

## カーボンナノチューブ複合材料の設計・合成・評価ループ

### 構築と高機能化に関する研究

Development of Design-Fabrication-Evaluation Methodology  
for High Performance Composites Reinforced  
by Carbon Nanotube

橋田 俊之 (HASHIDA TOSHIYUKI)

東北大学・大学院工学研究科・教授



#### 研究の概要

多層カーボンナノチューブ (MWCNT) /セラミックス複合材料を対象にナノ構造・ナノ界面の制御および分散性制御に焦点を当て、さらに実用性を考慮して無加圧焼結法を用いた合成法の開発を行う。これにより設計・合成・評価ループを構成し、機械・電気的特性のいくつかの応用に関する調査を行い、MWCNT/セラミックス複合材料の実用化のための基礎を形成する。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 機械材料・材料力学

キーワード：カーボンナノチューブ、複合材料、セラミックス、機械・電気的特性

#### 1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブ(CNT)は、多くの注目を集め物性の解明など飛躍的な進展が図られ、実用材料への展開が強く期待されている。高分子基複合材料については CNT 分散法や界面特性改善法などの技術開発が進み、一部は実用化されるに至っている。これに対して、セラミックス基複合材料については、これまで十分な実用化には至っていないのが実情であり、工学的展開が求められていた。

#### 2. 研究の目的

本研究は、多層カーボンナノチューブを配合したセラミックス基複合材料を作製するための設計・合成・評価に関する研究を行い、開発材料の機械・電気的特性の向上と実用化に向けた基礎研究を行うことを目的としている。

#### 3. 研究の方法

CNT として多層カーボンナノチューブ (MWCNT)、マトリックスとしてアルミナ等を選択し、MWCNT の分散性、界面特性を向上させるための合成に関する検討を行う。特に、実用性を考慮して無加圧焼結法により複合材料を作製する合成法を開発する。さらに、開発した複合材料の強度・破壊特性、トライボ特性、生体適合性、電気ひずみ効果、電波吸収特性等々を評価し、MWCNT/セラミックス複合材料の高機能化に関する研究を推進する。

#### 4. これまでの成果

本研究は、MWCNT を配合した複合材料の開発、ならびにその機能向上と応用展開を目的としている。これまでの主たる成果を以下に纏める：

- (1) MWCNT とセラミックス粉(アルミナ粉)の混合において、従来達成されていなかった MWCNT をほぼ均一に分散性させることができている。分散性は、微視組織観察ならびに電気伝導度測定に基づいて判断している。
- (2) MWCNT の分散性の向上には、混合媒体の pH や電解質添加、さらに MWCNT の剛性と表面電荷が重要な因子であり、これらの合成パラメータを選択・制御することが有効であることを示し、混合プロセスに関する詳細なデータベースを構築している。
- (3) 以上の検討により、MWCNT 複合材料の合成に関する課題においてコーナーストーンと位置づけられる、無加圧焼結法による MWCNT/アルミナ複合材料の作製に成功し、かつ放電プラズマ焼結法等の加圧焼結法による複合体の破壊特性も超える合成法を開発できている。この成果は、MWCNT の均一分散性ならびに界面特性の向上に依っている。
- (4) MWCNT 複合材料の機械・電気的機能向上を図るための基盤技術として、MWCNT の SEM 内一軸引張試験法と分

子動力学的数値解析を組合せたナノ構造・ナノ界面評価手法を開発し、き裂架橋モデルの構築のために基礎を形成している。

- (5) MWCNT/アルミナ複合材料の機械的特性に関して、MWCNT と破壊き裂の力学的相互作用により MWCNT が破断していること、ならびに破断現象によりき裂架橋効果が制限されていることを世界に先駆けてはじめて明らかにしている。また、SEM 内一軸引張試験法ならびに分子動力学的法を組み合わせた方法により、剣鞘型の破断について破断き裂の架橋力は MWCNT のエンドキャップ部におけるファンデルワース力にほぼ支配されていることを発見している。さらに、MWCNT のアニーリング処理による強度化など MWCNT/アルミナ複合材料の破壊特性をさらに向上できる方法を見出している。
- (6) MWCNT 複合材料の工学材料への応用展開に関して、破壊特性の向上に関する成果に加えて、以下の成果が挙がっており、今後の研究により実用化への道をつけられることが期待される：

- ・ MWCNT 添加により摩擦特性をグラファイト相当あるいはダイヤモンドライクカーボンのレベルまで向上できる。摩擦特性は、摩擦量を重量法、表面分析によっては検出できないほど極めて良好である。
- ・ 生体材料応用に関して、ヒドロキシアパタイトとの複合材料作製や人工股関節用カップ部材形状のニアネットシェイプ成形に成功している。
- ・ 電気的特性応用に関して、電気ひずみ効果を利用したマイクロアクチュエータ等の微小電気機械要素の作製に成功している。今後、変位性能等の特性を評価する予定である。さらに、金属ゲージの80倍以上の感度を有するひずみセンサーを開発している。
- ・ 電波吸収材料への応用に関して、MWCNT を複合化したセラミックス複合材料の電波吸収特性を世界ではじめて測定し、ニーズの高い数 GHz~10GHz 程度の周波数帯で良好な特性を有することを見出している。

## 5. 今後の計画

MWCNT 複合材料の作製に関する検討を継続しつつ合成法を確立するとともに、MWCNT 複合材料の機械・電気的特性等を利用した工学的展開・応用を目的とした検討に重点をおき、機能発現メカニズムと機能向上のための合成・評価研究を推進する。特に、MWCNT のナノ構造と機械・電気的特性との関係に注目した検討を行う。これらの知見を統合することにより、MWCNT 複合材料開発のための設計・合成・評価ループを構築する。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- (1) G. Yamamoto, S.Liu, N. Hu, T. Hashida, Y.Liu, C. Yan, Prediction of Pull-out Force of Multi-walled Carbon Nanotube in Sword-in-sheath Mode, *Comp. Materials Science*, 60, (2012) 7-12
- (2) A.Ning H. B. Jia, M. Arai, C. Yan, J. Li, Y. Liu, S. Atobe, H. Fukunaga, Prediction of thermal expansion properties of carbon nanotubes using molecular dynamics simulations, *Comp. Materials Science*, 54 (2012), 249-254,
- (3) L.He, M.Toda, Y. Kawai, M.Omori, T. Hashida and T. Ono, High Aspect Ratio Carbon Nanotube-Carbon Composite Microstructures Fabricated by Silicon Molding Technique, *センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム*, 28 (2011) 134-137.
- (4) Y. Li, N. Hu, G. Yamamoto, Z. Wang, T. Hashida, H. Asanuma, C.Dong, T. Okabe, M. Arai, H. Fukunaga, Molecular mechanics simulation of the sliding behavior between nested walls in a multi-walled carbon nanotube, *Carbon*, 48, 2934-2940 (2010).
- (5) G. Yamamoto, M. Omori, T. Hashida, H. Kimura, T.Takagi, Effects of sintering additive on mechanical properties of alumina matrix composites reinforced with carbon nanotubes, *J. Solid Mech.and Matls. Engng.*, 4, 460-469 (2010).
- (6) N.Hu, Y.Karube, M.Arai, T.Watanabe, C. Yan, Y. Li, Y. Liu, H.Fukunaga, Investigation on sensitivity of a polymer/carbon nanotube composite strain sensor, *Carbon*, 48 (2010) 680-687.
- (7) M.Omori, T. Watanabe, M. Tanaka, A. Okubo, H. Kimura, T. Hashida, Nanocomposite Prepared from Carbon Nanotubes and Hydroxyapatite Precursors, *Nano Biomedicine*, 1, 137-142 (2009).

ホームページ等

<http://www.rift.mech.tohoku.ac.jp/hashida-lab/cnt-kakenhi>