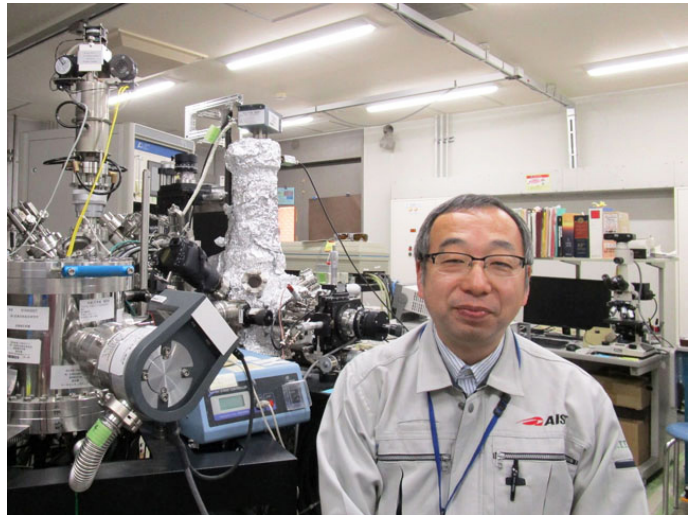




文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム 令和3年度技術スタッフ表彰 技術支援貢献賞 産総研で開発した装置による技術支援

受賞者 産業技術総合研究所 微細構造解析プラットフォーム 石塚 知明氏に聞く

文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム事業 (NPJ) は、微細加工プラットフォーム (PF)、微細構造解析 PF、分子・物質合成 PF の3技術領域について、全国の大学・公的研究所等 25 機関のナノテクノロジー関連先端機器類を、産官学の研究者にたいして共用を可能とするものである。参画している 25 機関を合せた PF の数は 37 となる。各 PF は、それぞれ得意専門分野を中心として先端機器を揃えており、PF 間をネットワーク化することで、相互に機器が補完され、より広い利用者ニーズに対応できる。各 PF では、技術スタッフがあり、先端機器の整備、保守、利用者の支援、更には装置利用の代行を行うことで、利用者の成果創出に貢献すると共に、利用者の幅を広げ、装置の利用効率を上げ、ナノテクノロジーの普及により社会の進化に貢献している。



石塚氏と技術支援担当の EUPS 装置

NPJ では平成 26 年以降、毎年秀でた支援活動を行った技術スタッフを表彰しており、次の 3 種類の賞を授与している (件数は令和 3 年度の例)。

- ・優秀技術賞：類まれな秀でた技術を有していると認められる者 - 1 件
- ・技術支援貢献賞：技術支援において多大な貢献をしたと認められる者 - 5 件
- ・若手技術奨励賞：35 歳以下で、優れた技術支援をしたと認められる者 - 1 件

今年度の表彰式は、2022 年 1 月 26 日に国際ナノテクノロジー総合展・会議 nano tech 2022 の併催会議の一つとして東京ビッグサイトの会議棟 703 会議室で行われた。新型コロナウイルス感染症対策として、会場参加とオンライン参加を可能とするハイブリッド型表彰式であった。

この度、技術支援貢献賞を授与された国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (産総研, AIST: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) デバイス技術研究部門の石塚 知明 (いしつか ともあき) 氏の表彰題目「産総研で開発した装置による技術支援」と題する NPJ の微細構造解析 PF での支援活動について、オンライン会議による取材を行った。本稿は産総研の微細構造解析 PF の特徴と、石塚氏の産総研開発の最先端装置による支援活動について紹介する。



1. 産総研の微細構造解析プラットフォームの概要

1.1 産総研先端ナノ計測施設 (ANCF) について [1]

産総研では共同研究開発施設の先端ナノ計測施設 (ANCF: AIST Nanocharacterization Facility) が文部科学省のナノテクノロジープラットフォーム事業 (NPJ) の

微細構造解析プラットフォーム (PF) に参画している。ANCF は産総研のつくばセンターにある分析計測標準研究部門、物質計測標準研究部門、デバイス技術研究部門の 3 研究部門が創造した計測分析技術・装置をプラットフォームとして公開し、計測支援を行うことで、学界・産業界・社会の課題解決に貢献することを目的としている。

ANCF は産総研の制度である共同研究や技術コンサルティング業務に利用しているが、上記の通り、NPJ の微細構造解析 PF に適用されている他に、TIA オープンイノ

バージョン拠点（元つくばオープンイノベーションアリーナナノテクノロジー拠点）にも参画している。

1.2 産総研微細構造解析 PF の装置群とその特徴

上述の通り、産総研の微細構造解析 PF の共用装置はすべて産総研の研究部門で研究開発した装置で、図 1 に示す 7 装置である。大学等他の微細構造解析 PF の共用装置は市販装置であり、これらとは試料の異なる側面から計測・分析するので、両者は相補的役割をはたすことになり、プラットフォーム全体として多種多様な計測・分析技術を提供することになる。

図 2 に ANCF での微細構造解析 PF の支援実績を NPJ



ANCF がある建物

<p>陽電子マイクロビームアナライザ</p>	<p>陽電子プローブマイクロアナライザ (PPMA) ▶ ナノ空孔</p> <ul style="list-style-type: none"> 電子線形加速器による高強度陽電子マイクロビーム (<math>< 30 \mu\text{m}</math>) を発生・利用 陽電子が電子と対消滅する際に放出する γ 線の検出から陽電子寿命を測定 電子密度に敏感な陽電子消滅寿命から原子空孔・空隙などを評価 試料中の陽電子寿命をマッピングすることで走査型陽電子顕微鏡を実現
<p>極端紫外光電子分光(EUPS)</p>	<p>極端紫外光電子分光装置 (EUPS) ▶ ナノ(最)表面物性</p> <ul style="list-style-type: none"> レーザー生成プラズマから出るパルス EUV 光 (255.17 eV, パルス幅 3 ns) を光源 光電子の脱出深さが 0.5 nm 程度となり表面敏感な分析を実現 飛行時間法による電子のエネルギー分光 (全エネルギー領域の同時測定) これにより帯電を抑制した絶縁物の測定が可能
<p>X線吸収微細構造分析 (XAFS)</p>	<p>超伝導蛍光収量 X 線吸収微細構造分析装置 (SC-XAFS) ▶ ナノ局所構造、電子状態</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射光を光源として蛍光収量法により X 線吸収スペクトルを測定 半導体検出器よりエネルギー分解能が優れている超伝導検出器を搭載 100 - 1500 eV で 10 - 20 eV (FWHM) のエネルギー分解能 微量の軽元素・遷移金属元素の分離・検出が可能
<p>超伝導 X 線検出器付走査型電子顕微鏡 (SC-SEM)</p>	<p>超伝導蛍光 X 線検出器付走査型電子顕微鏡 (SC-SEM) ▶ 軽元素の分布状態</p> <ul style="list-style-type: none"> SEM 観察する表面の任意の場所で発生する X 線の高感度検出による元素分析 超伝導トンネル接合 X 線検出器を搭載：半導体 X 線検出器の高スループットと波長分散型 X 線検出器の高エネルギー分解能を両立 軽元素の K 線や重い元素の L, M 線を明瞭に分離 → 元素分析を実現
<p>リアル表面プローブ顕微鏡</p>	<p>リアル表面プローブ顕微鏡 (RSPM) ▶ ナノ表面構造</p> <ul style="list-style-type: none"> SPM 用に開発の探針形状評価標準試料やカンチレバー等の校正機器を装備 大気、高真空、ガス雰囲気、溶液中など種々の実環境に対応 付帯設備として、SPM に最適化した試料調整装置を有する。
<p>固体 NMR 装置</p>	<p>固体核磁気共鳴装置 (SSNMR) ▶ 固体材料局所構造</p> <p>NMR 装置 3 台：600 MHz 及び 200 MHz…多核種対応 (^1H~^{207}Pb)、20 MHz…^1H 専用</p> <ul style="list-style-type: none"> 固体のまま測定してナノレベルの構造評価 固体試料の高速回転による高分解能 NMR 測定 固体 NMR データベース (無料公開中) を併設 https://ssnmr-sd.db.aist.go.jp/SSNMR/Top.php
<p>レーザー励起吸収分光装置 (VITA)</p>	<p>可視・近赤外過渡吸収分光計測装置 (VITA) ▶ 光反応ダイナミクス</p> <ul style="list-style-type: none"> 可視から近赤外の波長領域で過渡吸収及び蛍光寿命を測定する分光装置 フェムト秒やピコ秒などのパルスレーザーで試料に励起状態を形成 励起状態の時間変化を検出光の吸収 (または蛍光) 量の時間変化で追跡

図 1 産総研微細構造解析 PF の装置群

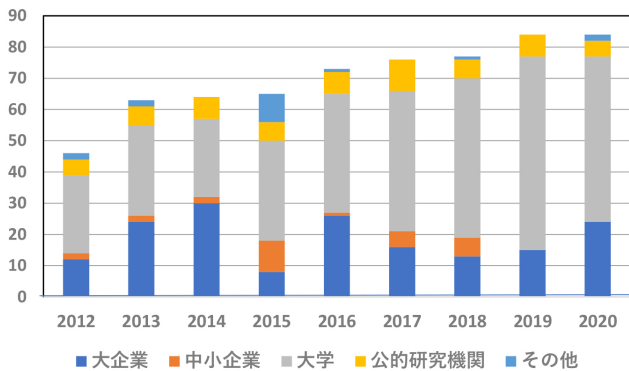


図2 ANSFの支援実績 (微細構造解析 PF: 成果公開)
(出典: 石塚氏提供資料より作成)

の開始から2020年までの9年間の変遷を示す。利用者の所属(大企業, 中小企業, 大学, 公的研究機関, その他)を区別表示している。合計件数は順次増加している様子が伺える。大学・公的研究機関の割合は50~75%, 民間企業の割合は25~50%, 外部供用率は40~60%であり, 成果非公開での利用もほぼ同程度とのことであった。



2. 石塚氏の微細構造解析 PF における担当業務とバックグラウンドとなる過去の経験

石塚氏の PF における担当装置は, 図1の装置群の中で, 次の3装置であった。

- ① 極端紫外光光電子分光装置 (EUPS)
 - ② 超伝導蛍光 X 線検出器付走査型電子顕微鏡 (SC-SEM)
 - ③ 超伝導蛍光収量 X 線吸収微細構造分析装置 (SC-XAFS)
- なお, ①と②についての担当業務は利用者の支援と機

器の維持管理保守であったが, ③については, 支援・保守担当者のサポートであった。

この業務を遂行するに当たっては, 次のような過去の専門的経験がバックグラウンドとなっている。

- EUPS の開発, 運用法の確立 [2] に技術補助者として参画 (平成 20 年~) し, 測定方法や機器の維持管理保守などについての様々なスキルを習得した。
- EUPS で得られた研究成果の学会発表 (応用物理学会) [3] [4][5][6][7][8] や, 論文の共著者 [9][10][11] となったなどの経験により, EUPS の原理や測定データの解釈などについての理解が深まった。
- EUPS で習得したスキル (特に, 真空装置の取り扱い方法など) は, SC-SEM, SC-XAFS での業務でも生かされた。



3. 石塚氏の支援活動

以下に石塚氏が支援活動として担当した装置について, 装置の概要紹介とこれを活用した利用者支援の例を紹介する。

3.1 極端紫外光光電子分光装置 (EUPS)

3.1.1 装置構成と機能の特徴

(1) 装置構成

EUPS (EUV excited photoelectron spectroscopy) はデバイス技術研究部門の富江 敏尚氏がパルスレーザー生成プラズマ光源の応用として1992年に考案し, 開発した [2]。この装置は, レーザープラズマを光源とし, 飛行時

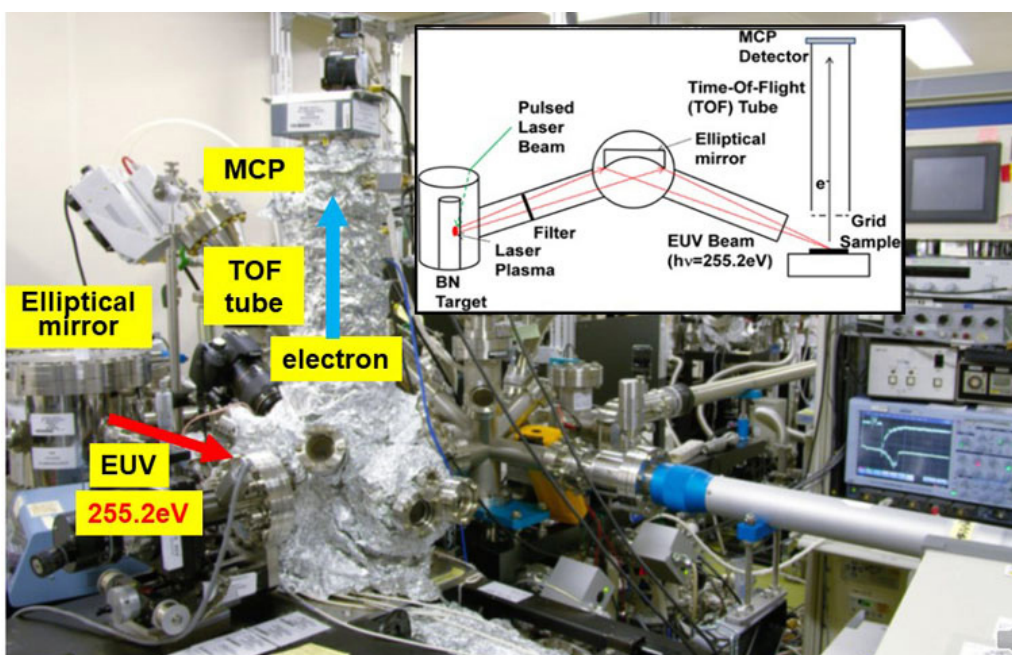


図3 EUPS システムの全景とその動作原理説明図

間法で電子分光することを特徴とする光電子分光装置で、世界で唯一の装置である。

図3にEUPSシステムの全景を示す。図の上部にこの装置の動作原理図が掲げている。原理図の左端にあるEUV（極端紫外線）光源は、短パルスレーザーをBN（窒化硼）に照射し、発生するプラズマから薄膜フィルターを介して取り出した4.86nm（255.17eV）の単色光の光源である。分光器で分光すると強度が4桁程度も落ちるが、分光器を使用しないので、その損失がない。光のパルス幅は3nsで、光源のピーク輝度は通常のX線管球より10桁明るく、放射光を超える。このEUVパルス光を原理図中央の楕円鏡で反射収束させ、原理図右端の試料に照射する。このEUVパルス光照射により試料から放出される光電子を試料上部に設けた飛行管に電子減速用のグリッドを介して導入し、管上部に設けた時間分解

電子検出器で検出する。システム全景写真では楕円鏡から試料に向けてEUV光の放射方向を赤い矢印で、飛行管の中の光電子の飛行を青い矢印で示している。

(2) 飛行時間法によるエネルギースペクトルの抽出

図4は飛行管型の電子分光の説明図である。この分光法が可能なのは、短パルス光源を用いているからである。図4左端の飛行管上部の光電子検出器の出力の時間変化が図4中央の時間波形のグラフである。このデータから、試料から放出される全てのエネルギーの電子が到達時間の違いとして検出されることになる。到達時間の違いは飛行速度の違いで、電子の運動エネルギーの違いによる。時間波形から速度スペクトルが得られ、図4右端の電子のエネルギースペクトルが得られる。

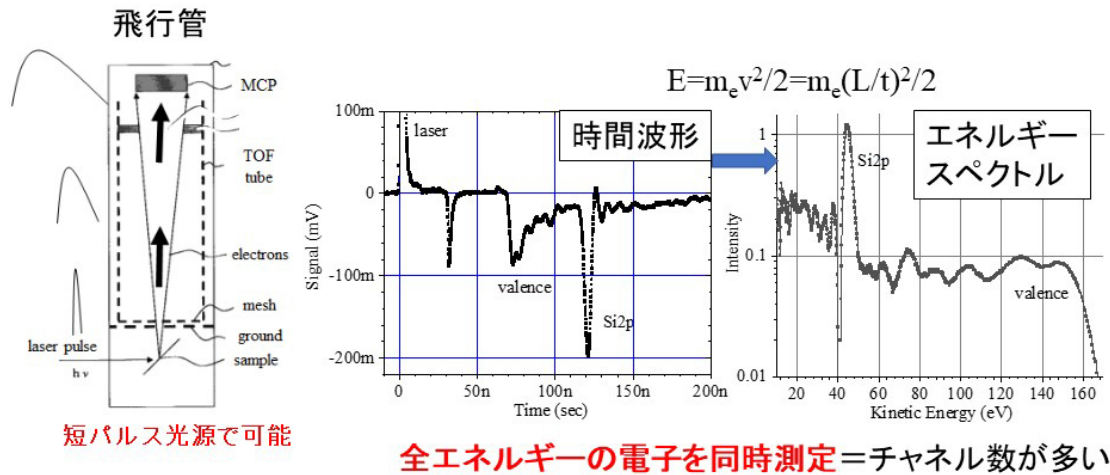


図4 飛行時間法で電子分光

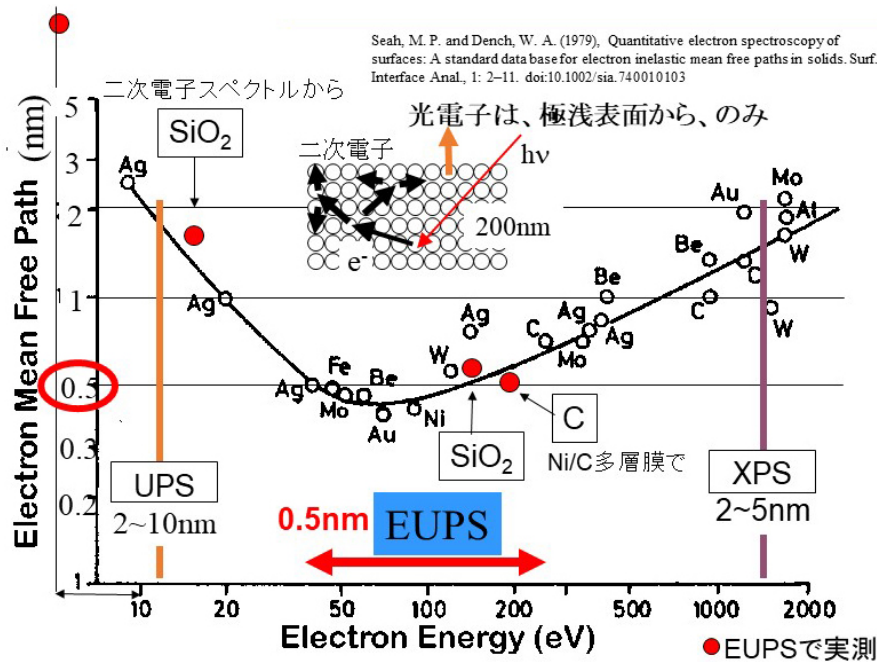


図5 電子のエネルギーと平均自由行程の関係

(3) EUV 照射による表面層 (0.5nm) からの光電子の放出

図5はEUPSの特徴の一つである、試料の表面から深さ0.5nm程度までの浅い領域、即ち、最表面原子層の電子状態を分析できることを説明している。図の横軸は試料を照射する光により励起される電子のエネルギー、縦軸は試料内で発生する光電子の平均自由行程であり、両者の間にはV字形をした実線曲線の関係がある。EUPSの場合、EUV光は255.17eVであり、図中のEUPSと記した青地領域の電子が観測される。この領域の脱出深さは0.5nmである。これに対して従来の電子状態解析に用いられて来たUPS(紫外線光電子分光)とXPS(X線光電子分光)の場合は2~10nmと2~5nmである。このため、最表面原子層を見たいとき、XPSでは深さ2~5nmの光電子スペクトルが重なって見えてしまうのに対し、EUPSでは深い場所からの信号に埋もれないで最表面原子層の信号のみが見える。

(4) 二次電子の活用

図5の中央上部の挿入図に示すように、EUV光は200nm迄入り込む。深いところで発生した電子は周りの原子に衝突して二次電子を生む。二次電子の脱出深さは深く、数nmの深さの情報を持った大量の二次電子も放出される。

図6の右グラフは広いエネルギー領域での電子のエネルギースペクトルを示す。飛行時間法ではエネルギーが大きいと分解能は良くないが、高エネルギー領域に内殻準位から出る光電子のピークが見える。低エネルギー領域の二次電子の強度は光電子の強度の2~3桁も大きい。

つまり、弱励起でも大きな信号になる。XPSなどでは、二次電子は邪魔な信号として捨てているが、実は極めて豊かな情報を含む。本EUPS装置では最も重要な情報として活用している。例えば、EUV光の強度を変えるデータから抵抗を評価する。また、超弱励起で信号が得られることと超高効率の飛行時間での電子分光をするので電荷チャージアップの影響が少なく、絶縁物でも仕事関数が測定できている。図6の左グラフは右グラフの横軸が縦軸になっており、各種記号のデータの関係を示している。

3.1.2 EUPSにおける石塚氏の担当業務

石塚氏の担当業務は、利用者の支援と機器の維持管理保守である。利用者の支援については、試料の調製、前処理(イオン Sputter、赤外線加熱、酸化処理、還元処理等)、測定を行い、解析は装置開発者の富江氏が担当している。石塚氏の平成25年から9年間の支援件数は41件であった。

機器の維持管理保守では、メンテナンスとトラブルへの対応を行った。トラブル対応では、EUPSは産総研で考案、開発されたホームメイドの装置であるため、故障やトラブル発生時の原因究明やその対策もかなりの部分は石塚氏が行い、解決できないときには、開発者の富江氏からのアドバイスのもとで解決している。最初の頃はかなり苦労したが、現在はノウハウが蓄積され苦労は少なくなったと石塚氏は語った。

メンテナンスでは精密な作業も多く(例えば、レーザー光やEUV光の光軸合わせ、試料のトランスファー機構の調整、真空分離用薄膜の貼り替え作業、など)、最初の頃はかなり時間もかかり苦労したとのことであった。

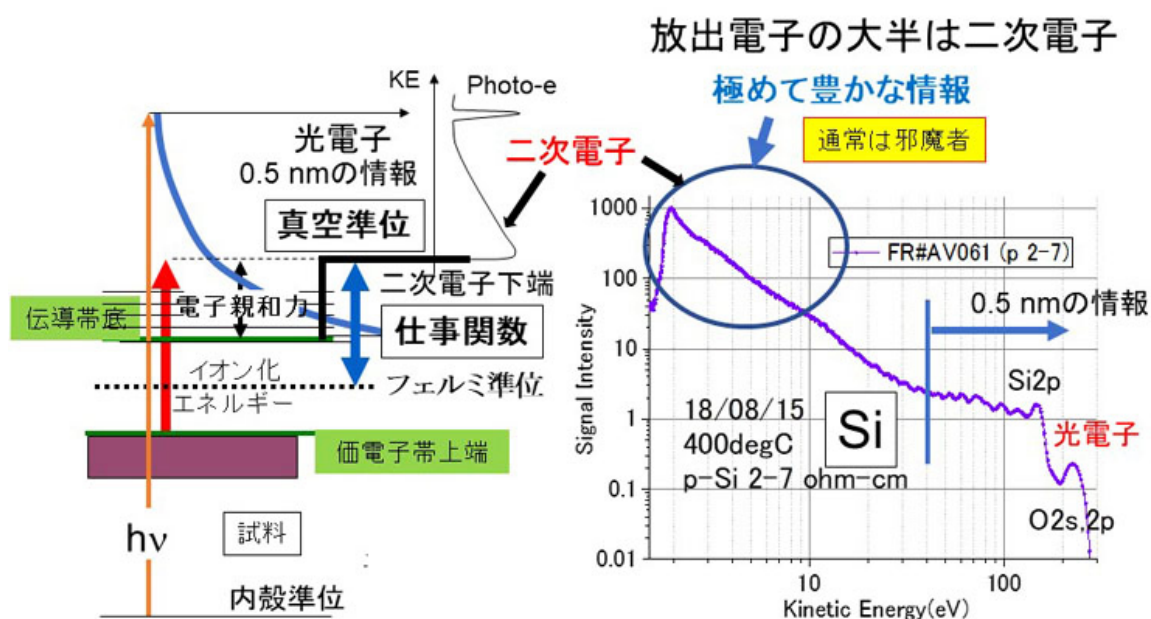


図6 光電子分光法とエネルギースペクトル

3.2 超伝導蛍光 X 線検出器付走査型電子顕微鏡 (SC-SEM)

3.2.1 超伝導蛍光 X 線検出器

X 線検出器には、エネルギー分散型分光器 (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDS) と波長分散型 X 線分光器 (Wavelength Dispersive X-ray Spectrometer : WDS) があり、図 7 に色分けして示すように、エネルギー分散型は X 線検出効率が良いがエネルギー分解能は悪い、一方波長分散型は逆にエネルギー分解能は良いが検出効率は悪い。これに対して産総研は「超伝導トンネル接合 (STJ) X 線検出器」を開発して図 7 の黄色領域を実現している。即ち、EDS の高検出効率と WDS の高エネルギー分解能を併せ実現している。

STJ は、2 枚の超伝導体で薄い絶縁膜を挟んだジョセフソン接合素子で、超伝導体に X 線が吸収されたとき生成

される準粒子を計測することで X 線のエネルギーを測定する検出器である。使用している超伝導体のエネルギーギャップが 1meV 程度であり、EDS の半導体素子に比べて 1000 倍も小さいため、エネルギー分解能の理論的限界は半導体検出器のそれと比べて数十倍改善されることになる。一方、STJ 素子は 100 μ m 角程度と小さく検出感度が低い。産総研ではチップ上に STJ のアレイ (二桁素子) を形成することで感度を高め、図 7 に示す高分解能と高検出効率を両立させている。

3.2.2 超伝導蛍光 X 線検出器を走査型電子顕微鏡 (SEM) に活用

上に述べた超伝導蛍光 X 線検出器の適用装置の一つが SC-SEM で、石塚氏が技術支援で担当している装置である。SEM-EDS での高空間分解能や軽元素の分析のために、軟 X 線を高エネルギー分解能かつ高効率な検出器で測定す

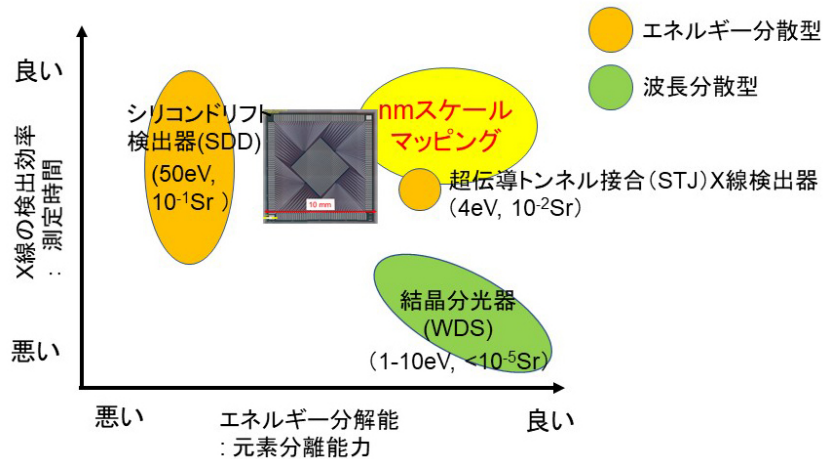


図 7 軟 X 線検出器の性能比較

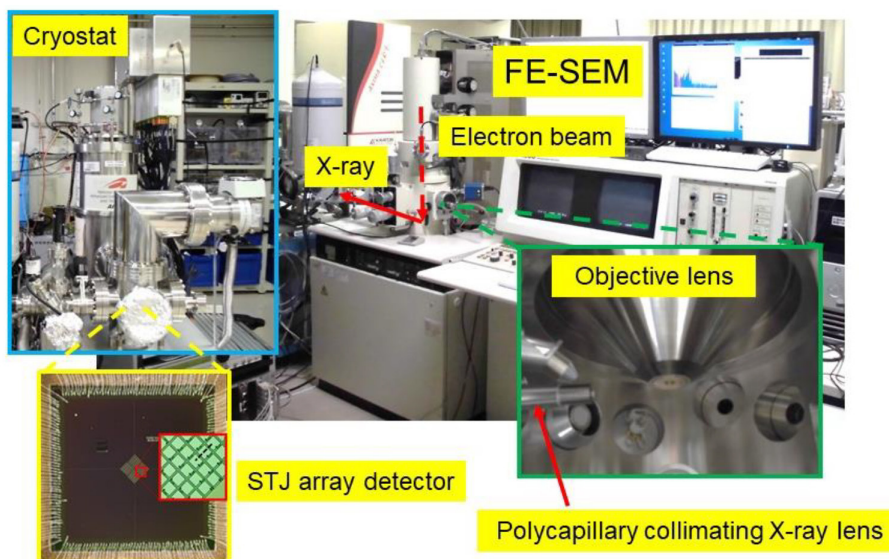


図 8 SC-SEM システムの全景

る必要があった。これに対応するために、産総研では STJ X線検出器付きの SC-SEM を開発した。

SC-SEM は軽元素の K 線や、重い元素の L, M 線を明瞭に分離し、元素分析ができること、低エネルギー X 線に高い感度を持ち、リチウム (Li) の特性 X 線の検出可能であることも確認されている。

図 8 に SC-SEM システムの全景を示す。SEM と STJ-X 線検出器を結合したもので、図の中央と右部分が FE-SEM (電界放射型電子銃 SEM) で、左部分の青線で囲んだ部分が超伝導システムである。その中にある STJ アレイチップで形成する検出器の写真が黄色い枠で示されている。右下の緑の囲みは、FE-SEM 写真の電子ビーム鏡筒 (赤い破線矢印) の根本にある分析室内部の写真で、電子線の対物レンズと試料から放出する特性 X 線をビームとして検出器に送るためのキャピラリーレンズが表記されている。

3.2.3 SC-SEM による分析例 - 微量元素分析

図 9 は Mg を含む GaN の分析例で、1250eV 付近に微量元素 Mg の小さいピークが検出されている。EDS では検出不可能なレベルである。また、WDS では微弱なピークは検出できるが、時間が掛かり過ぎて、実際には対応できない。

3.2.4 SC-SEM における石塚氏の業務

本装置における石塚氏の担当業務も、EUPS と同様に利用者の支援と機器の維持管理保守である。利用者の支援については、試料の調製、前処理 (表面コート (Os, Au, Pt), 表面研磨, クロスセクションポリッシャ, 等), 測

定を行い、本装置ではさらに解析も行った。

この装置については、平成 29 年度より 5 年間に 38 件の支援を行っている。特に苦労したこととしては、超伝導検出器を初めて使ったので、初めの頃は冷凍機の使い方からデータ処理に至るまで分からないことが多く、かなり苦労したと石塚氏は語った。

3.3 超伝導蛍光収量 X 線吸収微細構造分析装置 (SC-XAFS)

3.3.1 SC-XAFS の装置概要

軽元素の微細構造解析のために蛍光収量法による X 線吸収スペクトルを測定する必要がある。そのためには軟 X 線を高エネルギー分解能かつ高効率な検出器で測定する必要があった。これに対応するために、産総研で STJ X 線検出器搭載の SC-XAFS を開発した。

光源として、大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光施設の軟 X 線ビームラインを利用するため、同施設に SC-XAFS を設置した。図 10 はそのシステムの全景である。図の Sample から伸びる矢印の先に試料が設置され、右上の奥から、ビームラインからの軟 X 線が入射する。STJ アレイ検出器は SC-SEM の場合と異なり矢印の先の試料の近くに設置してある。

エネルギー可変の単色光を試料に入射し、入射光エネルギーと蛍光収量の関係を測定することにより、X 線吸収スペクトルを測定する。STJ の優れたエネルギー分解能により高精度の元素選別が可能となる。

真空中での測定ができる固体試料 (パウダーまたは板状 15mm 角以下) が測定対象であり、軽元素の K 吸収端、遷移金属の L 吸収端を測定することができ、元素の結合

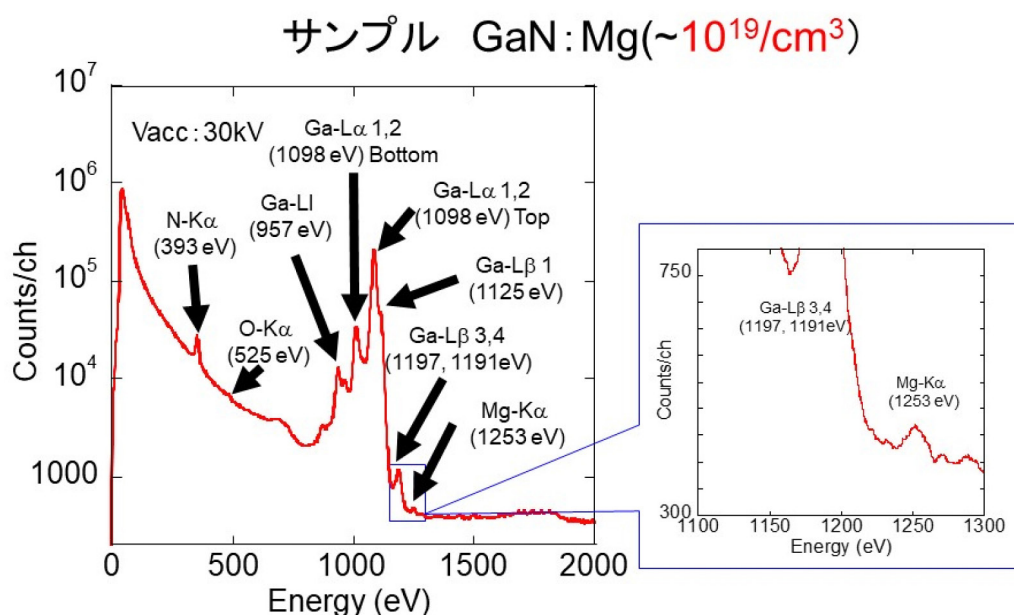


図 9 微量元素分析の例, Mg を含む GaN の例

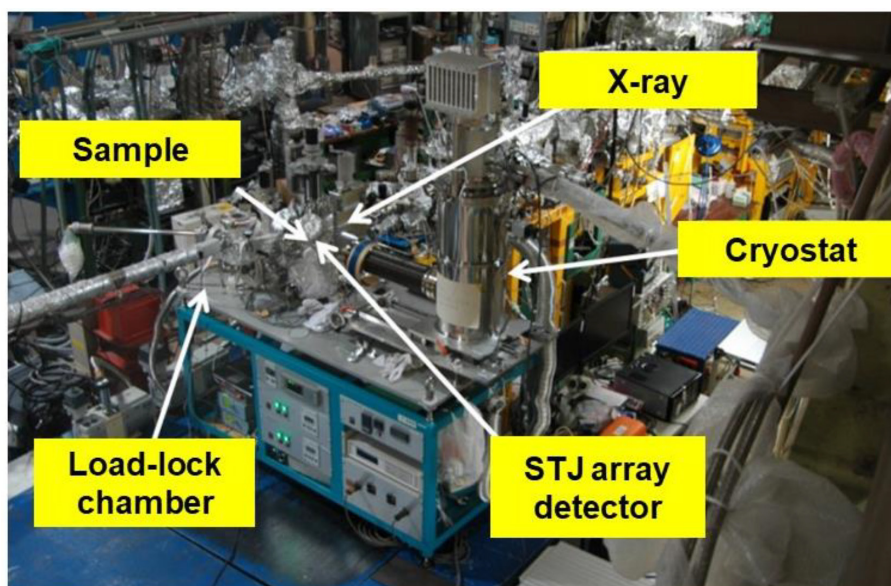


図 10 SC-XAFS システムの全景

状態・ナノ構造などの分析が可能である。特に SC-XAFS では微量元素の測定が得意である。

3.3.2 SC-XAFS による微量元素分析例

SC-XAFS による微量元素分析例を図 11 に示す。SiC 結晶中にドーパした微量の N (窒素) を検出する実験である。図 11 の上のグラフ中に黒の実線で示すデータは、あるエネルギーで測定した蛍光 X 線スペクトルである。同グラフの橙色の部分には、この蛍光 X 線スペクトルについて入射 X 線エネルギーを 385eV から 500eV の範囲で、1eV 刻み、露出時間 200s/ステップで変化させて測定したものを手前（グラフの一番下）から重ねて表現したもので

ある。左下のグラフは、そのステップ毎に上のグラフ赤の矢印で示した範囲の部分蛍光収量を、入射 X 線エネルギー 385eV から変化させるステップ毎にプロットしたものである。なお、右下のグラフは上のグラフの黒の矢印の範囲の全蛍光収量を同様にプロットしたものである。SC-XAFS での部分蛍光収量法での測定により、微量の N のデータを観測できることを示している。

3.3.3 この装置における技術支援活動

SC-XAFS の利用は平成 29 年度からの 5 年間で 7 件であった。石塚氏は、本装置に関しては担当者ではなく、担当者のサポート役として利用者の支援、機器の維持管

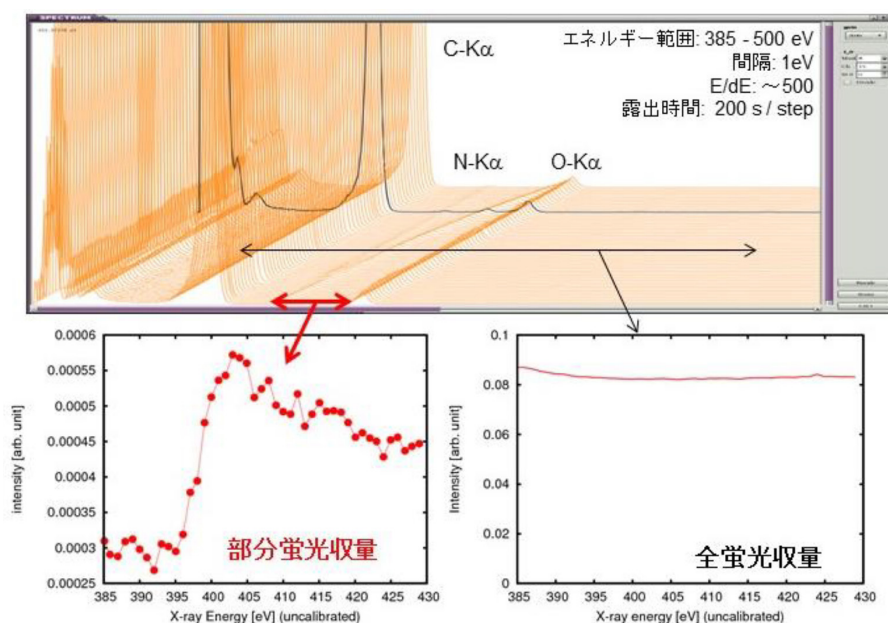


図 11 SC-XAFS の測定例 - SiC 窒素ドーパントの吸収端スペクトル

理保守に関わった。本装置は光源に高エネルギー加速器研究機構のX線ビームラインを使用しており、支援等の度に装置を指定のビームラインに設置する必要があり、その設置作業や光軸合わせに苦労したと語った。



4. おわりに

産総研の微細構造解析PFは、独自に研究開発した計測・解析技術を用いた分析装置を共用に提供するという大変特徴的なPFである。新技術に基づく装置故にシステムとして完成し、運用されるまでには多くの課題の克服があったことと推察される。また、PFの共用装置としての運用においても石塚氏が述懐しているように機器の維持管理保守に当初は随分手が掛かっている。しかし技術支援スタッフの努力によりトラブルを克服している。

石塚氏は利用者への要望として「市販装置では分析できない材料等に対して、産総研独自の分析装置の利用を検討して頂きたい」と述べ、支援者としての今後の抱負としては「担当装置に関するスキルをより高めて、これまで以上に利用者や研修者に満足してもらえる支援を行いたい」と語った。

このPFの独自開発分析装置の利用により、市販分析装置では不可能であった多くの新しいデータが収集・蓄積され、それが新材料や新技術の創出に結びつくことを期待したい。



参考文献

- [1] 産総研 ANCF のパンフレット, <https://unit.aist.go.jp/rima/nanotech/ancf03-skjpublication.html>
- [2] 富江敏尚, 石塚知明: 最表面原子層を分析する光電子分光装置 EUPS の開発 —レーザー生成プラズマ光源の実用化技術開発と EUPS が見せる材料最表面の魅力—, *Synthesiology* Vol.9, No.4 pp.216-234 (Nov.2016)
- [3] 石塚知明, 大塚照久, 葛西彪, 太田裕之, 富江敏尚: 二次電子の観測による TaN 薄膜の金属性の膜厚依存の評価, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 東海大学 (2010), 19p-C-9

- [4] 石塚知明, 大塚照久, 葛西彪, 太田裕之, 富江敏尚: 各種ゲートメタル材料の仕事関数の EUPS による評価, 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 長崎大学 (2010), 16p-S-18
- [5] 石塚知明, 大塚照久, 葛西彪, 太田裕之, 秦信宏, 富江敏尚: 埋め込み界面の EUPS 評価のためのサブ nm 深さ分解能イオンスパッタ, 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学 (2011), 25p-KW-9
- [6] 石塚知明, 大塚照久, 太田裕之, 富江敏尚: イオンスパッタにおけるミキシングの EUPS による評価, 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 山形大学 (2011), 31p-Q-10
- [7] 石塚知明, 大塚照久, 富江敏尚: 実用金属試料の仕事関数の表面処理依存の EUPS による評価, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学 (2012), 18a-F2-4
- [8] 石塚知明, 松林信行, 多田哲也, 富江敏尚: 最表面原子層の Pt 原子の価電子帯構造のオージェスペクトルによる評価, 第 62 回応用物理学学会春季学術講演会, 東海大学 (2015), 12p-D13-5
- [9] Toshihisa Tomie, Tomoaki Ishitsuka, Teruhisa Ootsuka, Hiroyuki Ota: Observation of Work Functions, Metallicity, Band Bending, Interfacial Dipoles by EUPS for Characterizing High-k/Metal Interfaces, *AIP Conf. Proc.* 1395, 148-153(2011)
- [10] Y. Kawaguchi, F. Sasaki, H. Mochizuki, T. Ishitsuka, T. Tomie, T. Ootsuka, S. Watanabe, Y. Shimoi, T. Yamao and S.Hotta: Electronic states of thiophene/phenylene co-oligomers: Extreme-ultraviolet excited photoelectron spectroscopy observations and density functional theory calculations, *J. Appl. Phys.*, 113, 083710 (2013).
- [11] F. Sasaki, Y. Kawaguchi, H. Mochizuki, S. Haraichi, T. Ishitsuka, T. Ootsuka, T. Tomie, S. Watanabe, Y. Shimoi, T. Yamao and S.Hotta: Effects of pn doping in thiophene/phenylene co-oligomers thin films, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 620 (1), 153-158 (2015).

図は全て石塚氏から提供された。

(向井 久和)