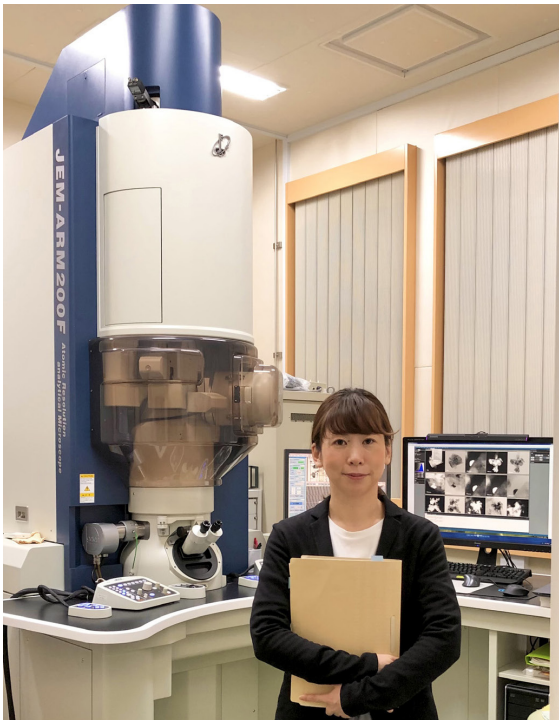




## 文部科学省 マテリアル先端リサーチインフラ 令和4年度技術スタッフ表彰 技術支援貢献賞 微細構造解析支援と業務効率化への取り組み

受賞者 北海道大学・電子科学研究所技術部 平井 直美氏に聞く



JEM-ARM200F の前で平井 直美氏



nano tech 2023 会場にて  
遠堂 敬史氏 創成研究機構ナノテクノロジー連携研究  
推進室特任助教（ARIM 関連のとりまとめ役）と平井氏

文部科学省では 2012 年度から 2021 年度までの 10 年間実施した「ナノテクノロジープラットフォーム (NPJ)」事業を引き継ぎ発展させる「マテリアル先端リサーチインフラ」(ARIM) を 2021 年度に開始している [1]。NPJ において毎年度行われてきたプラットフォーム利用者に対する技術スタッフの優れた支援活動を表彰する制度が ARIM においても引き継がれた。2023 年 2 月 1 日 ~3 日東京国際展示場（東京ビッグサイト）で開催された nano tech 2023 第 22 回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議の初日、同会場の会議室において、ARIM 令和 4 年度技術スタッフ表彰の表彰式が行われ、優秀技術賞 1 件、技術支援貢献賞 4 件が表彰された [2]。

この度、技術支援貢献賞受賞者の一人、北海道大学 ARIM の計測・分析分野の平井 直美（ひらい なおみ）氏（同大学 電子科学研究所 技術部）を Web 取材し、受賞テーマ「微細構造解析支援と業務効率化への取り組み」に関わる技術支援活動について伺った [3]。



### 1. 北海道大学 ARIM の概要 [4]

北海道大学 ARIM（以下北大 ARIM）は、文部科学省 ARIM における 7 つの重要技術領域の一つ「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」を担当する物質・材料研究機構ハブにつながるスポーク機関とし

て、位置づけられている。北大 ARIM の体制を図 1 に示す。

文部科学省の NPJ においては、北大の創成研究機構ナノテクノロジー連携研究推進室に設けられた北大 NPF (Nanotechnology Platform) 運営委員会が北大の NPF 事業を統括していたが、ARIM においては、同連携研究推進室に設けられたマテリアル先端リサーチインフラ運営委員会が北大 ARIM の活動を統括しており、北大 NPF に参

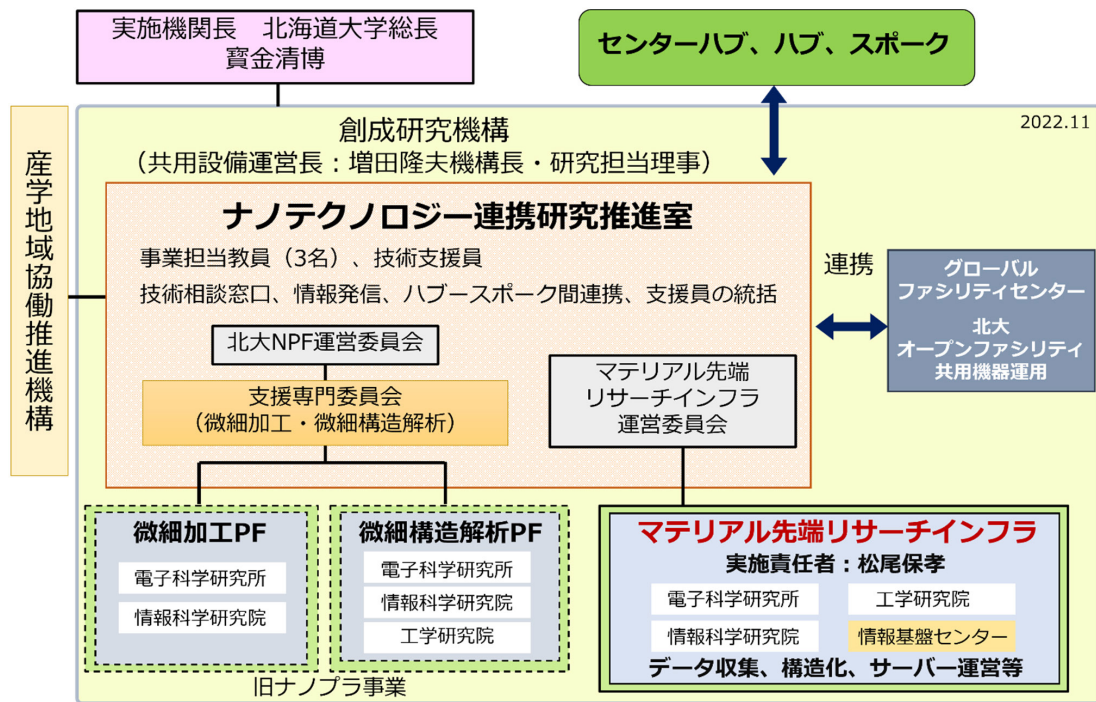


図1 ARIMに関わる北海道大学の支援体制（北大NPFの体制を併記）

画していた電子科学研究所・情報科学研究院・工学研究院はそのままARIMの体制に移行した。

即ち、NPJにおいて北大が推進してきた微細加工と微細構造解析プラットフォームの支援活動は、北大ARIMでは、「加工・デバイスプロセス分野」と「計測・分析分野」の横断技術領域に引き継がれた。また、北大ARIMの発足にあたり、新たに、情報基盤センターが加わって

いる。情報基盤センターは情報化推進のための研究開発、情報基盤の整備・運用を行う北大の研究センターであり、ARIMにおいて各拠点の設備共用で創出されるデータを蓄積・構造化してセンターハブに集積・構築されたデータ基盤を活用するデータ駆動型研究開発体制構築の目標実現に向けた対応である。

北大ARIMは、上記横断技術領域において特にフォト

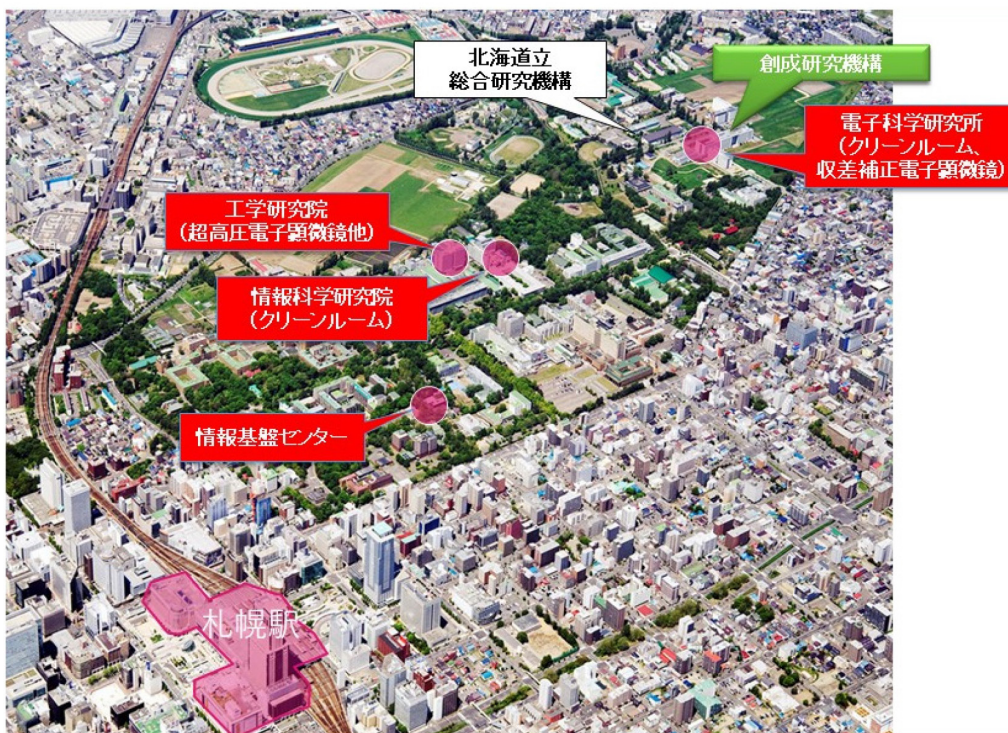


図2 北海道大学支援機関の俯瞰図

ニクスデバイス等を中心に技術支援活動を行っており、加工・デバイスプロセス装置群 37 台と計測・分析装置群 21 台の共用装置群を揃え、北大の研究者・技術者が長年培ってきた技術・経験・英知を結び付けて、イノベーション創出を狙う利用者の研究開発を支援している。

図 2 は北大構内の俯瞰図で、北大 ARIM の支援担当組織の場所を示している。上述「計測・分析分野」の支援活動は電子科学研究所と工学部の工学研究院、情報科学研究院で行われている。



## 2. 北大 ARIM における計測・分析分野の支援活動 [4]

表 1 は、北大 ARIM 共用装置一覧表である。黄緑色地で示す 4 用途（表面構造解析、内部構造・3D 構造解析、

電子状態分析、試料作製装置）に分類表示している。青色地の部分は平井 直美氏と同じく電子科学研究所職員の森 有子氏と 2 名体制で担当している装置である。

共用装置の利用形態と利用課題数（2022 年度の例）を表 2 に示す。機器利用は、利用者が自ら機器を操作し利用するもので、後述のように汎用装置については、講習により利用者が自立して操作できるように対応していると平井氏は語っており、その効果もあり課題件数が多い。技術代行は技術スタッフが利用者にとって機器を操作するものである。

図 3 に計測・分析分野における支援件数の推移を、NPJ の 10 年間を含めて示す。平成 30 年度、31 年度に減少したのは、北海道胆振東部地震による装置稼働停止の影響である。引き続きコロナ禍の時期になったが、後述の支援業務改善で説明の Web 活用などにより、以前と変わらない支援件数に復活している。

表 1 計測・分析分野の支援装置一覧（黄緑色地：用途領域分類、青色地：平井氏担当装置）

1. 表面構造解析	2. 内部構造・3D構造解析	3. 電子状態分析
◆走査型電子顕微鏡 電界放射型走査電子顕微鏡 (日本電子：JSM-7001FA) 電界放出形走査電子顕微鏡 (日本電子：JSM-6500F) 超高分解能電界放出形走査電子顕微鏡 (日立ハイテック：Regulus8230)	◆三次元電子顕微鏡 集束イオンビーム加工・観察装置 (日本電子：JIB-4600F/HKD) ◆走査型透過電子顕微鏡 ダブル球面収差補正走査透過型電子顕微鏡 (日本FEI：Titan3 G2 60-300) 量子・電子制御ナノマテリアル顕微物性測定装置 (日本電子：JEM-ARM200F) 収差補正走査型透過電子顕微鏡 (日本電子：JEM-ARM200F) 走査型透過電子顕微鏡 (日立ハイテック：HD-2000)	◆光電子分光 時間分解収差補正光電子顕微鏡システム (エルミテック：AC-PEEMIII) 大気中紫外光電子分光装置 (理研計器：AC-3)
◆オージェ電子分光 オージェ電子分光装置 (日本電子：JAMP-9500F) ◆X線光電子分光 X線光電子分光装置 (日本電子：JPS-9200)	◆透過型電子顕微鏡 電界放射型分析電子顕微鏡 (日本電子：JEM-2010F) 環境セル対応透過電子顕微鏡 (日本電子：JEM-2010)	<b>4. 試料作製装置</b> ◆集束イオンビーム加工装置 集束イオンビーム加工装置 (日立ハイテック：FB-2100) 集束イオンビーム加工装置 (日本電子：JEM-9320FIB) ◆イオンミリング 精密イオン研磨装置 (ガタン：PIPS Model 691) 精密イオン研磨装置 (ガタン：PIPSII Model 695) イオンスライサー (日本電子：EM-09100IS)
◆電子線プローブマイクロアナライザー 電界放出形電子プローブマイクロアナライザー (日本電子：JXA-8530F) ◆紫外・可視分光 顕微紫外解近赤外分光装置 (日本分光：MSV-5200)	◆超高压電子顕微鏡 マルチビーム超高压電子顕微鏡 (日本電子：ARM-1300)	◆試料作成装置群 切断装置、機械研磨装置、電解研磨装置

表 2 共用装置の利用形態 (a) と 2022 年度の利用形態別受付課題数 (b)

(a) 共用装置の利用形態

技術相談	機器利用	技術補助	技術代行	共同研究	データ利用
専門技術で アドバイス	利用者自身で 操作	技術スタッフが 補助	利用者に代わり 操作	利用者と参画機 関共同実施	蓄積したデータ の利活用

(b) 2022 年度の利用形態別受付課題数

	課題数 合計	主な利用形態					
		技術相談	機器利用	技術補助	技術代行	共同研究	データ利用
計測のみ	85	1	64	1	11	5	3*
加工+計測	116	1	86	1	15	9	4*

\*：現在はセンターハブでのデータ基盤構築中であり、それに向けたデータ登録のみ

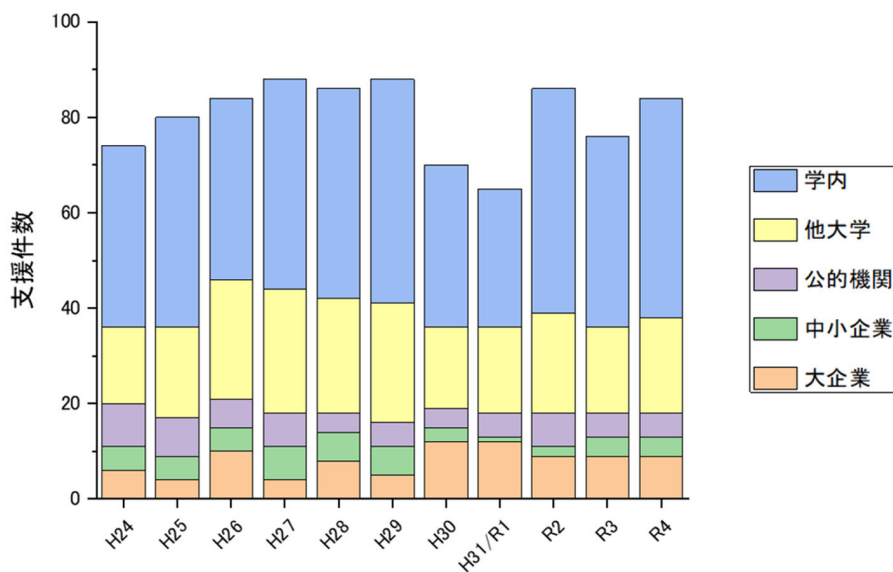


図3 北大 ARIM 横断領域：計測・分析分野\_支援状況の推移 (旧微細構造解析 PF 分含む)

### 3. 平井氏の担当業務と業務経歴

#### 3.1 ARIM における担当業務

平井氏は表1に示した計測・分析分野の5装置を担当している。図4にその中の主な4装置の写真と仕様を示す。森氏と2名体制でこれら装置を担当し、実験室環境整備、装置管理、装置初回講習、テキスト・資料作成、観察の相談、サポート、依頼観察業務などの業務を実施している。

多分野の利用者に対応して、様々な試料の観察が必要になることから、試料調製方法からどの装置を使うか等、

一連の流れの案内ができるように心掛けていると平井氏は語った。

図4左上の収差補正走査型透過電子顕微鏡 (JEM-ARM200F) は、電子レンズの収差補正装置を搭載した高分解能STEM (Scanning Transmission Electron Microscope) であり、原子分解能像の取得が可能である。EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: エネルギー分散型X線分光) やEELS (Electron Energy Loss Spectroscopy: 電子エネルギー損失分光) などの検出器も搭載されており、元素分析や化学状態分析も可能である。原子の並びや結晶構造が高分解能で直接観察できるので、多くの分野からの需要があるとのことであった。



図4 平井氏担当の共用装置 (電子科学研究所職員の森 有子氏と2名体制)

図4のそれ以外の3機器, 走査型透過電子顕微鏡(STEM: HD-2000), 電界放射型走査電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope), 集束イオンビーム加工装置(FIB: Focused Ion Beam)は利用者の多い汎用装置であり, 利用者は初回講習を受けて, 自立してできよう後述のような初回講習を含む工程の改善を図っている。現在は森氏が汎用装置の初回講習とサポートを担当し, 平井氏は高分解能STEM(JEM-ARM200F)担当に専念できる環境にあると言う。

### 3.2 平井氏の業務経歴

平井氏と北大との関係は, 2009年に光触媒を研究する研究室で, 触媒粉体作製の補助員をしたことに始まった。この時の触媒粉体合成や作製の過程, 活性の測定方法などの経験は, 後のSTEM観察に役立っている。例えば, 試料に混入する不純物の由来など心当たりが付きやすいことなどである。

2012年大学職員として電子科学研究所のナノテク連携推進室に配属され, この年開始されたNPJの共用装置のなかのSTEM(HD-2000)とFIB(FB-2100)担当となった。この時, 電子顕微鏡に関して全くの素人であったが, メーカー担当者の講習や, 前任者の残した実験ノートやテキストを参考にトレーニングを重ねることで, 担当業務を遂行している。

2014年に高分解能STEM(JEM-ARM200F)が導入され, 平井氏はこれも含めて担当となった。この時は, ナノテク研修等で他大学の装置管理を参考にし, 工学研究院のナノテク支援員にSTEMの管理・操作方法を習う等, 積極的に必要技術の習得を図った。

2016年に電子科学研究所 技術部に配属となる。この時, 森氏がナノテク支援員として配属され, 2人体制となった。この頃から少しずつ業務の進め方やテキストの改善に向けた見直しをはじめた。

2020年以降には, 新型コロナ感染症対策が加わり大きく業務の見直しを行い現在に至っている。

### 3.3 業務効率化への取り組み [5]

電子顕微鏡の初心者から装置利用者を支援する立場にまでなった平井氏は, その間の自らの試行錯誤の経験を踏まえて支援業務の改善・効率化を進めてきた。2020年以降は, 感染症対策の為, 利用者との接触時間を短縮することが急務となり, 支援体制の改善やWebの活用を進めた。特に, 接触時間と頻度が高い, 汎用装置(STEM, SEMとFIB)の初回講習と, JEM-ARM200Fでの高分解能STEM観察の対応改善について, 以下に説明する。図5と図6は, それぞれの作業の流れを改善前と後と比較して示している。

以下に各々の工程の中で改善した点の概要を示す。

#### ■初回講習における改善点(図5)

- (1) 初回講習を効率的・効果的にするために事前アンケートの実施 ---- 図5 ①対応
  - 利用申請時に, アンケートを実施し, 装置利用の習熟度や試料情報などを事前収集することで, 適切な講習プランを準備でき, 講習時間の配分・調整も容易となる。
  - 日程調整・アンケートはGoogleフォームを活用することで, 回答漏れなく, メールラシーも減少した。
- (2) 操作マニュアルでの予習を必須とする ---- 図5 ②対応
  - 操作マニュアルを一新すると共に, 機器操作を動画撮影し, 動画マニュアルを編集した。図7は, 操作の工程毎の動画一覧で, 各工程の動画の長さはその表紙に記載の通り数分である。
  - 利用者は初回講習の前に, 操作マニュアルと動画マニュアルを用いて予習をする。初回講習の理解度が上がり, 講習後のサポート, 補足説明, 問い合わせが減少した。
- (3) 初回講習では利用者が実際に観察する試料を持参する ---- 図5 ③対応
  - 初回講習では, 利用者が持参した試料を用いる。観察条件出しの過程を一緒に学ぶ実践的な内容となる。利用者の操作の自立が早くなり, 技術スタッフも様々な試料対応の経験が増える。

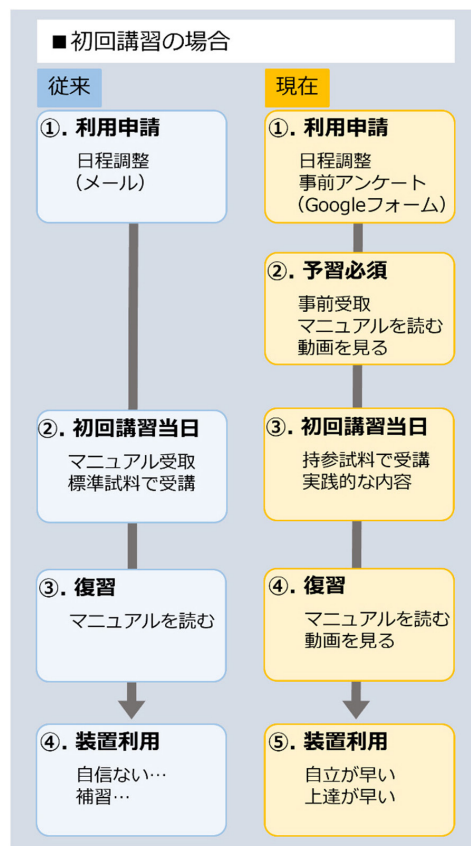


図5 初回講習の効果向上の施策 (汎用STEM, SEM, FIB対応)

以上の実施により、感染症対策として利用者との接触時間も短縮され、利用者の自立が早まり、技術スタッフ側は、時間と気持ちの余裕が生まれ、負担軽減を実感しているとのことである。

### ■高分解能 STEM 依頼観察の改善点 (図 6)

(1) 汎用 STEM での予備観察を必須とする。----- 図 6 ②, ③対応

・試料の分散状況、平均的な形状やサイズなどを利用者が把握・確認する。利用者は、この情報を基に、重点的に観察したいポイントを「観察シート」に記入し試料と共に提出する。試料情報、観察内容を技術スタッフと情報共有、蓄積することで円滑な観察進行が可能となる。

(2) 試料準備 ----- 図 6 ②, ③対応

・高分解の像観察には、試料調製状態が直接影響する。試料調製の状態が悪いと、観察が不可能な事態や、装置自体のトラブルが発生することがあり、他の利用者の実験スケジュールにも影響を及ぼすことになる。

・利用者の分野の広がりから、様々なタイプの試料観察、例えば、デバイス (FIB 加工試料)、触媒粉体、材料、マイクローム切片などの観察が必要になる。対策として、試料調製方法の周知が必要で、平井氏が自身の経験を基にテキストと動画を作成して利用者に提供している。必要があれば実際に講習する。

(3) 試料数を制限 (最大 3 個まで) ----- 図 6 ③対応

・時間内に無理なく計画的に観察を進行することができる。

(4) 直接立ち合い観察は基本 1 名とする。Web での立ち合いでは制限なし。----- 図 6 ④対応

・感染症対策であり、また、静穏な環境で観察に集中できる効果もある。

観察に至る手順の変更では、予備観察の追加、観察シート (利用者)・観察メモ (技術スタッフ) 作成の追加など手順が増え、一見遠回りに思えるが、効率良く豊富な観察情報が得られ、利用者にとっても、技術スタッフ側にとってもメリットが大きい。

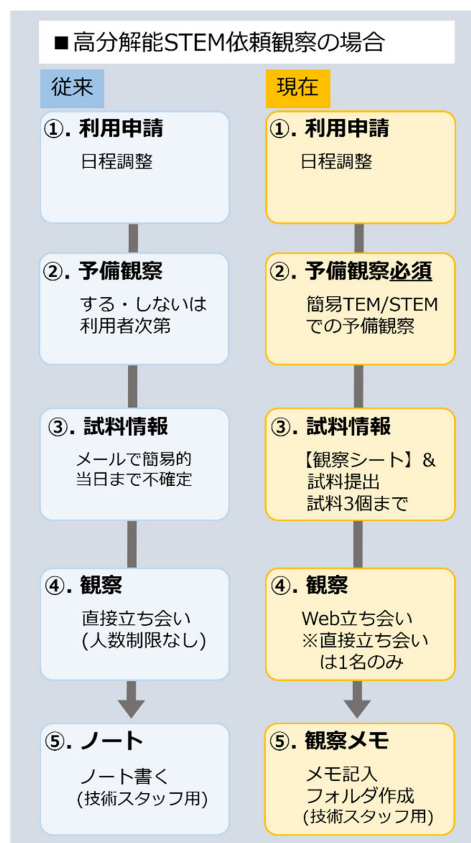


図 6 高分解能 STEM 観察の対応改善



図 7 動画マニュアル (SEM 操作) の例 [5]



## 4. 研究支援事例

### 4.1 支援に用いた高分解能 STEM (JEM-ARM200F) の機能 [6]

4章で紹介する2件の事例は平井氏が担当のJEM-ARM200Fにより技術支援を行ったものである。ここで技術支援に用いたHAADF-STEM法とSTEM-EELSについて簡単に紹介する。図8にSTEM-EELSおよび、HAADF像検出の仕組みを示す。

HAADF (High-angle annular dark-field: 高角度散乱環状暗視野) 法は、STEMにおいて、電子ビームを超微細に集束した電子プローブで試料表面を走査し、その電子が試料を透過する際に高角度に散乱したもの(黄色で表示)を環状の検出器(水色で表示)で検知するものである。高分解能STEMのサブナノプローブを用いることで原子分解能の像がえられる。試料で高角度に散乱した電子を検出するとADF(環状暗視野)が得られ、原子番号に応じたコントラストとなり重元素ほど明るい像となる。一方、透過した電子を検出すると、BF(明視野)像が得られ、TEMによる明視野像と同じコントラストとなる。ADFで特に高角度(High-angle)の散乱電子を検出するのがHAADFである。図8左上に原子分解能のHAADF像(Si結晶)の例を示す。

EELS (Electron Energy Loss Spectroscopy: 電子エネルギー損失分光法) は、試料に入射した電子線が、試料を通過する際に物質との相互作用により生じるエネルギー損失を評価するものである。エネルギーを失った電子を電子分光器で分光し、損失した電子エネルギーの強度分布をスペクトルとして取り出すことができ、このうち内殻電子励起によるエネルギー損失ピークを用いると試料中に含まれる元素の組成や化学状態を知ることが出来る。STEMと組み合わせることで、微小領域の測定が可能となる。

同じく元素分析を行う機能として、EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: エネルギー分散型X線分光) 検出器も搭載されており、試料に電子線を照射したときに発する特性X線を検出し、試料中の元素の種類や量を分析することができる。

両者を比較すると、エネルギー分解能ではEELSが約1eVでEDSより2桁優れており、空間分解能でも、EDSでは長い測定時間(約30s)で、電子ビームドリフトが生じ分解能が低下するのに対し、EELSの測定時間は短く(約5s)、プローブ寸法で決まる空間分解能を維持する。更に、EELSでは、EDSで検出困難なLiやBeの検出や、物質の結合状態の比較が可能となる。一方、EDSは組成分析機能における定量性に優れ、また、試料の厚さ制限も緩くなる等の特徴がある。利用者の研究内容に合わせた両者の使い分けが必要となる。

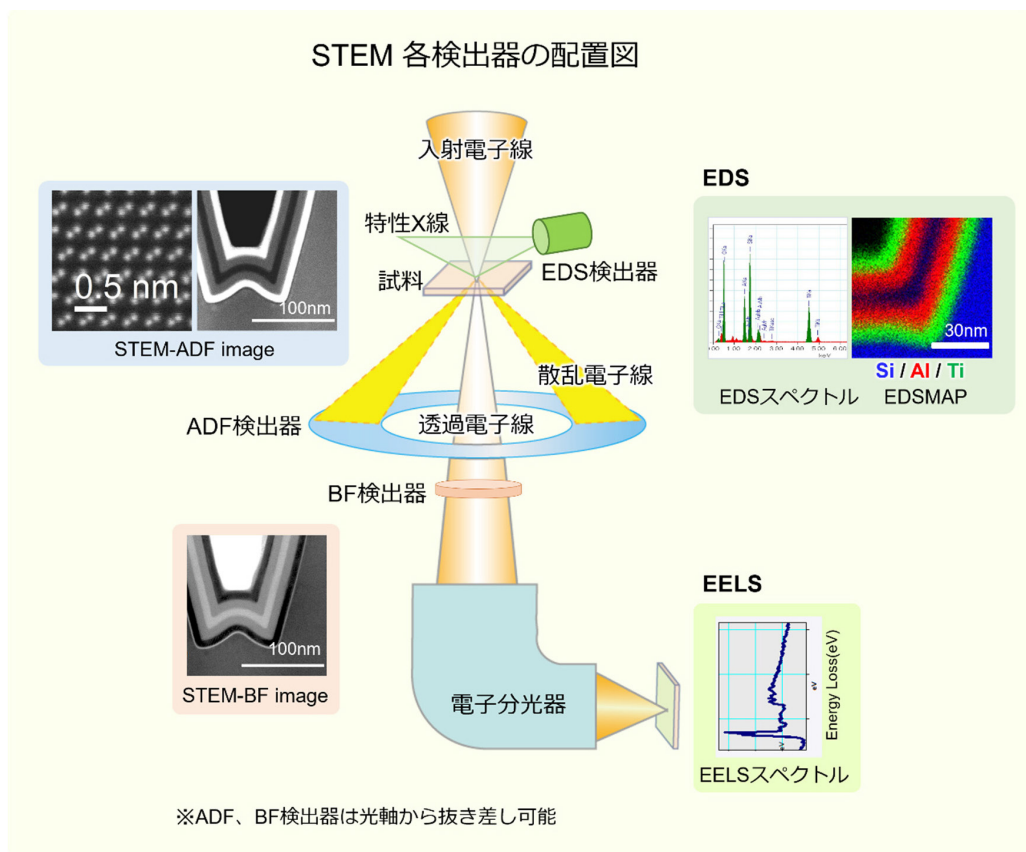


図8 STEM-EELS および、HAADF 像検出の仕組み

## 4.2 鉄アザフトロシアニン系酸素還元触媒の吸着状態解析の支援事例 [7][8]

本支援事例の利用者は、Li イオン電池より大容量で電圧を高めた空気電池の開発を目的として、電池の正極で空気中の酸素を還元する酸素還元反応を触媒により促進する方法に着目した。これまで触媒に Pt (白金) が使われてきたが、高価かつ希少であり、これに代わるものが求められていた。利用者の研究グループはその候補として鉄アザフトロシアニン系酸素還元触媒 (Fe AzULs) を取りあげ、多層カーボンナノチューブ (MWCNT) 電極に担持させる実験を行っていた。理論解析では Fe AzULs が単分子で MWCNT に担持していることが示唆されていたが、実態は分からず、北大 ARIM の共用装置 JEM-ARM200F を用いて原子分解能 STEM で測定観察することを依頼された。

この依頼に対して同装置の STEM-EELS で対応した。図 9 に観察・測定結果を示す。(a) は触媒を担持した MWCNT の HAADF 像である。MWCNT の表面には、様々な不純物も付着しており、目的の Fe を含む触媒を見つけるために、微小領域を電子プローブで走査して EELS 測定を繰り返した。(b) に EELS 解析領域 (0.5nm 角の赤□領域) を示す。(c) に得られた EELS スペクトルを示す。図中の 3 つのスペクトルデータは、(b) に示す 1, 2, 3 の解析領域に対応している。領域 1 では、CNT の C と触媒 Fe AzULs 中に含まれる Fe と N の存在を示すピークが検出された。領域 2 では Fe, N は検出されなかった。領域 3 では Fe だけが存在し、この領域の Fe は触媒分子が壊れてできたものと考えられる。走査した赤□領域は Fe AzULs 分子のサイズとほぼ同等であり、この測定結果から Fe AzULs が単分子の形で吸着していることが結論付けられ、利用者の目的が達成された。

本件の技術支援に際しての難関を平井氏は次のように語っている。

- ・当時は EELS に関して初心者であったので、似たよ

うな論文を参考にしながら様々な条件下で測定を繰り返した。電子プローブを当てることで触媒が動いてしまうこともあり、安定して情報が取得できる条件を探しながら数十か所測定し、このうち数か所から、適切なデータが得られた。

- ・最近では視野内の構造をみていてここなら上手く測定ができそうだという勘が働くようになり、似たような試料では同じパラメータ設定で始められるので条件出しの時間短縮もできるようになった。

この支援例の経験をもとに、次の支援例では、3.3 に記した業務の効率化を適用した。

## 4.3 Mo-V 系混合酸化物触媒の構造解析の支援事例 [9][10]

本支援事例の利用者は低級アルカンや不飽和アルデヒド選択酸化反応の工業用触媒として用いられる Mo-V 系混合酸化物触媒のモデル触媒である斜方晶系  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  および三方晶系  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  の触媒機能解析や構造解析に関する研究を行なっている。その研究の一環として該触媒の構造を北大 ARIM の共用装置 JEM-ARM200F での原子分解能 STEM で観察することを依頼された。図 10 に、(a) 斜方晶系  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  および (b) 三方晶系  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  の構造を示す。それぞれ上から順に、[001] 方向からのシミュレーション構造図、横から見たシミュレーション構造図、JEM-ARM200F で得られた [001] 方向からの HAADF 像である。シミュレーション構造図と HAADF 像は良く対応しており、斜方晶系  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  および三方晶系  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  の構造が実証された。シミュレーション構造図には 7 員環 (オレンジ色)、5 角形ユニット (ピンク色) などを表している。利用者は、北大 ARIM の JEM-ARM200F での観察を継続している。

本件の技術支援を行った平井氏は次のようにコメントしている。

- ・観察準備の苦勞について：Mo-V 系混合酸化物触媒

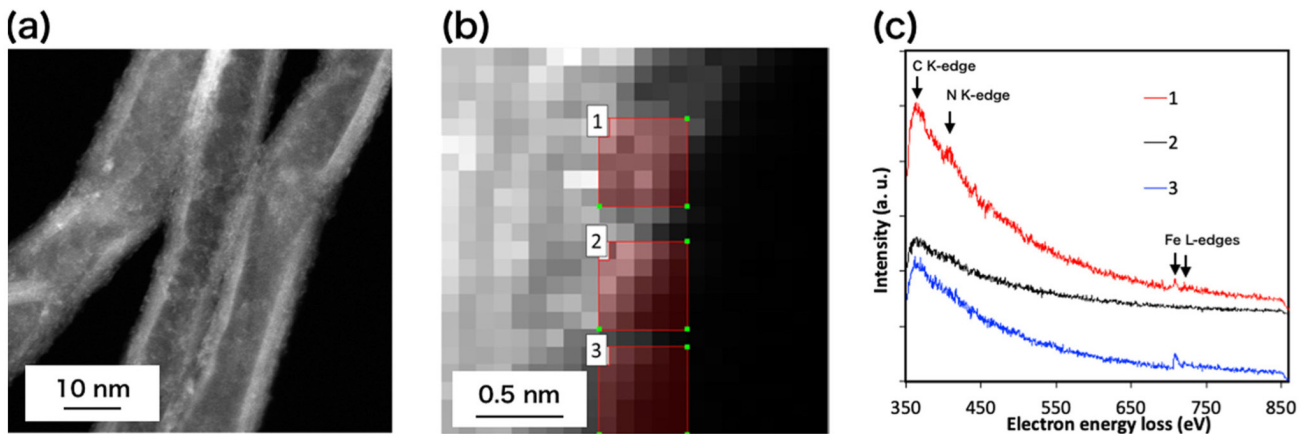


図 9 (a) Fe AzULs を表面に吸着させた多層 CNT の HAADF-STEM 像、(b) その表面の EELS 解析領域付近を拡大表示、(c) EELS スペクトルデータ [7]



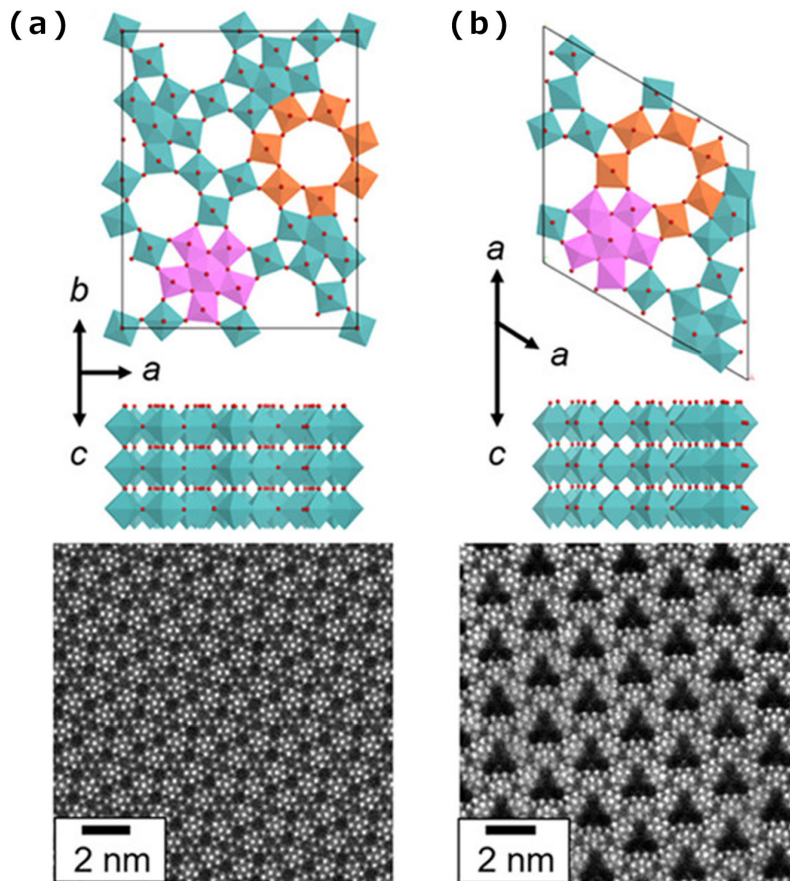


図 10 (a) 斜方晶系  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  (Orth-MoVO) (b) 三方晶系  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  (Tri-MoVO) [9]

は長い棒状の結晶であり、それを横に切った断面の高分解能観察が求められる。高分解能観察する為に必要な面積と電子線が透過できる厚さの欠片を見つけだし、電子線が結晶面に垂直に入射するための傾斜が必要となる。このように高分解能観察に適した欠片を予備観察の段階で判別することが難しかった。

- この結晶は電子線のダメージに弱い：繰り返しスキャンや焦点合わせに時間がかかると、結晶構造が壊れてしまうので、素早い操作が必要である。
- 視野探し時間の短縮化：高倍率の観察に特化した JEM-ARM200F は観察視野が狭く、観察に適した欠片を見つけ出すのに時間を費やす。そこで低倍率で視野が広い汎用 STEM (HD-2000) を用いて予備観察を行い、適切な欠片を複数個見つけて視野登録後、JEM-ARM200F で効率よく高分解能観察を行っている。

大変さを克服し、高分解能 STEM の持つ価値を利用者の研究・開発に結び付けることに努力され、その経験を業務効率化の仕組みとして体系化した。その活動は、真に技術スタッフ技術支援貢献賞受賞に相応しい。

その平井氏は利用者への要望として、高分解能 STEM 観察では、試料情報を技術スタッフ（装置担当者）と利用者が共有して観察に挑むことが大切で、利用者が自身の試料の状態をよく把握して支援を依頼するなどの協力がとても重要になると語っている。そして、業務の効率化を進める上で利用者の負担が増えてしまうことが無いようバランスをとることを意識しているという。また、今後の課題と抱負については、計測技術の進歩は続き、一方、利用者の研究の進展に伴い要望も変化する。時代の変化に対応できる方法を試行錯誤し、充実した技術支援を続けていけるよう努めていきたいと語った。

取材で伺った活動は、紙面には表現し尽くせないものがあり、今後、益々広がる利用者の要望に応える活躍を期待したい。

## 5. おわりに

取材を通して、高分解能 STEM が有する機能・性能が如何に高度であるかを実感することが出来た。同時に試料準備・観察準備の大変さも理解できた。平井氏はその

## 参考文献

- [1] ARIM Japan 文部科学省 マテリアル先端リサーチインフラ <https://nanonet.mext.go.jp>

- [2] 令和4年度技術スタッフ表彰; [https://nanonet.mext.go.jp/page/awards\\_for\\_technical\\_staff\\_R04.html](https://nanonet.mext.go.jp/page/awards_for_technical_staff_R04.html)
- [3] 微細構造解析支援と業務効率化への取り組み  
1675129324\_doc\_10\_0.pdf (mext.go.jp)
- [4] 北海道大学 創成研究機構マテリアル先端リサーチインフラパンフレット  
北海道大学 創成研究機構 マテリアル先端リサーチインフラ - ARIM  
[https://arim.cris.hokudai.ac.jp/wp-content/uploads/2023/06/%E3%83%9E%E3%83%86%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%83%AB%E5%85%88%E7%AB%AF%E3%83%AA%E3%82%B5%E3%83%BC%E3%83%81%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%95%E3%83%A9%E3%83%91%E3%83%B3%E3%83%95\\_2023.7%E6%94%B9%E8%A8%82.pdf](https://arim.cris.hokudai.ac.jp/wp-content/uploads/2023/06/%E3%83%9E%E3%83%86%E3%83%AA%E3%82%A2%E3%83%AB%E5%85%88%E7%AB%AF%E3%83%AA%E3%82%B5%E3%83%BC%E3%83%81%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%83%95%E3%83%A9%E3%83%91%E3%83%B3%E3%83%95_2023.7%E6%94%B9%E8%A8%82.pdf)
- [5] 平井直美, “微細構造解析支援の業務効率化への取り組み”, 北海道大学 電子科学研究所 技術部  
230417064255.pdf (eqnet-portal.jp)
- [6] 木本浩司, 三石和貴, 三留正則, 原 徹, 長井拓郎,  
“物質・材料研究のための透過電子顕微鏡”, 講談社,  
(2020/7/29)
- [7] Hiroya Abe, Yutaro Hirai, Susumu Ikeda, Yasutaka Matsuo, Haruyuki Matsuyama, Jun Nakamura, Tomokazu Matsue and Hiroshi Yabu, “Fe azaphthalocyanine unimolecular layers (Fe AzULs) on carbon nanotubes for realizing highly active oxygen reduction reaction (ORR) catalytic electrodes”, *NPG Asia Materials*, 11:57 (2019).
- [8] Press Release 令和3年12月13日: 『安価で高性能な燃料電池・空気電池用非白金触媒を実現 炭素に担持した金属錯体触媒分子を最適化』, 東北大学材料科学高等研究所 (WPI-AIMR), 東北大学多元物質科学研究所, 北海道大学電子科学研究所, 電気通信大学, AZUL Energy 株式会社  
[https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressing/tohokuuniv-press20211213\\_01web\\_ORR.pdf](https://www.tohoku.ac.jp/japanese/newimg/pressing/tohokuuniv-press20211213_01web_ORR.pdf)
- [9] Satoshi Ishikawa, Yudai Yamada, Naoki Kashio, Nagisa Noda, Kosuke Shimoda, Mio Hayashi, Toru Murayama, and Wataru Ueda, “True Catalytically Active Structure in Mo – V-Based Mixed Oxide Catalysts for Selective Oxidation of Acrolein”, *ACS Catalysis* 2021 11 (16), 10294-10307
- [10] 田中良裕, 石川理史, 上田渉, “結晶性  $\text{Mo}_3\text{VO}_x$  複合酸化物触媒を用いたエタンから酢酸への気相選択酸化反応” 第51回石油・石油化学討論会, 2F03 (2021).
- (図表はすべて平井氏から提供された)
- (向井 久和)