

「科学の本質」がここにある

電子の世界をとらえた電子顕微鏡技術

外村 彰
竹内 薫

日立製作所 フェロー
科学ジャーナリスト

世界で初めて何かを「見る」経験とはどのようなものだろうか。それは、おそらく、ワクワクドキドキ、といった言葉では表現しきれない別世界にちがいない。日本語の「発見」という言葉は、まさにそういう経験を意味するのだろう。外村さんは、それまで誰も見たことがなかった不可思議な量子の世界を電子顕微鏡によって見られるようにしてくれた。それは科学の原点であると同時に、門外漢にとっては、まさに「一目瞭然」「百聞は一見に如かず」を実感させてくれる手法でもある。「見る」ための数々のご苦労と、これからの抱負を語っていただいた。

「協創による革新」という日立のDNA—不可能を可能にした実験

竹内 物理を学んでいた学生時代に目にした外村さんの**二重スリット実験**の写真は、とても衝撃的でした。『ファインマン物理学』第5巻の二重スリット実験についてや、朝永振一郎のエッセイ「光子の裁判」など、書物を読んだだけではいまひとつ納得できなかったことを、外村さんの電子顕微鏡写真がはっきりと目に見せてくれた。それは本当に、目の前の霧が晴れた感じでした。そのご本人にお会いできるということ

竹内メモ1

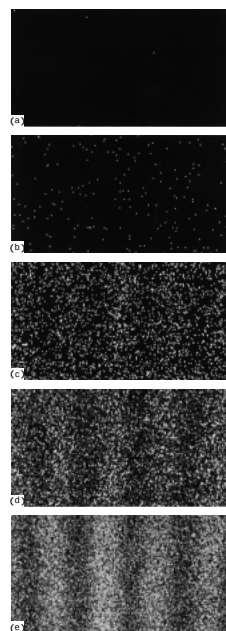
二重スリット実験

二重スリットのあるところに向けて、1個1個電子を飛ばす。その先に検出器を置いて観察すると、最初はポツンポツンとランダムな点だけが見えているのですが、その数が増えていくにつれ、縞模様が見れるという実験です。縞模様というのは、両方のスリットを同時に通過した波がその先で重なり合ったときに生じる干渉パターンで、それはつまり、電子が粒子であると同時に波でもあるという、相反する性質を持っていることの証明です。電子は一つの粒子として検出されるにもかかわらず、両方の隙間を同時に通っていると言えるわけです。

で、個人的に非常に楽しみにしてきたのですが、まず同じ物理分野の人間としてお聞きしたいのは、物理を志された理由です。

外村 私はもともと数学が好きだったんです。それに加えて、小さいころから自然現象にも興味があって、特に水の波紋が好きでした。それで自然と、物理の方向に進みました。私が通っていた当時、東京大学の物理学科には久保亮五、霜田光一、植村泰忠、後藤英一、小谷正雄、高橋秀俊、有馬朗人、宮沢弘成と、そうそうたる先生方がいらしたのですが、大学で教わった物理は、数学が難しすぎて、物理そのものの面白さを楽しむ余裕がなかった気がします。それで、学部を卒業してすぐ日立の中央研

究所に入りました。そのころ、中央研究所は学術面でもさまざまな貢献をしていて、とりわけ電子顕微鏡では、産業面でも学術面でも世界トップレベルにありました。さらに、電子顕微鏡を使って物理の新しい理論「ボーム・パイプズの理論」を実証した渡辺宏さん（後の日立製作所副社長、日立マクセ



(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1 電子が積算されて干渉縞が形成される様子



竹内 薫（たけうち かおる）

1960年東京都生まれ。東京大学教養学部教養学科卒業（専攻：科学史・科学哲学）、東京大学理学部物理学科卒業。マギル大学大学院博士課程修了（専攻：高エネルギー物理学理論）。理学博士（Ph.D.）

主な著書・訳書は、『知の創造 nature news & views』『科学の終焉（おわり）』（ジョン・ホーガン）『ペンローズのねじれた四次元』『世界が変わる現代物理学』『物質をめぐる冒険』『99・9%は仮説』など。

ル社長)や、分解能の世界記録を更新し続けている菰田孜さんの活躍ぶりは、学生だった私の耳にも入っていましたから、電子顕微鏡の研究室を希望したんです。

渡辺さんや菰田さん、そして、後に1年間留学することになる、かねてより憧れていたドイツのチュービンゲン大学のG. Möllenstedt先生方が行った実験は、実に見事でした。グラフなどでデータをプロットする必要もなく、1枚の電子顕微鏡写真の中に物理がすべて描かれていて、まさに芸術の域に達していました。それらを見て、「私たちが『曇らない目』を持っていれば、自然は、美しく、人を感動させる写真を撮らせてくれるんだ」と思うようになりました。

竹内 外村さんの二重スリット実験は、イギリスの科学雑誌で、科学史上最も美しい実験に選ばれたこともあるそうですね。電子は粒子であると同時に波でもあるということは、量子力学ではずっと以前から予測されていたものの、実際にそうなることを目で見える形として示したのはその写真が世界で初めてでした。

外村 ファインマンが「量子力学の真髄であるけれど実行は不可能」というふうに言っていた実験を、実現してみたいという思いは最初から強かったですね。でも、周囲が世界的な成果をどんどん出している中で、学部を出たばかりで研究のやり方も分かっていない私が興味だけで実験をするわけにもいきません。ところが、思いがけないことから、電子の波動性の実験ができることになりました。電子顕微鏡の性能向上のため、電子線の分解能を上げる目的で電子線ホログラフィーの研究開発がスタートしたのです。

ただ、始めてみるとすぐに、電子の波の性質を実用的に使うためには、どうしてもレーザーのような干渉性の高い電子線を開発する必要があることがはっきりしました。そこで、1968年から開発を始め、10年後の1978年に、やっと熱電子ではなく電界放出電子が使えるようになり、輝度が2けた上がりました。それによって、これまで肉眼では見えなかった電子の干渉縞がじかに見えるようになり、電子線ホログラフィーも実用レベルに達したのです。このころには、自分なりに実

験のやり方も修得していたので、ファインマンの二重スリットの実験をやってみようと思い始めました。

竹内 それでようやく本格的に実験がスタートしたわけですか。
外村 電子を1個1個二重スリット(電子線バイプリズム)に送るというシンプルな実験ですから、特に輝度の高い電子線を使わなくても可能だと思われるかもしれません。しかし、干渉縞が現れるまでには1時間もかかり、その間に電子源やバイプリズムのフィラメントがわずかに移動しても干渉縞がずれてしまうので、装置には長時間にわたって常に超安定であることをチェックすることが求められるのです。この実験が成功したのは、干渉性の良い電子線と、浜松ホトニクス社の技術による、電子1個1個を検出できる高精度な二次元検出器の開発のおかげです。

可視化は「科学の原点」

竹内 二重スリット実験に続く大きな成果として、アハラノフ=ボーム効果(以下、AB効果と言う。)の世界初の実証実験が挙げられます。これはいつごろから始められたのですか。
外村 計画を立てたのは1980年ごろでしょうか。AB効果の理論が示されたのは1959年で、その直後に、電子顕微鏡の大御所たちが、こぞってこの実験を行いました。しかし、実験方法に限界があったために、AB効果の最も基本的で肝心の「電磁のない所を通った電子も、干渉縞のずれの形で観測可能な物理的影響を受ける」という点が実証されていませんでした。

竹内メモ2

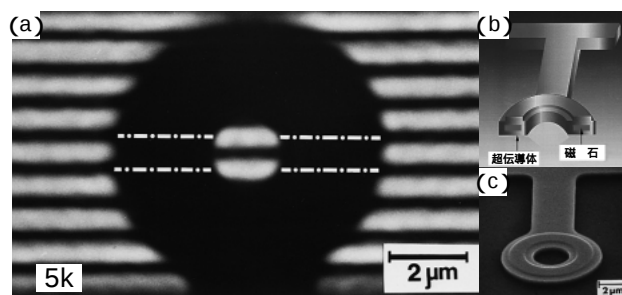
アハラノフ=ボーム(AB)効果

通常の電磁気学では、電場や磁場の中を、電荷をもった粒子が通ると、力を受けて軌道が曲げられます。ところが、1959年に、アハラノフとボームが、「電子の波は、電場も磁場もない所を通ったときにも、物理的な影響を受けることがある。」という現象を理論的に見出しました。その原因となるのがベクトルポテンシャルという物理量だと主張したことから、AB効果の実証は、ベクトルポテンシャルの存在を証明することになりました。外村さんの実験では、完全に磁力がもれないようにしたリング状の磁石(ソレノイド)に電子の波を通し、リングの中と外で波面がずれているかどうか、電子線ホログラフィーを使って干渉縞という形で調べたところ、ちょうど1/2波長分だけずれていることが実証され、AB効果の存在を示しました。電子はまったく磁場のない所を通っているにもかかわらず、ベクトルポテンシャルによって波面がずれたのです。

外村 彰(とのむら あきら)

1942年生まれ。1965年東京大学理学部物理学科卒業。同年日立製作所中央研究所入社。1996年東洋大学客員教授兼任(大学院工学研究科)、1997-2005年東京工業大学連携教授(大学院理工学研究科物質科学創造専攻)、1999年日立製作所フェロー、2002年東京電機大学客員教授、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、2003-2005年社団法人日本顕微鏡学会会長、2005年沖縄大学院大学先行的研究事業代表研究者、日本学術会議会員。工学博士。理学博士。
入社以来、電子線装置の開発および応用研究に従事。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。
瀬藤賞、金属組織写真賞、仁科記念賞、研究功績者表彰、朝日賞、日本学士院賞恩賜賞、The Benjamin Franklin Medal in Physics、米国科学アカデミー(物理)外国人会員、文化功労者顕彰、スウェーデンUppsala王立科学協会外国人会員。





(a) 電子線の干渉縞 位相差 = $1/2$ 波長
(b) 模式図
(c) 走査線電子顕微鏡像

図2 AB効果の検証実験

竹内 AB効果については、真偽を問う論争が起きていましたね。**ゲージ場（ベクトルポテンシャル）**の実在性を示す唯一の実験で、ベクトルポテンシャルが実在の物理量かどうかは長年にわたって議論されていた重要な問題でした。

外村 その論争に決着をつけるには、実験によるしかありません。しかし、企業の研究者ですから、そのような検証実験をやらせてもらえるのかということが、まず問題でした。そこで、ノーベル賞も受賞されたゲージ理論の権威である楊振寧（ヤンチエンニン）博士に手紙を出して、この実験の意義についてお聞きしたところ、約一か月後、来日されていたヤン博士がわざわざ日立の中央研究所まで来所くださり、ぜひやるべきだと励ましてくださった。それでわれわれも士気が高まりました。まず、直線状の磁石を使うかぎり、必ず両端ができてしまうので、磁石を円形にしてN極とS極をつけたリング型にしました。ただし、電子の波長は非常に短いので、その磁石もごく小さくしなければならず、微細加工技術を駆使して、円の外径が6ミクロンのものをつくったのです。幸い、われわれはそのころ、干渉性のよい電子線を開発し、電子線ホログラフィーを使うと干渉縞の形で磁石の両端から漏れた磁力線を定量的に測定する手法を開発したばかりのところでした。このため、論争になっていた「漏れ磁場」を定量的に測定できることも決め手になりました。

しかし、実際の実験をやるようになると、実験上の問題はいうまでもなく、論争中だったため、実験方法についても疑問が投げかけられるなど、さまざまな障害がありました。磁力の漏れが一切ないように、磁石の周囲を超伝導体で囲み、電子顕微鏡の中のサンプルを超伝導状態に冷やすための極低温ステージを作るなどして、結局、AB効果を実証して論争に決着をつけるのに、6年もの長い歳月を要しました。

竹内メモ3

ゲージ場（ベクトルポテンシャル）

電子に働く力は電気や磁気ですが、それ以外にも核力や重力があります。こういったあらゆる力を統一的に扱う理論が「ゲージ場の理論」と呼ばれます。この理論では、ゲージ場が最も基本的な物理量とみなされます。

ベクトルポテンシャルは150年以上前にマックスウェルが電磁気を表現する物理量として使い始めたものですが、力の統一理論としてゲージ場の理論が盛んになった1970年代後半に、再び注目されるようになりました。

竹内 科学の出発点は、観察をして実際に見るということではないかと思います。そういう意味で、外村先生の実験はすべて「科学の原点」と言えるのではないのでしょうか。研究というと、とかく理論に走りがちで、可視化ということがおざなりにされているような気がします。しかし、目に見える形にするというのは、特に科学インタープリターからすると、一般の人にわかりやすく説明するときに、大きな武器になるんです。計測や映像技術による可視化ということは、科学研究の一分野として確立されてもいいのではないかとさえ思います。

外村 私は、難しい理論はよくわからなくても、やっぱり電子の性質やふるまいをきれいに見せて説明したいんですね。学術じゃなくて、写真屋だって言われますが（笑い）。大学で量子力学を教えてくださったのは、名古屋大学から招かれた梅沢博臣先生でした。その数学は難しいものでしたが、数学ですべてを予測し、それが現実の物理の世界を言い当ててしまう量子力学に、なぜか、わくわくするような魅力を感じたんですね。計算式から導かれる結果が、なぜそうなるのか。もっと納得できるような形で見てみたいと思った。その気持ちが出発点なのかもしれません。

長期的な視点と、科学への理解を

竹内 **磁束量子**の観察に成功されたのは、このあとですか。

外村 AB効果の実験に取り組んでいたときも、磁束量子の観察は視野に入れていました。電子顕微鏡に極低温ステージをつくるという難しい技術を開発していましたから、それを生かす意味でも、超伝導体をターゲットにしようと。磁束の最小単位である磁束量子をとらえることは、電子顕微鏡の分野では30年来の夢でもありました。ただ、成功までには結局、10年ほどかかり、最初に磁束量子の姿が観察できたのは1989年でした。磁束量子が超伝導体の膜から外へ出てくる様子を、横からとらえることができたのです。しかし、それだけでは磁束量子がどう並んでいるのが二次元的に見ることができません。そこで、電子線を、超伝導薄膜の中を透過させて、磁束量子を直接観察したいと考えました。薄膜を透過させるには、もっと電子線の加速電圧を高くしなければならないと、ついに1 MVの透過型電子顕微鏡を作ったのです。

竹内 それで成功された。磁束量子も数式ではわかっていたのですが、実際に目で見たらどうなるかを示したのは世界初ですね。ここまでのお話であらためて感じたのは、どの実験にも成功までには長い時間がかかっていることです。日本では、そういった長期的な視点が足りない傾向があって、それが科

竹内メモ4

磁束量子

超伝導体に磁場をかけると、磁場が弱いところは超伝導体内部から磁場が排除されますが（マイスナー効果）、磁場を強くすると細い糸の形で超伝導体が破れ、磁場が侵入します。これが磁束量子で、一定の微小磁束を有します。

学技術政策でも課題になっているのではないのでしょうか。

外村 近年、科学技術予算は急増し、20年前と比べると科学研究費もけた違いに増えました。その反面、評価が頻繁に行われ、成果もすぐに期待されるようになっていきます。私の研究を振り返っても、干渉性のよい電子線の開発に10年、AB効果の完全な実証に6年、超伝導体中の磁束量子の挙動を観察できるようになるまでに、初めの計画から10年、そして1 MVの電子顕微鏡は初めの提案から17年もかかって実現しています。決してさぼっているわけではないのに、一つの仕事を成し遂げるには10年など、あっという間です。さらに、われわれの実験には装置づくりが必須になるという特殊事情もあります。しかし、こうした基礎科学におけるモノづくりでも、短期的に成果を求める近年の風潮の影響を受けて、大学や国の研究機関にもモノづくりをする研究者が本当に少なくなっていました。

竹内 文部科学省が行っているプログラムに、科学インタープリターを養成する講座が新たに設けられ、実は私も2回ほど講師を務めました。コンセプト自体はとてもすばらしいのですが、養成期間の面でも、運営方法の面でも、もっと時間をかけて、人材を養成するスタンスが必要だということを改めて痛感してきました。

外村 科学には、相当のお金が使われるようになり、国民の理解なしには進められません。研究者と国民の橋渡しをしてくれる科学インタープリターの役割は大変重要ですから、ぜひ優れた人を養成していただきたいですね。何事も、数年で成果を出そうとしたら、独創的な仕事などできませんし、特に科学では、目先の成果のためにほかの後追いだけしていたのでは、真の発展はありえません。もちろん、技術を生み出



すことに関しては、責任はわれわれ研究者にあります。ただ、その技術の内容や、生み出すためのバックグラウンドとして時間も資金も必要ということに関しては、広く一般の方々にも、また政府にも理解していただけたらと願っています。

竹内 日本は科学を受け入れるための裾野をもっと広げる必要があると思います。それを広げるために、私たち科学インタープリターも努力しなければいけないですね。最後に、電子顕微鏡の未来についてお聞かせいただけますか。

外村 ナノテクノロジーが発展し、バイオテクノロジーも原子分子レベルに突入しつつある中で、量子現象はさまざまな分野に共通するテーマになっています。電子顕微鏡の時代は、むしろこれからなんですね。現在の分解能は0.1 nmぐらいですが、それはもっと高められる。原理的には0.001 nmまで実現できると考えられています。そこまでいかないのは、われわれの技術が足りないからであって、努力すれば到達できるはずです。また、従来の電子顕微鏡は凸レンズしかありませんでしたが、ドイツでは技術的に困難だと言われていた凹レンズの開発にも成功しています。欧米では、将来をにらみ、国が率先して、そうした次世代の電子顕微鏡開発が本格化しています。偉大な先輩たちが培ってきた日本の電子顕微鏡技術の灯を絶やさず、科学の原点と言っていたいた観察の技術を発展させ続けるために、私がやるべき仕事は、まだまだたくさんあると思っています。



図3 1 MV電界放出型電子顕微鏡
(本装置は、独立行政法人科学技術振興機構の戦略的基礎研究推進事業の一環として開発されたものである。)

基礎科学の研究環境が非常に厳しくなっている現状を再認識するとともに、大きな驚きを覚えた。日本のお家芸として、世界をリードしてきた電子顕微鏡の研究は、今、大きな節目を迎えているようだ。欧米型の評価基準にもいいところはあるし、どの研究に国民の税金を投入するかを決めるのも大変に難しいことにちがいない。だが、欧米の制度を取り入れても、かえって、日本式の良き伝統が失われてしまうことだってある。電子顕微鏡の研究も、科学インタープリターの養成も、ともに短期的な視野だけでは真の成果を得ることはできない。この国の科学・技術の将来を考えると、どっしりとした長期的な制度と政策が必要なことをあらためて痛感した。