

【助成 39-36】

カイラリティーを特定した 2 つの単層カーボンナノチューブ間の熱伝導の解明

代表研究者 東京理科大学 理学部 ポストドクトラル研究員 入田 賢

〔研究の概要〕

単層カーボンナノチューブ(SWCNT)材料による熱伝導は SWCNT 自体の熱伝導だけでなくその接点の熱伝導特性に影響され、理想的な値には程遠いのが現状である。ナノスケールでの熱制御を行うためには、まず、構造が明らかな SWCNT 間の熱伝導特性を精確に理解することが不可欠である。本研究では、光学イメージング法を駆使した温度分布測定法を改善・高精度化し、精確な熱伝導率計測を可能にした。カイラリティーの異なる(9,8)と(12,4) SWCNT の熱伝導率を計測した。本研究成果は、ナノスケールでの熱伝導制御の基盤となる基礎データを示し、今後、ナノスケールでの熱制御技術の発展に貢献することが期待される。

〔研究経過および成果〕

SWCNT 薄膜の熱電変換効率の制御に不可欠な SWCNT 間におけるナノスケール熱伝導機構の解明を目指し、カイラリティーを特定した 2 つの SWCNT 間における熱伝導特性を光学イメージング法を駆使した温度分布測定により非接触計測する技術を研究開発してきた。

本手法は、SWCNT からの Photoluminescence (PL) が SWCNT の温度に依存していること(Lefebvre et al. PRB 2004)を利用し、図 1 (a)の様にピラーに架橋した SWCNT 全体にレーザーを照射加熱することで、2 次元 PL 検出器で測定した PL イメージング像(b)より SWCNT の温度分布(c)を計測した。計測した温度分布を元に 1 次元-定常-熱伝導方程式

$$\lambda(T) \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{\alpha \cdot \text{Laser}(x)}{A} = 0$$

を解くことで、SWCNT の熱伝導率の温度変化を求めることが可能である。ここで、熱伝導率 $\lambda(T)$ [W/m·K]、温度分布 $T(x)$ [K]、位置 x [m]、レーザー光の吸収率 α [-]、レーザーパワー分布 $\text{Laser}(x)$ [W/m]、SWCNT の断面積 A [m²]として用いた。先行研究で

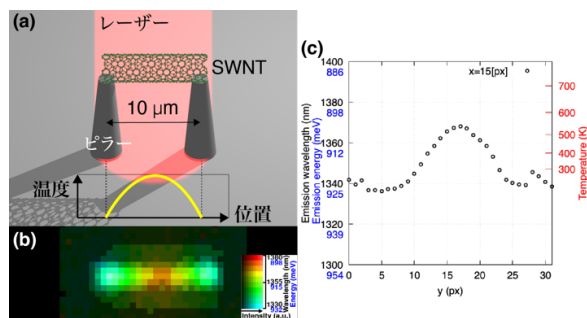


図 1 (a) 実験システム概略図. (b) (9,8) SWCNT の PL イメージング像. (c) SWCNT 軸方向クロスプロファイル. 0.6 [μm/px]として示す。

は、(9,8) SWCNT の熱伝導率が室温で 1600 W/m·K であることが示されている(Yoshino et al. ACS Omega 2018)。

先行研究で用いられていた Savitzky-Golay 法を用い解析した結果を図 2 (a,b)に示す。Savitzky-Golay 法とは、隣接する $2n+1$ 点のデータに対して、 m 次多項式による近似を行い、 $2n+1$ 点の中央値を近似した多項式の値に置き換えていくことで、ノイズを低減させる手法である。図 2 (a)に示す温度分布の最大値近傍の値のみしか熱伝導率を求める際に使用されてい

ない。図 2 (b)に示した熱伝導率を見ると不連続なプロットであり, 特に室温近傍で熱伝導率がどの様な値になるかは予測が難しい。一方, 本研究では, 図 2 (c)に示す様に計測した温度分布に対し $T(x)$ 関数をフィティングし求める事で, その二回微分より詳細な熱伝導率の温度変化(d)を明らかにした。

本研究で製作した試料チャンバーを図 3 に示す。この試料チャンバーを用い SWCNT の温度分布を計測, データ収集を行なっている。図 4 に 2 種類のカイラリティーの SWCNT の熱伝導率を示す。(9,8) と (12,4) SWCNT を比較すると, ニアアームチューブ-SWCNT の方が, 熱伝導率が高いという結果が得られた。本研究成果は, 現在, 論文投稿に向けてまとめている。

2 つの SWCNT 間の熱伝導計測については, 計測および解析を進めている。上記の研究成果により, こちらの研究についても理解が深まり研究が飛躍的に推進することが期待される。

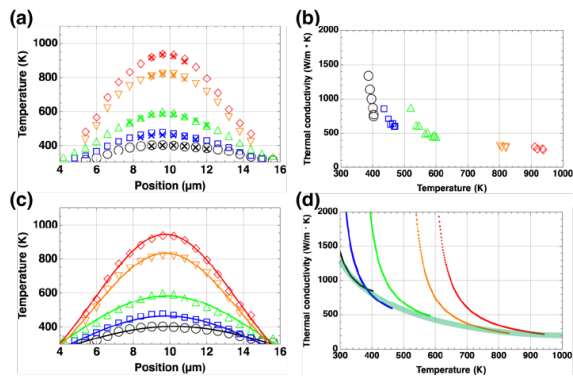


図 2 (a,b) Savitzky-Golay 法と(c,d) 本研究で計測した(9,8) SWCNT の熱伝導率。SWCNT の(a,c) 温度分布と(b,d) 熱伝導率。プロット形状は, 各レーザーパワーに対応する温度分布を示す。n = 6 で(a)に示した × マークの点で二回微分の計算を行った。(c)に示したラインは, 各温度分布に対するフィティングラインである。

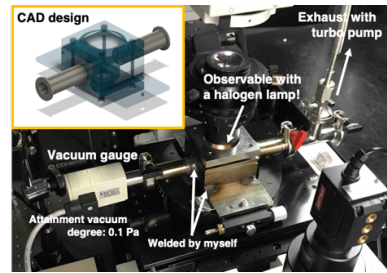


図 3 製作した試料チャンバー。

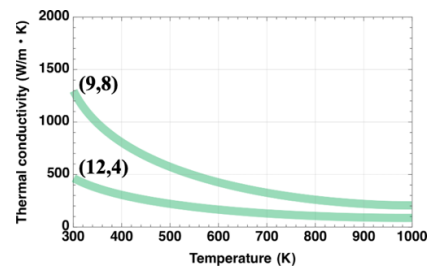


図 4 (9,8) と (12,4) SWCNT の熱伝導率。

[発表論文]

1. M. Irita, U. Taro, T. Yamamoto, Y. Homma, M. Sadgrove, Interaction between Phonons in a Single-Walled Carbon Nanotube and Near-field light of an Optical Nanofiber, 第 69 回 応用物理学学会 春季学術講演会, 口頭発表, (2022/03/24).
2. M. Irita, T. Uchikawa, T. Yamamoto, Y. Homma, M. Sadgrove, Control of Thermal Excitation in Single-Walled Carbon Nanotubes by Polarized Light, THE 22ND INTERNATIONAL VACUUM CONGRESS, 口頭発表, (2022/09/12).
3. M. Irita, T. Yamamoto, Y. Homma, 顕微蛍光分光法による半導体単層カーボンナノチューブのカイラリティー分布, 第 5 回日本表面真空学会若手部会研究会, ポスター発表, (2022/11/10).
4. M. Irita, K. Yoshino, K. Nagano, K. Sasaoka, T. Yamamoto, Y. Homma, 単層カーボンナノチューブのカイラリティーによる熱伝導率の違い, (論文投稿準備中).