

インテグレート・カーボンナノチューブによる 機能性部材とそれを組み込んだ 柔らかい MEMS デバイスの創製

研究代表者

畠 賢治

Kenji Hata

(独)産業技術総合研究所ナノチューブ応用研究センター 上席研究員



はじめに

カーボンナノチューブ (CNT) は、六角形に配置された炭素原子が、平面に亀の甲状に並んだ層 (グラフェン) を、一から複数層、ナノメートルサイズの円筒にした物質であります。このCNTはその構造から、優れた機械的、電気的、化学的特性を有している材料であり、次世代デバイスのコア材料として期待されております。しかしながら、CNTを用いたデバイスを実用化するためには、CNTをデバイス中の所定の位置に、所望の量及び並び方向 (配向方向) を制御して敷設し、かつその形状を任意に加工し、多様かつ設計された機能を付与して、安定に再現性良く製造する技術が必要であります。そのため、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なものとなっております。

我々の研究チームでは、CNTデバイスの製造する上で上記課題を解決し、シリコンテクノロジーでは実現できない革新的なナノデバイスを創出するため、「CNTシート合成技術の開発」、「CNTシートを貼って作るデバイス製造技術の開発」、「CNTと異材料とのインテグレーション技術の開発」、「柔らかいナノデバイスシステムの開発」に取り組んでおります。

CNT シート合成技術の開発

我々のグループでは、CNTの超高効率成長法である、水添加気相成長法 (スーパーグロース法) を用い、基板から、垂直に配向したCNTのマクロ構造体 (フォレスト) の作製に成功しました¹。この方法に加え、微細加工技術により触媒を直線状に加工することで、基板から数百μm以上垂直に配向した、膜状の「CNTシート」の成長に成功しました。このCNTシートのCNTの体積占有率は僅か数%ですが、CNTシートを貼って作る技術により、基板上で高密度化し、所望の量のCNTをその位置及び並び方向を制御して敷設することが可能となりました。

さらに我々は、CNTの構造体としての性質を明らかにするため、フォレストの光学的性質や、キャパシター電極としての性質を調査しました。光学的性質では、紫外光から遠赤外光 (波長0.2-200 μm) にわたって、反射率が低く一様な反射特性を示し、「黒い」材料である事がわかりました。このような範囲の光で「黒い」材料はかつてなく、世界で最も黒体に近い材料である事もわかりました。この結果から、我々のCNTは、赤外センサーなど、赤外光技術分野への応用を示唆することが出来ました²。

さらに、CNTをキャパシター電極として利用した場合、CNTの電気化学的安定性から、4Vまでの動作電圧に耐えるキャパシターを作製することが出来ました。また、このキャパシターは、CNTの配向性及び、直線性から、良好なイオン拡散性も得られ、高パワー密度で高エネルギー密度を達成することもわかりました³。

CNT シートを貼って作るデバイス製造技術の開発

CNTシートを成長基板から剥離し、デバイス製造基板に貼り付ける技術「貼り付け法」を開発しました。貼り付け法では、剥離したCNTシートを、デバイス製造基板の所定の位置に配向方向を制御して置き、そこに液滴を滴下し、CNTシート内の液体が乾燥する際の毛管作用によりCNT同士を凝集・高密度化し、同様に基板とCNTも密着させて貼り付ける技術です。この技術により、CNTが平面的一方向に配向し、高密度に集合した「CNT-wafer」を、任意の基板の任意の位置に、任意の配向方向をもって形成することが可能となりました。(図1) さらに、CNTを用いたデバイス製造プロセスから、高温のCNT成長プロセスを切り放

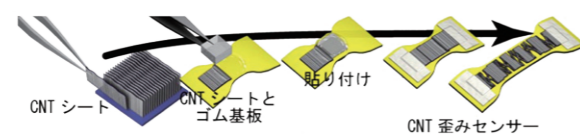


図1 貼り付け法イメージ図

す事を可能とし、柔らかいプラスチック基板や伸縮性のゴム基板の上で、CNTを用いたデバイス構築を可能としました。

この様にして作製した「CNT-wafer」に、従来開発した、リソグラフィ技術を適用し、CNTカンチレバーの作製を行い、その振動特性を評価した結果、CNTカンチレバーが弾性体として振る舞い、共振周波数を定める物質の音速がSiよりCNTの方が高いことがわかり、CNTはSiより高い共振周波数をもち得ることがわかりました⁴。

CNT と異材料とのインテグレーション技術の開発

前述のような、CNTの製造技術に加え、CNTに多様かつ設計された機能を付与するためには、CNTに異材料を導入するインテグレーション技術が重要であります。このインテグレーション技術のためには、CNTの密度及び形態制御技術が必要であり、その技術開発を行いました。

CNTシートのCNTの体積占有率は低いため、一つの構造体中で体積占有率 (本数密度) を制御できる技術開発を行い、異材料とのインテグレーションや、種々の用途に適用可能な、CNT構造体中のCNT本数密度を変化させる形状制御技術を開発しました⁵。この結果から、CNTシートからインテグレーションに最適な構造を有するCNT-waferを作製するのに、液滴ばかりでなく、泡や蒸気、スーパーインクジェット技術等も有効であることがわかりました。

また、領域内の「西澤チーム」と共同研究を行い、CNTシートを高密度化する溶液の中に酵素を導入し、CNT-wafer内に酵素を固定化することに成功し、CNTをバイオ燃料電池の電極に用いる事に成功しました⁶。

柔らかいナノデバイスシステムの開発

CNTシートの貼り付け法を用いて、伸縮性のゴム基板の上に、その伸縮させる方向と直交するように、CNTシートの配向方向を制御してCNT waferを敷設し、CNT歪みセンサーを作製しました⁷。(図1)

この様にして作製したCNT歪みセンサーは、最大で280%までの歪み測定を可能としました (既存の歪みゲージは5%程度の歪み測定)。このCNT歪みセンサーは、CNTの導電性と柔軟性を利用し、基板の歪みに対して、配向したCNT-waferが部分的に割れ、そこを柔軟なCNTが架橋することで、CNT-waferは大きな歪みでも破壊されることなく追

随し、導電性を有しています。この基板の伸縮によるCNT-waferの変形から、抵抗値が変異し、伸縮基板上に配向方向を制御して貼り付けたCNT-waferは、歪みセンサーとして機能します。さらに、この歪みセンサーは、単純なCNTの機械的変形と抵抗値変化を利用しているため、耐久性や、応答性にも優れていることが明らかとなりました⁷。

これら歪みセンサーのデバイス応用を見据え、電極部分に伸縮しても抵抗値が不変のCNT導電性ゴムを用い、全ての構成部品が伸縮可能なCNT歪みセンサー素子の開発に成功しました。この素子を絆創膏や、グローブ、ストッキングの上に構築し、呼吸・発声や、手の動き、足の動きを計測できる各種人体モニタリングデバイスの開発を行いました⁷。(図2)

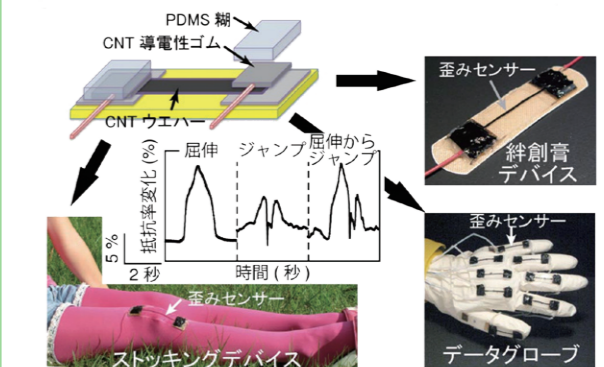


図2 各種人体モニタリングデバイス

今後の展開

今後は、開発したデバイスの実用化及び、解明したCNTの特性及び、開発した製造技術、インテグレーション技術を用い、新たな柔らかいナノデバイスシステムの開発を推進していきたいと考えております。

参考文献

- 1) K. Hata, et al., *Science* 306, 1362 (2004).
- 2) K. Mizuno, et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106, 6044 (2009).
- 3) A. Izadi-Najafabadi, et al., *Adv. Mater.* 22, E235 (2010).
- 4) Y. Hayamizu, et al., *Phys. Rev. Lett.* 102, 175505 (2009).
- 5) D. N. Futaba, et al., *Nano Lett.* 9, 3302 (2009).
- 6) T. Miyake, et al., *J. Am. Chem. Soc.* 133, 5129 (2011).
- 7) T. Yamada, et al., *Nature Nanotech.* 6, 296 (2011).