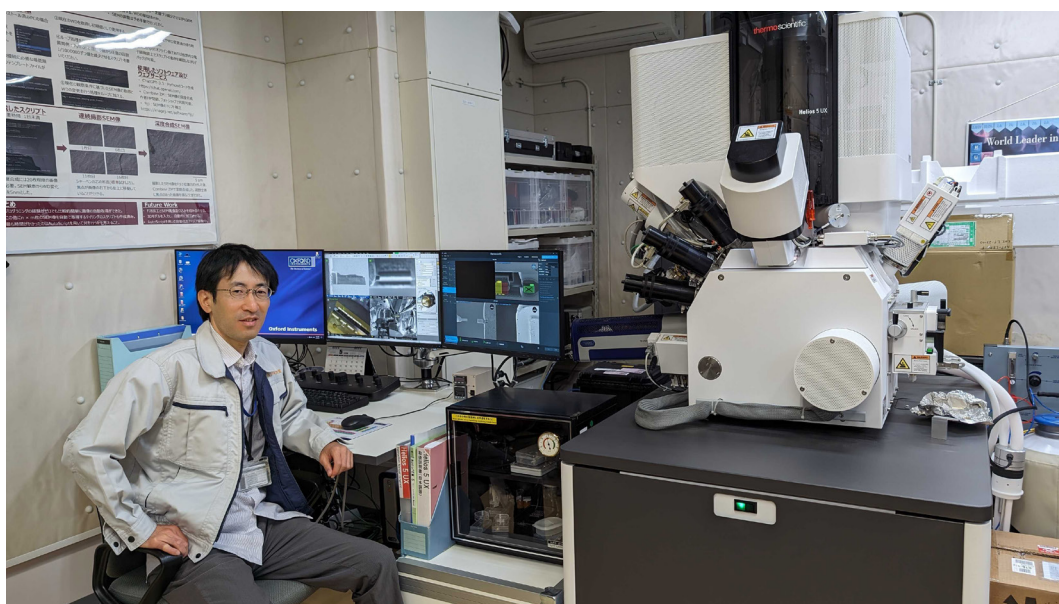




文部科学省 マテリアル先端リサーチインフラ 令和5年度技術スタッフ表彰 技術支援貢献賞 収束イオンビーム装置を用いた TEM 観察用薄膜試料作製 および微細構造解析支援

受賞者 九州大学マテリアル先端リサーチインフラ解析部門 阿内 三成氏に聞く



阿内 三成氏と FIB-SEM 装置 (Helios 5 UX)

文部科学省が 2021 年度より開始したマテリアル先端リサーチインフラ (ARIM Japan) [1] は、これまでのナノテクノロジープラットフォーム事業 (NPJ) (2012~2021 年度) で実施してきた最先端装置の共用、高度専門技術者による技術支援を発展的に継承した事業である。材料開発のための高度な先端装置の共用や技術支援の提供に加え、新たにリモート・自動化・ハイスループット対応型の先端設備を導入し、装置利用に伴い創出されるマテリアルデータを利活用しやすくした上で提供する。データの収集・利活用という新たな視点が加わった事業である。

ARIM Japan は、7つの重要技術領域として、1. 高度なデバイス機能の発現を可能とするマテリアル、2. 革新的なエネルギー変換を可能とするマテリアル、3. 量子・電子制御により革新的な機能を発現するマテリアル、4. マテリアルの高度循環のための技術、5. 次世代バイオマテリアル、6. 次世代ナノスケールマテリアル、7. マルチマテリアル化技術・次世代高分子マテリアルを挙げている。

これら 7 領域に対し、それぞれに強みを持つ先端装置群を提供するハブ機関と、特徴的な装置・技術を持つスポーク機関からなるハブ&スポーク体制で、利用者の研究開発を支援する。共用する装置は 3 つの技術領域 (1. 計測・分析、2. 加工・デバイスプロセス、3. 物質・材料合成プロセス) で整理されている [1]。また ARIM Japan には、本事業全体の運営事務局等を担うセンターハブが設けられている。

最先端共用設備の有効活用には、高度な専門技術を有する技術スタッフの支援が不可欠であり、技術スタッフの貢献に報い、その育成を図ろうと、NPJ は 2014 年度より技術スタッフ表彰を始めた。このスタッフ表彰は ARIM Japan にも引き継がれ、2024 年 1 月 31 日に東京ビッグサイトで開催された第 23 回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 (nano tech 2024) の会場会議室で、5 件の技術スタッフ表彰が行われた [2]。同表彰式で『収束イオンビーム装置を用いた TEM 観察用薄膜試料作製および微細構造解析支援』と題する九州大学マテリアル先端リサーチインフラ (計測・分析) の阿内 三成 (あうち みつなり) 氏の支援活動に対して技術支援貢献賞が贈られた。今回 Web 取材により、どのような支援が実施されたか、またそのご苦労、成果について阿内氏に伺った。



1. 九州大学における ARIM 事業の概要と活用状況

1.1 九州大学 ARIM の概要 [3]

九州大学は ARIM 事業における 6 つのハブ機関（九大、東北大、東大、名大、京大、NIMS）の 1 つとして、次世代ナノスケール材料分野におけるデータ収集・蓄積・構造化・利活用のインフラを整備し、スポーク機関となる信州大や横断技術領域の機関等との連携のもと、事業を実施している。

図 1 に、九州大学 ARIM の実施体制を示す。九州大学 ARIM ハブ拠点では、ナノテクノロジープラットフォーム事業における微細構造解析プラットフォームの機能を受け継ぐ「解析部門」と、同じく分子・物質合成プラットフォームの機能を受け継ぐ「合成部門」が、先端機器の共同利用を通じた材料データの収集・蓄積を牽引する。ここに、新機軸としてデータ利活用を主導する「データ部門」を加えた「革新的材料 DX 拠点」を学内における特定大型教育研究プロジェクト拠点として設置し、ARIM 事業を推進している。ユーザーのデータ駆動型研究

を支援するほか、マテリアル DX に携わる高度人材の育成にも取り組んでいる。

1.2 九州大学 ARIM 解析部門 共用設備の利用実績

九州大学 ARIM 解析部門では、超高圧電子顕微鏡をはじめとする 9 台の電子顕微鏡、収束イオンビーム加工と走査電子顕微鏡の複合機である FIB-SEM (Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope) 装置 4 台ほか、合計 19 台が共用設備として学外に開放、利用されている。共用設備の一覧と、設備の詳細な紹介は「九州大学ハブ拠点サイト設備紹介」[4] を参照されたい。また、共用設備を利用する際に技術スタッフが支援することで研究成果をあげた事例については、過去の技術スタッフ表彰の紹介記事 [5][6] も参照されたい。

図 2 は、九州大学 ARIM 解析部門の共用設備利用日数のこの数年間にわたる年次推移を示した棒グラフで、左側が利用者の所属組織別、右側は利用形態別の統計データである。このデータは学外の利用者のもので、この他にも自主事業として、学内の教職員、学生の共用設備利用、企業等を対象とした非公開事業も行っている。ARIM の利用日数は漸増傾向にあり、利用者の所属としては大学（橙

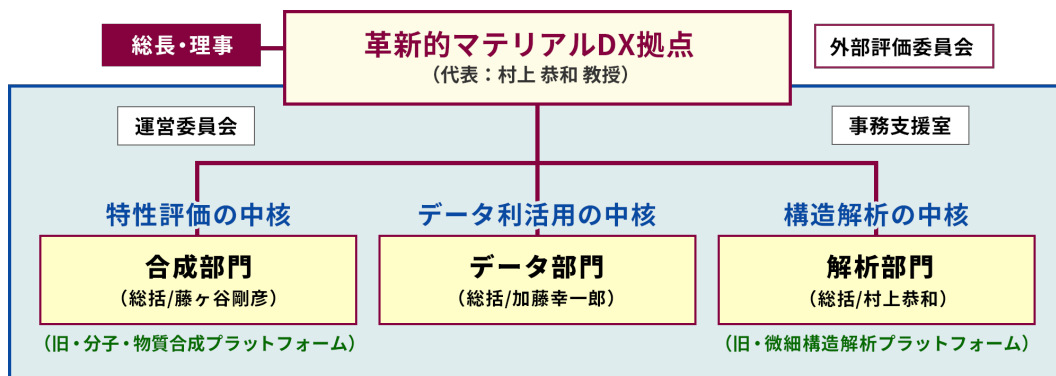


図 1 九州大学 ARIM の実施体制 [3]

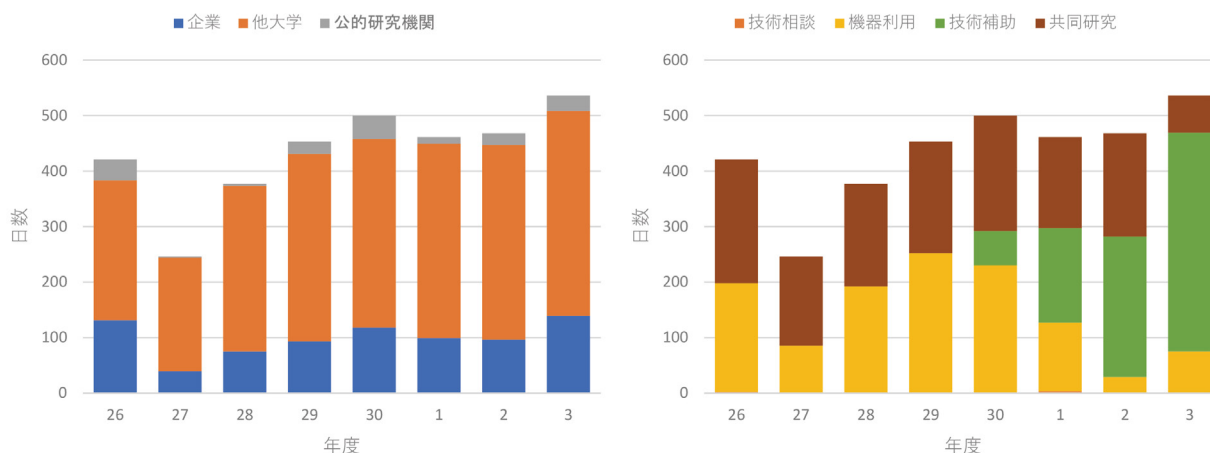


図 2 九州大学 ARIM 解析部門の利用状況：(左) 利用者所属組織別、(右) 利用形態別

色)が70%ほど,企業(青色)の割合は30%程度である。利用形態は,技術相談,機器利用,技術補助,共同研究の4つを実施している。技術補助については,H30年11月より開始した。第3章で阿内氏が技術支援した例を3件紹介するが,1件目と3件目はコロナ禍での特例対応として,利用者にリモートで電子顕微鏡での観察画面を共有しながら実験や解析を共同で行った。

2. 阿内氏の九州大学 ARIM における担当業務

阿内氏は2017年に九州大学の超顕微解析研究センターに学術研究員として着任し,ナノテクノロジープラットフォーム事業の時代も含めて解析部門の技術スタッフとしてSEM系の装置を中心に担当してきた。

図3は,阿内氏が支援で主に担当しているFIB-SEM装置3台とSEM装置1台である。日立製MI4000LのFIB-SEMは,SEM用のショットキー型電子銃がFIB鏡筒に対して直角に配置され,FIBで加工した断面をその場で垂直方向から低加速電圧でSEM観察することが可能となる(後述する図4を参照)。観察画像の三次元構築トモグラフィのほか,冷却加工および大気非暴露での試料搬送も可能である。次章で紹介する3件の支援例では,3.1節のFIB加工断面のSEM観察や,3.3節のFIBによる三次元構造可視化支援で,この日立MI4000Lを使用している。

図3 左から2番目のThermoFisherScientific製の

Helios 5 UXは,2023年9月に導入された新しいFIB-SEM装置である。高分解観察が可能なショットキー型SEM鏡筒と,高速かつ高精度での加工が可能なFIB鏡筒が52度で傾斜配置されている。AutoTEMソフトウェアにより薄片化領域を指定することで,TEM試料片の全行程(ピックアップ~マウント~薄片化仕上げまで)が全自動で実行可能であることが特徴で,既に利用実績を積重ねている。

左から3番目のThermoFisherScientific製Quanta 3D 200iは,熱電子銃型のSEM鏡筒とFIB鏡筒が52度傾斜配置した汎用のFIB-SEMである。TEM試料作製やパターンニングに用いており,比較的大きな試料を扱える。3.2節のPlan-viewリフトアウト法によるTEM試料作成支援では,このFIB-SEM装置が使用された。

図3右側のZeiss製ULTRA55はショットキー型のSEMで,EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:エネルギー分散型X線分光法)による元素分析,EBSD(Electron Back Scattered Diffraction Pattern:電子線後方散乱回折)による結晶方位解析が可能である。また,超伝導マイクロカロリメーターX線検出器によって高いエネルギー分解能での元素分析も可能である。

どの装置を使うべきかは,事前に利用者と打合せて要望を踏まえたうえで決めている。例えば3.2節のPlan viewリフトアウト法によるTEM試料作成支援では,TEM試料作成は汎用のQuanta 3D 200iでFIB加工し,100nm厚さに薄片化加工した試料のSEM観察はMI4000Lに移送して高分解SEM観察した。


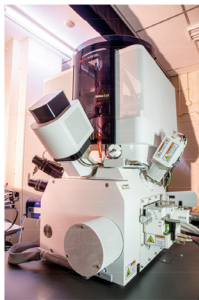
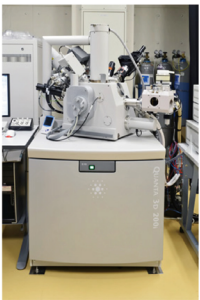

装置名	Hitachi MI4000L	ThermoFisherScientific Helios 5 UX	ThermoFisherScientific Quanta 3D 200i	Zeiss ULTRA55
外観				
SEM電子銃	ショットキー型	ショットキー型	熱電子型	ショットキー型
SEM加速電圧	0.1kV - 30kV	0.35kV - 30kV	0.5kV - 30kV	0.1kV - 30kV
イオン源	Ga液体金属	Ga液体金属	Ga液体金属	
FIB加速電圧	1kV - 30kV	0.5kV - 30kV	2kV - 30kV	
主な用途	TEM用薄膜試料の仕上げ、EDS、トモグラフィ	TEM用薄膜試料の自動加工、EBSD、トモグラフィ	TEM用試料のリフトアウト、パターンニング	SEM、EDS、EBSD、TES(超伝導マイクロカロリメーター)

図3 阿内氏が支援で担当するFIB-SEM装置3台とSEM装置1台



3. 技術支援事例

第2章で述べたように、阿内氏は複数台のFIB-SEM装置を使用して技術支援している。その中から代表的な技術支援事例3件について、以下に詳細を紹介する。

3.1 FIB-SEMによる断面観察支援 [7] ～Cu基板/Pdメッキ界面のナノボイド観察～

本支援例の利用者は、神奈川大学 物質生命化学科の松本太教授である。利用形態としては、技術補助支援（コロナ禍期間中であったため、特例としてTeamsで画面を共有してオンライン会話をしながらの実施）であった。

研究課題は、「Cu配線上への無電解パラジウム/金メッキにおけるPd触媒付与によるCu配線の腐食の原因究明」である。Cu配線上への無電解Pd/Auメッキでは、PdとCuの界面にナノサイズのボイドが形成されることが問題となっていた。無電解メッキの処理過程が原因と考えられ、Pd触媒付与処理溶液への添加剤を変えてメッキ処理を行い、ボイドの数の評価を行った。

Cu基板とPdメッキ界面に生じたボイドの数を評価するために、日立MI4000LのFIB-SEM装置を使用して幅数10 μ mの断面をFIBで加工し、高倍率SEM観察の写真撮影を行った。図4左側の模式図に描いたように、日立MI4000Lの直交配置では、試料に対して真横から集束Gaイオンビームを照射して断面加工し、真上からSEM観察用の電子ビームを加工断面に照射しながら走査する。一方、傾斜配置のFIB-SEMでは、図4右の模式図のように斜めからSEM観察を行う。垂直方向から撮影したSEM像と、傾斜配置のFIBと同じだけステージを傾斜した後、傾斜補正をかけて撮影することで傾斜配置の条件を模擬したSEM像を比較すると、垂直方向から観察したほうがコントラストと分解能が優れていることがわかる。ただし、直交配置で観察できるのは試料断面の近傍のみで狭いものに対して、傾斜配置されたFIB-SEMでは、任意の部

分の断面観察可能となる。

Pd触媒付与処理溶液への添加剤を複数種類変えた試料を、効率よくFIB加工・SEM観察を行うために、前準備工程を工夫した。まず、MI4000Lは最大の試料サイズが4×4×2mmまでなので、予め試料をトリミングしておく。FIBでの保護膜作製は時間がかかるため、市販の油性ペンで試料表面にマーキングをすることで厚さ数100nmの保護膜を形成した。試料の端は切断時の応力ダメージがあるので、10 μ m程度内部までFIBで加工してからSEM観察に用いた。

図5が、Pd触媒付与処理溶液への添加剤を4種変えて、FIB加工・SEM観察した結果である。図5左の棒グラフは、Cu基板表面とPd界面に生じたボイドの数を数えた結果で、青色がPd触媒付与後、橙色がPdメッキ後である。一番右の棒グラフは、Pd触媒付与処理溶液への添加剤なしの場合で、図5右の2枚のSEM観察写真はPd触媒付与後（青色棒グラフに対応）とPdメッキ後（橙色棒グラフに対応）のものである。SEM観察写真の上部、黒色の部分は油性ペンによる保護層で、Cu基板表面には厚さ100nm程のPdメッキ層が高輝度のコントラストで見える。右のSEM写真では、Pdメッキ層の直下に数多く

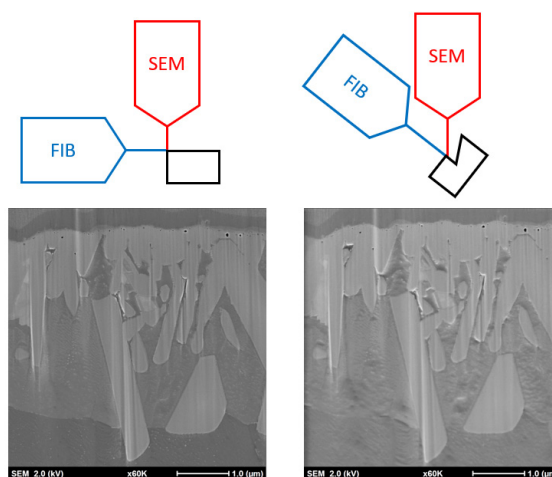


図4 垂直入射観察像（左）、傾斜観察像（右）

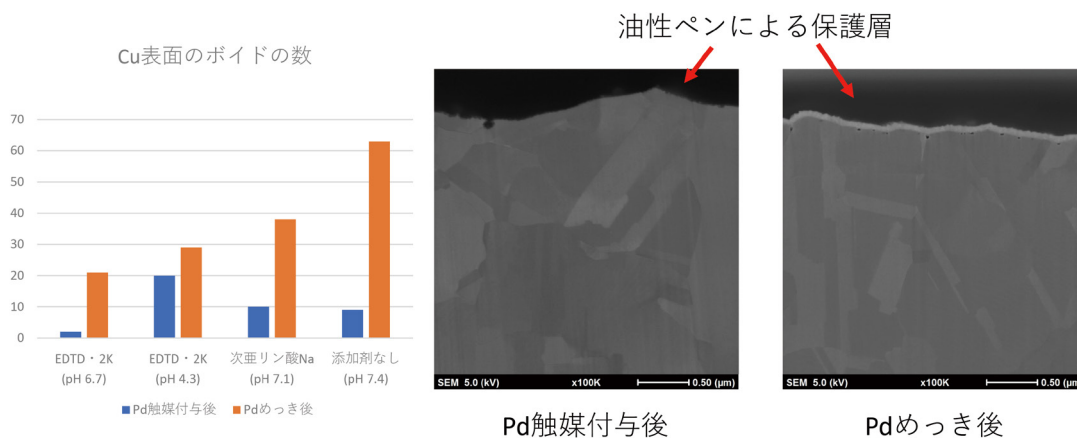


図5 Cu基板表面のボイドの数（左棒グラフ）とFIB-SEMによる断面観察（右2枚）

の小さなボイドが認められ（拡大しないと見えづらいが）、その数は図5の最右の橙色棒グラフに示すように60個強とカウントされた。添加剤なしのPd触媒付与後のSEM観察写真（左側）では、Pd/Cu界面の左方に大きな黒色ボイドが1つ見えるが、観察を広範囲にわたって行い、ボイドの数は図5の最右の青色棒グラフに示すように10個弱とカウントされた。

添加剤の条件を4種変えて行った結果として、EDTA・2K (pH6.7)を加えたものが最もボイドの生成を抑制できることが判明した（図5の最左、青色棒グラフ）。EDTA・2Kとは、エチレンジアミン四酢酸二カリウム塩二水和物（Ethylenediamine-N,N,N',N'-tetraacetic acid dipotassium salt dihydrate）である。

3.2 FIBによるTEM試料作製支援 [8][9] ～Plan-view リフトアウト法によるナノロッド解析～

本支援例の利用者は、九州工業大学 物質工学研究系の石丸 学 教授である。利用形態は、九州大学 ARIM の共用設備利用の技術補助支援であった。

研究課題は、「不均質な構造を持つ酸化物セラミックス材料の極微構造解析」である。YBa₂Cu₃O_{7-y} 超伝導薄膜中に量子化磁束を固定するナノロッドをパルスレーザー照射で導入し、ナノロッドの形状をTEMで薄膜断面観察だけでなく、薄膜表面から200nmの厚さの領域に形成したナノロッドの平面分布を広範囲で解析したいという利用者の要望があった。TEMによる断面観察では、ナノスケールでしか情報が得られない。FIB-SEMを使い、Plan-view リフトアウト法という、試料表面に対して平行な薄膜を切り出す手法を用い、薄膜表面に沿って広範囲で薄

片化することができ、マイクロスケールでナノロッドの平面分布をSEMで観察することに成功した。

図6に、FIB-SEM装置(Thermo Fisher Scientific製Quanta 3D 200i)を使用し、Plan-view リフトアウト法に従った試料作製工程を示す。

- ① ①まず、表面保護用のC（カーボン）デポを行う。
- ② 次に、ナノロッドの平面分布を観察する正方形領域の周辺を一部を残してFIB加工する。この写真は、Gaイオンビームを試料の真上から照射して加工し、イオンビームを試料上で走査した時に放出される二次電子を検出して得られるSIM (Scanning Ion Microscope) 像である。
- ③ ③試料搭載ステージを回転して、Gaイオンビームが試料に対して62度の斜め方向から入射するようにして薄膜の底面を加工、さらにステージを回転して-62度の反対方向からも加工して底面を切断する。
- ④ ④試料を90度回転させて底面が切断されていることを確認する。薄膜の底面は平らではなく、楔形になっていることがわかる。
- ⑤ ⑤ニードルに試料を接着して切り離す。
- ⑥ ⑥観察用メッシュに試料を貼り付ける。図6右下の模式図は、写真⑥の状態を描いたものである。この状態からGaイオンビームを上方から当ててCデポ保護層と基板を両側から削り取り、観察したいナノロッドが形成された膜が100nm程度残るように薄膜化した。

阿内氏は本支援について、次のように語った。Plan-view リフトアウトは、論文で読んで大まかな方法は知っていたが、実際に試したことはなかった。通常のcross sectionでのリフトアウトに比べて難易度が高く、また200nmの厚さの部分に存在するナノロッドを失わないよ

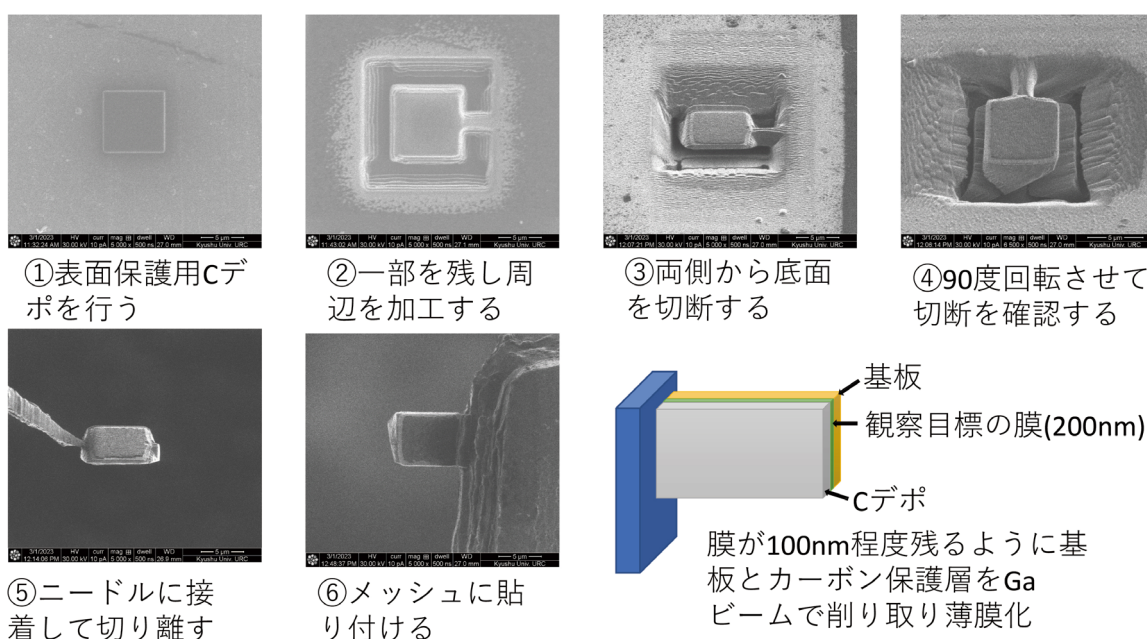
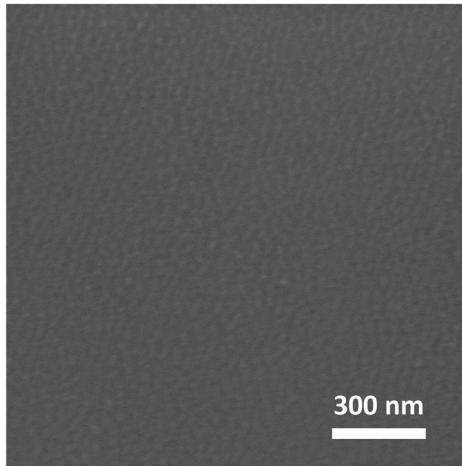
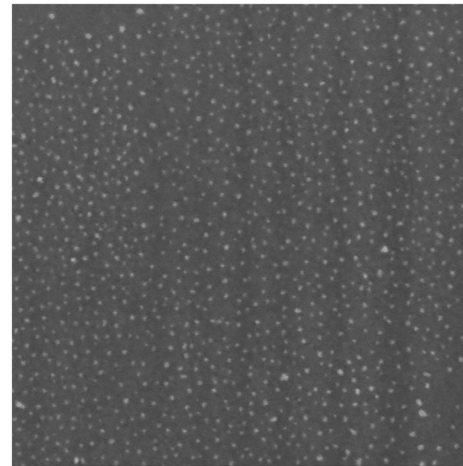


図6 FIBによるPlan-view リフトアウト試料作製工程（写真はFIBによるSIM像）



バルクのナノロッド



薄片化試料のナノロッド

図7 YBa₂Cu₃O_{7-y} 薄膜中のナノロッド分布のSEM観察；バルク（左）、薄片化試料（右）

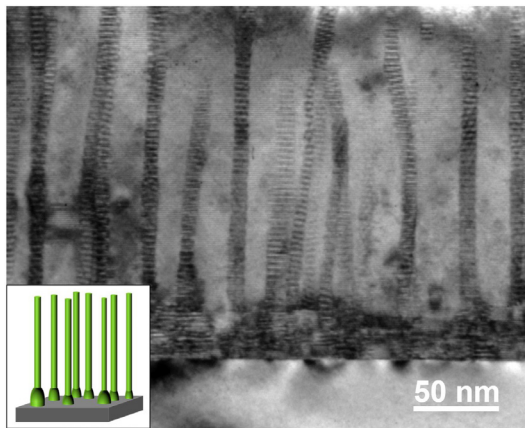


図8 YBa₂Cu₃O_{7-y} 超伝導薄膜中のナノロッド断面
TEM明視野像とナノロッドの模式図

うに薄膜化する必要があった。FIB-SEMは試料ステージの移動制限やオプションの構成が装置によって異なるため、Quanta 3D 200iに適したPlan-viewリフトアウトの手順を考え、図6の工程が実現した。特に、TEMグリッドを水平に固定する工夫が必要であった。

図7は、図6の工程で作製した表面に水平方向に薄膜化したYBa₂Cu₃O_{7-y}超伝導薄膜中のナノロッドを、日立製MI4000Lを使用してSEM観察した結果である。左側の薄膜化していないバルク状態でSEM観察した写真では、コントラスト差が弱くナノロッドの存在がわからない。一方、右側の薄片化試料ではコントラストが改善され、ナノロッドの平面分布が小さな白丸として明瞭に観察できた。ロッドの断面が白丸として見えており、均一な分布というよりは、いくらか分布にむらがある。ナノロッドを試料垂直方向の断面TEM観察すると、図8に示すように、ロッド長は200nm程である。

これら作製した試料を元に撮影された写真は、金属学会の金属写真コンクールで最優秀賞に選ばれた[9]。

3.3 FIBによる三次元構造可視化支援 [10][11] ～ SrTiO₃の焼結体の三次元構造観察～

本支援例の利用者は、茨城大学 理工学研究科の中島 光一 准教授である。利用形態としては、技術補助支援（コロナ禍期間中であったため、特例として利用者にTeamsで画面を共有してオンライン会話をしながらの実施）であった。

利用者の方では、高効率な水分解光触媒であるSrTiO₃の粒径50nm以下のナノキューブを合成し、それらを焼結した多孔質のSrTiO₃を用意していた。セラミック材料の微細構造は機械的特性、電気、熱、化学など各種物性に影響を与える。そこで、SrTiO₃焼結体内の空孔の立体的な分布構造を知りたいとの要望があり、FIB-SEM連続断面観察法による三次元構造可視化に取り組んだ。

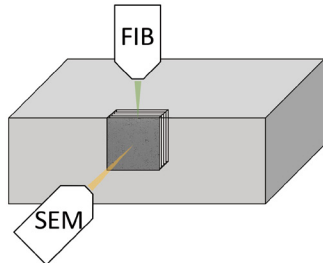
図9で、FIB-SEM装置によるトモグラフィー（シリアルセクションング）三次元構造可視化を説明する。使用したFIB-SEM装置は、直交配置型の日立製MI4000Lである。図8左下の模式図に示したように、SrTiO₃焼結体試料の上方からGaイオンビームを照射して、FIB加工する。加工サイズは横幅15μm×縦幅15μm×奥行5nmが1スライス分であり、試料の側方から加工した部分をSEM観察する。このFIB加工・SEM観察を、5nm間隔で300枚連続的に繰り返す。この操作は自動的に行われ、4時間ほどで終了する。図9右下に示したように、300枚のSEM像を重ね合わせることで三次元構造を再構築する。再構築ソフトウェアとしては、Avizoを用いた。

今回の支援で苦労した点としては、試料中にボイドが存在することでFIB加工時に筋状のカーテニングが発生しやすく、またボイドの奥の部分からの二次電子によってSrTiO₃とボイドの分離が難しくなる。そこで、単純なコントラスト差による2値化ではなく、機械学習ソフト(irastik)を用いることで、精度良くSrTiO₃とボイドを分

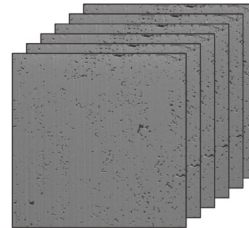
試料	SrTiO ₃
サイズ(xyz)	15 × 15 × 1.5 μm
加速電圧	1 kV
スライス間隔	5 nm
スライス枚数	300枚
再構築ソフト	Avizo



使用装置：日立MI4000L



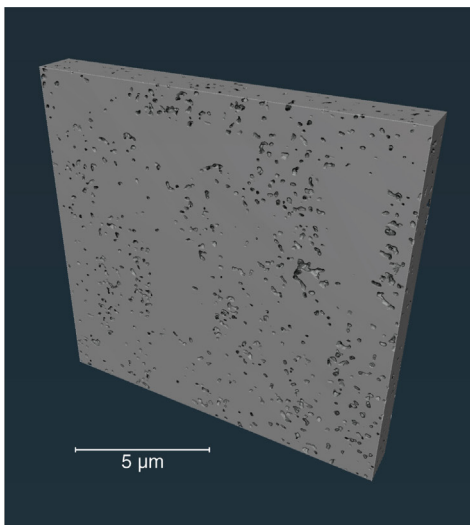
一定の間隔でFIBで加工し
露出した部分をSEMで観察



取得したSEM像をソフト
ウェアで3Dに再構築

図9 FIB-SEMによるトモグラフィー三次元構造可視化

SrTiO₃焼結体



空孔

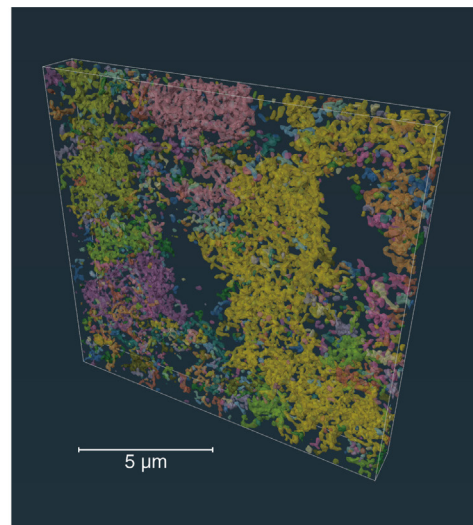


図10 FIBによる3次元構造可視化；SrTiO₃焼結体（左）、空孔のみ（右）

離できた。

こうしてSrTiO₃とボイドを分離したSEM像を300枚、Avizoで三次元構造可視化した結果が図10である。図10左のモノクロ写真は、横幅15μm×縦幅15μm×奥行1.5μmのSrTiO₃焼結体で、黒い部分が空孔（ボイド）である。図10右のカラー写真は、空孔のみをAvizoで三次元構造可視化したものである。ボイドは独立して存在しているのではなく、実は空間的につながってネットワークを形成しており、連結ボイド群は同じ色（例えば黄色）で表示している。所々にある黒い部分はボイドが全くない、すなわち緻密なSrTiO₃で埋まっている領域である。



4. おわりに

取材の締め括りとして、阿内氏に今後の課題や抱負について伺った。断面作製装置としてクロスセクションポリリッシャーが新しく導入され、他にも試料作製装置の導入が予定されている。FIB-SEMは手軽な断面の観察法であるが、広範囲の観察が弱点であるため、各種前処理装置を駆使した方法が提案可能なので、まずは当センターに相談してほしい。

FIB加工は今までは職人技で、持ち込まれる試料も人

によって異なることから定量化することが難しい分野であった。Helios 5 UX と TEM 試料の自動作製ソフト AutoTEM の導入により、省力化のみならず TEM 試料作製工程の可視化が可能となった。例えば FIB 加工での条件と処理時間などをデータとして保存できる。いまのところ FIB からは SEM 像と SIM 像のデータが得られているが、今後は SEM の加速電圧など構造化が可能となるようなデータを画像データに紐付けし、画像認識の自動化などデータ利活用に貢献したい、と阿内氏は語った。

阿内氏の ARIM 計測・分析分野での技術支援活動が今後益々充実して、日本の先端マテリアル研究の発展に貢献されることを期待したい。



参考文献

- [1] ARIM Japan 文部科学省 マテリアルリサーチインフラ；
<https://nanonet.mext.go.jp/>
- [2] 令和 5 年度技術スタッフ表彰；https://nanonet.mext.go.jp/page/awards_for_technical_staff_R05.html
- [3] ARIM JAPAN 九州大学ハブ拠点サイト；<https://nano.kyushu-u.ac.jp/arim/>
- [4] ARIM JAPAN 九州大学ハブ拠点サイト設備紹介；
<https://nano.kyushu-u.ac.jp/arim/facility/>
- [5] 令和 2 年度技術スタッフ表彰技術支援貢献賞「観察から周辺装置作製まで総合的な技術支援」受賞者 九州大学 微細構造解析プラットフォーム 工藤 昌輝氏に聞く；https://nanonet.mext.go.jp/data/doc/1652941731_doc_10_0.pdf
- [6] 平成 30 年度技術スタッフ表彰 優秀技術賞「電子線照射に高敏感な材料の電子顕微鏡による構造観察および分析」受賞者 九州大学 微細構造解析プラットフォーム 鳥山 誉亮氏に聞く；https://nanonet.mext.go.jp/data/doc/1652946236_doc_11_0.pdf
- [7] 田中 詩乃, 加藤 友人, 渡邊 秀人, 吉田 暁弘, 郡司 貴雄, 松本 太, “Cu 配線上への無電解パラジウム / 金めっきに及ぼす Pd 触媒付与溶液中の添加剤の影響”, 表面技術, Vol.72, No.1, pp.43~49 (2021)；https://www.jstage.jst.go.jp/article/sfj/72/1/72_43/_pdf/-char/ja
- [8] Masanari Kuroki, Tomoya Horide, Kaname Matsumoto, Manabu Ishimaru, “Nano- to microscale structural and compositional heterogeneity of artificial pinning centers in pulsed-laser-deposited $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ thin films”, J. Appl. Phys. 134, 045302 (2023); <https://doi.org/10.1063/5.0155145>
- [9] 日本金属学会 第 74 回金属組織写真賞 最優秀賞 “ $\text{Yba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ 超伝導薄膜中ナノロッド分布のマイクロスケールでの可視化”；<https://jimm.jp/award/PhotoAward/>
- [10] Kouichi Nakashima, Kaito Onagi, Yoshio Kobayashi, Toru Ishigaki, Yoshihisa Ishikawa, Yasuhiro Yoneda, Shu Yin, Masato Kakihana, and Tohru Sekino, “Stabilization of Size-Controlled BaTiO_3 Nanocubes via Precise Solvothermal Crystal Growth and Their Anomalous Surface Compositional Reconstruction”, ACS Omega 2021, Vol.6, No.14, pp.9410–9425 (2021)
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c05878>
- [11] Kouichi Nakashima, Kouta Hironaka, Kazuma Oouchi, Mao Ajioka, Yoshio Kobayashi, Yasuhiro Yoneda, Shu Yin, Masato Kakihana, and Tohru Sekino, “Optimizing TiO_2 through Water-Soluble Ti Complexes as Raw Material for Controlling Particle Size and Distribution of Synthesized BaTiO_3 Nanocubes”, ACS Omega 2021, Vol.6, No.48, pp.32517–32527 (2021); <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c04013>

(図は全て阿内氏より提供された)

(尾島 正啓)