

NIMS NOW

NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE

No.6
2015

原子を 観る その先へ

電子顕微鏡を巡る

系譜と挑戦



田中 信夫

日本顕微鏡学会長
名古屋大学
名誉教授



より細かく見たいという人類の 知的欲求

木本 電子顕微鏡の発明から話を始めたのですが、電子顕微鏡を初めて見た人は、学校の理科室にある顕微鏡と大きさや形がずいぶん違うと驚きますね。

田中 理科の授業で馴染みのある光学顕微鏡は、光を試料に照射し、透過してきた光がつくる像をガラスの凸レンズで拡大して観察します。17世紀、オランダで発明されました。一方、電子顕微鏡の歴史をたどると、1923年のフランスのド・ブロイによる「電子は波でもある」という言葉に行き着きます。それまで電子は粒子だと考えられていました。電子が波ならば、光学顕微鏡と同じような仕掛けで電子を使って物を拡大して観察できるはずだ、というアイデアが電子顕微鏡の始まりです。

物をどれだけ細かく見ることができるかという分解能は、波長によって決まります。波長が380～800nm（ナノメートル。1nmは10億分の1m）の可視光の場合、分解能は100nm程度が限界です。一方、電子の波長は可視光よりはるかに短いため、理論的には原子レベルの大きさも観察できます。

しかし、電子顕微鏡の実現には問題がありました。ガラスのレンズでは電子がつく

その先へ 原子を 観る、

電子顕微鏡を巡る
系譜と挑戦

「物をより細かく見たい」
それは人類の知的欲求の1つ。
そして人は光を拡大する顕微鏡を作った。

しかし科学者たちの情熱は、それで満足しない。
さらに極小の世界への扉を開く。
光の代わりに電子を使い、
ついには原子をも見ることに成功した。

原子に至るまでの道のり、
そして、これからの電子顕微鏡が魅せる世界とは――

日本から見た 先進電子顕微鏡の 進歩の歴史

今、顕微鏡の分解能は、すでに原子サイズ以下の50pm^{*}に達している。

その進化を可能にしたのは何だったのか。

キーワードは「高電圧」と「収差補正」。田中信夫 日本顕微鏡学会長と、

NIMSで最先端の電子顕微鏡を駆使して材料研究に取り組んでいる木本浩司 ユニット長。

師弟関係にあるこの二人が、電子顕微鏡発展の歴史とこれからを語り合う。

^{*}ピコメートル。1pmは1兆分の1m

木本浩司

物質・材料研究機構
先端的共同技術部門
表面構造・物性ユニット
ユニット長

る像を拡大できないのです。そうした中、ドイツのハンス・ブッシュが1926年、ドーナツ型のコイルに電流を流して発生させる磁場が、電子に対してガラスの凸レンズと同じ作用を持つことを示しました。そして1931年、ドイツのエルンスト・ルスカが世界で初めて電子顕微鏡の開発に成功したのです。

日本での始まり

木本 日本での電子顕微鏡開発の始まりは、1939年につくられた日本学術振興会の小委員会です。

田中 ドイツで電子顕微鏡が発明されたことは、日本にもすぐ伝わりました。それで、国産の電子顕微鏡を開発するべきであると、東京大学の瀬藤象二先生を委員長として日本学術振興会の中に「電子顕微鏡第37小委員会」が組織されたのです。

木本 大学や研究所の研究者だけでなく、メーカーの技術者も入っていたと聞いています。

田中 日立製作所や島津製作所、東京芝浦電気（現在の東芝）、横河電機などが参加しています。第二次世界大戦に突入するとドイツからの情報は途絶えましたが、独自に開発を進め、1941年には国産初の商用機の製作に成功しました。1945年に終戦を迎えると海外の進展状況が伝わってきま

したが、日本が遅れているとはまったく感じなかったと、私の師である上田良二先生が言っていました。1946年には、現在の電子顕微鏡の主力メーカーの一つである日本電子の前身、日本電子光学研究所も誕生しています。そして1949年には、日本顕微鏡学会が設立されました。今、私が会長を拝命していますが、日本の学会の中でも古いほうです。

高電圧という戦略

木本 電子顕微鏡は理論的には原子レベルの分解能があるのですが、当初は理論通りの分解能が出ませんでした。

田中 レンズの端の方を通過した電子は焦点位置からずれてしまうため、像がぼけます。それを球面収差といいます。この収差のために解像度が制限されてしまうのです。電子顕微鏡の発明以来、私たちはずっとこの収差に悩まされてきました。また電気的安定性も長年の問題でした。

木本 収差が残ったままでも、電子の波長を短くすれば分解能を上げることができま。そこで、電子に高い電圧をかけて加速させることで波長を短くする超高圧電子顕微鏡が開発されました。私が学生だった1990年ごろには、ほぼ原子分解能を達成していました。超高圧電子顕微鏡をつくっ

ていたのは日本のメーカーだけで、海外にも輸出していましたね。

田中 超高圧電子顕微鏡は一世を風靡しましたが、加速電圧を上げることで電子の波長を短くするのにも限界があります。電子の速度が光速に近づくと、アインシュタインの特殊相対性理論によって電子の質量が大きくなるため、それ以上スピードが上がらず波長が短くならないのです。この時期、超高圧電子顕微鏡の分解能も一つの頭打ちになってしまいました。

電子顕微鏡を巡る系譜、ドイツと日本

木本 一方、ドイツでは、球面収差の補正に挑戦していました。その中心となったのが、2015年度のNIMS賞を受賞されたハラルド・ローゼ、マキシミリアン・ハイダー、クヌート・ウルバンです。田中先生は3人をよくご存じで、研究の進展もリアルタイムで見られましたね。彼らはどのように収差補正技術を実現していったのでしょうか。

田中 まず、なぜ日本では収差補正技術が開発されず、ドイツだったのかという疑問があるでしょう。それは、ドイツには電子顕微鏡を生み出した学問上の土壌があり、永々とした系譜に支えられているからです。収差については、ドイツのオットー・シェルターが1930年代から基本的な研究を始



めています。1970年代に、その研究室で助教をしていたのがローゼでした。そして、ローゼの学生がハイダーです。彼らが収差補正に成功する1990年代半ばまで60年以上の間、そう恵まれない環境の中で脈々と研究を継承してきたのです。残念ながら日本にはこれほどの系譜はありません。文献を読んで原理的な部品の試作をしていた人はいませんが、一人ではとうてい勝てません。

木本 シェルツァーをさらにさかのぼると、量子力学の開拓者アルノルト・ゾンマーフェルトにつながるそうですね。しかし、日本の電子顕微鏡の研究にも別の面で連続と続いてきた伝統があり、私自身それは誇りに



思っています。

田中 日本における電子顕微鏡・電子回析の研究者の系譜をざっくり言うと、1900年代初頭の寺田寅彦から始まります。寺田の弟子が西川正治で、その弟子が三宅静雄、菊池正士、上田良二です。三宅先生はX線回折、菊池先生は原子核、そして上田先生が電子顕微鏡の研究に進みました。ほかにもいくつかの系譜があり、素晴らしい成果もたくさん出ています。しかし、収差補正ではドイツのこの系譜には勝てませんでした。

上田先生から、こう言われたことがあります。「ヨーロッパの科学というのは湖の底までしっかりと凍っているんだよ。ギリシャの時代からだからね。日本の科学は、凍っているのは湖の表面だけ。だから、少し暴れると氷が割れる!」と。

不可能への挑戦

田中 光学顕微鏡のレンズにも収差はありますが、凹レンズと組み合わせて収差を打ち消すことで補正ができています。しかし、電子顕微鏡で使っている軸対称の磁場では凹レンズの作用は出せないことを、シェルツァーが1936年に示していました。彼は1947年に、複数の磁極で構成される多極子レンズがつくる非軸対称の磁場を組み合わせることで収差を補正できると提案しています。ローゼたちは、その方法で収差補正の実現を目指しました。

木本 収差補正の方法が理論的に示されてから実用化されるまでに年月がかかりました。彼らはよく講演で「Mission impossible」（極めて難しい任務）と語っていますね。

田中 ハイダー本人から聞いたのですが、収差補正装置の開発で一番苦しかったのは成功する直前、1990年前ごろだったそうです。周囲からは不可能だと言われ、研究資金もなく、自分でもできないかもしれ

正できません。

田中 その場で収差を測定できるデジタルCCDカメラ、高精度な制御ができるソフトウェアなどさまざまな技術が成熟したのが、1990年代初頭でした。また、1970年代後半にドイツのフリードリヒ・ゼムリンが提案した収差を測定する方法も役立ちました。そしてウルバンが実際の観察を担当し、1990年代半ば、ローゼ、ハイダー、ウルバンにより、収差補正を用いて電子顕微鏡の分解能の向上に世界で初めて成功しました。

収差補正装置の開発には、もう一つの流れがあります。走査透過型電子顕微鏡（STEM）を開発したアルバート・クルーの流れをくむイギリス・ケンブリッジ大学のオンドレ・クリバネックがSTEM用の収差補正装置を開発し、1999年に分解能の向上に成功しています。

日本で初めて収差補正装置導入を決めた理由

木本 日本では、ローゼらの方法と異なり、薄い膜をレンズの中に入れて電圧をかける方法や、撮影した後の画像処理で収差を補正していました。超高圧電子顕微鏡でもきれいな像が得られていたので、当初は収差補正装置を導入しなくても十分だと思っていた人も多いと思います。

さまざまなナノの物性値を計測できる装置として発展させていく必要がある。

田中信夫

ないと思った。収差補正の実現に時間がかかったのは、周辺技術が追い付いていなかったのも一因です。

木本 収差を補正するには、現在どのくらいしているかを測定して多極子レンズを調整する必要があります。しかし1990年代まで、電子顕微鏡の像はフィルムで撮って現像するのが一般的でしたから、収差の測定まで時間がかかります。その間に顕微鏡の状態が変わってしまうかもしれないので、フィルムを使っている限りなかなかうまく補

田中 私は応用研究者ですから、収差補正ができることを証明しただけでは意味がなく、きれいな像、高い分解能が安定して得られなければ仕事にはなりません。自分で導入する価値が本当にあるかを確かめるために、ハイダーのところに5回以上通いました。

木本 田中先生は2000年ごろに日本で初めて収差補正装置を導入しました。決め手は何だったのですか。

田中 ハイダーの技術者としての誠実さ

に惚れ込んだからです。私が持っていった試料でテストしてもらおうと、そのときの装置は応用で使えるレベルではありませんでした。問題点を伝えると、3ヵ月後に行ったときには見事に改善されていました。彼は技術者としてのレベルも高く、人間的にも素晴らしく頼りになります。性能だけでなく、そういう信頼関係も重要です。

木本 ハイダーも、必死になって開発した装置はきちんと使える人でなければ売らないはず。田中先生だから、売ってもいいと思ったのでしょうか。

収差補正がもたらした恩恵

木本 収差補正装置によって、分解能が

きるのは、一番の懸案だった球面収差と呼ばれる3次の収差だけです。収差はより高次のものがあり、今後も補正技術の開発が必要。日本は球面収差補正装置の実用化では遅れましたが、今後は海外と肩を並べていけるのでしょうか。

田中 2005年に開始したアメリカのTEAM (Transmission Electron Aberration-corrected Microscope Project) など、各国で収差補正のプロジェクトが立ち上がっています。日本でも科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) として2004年と2006年から二つのプロジェクトが始まりました。その過程で、国産の収差補正装置が入った電子顕微鏡を日本電子が製作し、50pm以下の

2、3ヵ国しかありません。日本は確実に、キャッチアップしていると思います。

木本 電子顕微鏡について、今後どのような技術発展が必要だとお考えですか。

田中 原子が見えたと言いますが、ほとんどの場合は結晶中に並んでいるたくさんの原子がみたらし団子のように、縦に重なった状態を見ているのです。重なっている原子1個1個を三次元で見えるようにするのが一つ。また、原子の像を撮るだけでなく、さまざまな物性値を局所的に計測できる装置として発展させていく必要があります。原子の種類を見分けることは、木本さんが取り組んでいる電子エネルギー損失分光法で

日本の電子顕微鏡研究にも長大な系譜がある。 それは誇り。

木本浩司

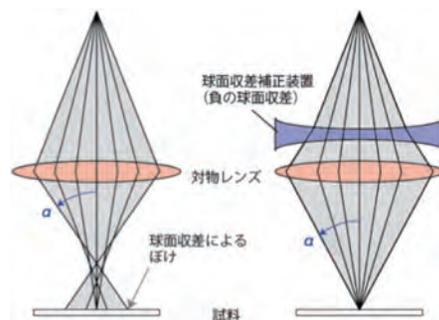
飛躍的に上がり、現在は50pm (0.05nm) 以下にまで達しています。水素原子の半径が53pmなので、原子半径以下です。収差補正装置の登場は、分解能の向上以外にも、観察対象が広がるなど大きなインパクトがありました。例えば、グラフェンやナノチューブのような原子1個分の厚さしかないナノ物質は、超高压電子顕微鏡では高エネルギーの電子ビームによって損傷してしましますが、低い加速電圧で試料を壊さずに高分解能で観察できるようになりました。これは材料研究にとって非常にうれしいことです。

田中 また、これまでは像のコントラストを出すために像を少しぼかしていたのですが、それが不要になったことで、界面の研究も大きく進みました。計測時間も、例えば1時間かかっていたものが1分で済みます。時間短縮は、特に半導体デバイスの製造管理など産業利用で重要です。

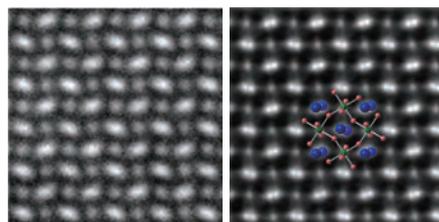
「像を見るだけ」から先へ

木本 収差補正装置が普及してきましたが、現在製品化されている装置で補正で

分解能を達成しています。さらに日本独自の収差補正装置も開発し、5次の収差補正にも成功しました。色収差の補正にも取り組んでいます。現在、収差補正装置が入った透過型電子顕微鏡 (TEM) をつくれる国は、



収差補正の原理



収差補正装置による分解能の向上

白い点が原子。従来型の透過型電子顕微鏡では、近くにある2個の原子を分けて観察することができず、白い点が楕円形になっている (左)。収差補正装置を用いた透過型電子顕微鏡では、2個の原子を分けて観察できる (右)。



実現できています。次は、原子同士の結合の“手”を見たい。欧米では、スピン偏極による散乱、非弾性散乱の計測にも力を入れ始めています。日本でも今すぐそれらに取り組まないと、再び引き離されてしまいます。木本さんをはじめ、日本の若手研究者に活を入れたいといけなくてね。

木本 頑張ります。

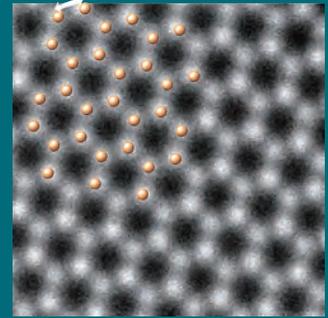
(文・鈴木志乃 / フォトクリエイト)



原子が見える 元素が分かる

結晶中の原子 1 個 1 個を捉えるだけでなく、
原子配列を元素ごとに分けて画像化する。
それを世界で初めて実現したのが、木本浩司ユニット長である。

0.142nm



収差補正STEMで観察したグラフェン

電子顕微鏡で原子を見ると……

電子顕微鏡を使うと原子が見えると言
う。では、どのように見えるのだろうか。

走査透過型電子顕微鏡 (STEM) は、細
く絞った電子ビームを試料に当てながら走
査し、試料を透過してきた電子で像をつ
くる。得られるのは、白い点が並ぶモノク
ロ画像である (図1左)。白い点が原子だ。電子は
試料中の原子と相互作用して散乱されるた
め、原子の位置が明るくなる。原子番号が
大きい元素ほど電子の散乱が大きくなり、
点が明るくなる。しかし、モノクロ画像だけ
から各原子について元素の種類を見分け
ることは、とても難しい。

「原子の配列が見えるというのは、とて
もすごいことで、眺めているとわくわく
します」と木本は話す。「しかし、電子
顕微鏡の解析結果を材料開発などに役
立てるには、どの元

素がどのように配置しているかという情
報が重要です。それには、それぞれの原
子について元素の種類を識別する必要
があります」

原子配列を元素別に可視化

木本は、2003年から元素の識別を
目指した研究に取り組んできた。注目
したのは、照射した電子が試料中の原
子と相互作用して失うエネルギーであ
る。原子は、中心に原子核があり、そ
れを取り囲むように電子がいくつかの
殻をつくっている。照射した電子が、
原子の内殻の電子と相互作用して失
うエネルギーは、元素ごとに固有で
ある。そのため、原子の内殻の電子
と相互作用してきた電子を捉え、エ
ネルギーを計測することで、その原
子がどの元素かを知ることができる。
「この方法は電子エネルギー損失分
光法と呼ばれ、STEMと組み合わせ
ると、原子

ごとに元素の種類を識別できることは
1980年代に提唱されていました。し
かし、原子配列のレベルでは、まだ
実現していなかったのです」

元素を識別するには、原子1個1個
の電子エネルギーの損失を計測する
必要がある。そのためには、電子ビ
ームを原子の直径以下の0.1nmま
で細く絞って、1個の原子に当て
なければいけない。それが難しい。

木本は、既存のSTEMの改良に着手
した。まず、電子ビームが狙った原
子の位置からずれないように、STEM
の機械的・電気的安定性を約10倍
向上させた。それを無振動特殊実験
棟に設置。さらに断熱材を切り貼り
して装置を包んで温度変化を抑え
るなど、外乱を極限まで排除した。

そして2007年、木本は、世界で初
めてSTEMと電子エネルギー損失分
光法を組み合わせることによって、
原子がどのように

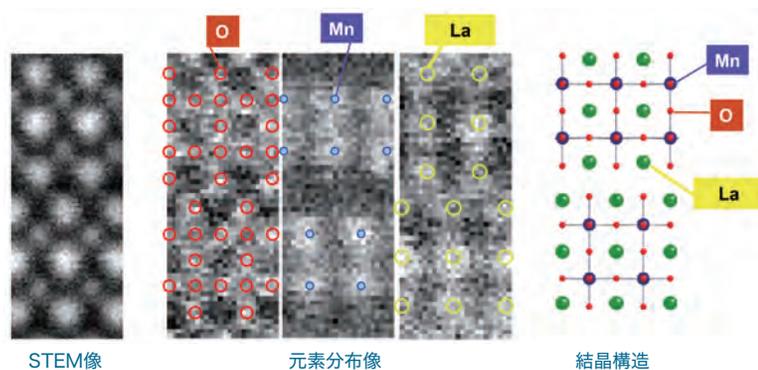


図1: マンガン酸化物のSTEM像と元素の識別
STEM像では、元素の位置が明るく観測されるが、元素の種類までは識
別できない (左)。STEMと電子エネルギー損失分光法を用いると、元素
ごとに原子の配列をそれぞれ識別することができる (右)。



図2: 収差補正走査透過型電子顕微鏡

並んでいるかを元素別に可視化することに成功し、科学雑誌『Nature』に発表した(図1)。解説記事ではその意義をたてる言葉が並んだ。しかし、像を得るのに1時間ほどかかっていることなど、実験装置上の限界が指摘されている。「収差と呼ばれるボケやゆがみを補正する装置が付いたSTEMがあれば、もっときれいな像を、もっと短い時間で得られることは分かっていたのですが、当時のNIMSにはありませんでした。でも、装置がないからできないとは言いたくなかった」と木本。「装置の改良に加え、結晶内部での電子の進み方や原子による散乱など量子力学的な効果についてシミュレーションを行なって検討したりすることで、収差補正装置なしでも実現できる道を模索しました」

木本の論文から3ヵ月後、『Science』に収差補正STEMと電子エネルギー損失分光法を用いて原子の元素識別に成功したという米国研究者による論文が発表された。「画質は同程度ですが画素数が多く、広い視野を30秒で撮れるという。衝撃でした。私たちのように小さな領域を1時間もかけて計測しているようでは材料評価には使えません。でも、世界で初めて実現したということの意義は大きいと思っています」

空間解像度は原子の半径と同じ

2010年末、念願の収差補正装置が付いたSTEMがNIMSに導入された(図2)。それは、騒音と振動を避けるため、大きな道路から一番離れた敷地の奥まったところにある建物の地下に設置されている。さらに床振動を抑えるために装置の下に除振台を置き、顕微鏡室のドアは気圧の急変を避けるため二重で、室温や風量の変動しないようになっている。試料をセッティングした後の操作はすべて、断熱の二重窓で隔てられた隣の部屋で行なう。「収差補正装置が付いていても、環境の外乱を徹底的に排除しなければ、精度よく原子を見ることはできないのです」と木本は言う。現在の空間解像度は50pm(0.05nm)。原子の中で最も小さい水素原子の半径(53pm)とほぼ同じだ。

「私たちは、納入された装置をそのまま使うわけではありません。装置を改造し、計

測システムを制御するソフトウェアを独自に開発することにより、メーカーが保証する仕様以上の性能を出し、私たちにしか見えない物を見ようとしています」

性能の高さを示すのが、グラフェンの像である(タイトル横)。グラフェンとは炭素原子が六角形の格子状に並んだもので、原子1個の厚さしかない。「これほどきれいなグラフェンの画像は、なかなか撮れないでしょう。顕微鏡メーカーの方が、プレゼンテーション用にこの写真が欲しいと言ったほどですから」

この像は、NIMSに収差補正装置がないころから独自に開発していたソフトウェアを用いて自動計測し、300枚の画像を重ね合わせて作成したものだ。

軽い元素も識別可能に

木本らのグループは収差補正STEMを用いて、NIMSだけでなく、国内の大学や研究機関、民間企業から依頼された試料の解析も行なっている。その一つが、ビスマス(Bi)系の高温超伝導体だ。NIMSで1988年に開発された材料で、Biとストロンチウム(Sr)とカルシウム(Ca)、銅(Cu)が層状に重なっている。層の数が異なるものがいくつか開発されており、それぞれ超伝導状態になる遷移温度が違う。STEMと電子エネルギー損失分光法を用いて、原子配列を元素別に可視化することに成功した(図3)。原子の配列と物性の関係が明らかになり、実用材料の開発に役立つと期待されている。

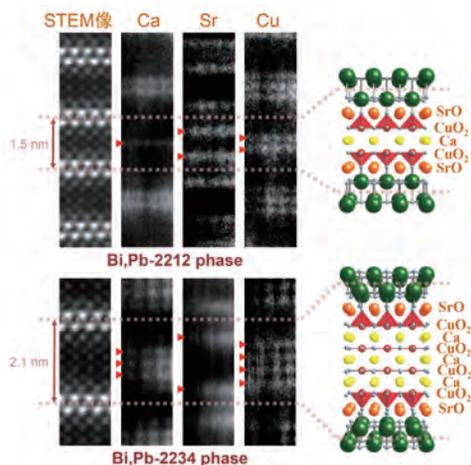


図3: ビスマス系高温超伝導体の元素分布像



木本浩司

物質・材料研究機構
先進的共通技術部門 表界面構造・物性ユニット
ユニット長

リチウム(Li)電池関連の解析依頼も多い。「Liは原子番号が小さいので、解析が難しい元素の一つです」と木本。それでも解析できるのは、このSTEMにはモノクロメーターという電子線を単色化する装置が付いているからだ。モノクロメーターによって、エネルギー分解能が1eV(電子ボルト)から70meVに大幅に向上した。その結果、原子番号が小さい元素の分析や、エネルギーが近い2種類の元素の識別ができるようになったのだ。

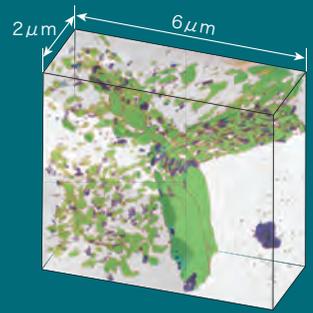
「エネルギー分解能が高くなると、化学結合状態を解析することもできます」と木本は言う。例えば、同じ酸素でも銅と結合している場合とスズと結合している場合では、酸素原子の電子の状態が異なる。化学結合状態の違いを捉えるべく、さらなるエネルギー分解能の向上にも取り組んでいる。

「ほかにも、ソフトな材料、例えばアミノ酸などの分子が見たい」と木本の夢は尽きない。「現在解析している試料のほとんどが、多数の原子から成る結晶です。空間分解能とともに検出感度を向上させ、グラフェンなどの上に分子を1個乗せて、分子の機能を保ったまま見たいですね」

電子顕微鏡を使って誰も見たことがない物を見る——その挑戦はこれからも続く。
(文・鈴木志乃/フotonクリエイト)

メーカーのシーズと 研究者のニーズで実現

鉄鋼材料を研究していた NIMS の原 徹主席研究員に、メーカーから相談が舞い込んだ。これをきっかけに開発されたのが、高精度な三次元構造解析が可能となる電子顕微鏡。その舞台裏を、原 研究員が語る。



耐熱鋼の断層像から析出物だけを取り出して再構築した三次元像

顕微鏡は補助機能。 加工装置だったFIB-SEM

「実は、FIB-SEMは昔からある装置です。それを“直交配置型”にしたことが今回の大きなポイントです」と原は言う。ではそもそも、FIB-SEMとはどういう装置なのだろうか。

この装置、FIBとSEMという2つの装置を組み合わせでできている。FIBとは、集束イオンビームのこと。細く絞ったイオンビームを試料の表面に当てて原子を弾き飛ばすことによって、試料の表面を加工する装置である。1980年代中ごろから半導体デバイスの微細加工などで用いられている。一方のSEMは、走査型電子顕微鏡のことを言い、細く絞った電子ビームで試料の表面を走査し、反射電子や試料から飛び出てきた二次電子などを捉えることで、試料表面の凹凸や組成を画像化して観察する装置である。

1990年代になると、表面の状態を観察しながらFIBで加工したいという要望が出てきた。その声に応えるべく、FIBとSEMを組み合わせたFIB-SEMが登場した。「当初からFIB-SEMは加工が主体で、FIBでの加工を補助するためにSEMがあるという位置付けでした」と原は解説する。

60度から直角に。 30度の変化がもたらすもの

「2008年ごろ、日立ハイテクサイエンスの技術者から、あるシーズ技術を持っているのだけれども何か良い使い道はないだろうか、と相談を受けました」と原は振り返る。そのシーズ技術とは、FIBとSEMを直角に配置するというものだった(図1右)。従来は、FIBとSEMの光軸が60度前後の角度で交わる配置になっていた(図1左)。話を聞いた原は、「FIB-

SEMの三次元イメージングの精度を上げられるのではないかと考えた。

「私の専門は鉄鋼などの金属材料です。多くの材料や、生物もそうですが、鉄鋼材料は三次元の階層的な組織を持っています。それらの分野の多くの研究者は、組織を正確に知るためにどうにかして内部の三次元構造を見たいと思って、使えそうな方法を活用してきました。FIB-SEMもその一つです」

試料の表面をFIBで薄く削ってSEMで観察すると、ある深さの断層像が得られる。FIBで削ってSEMで観察するということを繰り返し、得られた複数の断層像をコンピュータで再構築すると、試料の三次元構造を得ることができるのだ。しかし、FIB-SEMは加工を主体にした装置のため、三次元構造の解析に使うには不具合もあった。

最大の問題がFIBとSEMの配置だ。FIBとSEMが同じ点を観察できるので、観察しな

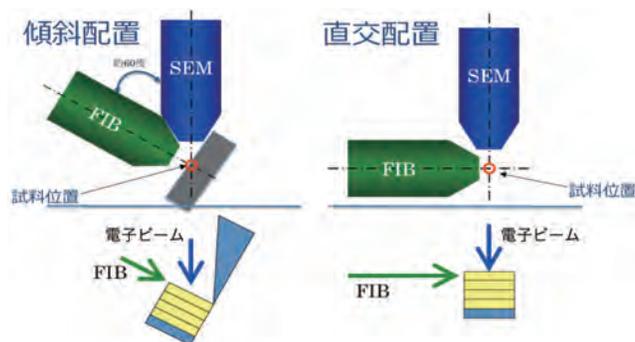


図1 FIB-SEMにおけるFIBとSEMの配置

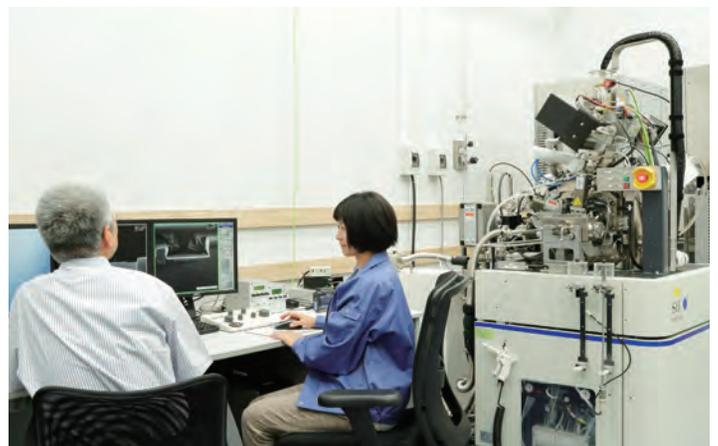


図2 直交配置型FIB-SEM

操作する中村(右)は「ニフトリの胚の頭蓋骨は印象に残っていますね。STEM用のきれいな薄片も取ることができました」と言う。「同じ試料でFIB-SEMによる三次元像とSTEM像を得られると、より詳細な解析ができます。しかしそれは、熟練した人にしかできません」と原。

から加工するには、FIBとSEMの光軸が60度前後の角度で交わる配置が最適だ。しかしSEMに対して試料表面が傾斜しているため、断層像の複数撮影では切削を繰り返すにつれて、SEMの画像がずれるなどの問題があった。「試料の三次元構造の高精度な解析を目的とするならば、FIBとSEMを直角に配置するのが理想的です。簡単なことに思えるのですが、誰もそれを実現できていませんでした。その技術を日立ハイテクサイエンスが持っていたのです」

メーカーの技術と研究者ニーズのマッチング

原は早速、日立ハイテクサイエンスがつくったプロトタイプで、手持ちの試料を観察してみた。「驚きました。従来のFIB-SEMより精度が上がるとは思っていましたが、想像以上でした」すぐ製品化に向けた共同研究開発をスタートさせた。「プロトタイプは、まだまだ荒削りでした。私たちがFIB-SEMを使う材料研究者の立場からさまざまな要望を出し、メーカーの技術者がそれを実現する、という形で一緒に開発を進めていきました」

要望の一つが試料の大きさだった。プロトタイプでは、0.1mmくらいが想定されていたが、原は「小さすぎる」と指摘した。「鉄鋼材料は、nm(ナノメートル)からmmまで幅広いスケールの組織があります。それらをすべて観察するためには数mmの試料を観察できるようにしたいと私たちは主張しました」検討や試作を重ね、4mm四方、厚さ2mmの試料を観察できるようになった。

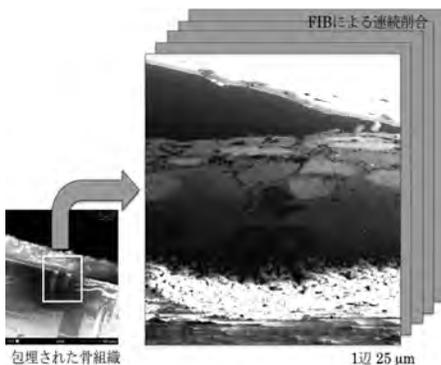


図3 ニワトリの胚の頭蓋骨の表層から深部までを観察

原は「一度の観測で試料についての多くの情報を手に入れたい」と、多目的化も譲らなかった。試料の元素組成が分かるエネルギー分散型X線分光分析装置、結晶方位が分かる後方散乱電子回折分析装置、切削していき最後に残った薄片を観察する走査透過型電子顕微鏡 (STEM) などの検出器を装備できるようにした。

そうして2011年に1号機が完成し、NIMSに納入された(図2)。耐熱鋼を観察したところ、界面上の析出物の分布を三次元で捉えることができた(タイトル横)。「直交配置型FIB-SEMの開発では、装置をつくる高い技術を持つメーカーの技術者と使う側のニーズを把握している材料研究者、そのマッチングが非常にうまくいきました」

電池材料から生物試料、顔料まで

直交配置型FIB-SEMは、NIMSが参画している文部科学省の「低炭素研究ネットワーク」や「ナノテクノロジープラットフォーム」事業を通じて外部の研究者も利用可能なことから、原の元には、さまざまな試料解析の依頼が寄せられる。

この装置が多く活用されているのは電池材料である。二次電池や燃料電池の電極には電子やイオンの通り道となる空隙が必要だ。空隙の大きさや配置を知るには高精度の三次元構造解析が可能な直交配置型FIB-SEMが適している。

材料系の試料が多いが、生物系試料の観察もある。印象深かった試料を聞くと、「ニワトリの胚の頭蓋骨、歯科用材料、あとは古代の顔料の解析も行ないました」という答えが返ってきた。ニワトリの胚の頭蓋骨では表面から深層まで解析して骨組織の形成過程を調べるための観察を行なった(図3)。

強みはオペレーターとノウハウの蓄積

さまざまな試料を解析する中で、改良すべき点も見えてきた。「まずは冷却装置を付けたい」と原は言う。FIBの切削による発熱で試料がダメージを受けてしまうことがある。冷却装置を付けることで、観察できる試料の種類が増えると期待される。「広い範囲を高



原 徹

物質・材料研究機構
先端の共通技術部門 表界面構造・物性ユニット
電子顕微鏡グループ
主席研究員

解像度で見たいという要望も多いですね。矛盾した難しい注文ですが、メーカーの技術者と検討しているところです」

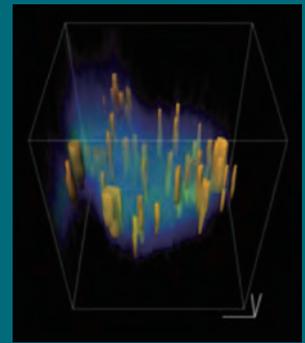
直交配置型FIB-SEMは、現在では国内で10台ほど導入されている。海外メーカーの追随はない。「開発に携わった装置が広く使われているのはうれしいのですが、今となっては私のところにある装置が一番古くなってしまいました」と、原は笑う。「しかし、私たちのところには優秀なオペレーターがいて、ノウハウが蓄積されています。解析技術は、どこにも負けませんよ」

今後は、本来の専門である鉄鋼材料の研究にも比重を置いていきたいと考えている。「鉄鋼の微細構造はまだ全然分かっていない。三次元で構造を見たい物は、まだいっぱいあるんです」と目を輝かせる。「見えない物があれば、メーカーの技術者と協力して新しい装置や手法を開発する。材料研究と装置開発をバランスよくやっていきたいですね」(文・鈴木志乃/フotonクリエイト)



「試料を動かす」 という逆転の発想

試料内部の三次元構造を高分解能で観察したい。
それを実現する新しい手法が NIMS から誕生した。
その開発の中心を担ったのは竹口雅樹ステーション長と
橋本綾子主任研究員らのグループである。



カーボンナノ構造体に付着させたプラチナナノ粒子の三次元構造の再構築

STEMで三次元イメージングを!

走査透過型電子顕微鏡 (STEM) は、分解能が非常に高く、試料を原子レベルで観察できることから、基礎研究から実用の場まで広く活躍している。しかし、竹口は現状の STEM に満足していなかった。「STEM では、細く絞った電子ビームを試料に当てながらスキャンして、試料を透過してきた電子で像をつくります。そのため、得られる像は影絵のようなものです。例えば、試料中に欠陥があることはわかっても、その欠陥が試料の上の方にあるのか下の方にあるのかまでは分かりません。どうにか STEM を使って試料の内部構造を三次元で観察したいと思っていました」

光学顕微鏡では、共焦点という仕組みを利用することで三次元イメージングがすでに実現されていた。試料の特定の深さに焦点を合わせ、透過してきた光のうち焦点位置以外からの光を除去すると、焦点位置だけの像を得ることができる。焦点の深さを移動させて複数の断層像を取得し、それらをコンピュータで再構築して三次元構造を得る。竹口は、この共焦点原理を STEM に応用して三次元イメージングを実現しようと、2004 年ごろから本格的な研究開発に着手した。

電子ビームではなく、試料を動かす

実は、その数年前からアメリカのアルゴンヌ国立研究所でも STEM を使った共焦点イメージングの研究開発が行なわれていた。彼らは、電子ビームを試料の上下方向に移

動させる技術を持っておらず、三次元構造までは得られていなかった。

一方、竹口には、とっておきのアイデアがあった。「電子ビームを移動させるのではなく、試料を載せたホルダーを三次元的に移動させればよいのではないかと考えたのです。この移動式ホルダーを試料走査ホルダーと名づけ、装置を手づくりしながら基礎実験を進めていきました」

2007 年には、橋本も研究開発に加わった。「竹口さんから『絞りをつくって』と言われたのは衝撃でした。それまでの私にとって電子顕微鏡は試料を観察する道具で、絞りは部品として買うものでしたから」と橋本は当時を振り返る。

竹口が装置の手づくりにこだわるのには、理由がある。「自分たちで装置をつくと、不具合を調整したり機能を加えたりすることが、容易にできます。時間がかかるとは思えるかもしれませんが、そのほうが実は研究の進みが速いんです。そして何よりも、あれこれ工夫しながら装置をつくっていくのは面白い」

そして 2008 年、試料走査ホルダーの開発に成功した。するとすぐ、イギリスのオックスフォード大学の研究者から共同研究したいと声がかかった。彼らも共焦点 STEM による三次元イメージングに取り組んでいたが難航しており、実現には試料走査ホルダーが不可欠だと考えたのだ。竹口にとっても共同研究は都合良かった。

当時 NIMS には、収差補正装置の付いた適した電子顕微鏡がなかった。オックスフォード大学には、それがある。「オックス

フォード大学は電子顕微鏡界の大御所です。彼らと試料走査ホルダーを持つ私たちが組めば、ドリームチームができます」と竹口。そして、2009 年度から 2 年間の共同研究プロジェクトが始まった。

散乱された電子で深さ分解能を向上

夢の実現には、解決すべき問題がもう一つあった。「試料内部の三次元構造を詳細に捉えるには、深さ方向の分解能を上げる必要があります。しかし、試料を透過してきた電子をそのまま使って像を得る方法では、実験結果からも、理論的な予想からも難しいことが分かってきました」と橋本は解説する。「そこで私たちは、試料中で散乱された電子を使って像をつくる環状暗視野という方法で、深さ方向の分解能を上げることを目指しました」

環状暗視野用の絞りをつくっては試し、つくっては試しを繰り返した。「絞りづくりも、

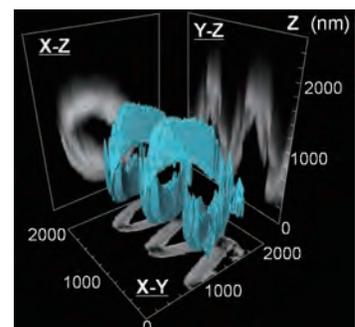


図1 カーボンナノコイルの三次元構造の再構築
収差補正のついていない STEM で 100nm 間隔で断層像を 27 枚撮影し、三次元構造を再構築した。

初めのことと比べると、ずいぶん上手く、速くなりました」と橋本は笑う。「改良していくと、深さ方向の分解能が少しずつ良くなっていきます。すぐ試して、すぐ改良ができる。装置開発における手づくりの利点を実感しました」

試料内部の三次元構造が見えた

そして、ついに竹口たちは、試料走査ステージと環状暗視野を組み合わせた共焦点STEMの三次元イメージングに成功する。実際に炭素繊維をコイル状にしたカーボンナノコイルを観察して、三次元構造を再構築することができたのだ。

図1のカーボンナノコイルの像は、収差補正装置が付いていないSTEMによるものだ。収差補正STEMであれば、もっと深さ分解能を上げることができる。そこで、オックスフォード大学の収差補正STEMと竹口らが開発した技術を組み合わせて、カーボンナノ構造体にプラチナ (Pt) のナノ粒子を付着させた試料を観察し、三次元構造を再構築した(タイトル横・図2)。Ptナノ粒子が内部でどのように分散しているかがわかる。このときは深さ分解能がまだ十分でなく、Ptナノ粒子が上下方向に引き伸ばされているが、プロジェクト終了の2010年度末には、原子1個が見えるところまで達成した。

その場観察も三次元で

2011年にはNIMSにも収差補正STEMが導入され(図3)、現在も、試料の内部構造をより鮮明に観察するための研究が続いている。



竹口雅樹

物質・材料研究機構
中核機能部門 電子顕微鏡ステーション
ステーション長

「実は、収差補正STEMを用いても深さ分解能を10nm以下にするのは難しく、足踏み状態でした。ようやく最近、その限界を超える鍵となる技術が成熟してきました。目標は原子レベルの0.5nmです!」と竹口は意気込む。橋本も、「物質の中で原子は格子状に並んでいます、現在の電子顕微鏡で見えているのは、上下方向の原子が重なった状態です。深さ分解能が上がれば、上下方向に並ぶ原子1個1個の配置まで見えるはず。ぜひ見たいですね」と声を弾ませる。

竹口たちは、新しい試料ホルダーの開発も進めている。電子顕微鏡は、内部を真空中に保っている。電子ビームが大気中の分子で曲がってしまうのを防ぐためだ。しかし最近、高温、ガス中、光照射など、材料が実際に使用される状態に近い環境で観察したいという「その場観察」の要望が増えている。そこで、試料をさまざまな環境下に置いてその



橋本綾子

物質・材料研究機構
先端的共通技術部門 表界面構造・物性ユニット
電子顕微鏡グループ
主任研究員

場観察が可能な試料ホルダーの開発しているのだ。

「その場観察の試料ホルダーと共焦点STEMの技術を組み合わせることで、例えば触媒が劣化していく様子を、実際の使用環境と同じ高温のガス中で、しかも内部構造を三次元で観察することも可能になります」と竹口。得られた知見は、より高性能な触媒の開発に役立つ。

竹口は、最後にこう語った。「電子顕微鏡は生きているんですよ。今日は調子が悪いか、何をしたいとか、話しかけてくれます。その声に耳を傾けないと、いい像を撮らせてはくれません。しかも、うまく撮らないと怒るんですよ。これからは独自のアイデアと手づくりの装置を駆使して、誰も見たことがない世界を撮り続けたいですね」

(文・鈴木志乃/フォトンクリエイト)

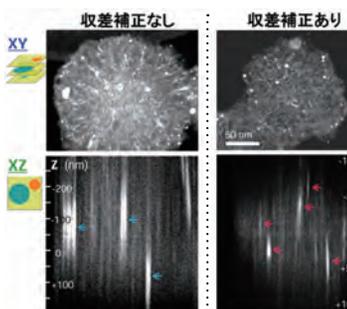


図2 カーボンナノ構造体に付着させたプラチナのナノ粒子の観察
収差補正なしに比べ、収差補正ありはナノ粒子の上下方向の伸びが小さくなっている。X-Z断面の像が撮れるのも試料走査ホルダーの特徴である。タイトル横の図 (P10)は25nm間隔で断層像を15枚撮影し、三次元構造を再構築したもの。青はカーボンナノ構造体、黄はプラチナのナノ粒子。

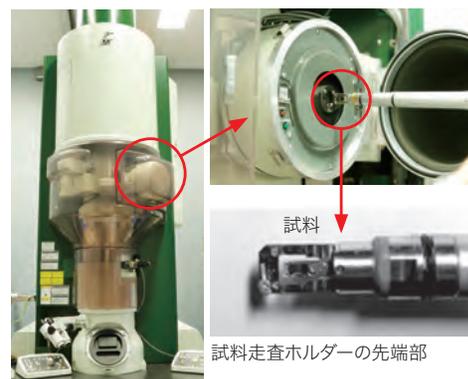


図3 試料走査タイプの走査型共焦点透過電子顕微鏡

TALKING WITH THE BIG THREE



KNUT WOLF URBAN
クヌート・ヴォルフ・ウルバン

1941年生まれ。シュトゥットガルト工科大学自然科学科博士課程修了。マックス・プランク金属研究所研究員をはじめ、パーバー原子力研究所(インド)、東北大学多元物質科学研究所、エアランゲン大学(ドイツ)等を経て、現在ユーリッヒ研究センター教授。

HARALD ROSE
ハラルド・H・ローゼ

1935年生まれ。ダルムシュタット工科大学物理学博士課程卒業後、同大学物理理論研究所研究員。その後同大学応用物理研究所準教授、ニューヨーク州レンセラー総合技術研究所教授、ローレンス・バークレイ国立研究所等を経て、現在ウルム大学教授。

MAXIMILIAN HAIDER
マキシミリアン・ハイダー

1950年生まれ。ダルムシュタット工科大学H.ローゼ物理学研究室卒業後、同研究室研究員等を経て、現在、カールスルーエ工科大学教授。また、ハイデルベルグにあるCEOS社社長。

不可能と言われた 収差補正の実現を目指して

電子顕微鏡用収差補正装置の開発・普及に貢献し、電子顕微鏡界のビッグ3とも称されるハラルド・H・ローゼ、マキシミリアン・ハイダー、クヌート・ヴォルフ・ウルバンの3教授が2015年度NIMS賞受賞に際し来日。収差補正実現に至るまでの秘話を語った。

1931年にエルンスト・ルスカが透過型電子顕微鏡(TEM)を、1937年にマンフレート・フォン・アルデンヌが走査透過型電子顕微鏡(STEM)を発明してまもなく、これらの分解能は電子レンズの収差によって制限されることが明らかになった。電子レンズは磁場によって形成され、物理の法則上、従来の方法で収差を補正することはできない。つまり、ルスカとフォン・アルデンヌが次世代に遺した課題は、自然の基本法則を克服すること以外の何物でもなかった。収差補正の実現に迫るアイデアや理論は、ドイツやイギリス、アメリカで考案されていたものの、1980年代前半になっても最適な方法はまだ発見されていなかった。その頃、ハラルド・H・ローゼは、それまでのどのアプローチでもうまくいかなかった問題点をすべてクリアする新しい理論を考案。マキシミリアン・ハイダー、クヌート・ヴォルフ・ウルバンとともに、1991年から1997年にかけて、世界初の収差補正透過型電子顕微鏡の開発に成功した。原子レベルで材料を観察したいという目標の前に立ちはだかっていた壁を打ち破ったのだ。理論家のローゼ、電子光学で傑出した経験を持つ実験物理学者のハイダー、そして材料科学者のウルバンという3人が組んだからこそ成し遂げられた成果だと、本人たちは語る。今や、世界中で500を超える収差補正装置が導入され、一部の例外を除き、TEMとSTEMの両方に、3人が開発した2段6極子型収差補正原理が採用されている。

— NIMS 賞受賞、おめでとうございます。
2015年度のNIMS賞選考委員会は、皆さんの材料研究への貢献が大きかったことを選考のポイントとして上げていました。

ローゼ教授 私たちの成果が材料科学の進歩に貢献したと選考委員会が認めてくださったことに感謝します。原子レベルのイメージングを可能にする収差補正電子顕微鏡を世界で初めて開発できたことを誇りに思うと同時に、1940年代から1980年代初頭にかけてドイツやイギリス、アメリカで行なわれた研究に感謝の意を表したいと思います。彼らの研究がうまく行かなかったのは、解決すべき課題があまりにも複雑だったからです。ですが、それらの研究結果が収差補正を不可能だと証明するものだと多くの専門家が考えたのは、明らかに早まった結論でした。この分野で何十年も研究を続けていた私は、収差補正は可能であると固く信じていました。他の資金提供機関が電子光学への投資を渋る中、私たちが信じてくれたフォルクスワーゲン財団には本当に感謝しています。同財団が、TEMとSTEMどちらの顕微鏡においても6極子に基づく原理で補正を行なうという私たちのコンセプトが適用できることを信じてくれたおかげで、1991年から1997年の間に開発を実現することができました。

ハイダー教授 3人が3人も、それぞれ大変な役割を担っていました。理論に始まり、その実現、そしてこの開発が如何に材料科学界にとって有益であるかの実証、と。バックグラウンドは違いましたが、それぞれの専門を生かしながら、協力し合って研究を進めることができました。その結果、高分解能、高コントラストの収差補正電子顕微鏡の開発に成功し、ついに物質中の原子を見られるようになっただけでなく、その位置をも正確に測定できるようになったんです。この成果によって、さまざまな研究活動が、特に材料科学の分野で発展することになったのなら、とても嬉しいですね。

ウルバン教授 収差補正顕微鏡のおかげで今や皆が、当たり前のように原子の像を目にできるようになりましたが、ただ、原子の世界というのは、量子物理学に支配される特殊な世界です。よく言われる「百聞は一見にしかず」という言葉は、原子の世界には当てはまりません。電子顕微鏡で見る原子像は、一見、私たちがよく知っている球形と棒で作られた原子模型ととてもよく合致しているため、物事を著しく単純

化してしまいます。原子の世界に入り込むことが可能になった今、自分たちが実際に目にしているものを真に理解することが、私たちにとってもっとも大きな課題の1つだといえるでしょう。像の中の「ドット」の場所に本当に原子は存在しているのか、原子のある場所に局在するスペクトル信号を本当に信じていいのかどうか。もちろん、TEM画像でもSTEM画像でも、コンピューターベースでの理解は大きく進んでいますし、それが今回の受賞理由の1つでもあります。原子分解能での研究のおかげで、ナノスケールの材料科学や日常生活における材料の改良に貢献できているのは事実です。しかしそれも、光学の発展と、画像に対する量子物理学的な理解の向上が同時にあってこそだと実感することが大切だと思います。

ローゼ教授 そうですね。原子レベルでものを見られるようになったことで、新しい世界が開かれました。このパラダイムの変化を軽視してはいけません。今や、物事を「原子的」に考えるという、新しいマインドセットが形成されています。今回の受賞の理由の1つとして、収差補正装置を搭載した電子顕微鏡を材料科学をはじめとした多くの分野に普及させた、ということがあると思います。収差補正技術は、たくさんの分野に新しい研究のチャンスをもたらしました。その1つが、電子エネルギー分光法です。また、最近では、電子放射測定で損傷を受けやすい生物材料や生体分子、細胞に対して、低い電子エネルギーと収差補正技術を採用した電子線を使うことで、試料の寿命が大幅に伸びたことが挙げられます。

ウルバン教授 過去の科学者は、構造を見ることだけで満足せざるを得ませんでした。ですが、構造体は「集合体の性質」であり、原子単体の性質ではありません。それが今では、原子1つの横方向座標や変移を、ピコメートルという驚異的な精度で測定できます。これは、最小の原子である水素原子の直径のわずか100分の1です。物理はここから生まれるんです。そして、このような次元で、現代の電子光学と第一原理計算法が出合い、組み合わせあって、最新の材料科学となっているんです。さらに、今や顕微鏡は、電子エネルギーを高精度で分析することが可能になり、電子が試料を透過する際に生じる特有のエネルギー損失を測定し、元素同定に使えるほどになっています。今日STEMが成功しているのは、これが理由の1つです。STEMにおける

試料のラスタライズは、原子スケールの細かい電子線によって行なわれます。これにより、原子ごとの元素分析が可能になっています。

— 皆さんのコラボレーションはどのように始まったのですか？

ウルバン教授 シュトゥットガルト工大にいたときに大型電子顕微鏡の導入に長年携わっていたおかげで、電子光学および電子光学技術が抱えている課題は熟知していました。一方で、本来の専門分野である材料科学では、1980年代に注目されていた超伝導や準結晶のような分野で、幅広く実験を行なっていました。声がかかったときは、ユーリッヒで新しい電子顕微鏡を導入し、さらに新しい材料研究グループを作ろうとしているところでした。材料研究において原子レベルの分解能が早急に必要だということは痛感していたので、ローゼ教授とハイダー教授が私をチームに招いてくれたときは、とても嬉しかったです。

ハイダー教授 私の場合、この件には、ハイデルベルクでヨアヒム・ザッハ博士と〈CEOS〉という会社を創設する前から関わっていました。ローゼ教授のことは何年も前から知っていましたが、学会などで顔を合わせては、収差補正プロジェクトを立ち上げる可能性について議論し

自分たちがやっていることを理解していたからこそ、ずっと楽観的でいられた
— ローゼ教授





正しい信念、強い意志、そして熱意が不可能なプロジェクトをサクセスストーリーに変えた — ハイダー教授

ていたのです。そして1989年の夏、オーストリアのザルツブルクで行なわれた学会で3人が一堂に会し、プロジェクトの資金面について話し合いました。当時、それが最大の障壁だったのです。ですが、それだけの資金が必要な理由を科学的に明確に提示したこと、ウルバン教授からの要請も手伝って、ついにフォルクスワーゲン財団の説得に成功し、プロジェクトに必要な資金を得ることができました。

ローゼ教授 電子光工学に関するハイダー教授の深いノウハウを活かして、それを土台にウルバン教授が、専門である材料科学分野の研究で数ピコメートルの精度の原子分解能画像を得ることによって、収差補正TEMが非常に有用であることを証明しました。これが、45ピコメートルという分解能を持つ新世代のTEMおよびSTEMを開発する第一歩となりました。

— 成功の鍵となったのはなんでしょう？

ローゼ教授 やはりチームワークですね。この3人がチームだったからこそ、材料科学の視点で見て、最新の電子光工学的手法を使い、新しい計器に必要な機械的・電子的安定性を実現するということができたんだと思います。また、僥越ながら、1981年(STEM)および1989年(TEM)の論文において私が発表した新しい構成原理の存在があったことも付け加えさせてください。私たちは、自分たちがやっていること

を理解していましたし、だからこそ諦めることなく、ずっと楽観的でいられたんです。

ハイダー教授 「原子が見える」TEMとSTEMを実現させたチームワークというのが、私たちにピッタリなスローガンかもしれません。開発の段階ごとに、それぞれのタスクがありましたから。私の役割は、どちらかというと開発の中盤にありました。理論は明確になったけれど、適用するためのTEMの準備ができていない段階です。何が問題なのかかわからない部分を解決するのにかなりの時間がかかり、大変な時期もありました。ですが、正しい信念、強い意志、そして問題が解決できないように思えるときでも諦めない熱意を持つことで、不可能に思われたこのプロジェクトを私たち3人のサクセスストーリーに変えることができたのです。そして、1997年に120ピコメートルの分解能を達成すると、新しい世界への門が開かれました。

ローゼ教授 ハイダー教授が必要としていた設備と人材を揃えるには、フォルクスワーゲン財団からの資金を得ることが必須条件でした。古代ローマ人の言葉にもあるように、研究の成功には、「美德(Virtute)」(高潔かつ勤勉、将来性がある)だけでなく「幸運(Fortuna)」も必要なのです。ハイダー教授に代わって言わせていただくと、部品の生産やライセンス、研究開発の継続に必要な資金とエンジニアたちを集められたことも、成功の重要な鍵でした。

ウルバン教授 さらに私から付け足したいのは、私たちが達成したことは、著名な科学史研究家のトーマス・S・クーンが提唱した「パラダイムシフト」にほかならない、ということです。誰も予測していなかったことすし、すでに世界中で何十年にも及ぶ試みがなされていたのですから、資金提供機関が、いわば「不可能」への資金提供に及び腰だったのも理解できます。したがって、「このプロジェクトは科学的にも経済的にも絶対に成功する」と、材料研究のコミュニティや資金提供機関に対して私たちが労力を惜しまずに説得を続けたことも、成功のもう1つの鍵だといえるでしょう。

— 今後、科学、そして電子顕微鏡はどう発展していくでしょう？

ローゼ教授 電子顕微鏡に関しては、原子を操作するような使い方がもっと進化するだろうと予想しています。さらに、低い電圧で高分解

能を実現する電子顕微鏡の出現により、生物や、その他放射線感受性の高い物体の観察において電子顕微鏡が再び盛んに使われるようになるかと予想しています。これは、私が現在、ウルム大学で集中的に取り組んでいる分野です。

ハイダー教授 そうですね。日本と世界のコラボレーションが、例えばNIMS経由でさらに強化されて、明るい未来が期待できると確信しています。ただ、あらゆる物質を画像化できる超高分解能電子顕微鏡の実現には、まだたくさん課題があります。新材料の研究も、マクロ的な物性を原子レベルで理解するにも、新しい画像化および分析手法のアプローチが必要です。

ウルバン教授 今後も科学は、新たな知見と新しい理論、実験ツールの増加によって、どんどん成長を続けるでしょう。世界的に普及し、科学をより豊かにしてきた、原子レベルの超高分解能電子顕微鏡もその中の1つです。また、科学による問題解決のニーズも急増するでしょう。健康、環境、気候変動、エネルギー問題。個人や公共の安全も忘れてはなりません。現代における課題の多くは、科学による解決策を必要としています。生体分子から工学材料に至るまで、物質の原子を見て、理解することが、重要な役割を果たしていくことになるでしょう。

(インタビュー:C. パムロイ)

私たちが達成したことは、「パラダイムシフト」にほかならない — ウルバン教授



ノーベル賞アラカルト

文:えとりあきお

題字・イラスト:ヨシタケシンスケ

10月になると、毎年ノーベル賞受賞者が発表されます。去年は、赤崎さん、天野さん、中村さんの3人がLEDに関する業績で受賞し、日本中が大いに沸きました。今年も、大村さんがノーベル生理・医学賞を、梶田さんがノーベル物理学賞を受賞し、2年連続で日本人の受賞者が出ています。

さて、小さいものを捉えてみたいというのは、人類が大昔から望みつづけていた夢でした。そうした望みを実現させた顕微鏡の研究者たちも、何人かノーベル賞を受賞しています。

オランダのフリッツ・ゼルニケは、光の波について研究しているうち、鏡の面の凹凸を修正する方法を発見し、見えないものが見えるようになるのではないかと考えました。その結果、位相差顕微鏡を発明し、1953年にノーベル物理学賞を受賞します。それまで見えにくかった細胞や微生物、組織が鮮明に見えるようになり、プラスチック、油、繊維などを観察することもできるようになって、医学や医療だけでなく、広く産業界でも利用されるようになったのです。

ドイツの物理学者エルンスト・ルスカは、光に代えて電子線を利用した顕微鏡の開発に成功します。1931年のことでした。そのおかげで、人類はより微細なものを見ることができるようになります。しかし、ルスカがノーベル賞を受賞したのは1986年。なんと開発から55年も待たなければなりません。電子顕微鏡はその間に大きな進歩を遂げて、現在では原子1個のサイズよりも小さい、50ピコメートルの大きさまで捉えることができるようになっています。

ルスカがノーベル賞を受賞したとき、

130歳まで生きて

「ノーベル長寿賞」を受賞するんじゃないか!



同時に二人の電子顕微鏡研究者が受賞しました。走査型トンネル電子顕微鏡 (STM) の開発をしたIBMチューリッヒ研究所のゲルト・ビーニヒとハインリッヒ・ローラーの二人です。彼らはトンネル電流を利用して試料の表面の形状を見ることができ電子顕微鏡を開発し、0.1オングストロームの大きさまで捉えることを可能にしました。STMの開発は1982年とされていますから、ビーニヒとローラーはわずか4年で受賞の栄に浴しました。

ノーベル賞受賞までに55年も待たなければならなかったルスカさんは、さぞじりじりしたに違いありません。受賞時にルスカは80歳。ご存知のように、ノーベル賞は生存していないともらえない賞ですから。

受賞までの期間が長かったといえば、今年亡くなった南部陽一郎博士も長いあいだ待たされた一人です。6種類のクォークの存在を予測した「小林・益川」理論の基礎を1960年代につくり、「素粒子物理学の父」とも言われていましたが、3人が同時に受賞した2008年、南部先生は87歳の高齢でした。

もう一人。IT時代の基盤はコンピュータの進歩と普及ですが、それにはトランジ

スタの発明と集積回路の発明が原動力になっています。トランジスタの発明には10年以内にノーベル賞が贈られました。集積回路の発明者であるジャック・キルビーは受賞まで42年も待たなければなりません。1958年にICを発明して、20世紀最後の受賞者(2000年)になったのです。

一方、研究成果の発表後わずか一年でノーベル賞を受賞した強運の持ち主もいます。1987年に高温超伝導物質の発見で物理学賞を受賞したIBMチューリッヒ研究所のミュラー博士とペドノルツ博士です。この研究については、日本の田中昭二博士が二人の論文に目をつけ、世界の学会に紹介して火付け役になったことでもよく知られています。

さて、顕微鏡に話を戻しますと、電子顕微鏡の収差補正技術を開発した、ローゼ、ハイダー、ウルバンの3人もノーベル賞の予想には幾度も名前が登場しています。その他にも大勢、世界中の優れた科学者たちが候補となっているわけですが、今後も世界的評価のもっとも高いこの賞の発表ごとに、悲喜こもごも、さまざまな興味深いエピソードがついてまわることは想像に難くありません。

えとりあきお: 1934年生まれ。科学ジャーナリスト。東京大学教養学部卒業後、日本教育テレビ(現テレビ朝日)、テレビ東京でプロデューサー・ディレクターとして主に科学番組の制作に携わった。『日経サイエンス』編集長に。日経サイエンス取締役、三田出版株式会社専務取締役、東京大学先端科学技術研究センター客員教授、日本科学技術振興財団理事等を歴任。

The 12th

GREEN
Symposium

2016

1/14

第12回 ナノ材料科学環境拠点シンポジウム
～次世代蓄電池の開発に向けた材料-計算-計測の融合研究～

日時

2016年1月14日(木)

10:30-16:45(予定) [懇親会 17:00-18:30]

会場

一橋講堂 (学術総合センター 2階)
東京都千代田区一ツ橋 2-1-2

参加費

無料 参加登録が必要です。下記URLよりお申込みください。
<http://www.nims.go.jp/GREEN/>

【特別講演】

射場 英紀氏 トヨタ自動車株式会社電池研究部部长

「次世代電池の共通課題解決のため基盤技術に期待すること」

山田 淳夫氏 東京大学工学系研究科教授

「新材料開発を基軸とするナトリウムイオン電池システムの構築」

中山 将伸氏 名古屋工業大学大学院工学研究科准教授

「リチウムイオン電池セラミックス材料の探索とマテリアルズ・インフォマティクス」

*講演タイトルは変更になる場合があります。

材料・計算・計測の融合研究による新材料開発の加速が注目されています。本シンポジウムでは、次世代蓄電池開発に向けた融合研究の新潮流に関する特別講演をいただくとともに、材料・計算・計測の研究者で構成されているGREEN全固体電池およびリチウム空気電池特別推進チームにおける融合研究を紹介します。

主催：国立研究開発法人 物質・材料研究機構 ナノ材料科学環境拠点 (GREEN)



- 東京メトロ半蔵門線、都営三田線、都営新宿線
神保町駅(A9出口)徒歩4分
- 東京メトロ東西線
竹橋駅(1b出口)徒歩4分



NIMS NOW vol.15 No.6 通巻155号 平成27年11月発行

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

古紙配合率100%再生紙を
使用しています植物油インキを
使用し印刷しています