

「プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製」  
平成 20 年度採択研究代表者

嶋 賢治

(独) 産業技術総合研究所 ナノチューブ応用研究センター 研究チーム長

自己組織プロセスにより創製された機能性・複合 CNT 素子による  
柔らかいナノ MEMS デバイス

## 1. 研究実施の概要

カーボンナノチューブ (CNT) はその優れた物理・化学的特性のため、次世代デバイスのコア素材として期待されている。しかしながら、CNT デバイスを実用化するためには、所定の位置に、所望の量の CNT を敷設し、かつ配向方向・形状を任意に制御して、多様かつ設計された機能を有する CNT デバイスを、安定に再現性良く製造する技術が必須である。このような高度な構造制御が必要なため、CNT デバイスは、CNT を大量にバルク材料として使用する用途より、実用化がはるかに困難となっている。

本研究テーマでは、かかる課題を解決するために、本研究チームが世界をリードする、超高効率 CNT 成長技術 (スーパージグロース法)、CNT 構造制御技術、CNT 高密度化技術 (“CNT-Solid”)、CNT 自己組織化技術 (“CNT-Wafer”) といった革新的な CNT の合成・プロセスのコア技術を結集し、さらに一步踏み込んで、未来の CNT ナノデバイス産業の礎を築く、基盤製造技術を開発し、10 年後に CNT-MEMS ナノデバイス産業を日本から実現する事を目的としている。

上記目的達成のため、本年度は、CNT シートを基板に貼って作るデバイスの製造技術開発を行い、基板上に貼った CNT シートから、CNT カンチレバーを作製し、その振動特性の評価を行った。また、デバイス応用のため、我々が作製する CNT 自体の特性評価も平行して行った。

今後は、貼って作るデバイスの製造技術開発を行いつつ、異材料とのインテグレーション技術開発及び柔らかいナノデバイスシステムの開発を行っていく予定である。

## 2. 研究実施内容 (文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

### 2. 1. CNT シートを基板に貼って作るデバイスの製造技術開発

これまで我々のグループでは、CNT の超高効率成長法である、スーパージグロース法を開発し、高純度、超長尺の垂直配向 CNT を合成可能とした。このスーパージグロース法を用い、基板からシート状に垂直配向した、CNT のマクロ構造体「CNT シート」を作製し、それに特殊な処理 (CNT 高

密度化技術)及び倒伏処理を施して、CNT を成長した基板に、CNT が平面的一方向に配向し、高密度に集合し板状になった「CNT-Wafer」を開発した。しかしながら、従来までのCNT-Wafer 作製法では、CNTを合成したシリコン基板上にしか、CNT-Waferを作製することが出来なかった。そのため、CNT-Wafer を用いた CNT デバイスの製造温度が、CNT の成長温度の 800 度となり、結果として、CMOSが積載されたシリコン基板上、プラスチック等のフレキシブル基板上、ゴム等のストレッチャブル基板上にナノデバイスを製造することが不可能であった。本研究では、CNT-Wafer を用いた CNT デバイスの製造のプロセス温度を、従来の 800 度から室温にして、従来のCNT-Wafer 作製法ではCNT デバイスの構築が不可能であった上記基板等に対し、CNT デバイス構築を可能とするため、CNT シートを成長基板から剥がして、デバイスを製造する基板上で高密度化して貼り付ける技術(図1)と、それらを元にしたデバイス製造技術の開発を行う。

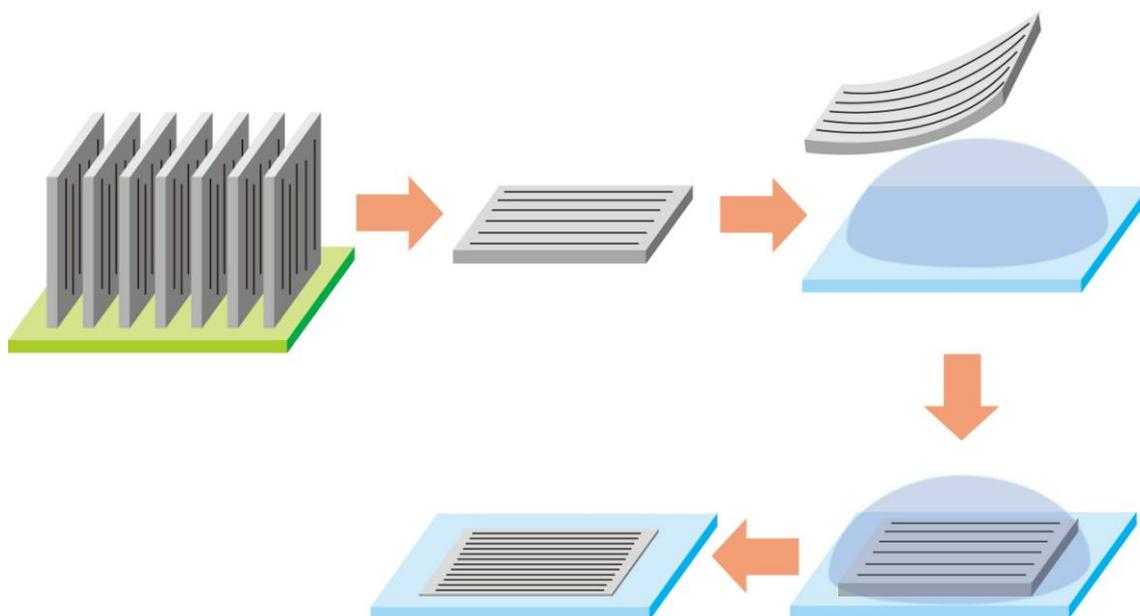


図1: CNT シートを合成基板から剥がし高密度化して貼り付ける技術のイメージ

本年度は、基板上に密に成長させた CNT シート群から、CNT を1枚基板上に高密度化処理して貼り付ける技術の開発を行った。さらに、従来まで培ってきた、リソグラフィー技術を貼り付けた CNT シートに施し、CNT カンチレバーの作製及び作製したカンチレバーの振動特性評価を行った。その結果、CNT カンチレバーが弾性体として振る舞うことがわかり、共振周波数を決める物質の音速が CNT カンチレバーにおいて 10100m/s となり、Si ウェハの音速(9000m/s)より高い事がわかった。これによりCNTカンチレバーはSiカンチレバーに比して、より高い共振周波数を持ち得ることがわかった。[1]

## 2. 2. スーパーグロース CNT の特性評価

我々は、単層 CNT の超高効率成長法であるスーパーグロース法を用いて、シリコン基板上に単層 CNT 垂直配向構造体(通称フォレスト)を合成した。フォレストの厚みを 10 mm 以上、密度を

0.002 g/cm<sup>3</sup>–0.2 g/cm<sup>3</sup>に調整することにより、高い光吸収率をもつ材料を作製することができた。

光吸収体は、カメラや精密光学機器の遮光、通信機器の電磁波・ノイズ防止、また吸熱性を利用して熱線吸収材や熱型赤外センサーのコーティング、放熱性を利用して電子機器の冷却などに利用されている。このように先進技術における光や熱のエンジニアリングに欠かせない材料であるが、これまで広い波長範囲で一定した高い吸収率を得ることは難しかった。例えば赤外領域の光吸収特性を放射率(吸収率と等価)によって評価すると(図2)、従来の光吸収材料の上限は 0.96 程度であり、また波長によって吸収率が変化するスペクトル構造をもちやすい。放射率(吸収率)を向上させ、吸収率の変動を抑えて一様とすることで、光吸収体を利用した機器類の一層の高機能化、高効率化が期待される。

CNT 垂直配向構造体(フォレスト)の光吸収性を評価するため、赤外分光装置(FT-IR)を用いて赤外領域(波長 5 μm – 12 μm)の垂直分光放射率を測定した(図2)。CNT 構造体は従来の光吸収材料に比べて高い放射率(平均 0.987)を示し、しかも波長による変動もほとんど見られなかった。測定結果より計算される半球反射率は 0.013 である。

次に紫外領域から遠赤外領域までを3つの測定域A(波長 0.2 μm–2 μm(紫外光~近赤外光))、B(波長 2 μm–20 μm(近赤外光~遠赤外光))、C(波長 25 μm–200 μm(遠赤外光))に分けて分光反射率(図3)を測定した。

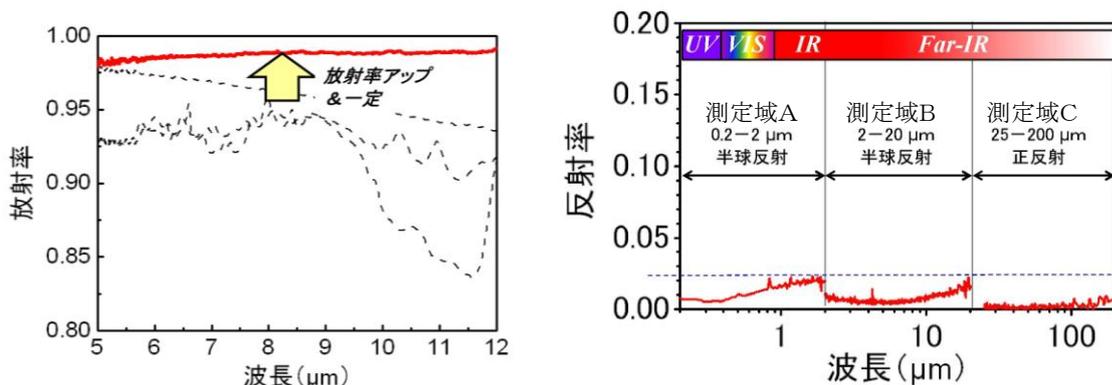


図3: CNT フォレストの分光反射率

図2: 垂直分光放射率の測定結果

本開発品(赤線)と従来品(破線)

その結果、測定域AとBで測定した半球反射率は、0.01~0.02 で、スペクトルは平坦であり、図2で示した垂直分光放射率の測定結果とよく一致した。また測定域Cにおいては正反射率を測定したところ、測定域A、Bと整合する低反射特性が明らかとなった(図3)。<sup>[2]</sup>

以上の測定結果から、CNT フォレストは紫外光から遠赤外光までの非常に広い波長範囲(波長 0.2 μm–200 μm)にわたって、一様な反射特性を示し、しかもその反射率は 0.01–0.02(吸収率に換算すると 0.98–0.99)と低いことが強く推察される。今回開発した CNT 光吸収体の「黒さ」は目で見える光だけではなく、紫外光から遠赤外光までの広い領域で「黒い」といえる。このように紫外光から遠赤外光まで、ほとんどすべての光に対して高い吸収率を示す材料はかつてなく、現在、世界で最も黒体に近い材料であるといえる。特に赤外領域での反射特性を明らかにしたことで、温

度計測やサーモグラフィ、赤外センサー、建築物や電子機器の熱管理など、赤外光技術分野への応用の道を拓(ひら)いた。

### 3. 研究実施体制

#### (1)「畠」グループ

##### ①研究分担グループ長:

畠 賢治 ((独) 産業技術総合研究所、研究チーム長)

##### ②研究項目

1. シート合成技術開発
2. CNT シートを基板に貼って作るデバイスの製造技術開発
3. 異材料とのインテグレーション技術開発
4. 柔らかいデバイス開発

### 4. 研究成果の発表等

#### (1) 論文発表 (原著論文)

1. "Mechanical Properties of Beams from Self-Assembled Closely Packed and Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes" Y. Hayamizu, R. C. Davis, T. Yamada, D. N. Futaba, S. Yasuda, M. Yumura, and K. Hata, Phys. Rev. Lett. (accepted)
2. "A black body absorber from vertically aligned single-walled carbon nanotubes" K. Mizuno, J. Ishii, H. Kishida, Y. Hayamizu, S. Yasuda, D. N. Futaba, M. Yumura, and K. Hata, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. (in press)

#### (2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 1 件)