

カーボンナノチューブをベースとしたロボット用高性能アクチュエータ材料の開発
— Development of Carbon Nanotube based Actuation Materials —

1 X X X X X (登録番号)

研究者代表 (独) 物質・材料研究機構 グループリーダー 唐 捷
(助成金受領者)

[研究の目的]

「人間と機械の調和の促進」のために、従来の「固い」「重い」といったロボットから「柔らかい」「軽い」ロボットへと移行が求められる。現在では、強度と柔軟性など機械特性が優れているカーボンナノチューブ(CNT)材料が注目されている。本研究では、われわれが独自に開発した電気泳動法を応用して、高密度・高配向CNTファイバおよびシート作製のためのプロセス技術を開発し、CNTをベースとしたロボット用高性能アクチュエータ材料を創製することを研究の目的とする。そして次の本格的な超強度CNT構造材料および高性能CNTアクチュエータ開発研究において先導的な役割を果たすことを目指す。

[研究の内容、成果]

CNTをベースとしたロボット用高性能アクチュエータ材料としては、超高強度CNTファイバと高性能センサー用CNTシートを創製することが必要である。従来の複合材料に匹敵またはそれを超える強度を持ち、導電性と高熱伝導性を有するファイバの実現を目指す。また、アクチュエータ用のセンサー材料として、表面積が大きく感度が従来のものを超えるCNTシートの作製を目指す。

技術的課題としては、これまでの電気泳動法に電極針構造の改良及び針とCNT分散液間の制御の高度化等の改良を加え、高密度・高配向CNTファイバ作製技術を確立する。

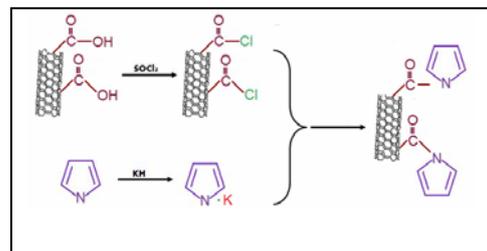
また、多点電極針電気泳動法により、高密度・

高配向CNTシートを得、さらにその電気化学的アクチュエータ機能を最適に引き出すシート作製プロセスを開発し、今までにない高性能アクチュエータCNTシートを創製する。また、その構造解析、強度評価、アクチュエータ機能評価を行い、さらに、固体電解質膜との多層化により、高性能アクチュエータを試作し、ロボット構造材料への有効性を検証する。

カーボンナノチューブは、円筒形の立体構造として様々な螺旋構造を持ち、その構造に依存して金属にも半導体にもなるという著しい特徴を持っている。われわれは電気泳動法で簡単かつ制御しやすい長繊維化CNTの糸の作製に成功した。それにより、軽量・高強度・導電性カーボンナノチューブ・ポリマー複合材料の作製や生物用電極の作製を進めている。

今回、高分子アクチュエータ素材であるポリピロールを出発材料とし、カーボンナノチューブを均一に分散させ、また、有機溶剤でファンクショナイズすることにより、マトリクスをポリピロールに架橋させた (Fig. 1)。このことにより、アクチュエータ性能を大幅に向上させることに成功している。

Fig. 1



Function CNT by using organic solvent

図1 有機溶剤によって、カーボンナノチューブ

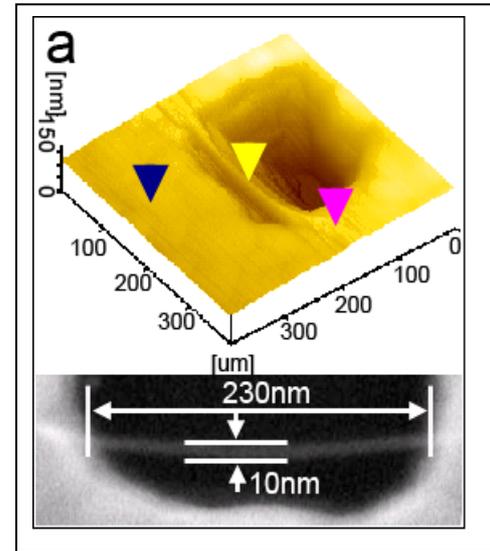
ブをファンクショナイズする。

また、軽量・高強度・導電性カーボンナノチューブ・ポリマー複合材料の作製や生物用電極の作製も進めているが、微小な長繊維化CNTの糸の力学測定法の確立が必要である。普段使われている顕微力学測定法はカーボンナノチューブ糸の測定に対して、試料のサイズが小さすぎて使いにくい。そこで、原子間力プローブ顕微鏡を用いて、長繊維化カーボンナノチューブファイバのヤング率の測定を試みた。

Fig. 2に示したようにSi基板上に溝を設け、カーボンナノチューブファイバを架橋した上で、Si基板上 (青矢印) およびSi基板上的ナノチューブ部 (赤矢印)、ナノチューブ架橋部分 (黄矢印) の3か所においてAFMにより応力を加え変形量を測定した。結果をFig. 3に示す。変形量からヤング率を導くためには試料の密度が必要である。ナノチューブファイバはFig. 4に示したように電場によってナノチューブバンドルを配向・集積させるためその密度は、電場強度に関係する。結果種々の直径・堆積密度を持ったナノチューブファイバが得られる事になる。例としていくつかの試料のSEM写真をFig. 5に示す。堆積密度の違いが明らかにわかる。ナノチューブファイバ形成時の電場強度から見積もられたナノチューブ直径と堆積密度の関係をFig. 6に示す。このような方法で様々な直径のカーボンナノチューブファイバの強度を測定し、ヤング率を見積もった。

直径が100nmのカーボンナノチューブファイバの強度は250GPaであり、普通のカーボンファイバ増強材料より強度が4倍が高くなったことを解明した。これから進めたいカーボンナノチューブ・ポリマー複合材料の開発について、明るい道が示されたと考えられる。

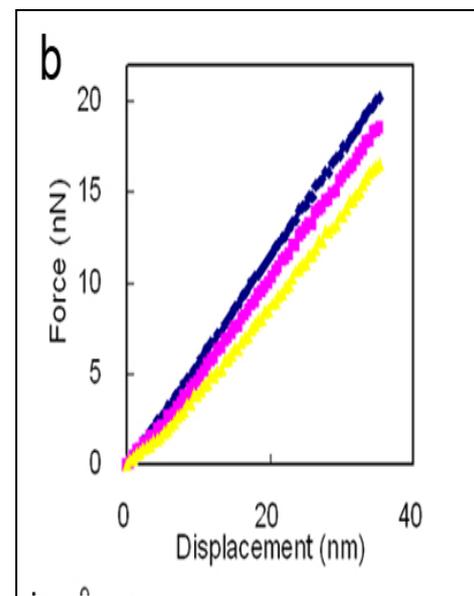
Fig. 2



An AFM topographic image of a nano-bridge structure formed by a SWCNT bundle; the inset being the SEM image showing the dimensions of the bundle

図2 AFM測定用のカーボンナノチューブサンプルの様子を示している。挿入図に使用しているカーボンナノチューブのバンドルのSEM写真を示している。

Fig. 3

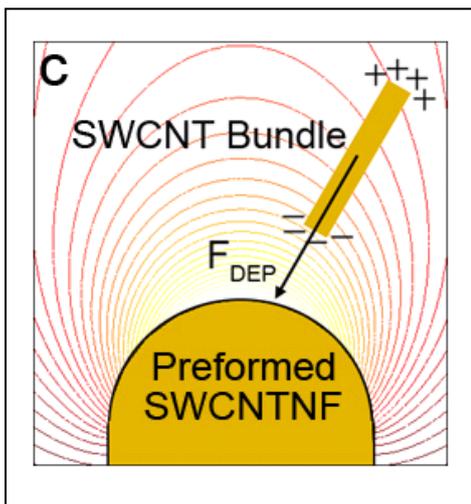


Force-displacement curves obtained from

the three spots indicated by colored arrows in fig. 2.

図3 三つのカラーの矢印は、それぞれ、図2で示すSi基板上(青)、Si基板上のナノチューブ部(赤)、ナノチューブ架橋部分(黄)での応力と変形の関係を表している。

Fig. 4



Simulation model of a SWCNT bundle attracted by dielectrophoretic forces towards the tip of the preformed SWCNT nano-fiber

図4 カーボンナノチューブバンドルの結合力は作製するときの電場強度と関係している。

図4ではカーボンナノチューブファイバの先端に受けた電場強度を示している。

Fig. 5(a)

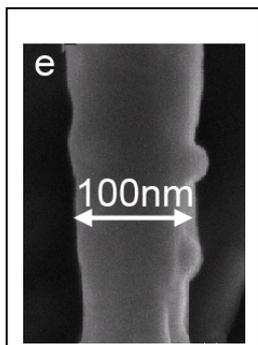


Fig. 5(b)

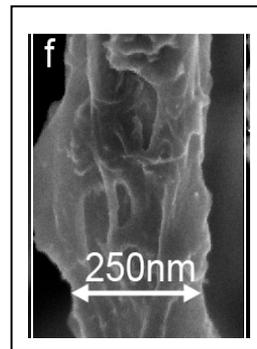
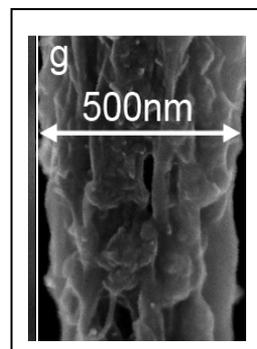


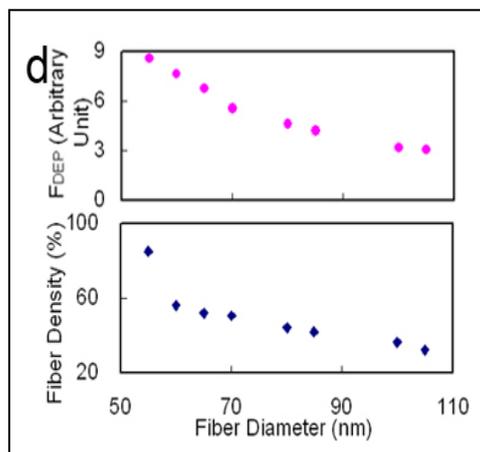
Fig. 5(c)



A series of high resolution SEM images showing the different surface morphologies of the SWCNTNFs with different diameters

図5 違う直径のカーボンナノチューブファイバのSEM写真を示している。堆積密度の違いが明らかにわかる。

Fig. 6



Simulated dielectrophoretic forces and measured packing densities of eight SWNT nano-fibers plotted with respect to their diameter;

図6 計算された電場密度とカーボンナノチューブ直径の関係及びカーボンナノチューブの堆積密度と直径の関係を示している。

[今後の研究の方向、課題]

我々が高分子アクチュエータ素材であるポリピロール・カーボンナノチューブ複合膜の作製ができ、アクチュエータ性能を大幅に向上させたことがわかった。この結果に基づいて、アクチュエータ用軽量・高強度・導電性カーボンナノチューブ・ポリマー複合材料の作製プロセスを確立し、性質評価を行った。イオン導電性高分子のポリピロールにカーボンナノチューブを均一分散し、マトリクスと架橋させることにより、アクチュエータ伸縮率や発生応力を大幅に向上させ、さらに性能劣化を格段に減少させることが期待される。

[成果の発表、論文等]

- 1) Jie Tang, Fabrication and Applications of Carbon Nanotube Fibrils by Dielectrophoresis, 4th Annual Conference on FOUNDATIONS OF NANOSCIENCE (FNAN007), invited, (2007)
- 2) J. Tang, P. Zhu, H. Zhang and L.-C. Qin, Tensile Modulus of Carbon Nanotube Nano-Fibers Produced by Dielectrophoresis, 2007 MRS Fall Meeting, (2007)