

日立評論創刊一千号記念寄稿

# Message from our Fellows

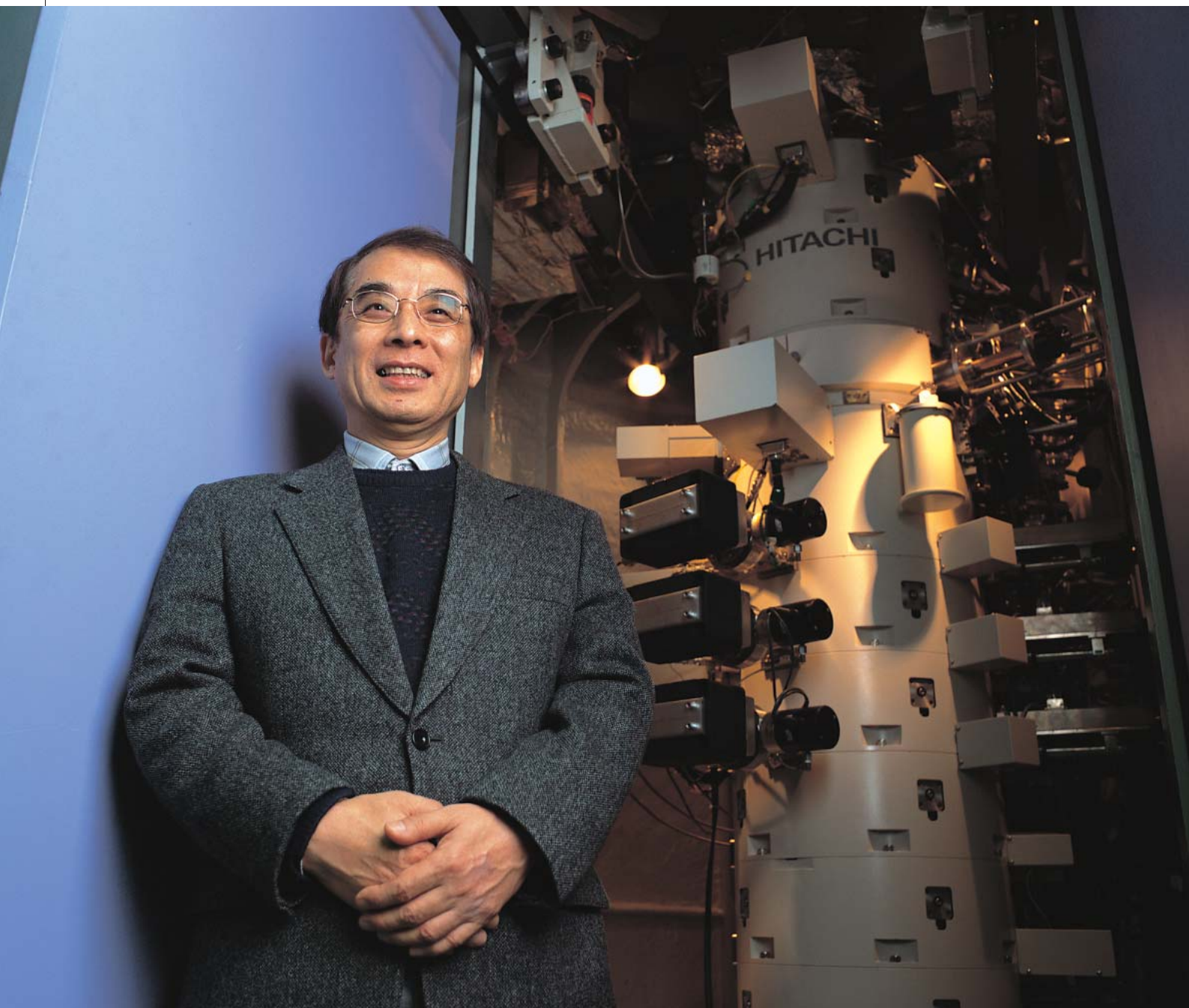
日立製作所 フェロー・理化学研究所 ディレクター・工学博士・理学博士

## 外村 彰

Akira Tonomura

# 電子の波に魅せられて

— 電子顕微鏡技術の革新 —



## はじめに

どんなに精巧な顕微鏡を作っても、光を使う限り、波長以下の分解能は得られないことが、1878年にE. Abbeによって示された。顕微鏡でも見えない病原菌の姿を追って、波長の短い紫外線を使った顕微鏡への努力がなされたりもした。1923年、L. de Broglieによって、電子が光の10万分の1もの短い波長を持つ波であることが提案されると、E. Ruskaは、原子レベルに至る分解能をも可能にする“電子を使った顕微鏡”の開発に着手した。1932年に初めて得られた電子顕微鏡像は10数倍と虫眼鏡と変わらぬ像で関心を呼ぶには至らなかったが、6年後にシーメンスと共同開発した分解能100

の装置によってバクテリオファージが初めて姿を現し、世界に衝撃を与えた。翌年には日本でも電子顕微鏡の開発がスタートしたが、第二次大戦が勃発し、情報がまったく入らない状況下での開発を余儀なくされた。しかし、これは結果的に良い結果を生んだ。欧米からの技術導入に頼っていた大多数の分野には見られない深みのある基礎を築くことができ、日本のお家芸と言われるまでに発展した。実際、この技術の高みに立って、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、量子物理などの幅広い分野で真に世界をリードする研究が現在出始めている。

ここでは、こうした伝統技術の上に立って、筆者が35年にわたり開発を繰り返してきた高輝度電子線を備えた電子顕微鏡と、それによって拓かれた新たな可能性を紹介し、日本の科学技術の行く末にも想いを馳せてみたい。

## 日本における電子顕微鏡開発

日本で電子顕微鏡の開発がスタートしたのは1939年。ここで中心的な役割を果たしたのは、瀬藤象二東大教授(後に生産技術研究所初代所長)を委員長とする日本学術振興会第37小委員会である。この委員会には、工学、理学、医学、生物学等の錚々たる研究者が勢揃いしただけでなく、日立、東芝、島津、日本電気、少し遅れて日本電子などのメーカーの技術者も加わった。委員長が研究費を配分する権限を持ち、各委員がそれぞれ電子顕微鏡を試作し、その結果をすべて公表するというユニークな進め方で、史上例を見ないほど見事な開発の牽引車となった。この委員会は1948年まで続き、翌年には日本電子顕微鏡学会が設立され、瀬藤が初代会長に就任した。2003年には日本顕微鏡学会へと生まれ変わり、現在、筆者が51代目の会長を務めている。

委員会の中心メンバーであった笠井完は、メーカーでなければ本格的な装置開発はできないと考え、会発足の2か月後に電気試験所を辞めて日立に入った。ちょうどその頃、日立では、中央研究所(中研)の設立が着々と準備中であり、笠井は建設事務所の所長に就任した。“相当遠い将来を目標にした基礎的研究”を行うという創業社長小平浪平の夢を実現すべく、内田祥三東大総長による鉄筋コンクリート6階建てが10棟並ぶという壮大な建屋が設計された。間もなく、日本も戦争に突入することになるが、研究所の設立は中断されることなく、1942年4月に開所の運びとなった。ただ、鉄材の入手が困難になったため、当座のこととして木造建屋が建てられた。笠井は、開所の2か月前に急逝し、笠井の後を追って1年遅れで日立に入った只野文哉が中研を舞台に電子顕微鏡の開発を進めていくことになる。

P R O F I L E

### 外村 彰

1942年生まれ。1965年3月東京大学理学部物理学科卒業、同年4月日立製作所入社、中央研究所配属。1985年同研究所および基礎研究所主管研究員、1989年新技術事業団「位相情報プロジェクト」総括責任者を兼務、1990年基礎研究所主管研究員、1994年新技術事業団「位相情報プロジェクト」完了、1996年東洋大学客員教授兼任(大学院工学研究科)、1997年東京工業大学連携教授兼任(大学院理工学研究科物質科学創造専攻)、1999年6月日立製作所フェロー、2002年東京電機大学客員教授兼任、理化学研究所フロンティア研究システムグループディレクター兼任、2003年社団法人日本顕微鏡学会会長に就任。工学博士・理学博士。

入社以来、電子線装置の開発およびその応用研究に従事。電子線エネルギー損失、電子線ホログラフィー電界放射型電子銃の開発を経て、1974年から本格的に電子線の干渉性を利用した電子線ホログラフィーの研究に従事、現在に至る。

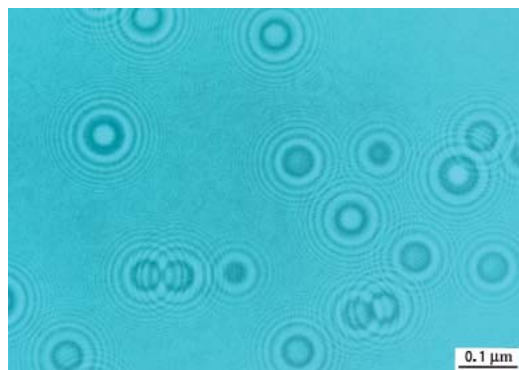
山下賞(日本電子顕微鏡学会)、光学論文賞(応用物理学会)、瀬藤賞(日本電子顕微鏡学会)、金属組織写真賞(日本金属学会)、仁科記念賞(仁科記念財団)、研究功績者表彰(科学技術庁)、朝日賞(朝日新聞社)、学士院賞恩賜賞(日本学士院)、The Benjamin Franklin Medal in Physics(Franklin Institute)、米国科学アカデミー(物理)外国人会員(米国科学アカデミー)、文化功労者顕彰(文部科学省)、スウェーデンUppsala王立科学協会外国人会員(Uppsala王立科学協会)

日本の電子顕微鏡が学術面においても世界のトップに立つに至ったのには、もう一つの理由がある。日本には、西川正治、菊池正士以来の電子回折の伝統があり、上田良二をはじめとする優れた研究者たちが電子顕微鏡に関心を示して、この分野に参入したことが挙げられる。電子顕微鏡では像観察と同時に回折像をも観察することができ、結晶性サンプルの像解釈には電子回折の理論が欠かせないためである。

筆者は、電子顕微鏡が開花した1965年、中研の電子顕微鏡グループに入った。提出されたばかりの物理の理論(ボーム・パイプの理論)を、たった1枚の電子顕微鏡写真で実証した渡辺宏の実験に憧れてのことだった。この頃、中研にいた研究者は、今思っても、世界一流の研究者が勢揃いしていた。只野、渡辺は言うまでもなく、木村博一、菰田孜などなど。その後、上田良二名大教授やノーベル賞受賞者の楊振寧(ニューヨーク州立大学教授)をはじめとする社外の優れた先生方にもご指導を賜わることになり、基礎研究に対する考え方を教え込まれた。これぞと思う結果を出す度に上田先生に報告をしたが、大層喜んでいただいた後に、必ずこう付け加えられた。「こんなことで満足してはいけない。あなたの成果は、模倣とは言わなくても海外での成果に負っており、「基礎演習」の域を出ていない。この結果が幹になって大枝小枝が出て、初めて「基礎研究」と言える。日本の科学技術が根を生やすには、なお60年の努力が必要である。満々たる自信、それに雑用にひるまぬ勇気で頑張るように。」学部を出ただけの筆者が、40年近くも企業の中で一筋に研究を続けられたのは、ひとえに、こうした環境と支援のお蔭であった。

## 高輝度電子線開発の歴史

図1 コロジオン膜穴で生じた電子の波紋



筆者が日立に入社して間もない頃に撮影した写真を図1に示す。膜穴で生じた電子の波の干渉写真だが、水面の波紋にそっくりである。1968年には、電子の波動性を利用した“電子線ホログラフィー”と呼ばれる新しい結像法の可能性を示すことができた。ただ、きれいな干渉写真を撮ろうとすると、とてつもない長い露光時間を要するため、実用に供することはできないことがはっきりした。

我々は、ただちにレーザー光のような輝度単位(立体角当たりの電子流密度)の高い電界放出電子源の開発をスタートした。この電子線は、金属の針先に電圧をかけて、内部の電子をトンネル効果で引き出す。以来、より高い輝度の電子線を求めて現在に至るまで開発を繰り返すことになるが、その歴史を表1に示す。

表1 高輝度電界放出電子顕微鏡の開発の歴史

西暦年	加速電圧	輝度 (A/cm <sup>2</sup> ・ster)	新たに拓かれた可能性
1968	100kV (熱電子)	10 <sup>6</sup>	・電子線ホログラフィーの可能性を実証
1972	50kV	10 <sup>7</sup>	
1978	80kV	10 <sup>8</sup>	・磁力線の観察 ・格子分解能記録(0.62 )
1980	125kV	2×10 <sup>8</sup>	・多段加速管の利用
1982	250kV	4×10 <sup>8</sup>	・AB(アハラノフ・ボーム)効果の検証
1989	350kV	5×10 <sup>9</sup>	・磁束量子の動的観察 ・格子分解能記録(0.55 )
2000	1,000kV (1MV)	2×10 <sup>10</sup>	・格子分解能記録(0.49 ) ・高温超伝導体の観察

10年後の1978年、80kV電子線の輝度が2桁向上し、劇的な進展が見られた。これまで、じかに見ることはできなかった電子線の干渉縞が、蛍光板上で直接見えるようになり、300本しかフィルムに撮影できなかった干渉縞の数が3,000本まで記録できるまでになった。加速電圧を上げるなどの工夫によって輝度はさらに向上し、そのたびに、新しい応用の可能性が拓けてきた。最新の1MV電子顕微鏡では、当初に比べ輝度は4桁も向上し、10,000本を超す干渉縞が得られるようになった。

## “量子力学の真髄”を見る

ミクロの世界では、電子は検出しない限り“波”として振る舞うが、検出されると“粒子”として姿を現す。量子の世界は、不思議だらけである。ノーベル賞受賞者のR. Feynmanは有名な彼の教科書の中で、こう述べている。「電子の二重スリットの実験は、まさにミステリーであり古典的には解釈できない。ここに量子力学の真髄がある。しかし、この実験は、スケールが非常に小さいので、そのままの形で行うことはできない。」

ところが、二重スリットに代わる電子線パイプリズム、輝度の高い電子線、電子を1個ずつ検出する二次元検出器などの先端技術の進展によって、この思考実験が実現可能になった。電子は1個1個電子線パイプリズムに送られる。電子を粒子と考えると、電子はパイプリズムの右か左かを通る。検出器に到着した電子はモニタ上の輝点として観測され、時間と共に積算されていく(図2)。当初、電子の到着位置はまったくランダムに見える(図3(a)、(b))が、やがて干渉縞が浮き上がってくる(図3(c))(d)(e)。電子は、時折パッと通るだけなので、装置の中に電子がいる確率は極めて小さい。まして、2個の電子が存在する可能性は、1時間待っても、まずない。電子は常に1個の粒子として検出され、2個に分かれたためしはない。にもかかわらず、次第に“電子の波が電子線パイプリズムの両側を同時に通ったときに生じる干渉縞”が、現れてくるのである。あたかも、1個の電子が二つに分かれてプリズムの両側を通ったかのようなのである。

かつて、量子現象は、デバイスのトレンドに究極の限界を与える邪魔者と考えられてきた。しかし、最近では、二重スリットの実験で示された量子力学の最も不思議な原理が、実用に供されようとしている。量子の世界では、1個の電子がプリズムの両側を通るという二つの状態を取ることができる。もっと沢山の状態を作って並列演算を行うと驚異的なスピードの“量子コンピュータ”が実現する。また、電子の波が途中で傍受されると、粒子として検出されて波の状態は破壊されてしまうので、“破ることのできない暗号システム”も可能になる。

こうして近年急激に関心の集まりつつある量子現象を解明すべく、さまざまな手法が開発されているが、電荷を持っている電子は、電磁場と直接反応するため、電磁場を通して量子現象を観察する手段としてうってつけである。

## 電子と電磁場の相互作用 AB効果

電磁場の中を通る電子には“力”が働く。ところが、量子の世界では、電場も磁場もない所を通る電子が物理的影響を受けることがある。それを如実に示す現象が、アハラノフ・ボーム(AB)効果である。2本の電子線が磁束をまたぐと、位相差が生じて干渉縞がずれる。たとえ、電子線が電場や磁場に触れていなくても、物理的な影響を受けるという訳である。

なぜ干渉縞がずれるのか？ 磁場は、磁石の外には存在しないが、“ベクトル・ポテンシャル”ならば、ドーナツの周りを取り巻いており、これが電子の波面を逆方向にずらしたのだという。ベクトル・ポテンシャルは、1970年代後半になると、“ゲージ場”と名を変え、力の統一理論における最も基本的な物理量となる。AB効果は、ゲージ場が観測可能な効果を生じることを直接示す唯一の現象として重要視されるようになった。しかし、いかに常識を逸脱した現象であるため、AB効果の存在をめぐって長い論争が闘われていたが、

図2 二重スリットの実験

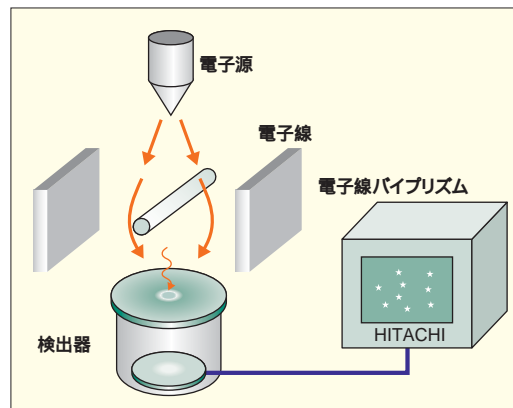
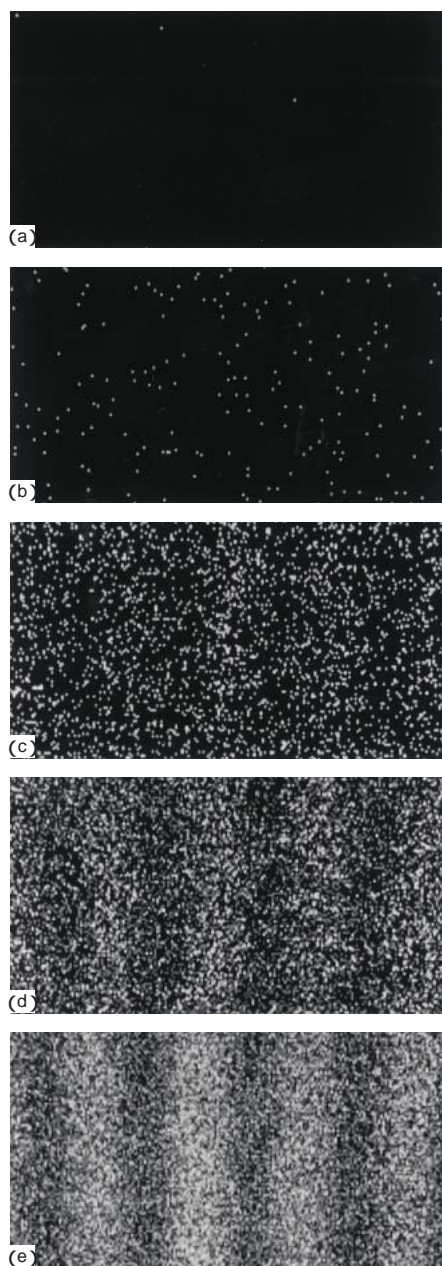
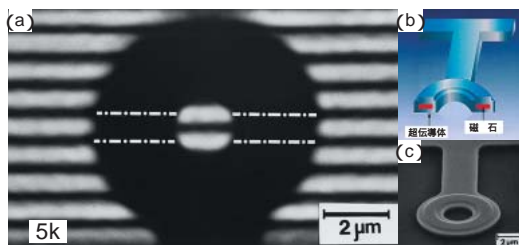


図3 電子が積算されて干渉縞が形成される様子



- (a)電子の数： 5
- (b)電子の数： 200
- (c)電子の数： 6,000
- (d)電子の数： 40,000
- (e)電子の数： 140,000

図4 AB効果の検証実験



(a)電子線の干渉縞 位相差 =  $\frac{1}{2}$  波長  
(b)模式図  
(c)走査型電子顕微鏡像

6年にも及び筆者らの一連の実験で決着が付き、AB効果は“二重スリットの実験”と並ぶ量子力学の基本現象として認知されるに至った。

最終的な実験結果を図4に示す。小さな棒磁石をぐるっと曲げてN極とS極をくっつけ、ドーナツ状の磁石を作る。磁場はドーナツの中をぐるぐる回って外部に出ない。さらに、磁場の漏れを完全に除くべく、ドーナツの周りを超伝導体で覆う。電子の波をドーナツの孔の中と外側に通し、波面がずれているかどうかを調べた結果、 $\frac{1}{2}$ 波長分だけずれており、AB効果が存在することが示された。かくして、この1枚の写真で、J. C. Maxwell以来100年以上にもわたって議論を呼び、数奇な運命をたどってきたベクトル・ポテンシャルがよみがえった。最近では、微細な電子回路やカーボンナノチューブといったナノの世界にもAB効果が顔を出し始め、オームの法則すら成り立たなくなってしまう。すなわち、リングやチューブの中を通る磁場の値によって、流れる電流が干渉し合って変化するのである。

## 超伝導体中の量子現象を見る

1990年、将来の事業の芽を育てるべく埼玉県鳩山に基礎研究所が建てられた。筆者のグループもここに移ることになったが、装置開発が必須のため、上田先生の支援を得て急速マシンショップも作るようになった。理化学研究所の誇る工作部の技術によって、“電子の波動性の実証”という偉業を成し遂げた菊池正士の実例をあげての説得が効を奏した。基礎研究所で開発された350kV電子顕微鏡(表1)で再び新しい可能性が生まれた。10年来の念願であった超伝導体中のミクロな量子現象の観察が可能になったのである。

超伝導体に磁場が印加されると磁場は超伝導体内部から排除されるが、磁場をさらに強くすると、磁場が細い糸の形となって超伝導体を貫く。この糸が“磁束量子”である。渦状の超伝導電流から成り、量子化されている。これに類したものは自然界の各所に存在する。例えば、宇宙が誕生し、進化していく途中で相変化をしたときに、変化に対応しきれずに“宇宙ひも”が出来、それが衝突を繰り返して現在の銀河やダークマターができたという説がある。新しい電子顕微鏡によって、生き物のように動き回る磁束量子を初めて観測できるようになったのである。しかし、この装置では金属超伝導体しか観察できなかった。高温超伝導体の磁束量子は一桁も太いために、それに応じて膜を厚くしなければならないが、350kVの電子線では、厚い膜を透過することができないためである。そこで、1MV電子顕微鏡の開発に挑戦することとなった(図5)。

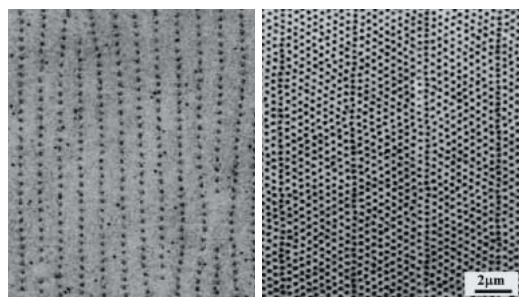
科学技術振興事業団と日立の資金で4年の歳月をかけ、日立の総力をあげて開発した結果、電子線の輝度が4桁向上し、0.5 を超える格子分解能の世界記録をも達成し、高温超伝導体の観察に取り組んだ。

高温超伝導体は層状構造を有するため、磁束量子は不思議な振る舞いをする。磁力線が層毎にジグザグになったり、絡み合ったりする。磁束量子の配列にも不思議な現象が見つかった。通常、磁束量子は稠密構造の三角格子を組むが、層面すれすれに磁場をかけると、稠密とはほど遠い配列になる。傾けた方向にチェーン状に並ぶのである。この理由は10年にもわたる謎であったが、1MV電子顕微鏡による透過観察によって内部の磁束量子の様子が初めて観察され、磁束量子が傾き、互いに引力が働いて、チェーン状に並んでいく様子が直接捉えられた(図6)。

図5 1MV電界放出型電子顕微鏡



図6 高温超伝導体のピクチャー写真



(a)YBCO (b)Bi-2212

## 新しい技術への挑戦

高さ7メートル、重さ40トンもの1MV電子顕微鏡(図5)を見上げるたびに思う。40年前、好奇心から“電子の波の実験”を始めたとき、こんな巨大な装置を作り、“量子の世界”が目あたりに見えるようになるとは夢にも思わなかった。

振り返ると、“欧米に先例のない研究”をやり続けるには、かなりの努力を要した。製品開発に従事している元気な研究者に負けぬ頑張りには当然だが、こんな基礎研究をやって何が嬉しいのか、周りへの説得にも努力を傾注した。幸い、今はまだ日本の電子顕微鏡のレベルは、産業、学術ともに非常に高く、飯島澄男、高柳邦夫、藤吉好則、難波啓一などのノーベル賞候補者も沢山いる。しかし、これは、ひとえに諸先輩の指導や支援の賜物で、将来については、いささか心配がある。ナノの世界を制御してナノテクノロジーやバイオテクノロジーを発展させるには、ナノ構造やナノ状態の計測が決め手になる。原子の100分の1という短い波長を有する電子は、電子顕微鏡の中で、ミクロの物体の原子構造や量子現象を、我々が見ているよりも、もっと鮮明に、もっと詳細に、目にしているにちがいない。電子の持つ情報を余す所なく読み出せていないのは、我々が装置開発をも含む努力を怠っているからである。ただ、電子顕微鏡の物作りをして本物にまで持っていくには、10年はかかる。

幸いなことに、日本の科学技術予算は、一昔前に較べると格段に増加した。この好機を生かして、自称だけでなく他国からも“科学技術創造立国”と呼ばれるようになって国民の期待に応えたい。量子力学も相対論も電子顕微鏡も、ヨーロッパの人たちの手で作り上げられた。無から新しいものを創造するための努力もその価値も、後追いとは桁違いである。戦後の物理は、アメリカが優位に立ち、50年経った今でもノーベル物理学賞を独占している。しかし、一国の繁栄は、文明であれ科学であれ、永久には続かないことを歴史が示している。50年も経てば、そろそろアジアの出番ではないかと思うが、是非とも日本であってほしい。

しかし、今の日本は成果を性急に求め、新しいことに挑戦する環境を若い人たちに提供できないのが無念である。確かに、一仕事した人にはあちこちから予算が出て、どんどん良い成果を出している。その代わり、予算獲得、報告会、報告書、国際会議、さらには評価、21世紀COEプログラムなどで忙しく飛び回って、自分自身で研究する暇がなくなったり、何年も先のことを考える余裕がなくなったりしている。しかし、こんなやり方をしていたら、いつまで経ってもアメリカの後追いが続く。350年もの間、解けなかった“フェルマーの予測”に決着をつけたプリンストン大学のA. J. Wilesは、論文も書かず学会発表もせず9年後になって、やっと論文が完成した。やはり、面白い仕事は、一旦潜伏して10年かかる。これこそ研究である。

是非、若い人たちには、夢を持って長い視点で将来を見据え、大きな目標にチャレンジしてほしい。そして我々年寄りには、50年100年後に科学技術の分野で世界をリードしている日本の姿を夢見て、若い人たちの夢をかなえるために必要な予算と、思う存分研究に没頭できる環境を提供できるように努力すべきである。上田先生が残してくれた言葉通り、満々たる自信と勇気が、若者にも年寄りにもなければ、道は開かれそうにない。だが、産官学が一体となったあの瀬藤委員会の歴史を思い出して日本が本気でやる気になれば、どんなことでもできない事はないと思う。