

合同セッション「カーボンナノチューブエレクトロニクス」

大阪大学 松本和彦

2008年9月2日に中部大学で開催された第69回応用物理学会学術講演会において、「カーボンナノチューブエレクトロニクス」シンポジウムを開催した。最初に名古屋大学の水谷からシンポジウムの趣旨とカーボンナノチューブの世界の最新動向、応用展開、期待と現実のギャップおよび今後の解決すべき課題について報告があった。シンポジウムは、成長、評価、デバイスのジャンルで構成され、以下この順で講演が行われた。

東京理科大の本間等はカーボンナノチューブの成長機構、成長方向の制御方法、触媒と直径の関係、長尺ナノチューブと触媒の関係、核形成の困難さ、高速成長の問題点について報告があった。TEM中で触媒からCNTが成長する様子を直接観察することに成功しており、今後のナノチューブの成長の指針を得るものである。またアルミナなどの固相触媒からもCNTが成長可能であり、従来のVLS成長以外の成長機構があることがわかった。

名古屋大学の篠原等はCNT中にフラレンなどを導入するピーポッドの作成方法、内包金属の種類の違い、TEM中での観察法、その電子状態について紹介があった。このピーポッドを加熱するとフラレンが分解し、内包金属が一次元のGd金属ナノワイヤをナノチューブ内部に形成することを初めて示した。これは驚くべき結果である。この金属チューブを作成するために重要なのは温度であり、1000は最低必要であることを示した。

九州大学の吾郷等はアルミナ基板の特殊な方向を用いることにより、その上に成長するCNTの方向をそろえられることを示した。これはアルミナ基板のアルミ原子の方向に沿って成長方向が揃うことが明らかになり、アルミとCNTとの相互作用によると考えられている。またアルミナ基板の原子層ステップが1段の場合は成長方向に影響を与えないが2段の場合はこのステップに沿って方向が揃うことが示された。

産総研の片浦等は、2種類の表面活性剤をCNTに混ぜて密度勾配超遠心分離法により金属と半導体を分離した。コール酸ナトリウム(SC)は半導体CNTに、ドデシル硫酸ナトリウム(SDS)は金属CNTに吸着しやすく、その重さの差により分離する。この手法では十分な分離が困難であり、DOC界面活性剤を用いると金属と半導体を完全に分離が可能になり、40mgのナノチューブまでスケールアップして分離できることを示した。ただこの手法では分離コストが500万円/1gと高く、かつ20時間以上の遠心分離の時間が必要であり実際的でない。この分離したCNTをFETに応用しそのON/OFF比を改善し3~4桁の値を得ている。さらに半導体/金属CNTの分離の改善法として、ゲル電気泳動法で分離する手法を提示した。この方法は安価でかつ30分という短時間で分離可能であることを実証し、さらに電界印加やゲルは最終的に必要ないことがわかってきた。

東工大の斉藤(晋)等は、カーボンナノチューブはフラレンに比較して構造定数の決定がまだ不十分であり、構造を予測しながら特性を定量的に予測していく必要があることを示した。ナノチューブは多体系で予測する必要があるため、密度汎関数法で計算する必要がある。この手法で(90)チューブの状態密度を計算すると伝導体と価電子帯でまったく状態密度が異なる非対称な形が計算され、これは従来の常識からはまったく驚くべき結果である。またポロンドープしたナノチューブでは超伝導になる可能性があるという興味深い計算結果と実験結果を示された。

名大の大野等はカーボンナノチューブトランジスタを制御するためには、仕事関数を利用してp型、n型を制御すること、閾値を制御すること、チャンネルのドーピングを制御す

ること、ヒステリシスを抑制することが必要であることを提案した。このため F₄TCNQ を n 型チャンネルにドーピングすると、チャンネル抵抗、コンタクト抵抗を下げることを示した。これは電極とナノチューブの界面でダイポールを形成するためであることを証明した。また HfO₂ を堆積することにより、p 型特性が n 型特性に変換した。これも HfO₂ 絶縁膜中に存在するイオンの影響であることが判明した。

阪大の前橋等は溶液中で p 型 n 型として動作する CNTFET の作成方法 構造を示した。また溶液中のデバイ長について述べ、この問題を解決するためのアプタマーを利用し、IgE を検出することに成功した。アプタマーは濃度の低いバイオ物質の検出に有効であることを乖離乗数を元に明らかにした。また交流測定の有効性について述べた。また電気化学反応を利用したバイオセンサーを開発し、6 つのマイクロポンプを組み込んだマイクロ流路システムを作成し自動的にバイオセンシングすることに成功した。

理研の石橋等はフェリチンを適度な濃度に分散して石英基板上に分散させ、メタンガスで CNT を成長すると、配向したナノチューブの成長が可能になることを示した。カルボキシル基(COOH)を CNT 末端に修飾し、エステル反応を利用してカルボキシル基同士を結合させ、CNT のリングを形成することを示した。この手法ではリングのサイズがさまざまであった。コラーゲンペプチドを CNT で挟み込んだ量子井戸構造を作成し、S T S で測定中である。

東北大の竹延等は CNT を用いたネットワーク型のフレキシブルエレクトロニクスについて講演した。インクジェットプリンタを用い、界面活性剤に分散した CNT をチャンネル間に形成することによりトランジスタを形成した。この場合、移動度 $\mu=10\text{cm}^2/\text{Vs}$, on/off 比 10^4 のものが得られたが、歩留まりの悪さやヒステリシスの問題があった。これは界面活性剤が原因であり、これを用いない手法を提案し、かつ CNT 濃度をショット数で制御することにより高性能のトランジスタを得ることに成功した。

名大の斉藤(弥)等は CNT のフィールドエミッション像(FEM 像)を詳細に検討した。CNT に吸着したメタン分子はある場合は高い活性化を示してナノチューブに化学的に吸着し、その構造を破壊するが、ある場合はメタン分子が CNT 上に構造を保ったまま物理吸着する。この場合にメタン分子の構造を FEM 像により観察することに成功した。さらに CNT にアルミ原子を蒸着するとゲッター効果によりエミッションの電流特性が極めて安定することが判明した。当然ながら金原子ではこのゲッター効果はえられなかった。また CNT 電子源の応用として、光電子管、平面ディスプレイ、X 線源、マイクロ波増幅器などの世界の状況について述べた。

以上のようにさまざまな CNT 研究について講演があり、一日中のシンポジウムであったにもかかわらず、最後まで活発な議論が行われ有意義なシンポジウムであった。