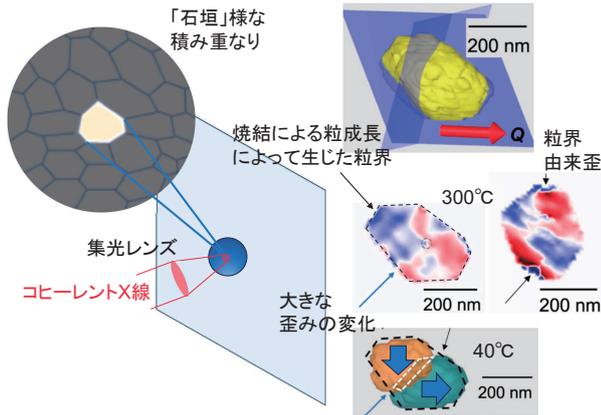


図4 セラミクスを構成する400 nmサイズ粒子のイメージング結果

7. 今後の展開

以上で紹介した結果以外にも応用例は広がりつつあります^[13]。今後、ナノ結晶分野のニーズを踏まえ、対応可能な粒子のサイズや種類を拡大してゆきます。一方、ガス-温度複合環境や電場-温度複合環境の整備は応用の観点からも重要であり、現在取り組んでいるところです。また、計測の効率化や解析の効率化といった事も検討を開始しています。

8. 結言

Bragg-CDI法の紹介と、BaTiO₃等ナノ結晶への適用状況について紹介いたしました。一粒子の挙動に着目しその温度変化を詳細に調べることで、セラミクス内部粒子のドメインの発生の起点となるポイントの特定など、従来の構造解析では得ることが難しい一粒子解析ならではの情報を得ることができるようになってきました。これから我々は、これら非一様な構造的特徴と物性の因果という視点に立ち「ナノ構造物性」といえる研究分野を進展させてゆきたいと考えています。今後、Bragg-CDI法が、その非破壊性を活用して材料やデバイスの様々な開発局面においてお役に立てるかどうか、ご議論いただければ幸いです。

9. 謝辞

ここで紹介した成果は以下の方々との共同研究によるものであり、感謝申し上げます。押目典宏氏、菅原健人氏、島田歩氏、町田晃彦氏、綿貫徹氏、上野哲朗氏、石井賢司氏（以上、QST）、Kim Sangwook氏、福島風世氏、白川皓介氏、黒岩芳弘氏（以上、広島大学）、上野慎太郎氏、藤井一郎氏、和田智志氏（以上、山梨大学）、門馬綱一氏（国立科学博物館）、豊川秀訓氏（JASRI、QST）、塚田真也氏（島根大学）。

また、本研究の一部は科学研究費補助金（研究課題番号JP19H05819、JP19H05625、JP22H01976、JP23H01868、JP23H04860）、文部科学省マテリアル先端リサーチインフラ事業（研究課題番号JPMXP1222QS0017）の下で実施されました。感謝申し上げます。

放射光を用いた実験は大型放射光施設 SPring-8 において JASRI の承認（課題番号 2021A1100、2021B1252、2022A1172、2022A3761、2022A3762、2022A3763、2022A3784、2022B1834、2022B3761、2022B3763、2022B3784）を得て実施されました。感謝申し上げます。

図 2-4 の描画には一部 ImageJ^[15] ならびに VESTA^[16] を使用しました。

文献：

[1] G. Arlt *et al.*, J. Appl. Phys. **58**, 1619 (1985).
 [2] K. Ishikawa *et al.*, Phys. Rev. B **37**, 5852 (1988).
 [3] T. Yamamoto *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, 4272 (1993).
 [4] S. Wada *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 6188 (2003).
 [5] T. Hoshina, J. Ceram. Soc. Jpn. **121**, 156-161 (2013).
 [6] I. Robinson *et al.*, Rev. Lett. **87**, 195505 (2001).
 [7] I. Robinson *et al.*, Nat. Mater. **8**, 291 (2009).
 [8] K. Ohwada *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SLLA05 (2019).
 [9] N. Oshime, K. Ohwada *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **60**, SFFA07 (2021).
 [10] N. Oshime, K. Ohwada *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, SN1008 (2022).
 [11] N. Oshime, K. Ohwada *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SM1022 (2023).
 [12] 押目典宏, 大和田謙二他 日本結晶成長学会誌 **51**, 1-02 (2024).
 [13] T. Nishikubo, K. Ohwada *et al.*, Chem. Mater. **35**, 870 - 878 (2023).
 [14] 特願 2022-125870「X線回折測定法およびX線回折測定装置」
 [15] M. Abramoff *et al.*, Biophotonics Int. **11**, 36 (2004).
 [16] K. Momma *et al.*, J. Appl. Crystallogr. **44**, 1272 (2011).

■ 連絡先



量子科学技術研究開発機構
 関西量子科学研究所
 放射光科学研究センター
 グループリーダー 大和田 謙二
 〒 679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
 ohwada.kenji@qst.go.jp

追悼 堂山昌男先生

日本 MRS の創設者の一人であり、日本 MRS 元会長、IUMRS 元会長の堂山昌男先生（東京大学名誉教授、名古屋大学元教授、帝京科学大学名誉教授）は、本年（2024 年）1 月 2 日にご逝去されました。享年 96 歳です。謹んで先生のご冥福をお祈りいたします。

先生は、1927 年（昭和 2 年）2 月 8 日、東京のお生まれです。名古屋の明倫中学校（現、明和高校）、第八高等学校を卒業、東京大学に進学、1952 年（昭和 27 年）東京大学工学部冶金学科を卒業されました。その後、特別研究生を経て、1954 年（昭和 29 年）に渡米され、翌年ノートルデム大学冶金学科大学院を修了し、1 年で修士の学位を得ました。指導教授は、焼結理論で有名なクチンスキー先生です。先生は毎日、夕方帰宅し、夜にまた現れ、研究がどこまで進んだかを聞いたとのこと。このため、夕食は遅い時間になり、寝る間もなかったと伺いました。この間、物理学を学び直したいとの思いで、物理の大学院への入学をめざしましたが、固体物理学で有名なザイツ先生の元に行く機会もあったそうですが、イリノイ大学（アーバナ・シャンペーン校）物理学科大学院に入学され、修士号、次いで 1962 年（昭和 37 年）に PhD を取得されました。指導教授は、格子欠陥論で有名なケーラー先生です。学位論文では、点欠陥の形成エネルギーを実験で求める研究でした。金属線をガラスの真空容器に封じ込めることが必要で、ガラス細工もご自身で行いました。ガラス細工では、失敗し、手を傷つけたこともあり、手の平に残る大きな傷を見せていただきました。困難な実験でしたが、これに成功し、喜びも大きかったと思います。

PhD 取得後、イリノイ大学物理学科研究員を経て、アルゴンヌ国立研究所の研究員、次いで副主任研究員に就任されました。米国の永住権を得るために選んだとのこと。研究は、金属の格子欠陥に関係し、照射損傷、計算機シミュレーションなど新たな分野を開拓しました。格子欠陥の計算機シミュレーションは、潤沢な研究費の元に、世界に先駆けて行い、様々な成果を得ております。計算機科学の開拓者の一人と言えるでしょう。

この間、恩師の橋口隆吉先生から東京大学に戻ってくるよう要請がありました。1967 年（昭和 42 年）、東京大学工学部冶金学科の助教授になりました。はじめて給与を貰った時に月給とは思わなかったそうです。米国では週給で、この金額と同じだったからです。実際、月給と聞いて驚いたとのことでした。米国では、研究所で将校クラスの給与をいただいていた。一遍に給与が四分の一になり、驚いたのも当然ですね。帰国後間もないころに、私は先生にお会いし、修士、博士と指導していただきました。日本では PhD の価値が低いんだよと嘆き、工学部では工学博士を持っていないと評価されないとのこと、1975 年（昭和 50 年）に工学博士を取得しております。同年、教授に昇任しました。ちなみに、私は、先生の主査で学位論文を審査していただいた第 1 号です。先輩の主査は橋口先生で、私が最初になりましたのはありがたいことです。

先生は、帰国後に新たな研究分野に挑戦したいとのことで陽電子消滅の実験を始めました。大型の角相関測定装置を自作し、金属・合金のフェルミ面の測定を行い、金属電子論の分野を切り開こうとしました。研究費の確保にも大変ご苦労されたことを覚えております。その後、陽電子の寿命測定装置、エネルギー測定装置も自作し、日本の陽電子消滅の研究に大いに貢献しました。先生が嘆いたことは、学生らが得た角相関曲線に小さな変化があり、実験誤差であろうと判断したことでした。これは、金属中の点欠陥に由来していることが他者の研究論文で発表され、このことに、



ありし日の堂山昌男先生ご夫妻

長らく格子欠陥の研究してきた先生が気付かなかったことです。小さな変化に意味があった訳です。我々には、何か違うことがあったら、小さなことでも追及しなさいとの教訓になりました。この陽電子消滅は格子欠陥の研究に大いに役立っています。陽電子消滅以外には、フィールドエミッション顕微鏡の実験的研究を行い、計算機シミュレーションの研究も引き続き行いました。

先生は 300 報を超える論文、数十冊の編著書を刊行され、数多くの国際会議を主宰されました。学術的な貢献は国内外で高く評価され、数多くの受賞があり、各種学会の要職を務めております。日本 MRS と IUMRS の創設については、日本 MRS のサイトの沿革に書かれていることを宗宮重行先生とともにに行い、新たな材料科学の研究分野を拓きました。先生は、正義感が強く、エピソードが豊富です。エピソードの一部は、先生のご著書『青信号はゴーでない ☆永住してみたアメリカ 行って見た世界☆』（内田老鶴園、1990 年 3 月刊）に書かれていますので、是非、お読みになってください。また、「裸の王様になるな」、「『一将功成りて万骨枯る』を避けよ」、「I、II とか、また、その 1、その 2 とか、同じ題目で発表するな。新たな研究で発表しろ」など、教わったことが多々あります。私自身は、公私にわたり大変お世話になり、感謝の念に堪えません。

先生の夢は『陽電子顕微鏡の開発』で、透過型陽電子顕微鏡の研究に、晩年まで計算機シミュレーションとともに取り組んでおりました。

日本 MRS 元会長 高井 治



『青信号はゴーでない
☆永住してみたアメリカ
行って見た世界☆』

ご案内

■ MRM2025

主催：日本 MRS

日時：2025 年 12 月 8 日 (月) ～ 13 日 (土)

会場：パシフィコ横浜ノース

(横浜市西区みなとみらい 1 丁目 1-2)

詳細：<https://mrm2025.mrs-j.org/>

Call for Symposia：現在、シンポジウム提案を上記のサイトで受け付け中です。

問合せ：E-mail：info_mrm@jmru.org



■ 第 34 回日本 MRS 年次大会

— 物質循環に資するマテリアルズイノベーション —

主催：日本 MRS (<http://www.mrs-j.org/>)

日時：2024 年 12 月 16 日 (月) ～ 18 日 (水)

会場：横浜市開港記念会館 (横浜市中区本町) 他

形態：対面形式で実施予定

詳細：<https://www.mrs-j.org/meeting2024/jp/>

現在、講演申込を上記のサイトで受付中です。

重要期日：

講演申込 締切：7 月 31 日 (水)

参加登録 開始：8 月 10 日 (土)

受理通知 公開 (MyPage) 2024 年 9 月 1 日 (日)

早期参加登録締切：9 月 30 日 (月) 15:00

事前参加登録 (オンライン) 締切：11 月 20 日 (水) 15:00

Abstract WEB 公開：12 月 1 日 (日)

問合せ：日本 MRS 年次大会事務局

〒 231-0006 横浜市中区南仲通 3-35

横浜エクセレントⅢ 4F-D1

E-mail：meeting2024@mrs-j.org

シンポジウム (22 件) ★：国際シンポジウム

A) 材料の基礎理論とデータサイエンス

A-1 革新材料開発のための新アプローチ

A-2 計算機シミュレーションによる先端材料の解析・機能創成

A-3 データ・計算駆動/AI・ロボット駆動による材料開発

A-4 過酷環境での耐性を追求するセラミックス材料科学

～先端プロセス・計測技術と DX による構造・形状・機能設計～

B) 基盤材料創成

B-1 日本 MRS 水素科学技術連携研究会

B-2 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

B-3 遷移金属元素を基軸とした物質合成・物性評価・機能開拓の最前線

B-4 メタ分布視座に基づくプラズマプロセスイノベーション

C) ナノ材料科学と技術

C-1 先端プラズマ技術が拓くナノマテリアルズフロンティア ★

C-2 ナノカーボンマテリアルの機能と応用

C-3 Nano-biotechnologies on Interfaces ★

D) ソフトマテリアルとバイオサイエンス

D-1 先導的スマートインターフェースの確立

D-2 ソフトマテリアルサイエンス

D-3 プラズマライフサイエンス ★

E) 先進機能材料

E-1 超スマート社会のためのリアルタイムバイオセンシング

E-2 有機イオントロニクス

— 持続可能な社会に向けたエネルギー・環境&バイオデバイスの新展開 —

E-3 イオンビーム技術によるマテリアルイノベーションの躍進 ★

F) 社会と環境

F-1 循環型社会実現に向けた水の革新技術

F-2 エコものづくりセッション

F-3 社会実装材料研究シンポジウム

F-4 持続可能な社会に向けたナノ材料のグリーンプロセッシング ★

S) マテリアルズ・フロンティア (ポスター)

S 物質循環に資するマテリアルズイノベーション

▽ 堂山昌男先生追悼シンポジウム

日時：12 月 18 日 (水) 午後 1 時から 4 時 (予定)

場所：横浜市開港記念会館

(〒 231-0005 横浜市中区本町 1 丁目 6-6)

■ 共催・協賛・公募

▽ 公開シンポジウム「バイオマテリアル・生体医工学の研究開発戦略」

主催：日本学術会議材料工学委員会・臨床医学委員会・歯学委員会・化学委員会合同バイオマテリアル分科会、機械工学委員会・基礎医学委員会・電気電子工学委員会・材料工学委員会合同生体医工学分科会

協賛：日本 MRS 他

日時：2024 年 10 月 29 日 (火) 9:30 ～ 12:00

場所：仙台国際センター会議棟 (宮城県仙台市青葉区青葉山)

▽「初心者のための電気化学測定法－基礎編
(電気化学セミナー A)」

主 催：電気学会
協 賛：日本 MRS 他
日 時：2024 年 6 月 21 日 (金) 9:00～7 月 4 日 (木) 17:00
場 所：オンデマンド配信

▽「初心者のための電気化学測定法－実習編」

主 催：電気学会
協 賛：日本 MRS 他
日 時：2024 年 9 月 3 日 (火)、9 月 4 日 (水)
場 所：オンデマンド配信

▽「初心者のための電気化学測定法－実習編 (オンデマンド) 配信」

主 催：電気学会
協 賛：日本 MRS 他
日 時：2024 年 10 月 1 日 (火)～10 月 9 日 (水)
場 所：オンデマンド配信

■日本 MRS 組織・役員等

(2024 年 6 月～2025 年 6 月定時総会終結時)

代表理事・会長

重里 有三 青山学院大学 理工学部 教授

理事・副会長

有沢 俊一 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 監事
経営企画 部門 部門長
高井 まどか 東京大学大学院工学系研究科
バイオエンジニアリング専攻 教授
中野 貴由 大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻
教授
松下 伸広 東京工業大学 アドバンスメントオフィス/物質理工学院
材料系 副学長・学長特別補佐/教授

理事

青木 学聡 名古屋大学 情報連携推進本部 情報戦略室 教授
井口 雄一朗 東レ株式会社 研究本部上席執行役員/研究本部長
岩崎 峰人 昭栄化学工業株式会社 開発部 部長
岩田 展幸 日本大学 理工学部 電子工学科 教授
内田 儀一郎 名城大学 理工学部 教授
岡 伸人 近畿大学 産業理工学部 教授
岡部 敏弘 神奈川大学 理学部 非常勤講師
小高 秀文 AGC 株式会社 技術本部企画部 産学官連携チーム
リーダー (シニアマネージャー)
折茂 慎一 東北大学 材料科学高等研究所 所長
加藤 拓也 出光興産株式会社 次世代技術研究所 主任研究員
久保 貴哉 東京大学 先端科学技術研究センター 特任教授
手嶋 勝弥 信州大学 アクア・リジェネレーション機構
機構長/卓越教授
豊田 裕介 株式会社本田技術研究所 材料研究センター
執行役員 材料研究センター長
永元 公市 リンテック株式会社 研究開発本部 研究所
新素材研究部 部長

西本 右子 神奈川大学 理学部 教授
八田 章光 高知工科大学 システム工学群 教授/副学長
待永 広宣 日東電工株式会社 研究開発本部
薄膜回路技術研究センター センター長
松本 佳久 大分工業高等専門学校 機械工学科 教授/副校長
山浦 一成 国立研究開発法人 物質・材料研究機構
ナノアーキテクトニクス材料研究センター (MANA)
グループリーダー
吉矢 真人 大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学
専攻 教授
渡邊 友亮 明治大学 理工学部 教授

監事

齋藤 永宏 名古屋大学大学院 工学研究科
化学システム工学 専攻 教授
酒井 均 愛知工業大学 非常勤講師

顧問

東 雄一 元 公益社団法人 自動車技術会 常務理事
伊熊 泰郎 神奈川工科大学 名誉教授
岸本 直樹 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 名誉監事
白谷 正治 九州大学 システム情報科学研究院
高等研究院長/主幹教授
鈴木 淳史 横浜国立大学 名誉教授
高原 淳 九州大学 ネガティブエミッションテクノロジー研究
センター 特任教授
細野 秀雄 東京工業大学 特命教授/荣誉教授/物質・材料研
究機構/特別フェロー
山本 寛 日本大学 常任監事/名誉教授

名誉顧問

梶山 千里 九州大学 名誉教授
岸 輝雄 国立研究開発法人 物質・材料研究機構/東京大学
顧問/名誉教授
高井 治 関東学院大学 材料・表面工学研究所/名古屋大学
教授/名誉教授
増本 健 公益財団法人 電磁材料研究所 相談役
山本 良一 東京大学/東京都立大学法人 名誉教授/理事長
吉村 昌弘 国立成功大学/東京工業大学 招聘講座教授/名誉
教授

■訃報

理事 沖縄工業高等専門学校 生物資源工学科 教授 嶽本あゆみ様
2024 年 6 月 8 日ご逝去されました。謹んでお悔やみ申し上げ
ます。

■事務局移転のご案内

2024 年 4 月 6 日、下記に事務局を移転しました。
〒231-0006 横浜市中区南仲通 3-35
横浜エクセレントⅢ 4F-D1
※電話、Fax、メールアドレスは従来どおりです。



To the Overseas Members of MRS-J

■ Bringing Science to Students...

Dr. Takamasa Ishigaki, Professor, Department of Chemical Science and Technology, Faculty of Bioscience and Applied Chemistry, Hosei University.

The author moved to Hosei University in 2009 after spending more than twenty years with National Institute for Materials Science in Tsukuba, Japan. Moving from a research institute to a university made me realize something I had forgotten during my time at the institute: the majority of students do not study science for their profession. Students often use the expression, "I want to learn to improve my skills". In recent years, it is also told that the superiority of communication skills has become more and more important in the evaluation of a person. Even if students are skill-oriented, and do not intend for science to be a profession, I want them to spend their university days with the experience of doing science. With the expansion of human resources who have experienced scientific thinking, we should be able to realize a sustainable society. Another topic is on a research center of Hosei University, Research Center for Micro-Nano Technology, which consists of faculty members specializing in electrical engineering, mechanical engineering, biotechnology, and chemistry. I served as the director of research center for ten years. I believe having this continuity is important because the center is characterized by interdisciplinary program management.

■ Introduction to Research and Education Institute for Semiconductors and Informatics at Kumamoto University

– Towards the formation of a semiconductor ecosystem –

Research and Education Institute for Semiconductors and Informatics, Kumamoto University, Professor, Yuji Noguchi

With the expansion of TSMC into Kumamoto prefecture, Kumamoto University has begun full-scale training of human resources with strong skills in semiconductors and informatics.

Recently, it has been reported that the second factory of TSMC will be built in Kumamoto and the Japanese government has decided to provide a total of up to 1.2 trillion yen. With the strong support from Japanese government and Kumamoto prefecture, our university is promoting a project to develop 3D-structured semiconductor devices. The mission of our institute is to create a semiconductor industry unique to Kumamoto and to develop highly skilled human resources. Here, I introduce our institute (Research and Education Institute for Semiconductors and Informatics) and the recent research contents of our members.

■ Non-destructive 3D imaging of nanocrystals by Bragg coherent X-ray diffraction imaging

Synchrotron Radiation Research Center, National Institutes for Quantum Sci & Tech (QST) Kenji OHWADA, Ph.D

A technique for nondestructive 3D imaging of nanocrystals: "Bragg coherent X-ray diffraction imaging (Bragg-CDI)" using synchrotron radiation coherent X-rays was presented. CDI is an imaging method which combines obtaining sample images by collecting coherent X-ray diffraction patterns and performing phase retrieval calculations. The Bragg-CDI method provides not only the scattering amplitude corresponding to the electron density, but also the phase, which corresponds to the strain field, allowing us to discuss the crystal heterogeneity. We can now successfully image particles of sizes ranging from 40 nm to 500 nm and study the temperature dependence of their structures. In addition, we have succeeded in obtaining images of a particle embedded in ceramics, and can discuss the formation process of domains. We expect that the non-destructive nature of the Bragg-CDI method will lead to it being useful in various stages of the development of materials and devices.

編集
後記

ご多忙中にも関わらず、巻頭言「やあ、こんにちは」、「研究所紹介」、「研究トピックス」をご執筆下さいました法政大学・石垣隆正先生、熊本大学・野口祐二先生、関西量子科学研究所・大和田謙二先生に感謝申し上げます。本号を編集するに当たり、日本MRSニュースの今後について少しだけ考える機会を得ました。日本MRSは、材料に関する国際学会の日本での開催を契機として、材料に関する横断的、学際的学術研究団体として1989年に発足しました。この発足の経緯が日本MRSの最大の特徴でしょう。日本MRSの今後の発展のために、原点に帰って考えることも良いことだと感じました。(明石 孝也・狩野 旬)

©日本MRS ©一般社団法人 日本MRS 事務局 〒231-0006 横浜市中区南仲通3丁目35 横浜エクセレントⅢ 4階D1

http://www.mrs-j.org Email: general-inf@mrs-j.org

2024年日本MRS ニュース編集委員会 第36巻 第2号 2024年6月30日発行

委員長: 西本 右子 (神奈川大学 y24moto@kanagawa-u.ac.jp)

副委員長: 明石 孝也 (法政大学 akashi@hosei.ac.jp)

委員: 鮫島 宗一郎 (鹿児島大学大学院)、大谷 忠 (東京学芸大学大学院)、狩野 旬 (岡山大学大学院)、新國 広幸 (東京工業高等専門学校)、寺迫 智昭 (愛媛大学大学院)、松田 晃史 (東京工業大学)、寺西 義一 (東京都立産業技術研究センター)、籠宮 功 (名古屋工業大学)

顧問: 岩田 展幸 (日本大学理工学部)、岸本 直樹 (国立研究開発法人物質・材料研究機構)、小林 知洋 (国立研究開発法人理化学研究所)、寺田 教男 (鹿児島大学大学院)、小椋 理子 (湘北短期大学)、松下 伸広 (東京工業大学)

編集・構成: 一般社団法人日本MRS 印刷・出版: 秋巧社