

電

子

顕

微

鏡

永瀬唯の
サイエンス・
パースペクティブ

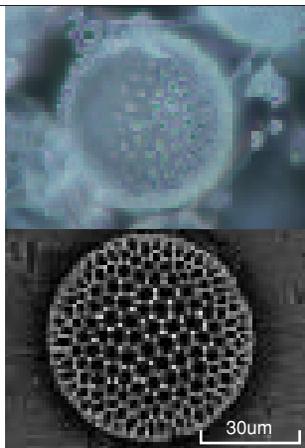


進化し続けるナノの眼

走査電子顕微鏡S-4700による珪藻(Paralia sulcata)の画像を
コンピューターで加工した“ナノアート” 撮影倍率:3000倍

5 μ m

永瀬唯(ながせ・ただし)
1952年生まれ。東京都立大学
理学部卒業。理工学系出版社
の編集を経て、科学技術ライター
となる。1987年、サイバーパンク
ムーブメントを契機として、技術文
化史、SF思想史を中心とした評
論活動を開始。明治大学理工学
部講師。著書『宇宙世紀科学読
本 スペース・コロニーとガンダ
ムのできるまで』(角川書店)、『腕
時計の誕生』(廣済堂出版)、『京
極夏彦の世界』(青弓社)、『欲
望の未来 機械じかけの夢の文
化誌』(水声社)ほか。



TM-1000による立体的な画像、上は光学顕微鏡による画像



卓上顕微鏡TM-1000



高さ約50cm、倍率1万倍、 垂涎の卓上顕微鏡

「え？ 髪の毛を1本ですか？」

思わず聞き返すと、株式会社日立ハイテクノロジーズで電子顕微鏡の設計を手がけてきた富田正弘(ナノテクノロジー製品事業本部 先端解析システム設計部 技術アドバイザー)は、「ええ」とにっこり笑った。

日立ハイテク那珂事業所サイエンスラボにあるデモスペースに、そのマシンは置かれていた。ごく普通の机の上に、高さ50cmあるかないかの直方体一つ。横にはディスプレイとコントロール用のノートパソコンが置かれている。

「重量は合わせて89kgです」

これが電子顕微鏡？

筆者が学生の頃、電子顕微鏡といえば、超大型で超高価な理系研究マシンの王者であった。ちょうど同じ頃の大規模コンピュータと同様に、それは、研究者や院生、ましてや学生には恐ろしくて、自ら触って操作するなぞおおよびもつかないシロモノだった。天井を突き抜ける巨大な鏡筒、膨大な消費電力……。

それが、ありふれた少し横長のテーブルの上に置かれているのだ。「単相100V、消費電力500Wですから、一般の小中学校、まあ需要はそんなにないでしょうが、一般の家庭でも設置可能です」

では、どう使うのか？

取材スタッフの女性が提供してくれた1本の髪の毛を、TM1000の試料台にセットすると、真空ポンプが動き出す。電子顕微鏡では、

光学顕微鏡の光の代わりに電子のビームを用いるが、電子ビームは空気できえぎられるので、高真空とはいえないまでも空気を抜く必要があるのだ。しかし、その作業もほんの数分でできる。

「かつては、電子顕微鏡でサンプルを見るには、高い真空をつくり出す必要がありました。しかし、このTM1000をはじめとした走査形電子顕微鏡なら、比較的低い真空でもシャープな映像を得ることができるのです。この種のものなら30〜50パスカルぐらいで十分です」(富田)

「パスカル(Pa)」といってもなじみがないかもしれないが、かつて気圧の表現に使った「ミリバール(mb)」が、「ヘクトパスカル(100Pa)」と表現されるようになってるのはご存じだろう。つまり、1パスカルが10万分の1気圧。30パスカルというと、ずいぶん低いようだが、小型の真空ポンプでも十分に実現できる程度の「低」真空だ。

横に置かれたパソコンのディスプレイに髪の毛の拡大像が浮かび上がった。髪の毛の表面を覆うウロコ状のキューティクルがはっきりと見てとれる。

「操作してみますか？」

操作は簡単だ。パソコンのマウスをクリックすれば倍率も自在に変えられ、フォーカスもオートで合わせることができる。いったい、どのくらい倍率を変えられるのだろうか？

「この小型の機種でも、20倍から1万倍まで、ズームで倍率を変えられます。光学顕微鏡を

扱ったことはおありですね。お気づきですか、奥行きの高さに？」

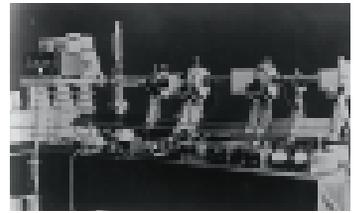
中学が高校でのぞいたことのある光学顕微鏡の像を思い出してほしい。そこに見えているシャープな像は、はるか無限遠にまで広がる空間のごく一部、1 μ m(マイクロメートル、100万分の1m)の数倍あるかどうかの薄さしかない。写真の世界という焦点深度が、光学顕微鏡の世界ではきわめて浅くなるのだ。

この電子顕微鏡像は違う。手元から奥までシャープ。光学顕微鏡が、空間のある距離だけをシャープに映すスクリーン、それも手元や奥のぼけた像が重なる不完全な断面図なら、これはまさに立体像。「まるで、ピンホールカメラ」と、同行のカメラマンが言う。

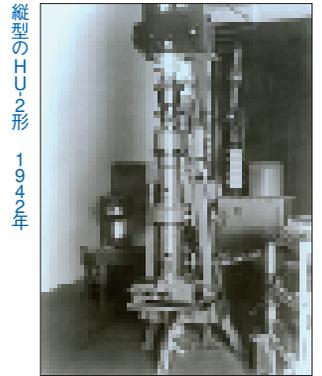
三十数年来、日立の電子顕微鏡の開発に携わってきた齊藤尚武(技術顧問)がボンとひざをたたく。

「まさにそのとおり、この方式の電子顕微鏡では、ピンホールのように、ほとんど点サイズの絞りを使ったのと同じなのです。走査形電子顕微鏡の場合はきわめて細い電子ビームを利用して、絞りの径を小さくしているわけです。これを順繰りに被写体に当ててスキャン、つまり走査することにより全体の映像を組み立てます。このために、距離の差によるボケがほとんど生じないのです」

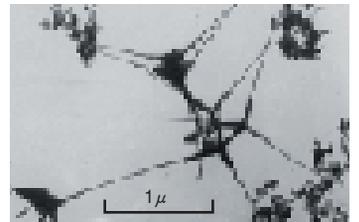
ああ、これが小学校のときにあったらと、5年生のときに半年分の小遣いを貯めて学習用顕微鏡を買った経験のある筆者はため息をついて



横型の第1号試作機HU-1形 1941年



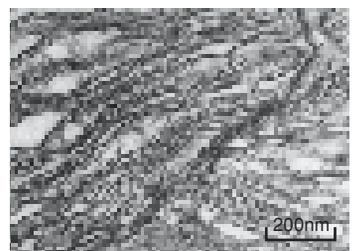
縦型のHU-2形 1942年



HU-2形による画像(酸化亜鉛粒子)



2段集束レンズ等で高性能・多機能化を実現したHU-10形、前身のHU-9形は1955年に初めて米国に輸出された



HU-10形による画像(渦鞭毛虫類の色素体)

350万Vの世界最高加速電圧を記録した超高压電子顕微鏡。1995年に大阪大学に納入



しまった。20倍から1万倍まで、立体画像がク
リックだけでズームできるなんて。

「実は、電子顕微鏡は半導体の検査や計測、
設計などにも多く使われています。活躍してい
るところは一般の人にはあまり見る機会がな
い。理科離れなどと言われていますが、そうい
った問題の解決のためにも、全国の小中学校に、
この卓上顕微鏡を普及させたいと願っているの
です」(富田)

最大加速電圧350万V、 世界最高の透過形電子顕微鏡

電子顕微鏡というメカニズムは、通常の光を用
いたものよりもずっと倍率の高い顕微鏡を目指
して発明された。光学顕微鏡には、原理的に大
きな限界がある。われわれがものを見るのは、あ
る物体に当たった可視光線の反射を自分の目
の網膜で感知するからだ。ところが、われわれ
の目に見える可視光線は波長360〜830nm
(ナノメートル、100万分の1mm)の電磁波。可
視光線よりも短い波長の光(電磁波)は、その
網膜の感光分子をすり抜けてしまう。光学顕

微鏡でとらえられる世界は、人間の網膜の限
界を超えることはないのだ。

そこで注目されたのが、光が光子であるよう
に、電子という名の素粒子でありながら波の性
質をもつ電子だった。化学的物質でできたレン
ズでは無理だが、電気を帯びた自由電子の流
れ——電子ビームなら、電氣的磁氣的にその進
路を曲げて、磁気レンズや電磁プリズム、電磁
反射鏡をつくることによって、網膜の限界を超
えたシャープな拡大像を得ることができる。

最初の電子顕微鏡は、ドイツのマックス・クノ
ールとエルンスト・ルスカによって、1930年代の初
めにつくられた。ちなみに電子顕微鏡は、透過
形電子顕微鏡(TEM)、走査形電子顕微鏡(S
EM)、ハイブリッド型の走査透過形電子顕微
鏡(STEM)に大別されるが、最初につくられ
たのは透過形電子顕微鏡である。

日立では1941年に横型のHU-1形を試
作、翌1942年には縦型のHU-2形を完成、
うち1台を名古屋大学に納品したが、戦況の
進展とともに研究は中断する。

1953年、本格的に製造開始されたのは、
縦型の透過形電子顕微鏡だった。すでに、19

30年代後半には走査形電子顕微鏡がつくら
れていたが、分解能などの点で、実用レベルには
達していなかったのである。

透過形電子顕微鏡の原理はいたってシンプ
ルだ。光学顕微鏡のレンズの代わりに電磁方式の
レンズで電子ビームを曲げ、感光像を得る。光
源の代わりに電子銃で発生した電子ビームを
送り出し、いくつかのレンズでサンプルを透過し
たビームを最下層の受光部(フィルムや電子カ
メラ)で映し出す。

電子顕微鏡の歴史で、まず注目されたのは、
厚いサンプルも透過し、分解能にも優れる大型
の透過形電子顕微鏡だった。戦後の日本では、
電子顕微鏡メーカーが乱立したことも一時期
あったが、やがて淘汰されてゆく。そのなかで、
日立は1955年にアメリカにHU-9形を輸出、
電子顕微鏡をめぐる世界市場の最先端に躍
り出る。

このとき、開発競争の焦点、いわばシンボルに
なったのが、いかに超高压の電子ビームを用いた
超大型の電子顕微鏡を実現できるかどうかだっ
た。電圧を高め、電子ビームの速度を上げれば
上げるほど、よりシャープな画像が得られる。



H-7650による画像(ラット腎臓)



透過電子顕微鏡の最新モデルH-7650



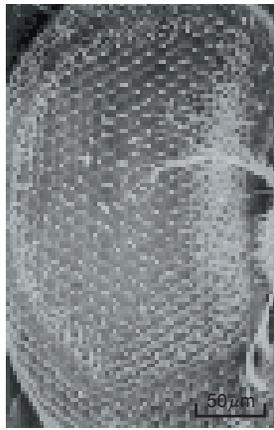
結果、世界は超高圧透過形電子顕微鏡の開発ラッシュとなった。日立でも加速電圧100万Vを単位とする超高圧電子顕微鏡を製造、1995年には、現在でも世界最高の最大加速電圧350万Vの電子顕微鏡を大阪大学に納品している。

走査形電子顕微鏡が開いた「非破壊性」という世界

一方の走査形電子顕微鏡はというと、その基本的なメカニズムは、前述のとおり、電子ビームを順繰りに被写体に当ててスキャン、つまり走査することにより全体の映像を組み立てる、というのだが、日立は1969年に走査電子顕微鏡HSM2形を初めて出荷した。



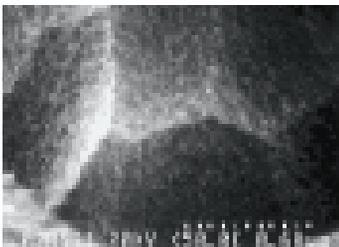
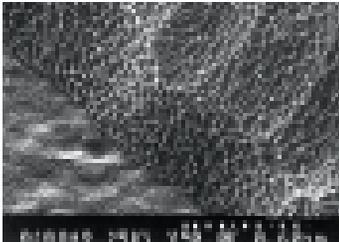
走査電子顕微鏡の第1号機HSM-2形
1969年



HSM-2形による画像(ショウジョウバエの頭部)



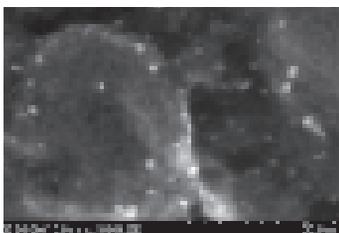
電界放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM) の
開発機 1971年



FE-SEM (上) と SEM の像比較



世界最高分解能を実現した電界放出形走査
電子顕微鏡S-5500



S-5500でとらえた100万倍の触媒画像

ちょうどその頃、分解能の向上を促す新たなアプローチが浮上しつつあった。「電界放出」(FE)という方式を利用した走査形電子顕微鏡で現在の電子顕微鏡の主流となっている方式である。

次代の新技術として注目されたこの電界放出法、1970年にシカゴ大学のアルバート・クルー教授が、電界放出形走査透過電子顕微鏡(FE-STEM)によってトリウム原子の観察に成功し、時代の寵児ちやうしとなった。日立では早速教授を招聘しょうへん、電界放出形の開発を開始した。

電界放出形では、先端が限りなく細い、針状の陰極をつくり出す。ブラウン管やそれまでの電子顕微鏡などに使う電子銃は熱により電子を放出するが、電界放出形では電界のみによって、その先端から限りなく細い電子ビームを放出できる。この正面に蛍光物質を塗布したガラス壁を配したら、これはナノサイズのブラウン管だ。事実、無数の電界放出形電子銃を使って、次世代の電子ディスプレイの実現を目指している電機メーカーもあるようだが、商品化にはまだ至っていない。

電界放出形電子銃でできるのは限りなく細

い電子ビームである。ならばどうするか？

細かいビームがサンプルにぶつかって二次的に生じる電子をそのまわりの検知器で測定するのだ。ビームはあらかじめ定められたとおりの順番と速度でサンプルを走査していくから、検知器で測定した電子のデータを再構成すれば、その立体的な構造を知ることができる。日立では1971年に、電界放出形電子顕微鏡を開発、数nmという当時としては驚異的な分解能を実現した。

きわめて細い電子ビームがサンプルに当たって放出するのは二次電子ばかりではない。X線もあれば、サンプルを透過する電子もあり、これらも、貴重な情報の源となる。電界放出形電子ビームは、いくつもの形で、物体に関しての貴重なデータを提供してくれるのだ。

電子顕微鏡の分解能を高めるには、いかに電子ビームの速度を上げて、パワーアップするかが鍵であり、そのために電子ビームを加速する電圧の高圧化、高真空化が追求されてきた。しかし、それは肝心のサンプルに対してはビームダメージのリスクを伴うものだった。そこに登場したのが電界放出形である。太い熱電子の柱

を利用した旧来の熱電子放出形とは異なり、低加速でも細い電子ビームを利用できる電界放出形は、破壊性がずっと少ないのである。

ところで、従来型の走査形電子顕微鏡による観測には、ある意味では原理的な限界がある。電子は静電気を帯びる物質を介して、その進路を変え、あるいは反射する。生体の場合は、高真空にするとサンプルの水分が奪われて、観測が難しくなってしまう。

そこで、旧来の走査形電子顕微鏡でこうした導電性のない物質を観察するには、その表面に導電性の金属原子などをコーティングするのが普通だった。

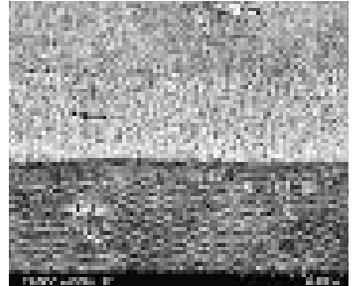
「そうすることで、確かに観測はできます。ところが、コーティングすることで本当の表面が隠れてしまう。高真空下での強力な電子線が、サンプルにダメージを与えてしまうこともありま

す。また、高真空室に入れられた生き物は干物なんです。つまり、生き物を観測しているつもりが、見ているのは干からびたサンプルではない」(富田)

「ならば、弱いエネルギーでも細い電子ビームができる電界放出形電子銃を用いれば、表面



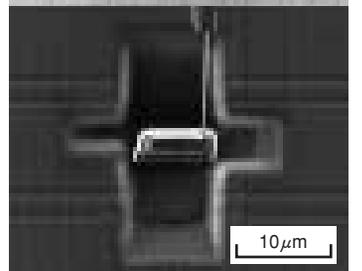
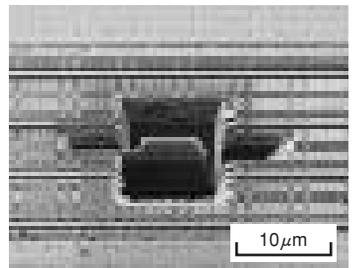
半導体デバイス産業を支える超薄膜評価装置の最新モデルHD-2300A



HD-2300シリーズでは、nmに近い評価が可能



ナノレベルでモノを加工する集束イオンビーム加工観察装置FB-2100



FB-2100におけるマイクロサンプリング例。イオンビームで集積回路の底部を切断し、摘出



に金属原子などをコーティングしなくても観察できるのではないかと。加速電圧が低いとイメージが小さいだけでなく、絶縁物でも電気を帯びにくくなる。生き物の観察には、水を含む組織を凍結乾燥させれば、周囲を真空にしてもそのままの状態に近い観測ができるのではないかと。表面から蒸散される水分で、観測精度が致命的に低くなることはない。いや、水を含む通常の標本やサンプルを低真空状態で観測することだって可能ではないか？ 標本中の水そのものを観測できはしないか？ 電界放出形の出現や低真空方式の走査形電子顕微鏡の出現によって、実にさまざまなアプリケーションが生まれてきました（齊藤）

低真空方式の走査形電子顕微鏡が可能にした含水標本の観察。さらにそれは、パソコンのようなコンパクト化も実現したのだ。

ナノサイズの半導体製造のお目付け役

日立ハイテクの電子顕微鏡は、医学やバイオの分野でも活用されているが、実は、電界放出

形電子顕微鏡の非破壊性は、全く別の領域で威力を発している。「電界放出形電子顕微鏡の実用化、製品化に日立が成功したのは1975年です。ちょうどこの時代、電子テクノロジーの世界で何が起きていたでしょうか」と齊藤尚武は話を続ける。

「パーソナルコンピュータの心臓部分であるマイクロプロセッサが世に広がり、それを用いたパソコンが市場に登場し、ミニコンや大型コンピュータの世界にLSI（高密度集積回路）が普及、さらに超高密度の集積回路（VLSI）プロジェクトが開始されるようになると、製品の歩留まりという問題が再浮上してきました。初期の集積回路の場合には、まだまだ未熟だった生産工程を改善することによって、ある程度は解決ができましたが、回路が複雑化するにつれ、仕上がり製品の検品と不具合の排除は不可欠となったのです。

1970年代後半までは、その検品には光学顕微鏡で事足りました。しかし、1980年代も半ば近くになり、256キビットDRAM（Dynamic Random Access Memory）から1メガビットDRAMへの移行が進むと、光学顕

微鏡による検品は原理的な限界に達してしまふ。電子ビームによる回路への障害（破壊を危惧する生産現場からの声もあったのですが、電界放出形はその不安を払拭するだけの成果を上げることができたのです。

以来、マイクロ以下、ナノサイズの回路が正しくつくられているかどうかを測定する測長走査形電子顕微鏡（CDSEM）は、半導体製品の製造における、最も重要なお目付け役として活躍しているのです（齊藤）

もともと、先に富田が指摘したように、残念ながら、最新の電子顕微鏡の成果を一般の人が自分の目で見る機会が逆減るようになった。だからこそ、卓上顕微鏡は、新世紀の驚異の眼がどんな世界を私たちに見せてくれるのか、それを手軽に確かめるためのマシンとして、大きな意味をもっているといえよう。

さて、最後にもう一つ、同じ半導体製品の製造ラインの最終段階で、数十µmサイズの解析箇所を摘出し、SEM（走査形電子顕微鏡）やSTEM（走査透過形電子顕微鏡）用の試料を作成するマシンを紹介しておこう。

この「集束イオンビーム（FIB）加工観察装

走査電子顕微鏡S-4700による珪藻（Paralia sulcata）の画像
「ナノアート」より転載
2002年（第58回）日本電子顕微鏡学会 写真コンクール金賞受賞作品
©（株）日立サイエンスシステムズ 武藤篤、鈴木猛夫、多持隆一郎
©日本歯科大学 南雲保
©文教大学 教育学部 出井雅彦
試料ご提供：日本歯科大学 南雲保様、文教大学 教育学部 出井雅彦様
撮影条件
試料：珪藻（Paralia sulcata）
測定装置：高分解能電界放出形走査電子顕微鏡 S-4700
撮影倍率：3,000倍
加速電圧：2 kV

置」は、電子顕微鏡がもつ「観る」機能のほかに、「掘る、削る」機能と「つける」機能をもっている。写真のように電子より重い金属イオンビームで集積回路の不良と思われる目的箇所を削り、細い金属プローブをそこへ接着し、その目的箇所を摘出することができる。写真の目的箇所は、幅10µm（100分の1mm）以下のサイズである。この断面を電子顕微鏡で観察し、どのようになっているか確認するということは、あたかも人間の内臓にできたポリープを内視鏡で取り出し、そのポリープが悪性かどうか判断することと同じことだ。

私たちの網膜の限界をはるかに超えて、超ミクロな世界を映し出してきた電子顕微鏡。そのテクノロジーは、人間の視覚の領域をも超えた。パフォーマンスを展開し始めている。