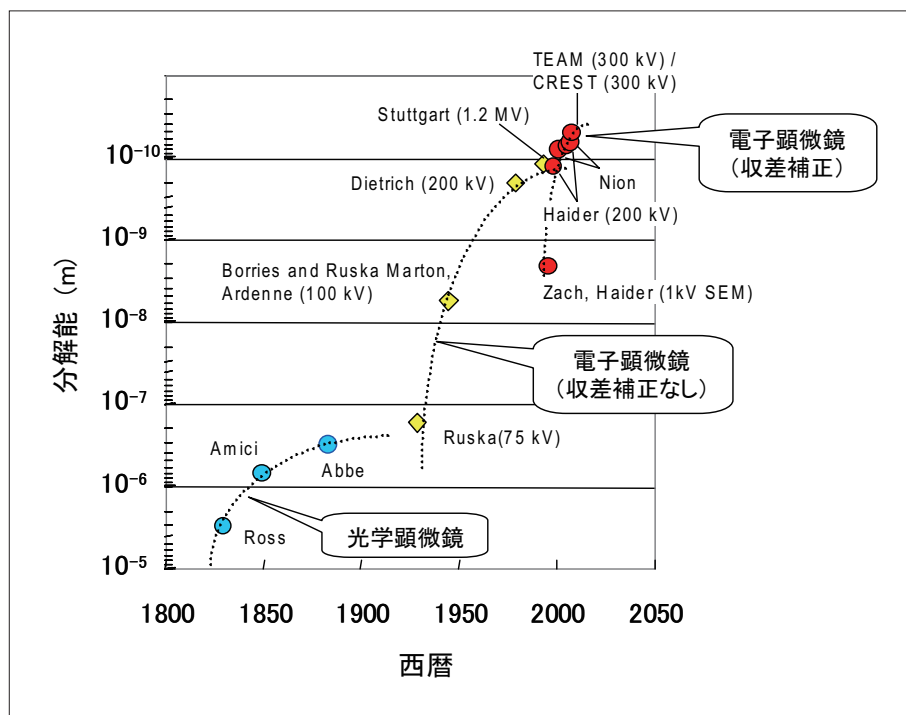


電子顕微鏡における収差補正技術開発の 世界的動向と日本の現状

電子顕微鏡は、戦前の黎明期から産官学が結集して開発に取り組み、日本が長きにわたって世界をリードしてきた領域であった。その技術はお家芸と言われる域にまで発展し、日本が開発した高圧～超高圧電子顕微鏡は、1990年に入ると0.1nmに迫る最高分解能を成し遂げ、世界各地の主要研究機関に多数設置された。しかし1990年代後半、ドイツで開発された球面収差補正レンズは電子顕微鏡の分解能を飛躍的に向上させるもので、ナノテクノロジーの時代背景も相まって世界中の注目を集めることとなった。欧米諸国において次々と収差補正顕微鏡開発プロジェクトが発足し、それまで熱心ではなかった米国までもが電子顕微鏡開発へと新規参入した。一時的に遅れをとった日本は危機感を募らせたが、もともと高い技術力を有していた日本メーカーが、大学や公的研究機関とのプロジェクト研究のもと高性能機器の開発に成功し、装置性能自体は再び世界のトップレベルに比肩するに至っている。しかしながら、すでに欧米諸国では収差補正機開発そのものは一段落し、今後10年～20年先を見据えながら最先端顕微鏡を多機能・多様化させ、ナノテク研究やバイオ研究の個別テーマへの応用展開を図るべく議論を深めている。

今後、日本でも新たなナノサイエンス局面を拓きつつ、装置開発も含めて世界をリードしていくためには今後の基礎研究の進め方が重要となる。各大学や研究機関がそれぞれの得意分野に立脚した拠点を設け、これらを横断的・有機的につなぐオールジャパン体制が今こそ強く望まれる。



出典：参考文献¹⁾、Copyright ©Macmillan Publishers Ltd.

電子顕微鏡における収差補正技術開発の世界的動向と日本の現状

阿部 英司
客員研究官

1 はじめに

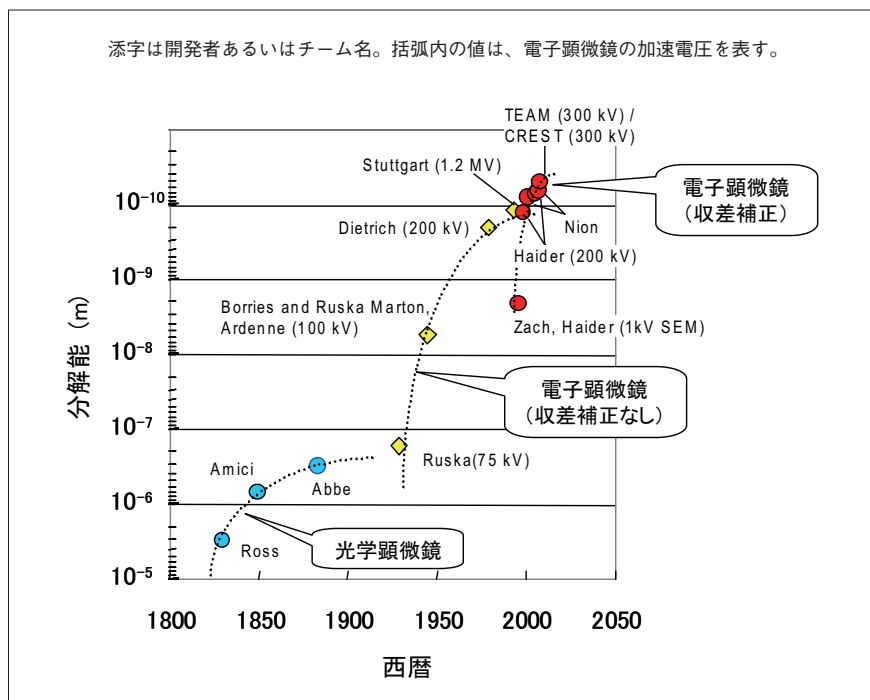
学校の理科室にある光学顕微鏡は、おそらく誰もが一度は覗いた経験があるだろう。植物の切片を拡大し、そこに「小さな部屋(セル：細胞の語源)」を見いだすことで、子どもたちは目には見えずとも小さな世界が存在することを知る。およそ300年以上前、Leeuwenhoekは自身で磨き上げたレンズを用いて初めての顕微鏡を作製し、次々と微生物を発見したのであった。ただし、どれほど精巧にレンズを磨いても、この顕微鏡で捉えることのできる小さなものには限界が訪れる。可視光を線源とする光学顕微鏡では、その波長であるおよそ $1\mu\text{m}$ (可視光波長： $380\sim 750\text{nm}$)が原理的分解能であり(図表1¹⁾)、これより小さな対象を捉えることはできない。

電子が、粒子であると同時に波としても振る舞うことは、20世紀科学のハイライトである量子力学の発見であった。この電子の波としての性質を利用し、量子力学の恩恵を最も直接的な形で応用展開した例が電子顕微鏡である。20世紀初期に、ドイツのRuskaは世界で初めての電子顕微鏡を作製し、光学顕微鏡では越えられなかった分解能の壁を打ち破った(図表1)。

その功績により、Ruskaは1986年のノーベル物理学賞を受賞している。電子顕微鏡開発の黎明期に、我が国はいち早く産官学プロジェクト(日本学術振興会第37小委員会)を立ち上げ、本分野のその後の発展を世界的にリードすることに成功した。1970年代にOECD(経済協力開発機構)が公表した「最も社会に貢献した100の技術」に、日本からは「新幹線」「トランジスター

ラジオ」「ビデオカメラ」「電子顕微鏡」の4つがランクインしている。1980年以降、日本のメーカーによる電子顕微鏡が生物分子や物質の原子配列などの高分解能観察を次々と可能とし、その性能の高さゆえ世界の主要研究機関にあまねく設置されるに至ったのである。電子顕微鏡開発は日本の科学史に残る成功を収め、「電顕ニッポン」は世界中に知れ渡った。

図表1 光学顕微鏡から電子顕微鏡にわたる分解能の発展史



出典：参考文献¹⁾、Copyright ©Macmillan Publishers Ltd.

しかし、20世紀末、電子顕微鏡発祥の地であるドイツから再び革命がもたらされた。電子顕微鏡に用いる磁場レンズの「球面収差補正機」が開発され²⁾、頭打ちの感があった分解能の飛躍的な向上が、優れたコストパフォーマンスのもと実現されたのである(図表1)。この新技術に対して世界が素早く反応し、欧米諸国で次々と収差補

正顕微鏡開発プロジェクトが発足した。特に、本領域において従来は傍観者であった米国が、政府主導のもとに前例のない投資を行い、電子顕微鏡開発・研究のイニシアティブをとるべく動き出した³⁾。この予想外の展開に対して、収差補正機開発初期において我が国は完全に一步出遅れてしまった。

本稿では、電子顕微鏡発展の歴

史を紐解きながら、現在の世界および日本における収差補正電子顕微鏡の開発動向を概説する。収差補正技術がもたらした電子顕微鏡の多様化・多機能化にも触れ、日本がお家芸の真の奪回に向けてとるべき長期的展望について私見を述べたい。

2 電子顕微鏡の発展史

2-1

電子顕微鏡の発明

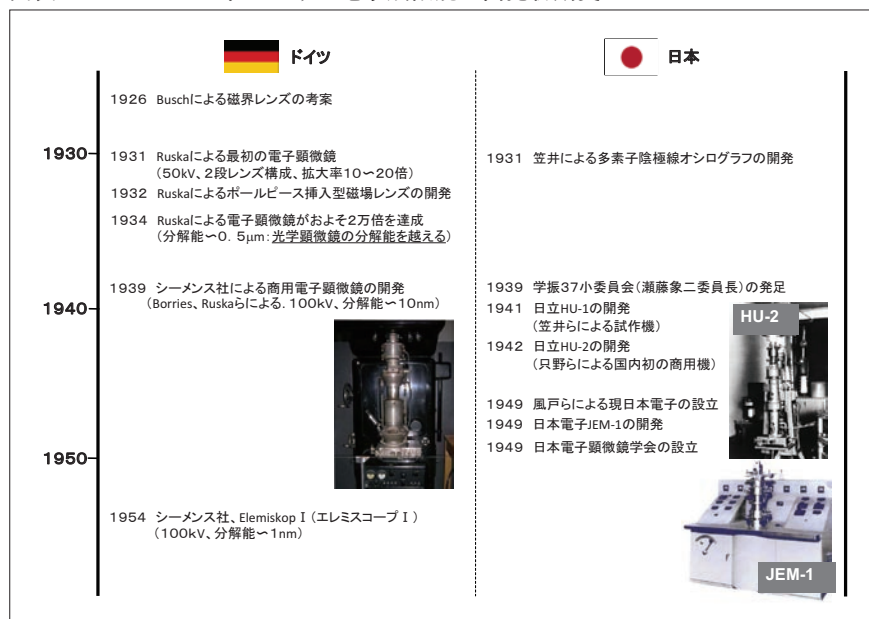
量子力学は、素粒子である電子が波としての性質も有することを我々に教えたが、その運動量と波長の関係は de Broglie の「物質波」の概念によって定式化された。これによれば、一定電圧のもと加速され運動する電子は、可視光を遙かに凌ぐ波長を有することが直ちに導かれる。すなわち、電子に作用するレンズがあれば、極めて高い分解能の顕微鏡が作製できることを意味する。ソレノイド(導線を巻き付けたコイル)磁場による電子収束効果が、光学系における凸レンズと等価な作用を持つことから、さっそく電子と磁場レンズの組み合わせによる「超顕微鏡」の開発が試みられた。しかし、最初の試作機の拡大率は10～20倍程度であり、全く実用的な意味をなさなかった(図表2)。磁場レンズの性能が全く追いついていなかったためである。最終的な決定打となったのは、コイルが発生する磁束をより効果的に集中させるため、Ruska が独自に考案した「ポールピース(図表3)」と呼ばれるパーツであり、これを挿入した磁場レンズが極めて優れた電子収束特性(レンズ拡大

—収差補正以前—

特性)を実現した。このポールピース型磁場レンズを2段で用いた超顕微鏡が、1934年に電子顕微鏡と

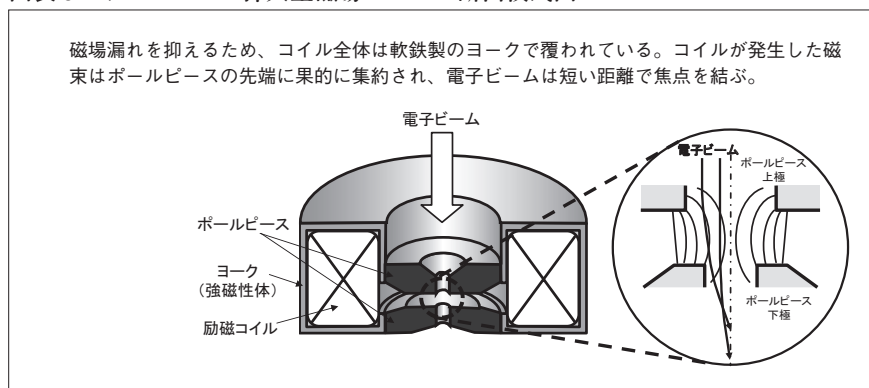
して初めて光学顕微鏡の分解能を越えた。その後、Ruska はシーメンス社において電子顕微鏡の開発

図表2 ドイツと日本における電子顕微鏡の開発初期史



科学技術動向研究センターにて作成。写真左は参考文献⁴⁾より転載、写真右は(株)日立製作所、日本電子(株)の各社提供

図表3 ポールピース挿入型磁場レンズの断面模式図



科学技術動向研究センターにて作成

を続け、1939年に最初の商用機、さらに1954年には現行機の原型となる高分解能型商用機(エレミスコープI:分解能は約1nm)までへと育て上げた(図表2)。

Ruskaの成功は、高性能磁場レンズの作製にあった。彼は、電子顕微鏡開発にあたってそれほど量子力学(電子=波)を意識していなかったとも言われており、とにかく既存の理論に沿って磁場レンズを設計し、独自の技術的工夫によってその性能を高めたのである。300年以上前に、Leeuwenhoekがひたすらレンズを磨き上げた姿勢に重なる。

2-2

日本の躍進-産官学プロジェクトの輝かしい成功

日本の電子顕微鏡の開発は、1939年、瀬藤(東大)を委員長とする日本学術振興会第37小委員会(以下、学振37小委員会)の発足に始まる⁵⁾。この委員会には、電子工学・物理・化学・医学等の広い学問分野から学者・研究者が集結するとともに、東京芝浦電気(株)(現在の(株)東芝)、(株)日立製作所、(株)島津製作所、日本電気(株)等のメーカーの技術者も多数加わり、産官学一体となって国産電子顕微鏡の開発を目指した。委員会運営には、大学、競合企業を問わず、得られたデータは全て公表するという非常にオープンな方針が採られた。また、当時は第二次世界大戦に突入した時期でもあり、ドイツで開発された最新の電子顕微鏡を輸入することが出来なかったため、それがかえって独自の開発を促すよい結果へとつながったとも言われている。これらの状況がうまくプラスに作用し、電子顕微鏡開発は日本の科学史に残る成功を収めたのである。世界の情報が溢れ、研

究の秘密主義が強くなった現在では、同様の状況を実現させることは難しいかもしれない。皮肉なことである。

学振37小委員会の中心メンバーであった笠井(電気試験所(現:(独)産業技術総合研究所))は、電子顕微鏡の黎明期に、目的は違えども全く同様の装置である陰極線(電子線)オシログラフを作製していた(図表2)。電子顕微鏡開発の重要性にいち早く気づいた彼は、(株)日立製作所へと異動し、すぐさま最初の試作機(HU-1)と、国産初の商用機(HU-2)の開発へと結びつけた。ドイツよりおよそ10年遅れて電子顕微鏡開発に着手した日本であったが、委員会発足からわずか数年で世界トップに比肩する装置開発を成し遂げたのである。成功要因には、①すでに電子光学基盤技術があったこと、②産官学間で常に互いの最新データを共有し、委員会が高いレベルで実質的な機能をしたこと、などがある。戦後の復興期に入ると、風戸らによって電子顕微鏡製作を主幹事業とする日本電子工学研究所(現在の日本電子(株))が設立された。同社の商用一号機(JEM-1)は、顕微鏡としてだけではなく、電子回折測定装置としての機能も有しており、現在の多機能電子顕微鏡の先駆けとなった。ちなみに、50年代後半までは東芝社も独自路線(静電レンズ)での電子顕微鏡開発を進めていたが、後に撤退した。その理由としては、静電レンズ性能の限界などの技術的な問題もあろうが、戦後急激に成長した半導体等の他分野へと技術者を振り分けなければいけないという、大会社ゆえの判断が大きかったものと思われる。同様の理由で、電子顕微鏡産みの親であるドイツのシーメンス社も、現在ではその製造を行っていない。

初期開発以降、電子顕微鏡はユーザーの要望に応じてより高性能・高分解能化への道を歩む。学振37

図表4 日本電子製の超高压電子顕微鏡(加速電圧125万ボルト)

図表1において、収差補正以前に世界最高分解能を達成した装置と同型機。

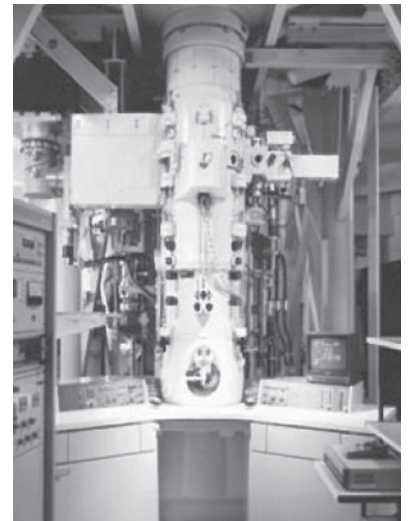


写真: 東京大学大学院工学系研究科提供

小委員会を通して、総合的に高いレベルでの基盤技術を築きあげた日本企業のこの間の躍進は目覚ましく、日立社、日本電子社に代表されるメーカーの日本製電子顕微鏡が、世界の市場を日の出の勢いで制していった。1966年に京都にて国際電子顕微鏡学会が開かれた頃には、国内で生産された電子顕微鏡はすでに2500台以上にのぼり、その半数以上が海外へと輸出されていたらしい⁵⁾。当時の電子顕微鏡開発は、日本のお家芸と言われる域にまで発展していた。1970年以降、電子顕微鏡の分解能はさらに進歩を遂げ、生物分子や物質中の原子までも捉えるに至った。

この期間における高分解能化への主流技術は、電子を加速する電圧を高くし、すなわち電子運動量を増加させ、波長を短くすることで分解能を向上させようとするものであった。日本が、その高い技術力を持って開発した高压から超高压電子顕微鏡(加速電圧400~1250kV)は、1990年に入るとほぼ0.1nmに迫る最高分解能を達成し

(図表1)、世界各地の主要研究機関にフラッグシップ機(図表4)として多数設置された。

3 収差補正電子顕微鏡の登場

超高圧機の開発により、1990年頃には電子顕微鏡の分解能は0.1nmにまで至った。ここで図表1に目を戻すと、1990年代に分解能の伸びがこの0.1nmあたりで頭打ちになっていたことに気づく。過去に、光学顕微鏡の分解能が1 μ m程度に留まったのは、前述のように可視光波長による原理的限界であった。物質波の概念に基づき、125万ボルトで加速された電子の波長を見積もると、1pm(ピコメートル:10⁻¹²m)のオーダーにまで達していることが導かれる。すなわち、0.1nmという値は、原理的分解能からまだ2~3桁もかけ離れていたのである。当時の電子顕微鏡の分解能は、磁場レンズの大きな球面収差によって著しく制限されており、その解決は電子顕微鏡研究者の長年にわたる悲願だった。本章では、1990年代後半に0.1nmの壁を越える飛躍的な分解能向上をもたらした磁場レンズ収差補正機の原理と、その開発に至る経緯を述べる。

3-1

球面収差とは

波長オーダーの原理的分解能へと近づくためには、レンズが取り込める入射波の範囲を十分に大きくする必要がある(回折限界による分解能 \propto 波長/レンズ開口)。しかしながら、凸レンズの端側を通過する波は、焦点面における理想収束位置からのずれが大きくなるため(図表5左)、取り込むことのできる範囲は制限されてしまう。このずれをもたらすのが、レンズの

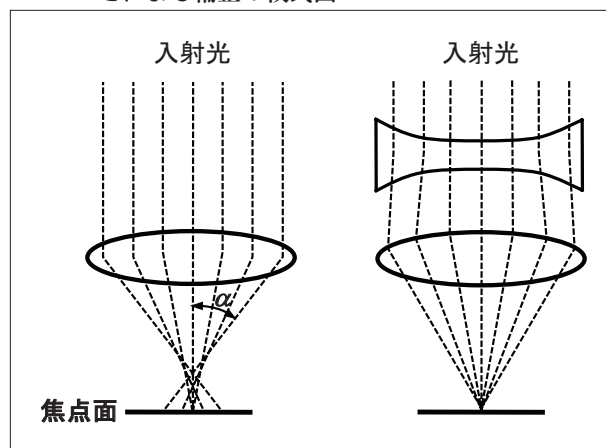
球面収差である。球面収差(Cs)の影響はレンズの端側、すなわち大きな収束角 α で伝播される波ほど顕著となり、その理想収束点からのずれはCs α^3 に比例することが知られている(光学では、球面収差は3次の収差と定義される)。一般の光学系では、凹レンズと組み合わせることによって球面収差は補正される(図表5右)。電子顕微鏡に用いる磁場レンズも凹レンズで補正できればよいのだが、電子入射軸に対して回転対称である磁場レンズ(図表3参照)では、基本的に凸レンズ作用しか得られないのである。近年実用化された収差補正技術では、非軸対称な多極子レンズを用いて凹レンズ作用を発生させるのだが、その基礎理論1940年代から与えられていた。

3-2

多極子レンズによる収差補正機開発

電子顕微鏡が未だ開発初期段階にあった1940年後半に、ダルムシュタット工科大学(独)の物理学者Scherzerは遙か先を見越した研究を次々と展開していた。例えば今日「Scherzer条件」として知られる、電子顕微鏡で原子配列を映し出すための理論的光学条件は、装置性能がそのレベルに達するずっと以

図表5 凸レンズの球面収差と、凹凸レンズの組み合わせによる補正の模式図



科学技術動向研究センターにて作成

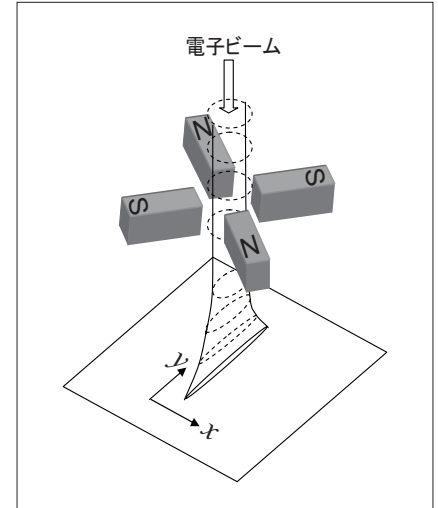
前⁶⁾に提案されていた。彼はレンズ特性に関しても早い時期から卓見しており、軸(回転)対称な磁場レンズでは負の収差(凹レンズ効果)を発生することができないことを理論的に示すとともに、多極子レンズを多段に組み合わせることによって球面収差補正が可能となることを初めて提案した。多極子レンズとは、平面内に配置された複数の磁極によって構成される非軸対称な構造を持つレンズであり、磁極の数によって4極子、6極子、8極子等がある。多極子レンズを用いた収差補正法は、Scherzerのアイデアを土台とする4極子-8極子の組み合わせ方式と、フランス国立科学研究センター(CNRS)のHawkesの提案から始まった6極子方式とに大別できる。それらおよびその発展史を図表6にまとめた。以下、4極子-8極子型、6極子型それぞれの原理を簡潔に述べる。より技術的な詳細は、参考文献を参照頂きたい^{7~9)}。

図表6 多極子レンズによる収差補正技術開発史

電子顕微鏡 収差補正レンズの開発史	
1940	
1947	Scherzer, 非軸対称多極子レンズによる収差補正の提案
1951	Seelger, Scherzer, 円筒レンズ+8極子の組み合わせによる試作機
1956	Archard 4極子-8極子レンズによる収差補正の提案
1960	
1964	Deltrap, 4極子-8極子レンズによる収差補正効果の実験的検証
1965	Hawkes, 6極子レンズによる収差補正効果の提案
1972	Creweら 4極子-8極子収差補正レンズを搭載した電子顕微鏡の試作 (収差補正による分解能改善は達成できず)
1979	Beck 2枚の6極子レンズによる収差補正効果の提案
1980	Crewe 1枚の6極子レンズによる収差補正効果の提案
1980	
1982	岡山、川勝 自己整合型4極子レンズの提案と実験による検証
1990	Rose 6極子レンズ+転送レンズによる収差補正法の提案 (収差補正機実用化へつながったアイデア)
1995	Haiderら Rose型収差補正レンズを搭載した電子顕微鏡の開発 (収差補正による分解能向上を初めて達成した)
1999	Krivanekら 4極子-8極子収差補正レンズを搭載した電子顕微鏡 (収差補正による分解能改善を達成)
2000	
2006	Krivanekら 4極子-8極子収差補正レンズによる高次収差補正 (5次の球面収差補正による、さらなる高分解能化)
2009	沢田ら 6極子+転送レンズによる高次収差補正 (5次の6回対称非点収差補正による、さらなる高分解能化)

科学技術動向研究センターにて作成

図表7 非軸対称4極子レンズによる入射電子ビームの偏向効果



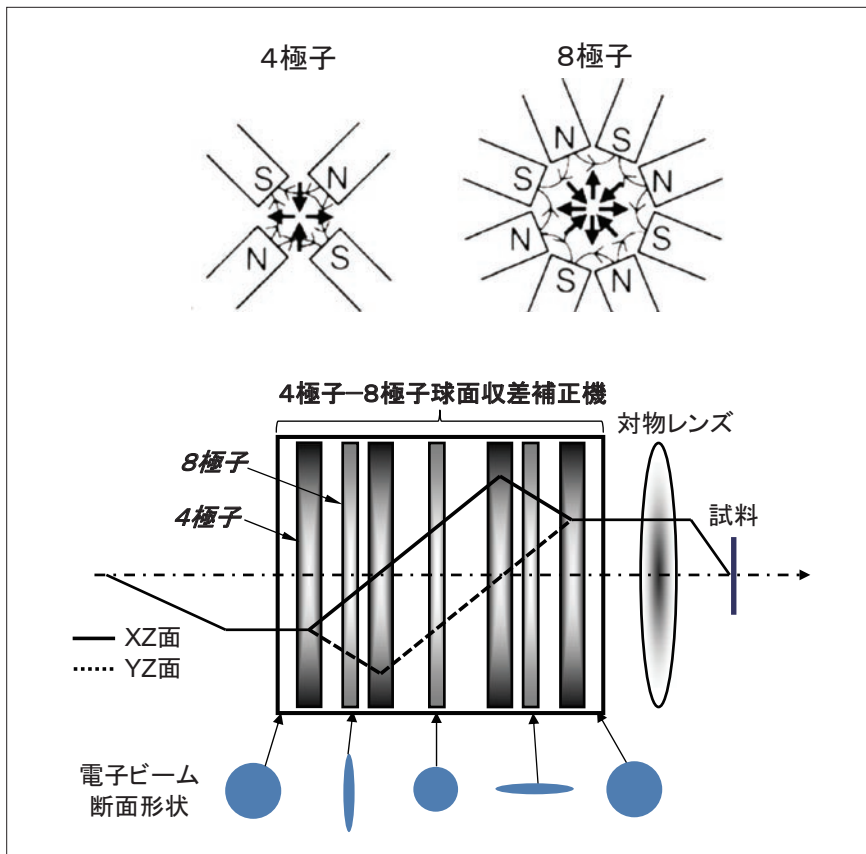
科学技術動向研究センターにて作成

3-2-1 4極子-8極子レンズによる収差補正

多極子レンズを通過する電子ビームは、レンズを構成する磁極ペアの数で決まる対称性に従って、軸中心から発散および収束のそれぞれ方向に偏向される。一例として、図表7に4極子レンズによる電子ビーム形状変形の模式図を示す。8極子場においては、凹レンズ作用である発散方向(図表8)への偏向が生み出す収差は、球面収差と同じ3次の α 依存性を持つため、この方向に対しては収差補正が可能となる。補正方向の制御は、多極子レンズにおける偏向力が磁極近傍で強く作用し、中心へ近づくほど弱くなるという特性を利用する。具体的には、まず4極子場でX方向へのみ強くビームを絞り込み、伸びたY方向を8極子場の発散方向に対応させ通過させることで、Y方向の収差が補正されることになる。これを極性が反転した4極子レンズを通せば、再び円状のビーム(Y方向のみ収差補正済み)へ戻る。引き続き、同様の収差補正作用をX方向に対しても行えば、全体の球面収差が補正できることになる。これら一連の流れを、図表8に模式的に示した。

収差補正機は、複数のレンズから構成される複雑な構造を持つこ

図表8 4極子、8極子レンズの発散・収束作用、および4段4極子-3段8極子多段レンズ構成による収差補正効果の模式図



科学技術動向研究センターにて作成

とが一目瞭然であろう。多段レンズにより、入射ビームを歪ませては元に戻す、といった過程を複数回繰り返す、ようやく球面収差は補正される。その際、多段レンズの各磁極一つ一つを相関させながら、極めて高い精度で制御しなければならない。それまでの電子顕微鏡が、基本的には一つのレンズ(図表3)のみを制御・調整すればよかったことを思えば、収差補正レンズが要求する制御レベルは極めて複雑かつ高度である。1970年代の初め、粒子ビーム制御の分野ですでに際だった成果を挙げていたイリノイ大学(米)のCreweによる収差補正機は、設計上の装置性能は十分であったが、実際の分解能改善は果たせなかった。補正機を構成する磁極材料の不均一性に起因する多極子作用の不具合や、複数レンズを同時に微調整する手段が十分に確立されていなかった等、当時の技術的未熟さが主要因であった。

これら基盤技術にその後の進展がもたらされ、次節に述べるRose-Haider型補正機の成功に続いて、1999年に4-8極子型収差補正機はケンブリッジ学派の流れをくむKrivanekらにより実用化された¹⁰⁾。彼らは、現在ではさらに高次収差(5次の球面収差)も補正する高分解能補正機を開発するまでに至っている¹¹⁾。なお4-8極子型補正機は、試料上へ電子ビームを収束する作用のみに働くため、試料透過後の電子波面の収差補正を必要とする透過型電子顕微鏡法(TEM)に用いることは出来ない。この原理的制限もあり、4-8極子型補正機は制御が比較的優しい低加速走査型電子顕微鏡(SEM: 加速電圧1kV)にてまずは実現された¹²⁾という経緯がある(1994年: 図表1)。

3-2-2 6極子レンズによる収差補正

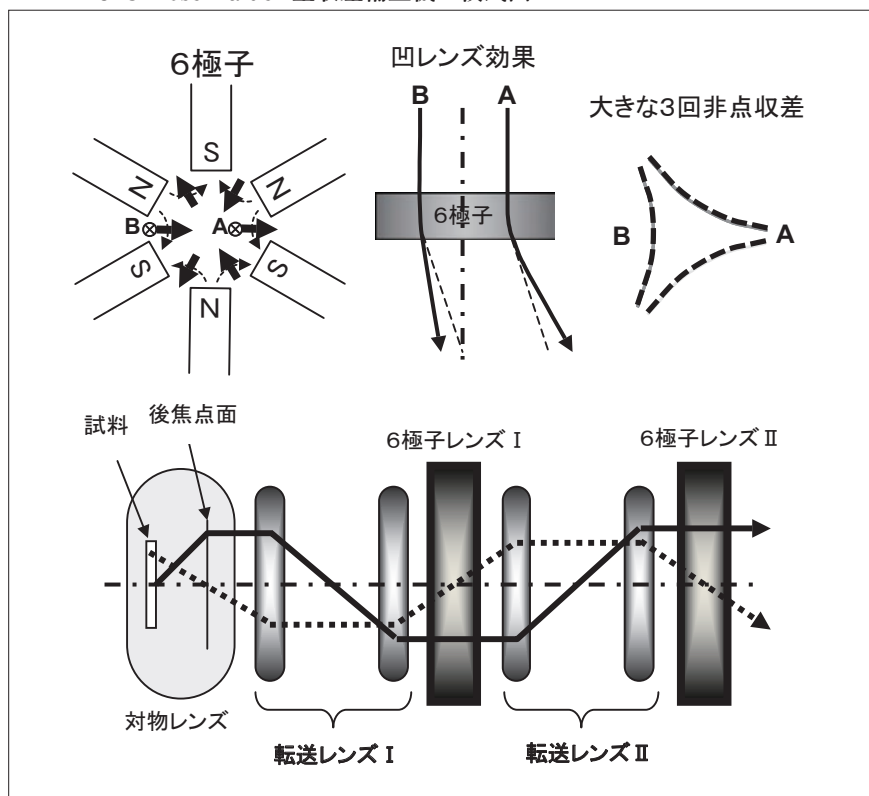
6極子レンズでは、前述の4-8

極子構成とは異なり、相対する磁極に異なる極性が配置される(図表9左上)。すなわち、光軸を挟んで両極側近傍を通過する電子は、それぞれ同一方向への偏向を受けることになる。前節で述べたように、多極子レンズにおける偏向作用の強さは、磁極へ近づくほど強く、また中心へ向かうほど弱くなる。図表9上の模式図において、光軸より遠ざかる力を受けるA入射の電子は、6極子場を通過中にその偏向力が次第に増していく一方、光軸へ向かうB入射の電子が受ける偏向力は次第に減少していく。これらの作用は総じて、光軸から離れる方向へと働く凹レンズの効果を生み出す。この発散偏向の α に対する依存性が3次であるため、球面収差補正が可能になるという仕組みである。6極子レンズはその特性上、4-8極子のような特定方向へのビーム変形過程(図表7)を必要としない利点があるが、極めて大きな3回非点収差(α に対する2次の収差)を生じ、ビーム形状

を3角形へと歪ませてしまうという致命的欠点がある(図表9右上)。それゆえ6極子場は、種々の理論的試みはあったものの、実現は無理であろうとの認識が主流を占めつつあった。しかし、Scherzerの研究室を引き継いだRoseが「転送レンズ(transfer-lens)の挿入」という見事な解決策を着想し¹³⁾、一気に実用化へとつなげたのである。

図表9下に、Rose型6極子補正系の構成を示す。互いに反対称な磁極配列となるように2つの6極子レンズが配置され、最初の6極子Iで発生した3回非点収差を次の6極子IIで打ち消せるようになっている。この働きを可能にするのが、収差補正を行うべき対物レンズの後焦点面を、それぞれの6極子レンズの光学的主面へと逐次伝達する転送レンズである。この転送レンズの見事なアシストを含めた一連の動作により、6極子型は3次の球面収差補正を成し遂げる。Rose型補正機は、最終的に彼の学生であったHaiderが設立し

図表9 6極子レンズの発散・収束作用、および6極子-転送レンズ多段構成によるRose-Haider型収差補正機の模式図



科学技術動向研究センターにて作成

た CEOS 社¹⁴⁾により実機開発がなされ、1995 年、収差補正による電子顕微鏡分解能向上を世界で初めて実現するに至った²⁾。6 極子型補正機は、電子ビーム収束タイプ (STEM) と試料透過波補正タイプ (TEM) のいずれの電子顕微鏡にも用いることができることから、現在の主流補正機となっている。

3-3

収差補正開発の鍵 —なぜ日本でできなかったのか?

その原理の提唱からおよそ 50 年の歳月を経て、20 世紀末に多極子レンズ収差補正技術は実現に至った。理論はあっても技術の未成熟さが実機開発を阻む、といった状況はいずれの領域にでも数多例はあろう。電子顕微鏡は日本が最も進んだ基盤技術を有していたのであれば、収差補正技術を最初に開発できたはずではないか、といぶかしむ声上がるのも無理はない。以下、収差補正技術開発の鍵となった要因や背景をいくつか挙げてみる。

1) 自動制御ソフトウェアの開発

極めて高精度な制御が要求される多極子多段レンズ群を自動的に光学チューニングするソフトウェアの開発が、商用機実現の最終的な鍵であった。この点、コンピュー

ターの計算能力が急激な成長をなし遂げた昨今の状況が、収差補正機開発を強力に後押ししたことは特筆すべき時代背景である。日本のメーカーは概してハード(装置本体)至上主義であり、ソフト開発を軽んずる傾向にあったことが裏目に出たと考えられる。

2) ベンチャー型の起業

収差補正機開発社である CEOS 社(独)や Nion 社(米)¹⁵⁾は、いずれも個人の発想を小規模な人員構成で展開するベンチャー企業であった。Nion 社の技術者の殆どは博士号取得者であり、個々の高い専門能力が技術開発を根本から支えている。博士取得者がむしろ日本企業から敬遠されがちな現状も含めて、我が国におけるベンチャー起業の難しさが収差補正機開発を阻んだ一因とも指摘できる。

3) 基礎研究と人材

前述のように、英国やドイツを中心とする収差補正機開発は、大学での数世代にわたる基礎研究が実を結んだ結果である。実用化へ決定的なアイデアとなった Rose の転送レンズは、Ruska のポールピースに匹敵する大きなブレークスルーであった。過去 50 年間を振り返ると、日本においても電子光学・収差補正に関する基礎研究として一部に萌芽的な試み、例えば岡山による SEM (30kV) 用補正機¹⁶⁾、志水・高井ら大阪大グループによ

る変調結像型収差補正¹⁷⁾などがあつた。しかし、現在の主流となった高エネルギービーム用多極子補正機に関する継続的研究は大学等でなされておらず、収差補正機実現の最終的な発想を生み出すための土壌は極めて乏しかったと言わざるをえない。

上記 1)、2) はしばしば日本の企業・産業体質に照らして議論されることであり、収差補正機開発に出遅れた原因の一部となったかもしれないが、筆者はおそらく直接的な主因ではないと考えている。技術的なブレークスルーをもたらした Rose の転送レンズは、電子光学に携わる者にとってはまさに「コロンブスの卵」の着想である。このアイデアは、地に足を着け、継続的な基礎研究を怠らなかつたドイツにおいてこそ生まれ得たのだと考える関係者は、筆者だけではない。収差補正技術は、ある日突然に現れたものでは決してない。収差補正理論は頭の片隅にあり、かつ潜在的な開発能力は十分に有していたものの、その技術実現は困難、もしくはかなり先のことであると決めてかかっていた日本の研究者・技術者では実機開発に至れるはずもなからう。長きにわたり、電子顕微鏡の世界市場で「一人勝ち」状態であった当時の日本の関係者が失っていたのは、学振 37 小委員会時代の挑戦心と情熱であったかもしれない。

4 収差補正顕微鏡の世界的展開 (2000 年～)

2000 年の米国によるナノテクノロジー・イニシアチブの提唱以降、ナノテク研究必須ツールである電子顕微鏡は存在力を高めていた。その最中での、収差補正機の登場は世界の注目を大いに集めることとなった。前世代の高加速電圧に

頼る高分解能化は、結果として非常に高いエネルギーを持つ電子ビームを用いるため、観察中の試料損傷が激しく、半導体やバイオ系試料への適用が著しく制限されてしまっていた。レンズ収差補正によれば、比較的低い加速電圧、

すなわち低エネルギーでも従来を遙かに凌ぐ分解能を得ることができ、電子顕微鏡の観察対象範囲を飛躍的に拡大できる。その重要性に世界がいち早く反応し、欧米諸国に次々と収差補正顕微鏡関連プロジェクトが発足した。

4-1

世界の収差補正
プロジェクト動向

図表10に、世界各国で展開された収差補正電子顕微鏡の主要プロジェクトをまとめた。以下、それぞれを簡潔に概説する。

・SuperSTEM (英)

英国は、原理・開発を先導してきた収束電子ビームを走査するタイプの透過電子顕微鏡法(STEM)に特化し、その高性能化を目的としてSuperSTEMプロジェクトを進めている¹⁸⁾。収差補正レンズにより、0.1nm以下にまで絞り込んだ高輝度・高干渉電子ビームを用いることから、近年その進化が著しい放射光施設と対比して“A Synchrotron in a Microscope (顕微鏡でのシンクロトロン)”と銘打っている。SuperSTEMは世界でもいち早くスタートした収差補正関

連プロジェクトのひとつである。

・TEAM (米)

2000年、米国はエネルギー省(DOE)主導のもと“TEAM”(Transmission Electron Aberration-corrected Microscope)プロジェクトを立ち上げ、主要国立研究所に収差補正電子顕微鏡を設置しつつ、装置開発でもイニシアティブをとるべく動き出した³⁾。実態としては、FEI社や米国内に拠点を持つ日本電子社、日立社等のメーカーとの連携を密にし、最新装置を随時導入していくスタイルをとった。TEAMプロジェクトは、特にFEI社の躍進の源となった。

・SATEM/SESAM (独)

ドイツでは2000年前後より、収差補正機を開発したCEOS社と国策会社であるLEO社を中心として、高分解能電子顕微鏡の開発を目指したSATEM(Sub-Ångstrom-TEM)、および分光測定の高分解能化も併せて行うSESAM(Sub-Electronvolt and Sub-Ångstrom Microscope)の2つのプロジェクト

が発足した。

・ESTEEM (欧州連合)

米国のTEAMに対抗すべく、2006年にEU連合も“ESTEEM”(Enabling Science and Technology for European Electron Microscopy)を立ち上げ、EU諸国間の連携と要素技術開発に着手した¹⁹⁾。そのプロジェクト名が示すように、単に装置技術開発に留まらず、そこから新しいサイエンス展開を生み出すことを主目的としている。そのため、研究者ネットワークの構築を重視している。

収差補正機実現に伴う世界規模での電子顕微鏡プロジェクト展開のなかでも、従来はその開発に傍観者であった米国が前例のない投資を行い、当該分野へ本格的に参入してきたことは日本の関係者に少なからぬ衝撃をもたらした。上述のように、米国TEAMプロジェクトの背景にはナノテクノロジー・イニシアチブの立ち上げがある。時のクリントン大統領によるナノテク提唱の際に引用された、ファ

図表10 世界の主な収差補正電子顕微鏡プロジェクト

プロジェクト	国/地域	期間	おもな参加機関		特徴	予算 (概算)
			研究機関、監督機関	装置メーカー		
SuperSTEM	英国	1997～	SuperSTEM研究所の設置(ダースペリー)、リバプール、リーズ、グラスゴー、ケンブリッジの4大学が共同で運営。	Nion	STEMによる微小領域の化学分析用装置の開発と応用	～25億円
TEAM	米国	2000～	ローレンス・バークレー、アルゴンヌ、ブルックヘブン、オークリッジの4国立研究所、イリノイ大学(フレデリック・サイツ物質研究所)。	CEOS, Nion, FEI等	分解能50pmの収差補正電子顕微鏡の開発	～25億円
SATEM	ドイツ	2000～	CEOS社、LEO社	CEOS, Zeiss/LEO	球面収差補正による0.1nm(1Å)以下の分解能が目標	～18億円
SESAM		2000～	マックスプランク研究所		エネルギーフィルターによる電子ビームの単色化(< 0.2 eV)	
ESTEEM	FP6/EC	2006～	7カ国11研究機関	特定せず	ヨーロッパの主要な電子顕微鏡センターと材料関係の研究機関を結びつけ、電子顕微鏡の応用利用を促進する。	～18億円
CREST	日本	2004～	東京工業大学・科学技術振興機構(JST)	日本電子	分解能0.5Å以下を達成。軽元素(リチウム)の観察に成功。	～9億円
		2006～	産業技術総合研究所・科学技術振興機構(JST)		低加速電圧によるソフトマテリアルの観察。独自の収差補正機の開発に成功。	

科学技術動向研究センターにて作成

インマン博士の有名な 1959 年の講演“Plenty of room at the bottom”²⁰⁾中には電子顕微鏡の重要性も明確に指摘されており、これが TEAM のきっかけとなったことは想像に難くない。

一台の設置費が数 10 億円かかっていた超高压電子顕微鏡と比べれば、収差補正顕微鏡は 3～6 億円程度であり、格段にコストパフォーマンスに優れている。それゆえ、国主導型プロジェクトであるにもかかわらずその費用はいずれも 20 億円前後と比較的少額規模であり、総じて優れた対投資効果が期待された。こうした需要熱の高まりのもと、収差補正機導入に素早い対応をした FEI 社の電子顕微鏡の基盤技術・生産性が急激に高まり、日本メーカーの独壇場であった世界市場を大きく再編していった。

FEI 社は、総合電機メーカーであるフィリップス社(オランダ)の電子顕微鏡部門が切り離された際、イオンビームを扱っていた米国企業の FEI 社を買収することで、技術者たちがフィリップス社から独立したという経緯を持つ。前フィリップス時代は汎用性重視の電子顕微鏡開発との印象が強く、日本メーカーを大きく凌駕する高性能機に本格的に着手することはなかった。しかし大会社の足かせが外れたことで、FEI 社の技術者た

ちは思う存分、高性能を追求する収差補正顕微鏡を作る機会を得た。ここでもベンチャーマインドが良い方向に働いたと言える。こうして生まれた“TITAN” (図表 11)と名付けられた同社のフラッグシップ機は世界から極めて高い賞賛を受け、TEAM プロジェクトの中核をなす機種になるとともに、日本製の電子顕微鏡に替わって世界の主要研究機関に次々と設置されていった。

4-2

日本における収差補正顕微鏡開発 (2004 年～)

米国 TEAM プロジェクトの後ろ盾もあり FEI 社が目覚ましく躍進する傍ら、日本メーカーは収差補正機導入初期の流れに完全に乗遅れた。FEI 社が TITAN の開発には箝口令を敷き、研究開発を秘密裏に進め情報公開を制限していたという経緯もある。FEI 社の旋風は海外のみならず、日本国内の顕微鏡ユーザーの中核をなす研究機関、例えば東北大学金属材料研究所、(独)物質・材料研究機構、JFE スチール(株)や新日本製鐵(株)の解析研究所などまでもが、次世代先端機として TITAN を導入するに至り、日本のメーカーも事の深刻さを強く認識した。しかしある意味、この「黒船」の襲来は国内の緊張感を高め、再び世界トップを目指そうとする気概を生み出す効果をもたらしただとも言える。やや出遅れたものの、その傷が深まる前に、我が国においても収差補正機開発の個別プロジェクトが直ちに(独)科学技術振興機構(JST)の支援のもと開始された(図表 10)。もともと高い基盤技術を有していた日本電子社は、短期間のうち立て続けに独自の収差補正装置を製作し、すぐさま分解能競争の先頭

へと躍り出ること成功した²¹⁾。図表 1 に、現時点における世界最高分解能を表す CREST と示された点は、この JST 支援の成果である。

JST の戦略的創造推進事業(CREST)の成果としてさらに特筆すべきは、既存技術の模倣にとどまらず、独自のアイデアを盛り込んだ新しいタイプの収差補正レンズ開発を遂げたことである²²⁾。原理的には転送レンズを用いる Rose 方式をベースとするが、従来の 2 段にもう 1 段加えた 3 段の 6 極子レンズ構成とし、これらを絶妙な回転角で配置することによって 6 回対称の非点収差を打ち消せることを見いだしたのである(図表 6 の 2009 年に記載)。収差補正レンズ特性を一段と改善するこのアイデアは、世界的にも非常に高い評価を受けており、電顕ニッポンの基礎技術力の高さを改めて内外へアピールすることとなった。また、現在 CREST では次に補正すべきレンズの色収差に関しても技術開発が進行中であり、同技術の開発²³⁾を進める CEOS 社の後塵を再び拝することのないよう、研究開発が進められている。

日本国内プロジェクトの成果として、高性能収差補正顕微鏡の開発は成功を収め、初期の出遅れは十分に取り戻したと言える。しかしながら冷静に収差補正顕微鏡フィーバーを顧みれば、FEI 社にしても収差補正レンズそのものは 100%CEOS 社に依存しており、この現状は日本メーカーの主たる商用機にもあてはまる。すなわち、いまだ CEOS 社が全体のキャスティングボートを握っていることを忘れてはならない。次章に述べるように、電子顕微鏡の高性能化・多機能化に伴い、顕微鏡本体よりもその周辺・付属装置の重要性が増すという傾向が、より一層強くなってきている。

図表 11 FEI 社の収差補正電子顕微鏡 TITAN (加速電圧 300kV)



出典：FEI 社提供

5 今後の展開 — 最先端電子顕微鏡の多機能化・目的特化

現代の電子顕微鏡は、単に拡大して原子を見るための装置ではない²⁴⁾。計測の3大基本である Diffractometry（回折法）、Spectroscopy（分光法）および Microscopy（顕微鏡法）といった一連の測定を、試料中の微小同一領域について行うことができる総合的計測装置である²⁵⁾（図表12）。Spring-8に代表される現代の放射光施設が、測定目的や対象試料に特化してビームラインを持つと同様に、最先端電子顕微鏡も特定手法に主眼を置き、目的性能を最大限引き出すための装置設計を行う機会が増えている。これを踏まえた今後の電子顕微鏡展開を、技術開発と基礎・応用研究のそれぞれの側面から述べてみたい。

5-1

周辺機器を含めた技術展開

前節で触れたように、収差補正レンズの登場は、それまでは顕微鏡本体に含まれるべきパーツであったレンズの一部分が周辺装置となり、顕微鏡本体よりも付属装置の重要性が増すという主従逆転の構図をもたらした。この兆候は、実は収差補正機登場の以前より芽生えていた。例えば、特性X線や電子エネルギーの分光器は今に至るまで、専門のメーカーが電子顕微鏡メーカーに提供する周辺装置である。それゆえ、分光性能を重視するユーザーにとって、顕微鏡本体の選択は二の次となっていた。分光器の殆どは海外メーカー製であるため、国内電子顕微鏡メーカーはここでも主導権を握られつつあった。米国Gatan社は、世界のマーケットをほぼ独占する電子エ

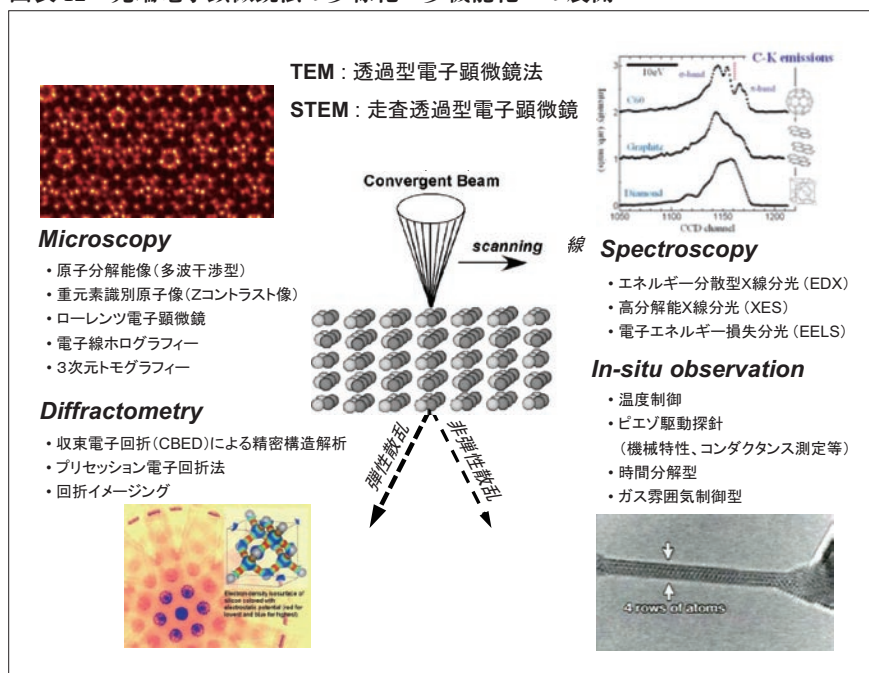
ネルギー分光器メーカーであるが、収差補正レンズの出現と同期して次々と高性能機へとバージョンアップし、一定量の世界ユーザーを常に確保し続けている。現在は、「顕微鏡本体は副次的」という状況がより一層顕在化しつつあるが、米国FEI社はCEOS社やGatan社との連携を密にすることで、現在の成長を遂げている。

収差補正機の登場と、付随する周辺装置の高性能化も相まって、電子顕微鏡本体はより一層の高度化を迫られている。国内メーカーがとるべき道は①顕微鏡本体性能の一層の向上を図る、と同時に、②独自の高性能分光器開発にも着手する、の2点となる。これらは、2006年より文部科学省が始めた「次世代の電子顕微鏡要素技術の開発」プロジェクトによって対応が図られている。その採択テーマ中には、電子銃や記録媒体といった要素基盤技術に加えて、国内独自の特性X線高分解能分光器の開発も含ま

れており、順調に成果を挙げつつある。しかし、一度のプロジェクトでは、周辺機器も含め多種多様に展開する電子顕微鏡法の全て（図表12）を網羅しきれないことを考えると、今後も継続的な対応が必須であろう。特に、最重要手法の一つである電子エネルギー分光器の商用機開発までを見越したプロジェクトが行われていない。今現在で高いポテンシャルを有するGatan社に無理に対抗し関係を損ねる必要は全くないが、中長期的には、部分的にせよ国内機器開発に着手すべきであろう。

収差補正機の効果は、単に最高到達分解能を上げるのみに留まらなかった。まず、その場観察（in-situ observation）の可能性がより一段と拡大した。対物レンズはその構造上において、レンズ内部に試料を設置する（図表2）のだが、従来はこの試料スペースを極小化し犠牲とすることで、球面収差をできるだけ小さく抑えて原子分解能

図表12 先端電子顕微鏡法の多様化・多機能化への展開



科学技術動向研究センターにて作成

を実現していた。収差補正後は、原子分解能を維持したまま、この試料スペースを数 cm オーダー（以前は数 mm オーダーであった）まで拡充した設計が可能となった。それゆえ、収差補正以前は挿入が困難であった、複雑形状をもつようなその場観察用の試料ホルダーの使用が可能となっている。最近の際だった試みとしては、国内外を含めて、触媒作用のガス雰囲気その場観察に特化した顕微鏡・ホルダー設計に関する個別プロジェクトが立ち上がっており、「環境・雰囲気制御型電子顕微鏡」という技術領域を形成しつつある。

もう一つの大きな流れは、従来の透過型電子顕微鏡を大幅に低加速電圧化した状態での高分解能観察を実現し、従来の 100 ~ 200kV 機でも試料損傷が顕著であった有機ソフト・バイオ系試料の原子像観察の道を拓こうとするものである。Nion 社はごく最近、60kV 電子顕微鏡の開発により、ボロンと窒素からなる原子一枚シート物質（炭素におけるグラフェンと相似の構造）の原子識別解析に成功し、Nature 誌の表紙を飾る大きなインパクトを与えている²⁶⁾。日本でも、CREST により開発された(独)産業技術総合研究所の 30 ~ 60kV 電子顕微鏡がカーボン材料の詳細解析²⁷⁾を行っており、この研究領域では世界の先陣を走っている。

ここで超高压電子顕微鏡にも触れておく。従来に比べてその守備範囲が狭まったとはいえ、超高压仕様でしかできない観察法があることは疑いの余地がない。例えば、無機系・生物系ともバルクに近い状態の厚い試料の観察、種々の計測法の加速電圧依存性の物理、等々がある。超高压電子顕微鏡は、日本が長きにわたり築き上げた世界に誇る技術であり、その継承の観点からも、収差補正ができたからといってこれらを直ちにゼロとすべきではないだろう。現在、主要

大学・研究機関の超高压電子顕微鏡拠点において、順次、目的特化型の設計に基づく装置の更新が進められている。

本稿では全ての技術を紹介しきれないが、上記のように、収差補正後の先端電子顕微鏡の多機能化および多様化の流れは世界で急速に進展している。研究者や技術者は常にアンテナを張り、世界の流れに遅れることなく、独自のアイデアを生み出す機会を常にうかがうべき重要な時期である。今後の装置開発で強く留意しておかねばいけない点は、既存技術集積で平均点に優れた「万能型」商用機もさることながら、観察対象・目的に特化した「オンリーワン型」の顕微鏡設計も肝要であるということである。特に研究者は、後者にこそ独自アイデアを盛り込んで世界をリードしなければならない。

5-2

収差補正顕微鏡による 基礎・応用研究展開

科学史において、計測性能の飛躍的向上は、しばしば新たな科学的知見をもたらしてきた。収差補正レンズ開発から十数年が経ち、その技術がほぼ確立した現時点の世界動向は、高性能化・多機能化した最先端電子顕微鏡を用いていかにしてナノ・バイオ研究の新展開を図るか、というフェーズへと移行している。EU 連合の ESTEEM は、この視点からのプロジェクトとなっていることは前述の通りである。米国 TEAM プロジェクトも 2010 年で役目を終えた後、現在は共同利用ネットワークを拡充することに主眼が移され、顕微鏡ユーザーの裾野拡大を目指している。この流れは、電子顕微鏡の収差補正技術が「目的特化した専門性の高いユーザー」の要求に応えただけで

なく、「汎用性向上による一般ユーザー層の拡大」という効果をもたらしていることを意味する。我が国もお家芸の真の復興という意味で、この機を逃すことなくナノテク分野やバイオ分野へと広く応用展開する機会を設けると同時に、専門家によるしっかりとした基礎固めを図ることが肝要と考えられる。

5-2-1 応用展開：ユーザー層裾野の拡大

収差補正電子顕微鏡では、その光学的調整はコンピューターによる自動方式であり、従来の原子像観察に求められた職人的技術はもはや必要とされない。その結果、専門家でなくとも技術的には電子顕微鏡の操作が容易となった。また、収差補正による電子ビーム輝度の 1 ~ 2 桁の向上による分析効率の大幅な改善は、従来は一日仕事であった測定が数分~数時間程度で行えるという大きな時間的メリットももたらした。これらの効果に代表されるように、収差補正技術はそれまで専門家限定であった高性能電子顕微鏡を、より一般的な分析装置として広めることを助けた。汎用性を重視する企業研究所が、大学や国立研究所に先行して収差補正顕微鏡の導入を進めていったのは、特筆すべき出来事である。汎用装置として成熟し、ユーザー裾野が広がることは、従来は使用機会が殆ど無かった様々な研究分野においても、先端電子顕微鏡で解析するケースが増えることを意味する。すなわち、いずれの分野の研究者でも新たな発見に出会える可能性が格段に増す。ナノテク材料の代名詞であるカーボンナノチューブも、飯島博士が常に電子顕微鏡に近い環境であったからこそ発見されたことが思い起こされる。日本における共同利用システムとしては、収差補正機以前より始められていた文部科学省の「ナノテクノロジー総合支援プ

プロジェクト(通称ナノ支援)²⁸⁾が継続されており、現在も収差補正顕微鏡の利用機会を促進している。また、最近では民間の依頼分析にも収差補正顕微鏡の環境が整いつつある。

5-2-2 基礎研究：専門家ネットワークの構築

収差補正開発後、多機能・多様化へ広く展開した電子顕微鏡を最大限活用し、新たな発見の機会を促進するためには、それぞれの専門領域における基礎的理解をより一層深めることが最重要課題となる。例えば、収差補正レンズを用いれば今や電子ビームを 50pm 以下の領域にまで絞り込むことが可能であり、ほぼ量子力学の限界に迫る状態にある。このような極微小ビームを入射した際、電子は試料中をどのように伝播していくのであろうか？ 試料内での弾性散乱、非弾性散乱や、特性X線の発光などは従来の電子散乱理論の延長で理解できるのだろうか？ こういった疑問があらゆる場面で出てくるであろう。まだ教科書に存在しないこれら一つ一つの現象を、理論・実験の両面で検証していく基礎研究が、次世代ナノ研究を世界的にリードする鍵となる。つま

り、「何を観ているのか」を正しく把握しておかないと、新しい発見に出会ったとしても研究者はそれを見落としてしまう。科学的発見(セレンディピティ)は、それを見るべき人(そうだと分かる人)によってのみ見いだされるのである。

現代の基礎研究は、広範に多様化、細分化した領域全てを一人の研究者が行うことはできないようになってきている。図表 12 に示した項目でさえ、筆者が思いついて記した一部の研究領域にすぎないかもしれない。お家芸と呼ばれただけに、日本国内には電子顕微鏡に携わる研究者は多く存在する。多様化した専門領域について、各大学や研究機関がそれぞれの得意領域の研究に立脚した拠点を設け、これらを横断的・有機的につなぐオールジャパン体制が今こそ強く望まれる。力を十分に発揮するためには、装置だけではなく人的ネットワークを通して、深いところで根はつながるべき各専門の知識・情報を共有し、世界に先駆けた新しいアイデアの創出を図ることが必要となる。発想としては、米国の TEAM というよりは、欧州連合の ESTEEM 寄りが望ましいと言えるかもしれない。オールジャパン体制下で、各拠点が国内電子

顕微鏡メーカーと連携し、得意分野を活かすオンリーワン型の装置設計を目指すことで得られる技術的ノウハウが、測定困難であったナノ試料の観察を可能にする新たな装置開発へとつながりうる。これら新装置は新たなユーザー層への興味を引きつけることとなり、さらなる裾野拡大へと直結することが大いに期待される。このような試みの先駆けとして、現在特定領域研究が始められている²⁹⁾。

本節を小括すると、電子顕微鏡の今後の展開として、①汎用性を高めた装置でユーザー裾野を拡大すること、②目的特化した装置で各専門手法を深めていくこと、の2点が肝要だと思われる。装置開発としては相反するコンセプトに見えるが、この2点が相容れないものだという事は決してない。山を大きくするためには、裾野を広げることと、頂を高くすることの両方が大事である。頂を高くしようとする基礎研究は、必ずやユーザー裾野を広げるための新しい装置開発へもつながるのである。電子顕微鏡の今後を議論する際、「汎用性」と「専門性」が混同されている場面をしばしば見受けるが、よく整理しながら方向性を見極める必要がある。

6 おわりに

1990年代後半、電子顕微鏡性能を飛躍的に向上させた収差補正レンズ機は革命をもたらし、ナノテクノロジーの時代背景も相まって世界中の注目を集めることとなった。発祥の地のドイツのみならず、米国までもがその開発に着手する自体となり、電子顕微鏡をお家芸としていた日本が大いに危機感を募らすこととなった。しかし、初動の遅れはあったものの、もともと高い技術力を有していた日本

メーカーは大学・公的研究機関とのプロジェクト研究のもとに高性能機器の開発に成功し、収差補正発明から十数年が経った現在、十分世界のトップレベルに比肩するに至っている。一時期は米国 FEI 社の著しい攻勢を受けた世界市場も、徐々に鎮静化・回復へと向かいつつある。

電子顕微鏡の歴史を顧みれば、ドイツの発明を、後追いではありながらも日本が高い技術力で先達

を追い越し、自らのお家芸とした経緯がある。冷静に見れば、収差補正機開発の初期動向においても同じことが繰り返されているにすぎない。すなわち、電子顕微鏡、収差補正レンズともにその発明自体は海外である。特に収差補正機は、ドイツ、英国の50年にわたる基礎研究が結実した産物であることを再認識すべきである。世界の科学先進国となった日本の技術を、もはや「物真似」と揶揄する声はな

いが、科学大国となった日本が次に成すべきは、既存技術の短期的開発だけにとどまらず、ゼロから新しいものを生み出す真の発明・発見であろう。それには、中長期的展望で基礎科学を継続的に、忍耐強くサポートしていく体制が必要である。対投資効果や短期成果主義のみでの判断は、本来得べき将来の大きな実りを逸する危険

性を孕んでいる。このことを、日本は過去の経験から学ばなければいけない。収差補正電子顕微鏡を軸にした多様な計測法の展開は、近い将来に必ずや大きな発明・発見が見込まれる領域である。次回こそ日本発で新技術を発信するためにも、各専門分野に跨がる研究者間のネットワークを強め、そこでのオープンな討論を通して、横

断的な基礎力強化を図るための枠組みの構築が急務であると考えられる。

謝辞

本稿執筆に関して、東京大学の幾原雄一教授に有益な意見を頂きました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) D. A. Muller, "Structure and bonding at the atomic scale by scanning transmission electron microscopy", *Nature Mater.*, 8(2009)263
- 2) M. Haider et al., "Electron microscopy image enhanced", *Nature* 392(1998)768
- 3) 米国 TEAM プロジェクトホームページ: <http://ncem.lbl.gov/TEAM-project/>
- 4) brewbooks, "Electron Microscope Deutsches Museum", <http://www.flickr.com/photos/93452909@N00/176059674/>, (使用許諾、Creative Commons Attribution-ShareAlike 2.0 Generic (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>))
- 5) 朝倉健太郎, 安達公一, 「電子顕微鏡を作った人々」, 医学出版センター (東京, 1989)
- 6) O.Scherzer, "The theoretical resolution limit of the electron microscope", *J. Appl. Phys.* 20(1949)20
- 7) 沢田英敬, 三宮工, 細川史生, 「球面収差補正 TEM および STEM」, セラミックス, 40(2005)908
- 8) 岡山重夫, 「多極子レンズによる収差補正技術の実用化」, 応用物理, 76(2007)1142
- 9) 岡山重夫, 「収差補正電子光学」, 顕微鏡, 45(2010)119
- 10) O. L. Krivanek et al., "Towards sub-Å electron beams", *Ultramicroscopy* 78(1999)1
- 11) N.Dellby et al., "Optimized quadrupole-octupole C3/C5 corrector for STEM", CPO-7 proceedings, p.97(2006)
- 12) J. Zach and M. Haider, "Aberration correction in a low voltage SEM by a multipole corrector", *Nucl. Instr. Meth. A*363(1995)316
- 13) H. Rose, "Outline of a spherically corrected semiaplanatic medium-voltage transmission electron microscope", *Optik* 85(1990)19
- 14) Ceos 社ホームページ: <http://www.ceos-gmbh.de/>
- 15) Nion 社ホームページ: <http://www.nion.com/index.html>
- 16) S. Okayama, "A new type of quadrupole correction lens for electron-beam lithography", *Nucl. Instr. Meth. A*298(1990)488
- 17) 「次世代超電子顕微鏡の開発」プロジェクト (1996 ~ 2001): http://www.jsps.go.jp/j-rftf/saishu_hyouka_08/04_sougou/p_pdf/s_09.pdf
- 18) 英国 SuperSTEM プロジェクトホームページ: <http://www.superstem.com/>
- 19) ヨーロッパ ESTEEM プロジェクトホームページ: <http://esteem.ua.ac.be/>
- 20) ファインマンの基調講演 (米国物理学会, 1959 年): "There's plenty of room at the bottom", 例えば <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- 21) H. Sawada et al., "STEM imaging of 47pm-separated atomic columns by a spherical aberration-corrected electron microscope with a 300-kV cold field emission gun", *J. Electron Microsc.* 58(2009)357.
- 22) H. Sawada et al., "Correction of higher order geometrical aberration by triple 3-fold astigmatism field", *J. Electron Microsc.* 58(2009)341
- 23) B. Kabius et al., "First application of Cc-corrected imaging for high-resolution and energy-filtered TEM", *J. Electron Microsc.* 58(2009)147

- 24) 特集企画「電子線で今何ができるか」, 結晶学会誌, 47 No.1 (2005)2
- 25) 阿部英司, 「最先端電子顕微鏡による局所構造・組成評価」, 応用物理, 79 (2010)293
- 26) O. L. Krivanek et al., “Atom-by-atom structural and chemical analysis by annular dark-field electron microscopy”, Nature 464 (2010)571
- 27) K. Suenaga et al., “Visualizing and identifying single atoms using electron energy-loss spectroscopy with low accelerating voltage”, Nature Chemistry 1 (2009)415
- 28) 文部科学省 ナノテクノロジーネットワークセンター: <http://www.nanonet.go.jp/japanese/>
- 29) 文部科学省 特定領域研究「機能元素のナノ材料科学」: <http://nanodopant.com/>

執筆者プロフィール



阿部 英司

客員研究官

東京大学大学院工学系研究科 准教授

<http://www.t.u-tokyo.ac.jp/tpage/index.html>

物質・材料研究機構を経て2005年より現職。2002年には、客員研究員としてオークリッジ米国立研究所に滞在。大学院時代より電子顕微鏡のおもしろさにとりつかれ、準結晶を始めとする種々の複雑構造に関する研究で世界をリードしている。「研究は情熱」が信条。