

カーボンナノチューブの非接触磁気抵抗 Magnetotransport properties of carbon nanotubes by contactless method

東北大・金研 大島 勇吾, 鈴木 宏貴, 岩佐 義宏, 野尻 浩之

Y. Oshima, H. Suzuki, Y. Iwasa, H. Nojiri
Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

単層カーボンナノチューブ(SWNT)は、グラフェンのシートを筒状に丸めた構造を持つ物質であり、シートの巻き方に応じて様々な直径・螺旋構造を持つ事ができる。その上、チューブの円周方向の波動関数が量子化されるために、SWNTの電子状態は螺旋構造に依存して金属にも半導体にもなりうる特徴を持つ[1]。一般的にSWNTの螺旋構造はカイラルベクトル (n,m) で表されるが、 $n-m$ が3の倍数であるときバンドギャップのない金属SWNT、3の倍数でない場合はバンドギャップが存在する半導体SWNTとなる。半導体SWNTは、電界効果トランジスタ構造において、従来のシリコンをはるかに凌駕する性能を示す事が報告されており、一方、金属SWNTは後方散乱が存在せずバリスティック伝導が実現されていると理論的に予想されている[2]。

また、チューブ方向に磁場を加えた場合、ベクトルポテンシャルの影響を受けて波動関数の位相に磁場の効果が加わり、結果としてエネルギーギャップが磁場で変化すると理論より示唆されている。この効果はSWNTにおけるアハロノフ・ボーム(AB)効果として知られており、この時、金属的なチューブはギャップが開いて半導体的になり、その逆の効果が半導体SWNTに期待されている[1]。

このようなSWNT特有の磁気伝導特性を実証するために、国内外で数多くの電気伝導実験が行われているが、電極またはチューブ間の巨大な接触抵抗の問題や微小な静電気によってチューブが破壊する事から、1本のSWNTの磁気抵抗を評価するには多くの困難が伴う。

そこで我々は、SWNTの研究で従来からネックになっている接触抵抗の問題を解決するために、電極を付けずに非接触で試料の伝導特性を評価する非接触法(空洞共振器摂動法)に着目した。空洞共振器摂動法は、試料を共振器内に置いたときの Q 値と共振周波数 f の変化から試料の高周波伝導度の実部及び虚部の情報が得られるものである[3]。

また、我々は測定するSWNT試料にも着目した。これまで1本のSWNTを計測する事に多くの困難が伴う事から、SWNT薄膜を用いて磁気抵抗測定がいくつか行われている[4-6]。しかしながら、これら

の薄膜では、低磁場側で弱局在効果による負の磁気抵抗、高磁場側でスピン依存型のVariable Range Hopping(VRH)伝導が起因の正の磁気抵抗/飽和しか観測されていない。これらはスパゲッティ状に絡み合ったSWNTを薄膜にした事による効果で、AB効果のような本来のSWNT特有の磁気伝導特性ではない。そこで今回、本質的なSWNTの磁場効果を観測するためにSWNTの含有率が低い0.5wt%の高配向SWNT薄膜を用いる。これによりSWNT同士の接触は殆どなく、本質的でない磁場効果が最小限に抑えられると考えられる。

今回我々は、上述の高配向SWNT薄膜を空洞共振器摂動法で測定することによって、AB効果による磁気伝導特性を観測したのでこれを報告する。

2. 実験方法

図1に空洞共振器摂動法の概略図を示す。高周波伝導度を導出するために必要なパラメーター、共振スペクトルの Q 値と共振周波数 f は、Agilent社製のベクトルネットワークアナライザE8363Bでモニターした。周波数は6.4GHz近傍測定している。まず試料を入れない空の状態での磁場挿入しながら測定

●Cavity Perturbation Technique

Light source & Detector:
Millimeter Vector Network
Analyzer (MVNA)

TE₀₁₁ mode

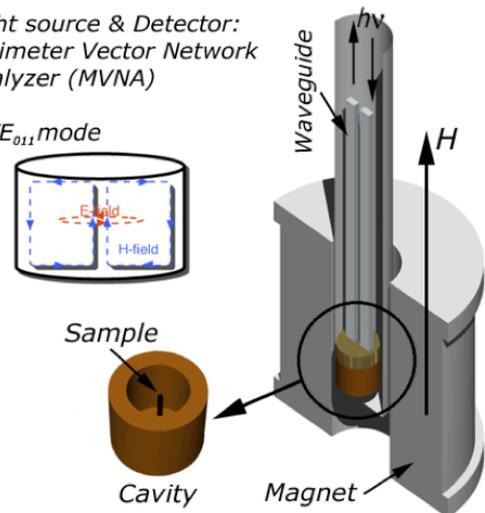


Fig. 1 Schematic diagram of the cavity perturbation technique. Semirigid coax cable was used instead of waveguides.

した後に、試料を投入し同じ測定を行う。その変化から高周波伝導度を導出し、その磁場依存性を評価する。

試料は東北大金研の岩佐グループで作成した高配向 SWNT 薄膜を用いた[7]。SWNT は HiPco 法で作成したもので、チューブの直径は約 1nm である。溶媒で SWNT を分散させた後に、あらかじめ熱で溶かしてあるポリエチレンと混合させたものを、機械的に引っ張ることによって配向薄膜を作成した（延伸法）。SWNT の含有率はポリエチレンに対して 0.5wt% である。作成した薄膜を適切な大きさに切り取り、空洞共振器の振動電場が最大のところに試料を配置する。

HiPco 法で作成したナノチューブには金属 SWNT と半導体 SWNT が混在している。そこで、測定温度を半導体チューブのバンドギャップより十分低い温度で行う。これにより磁気抵抗の振る舞いは殆ど金属ナノチューブによるものであると考える。

3. 結果

図 2 は作成した高配向 SWNT 薄膜の 4.2 K における $\Delta f (=f_s - f_0)$ と $1/2 \Delta Q (=1/2Q_s - 1/2Q_0)$ の磁場依存性である。下付きの S,0 は各々試料入りと空の時のパラメータである。図で明らかなように、磁場に対して Δf と $1/2 \Delta Q$ は伴にリニアに増加している。両方のパラメータが伴に増加している事から、試料は反分極極限の metallic side にある事を示しており[3]、この時 $1/2 \Delta Q$ は試料の抵抗に比例する。

配向方向に垂直に磁場をかけた場合（×印・ $B \perp$ tube）、磁気抵抗 ($1/2 \Delta Q$) の変化は殆どないが、配向方向に磁場をかけた場合（○印・ $B //$ tube）、磁気抵抗が大きく増加していく様が観測された。これは、これまで無配向 SWNT 薄膜で見られた負の磁気抵抗や高磁場領域で磁気抵抗が飽和する報告と異なる[5-7]。

正の磁気抵抗の原因としては、スピン依存型の VRH 伝導、金属ナノチューブの AB 効果が考えられる。今回得られた結果は正の磁気抵抗が 14 T まで飽和しない事から、これまで無配向薄膜で見られたような約 5T で磁気抵抗が飽和する、スピン依存型の VRH 伝導によるものと明らかに異なる。また $B //$ 配向の時に顕著な磁気抵抗を示す事から、今回観測された磁気抵抗は金属ナノチューブの AB 効果によるものだと考えられる。 $B \perp$ tube のわずかな磁気抵抗は配向しきれてない SWNT による寄与だと思われる。

4. まとめ・今後の課題

今回、我々は空洞共振器（非接触法）を用いて高

配向の SWNT 薄膜を 4.2K で測定し、リニアな正の磁気抵抗を観測した。磁気抵抗が 14 T まで飽和しない事と、 $B //$ tube 時に顕著な磁気抵抗が現れる事から、我々は SWNT の本質的な磁気伝導特性、つまり金属 SWNT による AB 効果をもっているものと考えている。しかしながら、現在 4.2 K でのみしか測定が行われていないために、温度依存性が速急に望まれる。これは今後の課題である。またこの磁気抵抗が AB 効果によるものだと確証を得るために、直径の違う SWNT での測定を予定している。

参考文献

- [1] T. Ando, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 777.
- [2] T. Ando and T. Nakanishi, J. Phys. Soc. Jpn. **67** (1998) 1704.
- [3] O. Klein *et al.*, Int. J. Infrared and Millimeter Waves **14** (1993) 2423.
- [4] G. T. Kim *et al.*, Synth. Met. 103 (1999) 2551.
- [5] G. T. Kim *et al.*, Phys. Rev. B 58 (1998) 16064.
- [6] T. Takano and Y. Iwasa, *to be published*.
- [7] A. Akima *et al.*, Adv. Mat. 18 (2006) 1166.

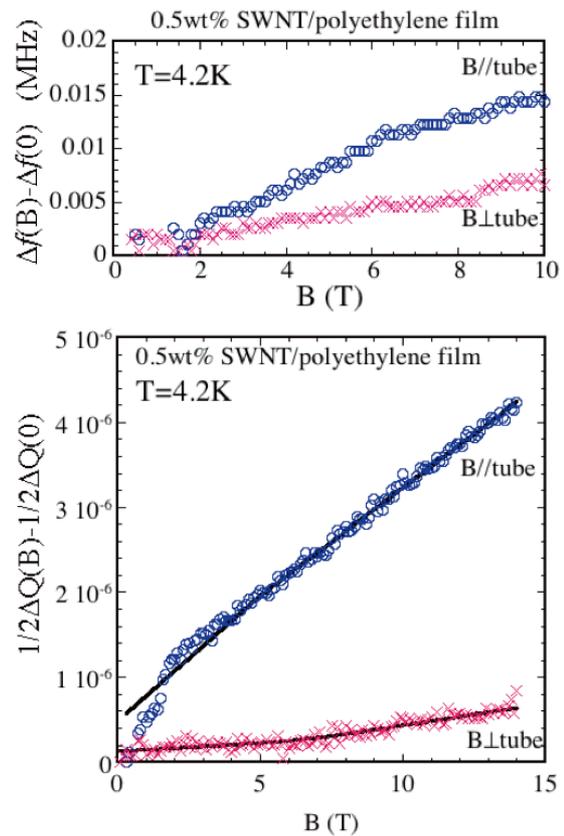


Fig. 2 Field dependence of Δf and $1/2\Delta Q$ of the highly-aligned SWNT thin film at 4.2 K. The circle and cross symbols are for field parallel and perpendicular to the stretched direction.