

## ナノスケール構造の解明に人生を賭けた電子顕微鏡のスーパースペシャリスト



### 飯島澄男

新しい素材であるカーボンナノチューブを発見し、その構造を解明した。カーボンナノチューブの構造は、炭素6個から成るリングが連なったシートを丸めた円筒状構造である。その円筒の長さは数百マイクロン以上が可能であるが、直径はナノメートルレベルであり、実在する材料として、また、人工的に合成する最も小さいナノサイズの極細線である。その存在と単層円筒状、多層円筒状、ホーン状等の多様な構造を有することを世界で初めて確認した。構造解明を土台として、カーボンナノチューブの電気特性の理論的な解明や実用化への動きが大きく加速され、大量合成法の開発も進んでいる。

#### 現職

- ・ NEC 特別主席研究員
- ・ 名城大学大学院 理工学研究科材料機能工学専攻教授
- ・ 独立行政法人 産業技術総合研究所 ナノカーボン研究センター センター長
- ・ 独立行政法人 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 発展継続研究 飯島チーム 研究代表者

#### 略歴

- 1939 年 埼玉生まれ
- 1963 年 電気通信大学通信学科卒業
- 1968 年 東北大学理学部物理学科博士課程修了 理学博士
- 1968 年 東北大学科学計測研究所助手
- 1970 年 米国アリゾナ州立大学研究員
- 1979 年 英国ケンブリッジ大学客員研究員
- 1982 年 新技術事業団 創造科学推進事業 林超微粒子プロジェクト基礎物性グループ グループリーダー

- 1987年 NEC入社
- 1991年 カーボンナノチューブ発見
- 1998年 科学技術振興事業団 国際共同研究事業「ナノチューブ状物質」プロジェクト代表  
研究者
- 1998年 名城大学客員教授
- 2001年 独立行政法人 産業技術総合研究所新炭素系材料開発研究センター センター長
- 2002年 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構「ナノカーボン応用製品創製  
プロジェクト」プロジェクトリーダー
- 2003年 独立行政法人 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 発展継続研究 飯島チー  
ム 研究代表者
- 2004年 独立行政法人 産業技術総合研究所ナノカーボン研究センター センター長

#### 主な受賞

- 1976 バートラム ワーレン賞 (米国結晶学会)
- 1980 瀬藤賞 (日本電子顕微鏡学会)
- 1985 仁科記念賞
- 1996 朝日賞
- 2001 米国物理学会フェロー
- 2001 石川カーボン賞
- 2002 マックグラディ新材料賞 (米物理学会)
- 2002 ベンジャミンフランクリンメダル 物理学賞
- 2002 日本学士院賞・恩賜賞
- 2003 応用物理学会業績賞
- 2003 文化功労者
- 2004 本多フロンティア賞
- 2004 米国炭素学会 科学技術功績メダル
- 2005 米国顕微鏡学会 著名科学者賞:物理学部門

## 1. 自然児だった少年時代

飯島が生まれ育ったのは埼玉県越谷市である。周りには水田が広がり、里山もあった。かえるを捕まえたり、鳩やウサギ、ニワトリ、アヒルなどを飼ったりしていた。

手先の器用さはその頃からで、後々に通じるものがある。竹ひごを曲げて模型飛行機を作ったりもした。工作の宿題で自分の分だけでなく、女の子の「本立て」を作ってあげたこともある。鉄道模型のパーツを袋から取りだすときの独特の匂い、レールを走らせるときのトランスから出てくる匂いや「ブーン」という音、時折出てくる火花など今でも良く憶えているという。小学校の担任は理科の先生で、植物採集などをしたことが記憶に残っているという。

口より先に行動する「行動派」だった。小学校の頃からのキーワードは「挑戦：チャレンジ」とのことである。

中学は地元の中学校ではなく、一番近くの「都会」である足立区の中学校に行った。中学校でも、理科の先生にかわいがられた。しかし、勉強の成績は特別優秀というわけではなかった。

## 2. 山と音楽に熱中した高校時代、大学時代

高校は、足立区と同じ第5学区に属していた都立上野高校に進んだ。上野高校は旧制市立二中で、旧制府立中学校の日比谷高校や西高校への対抗意識も強く、有名大学への進学率も高かった。しかし、飯島は山岳部を創設して、日光方面の山に行き、岩登りや沢登りに熱中するなどして、勉強への熱意はさほど持っていなかった。バンカラな「山岳部」はその後人気が無くなって消滅したという。

担任の萩原先生は化学が担当で、山岳部の顧問をお願いした。いまでもおつきあいがあるという。山岳部だけでなく、地学部にも加わり、筑波山の近くに「ざくろ石」を取りに行ったりした。そのころの先輩である堀秀道氏はその道に進んで、いまでも「なんでも鑑定団」の鉱物鑑定に出演している。

大学は、一期校に落ちて、二期校である電気通信大学に入った。学科は陸上通信学科で、始めはモールス通信の実習もあった。電子工学科はまだできたばかりの頃である。

大学でも、山岳部に入り、1年間に100日くらいは山に行っていた。また、大学3年、4年のころはフルートに夢中になり、東京交響楽団のフルート奏者に習ったこともある。それ以前にも楽器を手にしており、小学校以来のハーモニカを始め、高校時代にはマンドリンやギターなどを弾いていた。それも1つの「チャレンジ」だった。大学では、弦楽器をやろうかとも考えたが、時間がかかりそうなので、フルートにしたという。

電通大には越谷の自宅から2時間、往復で4時間かけて通った。何をやりたいのか自分でもはっきりしなかったが、4年になってようやくはっきりしてきた。4年で卒論のために配属になった先生が量子化学の先生だった。教育大から移ってきたばかりで教育大から連れてきていた学生が1人いたが、その他にはだれもおらず、1対1で教えてもらった。こ

ういったことがあって、工学よりも理学の方が自分に合っているように思えた。

そのころは電気通信大学には大学院が無く、東北大に行くことにして、夏休みから受験勉強を始め、量子力学も独学で勉強した。

卒論は適当な論文を読んでまとめたものでなんとかなったという。

### 3. 自分の肌に合っていた電子顕微鏡研究

東北大学金属材料研究所の小川四郎先生を含め3～4人の先生と面接したが、東北大学の学部から進学した学生は希望の研究室がそれぞれ決まっていたようだが、他大学からきた少数の学生は残りの研究室ということになって、小川先生が「君はここだね」と言って、日比忠俊先生の研究室に決まった。自分では、ここでなければ、という気持ちもなかったという。

入ってみると、電子顕微鏡を使って色々なものを見るのは自分の性に合っていた。細かいものが見えることや手先の器用さが必要なことなども自分に合っていた。工学部だけでなく、医学部などから生物分野の先生がやってきて、交流できたのが面白かった。

日比先生は、1936年に日本で最初の電子顕微鏡を製作し、また1956年には電子顕微鏡のフィラメントを改良<sup>2</sup>したことで知られている。従来のヘアピン形状のものに比べて、ヘアピンの先に尖った針を付けた「日比フィラメント」(図1)は現在でも高分解用として広く使用されている。このような技術を含めて電子顕微鏡の改良とそれを使ってものを見ることが研究テーマになっていた。アルカリハライドや蛋白を見ている人もいた。

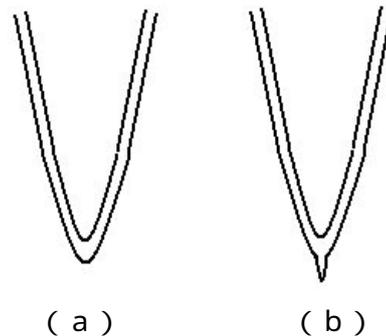


図1 通常のヘアピン型フィラメント (a)と日比フィラメント (b)

電気通信大学の頃とは全く異なった研究テーマになったが、別の所に移ることで自分自身のステップアップにつながることはよくあることであると飯島は述懐する。

修士課程と博士課程では臭化銀 AgBr の焼き出し効果(print-out effect)の研究をした。臭化銀は写真フィルムの感光剤であり、光が当たると銀が析出して潜像ができる。その際、光を当て続けると析出した銀粒子が(110)方向にスリップを起こすことなどを確認した。

析出した銀が条件によっては細長い結晶になって伸びる。その直径数十 nm のフィラメント状になった銀結晶の構造解析もおこなったが、その解析手法は、後にカーボンナノチューブの構造解析にそのまま適用された。また、銀粒子については、後に、1980年ころに、銀原子が4つという微粒子の状態を詳しく調べたことにつながっている。

このようなテーマのつながりが思わぬ所で出てくることもあるのは、一面では偶然だが、

<sup>1</sup> [www.ecei.tohoku.ac.jp/gk/tech2005/kensaku/pdf/154](http://www.ecei.tohoku.ac.jp/gk/tech2005/kensaku/pdf/154)

<sup>2</sup> [http://wwwsoc.nii.ac.jp/jps/jps/butsuri/50th/noframe/50\(10\)/50th-p719.html](http://wwwsoc.nii.ac.jp/jps/jps/butsuri/50th/noframe/50(10)/50th-p719.html)

一面では必然とも言える。一生懸命研究した結果がどこかでつながって次のテーマを引き寄せているとも言えるからだ。このような考え方は、飯島が研究を進める上で、基軸を貫くものとなっている。

研究室では、他の人が円筒状構造をもつアスベスト結晶の研究をしていたが、円筒状結晶からの電子回折図形はカーボンナノチューブと共通なので、そこで得た経験が30年後に役に立ったという。これも上述の考え方の一例であり、幸運な偶然といえるだろう。

博士課程の後、助手になって2年ほどの間、ポイントフィラメント(「日比フィラメント」)を使って電子線ホログラフィーの研究をしたが、そのときは、フィラメント製作用の治具やエッチング法などを工夫して習得した。これがその後米国に留学したときに大いに役立った。

#### 4. たまたま決まった米国留学

1970年から12年間、アリゾナ州立大学に行ったのだが、そこでは、州政府が国の予算を取ってきて電子顕微鏡研究のセンターを作って、中心となる研究者をオーストラリアから招いた。ジョン・カウリー教授である。そのとき、日比研究室に声がかかって、誰か人を送ってくれということになった。適任者は高分解能電子顕微鏡の技術に詳しい助教授だったが、ちょうどシカゴ大学への留学から戻ってきたばかりだったので、飯島が代わりに行けということになった。

飯島は、その以前に、修士課程の夏休みに自費でオーストラリアに行ったことがある。メルボルン大学に留学していた友人を訪ねたのだが、そのときカウリー教授には顔を合わせていたので、アリゾナ大学で教授のもとで仕事をするということになったのも何かの因縁かもしれない。

アリゾナ大学では、「電子顕微鏡を使った物質のナノメートルレベルの構造や物理現象の探求」をテーマにしたが、これが飯島のその後の人生を貫く専門となった。

研究室には日本電子(JEOL)製の電子顕微鏡が入っていた。そのフィラメントを日比フィラメントに取り替え、精密回転可能な試料取付台であるゴニオメーターも高分解能型に取り替えた。試料位置を下げて、適正位置に調整し、光軸合わせを精密に行って高分解能を実現した。真空中の部品を交換して適正条件に設定することは簡単なことではなかったが、東北大学での経験が役立った。飯島が調整して観察し終わった後に電子顕微鏡を使えば、高分解能の観察ができるということで、彼の後で使いたがる研究者が多かったという。

その後、アリゾナ大学が電子顕微鏡研究における世界のセンターになった感があり、人と情報が集まってきた。成果が出れば尊敬され、居心地は良かったという。

物質構造を原子レベルで解明する高分解能電子顕微鏡技術を世界に先駆けて開発し、これを使って、1971年にはニオブ酸化物結晶中の金属原子の直接観察に世界で初めて成功し、1973年には結晶中の点欠陥を原子レベルの分解能で撮影することに成功した。そして、1977年には、孤立タンゲステン原子の撮影に成功し、1932年に電子顕微鏡が発明されて以

来の「原子 1 個を見てみたい」という夢が実現したと言われた。アメリカ時代に学んだことの一つは、「人のやったことはやらない」ということだったという。

アリゾナ大学への留学の際に、子供は 1 才の子を連れて行ったが、アリゾナで 2 人目が生まれた。日本語学校が無かったので、自宅で自分で日本語を教えた。上の子は、普段使わない日本語をなぜ勉強しなければいけないのかと文句を言っていたが、バイリンガルになって、今ではシンガポールで新聞記者をやっているとのことである。

## 5 . 帰国の理由

12 年間続けたアリゾナ生活をうち切って帰国した理由の第 1 は子供の進学のためだった。特に、高校時代まで米国で過ごす米国が母国になってしまうと考えて、その前には、日本に戻ろうと考えた。

2 番目は米国社会のあり方が自分には合わないと考えたことである。最後の 1 ~ 2 年は自分でプロポーザルを作ったりしたが、米国は競争社会であり、「闘う」のが大変だと感じた。一定の枠ができ上がっていてその中で研究に没頭できるような環境が自分には合っていると思われたという。また、電子顕微鏡の仕事も、装置そのものについては面白そうなテーマがそろそろ無くなってきており、高分解能の追求から物質に着目する仕事に中心が移ってきていたという状況もあったという。

3 番目は日本の新しい基礎研究プロジェクトに参加するよう誘いがあったことである。神様のような存在であった名城大学の上田良二先生（もと名古屋大学。電子回折の研究が専門、電子顕微鏡の研究とともに、戦後いち早く金属超微粒子の研究を始めた。）が米国に来て直接誘って頂いたためである。

当時は、新技術開発事業団（現・独立行政法人科学技術振興機構、JST）の委託開発事業として、基礎研究を行うシステム（創造科学技術推進事業、ERATO）がスタートした最初の時期であった。このとき、ERATO には 4 つのテーマがあった。「超微粒子」（リーダーは林主税日本真空技術社長）、「特殊構造物質」（増本健東北大学教授）、「ファインポリマー」（緒方直哉上智大学教授）、「完全結晶」（西澤潤一東北大学教授）である。この「超微粒子」のプロジェクトのメンバーを上田先生が集めていた。

アリゾナ大学で、高分解能電子顕微鏡を開発し、ニオブ酸化物結晶中の金属原子の直接観察、結晶中の点欠陥の原子レベル観察、孤立タングステン原子の撮影など世界初の仕事をしたことが、参加を要請された理由だと思われる。

プロジェクトの研究拠点は、名城大学や筑波に分かれていたが、名城大に勤務することになり、その頃から自宅は名城大学の近くに構えた。名城大では新しい電子顕微鏡を作って、金の超微粒子がアメーバのように動く「構造ゆらぎ」を発見した。

## 6 . NEC に入社した理由

ERATO は 5 年という期限が決まっていた。それが過ぎたら、母校の東北大学に戻るこ

になると漠然と考えていた。問題は、予算と人だった。それらが無いと新しい電子顕微鏡も作れず、面白い仕事もできない。

そのころ、NEC 基礎研究所の篠田大三郎所長から誘いを受けた。高性能電子顕微鏡を新たに作ることも約束してもらうことができた。基礎研が川崎から新たに筑波に移転して拡充される少し前の時期である。

48 才で初めて企業に勤めることには多少躊躇したが、企業の研究所に行けば、大学では手に入らない面白い材料が手に入るのではないかと、その解析ができるなら良いのではないかと考えて決心した。

高分解能の電子顕微鏡を使って微細な構造を解析する仕事として、「3次元」の規則的な配列をしたものやその配列が乱れた格子欠陥、それから、いわば「0次元」である微粒子のビデオ観察などはかなり観察と解析が進み、残っている研究領域としては、「2次元」である表面に特有の配列構造などが考えられた(ナノチューブはいわば「1次元」構造であり、こういう考え方の流れに乗ったものということができるが、それは後になっての話である)。炭素の「2次元」構造であるグラファイトは構造解析上の面白さはあまり無いが、半導体材料であるシリコン結晶の特殊な「2次元」表面配列構造に関心が高くなっていた時期でもあったので、シリコン結晶について研究実績のある企業の研究所に行くことにした。

ERATO プロジェクトで一緒に仕事をしていた市橋氏を連れて行くことができたので、新しい電子顕微鏡を作るための予算と人があることになった。1987年にNECに入社して2年後、筑波の研究所に新しい電子顕微鏡ができた。

NECに入社後、初めて書いた論文はC60に関するものだった<sup>3</sup>。以前に観察した写真の中に写っていたオニオン構造についてのものである<sup>4</sup>。ノーベル賞を受賞したクロトーたちのC60の発見は質量分析法の結果から推測したものだが、その具体的な証明になる仕事である。

NECでの高分解能電子顕微鏡開発のポイントは、超高真空で高分解能であることであった。超高真空は、 $10^{-7}$ Pa程度が可能で、この位の真空度があればシリコンの清浄表面にのみ見られる特別な周期構造である再配列構造(シリコン結晶表面の $7 \times 7$ 構造など)も観察でき、表面現象の本質的挙動が観察できる。超高真空を実現するには、電子顕微鏡内壁に吸着している水分などを十分に取り除くための150程度のベーキング(加熱処理)が必要だが、そのための部品材料や排気系の改良がポイントだった。装置改良は地道な仕事だが、華やかな新発見の舞

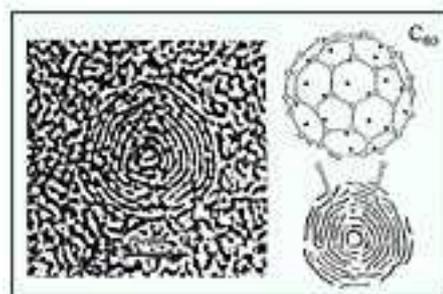


図2 C60の電子顕微鏡写真とそのタマネギ構造モデル

<sup>3</sup> Sumio Iijima, J. Phys. Chem., 91, 3466-3467(1987).

<sup>4</sup> <http://www.labs.nec.co.jp/innovative/E1/01.html>

台裏を支える重要な仕事である。ベーキングをすると、構成部材が変形する問題があり、また、レンズの役割をする開口部の大きさは高分解能の目的には小さい方がよいのだが、高真空にはなりにくくなってしまうという問題がある。これらの条件を両立させるような設計が難しいところであり、工夫のポイントであった。

ここで、飯島が NEC に入社した頃は、高温超伝導や室温核融合などが世界的なニュースになっていて、NEC の研究所でも大きな関心を集めていた。

飯島も高温超伝導材料の解析を行うことにした。電子顕微鏡内部でガス反応が可能だったので、他ではできない構造変化が観察でき、独自の成果を期待したが、期待したほどではなかった。高温超伝導は、構造に特徴があるというよりは、電子状態、スピン状態に特徴があるので、それを電子顕微鏡で確認するのは無理である。結局は「寄り道」だったと飯島は言う。

一方、化合物半導体材料の解析では、「自然超格子」という、構造によってバンドギャップが変わるということが分かったことが飯島の一番の思い出である。当時は光ファイバーの最も損失が小さい波長に合わせるために、発振波長を調整することができるということが大きな魅力であったために注目を浴びた。

企業だと大学では手に入らない先端研究材料について研究できる、という代表的な例の1つであるという。

## 7. カーボンナノチューブの発見

1985年にC60が発見されたときには、ERATOプロジェクトで微粒子の研究をしていたが、クラスターサイエンスの一環として、原子が数個結合した状態を、質量分析法(MS)を使って観察できるようにすることなどをしていたので、C60が質量分析法の結果から予測できるというクロトーたちの話には興味は持っていた。それ以前に観察した写真の中のオニオン構造についてNECに入社後解析して論文を書いたことは前記の通りである。

その後、1990年にアーク放電法<sup>5</sup>によるC60の大量合成法が報告され、C60の超伝導が見つかるなど興味はさらに大きくなった。

飯島はERATOのときに名城大学にいた関係からその後も非常勤の形で在籍をしていたので、時々名城大学にはでかけていた。名城大学では、安藤義則教授がアーク放電法によりC60を作っていて、その「燃えさし」である使用済みの電極がいっぱい転がっていた。

C60のタマネギ構造を昔観察していたが、C60の生成過

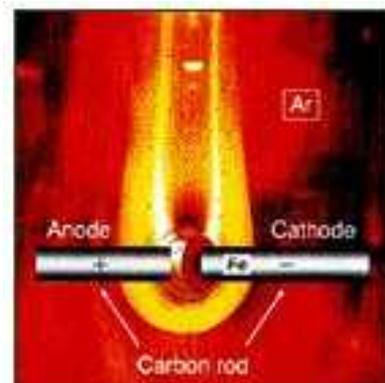


図3 アーク放電の様子

陽極側のカーボンが減り、陰極側にススが積もる。装置の内壁にもススが付く。内壁のススにC60がある。

<sup>5</sup> <http://www.labs.nec.co.jp/innovative/E1/01.html>

程はまだ分かっておらず、ボストンで行われた国際会議でも夜中になるまで議論が沸騰していたので、構造解析の立場から何か仕事ができるのではないかと考え、「燃えさし」をもらって調べようとした。

タマネギ構造をじっくり観察すれば C60 の生成メカニズムが分かるのではないかと考えて、手当たり次第観察した。それまで C60 は放電でできたススや陽極上の生成物の中にあると言われていたので、陰極上の生成物に興味を示す人はいなかったのだが、とにかくどこでも見てみようということで見たのが良かった。

陰極上の生成物の中に、タマネギ構造が見つかった。さらにそれに加えて、今まで見たことのない細長い構造が見つかった。これが「カーボンナノチューブ」であった<sup>6</sup>。炭素の「1次元構造」が見つかったのである。

電子顕微鏡による回折パターンを詳しく解析して、図5<sup>7</sup>に示すような炭素からなる六角形が連続した「グラファイトシート」を丸めた構造の多層チューブであることが分かった<sup>8</sup>。単純で細かな構造というのが分かって、これはきっと面白いものだろうと飯島は直感した。単純で細かいという点ではアスベストの形状と似ているので、構造も似ているのではないかと感じた。

ところが、当時は、世界中が C60 の超伝導ブームの真最中で、学会でも、NEC 社内でも反響は少なかった。ただ、一部の理論屋が大きな関心を持ってくれた。その結果、螺旋構造の違いによって導電性と半導体性とがあり得るなどの興味ある予測が出てきた。

最初は NEC 社内で議論して、生物の細胞中にたくさんある微細な螺旋構造物を指す言葉である「tubule」を使って、「Helical microtubule」と名付けた。もともと、医学・生物分野で構造解析に使われたのはX線による解析よりも電子顕微鏡による解析が先で、タンパクの構造決定も最初は電子だったことなどから、この用語を借りてきた訳である。

その後、基礎研究所の覧具所長と相談し、「命名が大事だ」ということで、「NEC チューブ」や「飯島チューブ」など色々考えた。サイズから考えて「マイクロ」では適当ではないということで「ナノチューブ」に落ち着いた。米国を中心に、スモーリーが言い出した「バッキーチューブ」という言い方も使われていた。建築家バックミンスター・フラーの建築物は球体状なので、チューブ状のものには適当でないということから、今では「カーボン

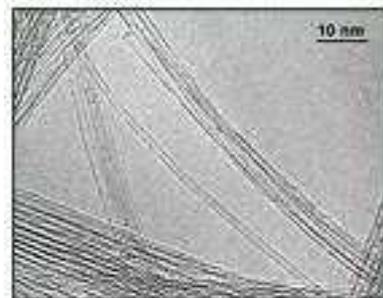


図4 電子顕微鏡で見た  
カーボンナノチューブ

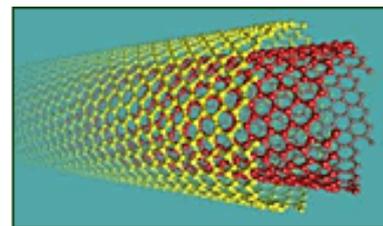


図5 カーボンナノチューブ  
の構造模型

<sup>6</sup> <http://www.labs.nec.co.jp/innovative/E1/01.html>

<sup>7</sup> <http://www.labs.nec.co.jp/innovative/E1/02.html>

<sup>8</sup> Sumio Iijima, Nature, 354, 56-58(1991).

「ナノチューブ」が一般的になってきている。

商標登録をしておけば良かったとも思うが、当時は思いつかなかったという。

## 8 . カーボンナノチューブ研究体制の拡大

もともと NEC での仕事として考えていたのはシリコンの表面構造などの半導体材料を対象とするものだったし、1991 当時は、C60 の大量合成法が見つかり、その超伝導性が報告され、一方では、高温超伝導のトピックスも出てきていた。

そういうわけで、カーボンナノチューブへの力のかけ方は弱くて、最初は、ノースウェスタン大学からきたポスドク (P. M. Ajayan) が 1 名増えたくらいだった。彼は、始めは、シリコンのクラスターについての仕事を担当してもらったのだが、2 年目の頃にカーボンナノチューブが見つかり、3 年目からナノチューブの担当に加わってもらった。その後、外国人のポスドクは入れ替わり何人が来てもらったが研究人員の大幅な増加はなかった。

1995 年ころから、スモーリーらがナノチューブの研究に大々的に取り組み始め、1996 年にレーザ蒸発法による大量合成法を開発するなど、追い越されてしまった感じになった。

そのころ、NEDO の国際共同研究費が取れて、額は大きかったことは無かったが、5~6 ヶ国の研究者と一緒に研究を進めた。しかし、研究者の増員までの予算は無かった。

その後、JST のプロジェクト (1998 年~2002 年) が通ってから急激に研究体制が拡大した。

## 9 . 印象に残る成果

飯島の印象に残る成果の第 1 は、ナノチューブの構造解析で大きな貢献をすることができたことであり、第 2 は、カーボンナノホーン<sup>9</sup>を発見したことだという。

ナノチューブの大量合成のためには成長メカニズムの解明が重要であると考えて、レーザ蒸発法の条件を種々変えて実験していた。触媒となる金属粒子や高温条件が必要と言われていたが、触媒が無い場合や室温の場合などの検討をした。その際に、レーザを YAG レーザ (出力 1 W) から CO<sub>2</sub> レーザ (2 KW) に変えたら、室温でもできた。ただし、ナノチューブではなくて、モジャモジャした集合体に角 (つ) がたくさん付いているような「ナノホーン」であった。大きさは 50~100nm くらいである。その「角」だけを取って観察すると、ナノチューブの径がだんだん大きくなって一方が開いた形になっていた。この「角」のことをナノホーンと思っている人もいるようだが、飯島は「角」を含めてもともとのモジャモジャしたものを「ナノホーン」と呼んでいる。

CO<sub>2</sub> レーザは、当時産業創造研究所というところで、鉄板加工用技術の開発のために使

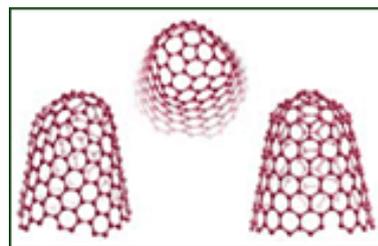


図 6 カーボンナノホーンの「角」の構造模型

<sup>9</sup> <http://www.labs.nec.co.jp/innovative/E1/02.html>

っていたものが用済みになってたくさん余っているのを使わせてもらったという。「つくば」という研究機関が近くに集まっているというメリットが生かされたとも言えるであろう。

#### 10. カーボンナノチューブ研究開発と実用化の展望

カーボンナノチューブは炭素原子をもとにした基本構造であり、応用分野は極めて多岐にわたる。その中でも実用化が進んでいるものとして飯島は次のものが有望だと考えている。

第1は、トランジスタ応用。第2は、スーパーキャパシタ応用。第3は、半導体の配線材料。第4は、ディスプレイ応用。第5は、透明導電膜応用。第6は、ナノホーンの燃料電池応用。第7は、ナノホーンのドラッグデリバリー応用。また前提として生体に対する影響の評価が重要であるという。

それらのなかでも、飯島が特に注目しているのは、まず、スーパーキャパシタ応用である。単位重量当たりの表面積を大きくできるのでパワー密度が大きくなるという利点を生かし、自動車用燃料電池と組み合わせてスタート時に必要な大電流のダッシュカレントにも対応可能になる。ナノチューブではまだパワー密度が低いので改良が必要だが、活性炭に比べてナノチューブの方がライフタイムは有利だ。比表面積はどちらも同じくらいだが、使用電圧領域はナノチューブの方が広い。また、充放電時の内部抵抗はナノチューブの方が低い。ナノチューブが電極表面に形成した触媒となる金属粒の位置に垂直に密集して成長するメカニズムが明らかになったことから制御性良くキャパシタ容量を調整できるようになった。

また、最近実用化に向けた開発が進んでいるのが、半導体 IC の配線材料、特に微細な開口部に埋め込む配線材料であるビアホール埋め込み配線への応用である。穴の直径が 100nm 以下になると Cu 等の金属材料では穴をきれいに埋め尽くすことが難しく、空洞ができるなどの問題があり、配線抵抗が大きくなって高速化の障害になっている。これに対して、微細な金属粒を穴の底に配置しておくとしてそれを触媒としてカーボンナノチューブが密集して成長し、穴の底から表面まできれいに埋め尽くすことができ、抵抗値を小さく抑えることができる。

これらの応用の進展は、ナノチューブの成長メカニズムを理解することが実用化にとっていかに重要であるかを教えている。

次には、透明導電膜応用である。フレキシブル液晶表示板に使える透明電極ができると期待している。

さらには、ナノホーンを燃料電池用に使うことである。

NEC<sup>10</sup>で進めているが、当初の目標性能はクリアしたという。ただし、システムとしての



図7 カーボンナノホーンを使った燃料電池内臓ノートパソコン試作機

<sup>10</sup> <http://www.labs.nec.co.jp/innovative/E1/03.html>

電池の一部なので、電池全体を実用化するには別の問題があるという。

生体に対する悪影響がないかについては、これまでにネズミやウサギに投与して影響を調べたが、悪性腫瘍ができるようなことはなかったという。世界的に標準サンプルでの検討が始まっているとのことである。

#### 1 1 . 創造的な研究開発のあり方について

飯島は、自分の仕事は電子顕微鏡を使ったマテリアルサイエンスであると考えている。その上で、それを使って役に立つものを作るのは当然であるとも考えている。

そういう考え方は、若いときから持っていたわけではないという。若い頃は、電子顕微鏡で原子が見えるかどうかなど、どうしたら見えるかだけが興味の中心だった。その技術を使って、ミネラル、酸化物など色々なものを見ることが面白かったとのことである。

現在、飯島は、いくつもの研究機関やプロジェクトにリーダーとして関わっているが、それぞれの特徴について次のように考えているという。

(a) JST のプロジェクトは、文科省のもとでの仕事であり、基本的には基礎研究である。軽々しく「応用」というべきではない。ディスプレイやスーパーキャパシタ応用でも基礎的なことは大事だ。

(b) 産総研の場合には、基礎と応用の両方の視点が必要だ。その中で、ナノチューブを作ることと、評価することが両輪として重要だ。評価については、電子顕微鏡を中心として評価法の開発も進めている。韓国との差は、評価技術力の差である。その点では、米国は総合力がある。欧州は、単発的なテーマでの力はあるが、総合力ではやや低い。

(c) 名城大学の場合には、青色発光素子とカーボンナノチューブとをセットにした形で COE のテーマになっている。COE では人材育成が重要な任務になっている。

#### 1 2 . 様々な受賞から考えること

飯島はカーボンナノチューブ発見以前から高分解能電子顕微鏡を駆使して様々なナノスケール構造を解明してきた。その成果に対して多くの表彰を受けてきた。カーボンナノチューブ発見とその構造解明に対しては、さらに色々な賞を受けているが、それらの受賞を通してその国その団体の科学技術の成果に対する期待と態度が分かるという。

ベンジャミンフランクリン賞については、研究開発に対する社会的評価の形としてかくあるべし、という意味で考えさせられるものが大きかったという。賞金は無くて、メダルだけであり、募金による運営で、ボランティアが仕事をしていた。協会の主な仕事は科学博物館の運営で、授賞式の後、博物館に来た高校生を集めて話をして質問攻めにあった。

英国王立協会の「金曜講話」については 200 年近くも続けているのはすごいと感じたという。「文化」を作っていく力であろう。継続は力なりである。英国の良い伝統を見せつけられたという。テニスクラブと同じで年間 20 回のシーズンチケットもある。ブラックタイ着用など時代錯誤的なところもある。講演の前と後で協会の主要会員と懇談する機会があ

るが、講演の直後に講演会場での質疑は一切無いというスタイルだった。

王立協会 (Royal Institution) は王立学会 (Royal Society) とは違って国からの援助は無い。

日本の学士院賞、文化功労者は、厳粛なセレモニーという感じが強かったとのことである。

### 13. 若い人たちに<sup>11</sup>

電子顕微鏡と出会ったことが、飯島の研究の道を決めたわけだが、これは、"セレンディピティ"というよりは、偶然の出会いだったのかもしれない。しかし、進路変更し、新たな分野に自ら飛び込んでいった、という点からは、何かを求める意思が働いていたことは事実であり、単なる偶然ではなかったようにも思われると飯島は述懐する。

若い人たちには、自分自身の力で判断して自分の道を見つけていくことを期待している。そのために、大人の責任として、子供が独りで生きていく術を身につけられるような場を用意してあげることが重要だという。自然にふれあい、自然の中で生き残れる力を身につけられるような機会が少なすぎると感じているという。最近の「理科離れ」についても、自然との触れ合いから習得する観察力、感性が欠如していることに起因するのではないかと飯島は考えている。興味をもたせるように育てることが本来の「教育」だと考えている。

そして、これから科学を志す若い人たちには、「人のやったことはやらない」ということを強調したいという。ただし、「人のやっていないことをやる」には、強いモチベーションが必要であり、広い視野で本物を見抜く訓練が必要である。この点を自分自身が強く自覚してほしいという。

収益を重視する企業では、基礎研究の継続は難しいかもしれない。しかし、重要なのは、その研究者やマネージャーに見識があるかであって、時には、ものにならないと思われる研究を中断する勇気も必要だ。

企業や大学等といった枠にこだわらず、日本そして世界に誇れる研究成果を生み出して欲しいと飯島はいう。日本の文化を創造する、というぐらいの自負が必要だし、そう思えるような地道な努力をしてほしいと飯島は願っている。

---

<sup>11</sup> <http://www.labs.nec.co.jp/innovative/E1/myself.html>