

「プロセスインテグレーションに向けた高機能ナノ構造体の創出」
平成 20 年度採択研究代表者

中嶋 直敏

九州大学大学院・工学研究院・教授

溶解カーボンナノチューブ高機能ナノシステムのデザイン

1. 研究実施の概要

本研究プロジェクトでは、本研究代表者が提案・展開してきた溶解カーボンナノチューブ (CNT) を素材とした次世代のナノカーボンハイブリッド高性能ナノ構造体の創出を目的に、研究を展開している。本研究により、透明導電性薄膜、無加湿燃料電池ナノ触媒、ナノ細線デバイス、アクチュエータ、MEMS バイオメディカル材料など、21 世紀の科学技術を支える画期的なナノ構造体を開発する。今年度は、SWNT 電子準位決定とともに、CNT ハイブリッド材料の機能開発 (単一カイラリティ識別・単離、CNT 自己組織化膜、CNT 超分子ハイブリッド) についての基礎知見を集積した。また、CNT/バイオハイブリッド材料の機能に関して、細胞との相互作用を評価した結果、CNT は細胞の機能発現や遺伝子発現を良好に維持することがわかり、優れたバイオマテリアルとなる可能性が示された。これらの基礎成果は、次年度への展開の重要な基盤を与えるものである。

2. 研究実施内容 (文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

本研究では、「可溶化ナノチューブ」を素材として、以下の 3 つの課題を中心に研究を推進している。

- (1) 未解明な CNT 基盤特性の解明 (SWNT 電子準位決定とバンドギャップ制御、CNT ナノ構造解析)
- (2) ボトムアッププロセスにより創出した CNT ハイブリッド材料の機能開発 (単一カイラリティ識別・単離、CNT 自己組織化膜、CNT 超分子ハイブリッド)
- (3) トップダウン/ボトムアップ技術融合により構築した CNT デバイス開発 (次世代ナノリソグラフィーとの融合、光リソグラフィーとの融合、MEMS テクノロジーとの融合)

これらに対して得られた当該年度の成果概要は以下の通りである。

1. SWNT/UV 硬化樹脂複合体を作成し、それらの熱伝導性について解析した。複合体の構造との関連から複合体の熱伝導性の向上要因を解析した。すなわち、SWNT 含量を 5wt% まで変化させたところ、熱伝導率はほぼ直線的に増加した。これに対して、SWNT/UV 硬化樹脂複合体の電気伝導率は、SWNT0.05wt%で劇的に変化し、熱伝導性と電気伝導率で増大の要因が大きく異なることがわかった¹⁾。
2. SWNT の選択的可溶化に関して、重合ポリフェノールが、カイラリティ選択的な可溶化に寄与する知見が得られた。また、いくつかの多環芳香族ポリマーを用いた、半導体 SWNT の選択的な可溶化に関するデータが得られた。
3. 透明電極上に孤立溶解 SWNT フィルム修飾を作成し、電気化学応答を精査した。分光電気化学的手法を適用して、SWNT の電子準位を決定する手法をほぼ確立した。
4. 単一カイラリティをもつ SWNT を識別・単離する新しい手法の開拓に関して、重要な基礎的知見を得ることに成功した。ここでは、SWNT を孤立溶解させ、選択的に「重し」を付けるという、独創的なアイデアに基づいている。
5. 極めて簡便な手法を用いて、CNT/ポリマー複合体を用いた導電性フィルムの開発の作成条件を探索し、導電性透明 CNT 超薄膜フィルムを作成できる新しい手法を見いだした。
6. 無加湿型プロトン伝導型ポリマーの候補であるポリベンゾイミダゾール(PBI)を基材とし、自己組織的に複合化した PBI/CNT/ナノ金属ハイブリッドを作製し、無加湿型のプロトン伝導を利用した新規な燃料電池ナノ触媒開拓の基礎知見を得た。PBI はその熱的安定性からスーパーエンジニアリングプラスチックとしての利用が有用とされている。PBI は剛直な骨格をしているにも関わらず、DMSO、DMAc 等の有機溶媒に可溶であるため材料への応用が簡便であるという特長を持っている。同時に PBI は多核芳香環を分子骨格中に持つため SWNTs の可溶化剤として作用する。燃料電池用触媒としては、より安価な多層 CNT を用い、PBI/CNT/白金ハイブリッドを作成して、そのナノ構造を調べたところ、高分解電子顕微鏡解析により、PBI/CNT/白金微粒子の理想的な 3 層界面構造の形成が認められ、そこでは高い白金利用効率が発現することがわかった。
7. ガン抗体を結合した SWNT スマート分子ヒーターによる抗ガン免疫療法の開発に関して、SWNT とガン細胞の特異抗原の結合にはアビジン-ビオチン反応による結合が適切であると考えた。このため、可溶化した SWNT 表層に生成したカルボキシル基にアビジンを共有結合させ、このアビジンにビオチン化抗体を結合させ、この反応モデルの構築と検証のために水晶発振子マイクロバランス法を用いた評価を行うべく準備中

である。また、並行して腫瘍組織内における複合体の動態を検証するために標識化 CNT を調製するべく、その分子デザインを検討した。これはアビジンを結合した CNT に抗アビジン抗体を結合させたもので、この抗体に FITC などの蛍光色素を結合させれば、蛍光標識化 CNT とすることができる発想でデザインされた。実際にこの標識化 CNT を組織内に注入後に免疫染色を行えば生体内での動態をより詳細に検索することができるものと期待される。

8. 溶解 CNT と MEMS テクノロジーの融合技術として、「溶解 CNT マテリアルを利用した細胞マニピュレーション技術の開発」および「溶解 CNT マテリアルを利用した金属イオンの新規 μ TAS の開発」に取り組み、溶解 CNT を利用したバイオ分野および化学分析分野の新しい技術開発を進めている。「細胞マニピュレーション技術」では、CNT マテリアルと細胞間の基本特性を理解するために、静電的に CNT を固定化した培養基板上で HepG2 細胞 (肝ガン細胞株) およびラット肝細胞の特性を評価した。その結果、HepG2 細胞では二次元状に伸展・増殖する細胞特性を促進し、ラット肝細胞では三次元状の細胞集合体形成を促進することを見出した。また、タンパク質分析や遺伝子解析技術を用いて、CNT 上で培養した細胞が高機能発現を維持できることを明らかにし、CNT マテリアルが優れた培養マテリアルとなりうる可能性を示した。また「金属イオンの新規 μ TAS」のテーマでは、アルキル側鎖末端にメタクリレートを有した酸性有機リン系化合物を用い、希土類金属である Eu^{3+} の溶媒抽出特性について検討した。その結果、本抽出剤はモノアルキル体とジアルキル体が 53% と 47% ずつ混合した混合物であり、 Eu^{3+} に対して抽出能を有していることが明らかとなった。現在、溶解 CNT / ポリマーゲルと MP200 を複合化した、光応答性分離ゲルの調製に取り組んでいる。

3. 研究実施体制

(1)「九州大学」グループ

①研究分担グループ長: 中嶋 直敏 (九州大学、教授)

②研究項目

プロジェクト A: 未解明な CNT 基盤特性の解明 (SWNT 電子準位決定とバンドギャップ制御、CNT ナノ構造解析)

プロジェクト B: ボトムアッププロセスにより創出した CNT ハイブリッド材料の機能開発 (単一カイラリティ識別・単離、CNT 自己組織化膜、CNT 超分子ハイブリッド)

プロジェクト C: トップダウン/ボトムアップ技術融合により構築した CNT デバイス開発 (次世代ナノリソグラフィーとの融合、光リソグラフィーとの融合、MEMS テクノロジーとの融合)

(2)「北九州市立大学」グループ

①研究分担グループ長:中澤 浩二(北九州市立大学、准教授)

②研究項目

「MEMS テクノロジーとの融合」

(i) 溶解 CNT マテリアルを利用した細胞マニピュレーション技術の開発

- ・細胞-CNT マテリアル相互作用の解析
- ・細胞マニピュレーション技術の確立と性能評価

(ii) 溶解 CNT マテリアルを利用した金属イオンの新規 μ TAS の開発

- ・光スイング抽出分離システムの開発
- ・金属イオンの μ TAS の開発

(3)「福岡歯科大学」グループ

①研究分担グループ長:川口 稔(福岡歯科大学、助教)

②研究項目

「ガン抗体を結合したSWNTスマート分子ヒーターによる抗ガン免疫療法の開発」

- ・可溶化 CNT へのアビジン結合スキームの開発
- ・ビオチン化特異抗体の調製
- ・ガン特異抗体の検索, マウスによる舌内動態評価モデルの確立

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. T. Fujigaya, T. Fukumaru, N.Nakashima, "Evaluation of dispersion state and thermal conductivity measurement of carbon nanotubes/UV-curable resin nanocomposites" *Synth. Metals*, in press.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)