

戦略的創造研究推進事業
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ

研究領域「高度情報処理・通信の実現に向けた
ナノファクトリーとプロセス観測」
研究課題「カーボンナノチューブ形成過程その場
観察と物性制御への展開」

研究終了報告書

研究期間 平成15年10月～平成20年03月

研究代表者：本間芳和
(東京理科大学理学部、教授)

1 研究実施の概要

(1) 研究の目的と構想

カーボンナノチューブ(以下 CNT)は最も着目されているナノ構造体であり、将来の機軸材料となる可能性を有している。しかし、電子デバイスへの応用においては、CNT を位置・方向を制御して配置するとともに、CNT の特性をも制御する技術を確認することが不可欠である。本研究では、高度な CNT の化学気相成長(CVD)技術に立脚し、各研究機関が有する最先端の電子顕微鏡技術、走査プローブ顕微鏡技術、ラマン分光技術、光学測定技術を駆使し、CVD 成長雰囲気でのその場観察を実現する。本チームの特徴は、CNT 成長技術(本間・小林)、走査電子顕微鏡(SEM)技術(本間)、透過電子顕微鏡(TEM)技術(竹田)、振動分光技術(小林)、発光分光技術(Finnie)、CNT ネットワーク構築技術(荻野)、それぞれの要素技術において世界のトップクラスの実績を有する研究者を集結して、CNT 成長のその場観察・計測技術の開発を遂行することにある。これに基づき、CNT の特性制御という困難な課題の解決への道を拓くことを目指して研究を行った。

(2) 研究実施内容及び成果

・電子顕微鏡によるナノチューブ成長過程解析

走査電子顕微鏡(SEM)による CNT 成長の CVD その場観察を実現するため、数十 Pa の圧力下での環境 SEM 観察、および 1 kV 以下での低速 SEM 観察、アルコールを用いた 600~800℃での CVD 成長を可能とする環境制御型 SEM 装置を開発した。エタノール蒸気を原料とすることにより、CNT 成長圧力を 10~30 Pa の領域まで低減することができた。しかし、この圧力領域では通常の二次電子信号を得ることができないので、SEM 観察時には試料温度を維持したままエタノール蒸気を排気し、高真空下での SEM 観察と低真空下での成長を繰り返す方法を用いた。これにより、単層 CNT 成長の連続観察に成功した。

- ① 微細構造間を電線のように結ぶ架橋 CNT の形成過程を解析し、CNT の伸長中に方向が揺らぐため、自己組織化的に最近接の構造間を架橋することを明らかにした。また、一度架橋構造が形成されると、次に成長した CNT が振れながら絡みつき、束(バンドル)が形成される。
- ② 基板上での成長初期過程の観察から、殆どの CNT の先端が基板に接触せずに成長を始めるが、約 100 nm 以上の長さになると、大部分が基板表面に倒れ込むことが明らかになった。これも、CNT が振れながら成長するとすれば、説明できる現象である。
- ③ 基板上での CNT 伸長過程の観察から、触媒が CNT の先端にあり、先端で伸長が起こっていることが示唆された。また、SiO₂ とサファイア上で伸長長さ・速度に大きな差がみられ、基板の影響が大きいことがわかった。

透過電子顕微鏡(TEM)による CNT 成長の CVD その場観察に関しては、最大加速電圧 200kV の電界放射型・透過電子顕微鏡をベースにして、電子銃などの鏡筒内を高真空に保ちつつ、試料の周囲には高い圧力のガス(2kPa 以上)を充たすことができる装置を開発した。透過電子顕微鏡の空間分解能の指標である情報伝達限界は、2kPa の窒素ガス雰囲気中において、0.16nm 程度にまで到達した。この環境電顕を利用して CNT の生成と成長過程のリアルタイム観察に成功した。

- ① ガスが電顕像に与える影響をシミュレートする方法を考案し、環境電顕内で単層 CNT の成長をその場観察できるだけでなく、その構造を同時に決定できる可能性があることを示した。
- ② シリコンナノワイヤーが CNT の生成をその場観察する上で極めて有用な触媒の担体になることを示した。触媒微粒子と CNT の直径の関係を統計的に調べることで、触媒の直径は CNT の直径と等しいか大きいことを明らかにした。
- ③ その場環境電顕観察から、スイングや回転など、CNT が成長方向を激しく変化させながら成長している様子もされた。このような CNT の成長方向の変化の原因としては、①CNT 同士の相互作用、②触媒からのカーボン析出速度の触媒位置不均一性、③触媒微粒子の動き、などが考えられる。これらリアルタイム観察は、上記の SEM 観察結果を裏付けるものである。

・分光によるナノチューブ成長過程解析

架橋 CNT の光学応答が基板上のものよりも遥かに強いことを利用して、フォトルミネッセンス (PL) による単一 CNT のカイラリティ計測や CVD 成長過程のその場ラマン分光計測法を開発した。また、X 線光電子分光法を CVD 中の触媒の化学状態解析に適用した。

- ① ラマン分光と CL の同時測定を実現し、様々な構造を持つ架橋単層 CNT のカイラリティを厳密に帰属することが可能となった。さらに、基板との接触、界面活性剤処理やバンドル形成など CNT の周辺環境によるラマン振動数の系統的な変化を明らかにした。これらは、カイラリティ制御研究に必要となる基盤評価技術となる成果である。
- ② 成長しつつある CNT をその場でラマン分光測定するための小型 CVD 装置を開発した。カイラリティに敏感な RBM 振動領域のシグナルを成長中に観察することに成功し、成長条件とカイラリティ分布の関連性を解析した。
- ③ ラマンシグナルの検出に CCD カメラによるイメージングを用いることにより、CNT の成長過程を実空間像として観察することに成功し、一本の架橋 CNT が形成される過程を捉えた。
- ④ PL シグナルの検出に InGaAs カメラによるイメージングを用いることにより、長い架橋 CNT の中でカイラリティ分布の評価を可能にした。これにより、成長途中でカイラリティ変化が生じることを示した。
- ⑤ 触媒となる金属微粒子の化学状態を解析するため、触媒蒸着から CVD 成長までを一貫して光電子分装置のチャンバで行うことを可能にし、触媒のその場化学状態分析を進めた。

・CNT 形成機構の解明

上記の電子顕微鏡および分光によるその場観察からの知見、さらには、CNT 生成触媒種の検討から、CNT 生成におけるナノ触媒の役割を解明した。これにより、今後のカイラリティ制御の研究に対する重要な指針を得た。

- ① これまで CNT 生成の触媒作用を持たないと考えられていた金・銀・銅のナノ粒子を活性化する方法を見だし、単層 CNT の合成に成功した。
- ② この結果から、CNT 生成の触媒作用とは、五員環を含む曲率を持ったキャップを生成するためのテンプレートを提供することにあるとの仮説を得た。これを実証するため、非金属である、SiC、Si、Ge のナノ粒子を用いても CNT が合成できることを示した。
- ③ SiC、Si は CVD 雰囲気中で固相を維持していると考えられることから、結晶性触媒粒子からのエピタキシャル成長により CNT のカイラリティ制御を行える見通しを得た。

・CNT 形成・特性制御

上記の電子顕微鏡および分光によるその場観察からの知見を、架橋 CNT などの CNT 構造物の形成に応用し、構造物形成の制御性を高めた。また、CNT の特性に対する電子線照射効果の解析から、電子線照射を CNT デバイス特性の変調に利用できることを示した。

- ① 架橋過程、バンドル形成過程の解析に基づき、単一 CNT だけからなる架橋構造の形成効率を向上した。これら単一架橋 CNT は、単一 CNT 分光や発光に対する環境効果の計測に有用であった。
- ② 基板上での成長初期過程の解析から、短い (100~300 nm) 単一 CNT を基板に直立させて形成することを可能にした。
- ③ 低エネルギーの電子線照射による欠陥生成を利用して、金属的な特性の CNT から p 型の半導体としてのデバイス特性を得た。これはカイラリティや直径を変化させたことと電気的には同等の効果である。

・CNT ネットワークの機能化

将来の機能化ナノ配線の一つのモデルとして、その基盤技術を開拓することを中心軸に CNT 機能化を検討した。本研究開始当初は、機能化配線の適用分野として電子デバイス、特に LSI への応用を主体に考えたが、完成度の高い Si 集積回路に適用されるのはかなり先のこととなるので、機能化配線の適用としてナノバイオテクノロジーへ課題の中心軸をシフトさせた。機能化では分子マ

ニピュレーションが必須であるため、走査プローブ顕微鏡(SPM)を用いた分子操作・CNT 操作を検討した。

- ① CNT ネットワークの高機能化: CNT 三次元ネットワーク形成と機能性ナノチューブ成長へ向け、化学気相成長(CVD)において CNT の接木、ナノウォール/CNT 複合構造形成、などを行った。また、固体表面への CNT 分散において、基板/CNT 及び CNT/CNT 相互作用の制御を行い、分散に適した基板表面と分散剤の条件を明らかにした。
- ② CNT 表面の高機能化: CNT 表面化学状態制御、及び単分子パターニングへ向けた基本技術を開拓し、CNT の医療応用を開始した。
- ③ 走査プローブによる高機能化: トップダウンの CNT ネットワーク形成に向けた CNT 水平方向マニピュレーションとともに、架橋 CNT の機械的振動の検出に向けた垂直操作技術を確立した。また関連技術として生体分子の固体基板上への固定・吸着力評価等を実施した。
- ④ 高機能化 CNT 集積へ向けた基盤技術: 生体機能移植に不可欠な脂質二重膜の形成技術を確立し、固体表面の構造制御による膜構造の制御を開拓した。また、ナノ空間材料としてのポラスアルミナ形成を行った。

(3) 類似研究に対する位置付け

CNT 成長過程のその場観察自体が新しい分野であり、CNT 研究者の注目度が高い成果である。環境 TEM を用いたその場観察については、本研究課題の提案後、海外の 2 つのグループから相次いで多層 CNT の成長過程観察が報告された。1 つはデンマーク工科大学のグループで Nature (2004 年 1 月)に論文が、もう一つはアリゾナ州立大のグループで、Appl. Phys. Lett. (2004 年 4 月)に論文が掲載された。しかし、これらではその場観察は実現できたものの、高温観察における分解能が単層 CNT の観察には十分でない。本研究チームでは、高温のガス雰囲気が高い分解能を実現するとともに、ナノ触媒の生成から原料ガスの取り込み・CNT の生成プロセスを一貫して観察できるシステムを構築した。また、ナノサイズの触媒粒子から単層 CNT が生成する瞬間を捉えるため、それに適した試料構造の作製と成長条件に関する技術・経験を蓄積してきた。これに基づき、先行グループとは質の異なる研究を実現している。一方、SEM その場観察に関しては、本研究チームの独壇場といえる状況であり、現在のところ、内外とも同レベルの研究結果は報告されていない。

カイラリティの制御のためには、単一の CNT の物性や置かれた状態を分別して解析することが重要な課題であるが、これまでの分光的な CNT 研究の多くは CNT の集合体を測定対象としており、単一の CNT からの測定に成功した例は極めて少ない。本チームの研究は、架橋単層 CNT 制御技術をベースに、単一の単層 CNT の測定を再現性よく組織的に測定していることに特徴がある。また、CVD 雰囲気中でのその場分光技術、イメージング技術は現在のところ他の追従を許していない。

CNT のバイオ応用に関しては、CNT への生体分子固定の研究が既に始まっているが、CNT の成長制御と CNT 表面の化学修飾を同時に実行している機関は非常に少ない。特に、架橋 CNT 網の形成とそれを支持体とする生体分子操作に注目している機関はほとんどない。

(4) 戦略目標・科学技術への貢献

CNT デバイス技術は、単独の電界効果トランジスタや単電子デバイス技術の研究が進展している。ナノテクノロジービジネス推進協議会(NBCI)ビジネス戦略ロードマップ(2005 年 10 月)では、CNT 小規模集積デバイスの実現を 2013 年頃と想定している。そのためのキーテクノロジーがカイラリティ制御であり、その実現無しには、CNT 集積デバイスへの展開は困難である。本研究で、カイラリティ制御に関する指針を得たことは、将来の CNT デバイスの集積化のみならず、新しい原理の CNT 量子デバイスの実用化に向けた大きな前進となる。また、架橋 CNT や垂直配向 CNT を利用した単一単層 CNT の物性評価は、基板や他の CNT、さらには、界面活性剤など環境の影響を排除した標準データを与えるものである。CNT 成長の高分解能透過電顕観察は、CNT 研究分野のみならず電顕技術の上でもチャレンジングな研究テーマである。このような大きな課題に率先して取り組んでいる意義は大きい。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

本研究では、高度な CNT の CVD 成長技術に立脚し、架橋 CNT の特異な性質、そして各研究機関が有する最先端の電子顕微鏡技術、走査プローブ顕微鏡技術、ラマン分光技術、光学測定技術を駆使し、CVD 成長雰囲気でのその場観察を実現する。特に、常圧に近い CVD 成長雰囲気下での電子顕微鏡観察という、新しい計測技術の開発が本研究の成否の鍵となる。このため、前期2年間に大きな設備投資を行い、「環境制御型低速走査電子顕微鏡(SEM)」および「環境制御型透過電子顕微鏡(TEM)」を開発する。これに、ラマンおよびフォトルミネッセンス測定を組み合わせ、CNT 架橋ネットワークの形成過程ならびに CNT の構造(カイラリティ)と触媒形態との関係を解析する。後期2年間には、これらの解析結果をもとに CNT の構造制御・特性制御へと展開する。さらに、これらの研究成果を集積デバイスに応用するため、「環境適応型走査プローブ顕微鏡(SPM)」の開発による CNT を用いた高次構造デバイス・マシンのその場構築を実現し、CNT の多層化・高機能化ネットワークの形成制御を検討する。なお、CNT は Vapor-Solid-Liquid (VLS)機構で成長すると考えられているが、本研究手法はシリコンナノワイヤーをはじめとする半導体ナノワイヤーの VLS 形成制御にもそのまま適用できるので、ナノワイヤーも視野において進める。

研究開始時に設定した研究内容の概要および各研究機関の連携体制を図1に示す。研究開始時の目標は以下の通りである。ただし、研究代表者の異動(NTT→理科大)に伴い、当初計画における本間グループの研究を SEM その場観察(本間グループ)と分光計測・電気的計測の研究(小林グループ)に分割した。成長制御の研究は、技術交流および学生メンバー・CREST 補助員の派遣を通じて、両グループの密接な協力関係の下に進めた。

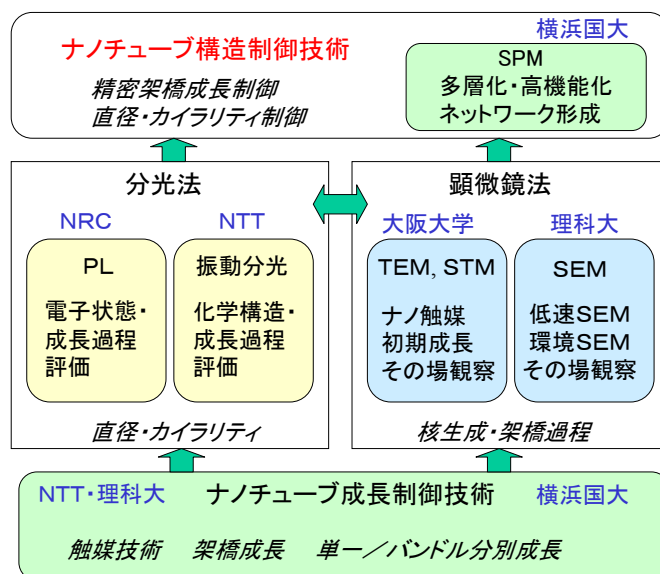


図1 研究体制と研究項目

I 走査電子顕微鏡および振動分光によるその場観察・計測技術の開発(当初の本間グループ)

① CNT の低压 CVD 成長法の開発(本間グループ、小林グループ)

CNT の成長過程をその場観察するため、SEM や TEM で観察可能な圧力条件下での CNT の成長を検討する。触媒粒子のナノサイズ化やホットフィラメントの利用により、CNT の成長圧力をより低くして、SEM や TEM の動作圧に可能な限り近づける。さらに、試料周囲の差動排気の強化と併せ、CNT 成長条件下での電子顕微鏡観察を実現する。

② SEM その場観察技術の開発(本間グループ)

高温試料加熱とガス導入が可能な試料室に、低速電子銃と低エネルギー検出機能を持った二次電子検出器を搭載し、その場観察用 SEM 装置を開発する。これを用い、熱 CVD で成長した架橋 CNT ネットワークを高真空下で低速電子線照射により観察し、CNT の熱振動の大きさとそのバンドル径依存性を解析する。これにより、架橋機構に関する知見を得る。さらに、上記 CNT 低圧成長技術と組み合わせ、CVD 環境下での直接観察を実現し、パターン上での架橋過程や基板上での成長過程、バンドル形成過程を解析する。これらの研究を通じて成長を支配するパラメータを解明し、各種架橋 CNT 成長の精密制御を実現する。

③ 振動分光法によるその場計測技術の開発(小林グループ)

CNT の構造評価の強力な手段であるラマン分光法を CVD 成長温度におけるその場計測に適用することを目標とする。まず成長位置制御を基に、架橋 CNT を識別して、選択的にラマンスペクトルを測定する技術を確立する。さらに架橋成長した CNT からのラマン散乱強度が増大する現象を利用して成長途中にある CNT からのスペクトル測定を狙う。ラマンスペクトルとは相補的な情報が得られる赤外分光法については、埋め込み金属層を用いた高感度反射赤外分光法を用いて、PL 法と同様に測定領域に存在するすべての CNT を対象としたカイラリティ分布評価の可能性を検証する。

II 光学測定を用いたカイラリティ評価およびその場計測(Finnie グループ)

① フォトルミネッセンス(PL)によるカイラリティ評価

最近、CVD 成長条件によってカイラリティ分布に差が生じることが明らかになった。PL は CVD 法で成長した CNT のカイラリティの同定に有用な手法である。そこで、様々な成長条件でパターン基板上に CVD 成長した CNT の PL スペクトルを比較し、カイラリティ制御に関する知見を得る。

② CVD 成長のその場モニタリング

次の2つの方向で、CVD 成長のその場モニタリングが可能な装置を開発する。一つは、薄膜成長プロセスとのアナロジーで、光の反射率の変化から成長状態の情報を得るものである。よりチャレンジングで魅力的な方法は、カイラリティ敏感なその場計測法の開発である。これに関しては、その場ラマン分光法の検討を進める。

③ 光学測定用試料の最適化

CNT の形状と方向が光学特性に影響すると考えられる。そこで、その場計測のために、CNT 成長用のパターン形状を最適化する。リソグラフィ設備(光学及び電子ビーム)をフルに活用し、光学測定に適したパターン形状の開発や触媒の選択形成を行う。

III 透過電子顕微鏡を用いた成長初期過程の解析(竹田グループ)

① 環境制御 TEM の開発

カイラリティ制御を考えた場合、ナノ触媒からの CNT の成長初期過程を解明することが必須である。このため、TEM 中でのその場観察法の開発が望まれる。SEM 同様、可能な限り低圧化での CNT 成長を実現するとともに、試料周りの差動排気により TEM 中でのその場観察にアプローチする。

具体的には、200-300 kV 級透過電子顕微鏡をベースにして差動排気システムを導入することで、透過電子顕微鏡の鏡筒内は通常の高真空を維持しつつ、試料周囲における原料ガスの圧力を、0.1-0.3 Torr まで高めて、ナノ触媒による CNT の成長をその場観察できる環境制御 TEM を開発する。観察時の透過電子顕微鏡の性能は、空間分解能:0.27 nm、インフォメーションリミット:0.18 nm 以上を目標とする。特に温度、原料ガスの圧力など成長条件を制御する機構を装備することで、CNT 成長の機構を解明することが可能な環境制御 TEM の開発を目指す。一方で、炭素、炭化シリコンあるいは窒化ホウ素などの軽元素でできたカプセルを用意して、その内部に金属ナノ触媒と原料ガスを封入させて、透過電子顕微鏡観察する方法も検討する。CNT 成長を TEM 法により観察するために適した試料の作製技術も確立する。

② 環境制御 TEM を用いた CNT の成長初期過程の解析

環境制御 TEM による CNT 生成と成長のその場観察を行う。本研究グループでは、加えて、VLS

機構で成長するシリコンナノワイヤーの成長初期過程の観察を主に走査トンネル顕微鏡によって併せて行い、ナノ触媒による VLS 機構を明らかにし、CNT の構造制御を目指す。

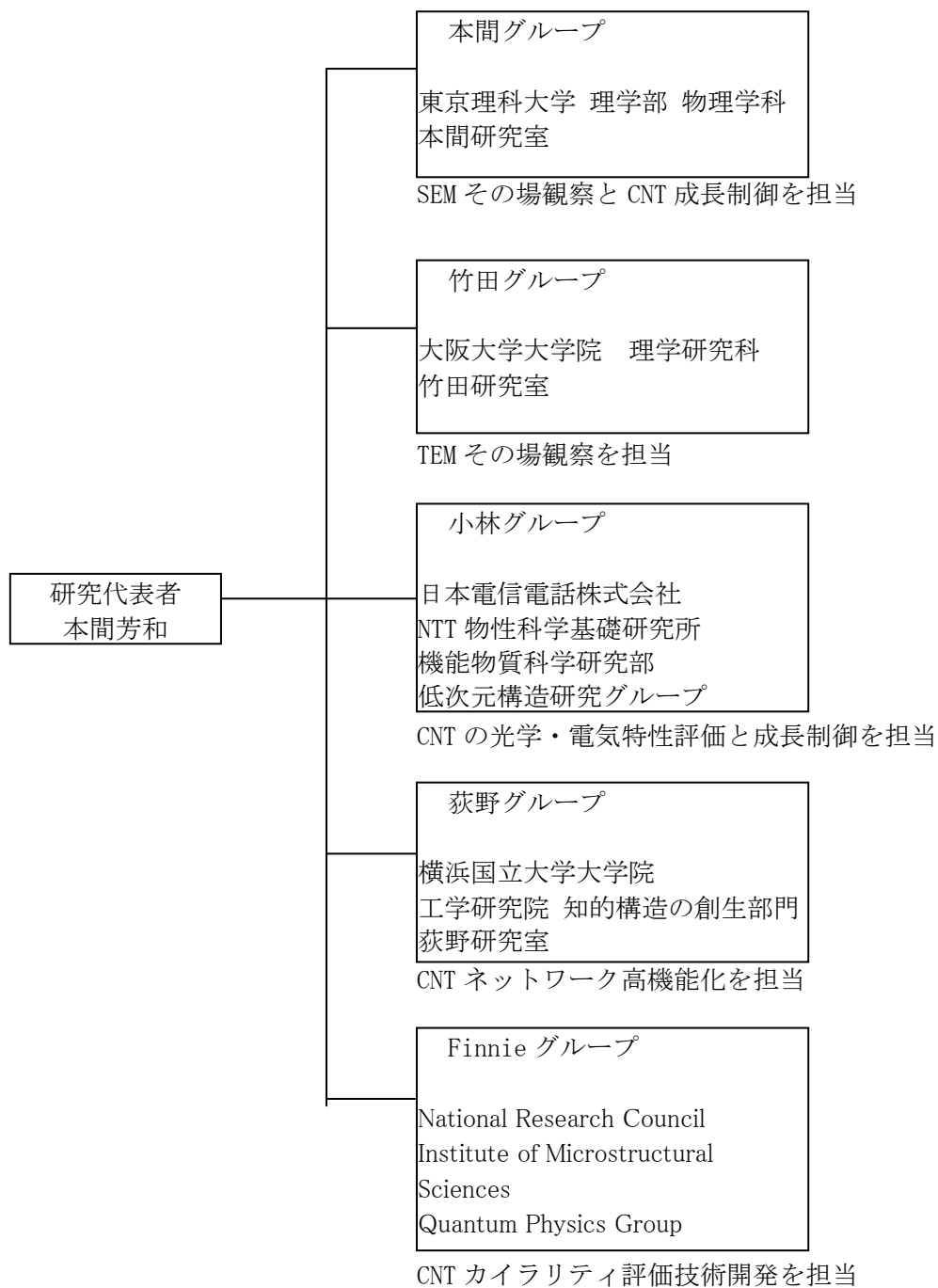
VI CNT の多層化・高機能化ネットワーク形成と特性制御 (荻野グループ)

本研究課題で明らかにされた CNT 成長過程のその場観察と成長制御に基づき、CNT ネットワークの高機能化に関する研究を行う。特に、環境適応型走査型プローブ顕微手法(SPM)により、CNT ネットワーク改質のその場観察を重点的に行う。高機能化には、CNT バンドルの分岐・結合操作、各種分子・原子の吸着による伝導型制御、先端の開口とドーピング、さらに、有機分子を含む CNT 分子ネットワークの形成、等が含まれる。これらの研究において、CNT ネットワークへ高機能を付与し、知的配線の実現や、CNT 分子ネットワークに基づく新しい集積デバイスの実現を目的とする。これらの目的には、CNT・分子操作を伴うため SPM が必須の技術となるが、CNT 機能化の多くはガス雰囲気、溶液中、高温下、など様々な環境下で行われるため、環境適応型 SPM 技術が要求される。そこで、CNT の高機能化に必要な環境下で CNT を操作し、その改質・ネットワーク再配列を行い、さらには分子吸着操作等も可能な環境適応型 SPM 技術を開拓する。環境適応型 SEM、環境適応型 TEM を用いた CNT 成長その場観察によって解明された成長機構とその制御に関する知見に基づき、CNT ネットワーク高機能化の基本過程を環境適応型 SPM により解明する。これらを通じて、将来の目標である知的 CNT ネットワークを用いた新集積デバイスへの開拓へ向けた基本検討を実施する。

その後の展開により新たに生まれた目標

プロジェクト発足当時は、機能化 CNT ネットワークの目標として集積デバイスにおける配線形成を重視していた。その後、外部では CNT と生体物質との適合性に期待が高まり、荻野グループ内においてはバイオテクノロジーの研究が順調に立ち上がった。そのため、CNT のバイオ技術応用へ重心を移した。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 走査電子顕微鏡によるナノチューブ成長過程解析と成長制御の研究（東京理科大学本間グループ）

(1)研究実施内容及び成果

チームの最終的な目標である CNT の特性制御には、ナノ触媒からの CNT 成長初期過程の解明が不可欠である。これに対しては、透過電子顕微鏡の専門家である竹田グループが環境制御型 TEM の開発を分担し、原子レベルでの評価を目指している。一方、CNT を実際に用いるためには、成長位置・方向制御、単一・バンドルの作り分けを初めとする高次構造の制御が不可欠である。本研究グループでは後者に焦点を絞り、SEM その場観察により CNT 構造物の形成機構を追求した。環境制御型 SEM 装置を用いることにより、CVD 成長雰囲気において CNT 成長をその場観察し、パターン上での単層 CNT の架橋形成やバンドル形成過程、基板上での成長過程を解析した。

また、その場観察で得られた知見を CNT 構造物の精密制御に応用するとともに、成長機構の解明を目指し、CNT 成長におけるナノ粒子の触媒作用を詳細に調べた。

・SEM による CNT 成長過程の観察技術開発

CNT 成長のその場観察を実現するため、1 Torr までの圧力下での環境 SEM 観察、および 1 kV 以下での低速 SEM 観察、アルコールを用いた 600～800℃での CVD 成長を可能とする環境制御型 SEM 装置(図 1.1)の開発を行った。装置自体は、当研究グループのバックグラウンドである超高真空 SEM 中その場結晶成長技術に、これまでに蓄積した CNT の CVD 成長に関する知見を活かすことにより、短期間で完成することができた。目標を達成するための最も大きな課題は、CVD 成長が比較的高いガス圧を必要とすることから、CVD 成長と SEM 観察を如何に両立させるかという点であった。そこで、CNT 成長を可能な限り低圧で行うこと、および高温の試料から S/N 比の良い二次電子信号を得るための条件を探索した。CNT の CVD 成長はエタノール蒸気を原料とすることにより、CNT 成長圧力を 0.1～0.2 Torr の領域まで低減することができた。この圧力領域では通常の二次電子信号を得ることができないので、SEM 観察時には試料温度を維持したままエタノール蒸気を排気し、高真空下での SEM 観察と低真空下での成長を繰り返す方法を用いた。これにより、単層 CNT 成長の連続観察に成功した。併せて、直径が 1 nm 前後の単層 CNT に対して、SEM で高い像コントラストを得る方法を検討した。構造間に架橋した CNT では、低速の電子線を用いることにより、鮮明な像が得られることを明らかにした。また、絶縁体上に成長した CNT は SEM で明像として際立たせられるのであるが、それが電子線照射で誘起される絶縁体表面の導電性(EBIC)によるものであることを解明し、単一 CNT のその場観察に活用した。

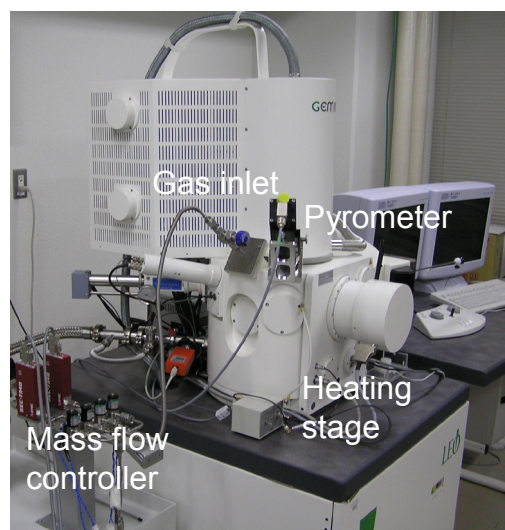


図 1.1 環境制御型 SEM

・CNT の成長過程解析

開発した SEM その場観察技術を用い、微細構造間を電線のように結ぶ架橋 CNT の形成過程を解析した。架橋構造は自己組織化的に最近接の構造間を結ぶように生じるのであるが、その形成機構は明らかにされていなかった。図 1.2 は、SiO₂ メサパタンを試料として 10 min 間隔の CVD を繰り返して観察した SEM 像である。これは 300 nm×300 nm、高さ 300 nm の SiO₂ 微細柱を正方

格子状に並べたものの一部である。10 min の成長 (a) で下側の柱から架橋 SWCNT が伸び始め、その 10 min 後の (b) ではさらに長くなっている。さらに 20 min 経過した (c) では伸長方向が変化し、最終的に上方の柱との間に架橋構造ができている。重要な点は、伸長方向が一定せず、途中で変化していることである。正方格子における近接構造物への架橋確率は、第 2 最近接(斜向かい)に比べ最近接間をはるかに高い。これまで、最近接構造間への架橋確率が高いことを説明するため、成長中に CNT 先端が大きく振動するモデルを考えていたが、伸長方向の変化が観察されたことから、それが裏付けられた。

図 1.3 はバンドル化の過程を示す連続写真である。(a)、(b) では一本の架橋 CNT が太くなるとともに湾曲しており、一度形成された架橋構造に他の CNT が絡みついてバンドル化すること、バンドル化後も CNT の伸長が続くため湾曲化が起こることを示している。また、(c) ~ (e) では、並行する架橋 CNT 同士が一体化する様子が捉えられている。CNT の絡みつきによるバンドル化も、伸長方向の揺らぎで説明できる。また、基板上での成長初期過程の観察から、殆どの CNT の先端が基板に接触せずに成長を始めるが、約 100 nm 以上の長さになると、大部分が基板表面に倒れ込むことが明らかになった。これも、CNT が振れながら成長するとすれば、説明できる現象である。

基板上に倒れ込んだ CNT がさらに伸長するかどうかは、基板上での CNT の方向制御とも関係する重要な問題である。図 1.4 に示すように、 SiO_2 上でも基板に接触しながらも伸長を続けるものが見いだされた。しかし、これは少数派(15%程度)で、大部分は伸長を示さず、長さも $2\mu\text{m}$ 以下と短いものが大部分であった。

一方、長い CNT の成長 報告されているが、多くの場合、これらはガス流に乗った CNT の先端に触媒があつて、ガス流の下流方向に向かって CNT が伸びる

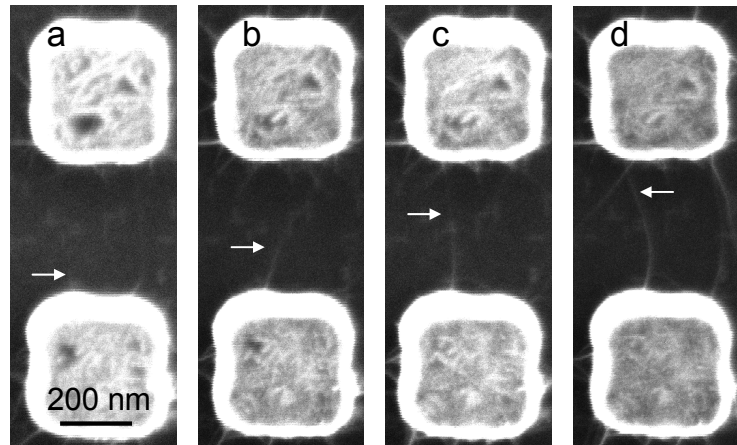


図 1.2 SiO_2 メサパターン間の架橋 CNT 形成過程の SEM その場観察
CVD 成長時間: (a) 10 min, (b) 20 min, (c) 40 min, (d) 50 min.

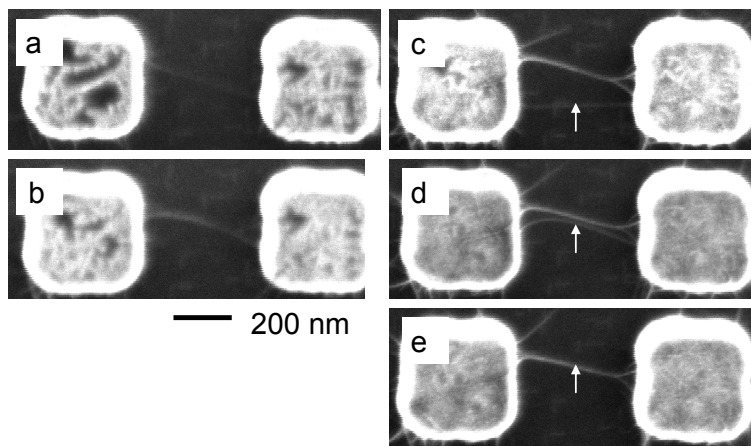


図 1.3 架橋 CNT のバンドル化過程
(a)-(b): バンドル化 (c)-(e): 架橋 CNT 同士の一体化

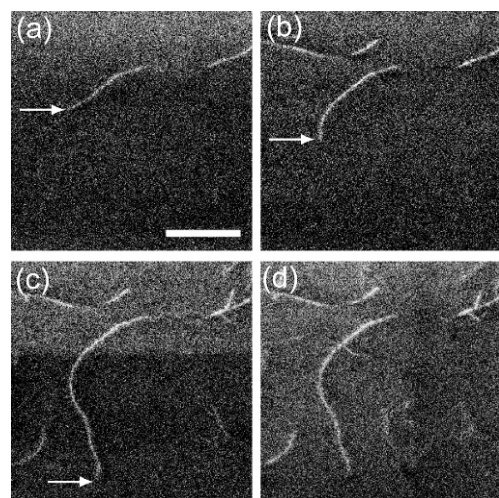


図 1.4 SiO_2 上での CNT の伸長過程
CVD 成長時間: (a) 5 min, (b) 10 min, (c) 15 min, (d) 20 min.

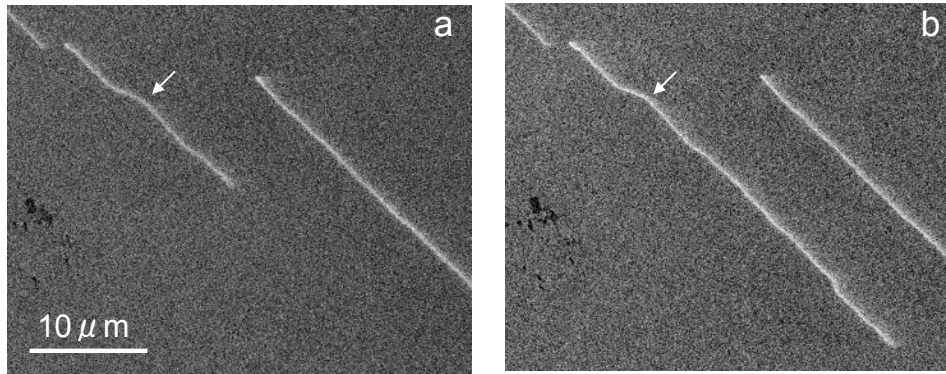


図 1.5 サファイア基板上的での CNT の伸長過程 CVD 成長時間: (a) 4 min, (b) 5 min. 矢印の部分の形状が伸長によって変化していない。

場合と考えられる。SEM 中での低圧成長ではこのようなガス流にたなびく成長は生じない。これとは別に、特定面方位のサファイア基板では、結晶方位に沿った CNT の伸長が報告されている。この場合には、触媒ないしは CNT が基板表面に接触しながらの伸長が起こっているはずである。そこで、サファイア(11-20)基板(R面)を用いたその場観察を行った。図 1.5(a)は 780°C で 4 min の成長を行ったもので、2 本の CNT がみられる。さらに 1 min 成長した(b)では、同一方向に 20 μm 以上伸びている。サファイア上では CNT は SiO₂ 上よりもはるかに長く伸びることがわかる。また、矢印で示した SWCNT の屈曲部が成長前後で変化しないことから、触媒が SWCNT の先端にあり、先端で伸長が起こっていると考えられる。

・CNT 成長制御への応用

その場観察によって得られた知見を生かすことにより、架橋 CNT をはじめとする CNT 構造物の形成制御が可能になった。まず、一度架橋構造が形成されるとそれに対してバンドル化が進行することから、成長時間の短縮あるいは CNT 生成収率を低減させた条件を利用し、一本のみ孤立させた架橋 CNT を再現性良く成長できるようになった(図 1.6a)。これにより、顕微ラマン分光法、顕微フォトルミネッセンス法それぞれを用いて、同一の架橋 CNT 一本の評価を可能にした(図 1.6a, b)。一方、直径が 2~5 nm の太い単層 CNT に対して、100~300 nm の長さで基板表面にほぼ垂直に孤立させて成長することに成功した(図 1.6c)。これは、触媒粒子の微細化と成長の高温化により実現した。これらの CNT 構造物形成法を、光学測定や電子顕微鏡測定に適した試料の作製に応用した。

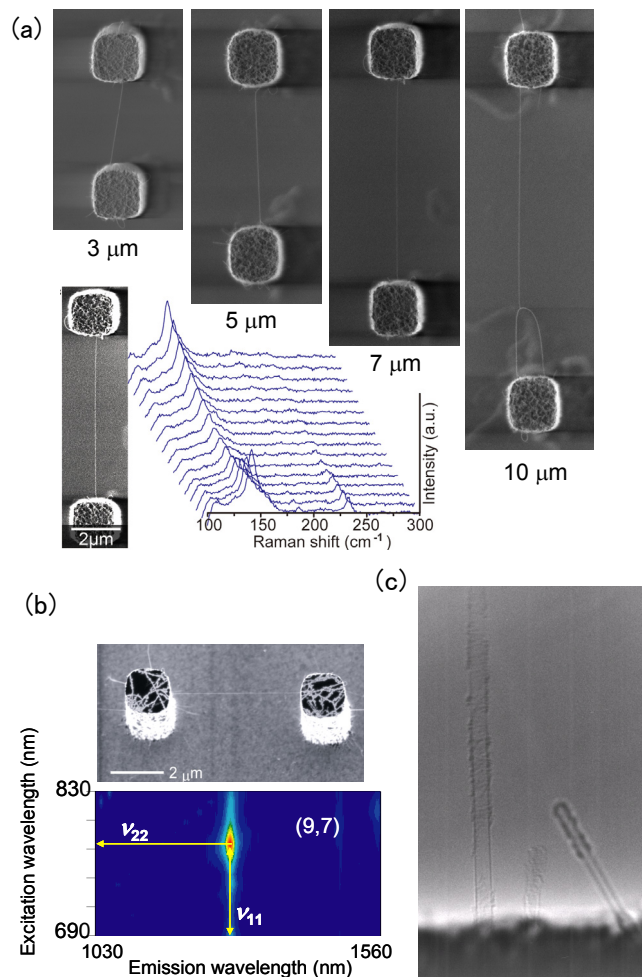


図 1.6 CNT 構造物形成制御 (a) 架橋 CNT とラマン線分析 (b) 単一 CNT の PL 測定 (c) 垂直配向 CNT

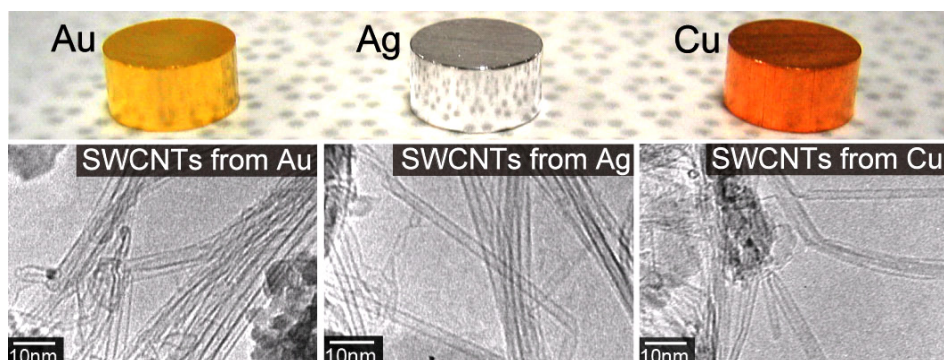


図 1.7 金、銀、銅を触媒として合成した CNT の透過電子顕微鏡像

・CNT 合成の新触媒の発見と成長機構の解明

これまで、CNT の生成には鉄族金属である鉄、コバルト、ニッケルが必須であるとされてきた。これは、これら鉄族金属が炭化水素やアルコールの分解作用を持つこと、および炭素を溶解できることと関係がある。しかし、エタノールを原料とした CNT の生成過程を解析する中で、これまで必須であると考えられてきた鉄族金属の性質は CNT 生成の本質ではないことが明らかになった。まず、これらの性質を全く持たないことから CNT 生成に最も不向きだと考えられていた金、銀、銅を触媒に用い、CNT を生成できることを見いだした(図 1.7)。さらには、金属ではない SiC、Si、Ge のナノ粒子を用いても CNT を生成できることを実証した(図 1.8)。これら、従来の常識を覆す触媒種を用いた CNT 合成を実現できたのは、触媒粒子を 3 nm 以下のサイズとすることに加え、触媒粒子の活性化法として大気中高温熱処理を CNT 生成工程直前に導入したことによる。大気中高温熱処理の役割は、微粒子表面の汚染除去により本来の触媒作用を引き出すものと解釈している。

以上の成果から、CNT 生成における触媒の本質的作用は、CNT の先端にある半球型のキャップ構造の鋳型となる曲面を提供することだと結論づけた(図 1.9)。エタノールを用いた合成では、エタノールの熱分解で供給される炭素が CNT を構成する炭素原子の6員環ネットワーク構造を自己形成すると考えられる。平坦な表面では六員環だけのシート(グラファイト)しかできないのに対し、五員環を含む半球型のキャップ構造の形成にはナノ触媒の曲率のある表面が必要であると考えられる。一度キャップが形成されると、それが CNT の結晶核となってキャップのエッジに次々と炭素原子が取り込まれ、CNT が生成する。

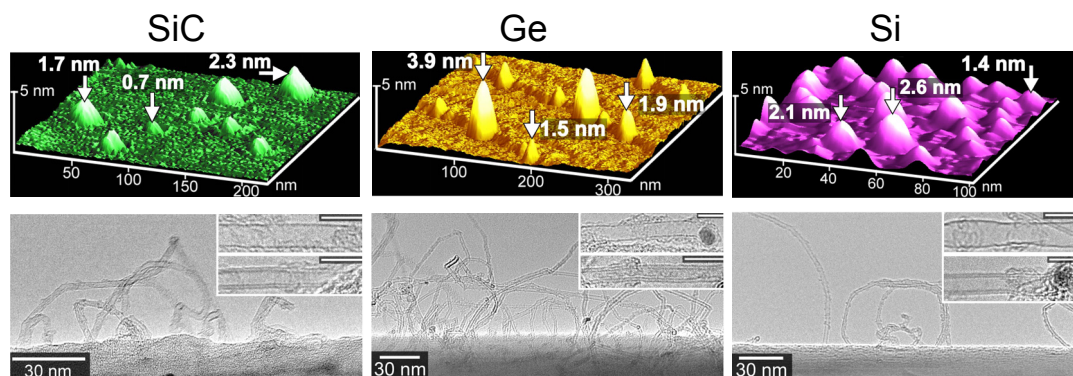


図 1.8 半導体微粒子を触媒として合成した CNT

上図:半導体微粒子の原子間力顕微鏡像 下図: CNT の透過電子顕微鏡像
挿入図のスケールバーは 5 nm

・類似研究との比較とオリジナリティ

SEM によるその場観察に関しては、多層 CNT を SEM 中で成長させた報告があるものの、本研究に比肩できるような類似研究は無い。成長制御に関しては非常に多くの機関で精力的に研究されているが、大多数は大量合成を指向したものである。本研究のように、孤立した架橋 CNT や垂直 CNT の精密成長制御に関する研究はほとんど報告されていない。とりわけ、金、銀、銅、並びに半導体触媒による CNT 成長は世界初であったため注目度が高く、金、銀、銅を用いた CNT 合成の論文は、米国化学会の論文誌 Nano Letters の 2006 年 10 月～12 月にアクセスされた論文の上位 3 位にランクされている。半導体触媒の論文も Nano Letters の 2007 年 7 月～9 月にアクセスされた論文の上位 6 位であった。触媒作用の新解釈も無論世界初であり、この分野の研究をわれわれがリードしている。

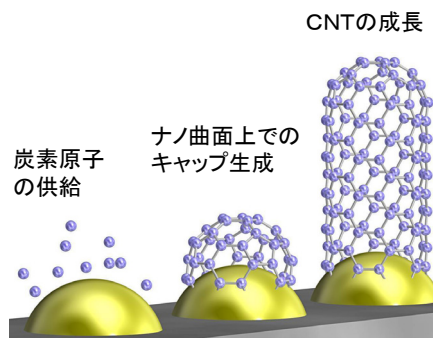


図 1.9 ナノ曲面における CNT の生成

(2)研究成果の今後期待される効果

本研究成果は、強磁性体である鉄族金属を触媒に用いずに CNT 合成が行えるという実用的な意義のほかに、今後の CNT 成長制御の研究に指針を与えたという学術上の大きな意義がある。それは、CNT 生成における触媒の役割の解明にとどまらず、固体の触媒から CNT が形成できることを示したことである。金属触媒はナノメータサイズになると、高温の CNT 生成雰囲気では液相あるいは表面が流動的な相になっており、そこから生成する CNT の構造を一つに定めることはできない。一方、本研究で新たに CNT 生成作用を実証した SiC や Si は成長中に固相を維持していると考えられる。ここで重要なことは、ナノ触媒が結晶性であれば、キャップの生成において下地の結晶とのエピタキシャル関係により、結晶格子と整合する構造のキャップが優先的に形成される可能性が生じることである。これにより、特定の直径でかつ特定の方位を向いたキャップを選択的に形成する可能性がでてきた。すなわち、適当な結晶構造とサイズを持った固体ナノ触媒を用いることにより、特定の構造の CNT を選択的に生成できる可能性がある(図 1.10)。今後、この方針に基づいて、特定の CNT 構造を生成できる結晶性触媒の探索を行う。

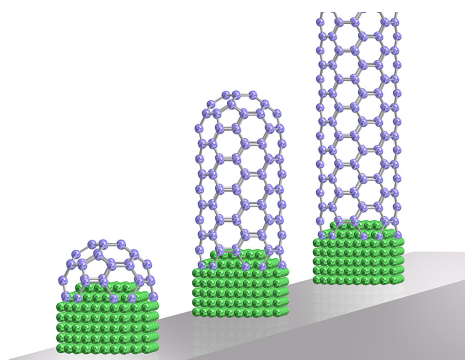


図 1.10 結晶性触媒からの CNT の生成

3. 2 透過電子顕微鏡を用いた成長初期過程の解析(大阪大学 竹田グループ)

(1)研究実施内容及び成果

・環境制御型透過電子顕微鏡の開発

本プロジェクトにより、差動排気方式による環境電顕(FEI 社製、図 2.1(a))が 2005 年 12 月に大阪大学に納入され稼働を開始した。この環境電顕は、最大加速電圧 200kV の電界放射型・透過電子顕微鏡をベースにして開発され、電子銃などの鏡筒内を高真空に保ちつつ、試料の周囲には高い圧力の高圧ガス(2kPa 以上)を充たすことができる。透過電子顕微鏡の空間分解能の指標である情報伝達限界は、2kPa の窒素ガス雰囲気中において、0.16nm 程度にまで到達している(図 2.1(c))。後に述べるようにこの環境電顕を利用してカーボンナノチューブの生成と成長プロセスのその場観察に成功した。

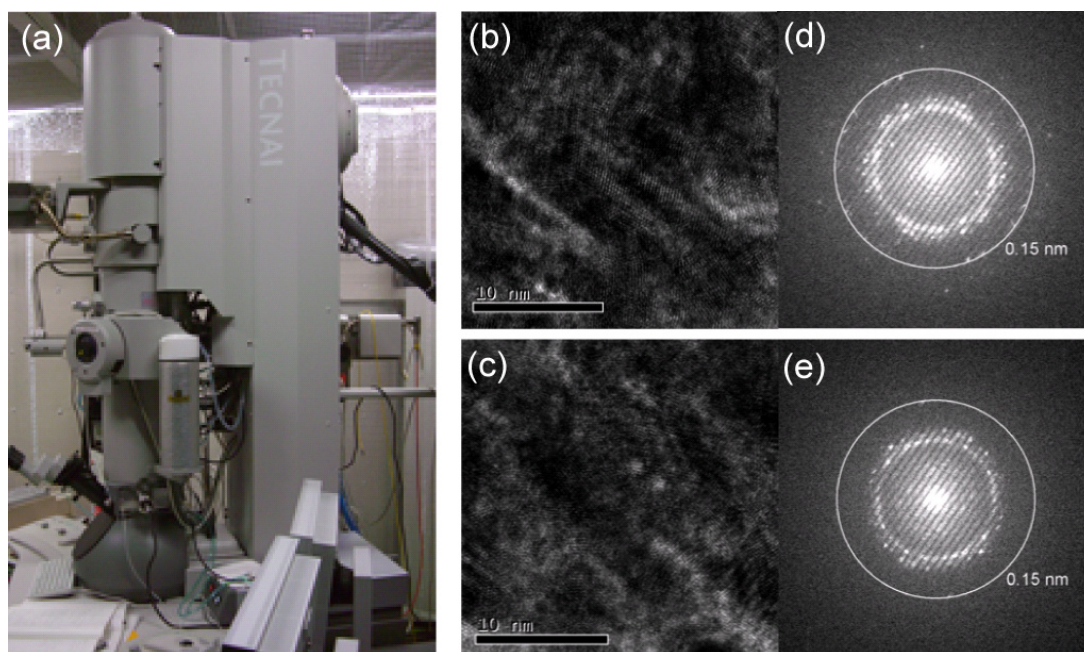


図 2.1 (a) 環境電顕。 (b) 真空中、(c) 窒素ガス 2kPa 中の金多結晶の高分解能電顕像と、(d), (e) それぞれのフーリエ変換像。

・原料ガス中にある単層カーボンナノチューブの透過型電子顕微鏡像シミュレーション

カーボンナノチューブの生成メカニズムを解明するために、新規に開発した環境電顕を用いて、原料ガスと金属触媒が反応しカーボンナノチューブが生成している様子を原子レベルで観察することを目指している。環境電顕は内部にガスを導入できる特殊な電顕であり、これまでに金属表面の酸化過程の観察や生体試料の観察に用いられている。しかしながら、ガス分子が電顕像に与える影響を理論的に考察したという報告はない。そこでカーボンナノチューブの成長その場観察の前段階として、原料ガス中にある単層カーボンナノチューブの電顕像をシミュレートした。

まず、ガスが電顕像に与える影響をシミュレートする方法を考案し、エタノールガス中にある単層カーボンナノチューブに適用した。電界放射型電子銃の電子放出効率は1ピコ秒間に1個程度であり、1ピコ秒間にガス分子は1ナノメートル程度動く。そのため各電子は異なるガス分子分布によって散乱されることになる。この影響をシミュレーションに取り込むため、ガス原子の座標を変えてシミュレートして得られた複数の像を平均化するという独自の工夫をした。一枚一枚の像はマルチスライス法によりシミュレートした。エタノールガス圧を0から5Torrまで変化させた時の、3種類の異

なる構造を持つ単層カーボンナノチューブのシミュレート像とそのフーリエ変換像を図 2.2 に示す。ガス圧が大きくなるにつれて、単層カーボンナノチューブの像はぼやけていくが、輪郭は明瞭に観察できている。また、フーリエ変換像にはガスによる散乱の影響がハローとなって現れているが、単層カーボンナノチューブの構造由来のスポットが 5Torr のエタノールガス中においても確認できる。これらのシミュレーション結果は、5Torr のエタノールガス中にある単層カーボンナノチューブの構造を決定することが可能であることを示している。5Torr のエタノールガス圧は、単層カーボンナノチューブの成長に十分な圧力であることが報告されている。このことから、環境電顕内で単層カーボンナノチューブの成長をその場観察することが可能だけでなく、その構造を同時に決定できる可能性がある。触媒の観察も同時に行うことで、単層カーボンナノチューブの成長メカニズムに関する新たな知見を得ることができると示された。

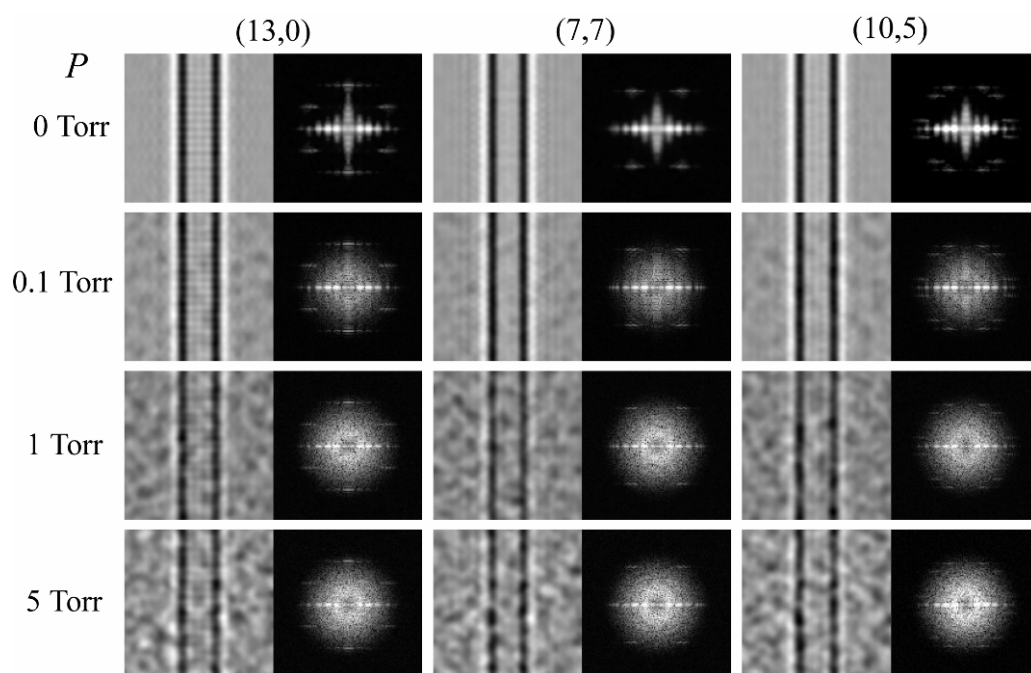


図 2.2 (13, 0), (7, 7), (10, 5) 単層カーボンナノチューブの環境電顕像とそのフーリエ変換像のガス圧依存

・シリコンナノワイヤー上への単層カーボンナノチューブ成長

単層カーボンナノチューブの成長その場観察を行う際、触媒微粒子の観察が鍵となる。触媒微粒子の直径は数ナノメートルと極めて小さいので、担体が厚い場合、透過像である電顕像で明瞭に観察することは困難である。そこで我々は、微粒子触媒の担体として直径数 10 ナノメートルのシリコンナノワイヤーを用い、その上に単層カーボンナノチューブを生成させることを考えた。まずシリコン基板に金を真空蒸着し、シラン(SiH_4)ガスを原料とする化学気相成長(CVD)法によりシリコンナノワイヤーを生成する。次に、得られたシリコンナノワイヤーに触媒としてコバルトを真空蒸着し、エタノールを原料ガスとする CVD 法を行うことで、シリコンナノワイヤー上に単層カーボンナノチューブを成長させることに成功した(図 2.3)。図 2.3 から明らかなように、シリコンナノワイヤー上にある触媒微粒子は明瞭に観察可能である。また図 2.3(b)のように、単層カーボンナノチューブの根元に触媒が存在することを示す電顕像も得ることができている。シリコンナノワイヤーは単層カーボンナノチューブの生成をその場観察する上で極めて有用な触媒の担体になり得ることが分かる。このような電顕像から触媒微粒子と単層カーボンナノチューブの直径の関係を統計的に調べることで、触媒の直径は単層カーボンナノチューブの直径と等しいか、単層カーボンナノチューブの直径より

大きいことを明らかにした(図 2.4)。また、シリコンナノワイヤー上に単層カーボンナノチューブが生成するためには、シリコン中に触媒が拡散することを防ぐための表面酸化膜が必要であることも明らかにした。

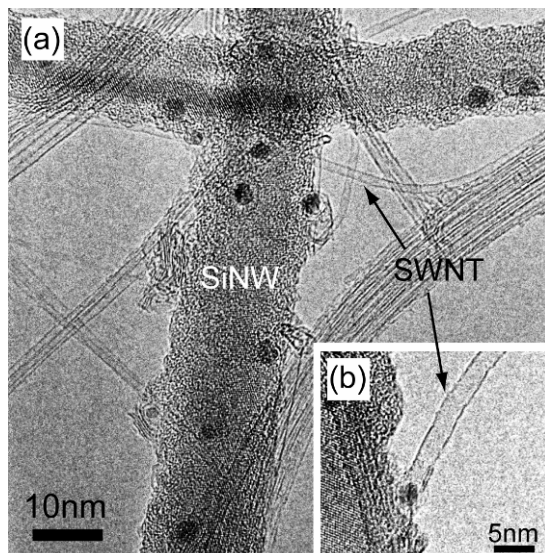


図 2.3 シリコンナノワイヤー上に生成した単層カーボンナノチューブ

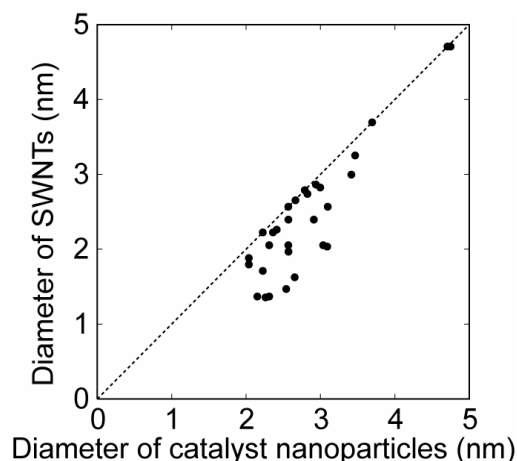


図 2.4 触媒微粒子と単層カーボンナノチューブのサイズ関係

・カーボンナノチューブ成長その場観察

カーボンナノチューブの成長過程を実空間で直接観察することは、その成長ダイナミクスを解明する上で最も有効な手法である。本研究では、環境電顕を用いて、カーボンナノチューブの成長をその場観察した。

図2.5は、多層カーボンナノチューブがコバルト触媒から成長するプロセスの、その場観察結果で、基板温度は650℃、原料ガスのエタノールの分圧は10Paである。電子照射損傷を低減させるために、加速電圧は120kVとしている。分解して酸素ガスを発生するエタノールを原料ガスとしたカーボンナノチューブの成長プロセスの、その場環境電顕観察は、本研究で初めて行われたものである。図2.5は、コバルト触媒の形状が変化した後((b),(c),(d))に基板から浮き上がり((e))、その瞬間に多層カーボンナノチューブが成長した様子を捉えている((e),(f))。その後、成長は停止するが、同時に、コバルト触媒の周囲には、特徴的な白いコントラスト(点線内)が観察された。これは、コバルト触媒が固化して結晶となっていることを示している。カーボンナノチューブ成長中におけるコバルト触媒の状態(固体、液体、あるいは部分的に熔融した固体)については、今後、さらに研究を進める。

この他に、多くの多層カーボンナノチューブが成長方向を激しく変化させながら成長している様子もその場環境電顕観察された。酸化シリコン基板温度は600℃、原料ガスのアセチレンの分圧は10Pa、触媒はコバルトである。図2.6に示したように、カーボンナノチューブが成長中にスイングしている様子が観察された。また、図2.7のように、成長方向が回転しているものも観察された。このようなカーボンナノチューブの成長方向の変化の原因としては、①カーボンナノチューブ同士の相互作用、②触媒からのカーボン析出速度の触媒位置不均一性、③触媒微粒子の動き、などが考えられる。図2.6中のカーボンナノチューブAにカーボンナノチューブBが近づき接触したときにカーボンナノチューブAが大きくスイングしていることから、カーボンナノチューブBからAに運動エネルギーが輸送された可能性がある。②はカーボンナノコイルの成長モデルとして提案されている。

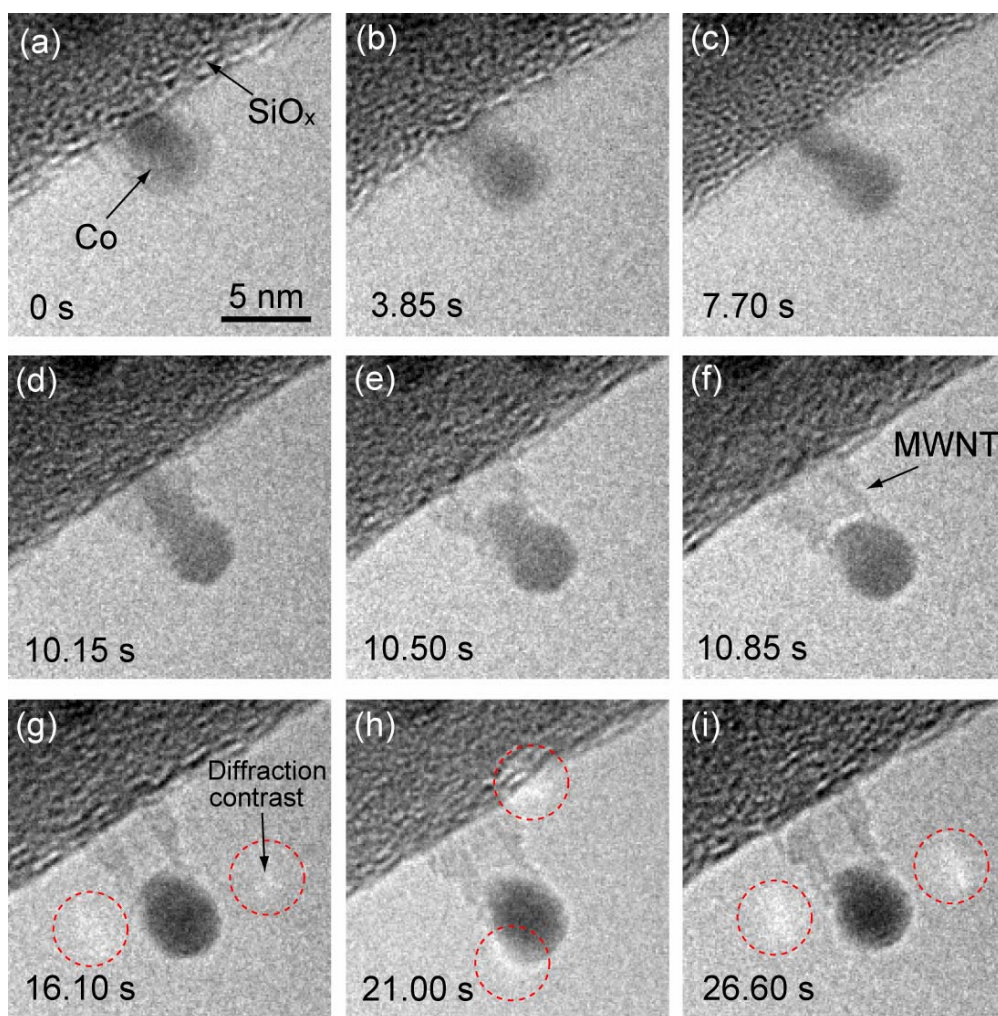


図 2.5 多層カーボンナノチューブの成長プロセスのその場環境電顕観察。観察時間は図中に表示した。

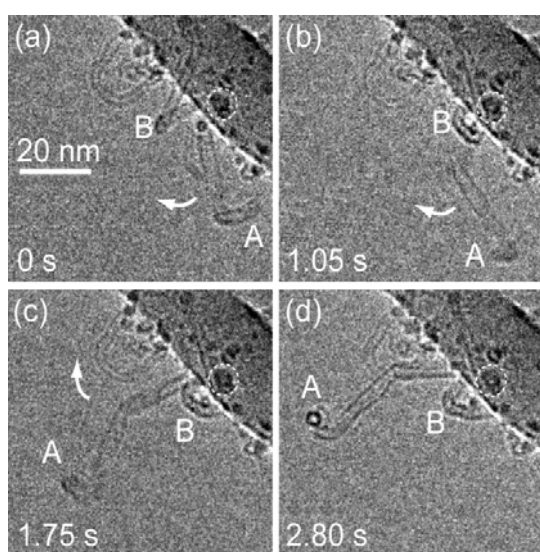


図 2.6 カーボンナノチューブのスイング

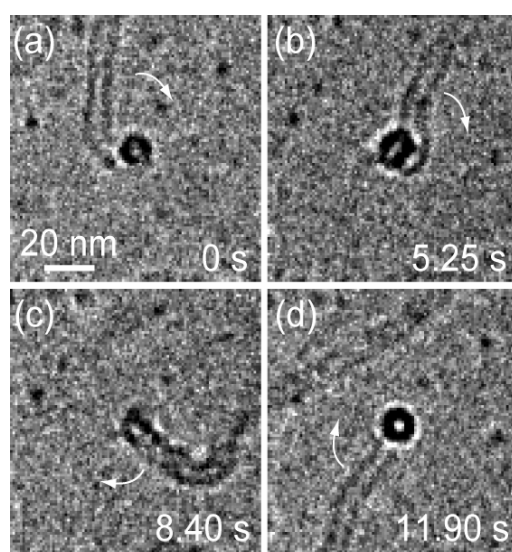


図 2.7 カーボンナノチューブの回転

図 2.6、2.7 のようなカーボンナノチューブ成長その場観察は、カーボンナノチューブのピラー間架橋成長メカニズムに関して本間らが SEM を利用して提案していたモデルを裏付ける結果と考えられる。カーボンナノチューブは成長中にスイング、回転しており、その成長方向は大きく変化している。したがって、最近接ピラーに接触する可能性が最も高い。一度ピラーに接触すると、分子間力によりカーボンナノチューブはピラーに固定され、架橋する。ピラーに接触したカーボンナノチューブがその後も成長し続けるかどうかは、成長条件に依存すると考えられる。我々のその場観察条件では、一度基板と完全に接触したカーボンナノチューブは成長しなかった。基板と半分ほど接触したカーボンナノチューブは、基板にその成長を阻害されながらも、不連続に成長する様子が観察された。

さらに、より高分解能な観察も実現できた。図 2.8 はナノ触媒から多層 CNT が伸長する様子を捉えたもので、0.35 s の間に矢印の屈曲部分が前進していることがわかる。この高分解能像では多層 CNT の格子像が明瞭に観察される。触媒から CNT が生成する瞬間も捉えられつつあり、今後原子スケールでの CNT 生成機構の理解につながるデータが得られるものと期待される。

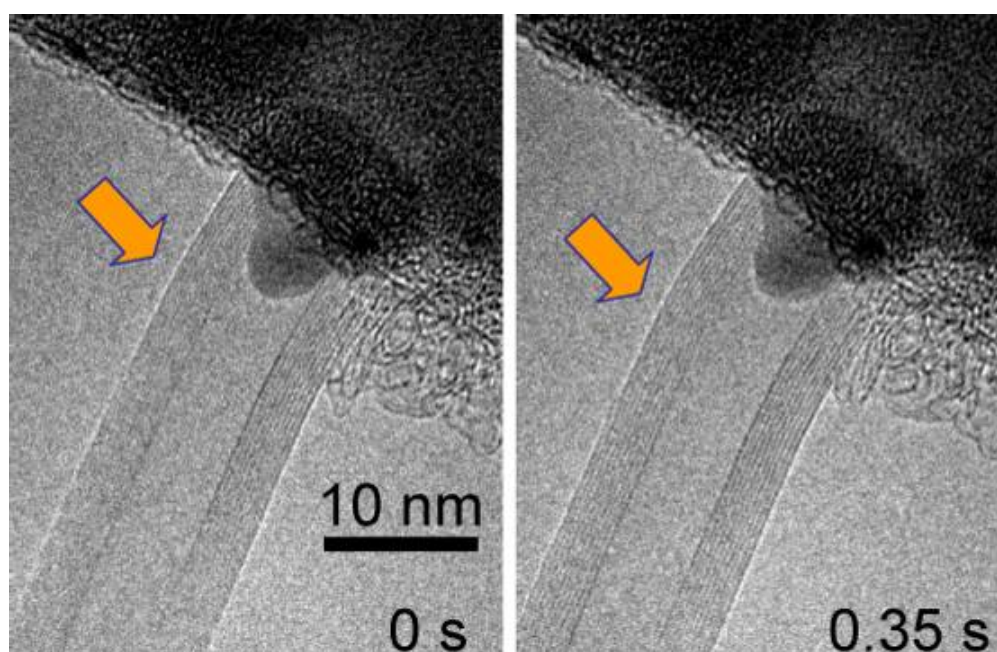


図 2.8 CNT 成長過程の高分解能観察

(2)研究成果の今後期待される効果

本プロジェクトで開発された環境電顕により、CNT の成長が原子スケールで観察可能となった。そのために、今後、観察例を増やすことで、CNT 成長中の触媒粒子の原子的構造および CNT 成長メカニズムについても飛躍的に新しい成果が期待できる。従来、理論的に考察されることが多かった CNT 成長について、直接観察から信頼できる知識が得られ、よって実用応用へ役立つ。

さらに、環境電顕は、現在、触媒研究の新しいツールとしても世界中で注目されている。このプロジェクトによって、国内で最初の本格的な環境電顕を開発できたことは、CNT 成長にみならず、より広い研究分野にも波及する成果である。

3.3 その場観察に向けたナノチューブ成長制御及び振動分光・電氣的計測技術の開発（NTT 物性基礎研究所 小林グループ）

(1)研究実施内容及び成果

・本プロジェクトにおける位置づけと概要

図 3.1 は本プロジェクトでカーボンナノチューブ (CNT) の構造評価・成長過程観察に持ちいられる手法を対比したものである。本研究では、プロジェクトの主要な観察手段である電子顕微鏡と相補的な情報、すなわちカイラリティや化学的狀態、さらにはエレクトロニクス応用において必須となるキャリア輸送特性の解析をターゲットとした。そのような情報が得られるラマン分光法、

	格子構造	成長形態	カイラリティ	定量	化学・電子状態	特長
TEM						直接観察
SEM						広範囲
ラマン・PL 分光						カイラリティ
光電子分光						化学状態
電気計測						キャリア輸送

図 3.1: 本プロジェクトで主に用いられる CNT 評価手段の特長と得られる情報

フォトルミネッセンス (PL) 分光法、光電子分光法および電気特性計測による CNT 成長雰囲気でのその場計測技術や成長した CNT の物性評価技術を開発し、CNT の成長制御や機能化に向けた研究を推し進めた。

ラマン・PL 分光法は CNT のカイラリティを識別した構造評価が可能であることが大きな特長である。特にラマン分光法は、成長途中にある高温雰囲気での測定に適していると考えられる。一方、PL 分光法と比較して、基板との接触やバンドル形成など CNT の周辺環境によってカイラリティに敏感な RBM 信号が大きくシフトしてしまうため、得られたスペクトルからカイラリティの帰属を行うことは一般に困難である。そこで、まず環境効果が極めて小さいと考えられる単一の架橋 CNT からのラマンスペクトルと PL を測定し、両者の対比からカイラリティ帰属の精密化を進めた。さらに、顕微鏡下に設置可能な小型 CVD 成長装置を開発し、CNT の CVD 成長過程をラマン分光法によりその場観察を行った。RBM 信号を明瞭に観測することに初めて成功し、成長途中にある CNT のカイラリティを識別した成長速度論解析を可能とした。化学状態分析に関しては、低圧力下での成長技術を基に、高真空を必要とする光電子分光法を CNT 成長表面のその場観察に適用し、CVD 成長条件下での触媒金属の化学状態を解明した。成長技術では、生体物質を利用して形成したサイズの揃ったナノ微粒子を CNT 成長触媒に適用し、成長した CNT の径と触媒サイズとの相関を検証し、触媒による CNT 径制御の可能性を探った。これらは、CNT の成長条件と構造との関連性を明らかにしており、カイラリティ制御に向けた成長制御法の指針へと結びつく成果である。

CNT の構造観察には通常電子顕微鏡が用いられている。そのプローブである電子線が CNT の物性に及ぼす影響をラマン・PL 分光法や電気計測を用いて調べた。その結果、低エネルギーの電子や光の照射による CNT 損傷の形成と回復現象を初めて発見し、さらにその損傷によって CNT のキャリア輸送特性が大きく変化することも見出した。生成した欠陥による物性制御の可能性を示す成果である。

以下に、これらの実施内容の詳細を示していく。

・単一カーボンナノチューブからのラマン・PL 分光とカイラリティ帰属の精密化

ラマン分光法によるカイラリティ帰属の精密化を目指して、ナノ柱状構造間に架橋した特定の CNT からのスペクトルを再現性よく測定する技術を開発した。プローブビーム径よりも十分に隔てられた柱状構造対に光学顕微鏡レベルで認識可能な固有のアドレスを付与し、数多くの柱状構造の中から特定の構造を容易に再現性よく選択できるようにした。さらに、その構造間に単一の CNT のみが架橋する条件で成長したものを試料とすることにより、特定の CNT の位置指定分光測定を実現した。図 3.2 に 3 μ m 離れたピラー間を 0.2 μ m おきにラマンスペクトルを測定した典型例を示す。直径約 1.2nm の単一架橋単層 CNT からの RBM (radial breathing mode) 信号の検出に成功していることがわかる。

図 3.3 の上図は、図 3.2 の試料を改良して、架橋確率を高めるためにより高い柱状構造を形成し、その間に単一の単層 CNT を架橋成長したものである。この試料を用いて、図 3.3 下図に示すように、特定の架橋 CNT からラマンスペクトルだけではなく PL スペクトルを測定することに成功した。図のスペクトルはそれぞれ2つの柱状構造の直上および柱状構造間で測定されたものであり、ラマンスペクトルでは 203 cm^{-1} 、PL スペクトルでは 1375 nm のピークが共通して観測されている。特に、柱状構造間では単一の信号のみが観測されている。これは、これらのピークが架橋した同一の CNT に由来するものであることを示している。これまでに報告されている理論計算の結果や PL スペクトルの詳細な解析例を基に、観測されている信号は (9, 8) というカイラリティを持った CNT 構造に帰属できる。同様に、様々な構造を持つ架橋単層 CNT のカイラリティを厳密に帰属することが可能となった。さら

に、架橋単層 CNT からは、基板など周辺環境による影響を受けずに、CNT 本来の物性が観測されることから、基板との接触、界面活性剤 (SDS) 処理やバンドル形成など CNT の周辺環境による RBM 振動数の系統的な変化を明らかにした。これらは、カイラリティ制御研究に必要な基盤評価技術となる成果である。

・カーボンナノチューブ成長過程のカイラリティ識別その場ラマン分光計測

上記のように、ラマン分光法は、高温かつ低圧力ガス雰囲気での CVD 成長条件でカイラリティを識別して CNT の構造評価を行うための有力な手段と位置づけられる。成長しつつある CNT をその場でラマン分光測定するための小型 CVD 装置を構築した。その装置の模式図を図 3.4 に示す。市販の顕微鏡用加熱装置を改造し、顕微ラマン分光装置の顕微鏡試料台に設置できる反応槽とし、その中に炭素源としてアルコールを制御性よく導入できるガス系を装備した。光ファイバを用いずに直接観察しているため、微弱なラマン信号を高効率で検出可能である。また試料温度は室温から 1100°C まで対応可能である。

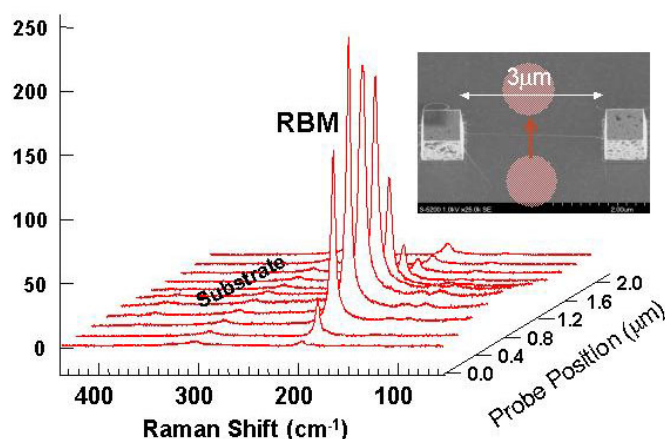


図 3.2: 単一架橋 CNT から観測された RBM 領域のラマンスペクトル

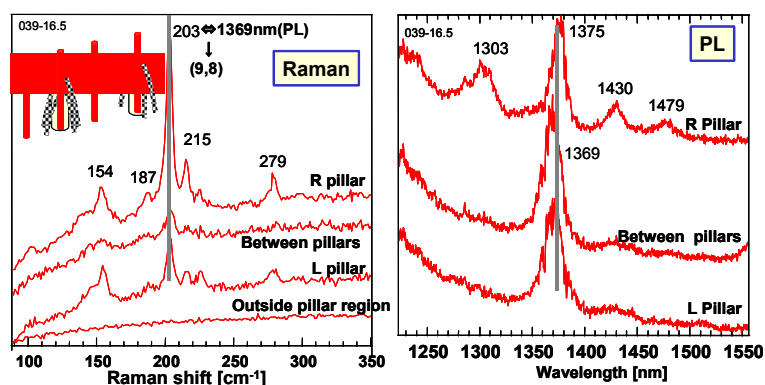
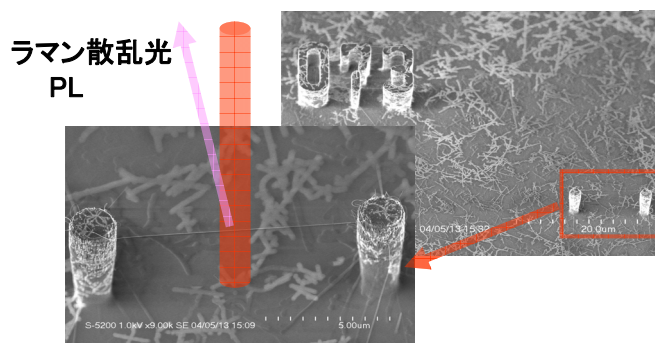


図 3.3: 単一架橋単層ナノチューブから観測されたラマンおよび PL スペクトル。両者の対比からカイラリティの帰属や環境効果の検証が可能となる。

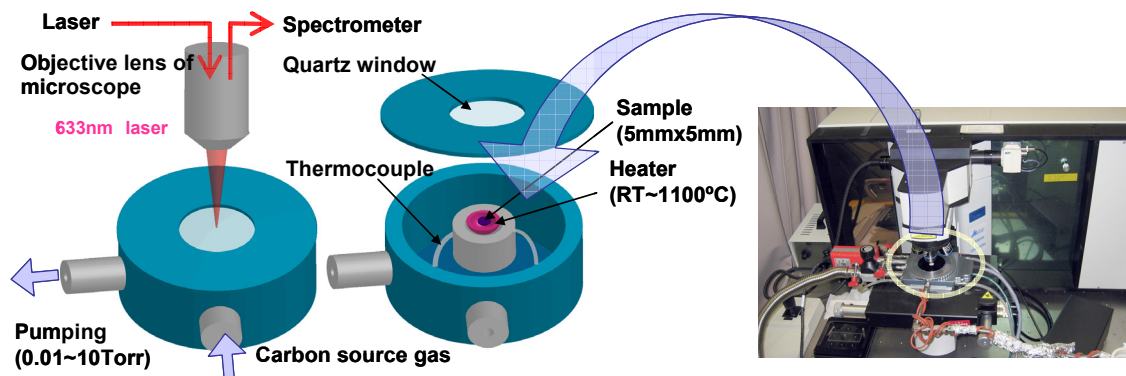


図 3.4: CNT 成長過程のその場ラマン測定用 CVD 装置と顕微ラマン分光器への設置状況。通常のラマン分光測定と全く同様にしてその場観察が可能である。炭素源のアルコールはマスフローコントローラにより精密に流量制御される。

図 3.5 は本装置を用いて測定された CVD 成長過程のその場ラマンスペクトルである。カイラリティに敏感な RBM 振動領域の成長時間依存性を示している。成長の進行と共に RBM 信号が出現し、その強度が増していく様子が明瞭に観察されている。スペクトルの挙動を詳細に検討すると、↑のピークは成長初期段階から出現しているのに対して、↓のピークは成長がある程度進行してから観測されている。また、RBM 信号の振動数は CNT 径に逆比例することから、成長の進行と共にカイラリティ分布は広がる傾向にあることがわかる。このような成長条件とカイラリティ分布の関連性は本測定によって初めて観測されたものである。

このような定性的なスペクトルの解析では、遅れて観測されるピークが単に成長速度が遅いのか、あるいは成長が開始するまでの時間(成長待機時間)が長いのかを判別することはできない。そこで、千足らによって提案された成長速度モデルに基づき、様々な成長条件において得られたその場ラマンスペクトルから、

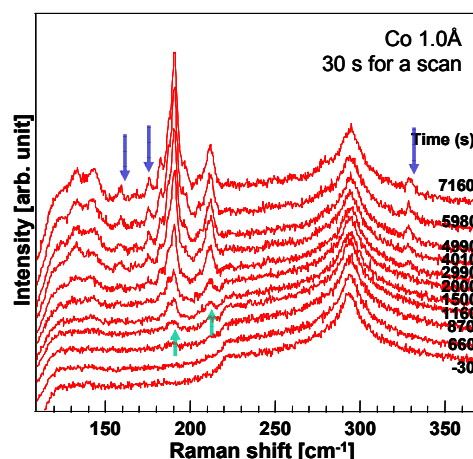


図 3.5: CNT 成長過程でその場観察された RBM 領域のラマンスペクトル。↑および↓はそれぞれ成長初期段階から出現するピークと遅れて出現するピークを示す。

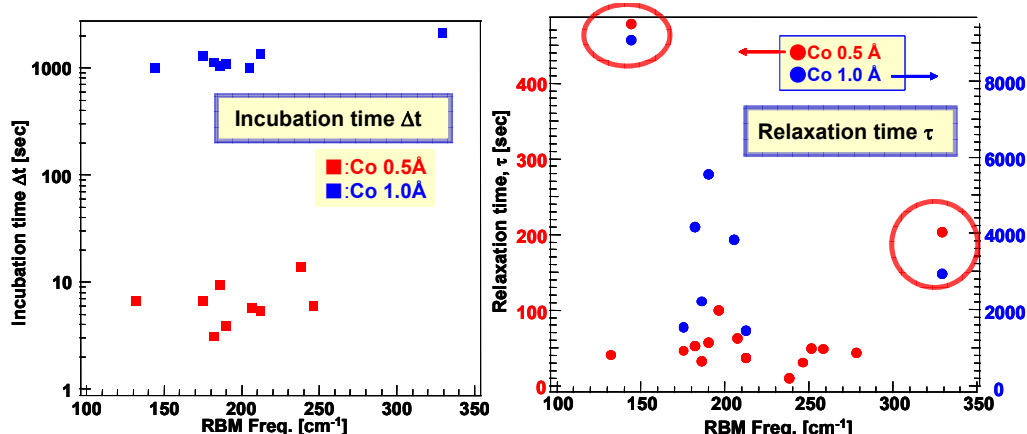


図 3.6: その場ラマンスペクトルの解析から得られた各 RBM 信号ごとの成長待機時間と緩和時間。成長待機時間はそれぞれの成長条件においてほぼ一定であるのに対して、緩和時間はカイラリティに強く依存することがわかる。

カイラリティ毎の成長待機時間 Δt と成長速度が飽和するまでの緩和時間 τ を解析した。その結果の一例を図 3.6 に示す。触媒である Co 蒸着膜の膜厚を $0.5 \text{ \AA}$ と $1.0 \text{ \AA}$ とした場合、成長待機時間は成長条件には依存するが、それぞれの成長条件ではほぼ一定であるのに対して、緩和時間は同一の成長条件においてもカイラリティに強く依存することがわかる。すなわち、成長の進行に伴うカイラリティ分布の拡大は、成長における緩和時間の相違に起因していることになる。以上のその場ラマンスペクトル解析と、比較的小さな触媒粒子からは細い CNT が成長するのに対して、比較的大きな触媒粒子からは広い径分布の CNT が成長するという AFM 観察結果を基にして得られた成長モデルを図 3.7 に示す。成長待機時間の成長条件依存性や成長速度の CNT 径依存性の原因については現時点では不明の点が多い。今後、サイズ制御触媒での成長速度解析やその場 TEM 観察などの結果も踏まえて更なる研究を進めることにより、カイラリティを決定する要因を抽出できるものと考えられる。

・生体関連物質を利用したサイズ制御触媒微粒子形成とカーボンナノチューブ径制御成長

蒸着膜を触媒とした CVD 成長では、その場ラマン観察の結果からもわかるように、蒸着膜が凝集してナノ微粒子を形成する過程も CVD 成長条件に依存している。触媒の凝集過程という成長では本質的ではない要因も考慮する必要があるため、成長条件と成長した CNT のカイラリティ分布の相関関係を直接的に解析することは困難であった。そこで、CVD 成長の触媒として従来の薄膜ではなくサイズの揃ったナノ微粒子を用いて、CNT の成長制御を行う研究を実施した。

CNT の成長触媒としては、図 3.8 に示すような直径 6-8 nm の鉄微粒子を内包したフェリチン蛋白質、Co 微粒子を内包した Co フェリチン、および直径 4 nm の鉄微粒子を内包した Dps 蛋白質を利用した。CNT は Si 熱酸化膜基板上にこれらのフェリチン類を均一に分散し、大気中熱処理によって蛋白質殻を除去後、CVD 法で成長した。

図 3.9 はフェリチンや Co フェリチンを触媒として CNT 成長後に観測された AFM 像とそれから得られる CNT・触媒径分布の解析結果である。サイズの大きな触媒からは太い CNT だけではなく、細い CNT も成長し、CNT 径は成長に寄与した触媒微粒子の径が上限となっていることが分かる。またフェリチンを用いた場合には、Fe 微粒子が基板へと沈み込む現象も透過型電子顕微鏡で確認されている。フェリチンより小さいサイズを持つ Dps 蛋白質を触媒とした場合でも、1 nm 程度の径の CNT が成長した。さらに、触媒粒子サイズが減少するにつれて、CNT 径は小さくなるばかりではなく、触媒サイズと CNT 径の差も小さくなる傾向にある。この結果は、より小さい触媒微粒子を均一に

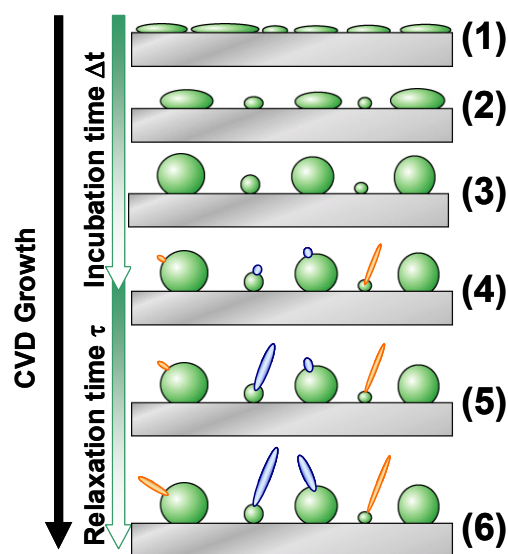


図 3.7: その場ラマンスペクトルの解析から得られた成長モデル。(1)→(3): 触媒微粒子形成、(4): 触媒微粒子中炭素濃度が一定の過飽和状態となり、CNT 初期核形成、(5): 比較的小さな微粒子から細い CNT が速い成長、(6): 比較的大きな微粒子から広い径分布の CNT が成長

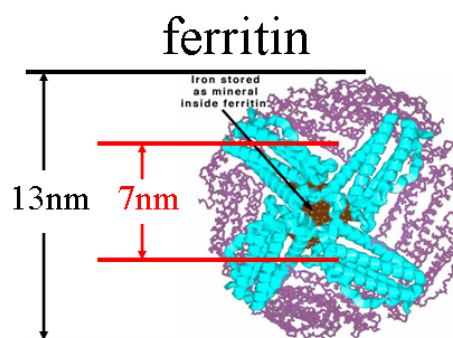


図 3.8: フェリチンの構造模式図。24 個の俵状のサブユニット(たんぱく質)から構成され、内部に 7 nm 程度の空洞が形成されている。この空洞に様々な物質を内包させることによりサイズの揃ったナノ微粒子を作製できる。

合成することが CNT の直径制御に結び付くことを示唆する。

そこで、平均 3nm 程度の微粒子から 1nm 程度の微粒子を形成する技術を開発した。方法は極めて単純であり、図 3.10 に示すように、不活性雰囲気下で高温アニールすることにより、アニール処理前よりも小さな径の微粒子を生成できる。この処理の条件を最適化することにより、1nm 程度の径を持つ Co 微粒子を作製できる。アニール処理によってこのように径が減少するのは、Co 微粒子の沈み込みや基板への拡散ではなく、Co 微粒子からの蒸発に起因することを確認している。

このように触媒サイズと CNT 径とのサイズ相関を調べることは、成長中の触媒の挙動の解明とともに、CNT の直径制御成長に大きく寄与すると考えられる。特にアニール処理法で得られた 1nm 程度にサイズの揃った触媒微粒子による CNT 径制御効果は今後検証していく必要がある。

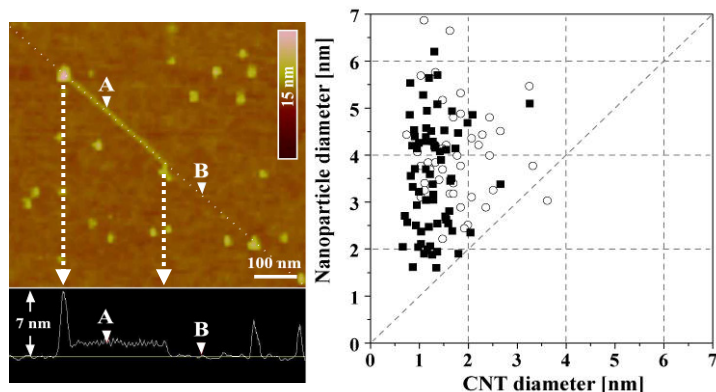


図 3.9:フェリチンを触媒として CNT を成長した試料の AFM 像とそれらから得られた触媒径と CNT 径の関係。AFM 像から 7nm 程度の大きな触媒粒子から 1.2nm 程度の細い CNT が成長していることがわかる。

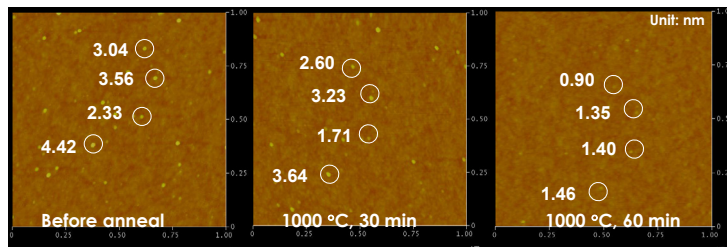


図 3.10:Co フェリチンから得られた Co 微粒子を高温アニール処理した時の AFM 像と観察された微粒子サイズ。アニール時間の制御により、1nm 径の微粒子を作製可能。

・カーボンナノチューブ成長表面のその場光電子分光計測

カイラリティの制御が CNT を用いたデバイス応用に向けた大きな課題となっている。そこで、カイラリティ制御の手法を開発する指針を得るために成長機構を解明することが本プロジェクトの大きな柱の一つである。CNT の成長機構において触媒となる金属微粒子が重要な役割を果たすが、その化学状態は、重要な情報であるにもかかわらず、電子顕微鏡観察や光学的な分光法では評価することが困難である。そこで、試料の化学状態が未知である場合に、その化学状態の解明に最も強力な分析手法となる光電子分光を用いて CVD 成長表面のその場化学状態分析を進めた。

ここで、成長後に試料を大気に曝してしまうと酸化反応や表面汚染の影響で正確な分析が不可能となる。そのため、成長後に大気にさらすことなくそのままの状態での測定することが必須となる。しかしながら、常圧に近い雰囲気が必要な CNT の気相成長と超高真空が必要である光電子分光では非常に親和性が良くない。そこで、比較的低い圧力での CNT の成長条件を見つけることを最初の課題とした。そして、成長原料ガスにエタノールを、触媒金属に Co を選択することによって 10^{-2} Torr 台での成長を実現した。これにより、同一装置内での CNT 成長と光電子分光測定が可能になり、CNT 成長後の触媒金属微粒子の化学状態を明らかにした。

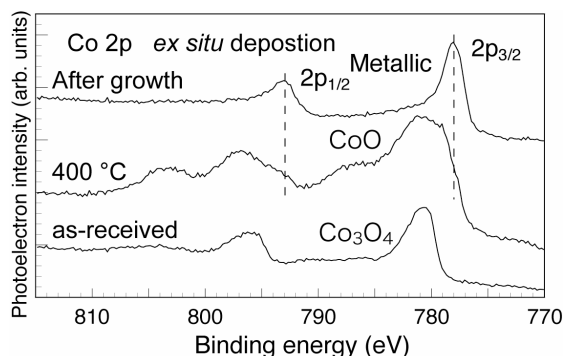


図 3.11:酸化した Co を用いた場合における成長前後の Co2p 光電子スペクトル。CNT 成長によって酸化した触媒微粒子は還元されて金属状態となる。

触媒金属である Co 膜を堆積後、大気に曝すことにより酸化した膜を用いる通常の成長プロセス(ex situ deposition)において、各過程で観測された Co の内殻光電子スペクトルを図 3.11 に示した。加熱途中を経て CNT の成長後に至る間に Co_3O_4 から CoO に変化した後、成長後には完全に還元されて金属状態になることが分かる。一方、蒸着膜形成から成長まで大気に曝さず真空一貫で CNT を成長した場合(図 3.12; in situ

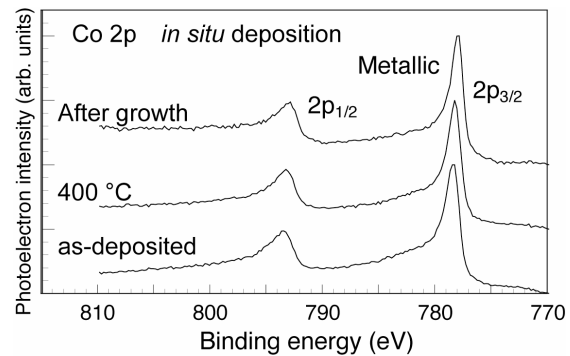


図 3.12: 真空一貫プロセスで金属状の Co を用いた場合における成長前後の Co2p 光電子スペクトル。成長後においても金属状態を維持している。

deposition) には、終始金属状態を維持しており、炭化物の形成は検出されないことが分かった。即ち CNT の CVD 成長において最終的に安定な触媒微粒子の状態は金属状態であることを意味する。これは、触媒金属の炭化を必要とする成長モデルは不適當であることを示唆している。また、通常プロセスよりも真空一貫プロセスで成長した方が高い CNT の収率が得られた。この時、炭素の内殻光電子の解析から、図 3.13 に示すように真空一貫プロセスの場合に多くの炭素が分解・堆積していることが分かった。この結果は、均一な金属 Co 微粒子が持つ高い原料ガス分解能力が収率を高めていることを表すとともに、金属微粒子に取り込まれない炭素が大量に表面に存在していることを示している。

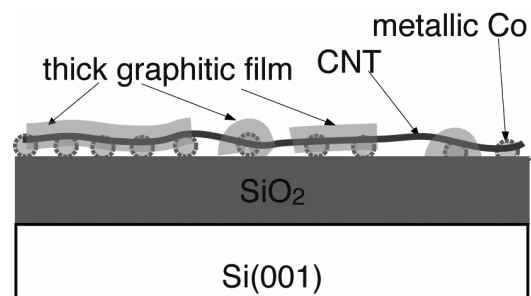


図 3.13: 成長後の表面状態の模式図。

これは SEM による表面形状観察とも一致している。以上のように光電子分光以外の手段ではモニターが困難な CNT 成長時における触媒の化学状態に関する情報を得ることが可能になり、化学状態分析が成長機構絞り込みに向けて重要であり、大きく前進しうることが示した。

・カーボンナノチューブの低エネルギー損傷・回復現象と機能化

CNT の形状・構造観察には透過型電子顕微鏡 (TEM) や走査型電子顕微鏡 (SEM) が広く用いられている。TEM では一般にナノチューブのノックオン損傷の閾値 (86 keV) 以上のエネルギーを持つ電子線が用いられており、また TEM 自体が非常に高い空間分解能を持つため、電子線照射によるナノチューブの損傷が容易に観測される。一方、SEM ではこの閾値より遙かに低いエネルギーの電子線が用いられるため、ナノチューブへの損傷は一般に意識されていなかった。しかしながら、本プロジェクトの研究遂行において、SEM 観察により CNT の光学スペクトルや電気特性が大きく変化する現象が認められた。そこで、低エネルギー電子線照射による CNT 構造・物性への影響を詳細に検討することとした。

図 3.14 は CNT への電子線照射前後に得られたラマンスペクトルを対比したものである。ノックオン損傷の閾値よりも十分低いエネルギーであるにもかかわらず、RBM 領域のラマン信号が明確に減衰し、欠陥に由来する D バンドの強度が増大していることがわかる。これは電子線により CNT が損傷を受け、電子構造が

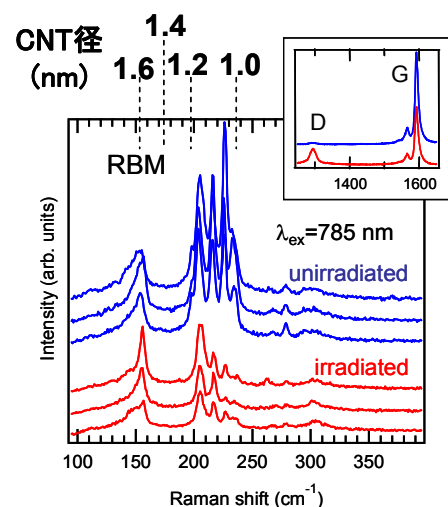


図 3.14: CNT に室温で電子線 (20keV, $6.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) を照射した際のラマンスペクトル変化。

変化したことを示している。しかも、RBM 信号強度は、細い(RBM 振動数が大きい)CNT ほど著しく減少していることも見て取れる。これは、細い CNT ほど電子線による損傷を受けやすいことを示している。

同様の損傷は低エネルギー電子線だけではなく、光の照射によっても引き起こされる。図15に白色シンクロトロン放射光照射前後のナノチューブのラマンスペクトルを示す。白色光には主に真空紫外光から1 keV 以下の軟 X 線まで幅広いエネルギー領域の光が含まれている。照射によりラマン信号強度は減少し、D バンド強度も増大する。これらの特徴は、電子照射後に観測されるものと同様であり、SWNT が光照射により損傷を受けたことを示している。なお、この場合照射は超高真空中で行われていることから、ここで観測された損傷は周辺ガスの影響ではなく、光や電子線照射によって引き起こされたことがわかる。また、損傷形成の照射光エネルギー依存性から、損傷が形成される最低の閾エネルギーは 6eV 程度であることも判明している。さらに、図 3.15 に示すように、損傷を受けた CNT を 900℃でアニールすると、損傷が回復して、ほぼ元の状態のスペクトルが得られる。このようにラマンスペクトルが回復することは、低エネルギー照射損傷において、これまでに知られている高エネルギー電子によるノックオン損傷や電子線で生成されたガスラジカルによる損傷とは異なり、炭素原子数は基本的に保存されていることを示している。

アニールによって損傷が回復する現象は CNT の

電気伝導度測定でも観測されている。図 3.16 は回復過程を SEM 中でその場計測した結果である。電子線照射による損傷と回復現象の観察を真空中で一貫して行う場合、損傷の回復は室温においても観測される。回復過程速度の解析から、回復過程の活性化エネルギーは 1eV と見積もられる。

以上の実験結果から導かれる低エネルギー照射損傷形成と回復過程の模式的エネルギーダイアグラムを図 3.17 に示す。損傷形成の活性化エネルギーは CNT のカイラリティに寄らずほぼ一定であり、6eV 程度のエネルギーを要する。回復過程には CNT 径依存性があり、細い CNT ほど回復に要するエネルギーは大きくなる。電子線や光照射後に観測される損傷はこれらの競合する損傷形成と回復過程の結果であり、回復の遅い細い CNT ほど大きな損傷をうけることになる。欠陥回復の活性化エネルギーの CNT 径依存性は、ナノチューブの側壁(曲がったグラフェンシート)に内包されている歪エネルギーに起因するものと考えている。電子、あるいは光による励起によって SWNT 中の C-C 結合が切断され、生じたダンダリング

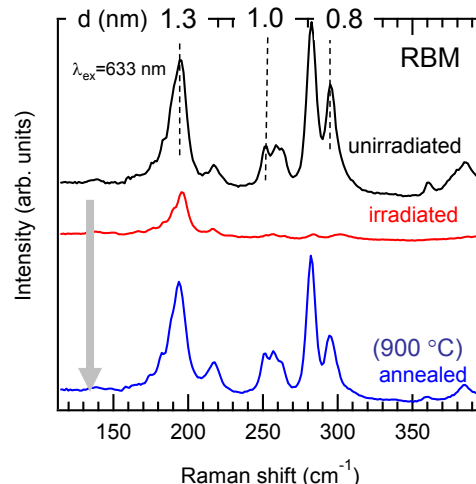


図 3.15: CNT に室温での VUV 光照射 ($8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$) およびアニール処理を施した際のラマンスペクトル変化。

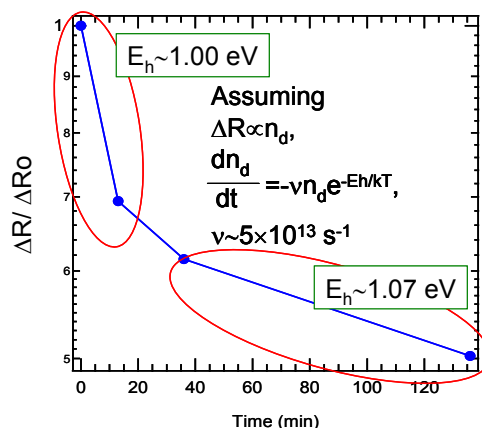


図 3.16: 電子線で損傷を与えた CNT の電気伝導度のその場測定結果。室温においても伝導度は回復し、その活性化エネルギーは 1eV 程度である。

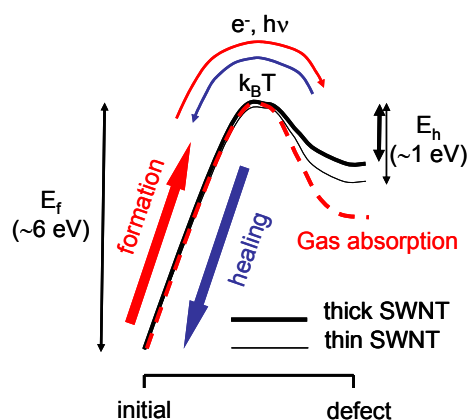


図 3.17: CNT の損傷形成・回復過程のエネルギー模式図。

ボンドが歪エネルギーの解放によって準安定状態として保持されて、損傷として観測されている。グラフェンシート中のC-C結合のエネルギーは高々数 eVであり、本研究で用いた電子や光子のエネルギーはこれを切断するのに十分な大きさである。C 原子数は保存されており、切れたボンドが再結合すれば欠陥が消滅するため、損傷と回復の可逆性を説明できる。太いナノチューブほど欠陥生成に伴う歪エネルギーの緩和が小さくなるため欠陥修復の活性化エネルギーは小さくなる。従って MWNT 等の太いナノチューブではたとえ C-C 結合がいったん切断されても、熱エネルギーによってすぐに修復されるため損傷は起こりにくい。損傷後の回復も欠陥修復の活性化エネルギーの小さい太いナノチューブから優先的に起こる。このように、損傷と回復の直径依存性をうまく説明できる。

欠陥を CNT デバイス特性変調に利用した例を図 3.18 に示す。照射前は金属的な特性であったものが、電子線を照射することにより p 型の半導体としてのデバイス特性を示すようになっており、カイラリティや直径を変化させたことと電気的には同等の効果が得られている。このように、低エネルギー照射によって形成した欠陥の制御技術は、欠陥をバリアとして利用した FET 構造でのキャリア輸送特性制御や、反応の起点として利用した様々な分子による修飾など、CNT 機能化へと結びつく成果である。

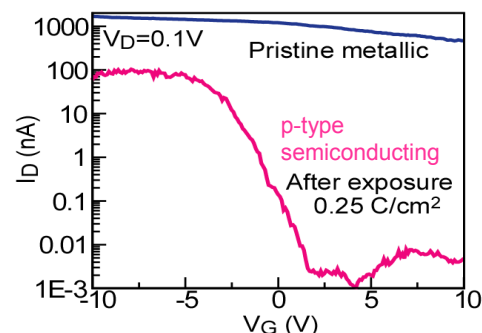


図 3.18: 低エネルギー照射損傷による CNT-FET 特性の金属-半導体転移

(2)研究成果の今後期待される効果

本研究によって、ラマン分光法による環境効果を考慮したカイラリティの帰属や CVD 成長過程のカイラリティ識別その場観察が可能となった。ラマンスペクトルをはじめとする振動スペクトルには、測定対象の分子構造に関する豊富な情報が含まれている。CNTのラマンスペクトルから、カイラリティだけではなく、電子構造や結晶性、さらには周辺環境に関する情報を得ることができるはずであるが、実際に具体的な構造に対応付けて解釈することは必ずしも容易ではない。本研究の成果は、ラマンスペクトルによるカイラリティ帰属の妥当性を担保するものであり、その場観察結果を解釈する上での基盤技術となる。さらに、成長途中にある CNT の構造をカイラリティを分別して評価することは、電子顕微鏡観察や光電子分光法などでは困難であり、本研究の大きな特長となっている。カイラリティの制御はカーボンナノチューブ成長研究の究極的な目標のひとつであり、今後はその目標達成に向けて、サファイアなどの結晶基板上成長や本間グループにおいて開発された結晶性触媒からの成長過程の解析へと本成果を展開していく。CNT の触媒上での核形成から成長初期段階について、カイラリティを分別した速度論的解析を進め、本プロジェクトの成果であるその場電子顕微鏡観察技術による結果と併せることにより、カイラリティ決定要因を明らかにして、その制御に向けた指針を打ち立てていく。

CNT は、その一次元的な構造に由来する優れた電気的・機械的特性のため、シリコンに続く次世代半導体材料として期待されている。しかしながら構造制御方法が未だ確立しておらず、それがCNTの実用ナノデバイス応用に向けた研究の大きな障害となっている。この問題を解決するための指針を確立することは、科学技術的にも社会的にも大きなインパクトを持つと考えられる。

低エネルギー照射による損傷形成と回復現象の研究から、電子線照射によりCNTは損傷を受けるが、回復過程が十分に早い高温では欠陥の蓄積はきわめて小さいことが示された。これは、本プロジェクトで進めている電子顕微鏡によるCNT成長過程その場観察において、電子線による損傷の影響は無視できることを示しており、観察結果の妥当性をサポートするものである。今後は、走査トンネル顕微鏡技術や理論家の助けを借りて欠陥構造の同定や微視的生成機構の解明を進めていく。さらに、これまで“邪魔者”扱いされていた欠陥を積極的にCNTの機能化に利用する欠陥エンジニアリングへの展開を図る。欠陥構造と電子とホールへのバリア効果との関連性を明らかにして、欠陥によるキャリア輸送特性制御を実現すると共に、欠陥を利用した量子ドット構造の室温動作単電子デバイスへの応用を進める。これらは、CNTカイラリティによる物性制御

3. 4 光学測定を用いたカイラリティ評価およびその場計測 (NRC-IMS Finnie グループ)

(1)研究実施内容及び成果

単一単層 CNT の架橋構造の光学活性を利用して、CNT の新しい光学的評価技術を研究した。架橋 CNT の光学活性については、Finnie と本間の共同研究で見いだされたものであり、本間グループ、小林グループでも研究を行っているが、本グループは半導体材料のフォトルミネッセンス (PL)に関する豊富な研究実績に基づき、先進的な評価技術の開発を担った。

・PLイメージング法によるカイラリティ評価

PL の検出に二次元検出器を用いることにより空間分解能を付与すると、長い SWCNT に沿った蛍光を得ることができる。これにより、CNT の欠陥や構造変化に関する情報を得ることができる。図 4.1 に評価用試料の構造と、装置構成を示す。Si 基板上の SiO₂ パタン間に架橋 CNT を形成した。PL 測定において、架橋 CNT の下にある Si 基板からの弱い発光が測定のバックグラウンドを高めるのを防げため、Pt で Si 上をコーティングしてある。試料からの発光は、図 4.1(b)中の 2 をミラーとすることにより、近赤外領域(波長 1~1.6 μm)に感度を持つ InGaAs カメラによって、図 4.2(a)のような近赤外発光の像を得ることができる。また、図 4.1(b)中の 2 を回折格子に変えることにより、図 4.2(b)のように近赤外のスペクトルを得ることができる。さらに、レーザ光の波長を変えることにより、特定のカイラリティの CNT の発光を励起できる。この測定システムを使ったカイラリティ評価の例を図 4.3 に示す。これは約 50 μm の長さの CNT を 760 nm の波長の光で励起した場合(a)と、810 nm の波長の光で励起した場合(b)の(分光しない)蛍光強度像が図 4.3(a)である。それぞれの励起波長で、強く発光する位置が変化していることがわかる。それぞれに相当する蛍光波長(c)を見ると、1.35 μm 、1.47 μm と波長が変化していることがわかる。これらの情報から、図の上半分は直径 1.11 nm の (10,6)ナノチューブ、下半分は直径 1.20 nm の(12,5)ナノチューブと同定でき、成長の途中でカイラリティが変化したものと判断される。このように、CNT の構造変化がわかるばかりでなく、成長中にカイラリティの変化を引き起こす現象が起きたことを知ることができる。

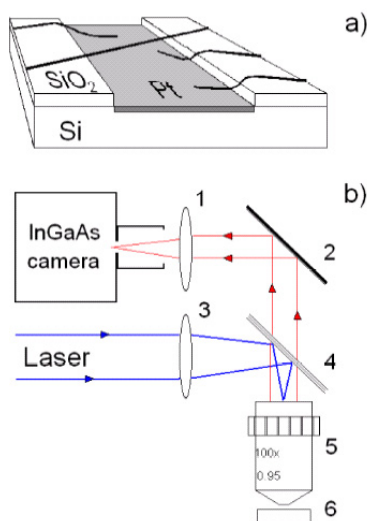


図 4.1 PL イメージング法
(a)試料構造、(b)測定系

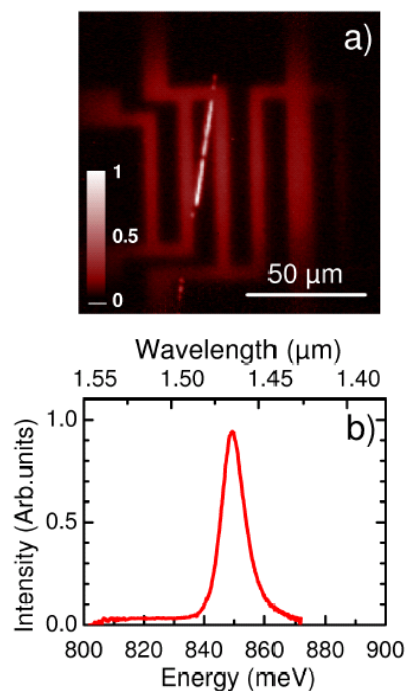


図 4.2 架橋 CNT2の(a)PL イメージと(b)スペクトル

・ラマンイメージング法を用いた CVD 成長その場観察

PL法はカイラリティ評価の有力な手段であるが、その場観察の観点では、CNT の発光波長が近赤外にあるため、試料からの熱輻射の影響を受け高温観察ができないという問題がある。一方、可視領域の波長を用いることのできるラマン分光では、CVD 温度である 800~900°C の温度領域でも CNT からのシグナルを捉えることができる。測定系は、図 4.1(b) で InGaAs カメラを可視領域に感度を持つ CCD に変えて行った。励起光源は 405 nm の紫ダイオードレーザで、波長フィルターを組み合わせることにより、CNT の D バンドと G バンドを含む 423~434 nm ($1090 \sim 1662 \text{ cm}^{-1}$) の光を検出した。図 4.4(a) は、試料温度を 30~875°C まで変化させたときのラマンイメージとスペクトルである。(b) の SEM 像に見られる A, B, C, D の 4 本の架橋 CNT をラマン像として認識できる。これは、架橋 CNT からのラマン強度が強いためである。温度の上昇と共にラマン強度が減少するため、像としての観察が困難になる。それでも、875°C において、(b) で A, B と表示されている CNT を識別することができる。一方、C, D と表示されている CNT は 775°C 以上では見られない。この温度依存性の違いは、カイラリティによるものと解釈される。

850°C でのエタノール CVD において、その場ラマンイメージングにより捉えた架橋 CNT の形成を図 4.5 に示す。左側のパネルは (i) 258 s から (ii) 259 s のビデオフレーム (積算時間 0.7 s) の間において架橋 CNT が形成されたことを示している。(iii) はその直後の 10 s 間の積算イメージである。(iv) はこの CNT を含む領域のラマン強度の時間変化で、258 s から 259 s の間で急激にラマン強度が増加していることがわかる。パターン間隔は 7 μm である

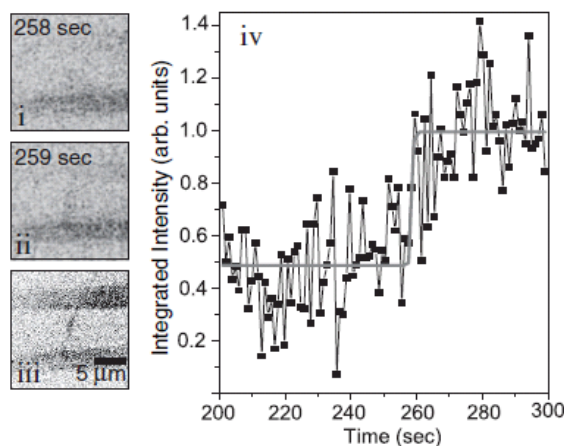


図 4.5 CVD 中における架橋 CNT 形成過程のラマン像と強度変化

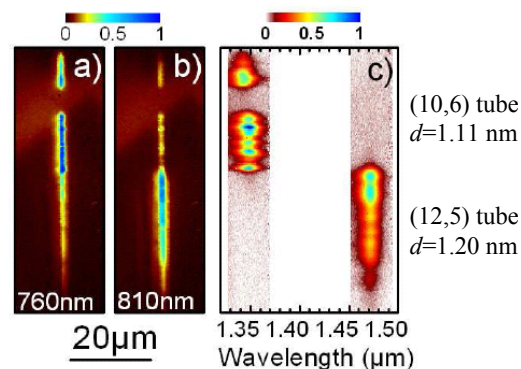


図 4.3 孤立架橋 CNT の PL イメージング

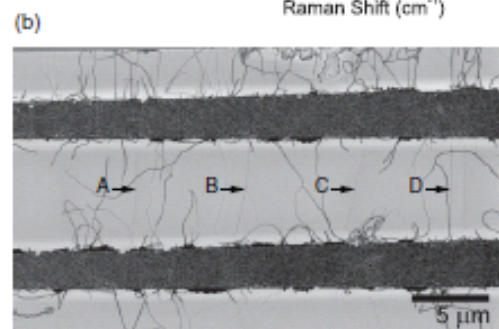
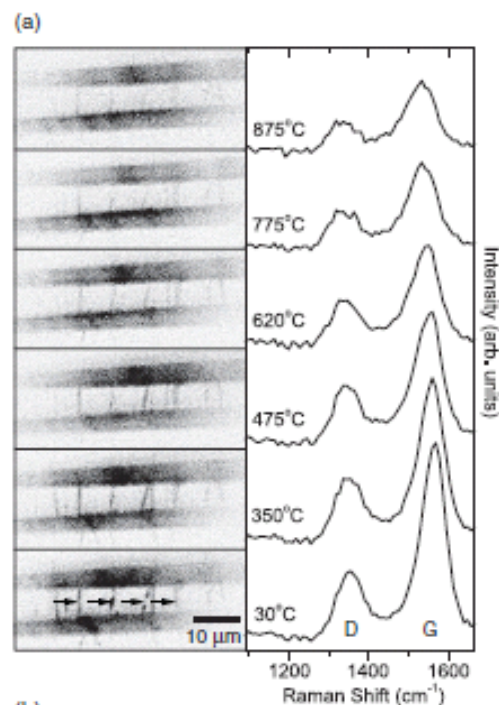


図 4.4 架橋 CNT のラマンイメージング
(a) イメージ及びスペクトルの温度依存性
(b) 対応する SEM 像

ので、この場合の架橋 CNT の成長速度は $7\text{ }\mu\text{m/s}$ 以上ということになる。このように、架橋 CNT の形成過程を初めてラマンイメージとして捉えることができた。図 1.2 に比べて成長速度が大きいのは、エタノール圧力が通常のエタノール CVD と同じ 10 Torr 程度であるためである。

・類似研究との比較

CNT の PL に関する研究がこの数年間で急増しているが、本研究グループが架橋単層 CNT の発光を初めて報告しており、本チームの架橋単層 CNT 制御技術に立脚した質の高い研究は、現在のところ他の追従を許していない。

(2)研究成果の今後期待される効果

PL イメージング法は、長い CNT のカイラリティ評価に適した方法である。最近、長い CNT の成長中に温度を変化することによりカイラリティを変えられることが報告された。このような CNT の評価は、本手法を用いることにより容易に行うことができる。原理的には試料ステージの走査によっても同様な情報を得ることができるものの、スループットには大きな違いがある。また、ラマンイメージング法は、CVD その場観察に適用可能であることが、本研究により実証された。現時点では D バンドと G バンド領域の像であるが、CNT の直径に依存した RBM シグナルを像として観察できれば、直径依存した成長過程、さらにはカイラリティ依存性を評価することが期待される。小林グループが成長中の RBM シグナルをスペクトルとし捉えられることを実証したので、適当な波長フィルタを用いることにより、1 本の CNT の RBM 像を観察することも不可能ではない。したがって、これらのイメージング手法は、CNT 成長機構の解明ならびにカイラリティ依存の成長のモニタ法として、発展が期待される。

3. 5 CNT の多層化・高機能化ネットワーク形成と特性制御(横浜国立大学 荻野グループ)

(1)研究実施内容及び成果

(1-1) 目標

本グループの担当する研究は、カーボンナノチューブ(以下、CNT と記載)の高機能化と物性制御である。本間グループ、竹田グループ、小林グループで明らかにされた CNT 成長の機構解明に基づき、CNT を骨格とする高次ナノ構造体の形成と新しい物性の発現、及び新しい応用分野を開拓することである。

CNT のエレクトロニクス応用では、これまでCNT 電界効果トランジスタ(CNT-FET)やナノ配線等が研究されてきた。CNT-FET 研究では、CNT を Si に替わる材料として位置付け、単体としての特性向上が図られ、一方、配線応用においてはビア配線への応用等が研究されてきた。しかし、CNT は形状それ自体がナノ配線であると同時に、単なる導電体ではない金属と異なり、配線中に pn 接合を配した方向性配線や、強靱かつ柔軟な性質を利用した機械スイッチなど、機能を備えた配線としての応用が将来的に有望である。本研究では、将来の機能化ナノ配線を一つのモデルとして、その基板技術を開拓することを中心軸として CNT 機能化を開始した。

一方、近年バイオテクノロジーとナノテクノロジーの融合分野への関心が急速に高まっている。CNT は生体分子と同じスケールであり、バイオテクノロジーへの応用が期待される。本研究開始当初は、機能化配線の適用分野として電子デバイス、特に LSI への応用を主体に考えたが、完成度の高い Si 集積回路に適用されるのはかなり先のこととなるので、機能化配線の適用としてナノバイオテクノロジーへ課題の中心軸をシフトさせた。図 5.1 は、バイオナノテクノロジーへ適用したシステム概念図で、Si 集積システム、CNT 信号伝達系、生体分子を用いた CNT の接続と高次構造形成、タンパク質分子とその活性を維持するための基板に支持された脂質二分子膜からなる。本研究では、脂質二分子膜形成等、融合に必要な基盤技術の開拓も並行して進めた。

以上の目標を達成する手段として、走査プローブ顕微鏡(SPM)を中心とした。本間チームにおいては、走査型電子顕微鏡と透過電子顕微鏡による成長その場観察が主要課題となっているが、機能化では分子マニピュレーションが必須になると考え、単分子操作が可能な SPM を選択した。

(1-2) 実施内容

機能付与は、CNT の 高次三次元ネットワークの形成と CNT の物性制御からなる。三次元ネットワークの形成として、化学気相成長(以下、CVD と記載)と CNT 表面の化学修飾による溶液分散とを用いた。CVD 法は、基板上の CNT の密度や位置を制御することができるため、ナノスケール配線形成に適した方法である。一方、外部で量産した CNT を基板上に分散させる方法は、溶液中で機能化した CNT を薄膜として形成できることから、機能性シートとして応用が期待される。CNT の物性制御に対しては、CNT 自体の性質の制御と CNT 表面の修飾

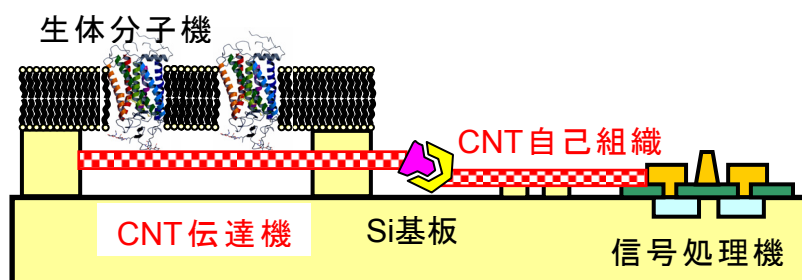


図 5.1 本研究の目標とする Si/CNT/生体機能集積構造

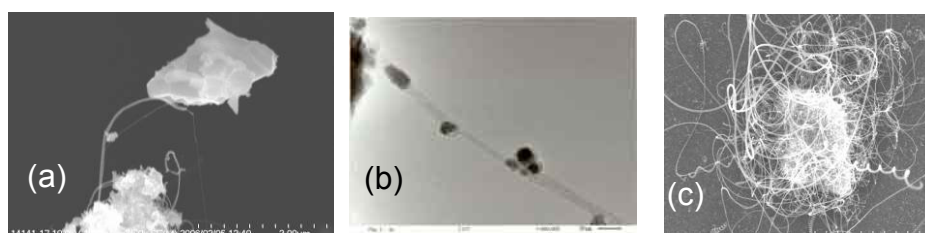


図 5.2 CVD により成長させた CNT
(a)垂直成長、(b)接木、(c)カーボンナノコイル

技術とに大別される。本研究では、機能化の目標の重点をバイオ応用へシフトしたので、後者の CNT 表面処理技術と溶液分散技術の開拓を主要課題とした。生体分子による機能付与では、溶液中での操作と観察が要求されるため、CNT と生体分子の SPM マニピュレーション技術を立ち上げた。応用においては、表面の化学状態の観察と制御に基づき、CNT の吸着能力を用いた生体内有害物質の除去へと展開した。

以上の経過から、本報告では、【1】 CNT の CVD 成長、【2】 CNT 表面の化学修飾と分散、【3】 CNT の SPM マニピュレーション、【4】 表面制御と応用技術、【5】 生体分子集積への基礎検討、に分けて研究成果を記述する。

【1】 化学気相成長による CNT ネットワーク形成

CNT ネットワークは、触媒を用いる化学気相成長により形成した。触媒は Fe、Co、または Ni の微粒子であり、水和物から多孔質物質にしみ込ませて微粒子化する方法と、真空蒸着薄膜の熱処理によって微粒子化する方法との 2 種類を用いた。以下、主要な結果を列記する。

・CNT の架橋成長と垂直成長

凹凸パターン間を架橋する CNT の成長を確認した。これは、新しい研究室を立ち上げるためのキャッチアップである。三次元 CNT ネットワーク形成には基板に垂直に成長する CNT が必要である。垂直電界を印加する試料ホルダーを作製し、垂直成長を確認した。この垂直の力は触媒担持物質を持ち上げるほど強力である。(図 5.2(a))

・三次元ネットワーク形成へ向けた CNT の接木

予め架橋成長した CNT 上に Fe または Co を蒸着し、CNT 上の微粒子からさらに CNT を成長させることを試みた。図 5.2(b)に示すように、この手法では CNT の成長起点を空間中で観察できるため、他のどのような構成よりも成長機構を調べるのに有力である。

・カーボンナノコイルの成長

CVD 法では、不純物や触媒を選ぶことにより、カーボンナノコイルを成長させることもできる。従来知られていた In と Sn の添加においてナノコイルが成長することを確認したのに引き続き、Ni 触媒とアルコール CVD の組み合わせでナノコイルが成長することを見出した。図 5.2(c)に、Ni を触媒としたアルコール CVD によって成長させたナノコイルの走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を示す。

・触媒担持物質によるパターン制御

触媒微粒子の粒径を制御ため、LSI で用いられるポーラスシリカを用いて触媒を担持し、高密度の CNT 成長を実現した。また、本ポーラスシリカは溶液から作製するため、パターンニングが容易である。これは実用的に便利な方法である。

・カーボン複合ナノ材料の形成

カーบอนは、CNT のほかに同素体としてダイヤモンドがあり、さらに CNT と異なる形状を持つ材料として、カーボンナノウォール (CNW) がある。これらはそれぞれが特徴を持つ物性を有するため、複合化によって新たな機能が期待できる。図 5.3 は、CVD 内にホットフィラメントを入れて行ったときの例である。(a)はダイヤモンド薄膜、(b)は CNW、(c)は CNW が

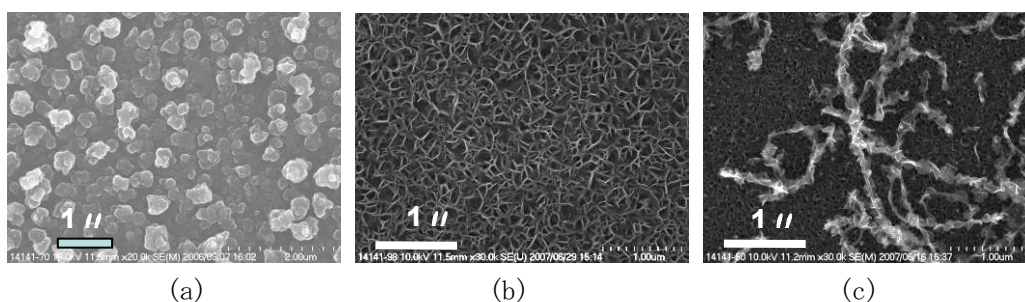


図 5.3 ホットフィラメントの支援によるカーボン系ナノ材料
(a) ダイヤモンド、(b) CNW、(c) CNW/CNT 複合材料

回りに成長した CNT である。(c)は、電子放出効率の高いフィラメント、または表面積比の高い材料として、新たな機能を有すると期待される。複合化は本研究のオリジナルである。

【2】 CNT 表面の化学修飾と分散

CNT はそのままでは水に溶けず、バンドルを形成している。外部で作製した CNT を、バンドルを解いて固体表面にシートとして展開するために、(a) CNT 間の凝集力を弱めるための CNT 表面処理、(b) 固体基板と CNT との付着力を強めるための基板表面処理、の二つのアプローチを採用した。(a)のアプローチでは、種々の有機分子を分散剤として試した結果、分散剤の構造として、(1) 両親媒性の構造であること、(2) イオン性のポリマーであること、(3) ベンゼン環などの π 電子が活用できる構造であること、が判明した。また、分散剤として短鎖 DNA は非常に優れていることも確認した。

(b)のアプローチは、本研究が最初の提案であり、親水疎水性の制御が重要な因子となる。CNT は疎水性であるので、基板を疎水化することで CNT との吸着力を増すことができる。図 5.4 は、疎水性 Si 基板(OTS, octadecyltrichlorosilane, をコーティングした基板)と、親水性 Si 基板(酸化膜)との比較を示す SEM 像である。ここで明らかなように、疎水性基板では基板上での再凝集が抑制されるため、均一性の良い分散膜が得られている。

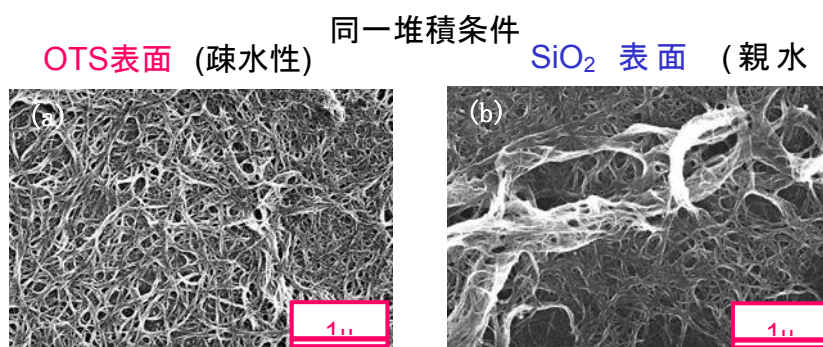


図 5.4 固体基板上での CNT 分散に及ぼす基板処理効果
(a) 疎水性基板、(b) 親水性基板。

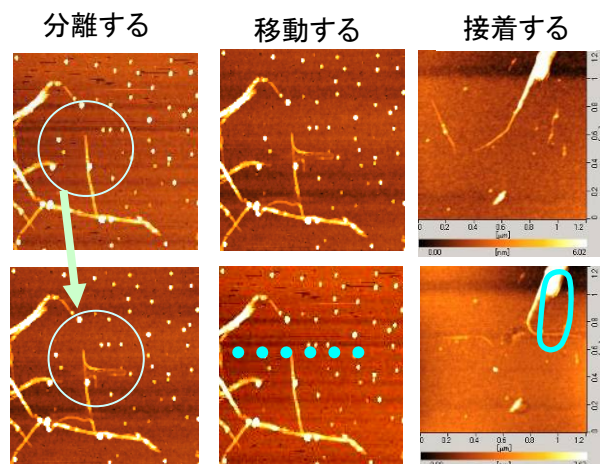


図 5.5 SPM による CNT の基本操作。バンドルから分離し、移動し、別の CNT へ接続する。

【3】CNT の SPM マニピュレーション

SPM による分子操作はスループットが悪いので直接応用には結びつかないが、機能付与の先行的な試みとして有力な手段である。CNT の SPM マニピュレーションを検討した結果、固体基板上的 CNT バンドルからの CNT の引き剥がし、CNT の移動・再配列、CNT の融合(バンドル化)、などの基本技術を確認した(図 5.5)。同時に、大気中の CNT 操作では摩擦が大きいため様々な構造体を作るのは困難であり、CNT と基板表面の界面制御が課題であることが判明した。この結果、CNT の高次構造を作製するのは液中が適しており、さらに、液中でそのような高次構造を形成する手段として、生体分子の特異的反応を用いることが有力であることが明らかになってきた。このため、溶液中での生体分子の付着力など、生体分子/基板表面の研究もテーマに追加した。

CNT は、力学的な応用が期待されている。機械ナノスイッチや生体細胞操作などへ適用する基礎技術として、架橋 CNT と SPM ティップの機械応答を計測した。図 5.6 に示すように、カンチレバーの振幅は、CNT との接触位置(たわみ)によって異なる。すなわち、振動するテ

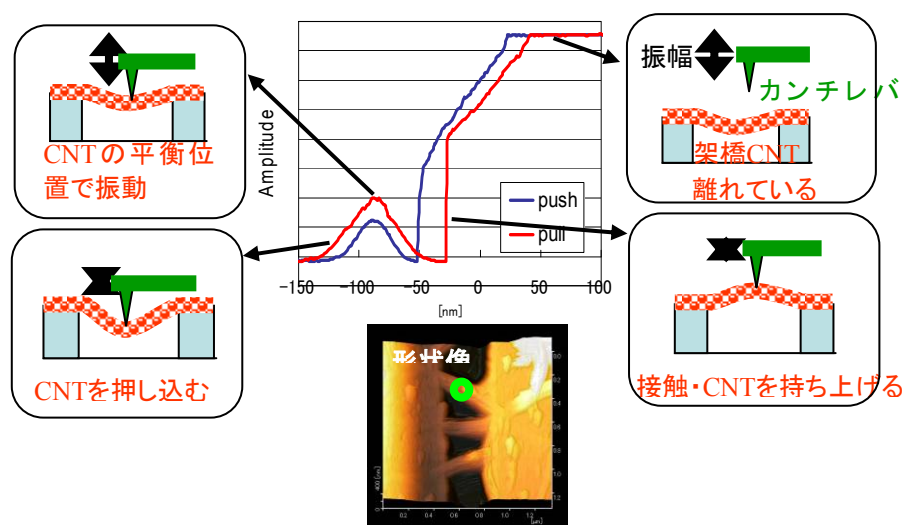


図 5.6 架橋 CNT 上で SPM ティップを接触させ、押し込んでいったときのカンチレバーの振幅と深さの関係(写真の AFM 像に対する実測)。グラフの縦軸はカンチレバーティップの振幅、横軸は深さである。

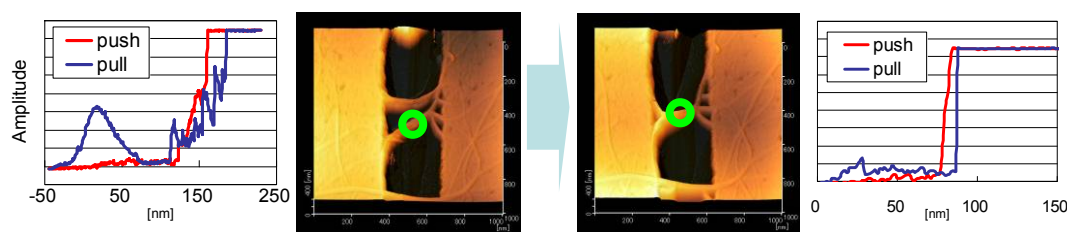


図 5.7 SPM による架橋した CNT バンドルの操作と機械的強さの改変

チップが架橋 CNT に近寄ると、最初は CNT をたたくために振幅は減少するが、CNT がチップに固定されると、CNT が上にたわむため振幅は急激に減少する。しかし、CNT の平衡位置付近まで押し込まれると、CNT は自由振動できるため振幅の極大を示す。さらに押し込むと振幅は減少し、CNT の反発力によって振動できなくなる。

SPM はこうした計測だけでなく、CNT 構造の力学特性のマニピュレーションも可能である。たとえば、図 5.7 の SPM 像で示すように CNT をバンドル化させると、張力が増しチップを強く固定する力が付与される。バンドル形成後は、平衡位置での振動が極めて小さくなっていることが、振幅と深さの関係から分かる。

環境制御とその場観察の観点から見た SPM の特徴は、溶液環境での操作・観察が可能なことである。すなわち、電子顕微鏡は成長のその場観察には非常に適しているが、溶液中の観察は事実上不可能である。CNT の機能化において応用上最も重要なのは分散制御と表面修飾である。上記の架橋 CNT の溶液中観察、溶液中でのバンドル操作、等は、溶液環境での CNT 機能化に必須の技術である。溶液中では SPM カンチレバーの Q 値が非常になくなることなどの問題はあったが、空気中とほぼ同等な観察とチップとの相互作用検出に成功した。また、溶液中では、カンチレバーで CNT を押し込んだ(引き上げた)ときの振幅の変化に特徴的な信号が得られた。これは、CNT バンドル同士(またはチップと CNT 間)の結合力が、溶液中では小さくなることに起因すると考えられる。このように、架橋 CNT を溶液中で観察し、チップとの相互作用を制御して CNT の機能化をその場観察できる技術を確認した。

以上のように、SPM による構造形成、力学特性制御への第一歩を踏み出したが、物性制御の応用へ向けてはこれからの課題である。

【4】表面制御と応用技術

CNT は、比表面積が大きく、ナノ表面を形成できるため、生体分子間反応の計測や吸着剤などへの応用が期待される。本研究では、CNT へのタンパク質分子吸着と、そのナノスケールパターニングを行った。表面状態の計測については赤外分光を計測手段として選択し、赤外反射吸収分光法(IRAS)と全反射赤外分光法とを立ち上げた。これを用いて、CNT 表面処理と生体分子吸着の計測を行った。

図 5.8(a)は、CNT 表面を酸処理し、タンパク質分子を吸着させたときの IRAS スペクトルである。酸処理によって吸着量が増していることが分かる。この応用として、電子線照射による局所反応場形成を提案した。原理は、電子線により欠陥を導入し、適当な条件で表面処理することにより、電子線照射部分だけ反応性を高めることである。実験では、Si 基板上に CNT を載せ、一部の領域(図 5.8 では上半分の領域)に SEM 内で電子線を照射したのち酸処理を行い、酸処理によって生じた反応サイトに蛍光色素を含む複合分子を反応させた。図 5.8(b)は以上のプロセスを経た後の光学顕微鏡像であり、図 5.8(c)は(b)と同じ領域の蛍光顕微鏡像である。図から明らかなように、電子線照射部分のみ蛍光が観察されることから、電子線による反応サイト形成が確認される。現在はまだこのような検証実験段階であるが、原理的に CNT 径と電子線スポット径で決まるナノ反応場の形成が可能であり、CNT が生体分子と同一スケールを持つことから、単分子反応場の形成の可能性が示されたと

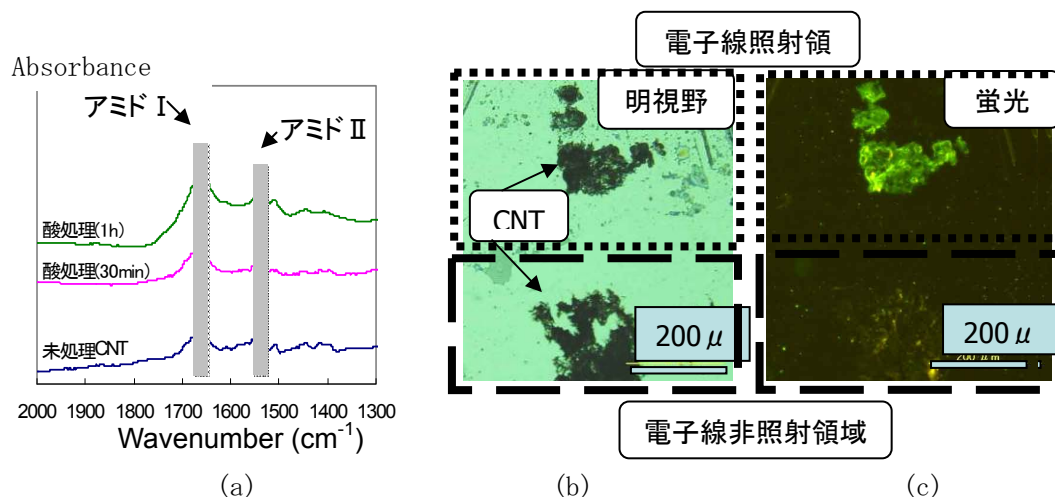


図 5.8 (a)CNT 表面に吸着したタンパク質分子の吸着量の酸処理依存性、(b) 固体基板上的 CNT の一部に電子線を照射し、酸処理した後に蛍光色素を反応させたときの光学顕微鏡像、(c) 同じ部分の蛍光像。

いえる。今後は、架橋 CNT などと組合わせて単分子吸着場を形成し、SPM によるマニピュレーションと合わせて、単分子反応検出へと展開する。

このような分子吸着の特性の医療応用として、血液中の有害物質除去における吸着剤を開発中である。血液中のビリルビンなどの有害物質除去には血漿吸着法が有望であるが、効率の良い吸着剤の開発が望まれている。これまでの吸着特性評価では、CNT によって吸着特性はかなり異なるが、CNT の形態と表面処理を適切に選択することにより高効率の吸着剤開発が可能なことを示した。

血漿吸着法では、一般に、有害物質はアルブミンなどのタンパク質に吸着して除去される。この場合、有害物質だけでなく本来は除去したくないタンパク質も同時に除去される。したがって、タンパク質の選択的吸着は重要な課題である。この基礎検討として、我々の発見した疎水性/親水性ドメイン構造を付与したサファイア基板表面を用い、各種のタンパク質分子を吸着する実験を行った。その結果、タンパク質分子はどのようなものであっても同じ吸着パターンを示すのではなく、親水性ドメインに吸着しやすいもの、疎水性ドメインに吸着しやすいものがあることを見出した。この選択性の理由は検討中であるが、CNT 表面に選択的に特定のタンパク質分子のみを吸着できる可能性が見出せたと言える。

【5】生体分子集積への基礎検討

図 5.1 に示す集積構造の実現へ向け、これまで述べてきた CNT 三次元ネットワーク形成、CNT シート形成、SPM による CNT 操作、CNT 表面状態制御、に加え、下記の検討を進めてきた。これらは、いずれは CNT と合体するが、現段階では分離した形で進めているので、関連のみ簡単に記す。

・生体分子マニピュレーション

生体/CNT の高次構造を固体基板上へ集積するには、生体分子と固体基板との界面制御が主要課題である。本研究では、タンパク質分子の固体基板への付着力を計測する技術을立ち上げ、疎水/親水性表面で分子吸着や化学結合による分子固定の吸着力を評価し、生体との親和性に優れた表面形成の指針を明らかにした。

・脂質二分子膜形成

固体基板上に生体分子を機能を失うことなく移すためには、細胞膜を作る脂質二分子膜の形成が必須である。カーボンナノチューブと生体分子の融合へ向けて脂質二分子膜の形

成に及ぼす基板構造の効果を明らかにし、集積構造作製への基盤技術を立ち上げた。生体分子は溶液中でのみ活性を維持し、特に創薬で重要な膜タンパク質では脂質二重膜に埋め込まれている必要がある。こうした分子からの信号を捕らえるのに、脂質二重膜/CNT/固体基板の構造は非常に重要である。本研究では、特に基板の原子スケールからマイクロスケールまでの表面構造依存性に重点を置き、ベシクルヒュージョン法と自発展開法による膜形成制御を行った。その結果、CNT と同一かそれ以下のスケールを持つ原子ステップも膜形成に影響を及ぼすことを明らかにした。

(2)研究成果の今後期待される効果

以上のように、CNT ネットワーク形成の二つのアプローチ、すなわち CVD 法においても、また溶液分散においても、さまざまな構造が形成可能であることを明らかにした。また、表面修飾により、生体との反応や相互作用を制御する指針が明らかになった。さらに、そうした CNT と生体分子の人工的操作とその場観察を SPM で行う技術を確認した。バイオテクノロジーとの一体化へ向けて基本技術となる人工生体膜(脂質二重膜)の形成についてもキャッチアップを達成した。

今後は、半導体の持つ高速高集積信号処理能力と、CNT の持つ自己組織化ナノ配線網と、さらに生体分子の持つ特異的な反応を集積化したデバイスの実現を目指す。その基本技術として、分子間反応を用いた CNT 高次構造の形成、CNT と生体分子との界面の電気的特性、脂質二重膜に埋め込まれたタンパク質分子からの信号の受け取り、など多くの課題があり、本研究はそのスタートラインを作ったところである。しかし、この集積化デバイスが実現すると、生体の信号を捕らえつつ生体内外で通信を行うデバイスなど、新しい医療や人間とのインターフェースを受け持つデバイスへとつながると期待される。

環境制御型 SPM による CNT 高機能化のその場観察については、本プロジェクトで達成した技術に基づいて、以下の研究を継続する。まず、電子顕微鏡手法等と比較した SPM の最も優位な特徴は、溶液環境で CNT 一本ずつの観察と操作が可能なことである。CNT を応用の観点から見たとき重要な技術の一つは溶液分散と表面修飾技術である。本プロジェクトでは、溶液分散過程について、各種分散剤の効果とともに溶液環境の変化による分散の変化を調べてきた。これらは溶液全体としての平均過程の観察・解析であった。例えば、我々は、DNA を分散剤とする CNT 分散溶液のイオン濃度を変化させ、CNT の再凝集の過程をラマン分光によって解析した。このような分散と再凝集の過程をその場観察しようとする、①溶液中でも特定の CNT が追跡できるように固定され、かつ個々の CNT は自由空間中にあること、②溶液中で CNT 一本ずつの分解能を持つ観察手段が必要なこと、③溶液中の化学的状態が可変で CNT への機械的な摂動も可能なこと(超音波分散などの効果の検証)、という条件が課せられる。架橋 CNT は①に対する唯一の手段であり、②に対しては SPM が事実上唯一の手法である。③については、本プロジェクトで既に技術を確認している。これまで、CNT 成長のその場観察には注目が集まっているが、溶液中での分散・凝縮、分子吸着による変化、等のその場観察はほとんど報告例がない。今後、「溶液環境下での CNT ネットワーク構造形成と機能化のその場観察」において、世界をリードする成果が期待される。

4 研究参加者

①本間グループ(走査電子顕微鏡によるナノチューブ成長過程解析と成長制御の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
本間 芳和	東京理科大学 理学部	教授	SEM その場観察	平成 15 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
千足 昇平	東京理科大学 理学部	助教	光学特性評価	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
金子 新	首都大学東京	助教	CNT ナノマニピュレーション	平成 15 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
高木 大輔	東京理科大学 理学部	大学院生 CREST 研究補助員	CNT 成長制御	平成 15 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
松本 哲憲	東京理科大学 理学部	大学院生	触媒技術・低圧成長	平成 15 年 10 月～ 平成 18 年 3 月
岩崎 謙	東京理科大学 理学部	大学院生	輸送特性評価	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
小泉 隆之	東京理科大学 理学部	大学院生	CNT ナノマニピュレーション	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
清水 麻希	東京理科大学 理学部	大学院生	輸送特性評価	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
若生 巖	東京理科大学 理学部	大学院生	SEM その場観察	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
渡部 智史	東京理科大学 理学部	大学院生	光学特性評価	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
伊藤 公一	東京理科大学 理学部	大学院生	CNT 成長制御	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
大野 宏	東京理科大学 理学部	大学院生	CNT 成長制御	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
坂井 渉	東京理科大学 理学部	CRES 研究 補助員	CNT 探針作製	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
池田 正人	東京理科大学 理学部	大学院生	CNT ナノマニピュレーション	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月

石黒 雅史	東京理科大学 理学部	大学院生	光学特性評価	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
張簡 智仁	東京理科大学 理学部	大学院生	SEM その場観察	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
花島 千城	東京理科大学 理学部	大学院生	光学特性評価	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
Liu Huaping (劉 華平)	東京理科大学 理学部	ポスドク	触媒技術・成長制御	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
久慈 怜	東京理科大学 理学部	学部 4 年 生	CNT 成長制御	平成 19 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
山田一希	東京理科大学 理学部	学部 4 年 生	CNT 成長制御	平成 19 年 10 月～ 平成 20 年 3 月

②竹田グループ(透過電子顕微鏡、走査トンネル顕微鏡を用いた成長初期過程の解析)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
竹田 精治	大阪大学大学 院	教授	環境 TEM の開発	平成 15 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
河野 日出夫	大阪大学大学 院	准教授	環境 TEM 開発、Si ナワイ ヤ成長初期過程観察	平成 15 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
大野 裕	大阪大学大学 院	助教	環境 TEM 開発・観察試 料作製技術の確立	平成 15 年 10 月～ 平成 19 年 3 月
市川 聡	大阪大学大学 院	特任助教	金属ナノ微粒子の電子 線ホログラフィによる 電位解析	平成 17 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
吉川 純	大阪大学大学 院	大学院生	Si ナワイヤ成長初期過程 観察	平成 15 年 10 月～ 平成 18 年 3 月
吉田 秀人	大阪大学大学 院	特任研究 員(博士研 究員)	環境 TEM による CNT 観 察	平成 15 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
内山 徹也	大阪大学大学 院	大学院生 (博士)	環境 TEM による触媒観 察	平成 17 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
種本 祐介	大阪大学大学 院	大学院生	環境 TEM による触媒観 察	平成 19 年 10 月～ 平成 20 年 3 月

③小林グループ(ナノチューブ成長制御技術の開発及び振動分光・電子分光・電気的計測によるその場観察の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
小林 慶裕	NTT 物性基礎研	グループリーダ	振動分光法の開発	平成15年10月～平成20年3月
前田 文彦	NTT 物性基礎研	主幹研究員	低圧 CVD 成長、その場光電子分光	平成15年10月～平成20年3月
鈴木 哲	NTT 物性基礎研	主任研究員	電気特性評価	平成15年10月～平成20年3月
神埼 賢一	NTT 物性基礎研	社員	熱 CVD・触媒技術	平成15年10月～平成18年3月
登倉 明雄	NTT 物性基礎研	社員	構造・電子物性評価	平成16年4月～平成20年3月
鄭 求桓	NTT 物性基礎研	ポスドク、CREST 研究員	成長・特性制御	平成16年4月～平成18年8月
内田 貴司	NTT 物性基礎研	CREST 研究員	その場分光測定	平成19年4月～平成20年3月
小林 尚文	明治大	大学院生	電気特性評価	平成15年10月～平成17年3月
遠藤 晋旦	東京理科大	大学院生	構造・光物性評価	平成17年4月～平成18年9月
村下 達	NTT PH 研	主任研究員	構造・光物性評価	平成18年4月～平成18年10月
田澤 雅也	東京理科大	大学院生	光学特性評価	平成18年4月～平成20年3月
山寄 明	明治大	研究補助員	生体利用触媒技術	平成15年10月～平成20年1月
酒井 裕司	東京理科大	学部 4 年生	その場分光測定	平成19年9月～平成20年3月
山谷 憲司	東京理科大	学部 4 年生	電気特性評価	平成19年9月～平成20年3月

④ 荻野グループ(カーボンナノチューブ高機能化の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
荻野 俊郎	横浜国立大学 工学研究院	教授	カーボンナノチューブ 高機能化の研究	平成 15 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
大矢 剛嗣	横浜国立大学 工学研究院	助手	カーボンナノチューブ 高機能化の研究	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
飯島 隆	横浜国立大学 工学府	大学院生	カーボンナノチューブ パターンニングの研究	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
石倉 義文	横浜国立大学 工学府	大学院生	カーボンナノチューブ 不純物効果の研究	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
河中 崇博	横浜国立大学 工学府	大学院生	カーボンナノチューブ 触媒の研究	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
土屋 範晃	横浜国立大学 工学府	大学院生	カーボンナノコイル成 長の研究	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
松野 直久	横浜国立大学 工学府	大学院生	カーボンナノチューブ 方向制御の研究	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
武藤 国広	横浜国立大学 工学府	大学院生	カーボンナノチューブ 修飾の研究	平成 16 年 4 月～ 平成 18 年 3 月
青木隆仁	横浜国立大学 工学府	大学院生	生体分子固定制御に関 する研究	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
伊藤 智哉	横浜国立大学 工学府	大学院生	ナノチューブ網構成技 術に関する研究	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
大野 健介	横浜国立大学 工学府	大学院生	ナノチューブ方向制御 に関する研究	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
葉玉 康仁	横浜国立大学 工学府	大学院生	生体分子反応解析に関 する研究	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
鈴木健太郎	横浜国立大学 工学府	大学院生	炭素ナノ材料形状制御 に関する研究	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
橋本 惇一	横浜国立大学 工学府	大学院生	ナノチューブ電気特性 に関する研究	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
上 直哉	横浜国立大学 工学府	大学院生	ナノチューブ成長起点 制御に関する研究	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
栗林 広法	横浜国立大学 工学府	大学院生	ナノチューブ光応用に 関する研究	平成 17 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
池田 高之	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT の SPM 操作技術に 関する研究	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
磯野 俊成	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT/生体分子複合体に 関する研究	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
植田 哲弘	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT の医療応用に関す る研究	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
田中 華子	横浜国立大学 工学府	大学院生	人工生体膜に関する研 究	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月

山田 哲	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT の医療応用に関する研究	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
佐々木孝輔	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT ナノパターン形成に関する研究	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
安藤 桂一	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT の医療応用に関する研究	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
小野 佑樹	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT の力学計測技術に関する研究	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
柏瀬 優太	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT の SPM 操作技術に関する研究	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
千葉 英次朗	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT ネットワークに関する研究	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
塚本 貴広	横浜国立大学 工学府	大学院生	細胞表面の状態制御に関する研究	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
藤田 正弘	横浜国立大学 工学府	大学院生	CNT/生体分子複合体に関する研究	平成 19 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
藤田 武士	横浜国立大学 工学府	学部 4 年 生	CNT/生体分子複合体に関する研究	平成 19 年 10 月～ 平成 20 年 3 月

⑤Finnie グループ(光学測定を用いたカイラリティ評価およびその場計測)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
Paul Finnie	NRC-IMS	Research Officer	PL によるカイラリティ評価	平成 15 年 10 月～ 平成 20 年 3 月
Kate Kaminska	NRC-IMS	ポスドク	ラマン分光によるカイラリティ評価	平成 17 年 6 月～ 平成 19 年 9 月

5 招聘した研究者等

氏 名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Aravind Vijayaraghavan (Rensselaer Polytechnic Institute, PhD student)	カーボンナノチューブ形成過程のその場観察に向けた成長過程および物性評価についての共同研究実施	NTT 物性科学基礎研究所機能物質科学研究部低次元構造研究グループ	平成 16 年 6 月 28 日～ 平成 16 年 8 月 26 日
Yung Joon Jung (Northeastern University, Assistant Professor)	カーボンナノチューブの成長と応用に関する共同研究	東京理科大学理学部物理学科本間研究室	平成 19 年 7 月 1 日～ 平成 19 年 8 月 24 日

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 3 件、国際誌 78 件)

Y. Kobayashi, T. Yamashita, Y. Ueno, O. Niwa, Y. Homma and T. Ogino, “Extreamly Intense Raman Signals from Single-walled Carbon Nanotubes Suspended between Si Nanopillars”, Chem. Phys. Lett. 386, 153–157 (2004)

Y. Homma, S. Suzuki, Y. Kobayasi, M. Nagase and D. Takagi, “Mechanism of bright selctive imaging of single-walled carbon nanotubes on insulators by scanning electron microscopy”, Appl. Phys. Lett. 84, 1750–1752 (2004)

Y. J. Jung, Y. Homma, R. Vajtai, Y. Kobayashi, T. Ogino and P. M. Ajayan, “Straightening suspended Single Walled Carbon Nanotubes by Ion Irradiation”, Nano Lett. 4, 1109–1113 (2004)

本間芳和, 小林慶裕, 前田文彦, “シリコン基板上でのカーボンナノチューブの化学気相成長における触媒の効果”, 表面科学 25, 339–344 (2004)

S. Suzuki, Y. Watanabe, Y. Homma, S. Fukuba, S. Heun and A. Locatelli, “Work functions of individual single-walled carbon nanotubes”, Appl. Phys. Lett. 85, 127–129 (2004)

Y. Kobayashi, H. Nakashima, D. Takagi and Y. Homma, “CVD growth of single-walled carbon nanotubes using size-controlled nanoparticel catalyst”, Thin Solid Films 464–465, 286–289 (2004)

Y. Kobayashi, D. Takagi, Y. Ueno and Y. Homma, “Characterization of carbon nanotubes suspended between nanostructures using micro-Raman spectroscopy”, Physica E 24, 26–31 (2004)

D. Takagi, Y. Homma and Y. Kobayashi, “Selective growth of individual single-walled carbon nanotubes suspended between pillar structures”, Physica E 24, 1–5 (2004)

F. Maeda, E. Leffosse, Y. Watanabe, Y. Homma, et al., “Surface and interface reaction of catalystd for carbon nanotube growth on Si substrates studies by soft X-ray photoelectron spectroscopy”, Physica E 24, 19–25 (2004)

T. Nishikawa, S. Suzuki, Y. Watanabe, O. Zhou and H. Nakano, “Efficient water-window X-ray pulse generation from femtosecond-laser-produced plasma by using a carbon nanotube target”, Appl. Phys. B 78, 885–890 (2004)

S. Suzuki, K. Kanzaki, Y. Homma and S. Fukuba, “Low-acceleration-voltage electron irradiation damage in single-walled carbon nanotubes”, Jpn. J. Appl. Phys. 43, L1118–L1120 (2004)

J. Lefebvre, P. Finnie and Y. Homma, “Temperature-dependent photoluminescence from single-walled carbon nanotubes”, Phys. Rev. B 70, 045419–1 – 045418–8 (2004)

D. Takagi, Y. Homma, S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Vertical Growth of Individual Single-Walled Carbon Nanotubes on Silicon and SiO₂ Substrates", Jpn. J. Appl. Phys. 44 (4A) 1564–1568 (2005)

Y. Homma, D. Takagi, S. Suzuki, K. Kanzaki and Y. Kobayashi, "Electron-microscopic imaging of single-walled carbon nanotubes grown on silicon and silicon oxide substrates", J. Electron Microscopy 54 (Supplement 1) i3–i7 (2005)

T. Mastumoto, Y. Homma and Y. Kobayashi, "Bridging growth of single-walled carbon nanotubes on nanostructures by low-pressure hot-filament chemical vapor deposition", Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 44 (10) 7709–7712 (2005)

J. Kikkawa, Y. Ohno, and S. Takeda, "Growth Rate of Silicon Nanowires", Appl. Phys. Lett. 86, 123109 (2005)

H. Kohno and S. Takeda, "Chains of crystalline-Si nanospheres: growth and properties", e-Journal of Surface Science and Nanotechnology 3, 131–140 (2005)

N. Ozaki, Y. Ohno, J. Kikkawa and S. Takeda, "Growth of silicon nanowires on H-terminated Si {111} surface templates studied by transmission electron microscopy", J. Electron Microsc. (2005)

H. Kohno, I. Kikuo and K. Oto, "Electron transport in Si nanochains/nanowires", J. Electron Microsc. (2005)

S. Takeda, N. Ozaki, K. Ueda, H. Kohno, J. Kikkawa and Y. Ohno, "Nucleation and growth processes of silicon nanowires", Mater. Res. Soc. Symp. Proc (2005)

J. Kikkawa, Y. Ohno and S. Takeda, "Analysis of growth rate of silicon nanowires", Mater. Res. Soc. Symp. Proc (2005)

H. Yoshida and S. Takeda, "Image formation in a transmission electron microscope equipped with an environmental cell", Phys. Rev. B 72, 195428–1 – 195428–7 (2005)

H. Kohno, H. Yoshida, J. Kikkawa, K. Tanaka and S. Takeda, "Carbon beads on semiconductor nanowires", Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 44, 6862–6863 (2005)

Y. Ohno, T. Shirahama, S. Takeda, A. Ishizumi, and Y. Kanemitsu, "Fe-catalytic growth of ZnSe nanowires on a ZnSe(001) surface at low temperatures by molecular-beam epitaxy", Appl. Phys. Lett. 87, 043105 (2005)

土屋範晃、荻野俊郎, "アルコール CVD におけるカーボンナノチューブの形状制御", 表面科学 18, 518–523 (2005)

S. Suzuki, D. Takagi, Y. Homma, and Y. Kobayashi, "Selective Removal of Carbon Nanotubes Utilizing Low-Acceleration-Voltage Electron Irradiation Damage", Jpn. J. Appl. Phys. 44, L133–L135 (2005)

S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Conductivity Decrease in Carbon Nanotubes Caused by Low-Acceleration-Voltage Electron Irradiation", Jpn. J. Appl. Phys. 44, L1498-L1501 (2005)

S. Suzuki, Y. Watanabe, Y. Homma, S. Fukuba, A. Locatelli and S. Heun, "Photoemission electron microscopy of individual single-walled carbon nanotubes", J. Electron Spectrosc. and Related Phenomena 144-147(2005)357-360

A. Vijayaraghavan, K. Kanzaki, S. Suzuki, Y. Kobayashi, H. Inokawa, Y. Ono, S. Kar, P.M. Ajayan, "Metal-semiconductor transition in single-walled carbon nanotubes induced by low-energy electron irradiation", Nano Lett. 5, 1575-1579 (2005)

G.-H. Jeong, S. Suzuki, Y. Kobayashi, A. Yamazaki, H. Yoshimura, and Y. Homma, "Effect of nanoparticle density on narrow diameter distribution of carbon nanotubes and particle evolution during chemical vapor deposition growth", J. Appl. Phys. 98, 124311 (2005)

G.-H. Jeong, A. Yamazaki, S. Suzuki, H. Yoshimura, Y. Kobayashi, and Y. Homma, "Cobalt-filled apoferritin for suspended single-walled carbon nanotube growth with narrow diameter distribution", J. Am. Chem. Soc. 127, 8238-8239 (2005)

P. Finnie, J. Lefebvre and Y. Homma, "Band-Gap Shift Transition in the Photoluminescence of Single-Walled Carbon Nanotubes", Phys. Rev. Lett. 94 (24) 247401-1 - 247401-4 (2005)

Y. Homma, D. Takagi and Y. Kobayashi, "Suspended architecture formation process of single-walled carbon nanotubes", Appl. Phys. Lett. 88 (2) 023115-1-023115-3 (2006)

D. Takagi, Y. Homma, H. Hibino, S. Suzuki, and Y. Kobayashi, "Single-walled carbon nanotube growth from highly activated metal nanoparticles", Nano Lett 6, 2642-2645 (2006)

D. Takagi, Y. Homma, S. Suzuki, and Y. Kobayashi, "In situ scanning electron microscopy of single-walled carbon nanotube growth", Surf. Interface Anal 38, 1743-1746 (2006)

H. Kohno, S. Takeda, and T. Akita, "Tunneling electron transport of silicon nanochains studied by in situ scanning electron microscopy", Appl. Phys. Lett. 89, 233124/1-3 (2006)

K. Yamamoto, H. Kohno, S. Takeda, and S. Ichikawa, "Fabrication of iron silicide nanowires from nanowire templates", Appl. Phys. Lett. 89, 083107 (2006)

F. Maeda, H. Hibino, S. Suzuki, and Y. Kobayashi, "Surface Reactions of Co on SiO₂ thin layer/Si substrate Studied by LEEM and PEEM", e-Journal of Surf. Sci. and Nanotechnology 4, 155-160 (2006)

G.-H. Jeong, A. Yamazaki, S. Suzuki, Y. Kobayashi, and Y. Homma, "Behavior of Catalytic Nanoparticles during Chemical Vapor Deposition for Carbon Nanotube Growth", Chem. Phys. Lett. 422, 83-88 (2006)

S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Diameter dependence of low-energy electron and photon irradiation damage in single-walled carbon nanotubes", Chem. Phys. Lett. 430, 370 (2006)

A. Vijayaraghavan, S. Kar, S. Rumyantsev, A. Khanna, C. Soldano, N. Pala, R. Vajtai, K. Kanzaki, Y. Kobayashi, O. Nalamasu, M. S. Shur, and P. M. Ajayan, "Effect of ambient pressure on resistance and resistance fluctuations in single-wall carbon nanotube devices", J. Appl. Phys. 100, 024315 (2006)

K. Kaminska, J. Lefebvre, D. Guy Austing, P. Finnie, "Real-time global Raman imaging and optical manipulation of suspended carbon nanotubes", Phys. Rev. B 73, 235410 (2006)

J. Lefebvre, D. G. Austing, J. Bond, P. Finnie, "Photoluminescence imaging of suspended single walled carbon nanotubes", Nano Letters 6, 1603 (2006)

D. Takagi, H. Hibino, S. Suzuki, Y. Kobayashi, and Y. Homma, "Carbon nanotube growth from semiconductor nanoparticles", Nano Lett. 7, 2272-2275 (2007)

D. Takagi, A. Yamazaki, Y. Otsuka, H. Yoshimura, Y. Kobayashi, and Y. Homma, "Gold-filled apo-ferritin for investigation of single-walled carbon nanotube growth on substrate", Chem. Phys. Lett. 445, 213-216 (2007)

T. Koizumi, M. Ikeda, D. Takagi, S. Chiashi, E. Rokuta, C. Oshima, and Y. Homma, "Direct growth of vertically aligned single-walled carbon nanotubes on metal tip by applying electric field", J. J. Appl. Phys. 46, 6087-6090 (2007)

I. Wako, T. Chokan, D. Takagi, S. Chiashi, and Y. Homma, "Direct observation of single-walled carbon nanotube growth processes on SiO₂ substrate by in situ scanning electron microscopy", Chem. Phys. Lett. 449, 309-313 (2007)

H. Liu, D. Takagi, H. Ohno, S. Chiashi, T. Chokan, and Y. Homma, "Growth of single-walled carbon nanotubes from ceramic particles by alcohol chemical vapor deposition", Appl. Phys. Express 1, 014001-1 - 014001-3 (2008)

H. Yoshida, T. Uchiyama, J. Kikkawa, and S. Takeda, "Growth of single-walled carbon nanotubes on silicon nanowires", Solid State Commun. 141, 632-634 (2007)

H. Kohno and S. Takeda, "Non-Gaussian fluctuation in the charge transport of Si nanochains", Nanotechnology 18, 395706 (2007)

J. Kikkawa, S. Takeda, Y. Sato, M. Terauchi, "Enhanced direct interband transitions in silicon nanowires studied by electron energy-loss spectroscopy", Phys. Rev. B 75, 245317-1 - 245317-5 (2007)

Y. Ohno, T. Shirahama, S. Takeda, A. Ishizumi, and Y. Kanemitsu, "Mechanism of the growth of ZnSe nanowires with Fe catalysts", Solid State Commun. 141, 228-232 (2007)

H. Yoshida, T. Uchiyama, S. Takeda, "Environmental Transmission Electron Microscopy Observations of Swinging and Rotational Growth of Carbon Nanotubes", Jpn. J. Appl. Phys. 46, L917–L919 (2007)

Kaoru Shoda and Seiji Takeda, "Systematic characterization of carbon nanotubes functionalized in CF₄ Plasma", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 7977–7982 (2007)

Hideto Yoshida, Tetsuya Uchiyama, Hideo Kohno, and Seiji Takeda, "Environmental transmission electron microscopy observations of the growth of carbon nanotubes under nanotube–nanotube and nanotube–substrate interactions", Appl. Surf. Sci. in press

T. Isono, H. Tanaka and T. Ogino, "Effect of Chemical Modification of the Substrate Surface on Supported Lipid Bilayer Formation", e-J. Surf. Sci. Nanotech. 5, 99–102 (2007)

T. Oya and T. Ogino, "Construction of Carbon Nanotube Networks Using Ferrocene Solution", Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology 799–803 (2007)

T. Isono, M. Fujita, T. Oya, and T. Ogino, "Fabrication of Carbon Nanotube Thin Films by Surface Engineering", Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology 804–808, (2007)

T. Oya and T. Ogino, "Constructing self-organized structures on silicon and sapphire surfaces", Surf. Sci 601, 2532–2537 (2007)

植田哲弘、山田 哲、大矢剛嗣、萩野俊郎, "赤外振動分光によるカーボンナノチューブ表面化学状態評価", 表面科学 28, 509–512 (2007)

R. Aoki, T. Arakawa, N. Misawa, R. Tero, T. Urisu, A. Takeuchi, and T. Ogino, "Immobilization of protein molecules on step-controlled sapphire surfaces", Surf. Sci S17625 (2007)

N. Tsuchiya and T. Ogino, "Morphology of Carbon Nanostructures in Alcohol Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 6091–6094 (2007)

T. Oya and T. Ogino, "Production of electrically conductive paper by adding carbon nanotubes", CARBON, (2007), in press

Y. Inoue, H. Fujimoto, T. Ogino, and H. Iwata, "Site-specific Gene Transfer with High Efficiency onto a Carbon Nanotube-loaded Electrode", Journal of the Royal Society Interface, in press

K. Kanzaki, S. Suzuki, H. Inokawa, Y. Ono, A. Vijayaraghavan, Y. Kobayashi, "Mechanism of Metal–Semiconductor Transition in Electric Properties of Single-walled Carbon Nanotubes induced by Low-energy Electron Irradiation", J. Appl. Phys. 101, 034317 (2007)

G.-H. Jeong, S. Suzuki, Y. Kobayashi, A. Yamazaki, H. Yoshimura and Y. Homma, "Size control of catalytic nanoparticles by thermal treatment and its application to diameter control of single-walled carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.* 90, 043108 (2007)

F. Maeda, S. Suzuki, Y. Kobayashi, D. Takagi, Y. Homma, "Reaction products of Co catalysts in ethanol-CVD ambient at low-pressure studied by in situ x-ray photoelectron spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys* 46, L148-L150 (2007)

G.-H. Jeong, A. Yamazaki, S. Suzuki, H. Yoshimura, Y. Kobayashi, Y. Homma, "Production of single-walled carbon nanotubes with narrow diameter distribution using iron nanoparticles derived from DNA-binding proteins from starved cells", *Carbon* 45, 978-983 (2007)

S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Healing of low-energy irradiation-induced defects in single-walled carbon nanotubes at room temperature", *J. Phys. Chem. C* 111, 4524-4528 (2007)

S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Low-Energy Irradiation Damage in Single-Walled Carbon Nanotubes", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 994-F04-02 (2007)

F. Maeda, H. Hibino, S. Suzuki, F.-Z. Guo, Y. Watanabe, "Surface reactions of Metal Catalysts for Carbon Nanotubes on an Oxide Thin Layer/ Si substrates studied by in situ Micro Xray adsorption spectroscopy using SPELEEM", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 967-V05-03 (2007)

F. Maeda, S. Suzuki, Y. Kobayashi, D. Takagi, Y. Homma, "Surface reactions of Metal Catalysts in Ethanol-CVD Ambient at Low-Pressure studied by in situ photoelectron spectroscopy", *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 963-Q05-04 (2007)

D. P. Sprunken, H. Omi, K. Furukawa, H. Nakashima, I. Sychugov, Y. Kobayashi, and K. Torimitsu, "Influence of the Local Environment on Calculating Aspect Ratio Distributions of Gold Nanorods in Solution Using Gans Theory", *J. Phys. Chem. C* 111 14299-14306 (2007)

J. Lefebvre and P. Finnie, "Polarized photoluminescence excitation spectroscopy of single walled carbon nanotubes", *Phys. Rev. Lett.*, 98, 167406-9 (2007)

K. Kaminska, J. Lefebvre, D. G. Austing, P. Finnie, "Real-time in situ Raman imaging of carbon nanotube growth", *Nanotechnology* 18, 165707 (2007)

D. Takagi, Y. Kobayashi, H. Hibino, S. Suzuki, and Y. Homma, "Mechanism of Gold-Catalyzed Carbon Material Growth", *Nano Lett.* 8, (2008) in press

H. Liu, T. Chokan, D. Takagi, H. Ohno, S. Chiashi, and Y. Homma, "Ambient gas effect on the catalytic properties of Au in single-walled carbon nanotube growth", *Jpn. J. Appl. Phys.* 47 (2008) in press

H. Ohno, D. Takagi, K. Yamada, S. Chiashi, A. Tokura, and Y. Homma, "Growth of vertically aligned single-walled carbon nanotubes on alumina and sapphire substrates", *Jpn. J. Appl. Phys.*

47 (2008) in press

H. Hibino, H. Kageshima, F. Maeda, M. Nagase, Y. Kobayashi, and H. Yamaguchi, "Low-energy electron microscopy (LEEM) was used to measure the reflectivity of low-energy electrons from graphitized SiC(0001) ", Phys. Rev. B, in press

(2)その他の著作物（総説、書籍など）

小林慶裕, "先端追跡:カーボンナノチューブの結晶基板上配向成長", 表面科学 27, 617 (2006)

前田文彦, "SPRING-8 の高輝度放射光を利用した先端触媒開発", (株)エヌ・ティー・エス、SPRING-8 触媒評価研究会編 pp 426-438 (2006)

前田文彦, 日比野浩樹, 鈴木哲, 渡辺義夫, 郭, "ナノチューブ成長用触媒金属の Si 酸化膜上における反応過程の SPELEEM による研究", ナノテクノロジー総合支援プロジェクト研究成果報告書 Vol.7, 77-80 (2006)

S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Processing and electric property control of carbon nanotubes by low-energy electron irradiation", NTT Technical Rev. 4-11, 25 (2006)

高木大輔, 本間芳和, "SEMによるカーボンナノチューブのCVD成長その場観察", 表面科学 28, 97-103 (2007)

本間芳和, 高木大輔, "カーボンナノチューブの合成を制御する", 高分子 56, 990-992 (2007)

鈴木哲, 小林慶裕, "カーボンナノチューブの低エネルギー照射損傷とその応用", NTT 技術ジャーナル 19, 2-13 (2007)

山崎明, 吉村英恭, Goo-Hwan Jeong, 小林慶裕, "タンパク質を用いたナノ粒子生成とカーボンナノチューブ成長触媒への応用", 日本物理学会誌 62, 180 (2007)

荻野俊郎, "先端追跡:生体適合性カーボンナノチューブ", 表面科学 29 (2008)

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

① 招待講演 (国内会議 10 件、国際会議 20 件)

神崎賢一, "SWNT の電子線照射による電気伝導性制御", 電気学会電子材料技術委員会カーボンナノチューブデバイス応用技術調査専門委員会, 2005 年 10 月 3 日

小林慶裕, "架橋カーボンナノチューブの成長制御と機能化", 応用物理学会関西支部セミナー「カーボンナノチューブの物性探索と応用」, 2005 年 11 月 25 日

小林慶裕, "架橋カーボンナノチューブのラマン・PLスペクトルと環境効果", 第 24 回吸着分子の分光学的セミナー, 2005 年 12 月 2 日

小林慶裕, "架橋カーボンナノチューブの成長制御と機能化", 平成17年度 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会 H17/A05 「プラズマナノ理工学基盤研究」, 2006 年 2 月 23 日

本間芳和, "単一単層カーボンナノチューブの分光計測", 第 53 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 2006 年 3 月 22 日

本間芳和, 高木大輔, 小林慶裕, "カーボンナノチューブの成長を追うその場計測", 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 29 日

鈴木 哲, 小林慶裕, "カーボンナノチューブの低エネルギー照射損傷", 電気学会電子材料研究会 「カーボンナノチューブの物性, 評価, 応用」 東京理科大, 2006 年 9 月 22 日

前田文彦, "ナノチューブ成長用触媒金属の Si 酸化膜上における反応過程の SPELEEM による研究", 第 11 回触媒評価研究会, 大阪府立大学(堺市), 2006 年 10 月 30 日

竹田精治, "環境制御型 TEM の新しい可能性", 日本物理学会, 鹿児島大学, 2007 年 3 月

竹田精治, 吉田秀人, 内山徹也, 河野日出夫, "環境制御型 TEM によるナノ構造生成プロセスの観察と格子欠陥エンジニアリング", 日本金属学会, 千葉工大, 2007 年 3 月

Y. Watanabe, S. Suzuki, Y. Homma, S. Heun, and A. Locatelli, "SPELEEM observation of individual single-walled carbon nanotubes", 3rd Int. Workshop on Nanoscale Spectroscopy and Nanotechnology (NSS3), USA, Dec. 1, 2004

P. Finnie, Y. Homma, J. Lefebvre, "Photoluminescence from SWNTs suspended in Free Space", 207th Meeting of the Electrochemical Society, Quebec, Canada, May 17, 2005

P. Finnie, Y. Homma, J. Lefebvre, "Photoluminescence from Nanotubes Suspended in Free Space", 1st Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy, Telluride, Colorado, USA, Jul. 20, 2005

T. Ogino, T. Ito, and Y. Hadama, "Carbon Nanotube Networks for Bio-electronic Application", Third JSPS-DST Symp. on Surfaces and Interfaces for Nanostructured Materials, Tokyo, Nov. 10, 2005

P. Finnie, "Carbon Nanotubes: Chemical Vapor Deposition and Photoluminescence", 1st Canadian Workshop on NanoCarbon, Montreal, Canada, Nov. 15, 2005

Y. Homma, "Imaging of single-walled carbon nanotubes by low voltage scanning electron microscopy", 5th Int. Symp. Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, Hawaii, Dec. 6, 2005

- S. Takeda, J. Kikkawa and K. Torigoe, "Formation of nanocatalysts for the growth of silicon nanowires", ALC'05, Hawaii, USA, Dec. 8, 2005
- Y. Homma, "Evaluation of individual single-walled carbon nanotubes using optical spectroscopy", JSPS A3 Foresight Program Seminar, Funabashi, Feb. 28, 2006
- Y. Homma, "Photoluminescence from single walled carbon nanotubes and its application to the characterization of individual SWNTs.", The Quantum Transport Nano-Hana International Workshop on Applications for Ubiquitous Electronics using Nano-Materials and Nano-Devices, Chiba , Mar. 1, 2006
- P. Finnie, K. Kaminska, J. M. Bond, D. G. Austing, J. Lefebvre, "Optical studies of nanotubes suspended in air", 209th Meeting of the Electrochemical Society, Denver, Colorado, USA , May 7-12, 2006
- Y. Homma, D. Takagi, "In-situ electron microscopy of single-walled carbon nanotube growth during chemical vapor deposition", 16th Int. Microscopy Congress, Sep. 5, 2006
- Y. Homma, "Toward Understanding of Single-Walled Carbon Nanotube Growth", 3rd Japan-Korea Symposium on Carbon nanotubes", 3rd Japan-Korea Symposium on Carbon nanotubes, Gyeongju, Korea, Oct. 14, 2006
- Y. Homma, "Toward the Growth Control of Carbon Nanotube Architectures", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium 2006, Osaka, Oct. 22, 2006
- Y. Homma, D. Takagi, and I. Wako, "In Situ Scanning Electron Microscopy of Single-Walled Carbon Nanotube Growth during Chemical Vapor Deposition", 2006 MRS Fall Meeting, Nov. 27, 2006
- T. Ogino, "Control of carbon nanotube networks and their application for biotronics", The 4th Int. Symp. on Ubiquitous Knowledge Network Environment, Sapporo , Mar. 5-7, 2007
- Satoru Suzuki and Yoshihiro Kobayashi, "Defects in single-walled carbon nanotubes induced by low-energy electrons and photons", 2007 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, Apr. 9-13, 2007
- Y. Homma, "A new interpretation of the role of catalyst in single-walled carbon nanotube growth", A3 Annual Meeting, Beijing, China, July 26-28, 2007
- Y. Homma, "On the role of catalyst in single-walled carbon nanotube growth", 4th Korean-Japanese Symposium on Carbon Nanotube, October 28-31, 2007
- Y. Homma, D. Takagi, I. Wako, and T. Chokan, "In situ scanning electron microscopy of single-walled carbon nanotube growth", 6th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, Kanazawa, Japan, October 28 - November 2, 2007

S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Low-Energy Irradiation Damage in Single-Walled Carbon Nanotubes: Defect Characteristics and Electric Property Control", International Carbon Nanotube Conference in Nagoya University, February 14, 2008

② 口頭発表 (国内会議 180 件、国際会議 38 件)

荻野俊郎、飯島隆、本間芳和, "カーボンナノチューブのエレクトロニクス配線への応用", 電気学会全国大会シンポジウム, 2004 年 3 月 17 日

鈴木哲、渡辺義夫、本間芳和、福場伸哉、S. Heun, A. Locatelli, "光電子顕微鏡による単層ナノチューブの観察(2)", 日本物理学会年次大会, 2004 年 3 月 27 日

小林慶裕、高木大輔、本間芳和, "架橋成長カーボンナノチューブの位置指定ラマン分光測定", 応用物理学会 2004 年春季講演会, 2004 年 3 月 28 日

松本哲憲、小林慶裕、滑川和一、本間芳和, "熱フィラメント CVD 法による単層カーボンナノチューブの低温成長", 応用物理学会 2004 年春季講演会, 2004 年 3 月 28 日

小林尚文、鈴木哲、本間芳和, "単層カーボンナノチューブ成長中のその場電気測定", 応用物理学会 2004 年春季講演会, 2004 年 3 月 28 日

高木大輔、本間芳和、小林慶裕、伊藤良一, "熱 CVD を用いた孤立単層カーボンナノチューブの垂直成長", 応用物理学会 2004 年春季講演会, 2004 年 3 月 28 日

福場伸哉、鈴木哲、本間芳和, "低加速電子線によるカーボンナノチューブの損傷", 応用物理学会 2004 年春季講演会, 2004 年 3 月 28 日

飯島隆、石倉義文、河中崇博、土屋範晃、松野直久、武藤国広、荻野俊郎、本間芳和, "配線応用へ向けた多孔質アルミナ上触媒を用いたカーボンナノチューブの成長と評価", 応用物理学会 2004 年春季講演会, 2004 年 3 月 30 日

Y. Homma, J. Lefebvre and P. Finnie, "Photoluminescence of suspended single wall carbon nanotubes", 23rd Electronic Materials Symposium, Izu-Nagaoka, 2004 年 7 月 7 日

本間芳和, "架橋単層カーボンナノチューブのフォトルミネッセンス", 第 27 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 東京, 2004 年 7 月 28 日

本間芳和, 小林慶裕, 高木大輔, J. Lefebvre, P. Finnie, "単一カーボンナノチューブのフォトルミネッセンスとラマン分光", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

高木大輔, 小林慶裕, 鈴木哲, 本間芳和, "垂直単層カーボンナノチューブへのフラーレンドーピング", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

松本哲憲, 小林慶裕, 滑川和一, 本間芳和, "熱フィラメント CVD 法による低圧下における単層架橋カーボンナノチューブの架橋成長", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

荻野俊郎, "表面ナノバイオエレクトロニクスにおけるナノ反応場制御", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

松野直久、荻野俊郎, "カーボンナノチューブの成長初期の核形成段階と成長段階の分離", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

石倉義文、荻野俊郎, "カーボンナノチューブの成長における不純物の添加効果", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

小林慶裕、高木大輔、本間芳和, "架橋成長孤立単層カーボンナノチューブの位置指定ラマン分光測定", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

前田文彦、日比野浩樹、小林慶裕, "Co/Si酸化膜/Si構造における表面・界面反応の LEEM による解析", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

鈴木哲、小林尚文、福場伸哉、本間芳和、小林慶裕, "低加速電子線照射によるカーボンナノチューブの加工", 第 65 回応用物理学会学術講演会, 仙台, 2004 年 9 月 1 日

吉田 秀人、竹田 精治, "成長雰囲気中における SWNT の TEM 像シミュレーション", 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森, 2004 年 9 月 12 日

吉川純、大野裕、竹田精治, "触媒 CVD 法によるシリコンナノワイヤー成長初期過程の定量解析", 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森, 2004 年 9 月 12 日

大野裕、白濱武郎、石墨淳、金光義彦, "MBE-VLS 法で成長した ZnSe ナノワイヤーの光学特性", 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森, 2004 年 9 月 12 日

河野日出夫、吉田秀人, "SiC ナノワイヤ直径変動の複雑性とスケーリング", 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森, 2004 年 9 月 12 日

鈴木哲、渡辺義夫、本間芳和、小林慶裕、福場伸哉、S. Heun, A. Locatelli, "個々のナノチューブの仕事関数測定", 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森, 2004 年 9 月 12 日

高木 大輔、小林 慶裕、本間 芳和、鈴木 哲, "孤立単層カーボンナノチューブの垂直成長と評価", 第 24 回表面科学講演大会, 東京, 2004 年 11 月 9 日

土屋範晃、荻野俊郎, "アルコール CVD におけるカーボンナノチューブの形状制御", 第 24 回表面科学講演大会, 東京, 2004 年 11 月 9 日

武藤国広、荻野俊郎, "カーボンナノチューブ上への金微粒子形成", 第 24 回表面科学講演大会, 東京, 2004 年 11 月 9 日

吉川純、大野裕、竹田精治, "VLS 成長によるシリコンナノワイヤーの臨界直径", 日本物理学会第 60 回年次大会, 野田, 2005 年 3 月 24 日

山本圭一、河野日出夫、竹田精治, “シリコンナノニードルをテンプレートとしたシリコン/鉄シリサイドヘテロ接合の形成”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 野田, 2005 年 3 月 24 日

森健一、正田薫、河野日出夫, “組成変化 SiGe ナノワイスカーの構造と成長メカニズム”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 野田, 2005 年 3 月 24 日

本間芳和、高木大輔、若生巖、小林慶裕, “SEM を用いた単層カーボンナノチューブ CVD 成長のその場観察”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

高木大輔、本間芳和、鈴木哲、小林慶裕, “平坦基板上における孤立 SWNT の成長過程のその場 SEM 観察”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

高木大輔、本間芳和、小林慶裕, “パターン基板上における架橋 SWNT 形成のその場 SEM 観察”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

松本哲憲、小林慶裕、滑川和一、本間芳和, “単層カーボンナノチューブの熱フィラメント CVD 成長におけるバイアス効果”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

吉川 純、竹田精治, “シリコンナノワイヤーの成長とナノ触媒形成過程”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

土屋範晃、荻野俊郎, “アルコール CVD による架橋カーボンナノチューブの成長”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

飯島 隆、荻野俊郎, “ポーラスシリカ触媒を用いたカーボンナノチューブの配列制御”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

神崎賢一、Aravind Vijayaraghavan、鈴木 哲、小林慶裕、猪川 洋、小野行徳, “単層カーボンナノチューブデバイスの作製とその輸送特性における電子線照射効果”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

登倉明雄、住友弘二、日比野浩樹、小林慶裕, “Si ステップバンチ上単層カーボンナノチューブの走査型トンネル顕微鏡による観察”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

鈴木 哲、小林慶裕, “低加速電子照射損傷を利用したカーボンナノチューブの選択的除去”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

鄭 求桓、山崎 明、高木大輔、奥田充宏、鈴木 哲、吉村英恭、小林慶裕、古川一暁、鳥光慶一、本間芳和, “DNA と金微粒子による架橋単層ナノチューブの機能化”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

小林慶裕、N. Cade、後藤秀樹、高木大輔、本間芳和, “架橋単層カーボンナノチューブの位置指定 PL / ラマン測定”, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま市, 2005 年 3 月 29 日

前田文彦、渡辺義夫、Elise Laffosse、鈴木哲、本間芳和、鈴木峰晴、北田隆行、萩原俊弥、田中彰博、木村昌弘、Vlaicu Aurel Mihai、吉村英樹、福島整、"ナノチューブ成長用触媒金属/SiO₂/Si構造における表面・界面反応の軟X線光電子分光による研究", 放射光利用 ナノテク最前線 2005, 2005 年 6 月 13 日

高木大輔, 本間芳和, 鈴木哲, 小林慶裕, "SWNT 成長のその場 SEM 観察", フラワーレンナノチューブ総合シンポジウム, 京都, 2005 年 7 月 25 日

D. Takagi, Y. Homma, Suzuki, Y. Kobayashi, "In-situ SEM Observation of SWNT Growth", 第 29 回フラワーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 京都, 2005 年 7 月 27 日

若生 巖, 高木大輔, 松本哲憲, 本間芳和, "パターン基板上における単層カーボンナノチューブの成長方向解析", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

松本哲憲, 小林慶裕, 本間芳和, "微細構造間に架橋成長した単層カーボンナノチューブの架橋確率解析", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

島崎洸一, 張 保平, 鈴木正樹, 塩川高雄, 落合勇一, 本間芳和, 石橋幸治, "架橋カーボンナノチューブの作製と光物性評価", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

吉田秀人、竹田精治, "原料ガス中におけるカーボンナノチューブの透過型電子顕微鏡像シミュレーション", 2005 年秋季第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

河野日出夫、吉田秀人、吉川純、田中孝治、竹田精治, "カーボンビーズナノワイヤ", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

青木隆仁、葉玉康仁、河中崇博、三澤宣夫、手老龍吾 Rahman Md. Mashiur、宇理須恒雄、竹内敦子、萩野俊郎, "サファイア基板上への生体分子固定", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

小林慶裕, ニコラス ケイド, 後藤秀樹, 高木大輔, 本間芳和, "架橋単層カーボンナノチューブの PL/ラマンスペクトルにおける環境効果", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

遠藤晋旦, 前田文彦, 松本哲憲, 本間芳和, 小林慶裕, "CVD 法による単層カーボンナノチューブ成長の高真空化へ向けた検討", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

鈴木哲, 小林慶裕, "カーボンナノチューブの電子照射中その場電気測定", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

チョン グーハン, 山寄明, 鈴木哲, 小林慶裕, 本間芳和, "CVD による単層カーボンナノチューブ形成における触媒微粒子の挙動", 2005 年秋季第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 7 日

伊藤智哉、武藤国広、荻野俊郎, "架橋カーボンナノチューブ上からのナノチューブの成長", 応用物理学会 2005 年秋季講演会、徳島, 2005 年 9 月 8 日

葉玉康仁、青木隆仁、荻野俊郎, "蛍光色素固定によるカーボンナノチューブの観察", 応用物理学会 2005 年秋季講演会、徳島, 2005 年 9 月 9 日

高木大輔, 本間芳和, 小林慶裕, "SEM その場観察および多波長励起 Raman 測定を用いた SWNT 成長機構の解析", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 10 日

小泉隆之, 高木大輔, 坂井 渉, 本間芳和, 小林慶裕, "金属探針上における孤立カーボンナノチューブの垂直配向成長", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 10 日

大野健介、荻野俊郎, "ナノ反応場応用にむけたカーボンナノチューブの高純度化", 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 2005 年 9 月 10 日

渡部智史, 高木大輔, 李泰基, 徳永英司, 本間芳和, "架橋構造を用いた単一単層カーボンナノチューブの近赤外発光分光", 日本物理学会 2005 年秋季大会, 京都, 2005 年 9 月 20 日

河野日出夫、吉田秀人、吉川純、田中孝治、竹田精治, "カーボンビーズナノワイヤの生成", 日本物理学会 2005 年秋季大会, 京都, 2005 年 9 月 20 日

吉川純、竹田精治、佐藤備平、寺内正己, "シリコン・ナノワイヤーの価電子励起過程の TEM-EELS 分析", 日本物理学会 2005 年秋季大会, 京都, 2005 年 9 月 20 日

磯野俊成、荻野俊郎, "カーボンナノチューブの化学修飾による可溶化", 日本表面科学会 2005 年講演大会, 大宮, 2005 年 11 月 19 日

チョン グーハン, 鈴木哲, 小林慶裕, "DNA と金属微粒子による架橋単層カーボンナノチューブの機能化", 第 30 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 名古屋, 2006 年 1 月 7 日

小林慶裕, 高木大輔, 本間芳和, "架橋単層カーボンナノチューブからの PL・ラマンスペクトルにおける環境効果", 第 30 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 名古屋, 2006 年 1 月 7 日

鈴木哲, 前田文彦, 小林慶裕, "光照射によるカーボンナノチューブの損傷", 第 30 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 名古屋, 2006 年 1 月 7 日

鈴木哲, 松本哲憲, チョン グーハン, 小林慶裕, 本間芳和, "Air-stable n-type single-walled carbon nanotube field effect transistors functionalized by amine molecules", 第 30 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 名古屋, 2006 年 1 月 7 日

磯野俊成、青木隆仁、田中華子、手老龍吾、宇理須恒雄、荻野俊郎, “脂質二重膜形成に及ぼす基板表面の化学修飾効果”, 応用物理学会 2006 年春季講演会、東京, 2006 年 3 月 22 日

田中華子、磯野俊成、手老龍吾、Md. M. Rahman、宇理須恒雄、竹内敦子、荻野俊郎, “脂質二重膜形成に及ぼす基板表面のナノ/マイクロ形状効果”, 応用物理学会 2006 年春季講演会、東京, 2006 年 3 月 22 日

青木隆仁、葉玉康仁、三澤宣雄、手老龍吾、宇理須恒雄、竹内敦子、荒川太郎、荻野俊郎, “表面構造制御によるサファイア基板上への生体分子の選択的固定”, 応用物理学会 2006 年春季講演会、東京, 2006 年 3 月 22 日

前田文彦、日比野浩樹、鈴木哲、郭方准, “Fe/SiO₂/Si 構造における表面・界面反応の SPELEEM による解析”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 23 日

清水麻希、森山悟士、鈴木正樹、布施智子、本間芳和、石橋幸治, “基板上に分散したカーボンナノチューブ量子ドットの統計的評価”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 24 日

岩崎 謙、佐藤俊介、鈴木正樹、本間芳和、石橋幸治, “ナノ触媒形成と単層カーボンナノチューブの成長”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 24 日

大野 宏、伊藤公一、高木大輔、小泉隆之、北条義則、本間芳和, “Al 薄膜を用いたアルコール CVD 法による長尺単層カーボンナノチューブの垂直成長”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 24 日

小泉隆之、高木大輔、坂井 渉、本間芳和, “金属探針上における孤立カーボンナノチューブの垂直配向成長[2]”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 24 日

河中崇博、荻野俊郎, “フェリチンを用いたカーボンナノチューブの成長位置制御”, 応用物理学会 2006 年春季講演会、東京, 2006 年 3 月 24 日

柳沢翔太、渡部智史、若生 巖、本間芳和, “単層カーボンナノチューブの発光に対する金属蒸着の効果”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 25 日

松本哲憲、鈴木 哲、Goo-Hwan Jeong、小林慶裕、本間芳和, “アミン修飾による大気中安定な n 型ナノチューブ電界効果トランジスタの作製”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 25 日

内山徹也、吉田秀人、河野日出夫、竹田精治, “TEM ホルダーを用いた SWNT 生成”, 応用物理学会、武蔵野工業大学大学, 2006 年 3 月 25 日

山本圭一、河野日出夫、市川聡、竹田精治, “テンプレートを利用した鉄シリサイド(β -FeSi₂)ナノワイヤの生成”, 応用物理学会、武蔵工業大学, 2006 年 3 月

吉川純, 日比野浩樹, 小林慶裕, 秋田知樹, 竹田精治, “シリコン・ナノワイヤーの配列制御”, 応用物理学会、武蔵工業大学, 2006 年 3 月

吉川純, 日比野浩樹, 小林慶裕, 秋田知樹, 竹田精治, “シリコンナノワイヤー上での単層カーボンナノチューブ成長”, 応用物理学会、武蔵工業大学, 2006 年 3 月

磯野俊成、池田高之、荻野俊郎, “基板との相互作用の制御によるカーボンナノチューブ薄膜の形成”, 応用物理学会 2006 年春季講演会、東京, 2006 年 3 月 26 日

池田高之、磯野俊成、荻野俊郎, “カーボンナノチューブの酸処理における分散特性と欠陥生成”, 応用物理学会 2006 年春季講演会、東京, 2006 年 3 月 26 日

伊藤智哉、武藤国広、荻野俊郎, “架橋カーボンナノチューブ上への触媒担持とカーボンナノチューブ成長のTEM観察”, 応用物理学会 2006 年春季講演会、東京, 2006 年 3 月 26 日

田澤雅也, 小林慶裕, 高木大輔, 本間芳和, “架橋単層カーボンナノチューブの Raman/PL スペクトルにおけるバンドル形成効果”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 26 日

張 保平, 島崎洸一, 塩川高雄, 吉田 寛, 鈴木正樹, 本間芳和, 石橋幸治, “SWNT からの誘導ラマン散乱”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 26 日

鈴木哲, 前田文彦, 小林慶裕, “超高真空中光照射によるカーボンナノチューブの損傷”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 26 日

前田文彦, 鈴木哲, 小林慶裕, 高木大輔, 本間芳和, “CVD法によるカーボンナノチューブ成長のin situ XPS”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 26 日

鈴木哲, 松本哲憲, チョン グーハン, 小林慶裕, 本間芳和, “アミン修飾による大気中安定な n 型ナノチューブ電界効果トランジスタの作製”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会、東京, 2006 年 3 月 26 日

前田, 日比野, 鈴木, 郭, 渡辺義夫, “酸化膜を形成した Si 基板上におけるカーボンナノチューブ成長用触媒金属の表面反応に関する SPELEEM による研究”, LEEM/PEEM 研究会, SPring-8(兵庫県), 2006 年 8 月 2 日-3 日

吉田 寛, 朝倉理啓, 塩川高雄, 本間芳和, 石橋幸治, “低圧力における SWNTs の成長 (III)”, 第 67 回応用物理学会学術講演会、草津, 2006 年 8 月 30 日

山寄明, 高木大輔, 鈴木哲, G-H. Jeong, 小林慶裕, 吉村英恭, 本間芳和, “サイズ制御触媒を用いたサファイア基板上での単層カーボンナノチューブの配向成長”, 第 67 回応用物理学会学術講演会、草津, 2006 年 8 月 30 日

上直哉, 荻野俊郎, “触媒粒径によるカーボンナノチューブの成長制御”, 第 67 回応用物理学会学術講演会、草津, 2006 年 8 月 30 日

佐々木孝輔, 松野直久, 荻野俊郎, “電界印加によるカーボンナノチューブの垂直成長”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 30 日

池田高之, 荻野俊郎, “原子間力顕微鏡によるカーボンナノチューブの配列操作”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 30 日

植田哲弘, 山田哲, 荻野俊郎, “カーボンナノチューブ上への分子吸着特性の赤外分光法による評価”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 31 日

磯野俊成, 荻野俊郎, “液中ラマン測定による生体分子の CNT への吸着評価”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 31 日

前田文彦, 登倉明雄, 鈴木哲, 小林慶裕, 高木大輔, 本間芳和, “CVD法によるカーボンナノチューブ成長の in situ XPS(II)”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 31 日

登倉明雄, 前田文彦, 小林慶裕, 高木大輔, 本間芳和, “X 線光電子分光による成長ガスが多層カーボンナノチューブに与える影響の解析”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 31 日

田澤雅也, 高木大輔, 本間芳和, 鈴木哲, 小林慶裕, “Raman 分光法による単層カーボンナノチューブ CVD 成長過程のその場観察”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 8 月 31 日

鈴木哲, 小林慶裕, “SWNT の低エネルギー照射損傷の直径依存性”, 第 67 回応用物理学会学術講演会, 草津, 2006 年 9 月 1 日

渡部智史, 柳沢翔太, 千足昇平, 本間芳和, “架橋単層カーボンナノチューブの発光に対する金属蒸着効果の解析”, 日本物理学会 2006 年秋季大会 千葉大, 2006 年 9 月 24 日

吉田秀人, 内山徹也, 河野日出夫, 松本良平, 竹田精治, “有機ガスの電子エネルギー損失分光”, 日本物理学会 2006 年秋季大会 千葉大, 2006 年 9 月 24 日

橋本惇一, 鈴木哲, 小林慶裕, 荻野俊郎, “低エネルギー電子照射によるカーボンナノチューブ FET の金属-半導体転移”, 日本表面科学会第 26 回表面科学講演大会 大阪大, 2006 年 11 月 6 日

植田哲弘, 磯野俊成, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “赤外振動分光によるカーボンナノチューブ表面化学状態評価”, 日本表面科学会第 26 回表面科学講演大会 大阪大, 2006 年 11 月 6 日

田澤雅也, 高木大輔, 本間芳和, 鈴木哲, 小林慶裕, “その場 Raman 観察による単層カーボンナノチューブ CVD 成長初期過程の解析”, 日本表面科学会第 26 回表面科学講演大会 大阪大, 2006 年 11 月 6 日

山寄明, 高木大輔, 鈴木哲, Jeong Goo-Hwan, 小林慶裕, 吉村英恭, 本間芳和, "サファイア基板上でのカーボンナノチューブの配向成長機構", 日本表面科学会第 26 回表面科学講演大会 大阪大, 2006 年 11 月 6 日

磯野俊成, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, "DNA による高密度カーボンナノチューブの分散", 日本表面科学会第 26 回表面科学講演大会 大阪大, 2006 年 11 月 7 日

高木大輔, 本間芳和, 日比野浩樹, 鈴木哲, 小林慶裕, "金銀銅からの単層カーボンナノチューブ成長", 第 32 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 名城大(名古屋), 2007 年 2 月 15 日

吉田秀人, 内山徹也, 竹田精治, "環境制御型透過電子顕微鏡を用いたカーボンナノチューブ成長その場観察", 日本物理学会 2007 年春季大会 鹿児島大, 2007 年 3 月 18 日

内山徹也, 吉田秀人, 河野日出夫, 竹田精治, "カーボンナノチューブ生成における合金触媒の電子顕微鏡観察", 日本物理学会 2007 年春季大会 鹿児島大, 2007 年 3 月 21 日

小泉隆之, 池田正人, 高木大輔, 六田英治, 大島忠平, 本間芳和, "金属探針上単層カーボンナノチューブの高配向成長と電界電子放出特性", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 27 日

高木大輔, 本間芳和, 日比野浩樹, 鈴木哲, 小林慶裕, "大気中熱処理を用いた金, 銀, 銅触媒からの単層カーボンナノチューブ合成", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 27 日

高木大輔, 本間芳和, 日比野浩樹, 鈴木哲, 小林慶裕, "自己配列 Au-Si ナノ粒子を用いたカーボンナノワイヤ/ナノチューブ合成", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 27 日

吉田寛, 朝倉理啓, 塩川高雄, 本間芳和, 石橋幸治, "低圧力による単層カーボンナノチューブの低温成長", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 27 日

大野 宏, 猪狩和彦, 高木大輔, 千足昇平, 本間芳和, "カーボンナノチューブ触媒に対する Al₂O₃ 基板の影響", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 27 日

正田薫, 竹田精治, "高分解能 TEM 分析による CF₄ プラズマ処理フッ素化 CNT 表面構造の系統的研究", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 27 日

青木隆仁, 荒川 太郎, 竹内敦子, 荻野俊郎, "ステップ制御されたサファイア基板上の原子構造の異なるテラスの観察", 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 27 日

山 嵯 明, 高木大輔, 鈴木 哲, Goo-Hwan Jeong, 吉村英恭, 本間芳和, 小林慶裕, “サファイア基板との相互作用によるカーボンナノチューブの配向成長”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 27 日

青木隆仁, 荒川太郎, 荻野俊郎, “SPM によるアビジン/固体表面吸着特性の評価”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 28 日

磯野俊成, 藤田正弘, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “高分子及び生体分子によるカーボンナノチューブの薄膜形成”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 28 日

植田哲弘, 山田哲, 安藤桂一, 大矢剛嗣, 小山尹誉, 高井利明, 荻野俊郎, “カーボンナノチューブへのビリルビン吸着(1)ーナノチューブ表面の吸着状態解析”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 28 日

安藤桂一, 植田哲弘, 山田哲, 大矢剛嗣, 小山尹誉, 高井利明, 荻野俊郎, “カーボンナノチューブへのビリルビン吸着(2)”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 28 日

柏瀬優太, 池田高之, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “AFM 操作によるカーボンナノチューブ/金属微粒子複合構造の形成”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 28 日

小野佑樹, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “原子間力顕微鏡を用いた架橋カーボンナノチューブの機械的性質の評価”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 28 日

若生巖, 張簡智仁, 山嵯明, 高木大輔, 本間芳和, “SEM その場観察を用いた基板上の単層カーボンナノチューブ成長過程解析”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

渡部智史, 伊奈真吾, 千足昇平, 徳永英司, 本間芳和, “単一単層カーボンナノチューブ発光強度の励起光強度依存性”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

千足昇平, 渡部智史, 石黒雅史, 花島千城, 本間芳和, “環境制御チャンバー内における単層カーボンナノチューブ蛍光測定”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

清水麻希, 神田晶申, 森山悟士, 本間芳和, 大塚洋一, 石橋幸治, “超伝導体-SWNT-超伝導体接合における多重アンドレーエフ反射の観測”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

岩崎謙, 鈴木正樹, 佐藤俊介, 本間芳和, 石橋幸治, “ナノ触媒形成と単層カーボンナノチューブの成長(2)単電子トランジスタの作製と評価”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

栗林広法, 磯野俊成, 荻野俊郎, 渡部智史, 千足昇平, 本間芳和, “DNA 修飾カーボンナノチューブシートからの発光特性”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

千葉英次朗, 葉玉康仁, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “ポーラスシリカ担持 Fe 触媒を用いたカーボンナノチューブシートの生成制御”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

大矢剛嗣, 荻野俊郎, “フェロイン溶液を用いたシリコン基板表面への構造形成”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 30 日

塚本貴広, 磯野俊成, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “陽極酸化アルミナ上における脂質二重膜の形成”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 30 日

小林慶裕, 田沢雅也, 高木大輔, 本間芳和, 鈴木 哲, “単層カーボンナノチューブ CVD 成長におけるカイラリティ分布のその場ラマン分光測定”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

前田文彦, 登倉明雄, 鈴木 哲, 小林慶裕, “CVD 法によるカーボンナノチューブ成長の in situ XPS (III) -Fe 触媒による成長-”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 29 日

鈴木 哲, 小林慶裕, “SWNT の低エネルギー照射損傷の回復”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 30 日

橋本惇一, 鈴木 哲, 荻野俊郎, 小林慶裕, “低エネルギー照射によるカーボンナノチューブ FET・SET 特性の制御”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 30 日

登倉明雄, 前田文彦, 高木大輔, 本間芳和, 吉越章隆, 寺岡有殿, 渡辺義夫, 小林慶裕, “軟 X 線光電子分光によるカーボンナノチューブへの原子状水素照射の影響の解析”, 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 青山学院大学(相模原), 2007 年 3 月 30 日

内田貴司, 田沢雅也, 山嵯明, 小林慶裕, “Co-フェリチン触媒を用いた CVD による単層カーボンナノチューブ成長のその場ラマン観察”, 第 33 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 九州大学(福岡市), 2007 年 7 月 11 日-13 日

高木大輔, 日比野浩樹, 鈴木哲, 小林慶裕, 本間芳和, “半導体微粒子からのカーボンナノチューブ成長”, 第 33 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 九州大学(福岡市), 2007 年 7 月 12 日

千葉英次朗, 鈴木健太郎, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “HF-CVD 法によるカーボンナノチューブ・ダイヤモンド複合材料の形成”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会 7P-T-17, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 4 日

大矢剛嗣、荻野俊郎, “フェロイン溶液に夜シリコン基板上への構造形成とカーボンナノチューブ成長への応用”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会 7P-T-18, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 4 日

佐々木孝輔、荻野俊郎, “電子照射による CNT 上への COOH 基のパターニング”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会 8a-T-2, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 4 日

小野佑樹、大矢剛嗣、荻野俊郎, “原子間力顕微鏡を用いた架橋カーボンナノチューブの機械的性質の評価”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会 8p-T-2, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 4 日

柏瀬優太、池田高之、大矢剛嗣、荻野俊郎, “AFM 操作によるカーボンナノチューブ/金属微粒子複合構造の形成(2)”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会 8p-T-8, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 4 日

内田貴司、田澤雅也、山寄 明、小林慶裕, “Co-フェリチン触媒を用いた単層カーボンナノチューブの CVD 成長過程その場ラマン観察”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 4 日-8 日

鈴木 哲、小林慶裕, “SWNT の低エネルギー照射欠陥生成のエネルギー閾値”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 4 日-8 日

高木大輔、山寄 明、大塚泰之、吉村英恭、小林慶裕、本間芳和, “Au-ferritin を用いた単層カーボンナノチューブ合成と SEM 観察”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 6 日

張簡智仁、若生 巖、高木大輔、本間芳和, “金触媒からの単層カーボンナノチューブ成長の SEM その場観察”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 6 日

大野 宏、山田一希、高木大輔、千足昇平、本間芳和, “カーボンナノチューブ触媒に対する Al₂O₃ 基板の影響(II)”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 6 日

高木大輔、日比野浩樹、鈴木哲、小林慶裕、本間芳和, “半導体微粒子からのカーボンナノチューブ合成”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 6 日

吉田秀人、内山徹也、種本祐介、竹田精治, “環境 TEM によるカーボンナノチューブ成長ダイナミクスの研究”, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 7 日

種本祐介、吉田秀人、内山徹也、河野日出夫、竹田精治, “その場環境 TEM 観察法によるカーボンナノチューブの成長速度の計測”, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 7 日

千足昇平, 花島干城, 本間芳和, “室温における単層カーボンナノチューブの真性光学遷移エネルギー”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 8 日

吉田秀人, 内山徹也, 種本祐介, 竹田精治, “カーボンナノチューブ成長過程の環境制御型透過電子顕微鏡その場観察”, 日本物理学会 第 62 回年次大会 北海道大学, 2007 年 9 月

荻野俊郎, “生体関連物質の固体表面への吸着”, 分子情報通信のサイエンス基板, 2007 年 9 月 28 日

磯野俊成, 田中華子, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “自発展開脂質二分子膜の自己組織化”, 日本表面科学会講演大会, 2007 年 11 月 1 日

小野佑樹, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “原子間力顕微鏡を用いた架橋カーボンナノチューブの機械的性質の制御”, 日本表面科学会講演大会, 2007 年 11 月 1 日

柏瀬優太, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “自己組織化単分子膜表面の AFM パターニング”, 日本表面科学会講演大会, 2007 年 11 月 1 日

荻野俊郎, “生体関連物質の固体表面への吸着特性”, 日本表面科学会講演大会, 2007 年 11 月 1 日

新家康介, 安藤桂一, 植田哲弘, 山田哲, 大矢剛嗣, 小山尹誉, 高井利明, 荻野俊郎, “生体関連物質のカーボンナノ物質表面への吸着”, 日本表面科学会講演大会, 2007 年 11 月 1 日

磯野俊成, 田中華子, 塚本貴広, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “固体表面上での脂質二重膜の自己組織化”, サポートィッドメンブレンワークショップ, 2007 年 11 月

高木大輔, 小林慶裕, 日比野浩樹, 鈴木哲, 本間芳和, “Mechanism of Gold-Catalyzed Carbon Material Growth”, 第 34 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 名城大学(名古屋市), 2008 年 3 月 3 日-5 日

伊藤 公一, 久慈 怜, 太平 光, 千足 昇平, 本間 芳和, “Fe 触媒を用いたアルコール CVD 法による直線状カーボンナノチューブ合成”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008 年 3 月 27 日

山田 一希, 大野 宏, 千足 昇平, 本間 芳和, “サファイア基板上でのカーボンナノチューブ成長におけるステップの影響”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008 年 3 月 27 日

高木 大輔, 小林 慶裕, 日比野 浩樹, 鈴木 哲, 本間 芳和, “Au 微粒子触媒からのカーボン材料形成の粒子径依存性”, 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008 年 3 月 27 日

永津 光太郎, 張簡 智仁, 千足 昇平, 本間 芳和, “単層カーボンナノチューブの近赤外蛍光スペクトルに対するSEM観察効果”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日

花島 干城, 金堀 響, 大野 宏, 千足 昇平, 本間 芳和, “As-grown 垂直配向 CNTからの蛍光発光測定”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日

大矢剛嗣, 荻野俊郎, “フェロイン溶液を用いたポーラスシリカ膜上への構造体形成とカーボンナノチューブ成長”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

池田高之, 青木隆仁, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “サファイア表面へのタンパク質吸着特性”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

磯野俊成, 田中華子, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “基板表面上の原子ステップによる脂質二重膜の成長方向制御”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

小野佑樹, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “液中における架橋カーボンナノチューブの機械的振動の観測”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

塚本貴広, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “マイクロ/ナノ階層構造をもつポーラスアルミナ表面の形成”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

新家康介, 安藤桂一, 植田哲弘, 山田哲, 大矢剛嗣, 小山尹誉, 高井利明, 荻野俊郎, “カーボンナノ物質における生体有害物質の吸着特性評価”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

高西謙二郎, 磯野俊成, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “実装に向けたカーボンナノチューブシート之作製”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

内田貴司, 酒井裕司, 山寄明, 小林慶裕, “単層カーボンナノチューブ CVD 成長における触媒径に依存した成長持続時間”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

田澤雅也, 内田貴司, 山寄明, 鈴木哲, 小林慶裕, “アニール処理による触媒粒子形成と単層カーボンナノチューブ成長過程その場Raman観察”, 第55回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008年3月27日-30日

Y. Homma, D. Takagi, Y. Kobayashi, T. Ogino, “Controlled Growth of Suspended Carbon Nanotubes on Nanostructures”, Int. Symp. Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Atsugi, Nov. 12, 2003

Y. Kobayashi, H. Nakashima, D. Takagi* and Y. Homma, "CVD growth of carbon nanotubes using size-controlled nano-particle catalyst", ACSIN-7, Nara, Nov. 16, 2003

Y. Homma, M. Tabe and T. Ogino, "Self assembly of nanostructures and carbon-nanotube interconnection", 12th International Conference on Solid Films and Surfaces, Hamamatsu, Jun. 21, 2004

Y. Homma, D. Takagi, S. Suzuki and Y. Kobayashi, "Vertical Growth of Isolated Single Walled Carbon Nanotubes on Si and SiO₂ Substrate", 8th International Conference on Nanometer-Scale Science and Technology (NANO-8) Venice, Italy, Jun. 29, 2004

S. Suzuki, Y. Watanabe, Y. Homma, S. Fukuba, S. Heun, and A. Locatelli, "Photoemission electron microscopy of individual single-walled carbon nanotubes", 14th Int. Conf. on Vacuum UltraViolet Radiation Physics, Australia, Jul. 1, 2004

S. Takeda and H. Yoshida, "HRTEM image simulation of carbon nanotubes in an actual growth environment", Materials Research in an Aberration Free Environment Pre-Congress Meeting, Savannah, Georgia, Jul. 31, 2004

T. Ogino, "Control of Nano-Reaction Surfaces in Biotronics", Int. Workshop on Surface-Biotronics, Tokyo, Oct. 19, 2004

Y. J. Jung, R. Vajtai, N. Chakrapani, G. Ameng, P. M. Ajayan, Y. Homma, Y. Kobayashi, and T. Ogino, "Controlled fabrication and modification of organized carbon nanotube architectures", American Vacuum Society Int. Symp. Philadelphia, Nov. 15, 2004

S. Takeda, "Nucleation and growth processes of silicon nanowires", 2004 Materials Research Society Fall Meeting, Boston, MA, Nov. 29, 2004

H. Kohno, H. Yoshida and S. Takeda, "Complex diameter modulations in silicon carbide nanowire growth", 2004 Materials Research Society Fall Meeting, Boston, MA, Nov. 29, 2004

P. Finnie, Y. Homma, J. Lefebvre, "Luminescence from suspended single walled carbon nanotubes", Photonics West, San Jose, USA, Jan. 23, 2005

J. Lefebvre, P. Finnie and Y. Homma, "Luminescence from suspended carbon nanotubes", 2005 APS March Meeting, Los Angeles, USA, Mar. 21, 2005

J. Lefebvre, P. Finnie and Y. Homma, "The luminescent properties of SWNTs", 2005 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, Mar. 28, 2005

P. Finnie, Y. Homma, J. Lefebvre, "Photoluminescence from SWNTs Suspended on Pillars in Free Space", International Conference on the Science and Application of Nanotubes (NT'05), Gothenburg, Sweden, Jun. 30, 2005

S. Suzuki, S.-Y. Fukuba, K. Kanzaki, Y. Homma, and Y. Kobayashi,, "Spatially Selective Removal of Carbon Nanotubes for Fabricating Nanotube Circuits", IEEE-NANO 2005, Nagoya , Jul. 12, 2005

G.-H. Jeong, A. Yamazaki, S. Suzuki, Y. Kobayashi, K. Furukawa, K. Torimitsu and Y. Homma, "Structural, optical, and electrical properties of functionalized SWNTs with DNA and metal nanoparticles", AVS 52nd International Symposium, Boston USA , Nov. 3, 2005

F. Maeda, H. Hibino, S. Suzuki, Y. Kobayashi, Y. Watanabe, and F.-Z. Guo, "Surface Reactions of Co on SiO₂ thin layer/Si substrate Studied by LEEM and PEEM", Inter. Sympo. on Surface Science & Nanotechnology , Nov. 14, 2005

J. Lefebvre, J. Bond, Y. Homma, P. Finnie, "Photoluminescence excitation spectroscopy of individual single walled carbon nanotubes", American Physical Society March Meeting, Baltimore, Maryland, USA, 2006

K. Kaminska, Jacques Lefebvre, Jeffery Bond, Guy Austing and Paul Finnie, "Raman imaging and optical manipulation of suspended carbon nanotubes", American Physical Society March Meeting, Baltimore, Maryland, USA, 2006

H. Yoshida, H. Kohno and S. Takeda, "Transmission Electron Microscopy Images of Single-walled Carbon Nanotubes in Source Gases", International Congress of Microscopy 16 (IMC16), Sapporo, Sep. 2006

H. Yoshida, T. Uchiyama and S. Takeda, "Direct observation of Carbon Nanotube Growth by Environmental Transmission Electron Microscopy", Microscopy of Semiconducting Materials XV, Cambridge, April, 2007

Yoshihiro Kobayashi, Masaya Tazawa, Daisuke Takagi, Yoshikazu Homma, Satoru Suzuki, "Chirality-sensitive in-situ observation of CVD growth of single-walled carbon nanotubes by Raman spectroscopy", NS21-Or4, 13th Int. Conf. Surf. Sci. (ICSS-13)/Int. Conf. Nanoscience and Nanotechnology (ICN+T 2007), Stockholm, Sweden, Jul. 2-6, 2007

T. Isono, T. Oya, and T. Ogino, " Fabrication of Carbon nanotube thin film by wrapping with DNAs", The 7th IEEE International Conference on Nanotechnology No. 128 (2007), August, 2007

T. Oya and T. Ogino, "Construction of carbon nanotube networks using ferroin solution", The 7th IEEE International Conference on Nanotechnology No. 113 (2007), August, 2007

Y. Inoue, H. Fujimoto, T. Ogino, and H. Iwata, "Electroporation with carbon nanotubes loaded electrode for highly efficient gene transfer", Int. Conf. Solid State Devices and Mat. 2007, August, 2007

Satoru Suzuki, Jun-ichi Hashimoto, Toshio Ogino, and Yoshihiro Kobayashi, "Electric property control of carbon nanotubes by defects", 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2007), Tuskuba, Japan , Sep. 18-21, 2007

D. Takagi, H. Hibino, S. Suzuki, Y. Kobayashi, and Y. Homma, "Carbon Nanotubes from Epitaxially Grown Semiconductor Nanoparticles", 34th International Symposium on Compound Semiconductors ISCS2007, Kyoto, Japan, October 15-18, 2007

S. Chiashi, T. Hanashima, Y. Homma, "Adsorption and desorption of ethanol molecules on SWNT surfaces", 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures", November 12, 2007

T. Isono, H. Tanaka, R. Aoki, T. Oya, and T. Ogino, "Self-assembling of supported lipid bilayer patterns on sapphire surfaces", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November, 2007

Takashi Uchida, Masaya Tazawa, Akira Yamazaki, Yoshihiro Kobayashi, "Chirality-resolved Growth kinetics & Single-Walled Carbon nanotubes from size-defined nonparticle catalyst.", ACSIN-9, Tokyo, Japan , Nov. 11-15, 2007

A. Tokura, F. Maeda, Y. Teraoka, A. Yoshigoe, D. Takagi, Y. Homma, Y. Watanabe, Y. Kobayashi, "Diameter dependence of hydrogen adsorption on single-walled carbon nanotubes", ACSIN-9, Tokyo, Japan , Nov. 11-15, 2007

T. Ogino, "Adsorption of protein molecules on solid surfaces", China-Japan Symp. Nano-Chem. Biology, November, 2007

T. Ogino, "Pattern formation of bio-molecules on solid surface", International Workshop on Nanostructure", November, 2007

T. Ogino , "Adsorption of protein molecules on solid surfaces", SSN08, February, 2008

T. Uchida, M. Tazawa, H. Sakai, A. Yamazaki, and Y. Kobayashi, "Chirality-resolved kinetic analysis of single-walled carbon nanotube growth by in-situ Raman spectroscopy", APS March Meeting, March 13, 2008

F. Maeda and Y. Kobayashi, "Key for high yielding growth of carbon nanotubes using ethanol - Difference in reactions of cobalt and iron -", 2008 MRS Spring Meeting, March 25, 2008

③ ポスター発表 (国内会議 34 件、国際会議 91 件)

鈴木哲、福場伸哉、神崎賢一、本間芳和、小林慶裕, "カーボンナノチューブのSEM観察による電子照射損傷", 第 27 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 東京 , 2004 年 7 月 28 日

小林尚文、鈴木哲、本間芳和、小林慶裕，“電気測定による単層カーボンナノチューブ成長のその場モニタリング”，第27回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム，東京，2004年7月28日

鈴木哲、小林慶裕，“低加速電子損傷を利用したカーボンナノチューブの加工”，第28回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム，名古屋，2005年1月7日

G. -H. Jeong, S. Suzuki, Y. Kobayashi, K. Furukawa, and K. Torimitsu, “DNAと金属微粒子による単層カーボンナノチューブの複合化”，第28回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム，名古屋，2005年1月7日

G. -H. Jeong, A. Yamazaki, D. Takagi, M. Okuda, S. Suzuki, H. Yoshimura, Y. Kobayashi, and Y. Homma, “触媒内包有機分子からの架橋単層ナノチューブ合成”，第28回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム，名古屋，2005年1月7日

小林慶裕，ニコラス ケイド，後藤秀樹，高木大輔，本間芳和，“ナノ構造間架橋単層カーボンナノチューブの位置指定 PL/ラマンスペクトル”，フラーレンナノチューブ総合シンポジウム，京都，2005年7月25日

鈴木哲，小林慶裕，“電子照射されたナノチューブのその場電気測定”，フラーレンナノチューブ総合シンポジウム，京都，2005年7月25日 8

チョン グーハン，山寄明，鈴木哲，小林慶裕，本間芳和，“CVD によるカーボンナノチューブ形成における触媒微粒子の時間展開”，フラーレンナノチューブ総合シンポジウム，京都，2005年7月25日

西田孟、吉川純、河野日出夫、竹田精治，“合金触媒による Si ナノワイヤーの成長条件”，応用物理学会、徳島大学，2005年9月

鳥越和尚、吉川純、大野裕、市橋鋭也、竹田精治，“荒れた表面におけるシリコンナノワイヤーの触媒の成長制御”，応用物理学会、武蔵工業大学，2006年3月

山寄明，高木大輔，鈴木哲，Goo-Hwan Jeong，小林慶裕，吉村英恭，本間芳和，“サイズ制御触媒を用いたサファイア上での CNT 配向成長”，第31回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム，三重県総合文化センター(津)，2006年7月12日

鈴木哲，小林慶裕，“曲がったグラファイトシートに特有の照射損傷”，第31回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム，三重県総合文化センター(津)，2006年7月12日

武田淳一，河野日出夫，竹田精治，“マイクロマニピュレータを用いた半導体ナノニードルの電気伝導特性の測定”，日本物理学会 2006 年秋季大会 千葉大，2006年9月25日

青木隆仁，宇理須恒雄，荒川太郎，荻野俊郎，“SPM によるアビジン/固体表面吸着特性の評価”，日本表面科学会第26回表面科学講演大会，大阪大，2006年11月6日

池田高之，荻野俊郎，“固体表面におけるカーボンナノチューブの配列操作”，日本表面科学会第26回表面科学講演大会，大阪大，2006年11月6日

橋本惇一, 鈴木哲, 荻野俊郎, 小林慶裕, “低エネルギー照射による SWNT 単電子トランジスタのクーロンギャップの増大”, 第 32 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 名城大(名古屋), 2007 年 2 月 13 日

鈴木哲, 橋本惇一, 荻野俊郎, 小林慶裕, “低エネルギー照射による金属的 SWNT の室温 FET 特性の半導体化”, 第 32 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 名城大(名古屋), 2007 年 2 月 13 日

山寄明, 高木大輔, 鈴木哲, Jeong Goo-Hwan, 吉村英恭, 本間芳和, 小林慶裕, “サファイア基板との相互作用によるカーボンナノチューブの配向成長”, 第 32 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 名城大(名古屋), 2007 年 2 月 13 日

田沢雅也, 高木大輔, 本間芳和, 鈴木哲, 小林慶裕, “ラマン分光法による単層カーボンナノチューブ CVD 成長過程のカイラリティ識別その場観察”, 第 32 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 名城大(名古屋), 2007 年 2 月 14 日

山寄明, Jeong Goo-Hwan, 鈴木哲, 吉村英恭, 小林慶裕, “カーボンナノチューブ径制御に向けた熱処理による触媒微粒子のサイズ制御”, 第 32 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 名城大(名古屋), 2007 年 2 月 15 日

前田文彦, 鈴木哲, 小林慶裕, “低圧エタノールCVDによるカーボンナノチューブ成長の触媒金属に関するその場光電子分光による研究”, 第 33 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 九州大学(福岡市), 2007 年 7 月 11 日-13 日

山寄明, 高木大輔, 大塚康之, 鈴木哲, 本間芳和, 吉村英恭, 小林慶裕, “金フェリチンを触媒に用いたサファイア基板上での配向単層カーボンナノチューブ成長”, 第 33 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 九州大学(福岡市), 2007 年 7 月 11 日-13 日

鈴木哲, 小林慶裕, “単層カーボンナノチューブの低エネルギー照射損傷の閾エネルギー”, 第 33 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 九州大学(福岡市), 2007 年 7 月 11 日-13 日

植田哲弘, 山田哲, ○安藤桂一, 大矢剛嗣, 小山尹誉, 高井利明, 荻野俊郎, “カーボンナノチューブ表面へのアルブミン吸着”, 第 68 回応用物理学会学術講演会 4P-P4-21, 2007 年 9 月 4 日

磯野俊成, 田中華子, 青木隆仁, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “サファイア表面上における脂質二重膜の自己組織構造”, 第 68 回応用物理学会学術講演会 5p-P8-14, 2007 年 9 月 4 日

塚本貴広, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, “脂質二重膜展開に用いるポーラスアルミナ表面の平坦性評価”, 第 68 回応用物理学会学術講演会 5p-P8-15, 2007 年 9 月 4 日

山寄 明, 鈴木友子, 吉村英恭, 表 和彦, 伊藤義泰, 川村朋晃, 小林慶裕, “フェリチン内包鉄ナノ粒子の構造評価”, 2007 年秋季第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学(札幌), 2007 年 9 月 4 日-8 日

池田高之, 青木隆仁, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, "原子間力顕微鏡によるサファイア表面上の化学状態評価", 日本表面科学会講演大会, 2007 年 11 月 1 日

磯野俊成, 田中華子, 塚本貴広, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, "自発展開脂質二重膜の成長方向制御", サポーティッドメンブレンワークショップ, 2007 年 11 月 1 日

塚本貴広, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, "ポーラスアルミナの表面形状と脂質二重膜の形成", サポーティッドメンブレンワークショップ, 2007 年 11 月 2 日

内田貴司, 酒井裕司, 山崎明, 小林慶裕, "Effective catalyst diameter for extended growth duration of single-walled carbon nanotubes", 第 34 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 名城大学(名古屋市), 2008 年 3 月 3 日-5 日

K. Yamaya, S. Suzuki, Y. Homma, and Y. Kobayashi, "Recovery process of low-energy irradiation damage of SWNTs", 第 34 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 名城大学(名古屋市), 2008 年 3 月 3 日-5 日

T. Mizuno, H. Maki, S. Suzuki, Y. Kobayashi, and T. Sato, "Low-Energy Irradiation Damage in Single-Walled Carbon Nanotubes: Defect Characteristics and Electric Property Control", 第 34 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム, 名城大学(名古屋市), 2008 年 3 月 3 日-5 日

柏瀬優太, 大矢剛嗣, 荻野俊郎, "陽極酸化法によるシリコン基板表面の局所化学状態の制御", 第 55 回応用物理学関係連合講演会, 日本大学船橋キャンパス(千葉), 2008 年 3 月 27 日-30 日

F. Maeda, E. Laffosse, Y. Watanabe, S. Suzuki, Y. Homma, M. Suzuki, T. Kitada, T. Ogiwara, A. Tanaka, M. Kimura, V. A. Mihai, H. Yoshikawa, and S. Fukushima, "Surface and Interface Reactions of Catalysts for Carbon Nanotube Growth on Si Substrates Studied by Soft X-ray Photoelectron Spectroscopy", Int. Symp. Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Atsugi, Nov. 12, 2003

S. Suzuki, Y. Watanabe, F. Maeda, Y. Homma, and Y. Ogino, "Non-rigid band shift behavior of potassium-filled carbon nanotubes", Int. Symp. Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Atsugi, Nov. 12, 2003

Y. Kobayashi, D. Takagi, Y. Ueno, and Y. Homma, "Characterization of carbon nanotubes suspended between nanostructures using micro-Raman spectroscopy", Int. Symp. Functional Semiconductor Nanosystems (FSNS2003), Atsugi, Nov. 12, 2003

T. Iijima, T. Kawanaka, N. Tsuchiya, N. Matsuno, K. Mutou, T. Ogino, and Y. Homma, "Catalyst formation processes in carbon nanotube growth for nano-interconnection", 12th International Conference on Solid Films and Surfaces, Hamamatsu, Jun. 21, 2004

T. Matsumoto, Y. Kobayashi, K. Namekawa, Y. Homma, "Low-pressure Growth of Single-walled Carbon Nanotubes Suspended between Nanostructures using Hot-filament Chemical Vapor Deposition", International Symposium on Nanocarbons 2004, Nagano, Nov. 15, 2004

G. -H. Jeong, S. Suzuki, Y. Kobayashi, K. Furukawa, and K. Torimitsu, "Synthesis of Hybridized Carbon Nanotubes with DNA and Metal Nanoparticles" International Symposium on Nanocarbons 2004 (ISNC 2004)", International Symposium on Nanocarbons 2005, Nagano , Nov. 15, 2004

S. Suzuki, S. Fukuba, K. Kanzaki, Y. Homma, and Y. Kobayashi, "Low-energy electron irradiation damage in carbon nanotubes", International Symposium on Nanocarbons 2006, Nagano, Nov. 15, 2004

A. Tokura, K. Sumitomo, and Y. Kobayashi, "STM/STS study of single-walled carbon nanotubes on Si substrate", The 12th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM 12), Japan , Dec. 9, 2004

G. -H. Jeong, A. Yamazaki, D. Takagi, S. Suzuki, K. Furukawa, Y. Kobayashi, Y. Homma, and K. Torimitsu, "Suspended Single-Walled Carbon Nanotube Growth and Their Hybridization using DNA and Gold Nanoparticles", International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions (NNCI 2005), Japan , Jan. 30, 2005

T. Iijima¹ and T. Ogino, "Position Control of Carbon Nanotubes using Porous Silica Supporter", Molecular-Based Information Transmission and Reception, Mar. 6, 2005

R. Aoki, Y. Hadama, T. Kawanaka, T. Iijima, N. Misawa, M. Rahman, R. Tero, T. Urisu, A. Takeuchi, and T. Ogino, "Immobilization of Inorganic and Bio-Materials on Sapphire Substrates", Molecular-Based Information Transmission and Reception, Mar. 6, 2005

G. -H. Jeong, A. Yamazaki, D. Takagi, S. Suzuki, Y. Kobayashi, K. Furukawa, and K. Torimitsu, "Synthesis of Suspended SWNTs and Their Functionalization using DNA and Gold Nanoparticles", 2005 MRS Spring Meeting, San Francisco, USA , Mar. 28, 2005

S. Suzuki, D. Takagi, Y. Homma, Y. Kobayashi, "Spatially selective removal of carbon nanotubes", Nanotube 2005, Sweden, Jun. 26, 2005

A. Vijayaraghavan, K. Kanzaki, S. Suzuki, Y. Kobayashi, S. Kar, P. M. Ajayan, "Metal-semiconductor transition in single-wall carbon nanotubes induced by low energy electron irradiation", Nanotube 2005, Sweden, Jun. 26, 2005

K.Kanzaki, A.Vijayaraghavan, S.Suzuki, Y.Kobayashi, H.Inokawa, Y.Ono, "Conductivity control of single-walled carbon naotubes by electron beam exposure", Nanotube 2005, Sweden, Jun. 26, 2005

K. Kanzaki, S. Suzuki, Y. Kobayashi, H. Inokawa, and Y. Ono, "Electronic modification of single-walled carbon nanotubes by low-energy electron irradiation", 2005 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2005), Kobe , Sep. 12, 2005

S. Watanabe, D. Takagi, E. Tokunaga, Y. Homma, "Photoluminescence from an Individual Single Walled Carbon Nanotube", Interbational Sympusium on Surface Science and Nanotechonology, Saitama , Nov. 14, 2005

I. Wako, D. Takagi, T. Matsumoto, Y. Homma, "Analysis of Single-Walled Carbon Nanotube Growth Direction on Patterned Substrate", Interbational Sympusium on Surface Science and Nanotechonology, Saitama, Nov. 14, 2005

Y. Hadama, R. Aoki, T. Ogino, "Observation of carbon nanotubes by fluorescence microscopy", Int. Symp. on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4), Ohmiya, Japan, P2-10, Nov. 15, 2005

R. Aoki, Y. Hadama, T. Kawanaka, N. Misawa, M. Rahman, R. Tero, T. Urisu, A. Takeuchi, T. Arakawa, T. Ogino, "Immobilization of bio-materials on step- controlled sapphire substrates", Int. Symp. on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4), Ohmiya, Japan, P3-117 , Nov. 16, 2005

K. Suzuki, N. Tsuchiya, N. Haneji, and T. Ogino, "Shape and size control of carbon nanocoils grown by CVD", Int. Symp. on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4), Ohmiya, Japan, P2-12 , Nov. 16, 2005

T. Itoh , K. Mutoh, T. Ogino, "Growth of carbon nanotubes from a suspended carbon nanotube surface", Int. Symp. on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-4), Ohmiya, Japan, P2-11 , Nov. 16, 2005

D. Takagi, Y. Homma, S. Suzuki, Y. Kobayashi, "In-situ scanning electron microscopy of single-walled carbon nanotube growth", 5th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices , Dec. 6, 2005

T. Koizumi, D. Takagi, Y. Homm, "Vertical Growth of Carbon Nanotubes on Metal Tips", 5th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices, Dec. 8, 2005

G.-H. Jeong, A. Yamazaki, D. Takagi, M. Okuda, S. Suzuki, H. Yoshimura, Y. Kobayashi, and Y. Homma, "Facile Growth of Suspended SWNTs by Wet Catalyst Method", American Physical Society March Meeting, Baltimore, Maryland, USA, Mar. 21, 2006

G.-H. Jeong, A. Yamazaki, S. Suzuki, Y. Kobayashi, H. Yoshimura, Y. Homma, "Single-walled carbon nanotubes from catalyst incorporating proteins", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

F. Maeda, S. Suzuki, Y. Kobayashi, D. Takagi, Y. Homma, "Surface reactions of Co catalysts in ethanol-CVD ambient at low-pressure studied by in situ photoelectron spectroscopy", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

G.-H. Jeong, T. Matsumoto, S. Suzuki, Y. Kobayashi, Y. Homma, "Functionalization of suspended single-walled carbon nanotubes with gold nanoparticles and DNA: Synthesis and characterization", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

Y. Kobayashi, M. Tazawa, D. Takagi, Y. Homma, "Environmental effects in position-selected PL/Raman spectra from suspended SWNTs", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

A. Tokura, F. Maeda, D. Takagi, K. Sumitomo, Y. Homma, Y. Kobayashi, "X-ray photoelectron spectroscopy study of vertically aligned carbon nanotube films", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

S. Suzuki, Y. Kobayashi,, "Diameter dependence of formation and healing of defects in single-walled carbon nanotubes induced by low-energy electrons and photons", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

Y.-L. Zhong, T. Akazaki, K.i Kanzaki, Y. Kobayashi, S. Suzuki, H. Takayanagi, "Multiple Andreev reflections and reentrant behavior in network-like carbon nanotubes", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

S. Suzuki, K. Kanzaki, Y. Ono, H. Inokawa, A. Vijayaraghavan, Y. Kobayashi, "Mechanism of metal-semiconductor transition in the electric properties of single-walled carbon nanotubes induced by low-energy electron irradiation", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

S. Suzuki, T. Matsumoto, G.-H. Jeong, Y. Homma, Y. Kobayashi, "Conversion of p-type nanotube field effect transistors to n-type by a simple treatment in air", 7th International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Nagano, Jun. 18-23, 2006

Y. Kobayashi, M. Tazawa, D. Takagi, and Y. Homma, "Position-specified measurements of resonance Raman and photoluminescence spectra from a particular suspended carbon nanotube", 20th International Conference on Raman Spectroscopy, Yokohama, Aug. 20-25, 2006

D. Takagi, Y. Kobayashi, and Y. Homma, "Analysis of Initial Stage of Single-walled Carbon Nanotube Growth by In Situ Scanning Electron Microscopy and Ex Situ Raman Spectroscopy", 16th International Microscopy Congress, Sapporo, Sep. 7, 2006

T. Uchiyama, H. Yoshida, H. Kohno and S. Takeda, "Growth of SWNTs on a Si substrate set in a TEM specimen holder", IMC16, Sapporo, September, 2006

J. Takeda, H. Kohno and S. Takeda, "Manipulation and Characterization of Semiconductor Needles using Micro-Manipulator in SEM", IMC16, Sapporo, September, 2006

H. Kohno and S. Takeda, "Charge Transport through Silicon Nanochains Investigated in Combination with TEM and SEM", IMC16, Sapporo, September, 2006

T. Isono, H. Tanaka, and T. Ogino, "Effect of Chemical Modification of the Substrate Surface on Lipid Bilayer Formation", 2006 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2006), Yokohama, Sep. 12-15, 2006

T. Isono, H. Tanaka, and T. Ogino, "Effect of Chemical Modification of the Substrate Surface in Lipid Bilayer Formation Process", 10th ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces (ISSP-10), Kashiwa, Oct 9-13, 2006

A. Ueda, S. Yamada, and T. Ogino, "Characterization of Carbon Nanotube Surfaces by Infrared Reflection Absorption Spectroscopy", 10th ISSP International Symposium on Nanoscience at Surfaces (ISSP-10), Kashiwa, Oct 9-13, 2006

D. Takagi, Y. Homma, H. Hibino, S. Suzuki, and Y. Kobayashi, "Single-walled Carbon Nanotubes Synthesized from Cu and Noble Metals", I3rd Japan-Korea Symposium on Carbon nanotubes, Gyeongju, Korea, Oct. 14, 2006

T. Isono, T. Oya, T. Ogino, "Dispersion of High-density Carbon Nanotubes Modified with DNAs", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Synposium, Osaka, Nov. 20-22, 2006

T. Ikeda, T. Oya, and T. Ogino, "Observation of Carbon Nanotube Manipulation by Frictional Curve Mode in a Scanning Probe Microscope", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Synposium, Osaka, Nov. 20-22, 2006

H. Tanaka, T. Isono, R. Aoki, and T. Ogino, "Effect of Nano/Micro-Scaled Morphology of the Substrate Surface on Lipid Bilayer Formation", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Synposium, Osaka, Nov. 20-22, 2006

T. Ito and T. Ogino, "Formation of Three-Dimensional Carbon Nanotube Network", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Synposium, Osaka, Nov. 20-22, 2006

R. Aoki, A. Takeuchi, T. Arakawa, and T. Ogino, "Atomic force microscopy study on protein adsorption on sapphire surfaces", Handai Nanoscience and Nanotechnology International Synposium, Osaka, Nov. 20-22, 2006

H. Yoshida, T. Uchiyama, J. Kikkawa, S. Takeda and Y. Homma, "Synthesis of Single-walled Carbon Nanotubes on Silicon Nanowires", 2006 MRS (Materials Research Society) Fall Meeting, Boston, Nov. 27-Dec. 1, 2006

H. Kohno and S. Takeda, "Tunneling electron transport of silicon nanochains studied by in-situ scanning electron microscopy", 2006 MRS (Materials Research Society) Fall Meeting, Boston, Nov. 27-Dec. 1, 2006

T. Isono, H. Tanaka, and T. Ogino, "Chemical Modification of the Substrate Surface for Uniform Lipid Bilayer Formation", 2006 MRS (Materials Research Society) Fall Meeting, Boston, Nov. 27–Dec. 1, 2006

T. Ito, T. Ogino, "Three-Dimensional Single-Walled Carbon Nanotube Architecture using Suspended Catalyst Particles", 2006 MRS (Materials Research Society) Fall Meeting, Boston, Nov. 27–Dec. 1, 2006

T. Ogino, N. Tsuchiya, "Growth of Carbon Nanocoils in Alcohol Chemical Vapor Deposition", 2006 MRS (Materials Research Society) Fall Meeting, Boston, Nov. 27–Dec. 1, 2006

F. Maeda, S. Suzuki, Y. Kobayashi, D. Takagi and Y. Homma, "Surface Reactions of Metal Catalysts in Ethanol-CVD Ambient at Low-pressure Studied by in-situ Photoelectron Spectroscopy", 2006 MRS (Materials Research Society) Fall Meeting, Boston, Nov. 27–Dec. 1, 2006

F. Maeda, H. Hibino, S. Suzuki, F-Z. Guo, Y. Watanabe, "Surface reactions of Metal Catalysts for Carbon Nanotubes on an Oxide Thin Layer/ Si substrates studied by in situ Micro Xray adsorption spectroscopy using SPELEEM", 2006 MRS (Materials Research Society) Fall Meeting, Boston, Nov. 27–Dec. 1, 2006

K. Kaminska, J. Lefebvre, D. G. Austing, . Finnie, "Real-time global Raman imaging of carbon nanotubes", International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPM), Tirol, Austria, Mar. 10–17, 2007

K. Shoda and S. Takeda, "Systematic characterization of carbon nanotubes functionalized by CF₄ plasma fluorination by means of transmission electron microscopy", 2007 MRS (Materials Research Society) Spring Meeting, San Francisco, April, 2007

R. Aoki, T. Arakawa, and T. Ogino, "Adhesion Force of Avidin Molecules on Well-Ordered Solid Surfaces", 2007 Materials Research Society Spring Meeting 2007, April, 2007

T. Tsukamoto, T. Isono, T. Oya, and T. Ogino, "Formation of lipid bilayers on porous alumina surfaces prepared by anodic oxidation", ISNM/MB-ITR 2007 P-21 (2007), April, 2007

T. Isono, M. Fujita, T. Oya, and T. Ogino, "Fabrication of carbon nanotube thin films for biosensor application", ISNM/MB-ITR 2007 P-13 (2007), April, 2007

K. Abdo, A. Ueda, T. Oya, T. Koyama, T. Takai, and T. Ogino, "Bilirubin/albumin adsorption on carbon nanotubes", ISNM/MB-ITR 2007 P-14 (2007), April, 2007

H. Tanaka, T. Isono, T. Oya, and T. Ogino, "Formation of lipid bilayers on solid surfaces", ISNM/MB-ITR 2007 P-20 (2007), April, 2007

Akira Yamazaki, Daisuke Takagi, Satoru Suzuki, Goo-Hwan Jeong, Hideyuki Yoshimura, Yoshikazu Homma, Yoshihiro Kobayashi, "Growth behavior of aligned single-walled carbon nanotubes on sapphire surfaces", NSP4-58, 13th Int. Conf. Surf. Sci. (ICSS-13)/Int. Conf. Nanoscience and Nanotechnology (ICN+T 2007), Stockholm, Sweden, Jul. 2-6, 2007

S. Chiashi, S. watanabe, and Y. Homma, "Photoluminescence from SWNTs in the environmental chamber", 2nd Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy, Ottawa, Canada, July 4-7, 2007

K. Kaminska, J. Lefebvre, D.G. Austing, P. Finnie, "Real time global Raman imaging of carbon nanotubes", 2nd Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy, Ottawa, Canada, July 4-7, 2007

J. Lefebvre, D. G. Austing, P. Finnie, "Photoluminescence imaging and spectroscopy of individual single walled carbon nanotubes", 2nd Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy, Ottawa, Canada, July 4-7, 2007

D. G. Austing, J. Lefebvre, J. Bond, P. Finnie, "Luminescence imaging of novel suspended carbon nanotube field effect transistors ", 2nd Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy, Ottawa, Canada, July 4-7, 2007

S. Chiashi, T. Hanashima, and Y. Homma, "Photoluminescence from suspended single-walled carbon naotubes in ethanol gas", A3 Annual Meeting, Beijin, China, July 26-28, 2007

H. Ohno, K. Ito, K. Yamada, D. Takagi, S. Chiashi, and Y. Homma, "Effect of aluminum-oxide on carbon nanotube growth catalysts ", A3 Annual Meeting, Beijin, China, July 26 - 28, 2007

T. Isono, T. Oya, and T. Ogino, "Effect of surface nanostructures on self-spreading supported lipid bilayer formation and dynamics", Int. Conf. on Materials for Advanced Technology B-10-PO8 (2007), July, 2007

T. Oya and T. Ogino, "Use of ferroin solution for fabrication of carbon nanotube networks", Int. Conf. on Materials for Advanced Technology E-5-PO20 2007, July, 2007

T. Ikeda, R. Aoki, T. Oya, and T. Ogino, "Characterization of chemical states on a sapphire surface by frictional force mode of atomic force microscopy", Int. Conf. Sci. of Friction p-6 (2007), September, 2007

R. Aoki, T. Arakawa, T. Oya and T. Ogino, "Immobilization of Protein Molecules on Step-Controlled Sapphire Surfaces and Characterization of the Adhesion Forces", Int. Conf. Solid State Devices and Mat. 2007, September, 2007

H. Ohno, K. Igari, D. Takagi, S. Chiashi, and Y. Homma, "Effect of Aluminum-Oxide on Carbon Nanotube Growth Catalysts", 34th International Symposium on Compound Semiconductors ISCS2007, Kyoto, Japan, October 15-18, 2007

F. Maeda, S. Suzuki, Y. Kobayashi, D. Takagi, and Y. Homma, "In situ x-ray photoelectron spectroscopy study on carbon nanotube growth using metallic and oxidized catalysts by ethanol-CVD", 34th International Symposium on Compound Semiconductors ISCS2007, Kyoto, Japan, October 16, 2007

S. Chiashi, T. Hanashima, Y. Homma, "Photoluminescence measurement of SWNTs adsorbed by ethanol", 4th Korea-Japan Symposium on Carbon Nanotube, October 29, 2007

H. Liu, T. Chokan, D. Takagi, H. Ohno, S. Chiashi, and Y. Homma, "Investigation of the properties of gold catalyst in SWCNT growth", 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, Tokyo, Japan, November 11-15, 2007

T. Ikeda, R. Aoki, T. Oya, and T. Ogino, "Selective Adsorption of Proteins on Sapphire Surfaces", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November, 2007

A. Ueda, S. Yamada, K. Ando, T. Oya, T. Ogino, "Infrared Absorption Spectroscopy Study on Protein Adsorption on Carbon Nanotube Surfaces", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November, 2007

Y. Ono, T. Oya, and T. Ogino, "Characterization of Mechanical Properties of Suspended Carbon Nanotubes", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November, 2007

T. Tsukamoto, T. Oya, and T. Ogino, "Morphology of Porous Alumina Surfaces Prepared by Anodic Oxidation", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November, 2007

H. Chiba, K. Suzuki, T. Oya, N. Haneji, and T. Ogino, "Growth of Carbon-based Composite Materials by Hot-Filament Chemical Vapor Deposition", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November, 2007

Y. Kashiwashe, T. Oya, and T. Ogino, "Manipulation of Carbon Nanotubes and Metal Nanoparticles using Atomic Force Microscope", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November, 2007

K. Ando, A. Ueda, S. Yamada, T. Oya, T. Koyama, T. Takai, and T. Ogino, "Bilirubin/Albumin Adsorption on Carbon Nanotube Surfaces for Medical Treatment", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November, 2007

F. Maeda, S. Suzuki, and Y. Kobayashi, "Chemical state of iron nanoparticle catalysts for single-walled carbon nanotube growth studied by in situ photoelectron spectroscopy", ACSIN-9, Tokyo, Japan, November 12, 2007

H. Liu, T. Chokan, D. Takagi, H. Ohno, S. Chiashi, and Y. Homma, "Effects of the Deposited Amount of Au on Single-Walled Carbon Nanotubes Growth", A3 Foresight Program: Sub-10 nm Wires; New Physics and Chemistry, Kusatsu, Japan, November 15-17, 2007

Y. Ono, T. Oya, and T. Ogino, "Mechanical Properties of Suspended Carbon Nanotubes",

ICSPM15, December, 2007

Y. Kashiwase, T. Oya and T. Ogino, "Control of Hydrophilicity of Local Anode-Oxidized Si Surfaces Covered with Self-Assembled Monolayers", ICSPM15, December, 2007

S. Suzuki, J. Hashimoto, T. Ogino, and Y. Kobayashi, "Effects of local low energy electron irradiation on carbon nanotube FETs and SETs", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2007), December 2-7, 2007

S. Chiashi, T. Tateki, and Y. Homma, "Effect of Adsorbed Gas Molecules on Photoluminescence from SWNTs", International Carbon Nanotube Conference in Nagoya University, February 14-15, 2008

T. Uchida, M. Tazawa, H. Sakai, A. Yamazaki, and Y. Kobayashi, "Chirality-resolved in-situ Raman spectroscopy of single-walled carbon nanotube growth", International Carbon Nanotube Conference in Nagoya University, February 14, 2008

(4)特許出願

①国内出願 (24 件)

1. カーボンナノチューブ成長方法、神崎賢一、本間芳和、日本電信電話株式会社、平成 16 年 3 月 23 日、2004-084731
2. カーボンナノチューブの製造方法及び半導体装置の製造方法、本間芳和、鈴木哲、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 16 年 3 月 26 日、2004-091701
3. レーザ装置、発光素子及びその製造方法、登倉明雄、本間芳和、小林慶裕、松岡隆志、日本電信電話株式会社、平成 16 年 4 月 5 日、2004-111175
4. カーボンナノチューブの製造方法、神崎賢一、本間芳和、日本電信電話株式会社、平成 16 年 7 月 8 日、2004-201778
5. 半導体装置の製造方法、鈴木哲、神崎賢一、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 16 年 7 月 8 日、2004-201782
6. トンネル接合の形成方法、鈴木哲、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 16 年 9 月 15 日、2004-268068
7. プローブ型光測定装置、村下達、小林慶裕、登倉明雄、住友弘二、日本電信電話株式会社、平成 16 年 10 月 18 日、2004-302496
8. 光機能素子、川西悟基、大原拓也、谷口篤、小林慶裕、神崎賢一、日本電信電話株式会社、平成 17 年 2 月 28 日、2005-054513
9. 配列カーボンナノチューブの製造方法、神崎賢一、日比野浩樹、尾身博雄、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 17 年 3 月 15 日、2005-073525
10. カーボンナノチューブの製造方法およびトランジスタの製造方法、神崎賢一、鈴木哲、小林慶裕、猪川洋、小野行徳、日本電信電話株式会社、平成 17 年 3 月 15 日、2005-092444
11. カーボンナノチューブ成長用基板及びカーボンナノチューブの形成方法、前田文彦、日比野浩樹、鈴木哲、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 17 年 3 月 28 日、2005-091072
12. 発光素子及びその製造方法、登倉明雄、前田文彦、日比野浩樹、住友弘二、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 17 年 3 月 28 日、2005-092425
13. レーザ装置、発光素子及びその製造方法、登倉明雄、本間 芳和、小林慶裕、

- 松岡隆志、日本電信電話株式会社、平成 17 年 4 月 5 日、2005-109245
14. カーボンナノチューブの形成方法、チョン グーハン、小林慶裕、鈴木哲、日本電信電話株式会社、平成 17 年 8 月 5 日、2005-227740
 15. 光機能素子およびその製造方法、谷口篤、大原拓也、川西悟基、神崎賢一、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 17 年 8 月 5 日、2005-228474
 16. 半導体装置の製造方法および装置、鈴木哲、神崎賢一、前田文彦、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 17 年 12 月 15 日、2005-361479
 17. カーボンナノチューブの直径制御方法および直径制御装置、鈴木哲、神崎賢一、前田文彦、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 17 年 12 月 20 日、2005-366128
 18. トンネル接合の形成方法及びトンネル接合の形成装置、鈴木哲、神崎賢一、前田文彦、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 17 年 12 月 26 日、2005-372270
 19. トランジスタの製造方法、神崎賢一、鈴木哲、前田文彦、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 18 年 1 月 20 日、2006-012289
 20. カーボンナノチューブの成長方法、本間芳和、高木大輔、学校法人東京理科大学、平成 18 年 3 月 20 日、2006-076478
 21. カーボンナノチューブの成長方法およびカーボンナノチューブ構造体の製造方法、本間芳和、高木大輔、学校法人東京理科大学、平成 18 年 3 月 20 日、2006-076498
 22. カーボンナノチューブトランジスタの製造方法、鈴木哲、小林慶裕、日本電信電話株式会社、平成 19 年 2 月 5 日、2007-025223
 23. カーボンナノチューブの成長方法およびカーボンナノチューブ構造体の製造方法、本間芳和、高木大輔、学校法人東京理科大学、平成 19 年 2 月 20 日、2007-039553
 24. 医療用吸着剤、荻野俊郎、大矢剛嗣、安藤桂一、植田哲弘、山田哲、小山尹誉、横浜国立大学 メディカルサイエンス、平成 19 年 3 月 16 日、2007-69580

②海外出願 (0 件)

(5)受賞等

①受賞

高木大輔 応用物理学会講演奨励賞「熱CVDを用いた孤立単層カーボンナノチューブの垂直成長」2004年5月 応用物理学会
高木大輔 Student Award 2005年12月10日 ALC'05 (5th international Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices)
吉田秀人 吉田秀人 応用物理学会講演奨励賞「環境 TEM によるカーボンナノチューブ成長ダイナミクスの研究」2007年12月 応用物理学会

②新聞報道

朝日新聞 2004年1月28日「プロジェクトナノチューブ 電子素子 導電性は銅線の一千倍に」
日刊工業新聞 2004年9月1日「カーボンナノチューブ成長過程その場で観察 阪大 透過型顕微鏡開発へ」
日経産業新聞 2005年2月3日「電子線で容易に切断 NTT LSI向け配線技術」
日刊工業新聞 2006年7月21日「ナノステップサファイアプレート」
化学工業日報 2006年11月27日「触媒、鉄属以外を適用 金・銀・銅など 単層 CNT 合成成功」
日刊自動車新聞 2006年11月29日「カーボンナノチューブ 鉄族金属以外で精開発合

成」

電波新聞 2006 年 12 月 7 日「金・銀・銅触媒に カーボンナノチューブ合成に成功」

日本経済産業新聞 2006 年 12 月 12 日「単層ナノチューブ 金・銀・銅触媒で成功」

朝日新聞 2006 年 12 月 19 日 「カーボンナノチューブ 金銀の触媒で合成成功」

③その他

Nanowerk (<http://www.nanowerk.com/>)への掲 2006 年 12 月 6 日

“Quite unexpectedly, gold, silver and copper can produce single-walled carbon nanotubes”

金・銀・銅を触媒とした CNT 合成の紹介とインタビュー記事

<http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1104.php>

Nanowerk (<http://www.nanowerk.com/>)への掲 2007 年 4 月 26 日

“Watching carbon nanotubes grow” Finnie グループのその場ラマンイメージングの紹介とインタビュー記事

<http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1842.php>

nature nanotechnology vol. 2, No. 9, 2007, p. 531 “TOP DOWN BOTTOM UP” Nano Lett.

7, 2272 (2007)掲載の半導体触媒による CNT 合成の論文の紹介とインタビュー記事

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H16. 7. 23	チーム内ミーティング	横浜国立大学	6名	各グループの進捗状況報告、研究の進め方の討論
H16. 10. 5～6	JST カーボンナノチューブ合同研究会	伊豆伊東ホテル聚楽	50 名	CNT 関連研究チームの交流
H17.6.23	本間チームオンサイトミーティング	東京理科大学森戸記念館	約 40 名	研究進捗状況の報告
H18.10.10 ～ 12	JST 領域横断ワークショップ	飯綱高原ホテルアルカディア	約 50 名	CNT 関連研究チームの交流
H18.12.20	本間チームオンサイトミーティング	東京理科大学 9 号館	約 50 名	研究進捗状況の報告
H20.1.26 ～ 28	JST 領域横断シンポジウム	湘南国際村センター	約 50 名	CNT 関連研究チームの交流

8 研究成果の展開

(1)他の研究事業への展開

①JST先端計測分析技術・機器開発事業「AFM 探針形状評価技術の開発」

平成 17 年度～平成 20 年度 研究代表者 一村信吾 研究分担者 本間芳和

内容:原子間力顕微鏡(AFM)の探針形状評価用の標準物質として、架橋 CNT を用いたナノ標準を開発する。

②平成 19 年度 JST シーズ発掘試験「炭素系複合ナノ材料の開発」 研究代表者 荻野俊郎

③科学研究費補助金 特定領域研究(計画研究)「機能性カーボンナノチューブの光物性に関する研究」平成 19 年度～平成 24 年度 研究代表者 本間芳和

内容:CNT の光デバイス応用を目指し、CNT の光学特性を評価する。

(2)実用化に向けた展開

①NEDOナノテク・先端部材実用化研究開発「単一ナノ物質の原子分解能高精度分析システ

ムの研究開発」平成 17 年度～平成 19 年度 研究代表者 中井泉 研究分担者 本間芳和
内容:架橋 CNT をナノ物質の保持材料として、ナノ領域の X 線分析用の試料を開発する。また、SEM 中でのその場分析により、架橋 CNT 中での物質反応を探る。

- ②荻野グループ共同研究「カーボンナノチューブによるビリルビン吸着機能に於ける時間との特
性および温度による吸着性能評価に関する研究」(メデイカルサイエンス株式会社)

9 他チーム、他領域との活動とその効果

(1)領域内の活動とその効果

石橋チーム「カーボンナノ材料を用いた量子ナノデバイスプロセスの研究」とは、本チーム発
足当初から連携関係にあり、CNT の成長制御に関して学生の派遣を通して協力して研究を
遂行した。

彌田チーム「信頼性ナノ相分離構造テンプレートの創製」とは、ナノ相分離構造テンプレート
を CNT 触媒前駆物質の直径・配列制御に応用すべく、共同研究を実施した。今後も共同研
究を継続する予定である。

市川チーム「超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術」の超微細ナノドットは、
CNT 触媒として利用できる可能性があり、今後、Ge や鉄シリサイドのナノドットを使った共同研
究を実施する予定である。

(2)領域横断的活動とその効果

JST 内のカーボンナノチューブ関連プロジェクト(石橋チーム、松井チーム、本間チーム、松本
チーム、篠原チーム、岩佐チーム)が領域を横断して研究成果発表、交流を行うシンポジウム
を共同で 3 回実施した。情報交換、特に若手研究者・学生同士の交流が大いに促進された。

10 研究成果の今後の貢献について

(1)科学技術の進歩が期待される成果

・固体ナノ触媒からの CNT 生成を実証したことにより、結晶性ナノ粒子から CNT をエピタキシャル
成長させる可能性が高まった。CNT のエピタキシャル成長が実現できれば、カイラリティ制御
のブレークスルーになると期待される。今後、エピタキシャル成長が可能な触媒種探索が実験・
理論の両面から盛んになると予想される。

・環境 TEM 技術は、CNT の研究だけでなく、ナノ触媒の作用を解明する上で重要な技術である。
今回、2kPa の窒素ガス雰囲気中においても 0.16nm に及ぶ高い分解能が得られることを実証し、
かつ、高温の実 CVD 雰囲気において CNT の格子像観察を実現した。この成果は今後の環境
電顕技術の利用を加速させると考えられる。

(2)社会・経済の発展が期待される成果

・金、銀、銅のナノ触媒は実用的に十分な収率の CNT が得られるので、従来の鉄、コバルト、ニ
ッケル触媒を用いた場合、これら金属の磁性が問題となる分野で工業的に利用できると期待さ
れる。

11 結び

研究提案を行った時点では、CNT のカイラリティ制御には全く見通しの無い状況であった。この
ため、CNT 成長機構の解明をめざして新しいその場観察・計測法の開発を掲げての応募であった。
4 年間では目標に到達できないリスクがあった基礎的研究の提案を採用していただいたことに深謝
している。この 4 年間の研究で TEM、SEM、ラマン分光法、PL 法によるユニークなその場観察・計
測法を確立するとともに CNT 成長機構に関する理解が急速に深まった。全く見通しの無かったカ
イラリティ制御がようやく視界に入ってきたと感じている。われわれの金・銀・銅における CNT 生成
触媒作用の発見は、他の CNT 合成研究者に大変なショックを与えた。最新の固相 SiC の触媒作
用の発見はさらなる波紋を広げるはずである。この時点では、われわれが CNT の成長機構を最も

的確に把握していると自負している。かつ、世界有数の CNT 成長過程観察技術を構築したところである。これらの知的財産と技術を最大限に活かし、カイラリティ制御の実現に向けて研究を加速したい。