



Title	カーボンナノチューブデバイス研究の最近の展開
Author(s)	松本, 和彦
Citation	大阪大学低温センターだより. 2005, 129, p. 14-17
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/5903
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

カーボンナノチューブ デバイス研究の最近の展開

産業科学研究所 松 本 和 彦 (内線 8410)

E-mail: k-matsumoto@sanken.osaka-u.ac.jp

カーボンナノチューブは形状が微細であるという特長のみならず、一次元構造に基づいた特異な伝導特性を有しており、これらの特長を活かした様々なデバイスの研究が活発になっている。ここではカーボンナノチューブの特異な伝導の一つであるバリスティック伝導特性、単一電子トランジスタ特性、カーボンナノチューブ内のスピンのゼーマン分離、電界効果トランジスタ及びピーポッドFET等について述べる。

図1はカーボンナノチューブをチャンネルとした3端子素子を模式的に描いたものである。カーボンナノチューブの両端にソース・ドレインの金属電極が形成されている。またチャンネルのフェルミレベルを変調するためのサイドゲート、あるいはバックゲートが形成されている。この素子のドレイン電流のドレイン電圧及びゲート電圧依存性を

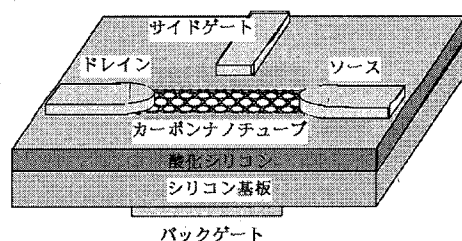


図1 カーボンナノチューブFETの模式

8.6Kで測定し2次元表示すると、図2(a)に示すような周期的な菱形の構造が現れる。これはクーロンダイヤモンドと称される構造で、カーボンナノチューブの内部の正孔の数が一個ずつ変化していく様子を示している。即ち、図2(b)に示すように、カーボンナノチューブ全体が一個の島領域として働き、この島領域に正孔がドレインから入る。ゲート電圧により島領域に入る事ができる正孔の数がきまり、ゲート電圧が大きくなるに従い隣のクーロンダイヤモンド構造を形成していく。従って図2(a)に示すようなダイヤモンド構造がいくつも周期的に並んだ構造が現れる。このクーロンダイヤモンド構造の外側（より大きなドレイン電圧領域）でのドレイン電流のドレイン電圧依存性を測定すると、図3(a)に示すように、電流が0.4mVという非常に小さな周期で負性抵抗のピークが

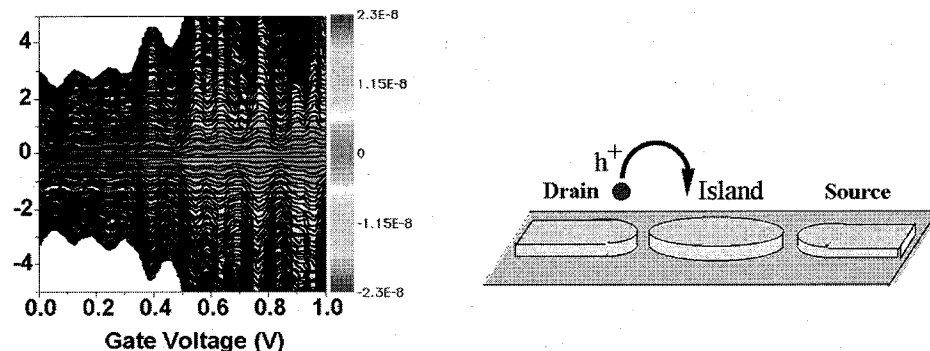


図2(a)(b) 単一正孔トランジスタのクーロンダイヤモンド特性と解釈図。

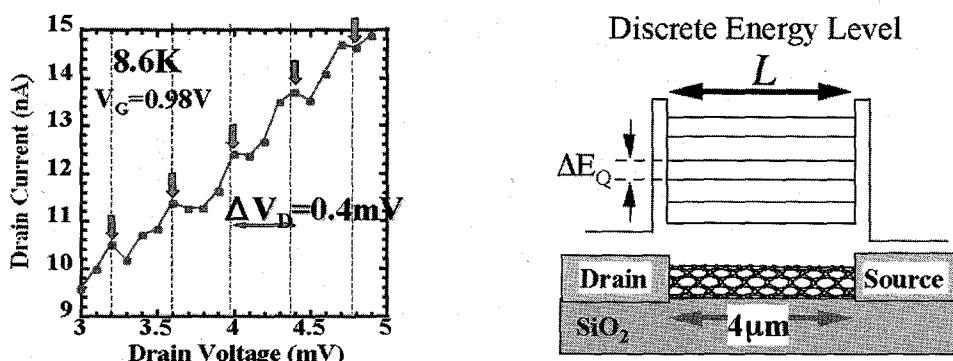


図3(a)(b) 正孔のバリスティック伝導による量子準位を介した負性抵抗と解釈図。

現れる。このピークはカーボンナノチューブ内部に量子井戸が形成され、その離散的な量子準位を介した正孔の共鳴トンネル電流によるものである。内部に正孔の定在波が存在するための周期境界条件から量子井戸の大きさを算出すると $4\ \mu\text{m}$ という巨大な値が得られる。チャネルとして用いているカーボンナノチューブの長さが $4\ \mu\text{m}$ であるから、カーボンナノチューブ全体が一つの量子井戸を形成していることが分かる。即ち $4\ \mu\text{m}$ のカーボンナノチューブ全体に渡って正孔が散乱を受けることなくバリスティックに伝導して定在波を形成し、量子準位を形成していることが分かった。これによりカーボンナノチューブ内部の正孔のコヒーレンス長は $4\ \mu\text{m}$ 以上であることが分かった。

更にカーボンナノチューブ単一電子素子を 30mK の極低温で測定すると電子の偶奇性やスピンの向きが分かるようになる。図4は理研の石橋等による結果である。 30mK におけるクーロンダイヤモンド特性を示しているが、クーロンダイヤモンド構造のサイズが大小交互に現れていることが分かる。単一電子素子の島領域（ここではカーボンナノチューブそのもの）内部の電子の数が奇数の場合、次に入る電子はスピンの向きを変えて同じ準位に入ることができるため、電子が新たに島領域に入るために必要なエネルギーはチャージングエネルギー ($e^2/2C$) のみで良い。ところが島領域内部の電子数が偶数の場合、新たに入る電子は、準位が既に2つの電子で埋まっているために、一つ上の準位に入る必要がある。従ってこの場合、電子が新たに島領域に入るために必要なエネルギーはチャージングエネルギー ($e^2/2C$) と準位間エネルギー ΔE を足したものになる。このように島領域内部の電子の数が偶数と奇数の違いにより、新たに電子を追加するために必要なエネルギーが異なるために、クーロンダイヤモンド構造のサイズが大小交互に変わるのである。更に磁場を印加すると、電子数が偶数から奇数に変わる境界でのクーロン振動ピークは、図5(a)に示すように磁場の増加とともにより低いゲート電圧の位置にシフトする。逆に電子数が奇数から偶数に変わ

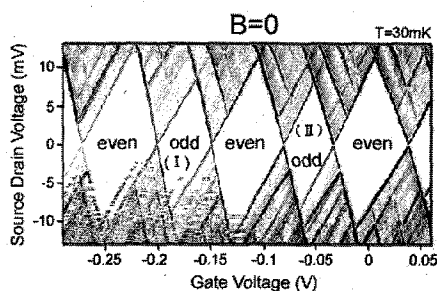


図4 電子数の偶奇性を示すクーロンダイヤモンド特性。

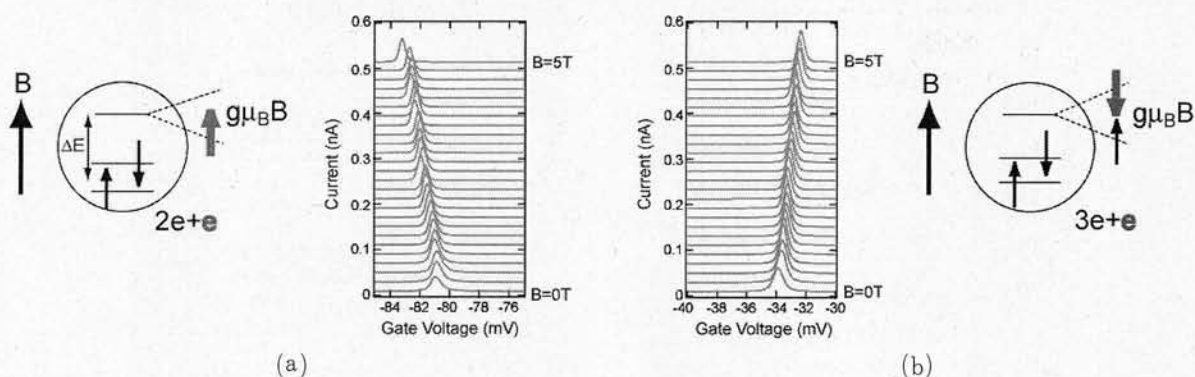


図 5 (a)(b) ゼーマン分裂を示すクーロン振動ピーク。

る境界でのクーロン振動ピークは、図 5 (b) に示すように磁場の増加とともにより高いゲート電圧の位置にシフトする。電子数が偶数から奇数に変わる境界では、新たに加わる電子はゼーマン分離した一つ上の準位の下側の準位に入る。磁場の増加に従いゼーマン分離が大きくなり、クーロン振動はより低いゲート電圧の位置に移動する。電子数が奇数から偶数に変わる境界ではゼーマン分離した下側の準位は既に電子で埋まっているために、新たに入る電子はゼーマン分離した上側の準位に入る。従って磁場の増加に従いゼーマン分離が大きくなり、クーロン振動はより高いゲート電圧の位置に移動する。このような測定手法を用いると電子の偶数、奇数の違い、スピンの向きまで確定できる。

図 1 に示すカーボンナノチューブ素子の一般的な応用は電界効果トランジスタ (FET) である。ソース・ドレイン間に流れる電流をゲート電圧により制御するものである。カーボンナノチューブは大気中の酸素に触れることにより p 型半導体特性を示す。カーボンナノチューブ内部に、金属を内包したフラーレンを内包することができる。この構造をピーポッド (さやえんどう) とよぶ。図 6 は名古屋大学の篠原等により合成された C_{82} フラーレンにガドリニウム原子 Gd を一個内包した金属内包フラーレンを、更に単層カーボンナノチューブに内包したピーポッドの透過電子顕微鏡写真とその模式図である。ピーポッドでは内包金属から電子がフラーレンに移動し、更にその電子

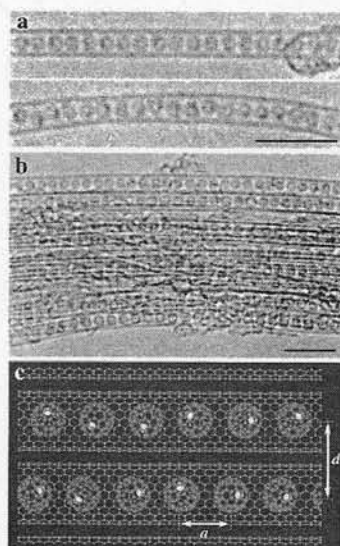


図 6 ピーポッドの TEM 像。

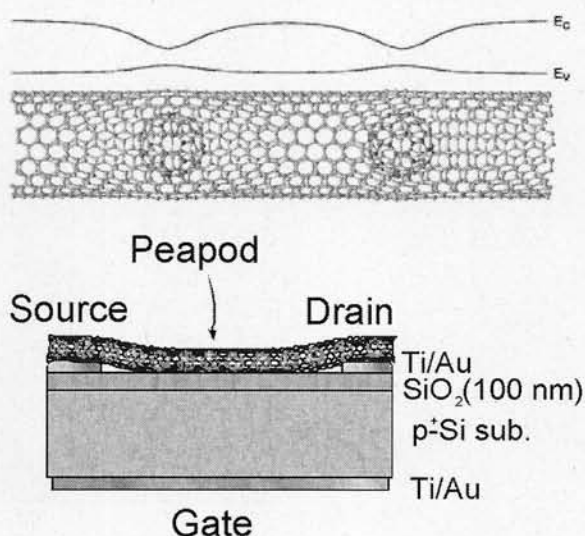


図 7 ピーポッド FET の構造図

がカーボンナノチューブに移動すると言われている。そのためこのピーポッドを走査トンネル顕微鏡を用いて STS 測定すると、図 7 の上に示すように内包フラーレンの存在する位置でのカーボンナノチューブの伝導帯が大きく変調されることがソール大学のクック等により報告されている。名古屋大学の水谷等は、このピーポッドをチャンネルにした図 7 の下に示すピーポッド FET を作成した。すると通常 p 型を示すカーボンナノチューブが、図 8 に示すように p 型と n 型の両方の特性を示すアンビポーラ特性を示した。しかも内包金属からフラーレンへ移動する電子数が多いほど、p 型と n 型の間のギャップが小さい特性を示した。これはピーポッドのバンドギャップが内包金属により小さくなっていると予測される。このように内包する金属内包フラーレンにより、カーボンナノチューブの伝導特性が変調できることが分かった。この手法はカーボンナノチューブを将来電子デバイスとして用いる場合の有効な手段になると考えられる。

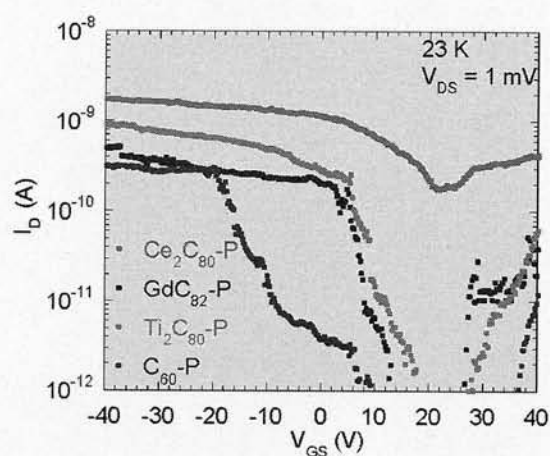


図 8 様々な内包金属フラーレンを内包するピーポッド FET のアンビポーラ特性。内包金属からフラーレンへ移動する電荷数が多いピーポッドほどバンドギャップが小さくなる。

以上、カーボンナノチューブの特殊な伝導特性を利用した最近のナノデバイスについて紹介した。ここで紹介した研究以外にも、カーボンナノチューブを用いた pn 接合、相補型トランジスタロジック、単一電子インバータ、発光ダイオード、超高感度バイオセンサー、朝永—ラッティンジャー液体など、様々な分野で非常に幅広い研究展開がはかられており、今後の発展が楽しみな分野である。