

企画特集 10<sup>-9</sup> INNOVATION の最先端 ~ Life & Green Nanotechnology が培う新技術~ 本企画特集は,NanotechJapan Bulletin と nano tech のコラボレーション企画です.

<第 46 回>

# 科学技術に日本の繁栄を託し,原子分解能電子顕微鏡開発から 計測ソリューションへ

日本電子株式会社 EM 事業ユニット 大藏 善博氏, 石川 勇氏, 奥西 栄治氏に聞く

ナノテクノロジーでは、物質・材料をナノス ケールで理解し、制御・創出して、技術や産業 に革命をもたらすことによる社会貢献を目指し ている. このためには、まずもって、原子・分 子レベルの観察が必要不可欠な技術として求め られる. 2016年1月27日から29日に東京ビッ グサイトで開催された「第15回国際ナノテク ノロジー総合展・技術会議 (nano tech 2016) は、これに応える企業として、「斬新かつ先駆的 な技術・製品の出展者を表彰する」 nano tech 大 賞 2016 の特別賞に日本電子株式会社を選んだ. 受賞理由は、「独自技術を活用して分解能が世界 最高レベルの透過型電子顕微鏡を開発. ナノテ クノロジーの研究加速に貢献している点を賞す」 であった. 受賞対象となった高分解能電子顕微 鏡の技術内容や、開発の経緯、今後の展開など



日本電子の展示室にある電子顕微鏡 DA-1 の前で (左から)石川 勇氏,大藏 善博氏,奥西 栄治氏

を伺うべく,東京都西部の昭島市にある日本電子株式会社の本社を訪ねた.お話は,主に,執行役員 EM 事業ユニット長 大藏 善博(おおくらよしひろ)氏, EM 事業ユニット EM 技術開発部 部長 石川 勇(いしかわ いさむ)氏, EM 事業ユニット EM アプリケーション部 部長 奥西 栄治(おくにし えいじ)氏の3人から伺い,電子顕微鏡の 事始めについては,営業戦略本部 YOKOGUSHI 推進室 室長代理 生野 朗(しょうの あきら),総務本部 法務広報室 副主査 浜中 巌(はまなか いわお)の両氏から伺った.

1.日本電子における電子顕微鏡の開発~ 科学技術による日本の復興・繁栄への思い

#### 1.1 電子顕微鏡事始め

日本電子株式会社(JEOL)における電子顕微鏡開発の きっかけは1945年8月の太平洋戦争終戦の時であった [1]. 創業社長の風戸(かざと)健二氏(1917~2012, 社長在任:1949~1975)は,千葉県茂原市出身,海軍 機関学校を卒業し,軍艦妙高に乗って海外を回る中で, 海外の技術が日本より遥かに進んでいることを知った. 風戸氏は1941年に応召し,1944年からは海軍技術研 究所で電波誘導式対空ロケットの開発に従事している時 に終戦を迎えた.復員して民間人となったが,技術の戦 いに敗れたという無念さを感じていたので,日本の再建 は科学振興・工業立国以外にないと確信した.

一方,電子顕微鏡は1931年にドイツベルリン工科大 学のErnst August Friedrich Ruska が試作に成功し(1986 年にノーベル物理学賞受賞),日本では1940年に大阪大 学の菅田 栄治教授が国産第一号機を完成させていた.風 戸氏は偶然手に入れた本から電子顕微鏡に魅力を感じ, 海軍研究所で同僚だった伊藤 一夫氏(1921~)らと組 んで,その開発に着手した.出資者が見つかり,1946 年5月に日の出金属株式会社を設立し,1947年8月に は株式会社電子科学研究所に改組した.仕事場は茂原の 海軍の集会所跡,軍需工場が放出した工作機械を用いて 部品加工を行った.当時は,日本中が経済的に困窮して おり,風戸氏らは研究の合間に自転車で海岸地帯に出か け,海藻を採集して代用醤油を作って研究費や生活費に

#### 充てていた.

試作品製作に当り、問題になったのはレンズ方式であっ た. 静電界で電子線を偏向させる電界型と磁界によるロー レンツ力で電子線を曲げる磁界型がある.まず,製作が 比較的容易で実績のあった電界型を1946年10月に選 んだ.ところが、1947年5月に出来上がった試作機で は高圧電源の安定性が悪く,電界レンズの性能不足で電 子線が結像しなかった.今にして思えば、その後、電界 型電子顕微鏡で先行していたドイツの AEG 社, アメリカ の GE 社,日本の東芝がいずれも電子顕微鏡事業から撤退 しているのは電界型の難しさを表しているのかもしれな い.風戸氏らは、電界方式に代えて磁界方式に取組んだ ところ、僅か4ヶ月後の1947年10月には実用に供し得 る電子顕微鏡の試作に成功し、DA-1型(図1)と命名し た. この透過型電子顕微鏡 DA-1 と伊藤 一夫氏の設計ノー トは、2010年に国立科学博物館の未来技術遺産に登録 された. また, DA-1の開発により, 故風戸氏と伊藤氏は 2016年3月にアメリカで、「先端理化学装置の発展に貢 献し、世界経済における分析化学の役割に脚光を当てる 傑出した人物」を表彰する Pittcon Heritage Award を受 賞した.

#### 1.2 電子顕微鏡事業の展開から分析機器の開発へ

房総の片隅で少数の青年技術者達が電子顕微鏡の製作 に成功したことは戦後の明るいニュースとなり,天皇陛 下(昭和天皇)や,皇太子殿下(現天皇陛下)の来訪を



図1 日本電子の電子顕微鏡初号機 DA-1

仰いだ. 会社は生産体制を整えて, 1948 年中に 8 台の 受注に成功した. しかし, 製作・納入した DA-1 型は木製 の机の上に載せた試作機の域を出るものではなく, 頻繁 に熟練技術者の調整を必要とした. 特に問題だったのは, DA-1 型の分解能は 50Å だったのに, その当時米国では 既に 20Å の分解能の装置ができあがっていたことだった. 分解能向上に向け, 風戸氏, 伊藤氏らは 1949 年 5 月に 研究開発を中心とした株式会社日本電子光学研究所を設 立し, 風戸氏が初代社長となった. 会社の英語名 Japan Electron Optics Laboratory の頭文字を取った JEOL は, 1961 年の日本電子株式会社への社名変更後も会社の略称 として使われている.

新会社では、1949年10月に日本電子1号機となる JEM-1型を完成させた.その後、1956年にはフランス サクレー原子力研究所に輸出第1号電子顕微鏡 JEM-5G を納入するなど電子顕微鏡での実績を積み上げて行った. 一方,広く計測・分析機器に製品を展開しようと、同年 には国産初の核磁気共鳴(NMR)装置を完成させた.風 戸氏は自前主義で、この NMR 開発は独力で行った.さら に、NMR に使用する IC も自社で製作し自社製品に組み 込んだ.この他にレーザー、ビデオやX線 CT の開発な どの自前主義の行き過ぎはあったが、計測・分析機器の 製品展開は、質量分析装置、液体クロマトグラフィ.ア ミノ酸分析装置、光電子分光装置、集束イオンビーム装 置など次々に実現している.

第3代社長になった伊藤一夫氏(社長在任1982~ 1987年)は経営理念を次のように明文化した:「日本電 子は,「創造と開発」を基本とし,常に世界最高の技術に 挑戦し,製品を通じて科学の進歩と社会の発展に貢献す る」.「創造と開発」を基に顧客の要望に応えて,科学の 進歩によって社会の発展に貢献するのが創業社長以来, 日本電子で培われて来た行動指針であり,この流れで計 測・分析装置の製品展開,走査電子顕微鏡,1000kV超 高圧電子顕微鏡,原子分解能電子顕微鏡と電子顕微鏡の 開発が進められた.



#### 2.1 分解能の向上は電子顕微鏡開発の原点

電子顕微鏡の開発は,光学顕微鏡では見ることのでき ない微細な対象を観察したいという要求から始まった. どこまで小さいものが見えるかは顕微鏡の分解能で決ま る.分解能は用いる光源(電子,光)の波長に依存するので, 電子顕微鏡の光学顕微鏡に対する利点は極めて短い電子 の波長による分解能の向上である.

透過電子顕微鏡(TEM)の構成は、光学レンズの代わりに電磁界によって電子線を偏向させる電磁レンズを使用する以外、光学顕微鏡とほとんど変わらない. TEM の

後に、電子線を走査して試料に照射し、試料から発する 二次電子を検出して画像化する走査電子顕微鏡(SEM) が生まれ、試料の微細な形態観察やLSIパターンの寸法計 測などに広く用いられている.さらに、SEM 同様に細く 絞った電子線を走査して照射し、透過電子線強度の像を 検出する走査透過電子顕微鏡(STEM)が注目されるよう になった.本稿で紹介する原子分解能電子顕微鏡はSTEM である(図2).細く絞った電子線を用いるので微細な領 域ごとの構造や組成を分けて捉えやすくなる.細く絞っ た電子が試料に入射すると、試料から二次電子、特性 X 線が放出する.二次電子を用いて SEM 像を観察でき、特 性 X 線を分析することによって試料の元素分析などがで きる(EDS: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy,エ ネルギー分散 X 線分光).

試料中を透過した電子を電子レンズによって結像する と TEM 像が得られる.透過電子の一部は試料で散乱す るので,試料で散乱していない電子を検出器で検出する と明視野像,散乱を受けた電子を検出すると暗視野像の 両方が同時に得られる.また高角度に散乱した電子を円 環状の検出器で検出するとHAADF(高角度環状暗視野, High-Angle Annular Dark-Field)像が得られる.この像は, 電子波の干渉効果が関与しないため,原子の像を反映し ている.円環の穴を通った透過電子のエネルギー分析を 行う EELS(Electron Energy Loss Spectroscopy,電子エ ネルギー損失分光)を加え,HAADFと組み合せると,原 子コラム(電子入射方向に沿って縦に並んだ原子列)ご との元素分析ができる[2].

分解能は様々な要因で決まるが、光や電子線が波であることに基づく回折限界は波長λの1/2がおおよその目

安になり、可視光を使う光学顕微鏡の分解能は数 100nm に止まる.一方、電子線の波長  $\lambda$  は、加速電圧 V のとき、  $\lambda = \sqrt{150/V}$  (Å) で近似できる (1Å = 10<sup>-10</sup>m = 0.1nm = 100pm).従って、電子線の波長は 100kV で約 3.7pm (3.7 × 10<sup>-12</sup>m), 200kV で約 2.5pm, 300kV で約 2.0pm, 1000kV で約 0.87pm となる.対象物の大きさは、ウイ ルスだと数 10 ~数 100nm となり光波長より小さい.結 晶の繰返し周期(格子定数)は 5Å(500pm)前後、原子 半径は 1Å(100pm)程度であり、電子線の波長はこれら より充分短く、原子が観察できることが判る.

しかし,光と同様に電子レンズにも「収差」が存在する. 電子線が一点に収束しないため結像にボケが生じるので ある.収差には成因により色々の種類があるが,球面収 差によるボケは光軸上の1点から出射した電子線が像面 でない位置で光軸と交わるために生じる円状のボケであ る. 凸レンズと凹レンズを組み合わせることで低減する ことが可能な光学顕微鏡と比べると,電子レンズの収差 ははるかに大きく分解能を左右する.球面収差に打ち勝っ て分解能を上げる方法は,これまで,電子の波長を短く すること,すなわち加速電圧を高くすることのみであっ た.このため,高分解能の1000kV電子顕微鏡は3階建 てくらいの高さになってしまった.これに対して,なん とか球面収差を補正しようとする試みが古くから行われ てきた.

電界もしくは磁界レンズの収差は軸対称レンズだと常 にプラスである.軸対称でないレンズでマイナスの収差 を発生させられることは、1940年代にドイツ人のシェル ツアーによって理論的に示されていた.軸対称でない磁 場は複数の電磁石で構成される多極子で作ることができ



図2 走査透過電子顕微鏡(STEM)の機能構成

る.代表的に使われる6極子でマイナスの球面収差を発 生することができるが、同時に大きな非点収差を与えて しまう.そこで2枚の方向が異なる6極子を組み合わせ、 非点収差をキャンセルすることでマイナスの球面収差の みを残すことができた.こうして生じたマイナスの球面 収差で対物レンズのプラスの球面収差をキャンセルする のが、球面収差補正装置である.

今回の nano tech 大賞の原子分解能の透過型電子顕微 鏡(図3)は、収差補正技術を取り入れ、見えなかったも のを見たいという研究者の要求に応えるかたちで進めて きた装置開発の成果である.このため、大学の先生など 多くの研究者とのコラボレーションを行い、国家プロジェ クトに参画して、国産の球面収差補正技術開発を経て実 現したものである.

### 2.2 原子分解能への挑戦~原子分解能実現のための 技術開発

日本電子が参加した国家プロジェクトは、科学技術振 興機構 (JST)の戦略的創造研究推進事業 CREST であった. この事業は、国が定める戦略目標の達成に向けて、課題 達成型基礎研究を推進し、科学技術イノベーションを生 み出す革新的技術シーズを創出するチーム型研究である. 研究領域「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・ 分析基盤技術」の中の研究課題「0.5Å 分解能物質解析電 子顕微鏡基盤技術の研究」が 2004 年 10 月から 2010 年 3 月まで進められた.当時、欧米でも国家レベルでの大 型プロジェクトが発足していたが、我が国では、物質解 析に資する世界最高分解能の顕微鏡を開発するとして企 画されたプロジェクトで [3]、このプロジェクトで開発さ れた電子顕微鏡は目標分解能が 0.05nm であることから、 R005 (Resolution double "O" five) と名付けられた.

プロジェクトでは、すべて自社製の最高加速電圧 300kVの安定化冷陰極電界放出型電子銃、高分解能鏡筒、

安定化電源、高分解能用収差補正装置、収差補正制御ソ フト等を開発し、目標の分解能の 0.05nm を超える分解 能を達成した. 収差を補正することによって、シャープ なビームが得られるのでこれをプローブとすることによ り, STEM 環状明視野観察法による軽元素カラム(Liなど) の検知が可能になった [4]. このように収差補正技術が成 熟していく中で,2009年には STEM 収差補正装置を標準 搭載した最高加速電圧 200kV の原子分解能分析電子顕微 鏡 JEM-ARM200F(分解能 80pm)を"汎用機"として開発・ 上市した. R005 と JEM-ARM200F で培った収差補正技術・ 原子分解能技術を基に開発したのが、さらに分解能の高 い最高加速電圧 300kV の原子分解能電子顕微鏡 JEM-ARM300F(分解能 60pm)である [5]. 高エネルギーの 電子で損傷を受ける物質・材料のために, 80kV, 160kV の比較的低加速電圧でも使用できる.また,STEM として, EDS, EELSの機能も搭載された.この原子分解能電子顕 微鏡には次節に示す要素技術が開発・適用されている.

### **2.3** 原子分解能電子顕微鏡開発の基礎となった 要素技術[6]

#### (1) 12 極子球面収差補正装置

球面収差補正では,R005プロジェクトで軌道拡張型 12極子球面収差補正装置(ETA Corrector: Expanding Trajectory Aberration Corrector)を開発した.図4に中 心部を電子線が通過する12極子(Dodeca-pole)磁極断 面図と12極子を組込んだ電子光学系の模式図を示してい る.レンズ系を厚みの異なる2つの12極子("η"を添え た2つの長方形)で挟む構成とし,試料に近づくにつれ て軌道が拡張する光学系を実現している.軌道拡張光学 系(縮小光学系)は,前段の光学要素が作る擾乱要因や 色収差やノイズ等が試料面上で縮小され,分解能を阻害 する要因を試料に対して小さくすることが出来る.



図 3 原子分解能電子顕微鏡 JEM-ARM300F



図4 軌道拡張型 12 極子球面収差補正装置

#### (2) 高性能冷陰極電界放出型電子銃

高輝度・高安定性を実現するため、電子線源には、基礎技術をR005プロジェクトで開発した冷陰極電界放射型電子銃を用いた. 冷陰極には電子放出面がW結晶の(310)面を用いた. この電子銃からの電子線はエネルギー幅が狭く、干渉性が高い. 冷陰極電子銃はチップ表面が清浄でないと働かない. 真空中のガス分子がチップの表面に少しでも吸着すると電子の放出が阻害される為である. この電子銃を使い物にするには、顕微鏡の使用中を通してガスの吸着を抑制し、高いプローブ電流を一定に保ち続けられる極高真空が必要であった.

そこで、本電子銃の真空系は、エミッター付近に装備 した排気速度の大きい非蒸散型ゲッターポンプ(NEG: Non evaporative getter pump),加速管部を排気する排 気速度 200L/sのスパッタイオンポンプなどを装備した ものとした.これにより、電子銃チャンバの真空度が大 幅に改善し、従来より一桁高い10<sup>-9</sup>Paの真空度を達成 して、電子銃の安定駆動が可能となった.フラッシング して、エミッション電流(チップから放出される全電流) を10μAに設定後、エミッション電流とプローブ電流(試 料まで達した電流)の安定度を測定した(図5).フラッ シング4時間後でも90%以上のプローブ電流が保持され ている.エミッション電流はチップから光軸に対して大 きな角度で放出され,観察には使用しない電子も含まれ るので減衰率が大きいが,極高真空化により観察に必要 となるプローブ電流の低下が極めて少ないため,顕微鏡 の使用上は問題とならない.結果として,冷陰極電子銃 源を8~10時間,約1日連続して使えるようになった.

#### (3) 新しい対物レンズの設計と原子分解能の確認

JEM-ARM300F に対して、二つの新しい対物レン ズを設計・開発した.超高分解能構成 FHP (full high resolution pole piece)と高分解能分析構成 WGP (wide gap pole piece)である.FHP は照射側と結像側の両方で 収差が小さい対物レンズである.FHP 対物レンズを含む 照射系の色収差(電子の波長のゆらぎに起因する収差)は, 従来比 65% に低減された.このレンズを使い,球面収差 補正することでサブ Åの超高分解能を達成した.もう一 つの WGP は,分析性能を強化した対物レンズで,ギャッ プ間のスペースが大きいので厚さのある特殊ホルダーの 利用にも対応できる.

この FHP を使い加速電圧 300kV にて, 方位の異なる Si, Ge, GaN の結晶の高角度環状暗視野(HAADF) STEM 像を観察した. 図 6 のように, Ge と Si 結晶を [114] 方向 から観察し, Sub-50pm 以下の分解能を STEM 像で確認 した.





図 6 JEM-ARM300F の HAADF STEM 像で確認した原子分解能

#### 2.4 原子分解能電子顕微鏡の急速な普及

企業としては数多く売れる汎用装置を開発したい. 一 つの型の高性能電子顕微鏡はこれまで年に 10 台のペース で, 10 ~ 15 年売れていた. そこで今回の原子分解能電 子顕微鏡も 10 年売れるとして 100 台の販売を想定した. 分解能 0.5Å の装置を必要とするユーザーは限られている と当初は考えていた. ところが, この原子分解能電子顕 微鏡の受注実績の立ち上がりは極めて速かった. 4 年で累 計は 100 台になり, その後の 3 ~ 4 年で 150 台を受注 するに至っている. 原子分解能で見たいという要求を持 つユーザーが増え, 最先端技術は汎用化していることを 意味している. まさにナノテクノロジーの普及の醍醐味 である.

## 3.原子分解能電子顕微鏡の様々な観察 結果

原子分解能電子顕微鏡による観察例に,準結晶の構造 解析がある[7].準結晶は結晶の並進対称性は持たない が、原子配列に高い秩序性を持つ固体物質である. Al 組 成 70-72at%, Co 含有量8~25at%, Ni 含有量20~ 5at%のAl-Co-Ni 合金には6種類の2次元準結晶と幾つか の近似結晶が見いだされている. その広い Co/Ni 組成比 に存在する準結晶が安定な理由は, Co と Ni 原子の規則 配列が重要な役割を担っていると考えられてきた. そこ で、原子分解能電子顕微鏡による HAADF-STEM 像と EDS 元素マッピングの観察から Co と Ni 原子の規則配列を明 らかにすることが試みられた. 図7(d)に HAADF-STEM 像(a)と原子分解能の EDS 元素マップ(b),(c)を重ね 合わせて示した. 結晶構造のモデル図(e)と比較すると、 5角形配列を持つ直径1.2nmの Co(●)または Ni(●) クラスターが規則的に存在することが分った.

もう一つの例は、図8に示す粒径約17nmのPd/Auコ アシェル微粒子から取得したEDS元素マップである[8]. このような微粒子は電子線照射によるダメージを受けや すく、照射電流の高い状態での測定では粒子の形状や構 成元素の分布が変化する恐れがある.そのためこの実験 は加速電圧を160kVに、照射電流を30pAに設定して行 われた.取得されたEDS元素マップを見ると各元素の分 布が明瞭に観察されている.特にシェル部分を構成する



図7 原子分解能電子顕微鏡の EDS 元素マップによる AlCoNi 結晶相の原子分布



図8 Pd/Au コアシェル微粒子の EDS 元素マップ

Pd は Au のコアの周りに非常に薄い層として存在してい るのがわかる.元素マップデータから抽出されたそれぞ れの元素の X 線強度プロファイルから, Pd 層の厚さは約 3 原子層に相当する約 0.6nm であることがわかった.

## 4.物質・材料を多面的・総合的に理解 する分析ソリューションへの展開

前節では、原子分解能電子顕微鏡による材料評価の例 を示したが、この装置の持つ複数の機能を利用して新し い結果を得ている.物質・材料,デバイス中の材料の評 価・解析には、いくつもの手段で様々な角度からその材 料の評価・解析を行う必要があるため、電子顕微鏡の分 解能向上,高性能化,多機能化の一方,JEOL は多種の分 析機器を開発・実用化し、その組合せ・活用により材料 に関する総合的な知見を得る分析ソリューションの提供 を "YOKOGUSHI" の名の下に推進している. 計測・分析機 器の開発・利用はユーザーとの連携の許に行われ、この 機器間,産学官を結ぶ「横串」に当る連携を表わすキー ワードが "YOKOGUSHI" である. 産学官連携の例として は、10年を超える東京大学との産学連携、ニコンとの協 業による光学顕微鏡・走査電子顕微鏡連携システムの開 発, 理研 CLST (ライフサイエンス技術基盤研究センター) -JEOL 連携センター設立がある.

"YOKOGUSHI"分析ソリューションの一つの例として、 Liイオンバッテリー(LIB)の解析・評価を紹介する. 様々な計測・分析機器で LIB の構造や動作が解析されて いる.一つの解析は走査電子顕微鏡 (SEM) による電池 材料の形態観察で,LIB の動作解析には Li 原子/イオン の検知/追跡が不可欠である.しかし,SEM の分解能は 1nm 程度であり検知が困難である.これに対し,R005 では高い空間分解能により,LiV<sub>0</sub>O<sub>4</sub>の Li 原子の位置を隣 の酸素や V と区別してとらえることが出来た.図9の右 図は LiV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の構造モデルであり,図9の左図は LiV<sub>2</sub>O<sub>4</sub> の HAADF-STEM 像で,構造モデルの Li の位置に HAADF-STEM 像でも原子の影を明らかに捉えることができた [4].

また,多くの充放電を繰返した後のLiCoO<sub>3</sub> 正極材断面 を電子線マイクロアナライザ(EPMA)で元素分析する と、中心部分のAl集電体(図10中心の黒帯)から離れ、 両端のセパレータに近づくに従ってLiの信号強度が高く, 元素分布に偏りが生じていることが分った(図10).こ の元素分布の偏りが劣化の原因の一つと考えられるとい う[9].ちなみにこのEPMAもJEOLの看板装置の1つで あり、TEMで培った電界放射型電子銃を搭載し、これま でにない高性能を達成したものである.

このほかにも、Liイオン電池の評価・解析には様々な 分析機器が利用できる.例えば、光電子分光装置(XPS) により,化学結合状態,充放電後の負極材の分析ができる. 正極材/負極材,セパレータ,電解液に対し,上記の他 にも,NMR,蛍光X線分析,オージェ電子分光,ガスク ロマトグラフ/質量分析(GC/MS)など様々な機器の 適用例がある[9].

Liイオン電池以外にも "YOKOGUSHI"の成果が報告さ



図9 Liイオン電池に用いられる LiV2O4の原子分解能電子顕微鏡による解析



図 10 EPMA で観測された充放電後の Li イオン電池正極における元素分布の偏り

れている. 例えば, JEOL は,「核磁気共鳴技術と透過電子 顕微鏡技術を活用した< YOKOGUSHI >研究成果が発表さ れました」というニュースリリースを行った. この研究成 果は,東京大学における耐溶剤性を高めた触媒の開発で, NMR と電子顕微鏡の組合せで,開発した触媒の構造が従 来品と違っていることを確認している [10].

JEOL は、祖業の電子顕微鏡の技術革新に止まらず、創 業以来の計測・分析機器の積極展開により、計測ソリュー ションを提供し、科学技術の発展に貢献しようとしている.



0.5Å (= 50pm, 0.05nm)という原子レベルの分解能 で電子顕微鏡観察ができるようになった.これを可能にし た要素技術の1つは,70年間達成できなかった電子レン ズの収差補正にあった.しかし,その成功は,高真空の 実現,電気回路と装置の機械的な安定化など,原子分解 能実現を阻む数多くの障害を取り除く地道な努力なしに 達成できるものではなかった.この原子分解能電子顕微 鏡のルーツは,日本の繁栄を科学技術の発展に託そうと した創業者風戸健二氏の思いにある.平成28年度に始 まる第5次科学技術基本計画は,未来の社会,"Society 5.0" 実現への科学技術の貢献を打ち出した.原子分解能電子 顕微鏡のさらなる発展とそれを組込んだ"YOKOGUSHI"と 名付けた計測ソリューションの提供が,その一端を担う ことを期待したい.



- [1] Chemical Heritage Foundation,「風戸健二」,機器分 析の創業者達 - 近代社会をかたちづけた人々 -, p.49, 分析産業人ネット「機器分析の創業者達」編集委員 会編,2010年9月9日 特定非営利活動法人 分析 産業人ネット発行
- [2] 高角度散乱暗視野(走查透過電子顕微鏡)法, http://www.jeol.co.jp/words/emterms/search\_result. html?keyword=HAADF-STEM
- [3] JST 先端計測分析技術・機器開発プログラムに おける今後の展開について,平成27年7月23 日文部科学省科学技術・学術政策局研究開発基

盤課, http://www.mext.go.jp/b\_menu/shingi/ gijyutu/gijyutu17/006/shiryo/\_\_icsFiles/afieldfi le/2015/08/10/1360828\_02.pdf JST CREST 戦略的創造研究推進事業 終了領域「物質 現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技 術」, http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research\_ area/completed/bunya02-2.html

- [4] K. Takayanagi, Y. Oshima, T. Tanaka, Y. Tanishiro, H. Sawada, H. Hosokawa, T. Tomita, T. Kaneyama, and Y. Kondo, "Lithium Atom Microscopy at Sub-50 pm Resolution". JEOL News, Vol. 45, No. 1, pp. 2-7 (2010)
- [5] 究極の原子分解能電子顕微鏡 JEM-ARM300F を販売 開始, JEOL ニュースリリース 2014/05/07, http:// www.jeol.co.jp/news/detail/20140507.776.html
- [6] 沢田英敬, 奥西栄治, 志村直軌, 佐藤一仁, 森下茂幸, 佐々木健夫, 神保 雄, 河野祐二, 細川史生, 成瀬達雄, 湯浅修一, 有馬則和, 脇俊 作, 片境浩二, 小林正明, 田中宏典, 田中裕之, 外山勝弘, 近藤行人, 金山俊克, 「超高分解能を実現した " 原子分解能分析電子顕微鏡 JEM - ARM200F"」, 日本電子 News, Vol. 46, No. 1, pp. 35-40, September 2014
- [7] 平賀 賢二,安原 聡,「原子分解能のエネルギー分散
  型 X 線分光法の準結晶の構造研究への応用」,日本電子 News, Vol. 47, No. 1, pp. 27-35, August 2015
- [8] 奥西栄治, 佐々木健夫, 沢田英敬, 神保 雄, 岩澤頼信, 宮武耕志, 湯浅修一, 大西市朗, 箕田政顕, 金山俊 克, 近藤行人,「GRAND ARM における超高感度 EDS 分析システムの開発」, 日本電子 News, Vol. 47, No. 1, pp. 42-47, August 2015
- [9] JEOL Application Note リチウムイオンバッテリー
  ノート No. 0201A587C (Bn)
- [10]「核磁気共鳴技術と透過電子顕微鏡技術を活用した
  < YOKOGUSHI > 研究成果が発表されました」JEOL
  ニュースリリース 2013/07/16, http://www.jeol.
  co.jp/news/detail/20130716.521.html
  「ニッケルナノ粒子をカルベンで活性化した新しい
  高分子固定化触媒を開発! ~架橋基と配位子の二つ
  の役割を担うカルベン~」東京大学プレスリリース,
  http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2013/33.html

(古寺 博)