

電子顕微鏡でできるナノ加工



若 者

平 原 佳 織*

Nano-process in electron microscopy

Key Words : carbon nanotube electron microscopy nanomechanics process

1. はじめに

平成 19 年度 1 月より工学研究科機械工学専攻で助教として採用され、1 年余り経った。ナノ工学領域という 18 年 10 月開設の新講座で透過電子顕微鏡 (TEM) を用いたナノ構造物質の加工に関する研究を行っているが、機械工学分野では全国的に見ても TEM による研究がそれほど多くなく、私の様などちらかといえば理学系の色彩が強い経歴の研究者が機械工学専攻の教員になるのも珍しいように思われる。今回、この記事執筆させて頂くにあたり、私が機械工学専攻に着任するまでを振り返ると共に、現在阪大で進めている研究を少し述べさせていただき、機械工学という分野で TEM がどのような工学領域を開拓できる (できそう) かを、私なりに改めて認識する機会にさせていただきたく思う。

2. 透過電子顕微鏡 ~ 百聞は一見にしかず

光学顕微鏡が可視光を使って観察物の像を拡大するように、TEM は、その名前の通り観察物試料を通過 (透過) した電子線を、レンズを使って結像する。電子線の波長 (加速電圧 100kV で約 0.003nm) は可視光 (数百 nm) に比べて極めて小さく、レンズ収差による像のぼけ等を考慮しても、汎用装置での分解能は 0.2nm 程度である。原子 1 個は見えなくても金属結晶の格子像が観察できる程度である。

私が TEM により撮影した結晶構造像を初めて見たのは名古屋大学工学部応用物理学科の三回生のときだが、教科書のモデル図で見ていたような結晶格子が直視できていること自体に感動でき、原子が整然と並んだ様はとても美しいことを知った。そのときはあまり深く考えなかったが、「見える」ということが何より強い証拠になると、現在に至るまで強く意識することとなり、四回生ではその像を見た研究室で高分解能透過電子顕微鏡法を学ぶことになった。博士前期課程でカーボンナノチューブ (CNT) と呼ばれる炭素六員環構造が円筒状に閉じた構造体が研究テーマだった縁から、修了後は電子顕微鏡学の第一人者で CNT の発見者でもある飯島澄男氏に師事し、名城大学で研究員として研究活動を進めた。

TEM は像を得るだけでなく、同じ場所から電子回折図形が撮影でき、X 線回折で行う様な周波数空間での平均構造解析がナノサイズの局所領域に対して行える。高結晶性材料の解析では像のみよりもはるかに高精度で解析できる。飯島氏が CNT を発見した際も、電子回折により CNT が様々な螺旋構造を持つことを示した。CNT の螺旋構造はカイラル指数という 2 つの整数の組で定義され、CNT はカイラル指数の値によって電気的性質が異なる。実際に合成される CNT は一本一本がさまざまな螺旋構造を持つので、一本レベルの確実な構造解析手法が必要である。私はナノ回折と呼ばれる極小領域での回折手法を CNT 一本に適用できるようにアレンジし、得られた電子回折の強度分布を詳細に検討した結果、直径 1.5 ~ 6nm の CNT では 95% 以上の確率でカイラル指数を一義的に決定できるまでに解析精度が向上できた。

CNT の中空空間に異種物質を詰め込んだ新奇複合物質の創成も試みられた。最初に内包したのはフ



* Kaori HIRAHARA

1974年12月生
名古屋大学大学院・博士前期課程工学研究科・応用物理学専攻 (1998年)
現在：大阪大学大学院 工学研究科機械工学専攻複合メカニクス部門 助教 博士 (理学) 電子顕微鏡学、固体物理、結晶学、材料科学
TEL : 06-6879-7815
FAX : 06-6879-7815
E-mail : hirahara@mech.eng.osaka-u.ac.jp

ラーレンという球殻状分子で、フラーレン分子が内包されたCNTはTEM像上での形状がサヤエンドウに似ていることから、ピーポッドと呼ばれるようになったが、金属内包フラーレンピーポッドをTEM観察したところ、フラーレン分子の籠の中に金属単原子が閉じこめられた様子が写っていた。これは二つの点で重要な結果といえる。ひとつは三次元結晶中で自転しているはずのフラーレン分子が一次元結晶では数秒単位で静止している直接の証明であること、それから、CNT内で一列に並ぶことが、分子一個体の像観察を可能にしたことである。特に後者は、CNTの単分子担持材としての活用の可能性へのヒントであり、将来のTEM観察手法を変えていくかもしれない。

以上のような成果を博士論文にまとめた後、再び名大の出身研究室(現エコトピア科学研究所)にポスドクとして帰ることになった。その数年前に、電子顕微鏡技術の世界は数十年來のブレイクスルーを迎えていた。対物レンズの球面収差補正の実現で、原子一個を分解できる、真の原子分解能が実現し、名大では国内一号機が導入され半導体材料などの成果が出始めたところだった。炭素原子が観察できるように装置を調整すると、従来のTEMでは透明だった、CNTを構成するグラフェン一枚の六員環構造中の炭素原子像が捉えられた。同時に球面収差補正は分解能向上以外にも利点があることに気づき、新しい三次元構造解析法の開発に繋がられるのではと期待しているところである。

3. ナノ科学から機械工学分野へ

ポスドク時代まではCNTの構造解析手法の確立という、ナノ材料科学よりは比較的電子顕微鏡学を興味を中心として研究を進めてきたが、カイラル指数が電子回折で決定できるようになり、像でも優れた装置を使えば欠陥一個レベルの観察が可能になってきた頃、そのような構造解析法で何を明らかにするのが面白いのか、と考えるようになっていた。一般に、ナノサイズの構造物質は、局所的な構造変調が物質全体の性質に大きく影響することが知られている。CNTの場合、理想的なモデルではカイラル指数で電気的特性が決まるが、実際に合成されるCNTには多少なりとも欠陥がある。局所領域の構造を捉えるには極めて威力を発揮するTEMを用い

てCNT一本レベルの特性が議論できれば、ナノデバイスなどへの応用にも寄与できる。18年の夏頃、現研究室の中山喜萬教授より、ナノ工学領域という講座を機械工学専攻に新設するとのお話を頂いた。機械工学専攻というと全く立ち入ったことのない分野に思えて当初やや抵抗感があったが、TEMの研究室が機械工学にあるのは新鮮なことに思えた。機械工学分野での基礎知識を得た学生がTEMを使える環境は、そう多く用意されているものではない。TEMは整備された装置で単に像を撮れば良い訳ではなく、像に何が写っているかを適切に解釈するためには十分に電子光学の知識が必要なため、従来TEMを専門とする研究室は、電子顕微鏡学が研究の支柱にあることが多い。他分野の研究者には敷居が高いと言われることもしばしばである。だが、電子顕微鏡学そのものは必要最低限にしてナノサイズの機械現象の解明に専念する、という研究の姿勢があっても、従来の電子顕微鏡学者とは異なった観点、発想を適用して新たな着想や思いがけない発見が期待できるかもしれない。そう言った意味で、半分怖いもの見たさのような気持ちで阪大へ助教として赴任した次第である。

4. ナノ加工技術に必要なのは、器用な「手」とよく見える「目」

現在トランジスタやセンサなど様々なナノデバイスが研究されているが、その実現にはそれらを構築する部品の素材や加工技術の開発が重要な鍵といえる。曲げ、切断、溶接、固定、メッキ、等、多岐にわたる機械加工をナノ構造体単体に対して精度良く行うには、加工する「手」となる技術の開発が重要な課題である。現在、ナノ加工ができる「手」としては操作プローブ顕微鏡が最も一般だが、操作と像取得を同一カンチレバーで交互に行うので、加工と観察が同時には難しい。これに対し、本研究室では目的物質をナノメートル精度で三次元操作できる「手」となるピエゾ素子駆動式マニピュレータをTEM内に組み込んでいる。この機構は、TEMという強力な「目」を持っていることが、最大の利点である。TEM内部での一連の加工過程が加工精度以上の高分解能で同時に観察・記録できる。比表面積が大きく体積のきわめて小さいナノサイズの物質では、格子欠陥、歪みなど、加工に伴う局所領域の構

造変調や表面構造が素材全体の特性に影響を及ぼすと予想できるが、TEM 内部でナノ物質を自在に加工しながら、加工に伴う局所的な構造変調を像観察し、同時に物性測定を行えば、ナノ加工に特有な物性の形態依存性や最適加工条件が詳細に調べられる。本研究室では、カーボン原子を骨格とするCNTやタンパク質など生体高分子に注目し、これらナノ材料の「ナノエンジニアリングの体系化」を研究の中心課題に掲げている。一本のCNTの塑性変形やCNT同士の接合、接着など、さまざまな加工を行い、原子レベルの構造変化と電気特性・力学特性を同時

計測することで、それらの相関を明らかにしようとしている。学生は今年度から配属されたばかりで、そのほとんどが研究生活一年目だが、数ヶ月かけてようやくTEMを使いこなせるに至り、研究も軌道に乗ってきたところである。今後、本研究室のような機械工学とナノ固体物理学の学際領域から発信される成果を積み重ねていくことによって開拓されていくであろうナノ加工技術の体系化という分野は、将来のナノテク産業発展のための重要な基盤要素になると考えている。

