

領域略称名：ナノチューブ  
領域番号：475

平成24年度科学研究費補助金  
「特定領域研究」に係る研究成果等の報告書  
「カーボンナノチューブナノエレクトロニクス」

(領域設定期間)  
平成19年度～平成23年度

平成24年6月

領域代表者 名古屋大学・工学研究科・教授・水谷 孝

## 目次

1. 研究領域の目的および概要
2. 研究領域の設定目的の達成度
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況
4. 主な研究成果
5. 研究成果の取りまとめの状況
6. 研究成果の公表の状況
7. 研究組織と各研究項目の連携状況
8. 研究費の使用状況
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度
10. 研究計画に参画した若手研究者の状況
11. 総括班評価者による評価の状況

## 1. 研究領域の目的および概要

研究領域名：カーボンナノチューブナノエレクトロニクス

研究期間：平成19年度～平成23年度

領域代表者所属・職・指名：名古屋大学・教授・水谷孝

補助金交付額（金額単位：千円）

	直接経費
2007年度	285,900
2008年度	340,600
2009年度	301,700
2010年度	236,600
2011年度	159,400
総計	1,324,200

目的：

カーボンナノチューブ(CNT)は、1nm という分子レベルの直径を“ビルト・イン”で有する円筒状ナノカーボン物質である。その一次元性から、無散乱電子輸送、高い電子放出特性、大きな比表面積、大きな電子-正孔結合エネルギー等さまざまな特長を有し、また材料の持つ柔軟性と相まって多くの期待が寄せられ、本特定領域申請当時、これらの特長に基づいた CNT デバイスの基本特性も示されつつあった。しかしながら、CNT の成長機構の理解とそれに基づく特性のそろった高品質 CNT の成長は十分とは言えなかった。また、その一次元性がゆえに影響が大きくなる外部環境の効果、あるいは欠陥が CNT の電気特性・光学特性に及ぼす影響等に関して不明な点も多く、CNT のポテンシャルを十分に発揮させるには至っていなかった。

そこで本領域では、「CNT のデバイス、成長、評価、理論の研究を進めている主要研究者を結集し、各分野の専門家が連携してこれらの課題を解決し、CNT ナノエレクトロニクスにおいて世界をリードする先進的研究を推進すること」を設定目的とした。その成果は、日本発の材料である CNT に関する材料科学、物性物理、およびデバイス物理に関して理解を深めると同時に、CNT のナノエレクトロニクスへの発展の基盤技術を確立するものである。

概要

本特定領域研究では、上記目的を達成するため A01:新機能カーボンナノチューブデバイス開発、A02:機能性カーボンナノチューブの創製、A03:機能性カーボンナノチューブの物性評価、A04:機能性カーボンナノチューブ物性の理論解析・デザインの4つの研究項目を設け、各研究項目間が有機的に連携して研究を推進する体制を構築した。本体制により、ナノチューブ独自の特性を生かした新機能ナノデバイスを探索し、その基本機能を実証する。なお各項目間の連携を推進するため、ナノチューブ材料、デバイス等を各研究グループ間でやり取りするなど、共同研究を積極的に実施する。

## 2. 研究領域の設定目的の達成度

以下に各項目の代表的な成果をまとめたとおり、ナノチューブの基礎物性からデバイス応用までの各項目において、世界を先導する多くの成果を得ることができ、各項目とも設定目的を十分に達成することができた。

### A01「新機能カーボンナノチューブデバイスの開発」

ナノチューブ薄膜トランジスタにおいて、ナノカーボンの中で世界最大の集積規模(108素子)、

最高の動作速度(0.51 $\mu$ s/ゲート)の薄膜トランジスタ集積回路を実現し、世界最先端の技術を実現するとともに、ナノチューブ薄膜トランジスタの応用展開の可能性を示した。さらにカーボンナノチューブ電界効果トランジスタを用いたバイオセンサーにおいては、確率共鳴現象を利用した pH 検出に初めて成功するとともに、カーボンナノチューブの水平配向成長による CNT チャネル高密度化と組み合わせて、高感度動作に成功した。また CNT 電子源を文字表示用ディスプレイ、電離真空計、走査電子顕微鏡用の電子源に利用し、その実用可能性を示した。さらに、将来のナノ電子デバイスとしての展開が期待される量子デバイスにおいては、CNT 量子ドット中の励起子のコヒーレント操作の基本原理解説に初めて成功し、励起子量子ビットへの発展の可能性を明らかにした。

#### A02 「機能性カーボンナノチューブの創製」

反応制御熱 CVD、2 元金属触媒レーザーオープン法や非磁性触媒プラズマ CVD 法の開発によって、(6, 5)などのほぼ単一カイラリティの単層 CNT 合成を世界に先駆けて実現すると共に、水晶基板上での水平配向合成の高密度化なども実現した。また、密度勾配超遠心分離法やゲルクロマトグラフィー法、分子ピンセット分離法などの分離技術を開発し、単一カイラリティ単層 CNT 分離、高純度の半導体/金属 CNT 分離等に加えて、世界に先駆けた光学活性単層 CNT の分離などを実現している。ゲルクロマトグラフィー法では繰り返し分離法と組み合わせることで検出限界以下の世界最高純度(99%)を実現した。さらに、高純度 2 層 CNT、各種内包 CNT (ピーポッド)、金属ナノワイヤ内包 CNT などを創出し、世界を先導する成果を得た。また新奇ナノチューブの構造、電子・磁気物性などの基礎物性を解明すると共に、高純度半導体 CNT ではこれを薄膜トランジスタ、透明フレキシブルトランジスタに適用し、世界的に注目される特性を実証した。

#### A03 「機能性カーボンナノチューブの物性評価」

CNT の電子顕微鏡、走査型プローブ顕微鏡、光学測定による高度な評価を実現し、CNT の各種欠陥の解明ならびに新奇物性の発見に寄与した。具体的には、高分解能電子顕微鏡による CNT 成長時に導入される五員環/七員環等のトポロジカル欠陥や酸化で生じる欠陥の直接観察、各点ストロボ走査ゲート顕微鏡による CNT チャネルにおける欠陥や電位障壁の評価、SWNT 探針の STS による CNT の状態密度・van Hove 特異性の高精度計測とカイラリティの同定、など世界最先端の評価・解析結果を得た。新奇物性に関しては、CNT 周囲の分子間力場に形成される水単分子層の存在・挙動の解明、CNT 内に内包したナノチューブカプセルの熱エネルギーによるリニア振動の発見、荷電励起子(トリオン)の室温・固体物質中での初めての観測など、世界の中で有数の特徴ある成果が得られた。さらに CNT の光学的性質を決める励起子状態の微細構造、二層 CNT やバンドル CNT における励起子エネルギー移動レートなど、重要な基礎物性を解明した。

#### A04 「機能性カーボンナノチューブ物性の理論解析とデザイン」

ナノチューブの幾何構造パラメータの詳細、バンド構造、さらには、全エネルギーを世界で初めて系統的に解明した他、(6, 5)カイラリティなどのニアアームチェアチューブのエネルギー的な安定性を発見するなど、今後のナノチューブ成長とデバイス応用展開の基礎データを与えた。

さらにカーボンナノチューブの光スペクトルについて、2 光子吸収、環境誘電体効果、バンド非等方性によるファミリ効果、さらに 2 層ナノチューブの層間遮蔽効果などについて統一的な計

算手法を用いてその全体像を解明した。

また電極/CNT 界面に印加するストレスを制御することにより、仕事関数の大きい Au 電極でも p 型と n 型のナノチューブ FET を作り分けることが可能であることを第一原理計算で示した。

以上のように第一原理電子構造計算による研究、有効質量理論による研究で世界第一線の成果を多数達成し、本領域における国内外の研究発展に大きく寄与するとともに、世界に対し先導性を示した。

なお、領域設定期間終了の翌年度に当たる本年 6 月に実施した国際会議形式の成果報告会において、招待講演をお願いした世界的に活躍している著名な研究者にアンケート形式で本領域の研究成果について評価をいただいたが、研究のオリジナリティ、研究成果の質（世界トップクラスかどうか）、ナノチューブナノエレクトロニクスへの発展の可能性、本領域全体としてのアクティビティの高さのすべての項目において、最高クラスの評価をいただいた。

### 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況

本領域の研究を推進するにあたって深刻な問題点はなかったが、以下の事項を要検討事項と考え、対応をとってきた。

#### (i) 専門分野の異なる研究者の相互交流と連携研究の推進

本特定領域は、デバイス、成長・合成、物性評価、物性理論と専門分野の著しく異なる研究者集団から構成されており、適切な領域運営を行わないと、バラバラな研究になってしまう懸念があった。一方、有効な相互交流を行えば研究視野が広がるばかりか、連携研究により新たな研究の広がりや発展が大いに期待できる。以上のことを踏まえ、本特定領域発足以来、連携研究の重要性を強く指摘し、研究グループ間の共同研究を呼びかけるとともに、計 13 回の班会議、1 回のテーマを絞った班横断討論会で、研究課題の共有化と連携研究の推進を図った。また本領域で購入した設備のうち共用化が可能なものについては、設備情報を領域ホームページのメンバー専用ページに掲載し、研究費の効率的使用を図った。以上の結果計 52 件の連携研究が行われ、53 件の共著論文、104 件の連名の講演に結び付けることができた。

#### (ii) 研究成果の積極的な情報発信と広報

本領域の研究成果を学術論文として公表するのみで満足することなく、広く情報発信していくことが重要である。そのための方策として、本領域で開催する全体会議および研究会はすべて公開とするとともに、ホームページを使った広報、特定ニュースレター（1～9 号）の発行と関連学会研究者への送付など、種々の方法で情報発信を行ってきた。

また、応用物理学会でのシンポジウムの企画（2 回）、関連研究会等（フラーレン・ナノチューブ学会、学術振興会 151 委員会、応用物理学会応用電子物性分科会）との双方向情報交流などを実施し、関連学会と連携して本研究分野の発展を推進してきた。

#### (iii) 国際的視野に立った研究の推進

競争の厳しい本分野で先導的な役割を果たすためには、国際的な視野に立って研究を推進していく必要がある。この施策の第 1 歩として、国際会議を共催も含めてこれまでに 5 回開催し、本特定の活動と成果をアピールするとともに、活発な議論を行ってきた。また最終成果発表会は国際会議形式とし、国内外を対象に研究成果を発表した。

#### (iv) 新分野の開拓とエレクトロニクスへの展開

中間評価において指摘された「公募研究課題の参画による組織の拡充」に対応すべく、また本

特定でこれまでカバーできていなかったナノチューブ薄膜トランジスタについて、H22 年度から公募研究で取り上げた。しかし採択者が1年後に「内閣府の最先端・次世代研究開発支援プログラム」に採択された結果、重複制限のため本特定領域における公募研究を辞退することとなったため、このテーマは領域代表が担当することとした。その結果世界最大規模かつ最高速のナノチューブ薄膜トランジスタ集積回路を実現することができた。

なお特定領域を開始後、国内外で急速に研究が立ち上がりまたナノチューブと関連が深いグラフェンについては、ナノチューブに対する研究パワーを削ぐことなくナノチューブ/グラフェンの得失を明らかにすべく、おもに理論班でナノチューブとの比較の観点で取り上げてその物性を明らかにしてきた。また本領域が企画・開催するシンポジウムにおいてグラフェン研究者を交えて得失と課題を議論した。

また、エレクトロニクスへの展開に対する期待に応えるには、科学としての視点のみではなく、産業応用等のこれとは異なる視点も持って研究を推進していくことが望ましいことから、産業界から3人の研究者に特別委員として参加してもらう体制をとった。

#### (v) 若手研究者の活性化

高い実績を有する研究者に囲まれて、委縮することなく本特定領域の研究に積極的に参加することは彼らの成長にとって重要であり、その雰囲気醸成すべく、研究分担者を始めとする若手研究者が中心となった班会議を開催したり、特定研究会でポスター発表を企画し、討論の場を設けた。以上の施策の結果、若手研究者23名が受賞するなど、若手研究者の活性化を図ることができた。

## 4. 主な研究成果

研究項目毎の主な研究成果は以下のとおりである。

### A01 「新機能カーボンナノチューブデバイスの開発」

#### 水谷 孝

1. 半導体的に振る舞う CNT の優先成長技術を活用した CNT 薄膜トランジスタを用いて、ナノカーボンの中で世界最大の集積規模 (108 素子)、最高の動作速度(0.51 $\mu$ s/ゲート)の CNT 薄膜トランジスタ集積回路を実現し、ディスプレイへの展開の可能性を示した。(図1)
2. ソース/ドレイン電極下に形成した埋め込みゲート電極を有する、電界ドープ型 FET や pn 接合の作製を可能とするとともに、pn 接合の順バイスにおける電子—正孔同時注入発光、光検出動作に成功し、光電子複合デバイスの可能性を実証した。
3. CNT-FET において半導体的振る舞いを示す CNT を優先的に成長可能な PECVD において、その原因が、金属的 CNT に生じた欠陥が障壁として振舞うためであることを明らかにした。

#### 松本和彦

1. カーボンナノチューブ電界効果トランジスタを用いてバイオ分子を電気的に検出する素子において、確率共鳴特性を活用して高感度なバイオセンシングに成功した。(図2)
2. 微細な機能性カーボンナノチューブの特長を活用して、石英基板を用いた方向制御カーボンナノチューブアレイを用いた高感度バイオセンシングに成功した。

#### 石橋幸治

以下に示すとおり、CNT 量子ドット中の励起子のコヒーレント操作の基本原理解説に初めて成功し、励起子量子ビットへの発展の可能性を明らかにした。(図3)

1. 1個のナノチューブ量子ドットからの発光を観測し、光との強結合状態（励起子ポラリトン）を観測した。
2. パルス列の照射による、励起子発光のコヒーレントな制御を実現した。

### 齋藤 弥八

1. CNT 電子源を文字表示用ディスプレイ，電離真空計，走査電子顕微鏡用の電子源に利用し，その実用可能性を示した。（図4）
2. 単一 CNT と電極金属との接合における電子放出特性および電子輸送特性を解明するとともに，CNT-金属電極コンタクトにおけるコンタクト抵抗と接触面積の関係を明らかにし，電子放出素子の性能向上の指針を得た。

### 梅山 有和

1. 光機能性分子（ポルフィリン）により共有結合修飾されたフラーレンピーポッドを創製し，それを用いた光電変換デバイスでは，ポルフィリンの吸収に由来する光電流の発生を観測した。

### 竹延 大志

インクジェット法の持つ膜密度調節機能を用いて、カーボンナノチューブ密度と薄膜伝導の関係を示した。この知見を基に、インクジェット法を用いて電極（高密度カーボンナノチューブ膜）・半導体（低密度カーボンナノチューブ膜）・ゲート絶縁膜（イオン液体）全てをインクジェット法で作製した完全塗布型カーボンナノチューブトランジスタの作製に成功した。

### 喜多 隆

エラストマに練り込んだ MWCNT を利用したフレキシブルフィールドエミッションデバイスにおいて、添加する MWCNT 濃度でエラストマのシート抵抗を制御し、高圧印加により 1mA を超える極めて強い電子放出を実現した。励起した蛍光体輝度は 10 万 cd/m<sup>2</sup> を超える世界最高性能を示した。

### 藤原 明比古

強磁性体を電極としたカーボンナノチューブ電界効果トランジスタを作製し、電場および磁場による伝導度変調に成功した。さらに、強磁性電極を設計し磁気異方性を利用した磁気特性の制御を実現した。

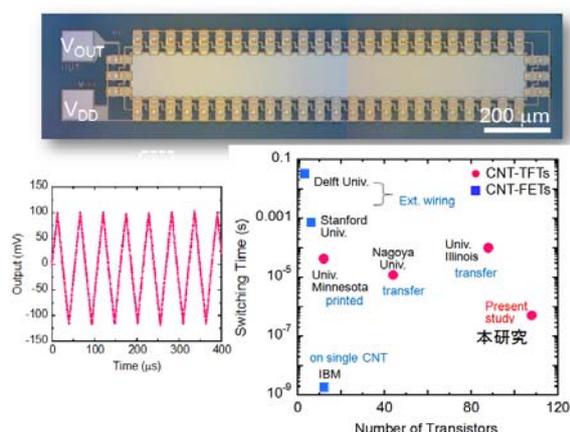


図1. CNT 薄膜トランジスタ集積回路（世界最大規模(108TFTs)かつ最高速度(51μs/gate))リング発振器を実現。(ディスプレイに適用可) (水谷)

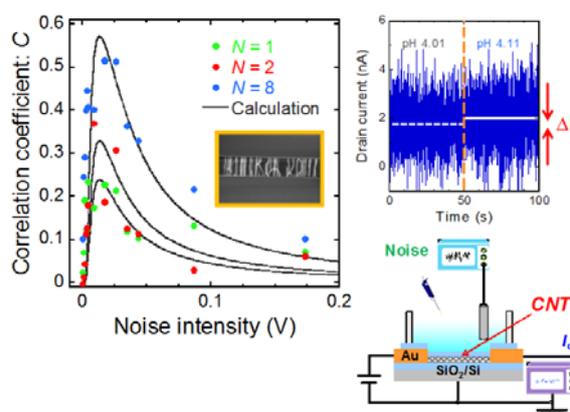


図2. 確率共鳴現象を利用した高感度バイオセンシング（白色雑音の重畳とCNTチャネル数Nの増加により感度向上）。(松本)

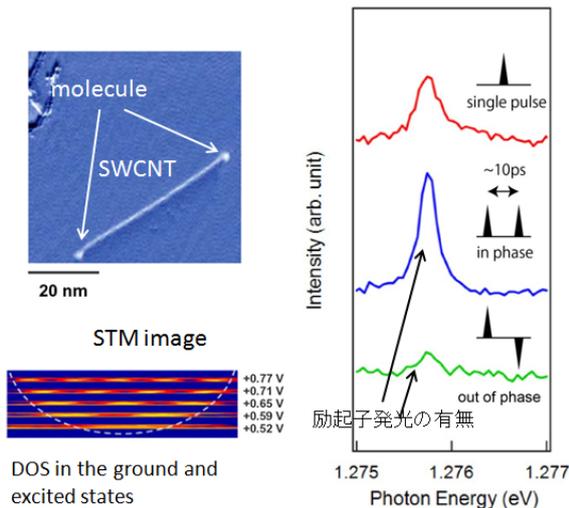


図3. CNT 量子ドット中の励起子のコヒーレント操作の基本原理解証(STSによる量子状態観測(左)と光パルスによる励起子発光の制御(右))。(石橋)

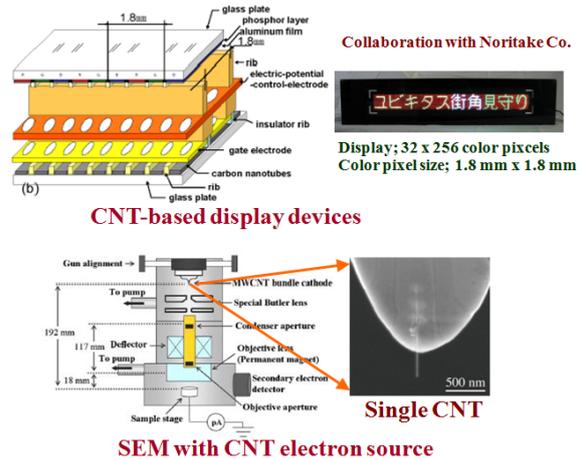


図4. 電池駆動可能なCNTディスプレイ素子(上)とCNTを電子源(高い安定性)に用いた走査電子顕微鏡(下)。(齋藤弥八)

## A02 「機能性カーボンナノチューブの創製」

丸山茂夫

1. 単層 CNT 合成効率を左右する微量のアセチレンの効果などを明らかにするとともに、単層 CNT 合成プロセスにおける化学反応プロセスの解明と異種分子混合などによる制御を実現した。また、Co/Mo の二元触媒の精密制御とエタノール原料ガスへのアセトニトリル添加による窒素ドープによって、小径単層の(6,5)を初めとする高純度ニアアームチェアナノチューブを選択的に合成できることを示した。(図5)
2. チャネルおよび電極用の単層 CNT 成長と転送技術を組み合わせることにより、透明フレキシブル FET の作製と動作実証に成功した。

篠原久典

1. 独自に開発したゲルクロマトグラフィー法を用いて長さ選別・分離を行い、長尺(平均長 $\sim 2 \mu\text{m}$ )かつ、高純度( $>99\%$ )の半導体 CNT を分離精製することに成功した。(図6) この試料を薄膜トランジスタのチャネルに適用して、高移動度 ( $170\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ ) と高オンオフ比 ( $10^6$ ) を実現した。
2. 天然 DNA をラップすることで、SWCNT の孤立分散に成功した。また、非吸着 DNA を除去しても CNT が凝集しないという、界面活性剤等とは全く異なる特異な分散特性を発見した。この性質を活用して、高均一な DNA-CNT のネットワークを構築し、孤立 CNT からなる導電性薄膜として利用できることを見出した。
3. 金属ナノワイヤ内包の単層、2層ナノチューブの高収率合成法を独自に開発して、構造と電子物性を高分解能透過型電子顕微鏡と磁気測定により解明した。

畠山カ三

1. 非磁性触媒及び時間制御型プラズマ CVD による“極狭カイラリティ分布単層 CNT(SWNT)の選択合成“の実現に続いて、特定の(6, 5)カイラリティ SWNT のみの大量合成を可能にする“核

成長孵化時間差の増大化”に成功した。(図7)

2. プラズマイオン照射による原子・分子内包 CNT 成長/創製技術を開発するとともに、新規光電子融合デバイスに発展が期待できるナノ光スイッチングと高効率光電変換機能、電気磁気融合デバイスに発展が期待できる強磁性(低温)/超常磁性(室温)転移現象を発見した。

### 阿知波洋次

レーザー蒸発法を用いて、チューブ成長における反応場の温度、活性化エネルギー、供給炭素量の精密制御により、単一(6,5)カイラリティチューブ作製法を確立した。(図8)

### 小松直樹

光学活性単層カーボンナノチューブを得る手法として提案済みの分子ピンセットを法に関して、論理的分子設計手法を確立し、これを用いて SWNT の構造識別能を高めることに成功した。また論理的に設計したピンセット型分子(分子ピンセット)を用いた分子認識に基づく SWNT の新規分離法を確立した。分子ピンセットは SWNT の直径を認識すると同時にその右巻き、左巻きを識別し、世界で初めて光学活性 SWNT を得ることに成功した。(図9)

### 保田 諭

合成時の熱揺らぎを抑え、構造を自在に制御可能な合成プロセスを開発することを目的に、室温・溶液プロセスである電気化学重合による SWNT 合成を検討し、微量ではあるが SWNT の合成が可能であることを明らかにした。また生成する SWNT の直径を触媒サイズにより制御可能であることを明らかにした。

### 小林慶裕

フラーレンやナノダイヤモンド成長核からの CNT 成長機構を検討し、結晶成長核からの高効率 CNT 成長の指針を解明し、高効率 CNT 自己複製成長を実現するための基礎を築いた。

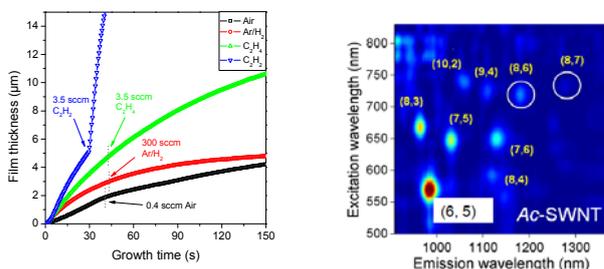


図5. 成長過程における微量アセチレン効果解明(微量添加することによる成長速度の急増大)と、アセトニトリル添加による小径単層の(6,5)を初めとする高純度ニアアームチェア CNT の選択的合成。(丸山)



図6. CNT 分散液の工夫と半導体/金属 CNT の繰り返し分離により高純度(99%以上、現状の検出限界)、長尺(2μm)分離を実現。(篠原)

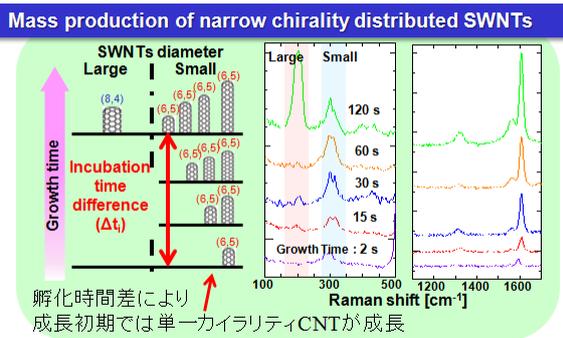


図7. CNT成長開始までの孵化時間がカイラリティに依存する現象の発見とそれを活用した単一(6, 5)カイラリティ CNT の大量成長の可能性実証。(畠山)

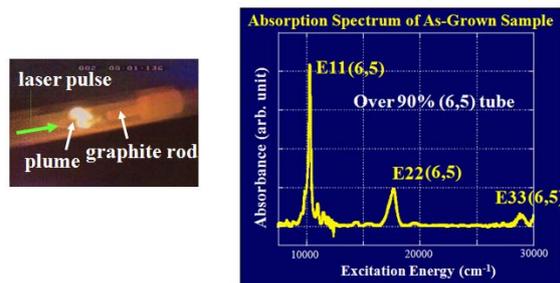


図8. レーザー蒸発法成長における反応場の温度、活性化エネルギー、供給炭素量の精密制御による単一カイラリティ(6, 5)CNT成長。(阿知波)

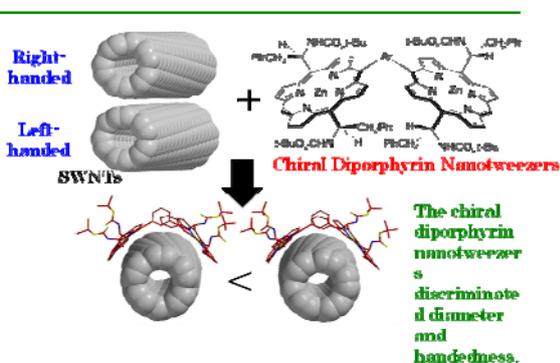


図9. 光学活性 CNT(右手/左手系)の分子ピンセットによる分離と、分子ピンセットの分子設計手法を確立。(小松)

### A03 「機能性カーボンナノチューブの物性評価」

本間芳和

1. CNT の発光に対する分子吸着効果を解析し、CNT 周囲の分子間力場に水をはじめとする単分子安定相が形成されることを解明した。(図10)
2. CNT への水素吸着により、三重項励起子の発光が誘起されることを解明した。

末永和知

1. 通常 TEM では脆弱性のため観察が困難な直径の細いカーボンナノチューブについても、電子ビームの低エネルギー化により観察を可能とするとともに、成長時に導入される五員環/七員環等のトポロジカル欠陥や酸化で生じる欠陥などの詳細な構造解析手法を確立した。(図11)
2. ナノチューブ内部に吸着する分子などの観察を通して、内包分子とナノチューブとの相互作用がその光学特性に影響を与えることを実証した。

## 片山光浩

1. 金属探針上に成長させた単層CNT(SWNT)探針のSTSにより (従来と逆の配置を提案)、SWNTの状態密度とvan Hove特異性の高精度計測とカイラリティの同定に成功した。(図12) さらにフォトンSTMによる単一SWNTからの発光特性計測法に道を拓いた。
2. SWNT表面への種々のガス分子の吸着・脱離機構を解明した。特に、Pt修飾SWNT上のCO吸着において、Ptナノ粒子上のCO酸化反応によってSWNTに電子供給される機構を解明した。

## 秋田成司

1. CNT内に内包したナノチューブカプセルが熱エネルギーによりリニア振動することを見だし、分子モーターの可能性を示した。(図13)
2. CNTの機械的振動の光学的測定法を開発し、それにより、真空以外での条件下での損失機構を明らかにした。(図13)
3. CNTの円筒状態と扁平状態間の遷移現象を見だし、その機構の解明と、この現象を利用した回転アクチュエータを提案した。

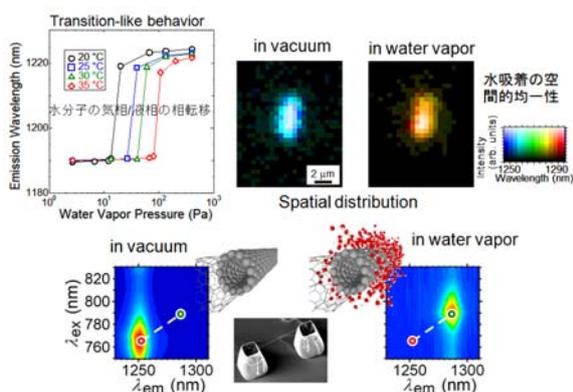


図10. CNTの発光解析を通じてCNT表面への安定な水吸着層の存在を証明し、CNT内格子振動特性等への影響を解明。(本間)

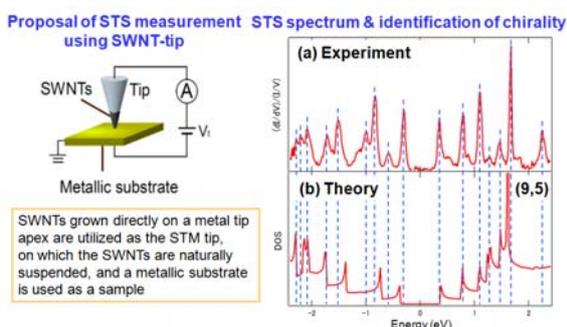


図12. CNT探針のトンネルスペクトロスコピー(探針と被測定基板との関係を逆にするのがポイント)によりCNT状態密度の精密測定を実現(理論と良い一致)。(片山)

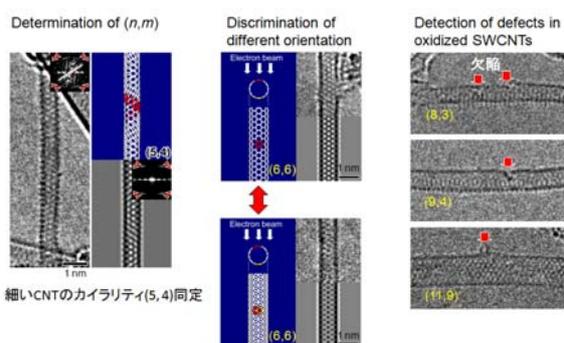


図11. 直径が細く不安定で観察困難なCNTの観察実現(照射電子エネルギーの低減)(左と中央)と、酸化で生じた欠陥の観察(右)。(末永)

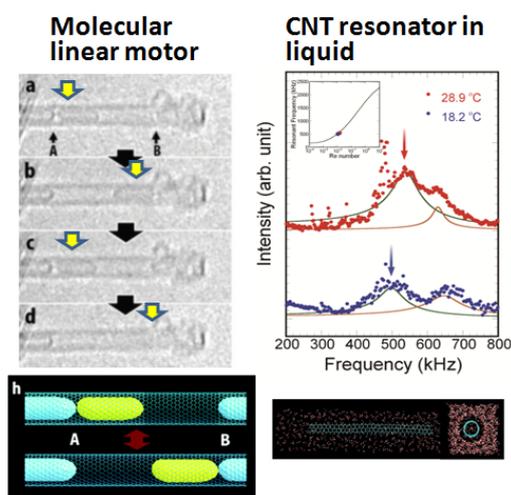


図13. CNTに内包したCNTカプセルの熱エネルギーによるリニア振動の観測(左)とCNT水中共振器の損失機構解明(右)。(秋田/中山)

## 山田啓文

1. 各点ストロボ走査ゲート顕微鏡を開発し、CNT チャンネルにおける欠陥や電極障壁の評価を可能とした。本計測法により従来法より高い空間分解能・短い測定時間で欠陥の可視化が実現できた。(図14)
2. ケルビンプローブ法による CNT チャンネル電位評価における問題点(チャンネル周辺束縛電荷の影響)を明らかにし、新たに開発した FM-HF-EFM(周波数変調高周波電気力顕微鏡)により、定量的な電位評価に成功した。

## 中村新男

1. フェムト秒時間分解分光法を用いて二層カーボンナノチューブの励起子エネルギー移動レートを初めて決定し、内層チューブは光らないこと、及びこれまでに報告されていた内層チューブ発光は、精製二層ナノチューブに不純物として含まれる単層ナノチューブからの発光であることを明らかにした。(図15)
2. 形態、距離を変えて単層カーボンナノチューブ間の励起子エネルギー移動レートを評価し、これまでの Forster モデルを発展させた distributed transition monopole 近似が妥当であることを明らかにした。(図15)

## 松田一成

1. カーボンナノチューブの光学的性質を決める励起子状態の微細構造を解明し、さらにカーボンナノチューブを含めて固体中で初めて、室温での荷電励起子(トリオン)の存在を実験的に観測することに成功した。(図16)
2. カーボンナノチューブの発光効率の律則要因がカーボンナノチューブの長さであることを明らかにし、さらにプラズモン共鳴現象を使い発光強度を増強させることに成功した。

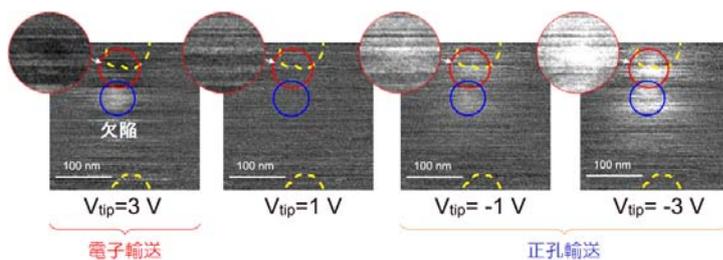


図14. 各点ストロボ走査ゲート顕微鏡による障壁の可視化。(各点測定モード計測により従来法より高い空間分解能・短い測定時間)。(山田)

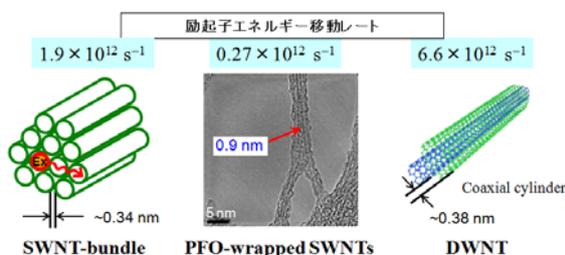


図15. フェムト秒時間分解分光計測による励起子エネルギー移動レートの測定。よく用いられる Forster 公式の限界と、二層 CNT における従来の定説を覆す結果を示した。(中村)

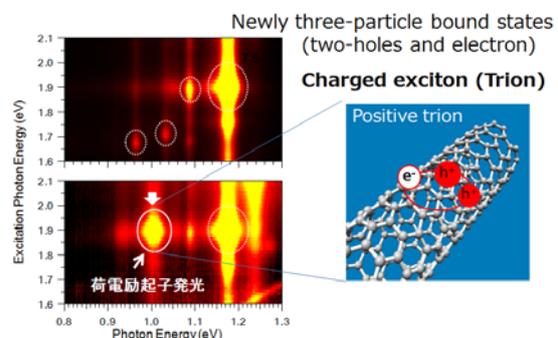


図16. CNT で荷電励起子(トリオン)の存在を実験的に観測することに成功。室温での観測は固体中では初めて。(松田)

## A04 「機能性カーボンナノチューブ物性の理論解析とデザイン」

齋藤 晋

1. CNT 直径の細いものから太いものまでの広い直径領域において、ナノチューブの幾何構造パラメータの詳細、バンド構造、さらには、全エネルギーの系統的解明を、世界に先駆けて達成した。この中で実験的によく得られる(6, 5)カイラリティナノチューブのエネルギー安定性を示した。(図 1 7)
2. グラフェン系とナノチューブ系における、不純物ドーピングの電子構造に及ぼす影響を予測した。

安藤恒也

1. カーボンナノチューブの光スペクトルについて、2 光子吸収、環境誘電体効果、バンド非等方性によるファミリー効果、さらに 2 層ナノチューブの層間遮蔽効果など統一的な手法の計算で、その全体像を明らかにした。(図 1 8)
2. ナノチューブの電場・磁場応答、有限長交流伝導率などを明らかにした。また、グラフェンの研究の新展開にともない、その異常反磁性帯磁率の起源、電気伝導、最小伝導率、環境遮蔽効果、単層/2 層グラフェン境界付近の電子状態の特徴などを理論的に明らかにした。

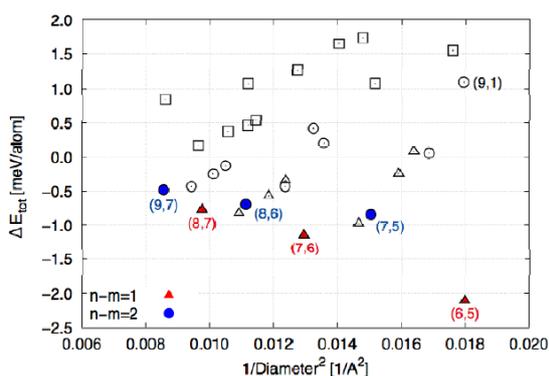
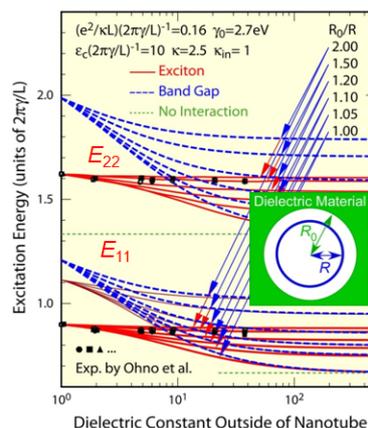


図 1 7. 各種 CNT の全エネルギー計算結果例。(6, 5), (7, 6)カイラリティ CNT が実験的によく得られることと対応する結果。世界で初めて CNT のボンド長、仕事関数、全エネルギー等を系統的に計算。(ヘリカル対称性操作の導入により実現)。今後の各種材料、デバイス設計の基礎となる。(齋藤晋)



誘電体遮蔽効果により遷移エネルギーが変化(水谷の実験結果を説明可)

図 1 8. 励起子エネルギーに与える環境誘電体遮蔽効果の計算例。CNT の光スペクトルについて、世界に先駆けて電子間相互作用と励起子効果の重要性を理論的に示し、統一的な手法の計算で、その全体像(2 光子吸収、環境誘電体効果、ファミリー効果等)を明らかにした。(安藤)

岡田 晋

1. 電界印加時における C59N 内包 CNT の電子構造を第一原理計算から求め、C59N の軌道が電界に対して強く応答し高エネルギー側にシフトすることを明らかにした。この結果をもとに、当該系において実験で観測される n 型伝導の機構を提案した。(図 1 9)
2. CNT 内の励起子と内包磁性原子上の局在スピンの相互作用による、三重項励起子発光を用いた磁性状態測定方法を提案した。

## 安食博志

1. 電極/CNT 接合に印加するストレスを制御することにより、仕事関数の大きい Au 電極でも p 型と n 型のナノチューブ FET を作り分けることが可能であることを、ファン・デル・ワールス引力補正を加えた第一原理計算で示した。(図 20)

2. レーザー光の振動数と偏光の調節で、共鳴放射力によりナノチューブのサイズと配向を選別することが可能であることを理論的に示した。

## 斎藤峯雄

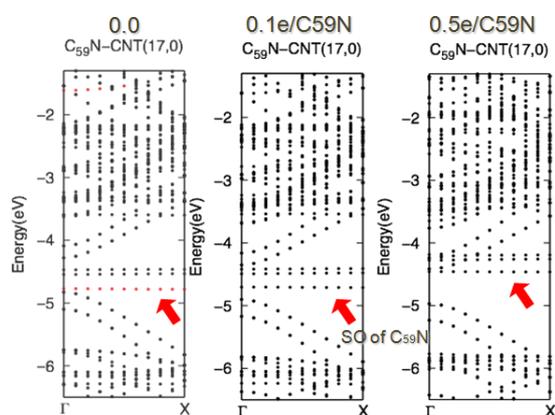
1. グラフェンやナノチューブに水素が吸着した場合、どのような位置につきやすいかを第一原理計算で明らかにした。またグラフェンにおける水素 2 量体では、最安定構造が従来と異なる事を発見した。さらに吸着する水素原子の数が奇数であると磁性が発現することを発見した。

2. グラフェンやナノチューブにおける、アダトム・空孔対が回復するバリアを計算し、低温での欠陥生成の実験結果を説明出来る結果を得た。

## 中西 毅

1. 扁平したカーボンナノチューブの電子状態を有効質量方程式の方法で調べ、2 層グラフェンと類似した対称および反対称サブバンドと、バンドギャップの有無を示した。

2. 比較研究として、1, 2 層グラフェン境界の境界条件を調べ、(1)谷分極伝導、(2)境界ランダウレベル、(3)STM 観察における新たな量子干渉効果などを明らかにした。



**Singly occupied state shift upward with increasing electric field**

図 19. C59N 内包 CNT の電子レベルが電界とともに上方にシフトする第一原理計算結果。C59N 内包 CNTFET が n 型伝導を示す実験結果 (畠山) と対応。(岡田)

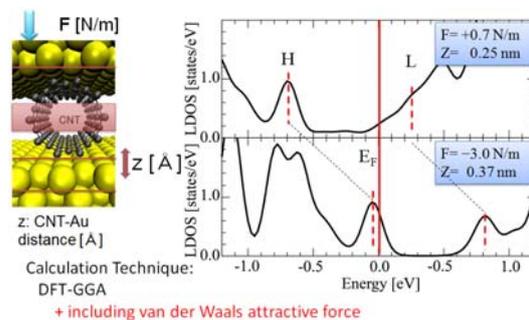


図 20. Au/CNT 接合におけるフェルミレベル ( $E_F$ ) の計算結果。印加するストレスを変えることにより ( $E_F$ ) は価電子帯上端から伝導帯下端まで移動。Au 電極により p 型から n 型まで実現できる。(水谷の実験結果を説明可) (安食/森川)

## 5. 研究成果の取りまとめの状況

研究成果の一部はすでに Japanese Journal of Applied Physics の special issue “Carbon Nanotube Nanoelectronics” (2010, vol. 4) にとりまとめて公表済みである。またこれまでの成果のうち体系化されたものについては、「9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度」のところで述べるように、書籍、ハンドブックとして公表し、本分野の発展に貢献した。

さらに領域設定期間終了の翌年度に当たる本年6月に国際会議形式の成果報告会を実施し、これまでの成果を Proceedings として発行した。

なお領域全体の研究成果内容を10ページ/研究代表者程度にまとめ、これを全発表論文リストとともに研究成果報告書(冊子体)とまとめる予定である。

## 6. 研究成果の公表の状況

研究成果の主要なものを以下に示す。発表論文数は合計938件と多数にのぼっており、アクティビティの高さを示している。なお発表論文リストを本特定領域のホームページ(<http://133.6.66.95/tokutei/>)に掲載している。これらを含む学術成果は、学術論文はもとより、共催を含めてこれまでに5つの国際シンポジウムを開催するなどして世界に向けて発信している。また本特定領域研究の成果発表会・研究会は公開とし、特定メンバー以外にも公表するとともに、議論を深めている。

このような成果・活動状況は1-9号のニュースレターにより関連分野研究者に周知するとともに、ホームページに掲載して、外部に発信している。このような学術分野における情報発信のみでなく、通算96件の新聞報道に見られるように、一般社会への広報活動にも努めている。

これらの研究成果は外部からも高く評価され、招待講演・依頼講演は通算627件、受賞57件を数えている。その中で奨励賞等の受賞が26件と、若手の活躍も目立っている。

### (1) 主な論文等一覧

平成19~23年度の全発表論文数は938件であり、多くの成果が得られた。なお全発表論文リストを特定領域のホームページ(<http://133.6.66.95/tokutei/>)に公表している。研究代表者毎のおもな論文は以下のとおりである。

(研究代表者：二重下線、研究分担者：一重下線、corresponding author：\*)

#### A01 新機能カーボンナノチューブデバイスの開発

水谷 孝

1. \*Y. Okigawa, S. Kishimoto, Y. Ohno, and T. Mizutani, "Electrical properties of carbon nanotube thin-film transistors fabricated using plasma-enhanced chemical vapor deposition measured by scanning probe microscopy", Nanotechnol. 22, 195202-1-7 (2011). (被引用回数,0)
2. \*T. Mizutani, Y. Okigawa, Y. Ono, S. Kishimoto, and Y. Ohno, "Medium Scale Integrated Circuits Using Carbon Nanotube Thin Film Transistors", Appl. Phys. Exp. 3, 11510-1-3 (2010). (被引用回数,4)
3. Y. Ono, S. Kishimoto, Y. Ohno, and \*T. Mizutani, "Thin film transistors using PECVD-grown carbon nanotubes", Nanotechnol. 21, 205205-1-5 (2010). (被引用回数,3)
4. \*T. Mizutani, H. Ohnaka, Y. Okigawa, S. Kishimoto, Y. Ohno, "A study of preferential growth of carbon nanotubes with semiconducting behavior grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition", J. Applied Phys. 106 (2009) 73705-1, 2009. (被引用回数,9)
5. \*Y. Ohno, S. Iwasaki, Y. Murakami, S. Kishimoto, S. Maruyama, T. Mizutani, "Excitonic transition energies in single-walled carbon nanotubes: Dependence on environmental dielectric constant", phys. stat. sol. (b) 244 (2007) 4002. (被引用回数,26)

松本和彦

1. Yasufumi Hakamata, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Seiya Kasai, Koichi Inoue, and \*Kazuhiro Matsumoto, "Signal Enhancement Based on Stochastic Resonance in Carbon Nanotube Field-Effect Transistors.", Proceeding of Fourth International Conference on Sensing Technology (2010) 1-5. (被引用回数,6)

2. Masuhiro Abe, Katsuyuki Murata, and \*Kazuhiko Matsumoto, "Dependence of sensitivity of biosensor for carbon nanotube field-effect transistor with top-gate structures.", J. Appl. Phys. 107 (2010) 084504. (被引用回数,0)
3. Kenzo Maehashi and \*Kazuhiko Matsumoto, "Label-Free Electrical Detection Using Carbon Nanotube-Based Biosensors.", Sensors 9 (2009) 5368-5378. (被引用回数,21)
4. Yasuki Yamamoto, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, and \*Kazuhiko Matsumoto, "Noise Reduction of Carbon Nanotube Field-Effect Transistor Biosensors by Alternating Current Measurement.", Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 06FJ01. (被引用回数,13)
5. Yuichi Tsujita, Kenzo Maehashi, \*Kazuhiko Matsumoto, Miyuki Chikae, Yuzuru Takamura, and Eiichi Tamiya, "Microfluidic and Label-Free Multi-Immuno-sensors Based on Carbon Nanotube Microelectrodes.", Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 06FJ02. (被引用回数,4)
6. Yuichi Tsujita, Kenzo Maehashi, \*Kazuhiko Matsumoto, Miyuki Chikae, Soichiro Torai, Yuzuru Takamura, and Eiichi Tamiya, "Carbon Nanotube Amperometric Chips with Pneumatic Micropumps.", Jpn. J. Appl. Phys. 47 (2008) 2064-2067. (被引用回数,13)

齋藤弥八

1. \*M. Karita, K. Asaka, H. Nakahara, Y. Saito: "In-situ TEM study on the improvement of contact resistance between a carbon nanotube and metal electrodes by local melting", Surface and Interface Analysis, (2012), DOI: 10.1002/sia.3864. (被引用回数,0)
2. \*H. Nakahara, S. Ichikawa, T. Ochiai, Y. Kusano, Y. Saito, "Carbon Nanotube Electron Source for Field Emission Scanning Electron Microscopy", e-J. Surf. Sci. Nanotech. 9 (2011) 400-403. (被引用回数,0)
3. \*H. Liu, H. Nakahara, S. Uemura, Y. Saito, "Ionization Vacuum Gauge with a Carbon Nanotube Field Electron Emitter Combined with a Shield Electrode", Vacuum 84 (2010) 713-717. (被引用回数,1)
4. \*J. Yotani, S. Uemura, T. Nagasako, H. Kurachi, T. Nakao, M. Ito, A. Sakurai, H. Shimoda, T. Ezaki, K. Fukuda, Y. Saito, "High-luminance 1.8-mm-pixel-pitch CNT-FED for ubiquitous color character displays", J. Soc. Information Display 17 (2009) 361-367. (被引用回数,1)
5. \*K. Asaka, H. Nakahara, Y. Saito, "Nanowelding of a multiwalled carbon nanotube to metal surface and its electron field emission properties", Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 023114 (3p). (被引用回数,21)

石橋幸治

1. Takahiro Morimoto Akihiro Kuno, Shota Yajima, \*Koji Ishibashi, Koji Tsuchiya, and Hirofumi Yajima, "Effective energy gaps of double-wall carbon nanotubes with field effect transistors ambipolar characteristics", Appl. Phys. Lett. 100, 043107 (3 pages) (2012) (被引用回数,0)
2. Maki Shimizu, Hikota Akimoto, and \*Koji Ishibashi, "Electronic transport of single-wall carbon nanotubes with superconducting contacts", Jpn. J. Appl. Phys. 50, 035102 (6 pages) (2011) (被引用回数,0)
3. H. Tabata, M. Shimizu, and \*K. Ishibashi, "Fabrication of single electron transistors using transfer-printed aligned single walled carbon nanotubes arrays", Appl. Phys. Lett. 95, 113107, (2009) (被引用回数,5)

梅山有和

1. T. Umeyama, J. Mihara, H. Hayashi, N. Kadota, V. Chukharev, \*N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, K. Yoshida, S. Isoda, M. Takano, \*H. Imahori, "Effects of Fullerene Encapsulation on Structure and Photophysical Properties of Porphyrin-Linked Single-Walled Carbon Nanotubes", Chem. Comm. 47 (2011) 11781. (被引用回数,3)
2. T. Umeyama, N. Tezuka, F. Kawashima, \*S. Seki, Y. Matano, Y. Nakao, T. Shishido, M. Nishi, K. Hirao, H. Lehtivuori, \*N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, \*H. Imahori, "Carbon Nanotube Wiring of Donor-Acceptor Nanograins by Self-Assembly and Efficient Charge Transport", Angew. Chem. Int. Ed. 50 (2011) 4615. (被引用回数,5)

3. L. Wei, N. Tezuka, T. Umeyama, H. Imahori, \*Y. Chen, "Formation of Single-Walled Carbon Nanotube Thin Films Enriched with Semiconducting Nanotubes and Their Application in Photoelectrochemical Devices", *Nanoscale* 3 (2011) 1845. (被引用回数,2)
4. N. Tezuka, T. Umeyama, Y. Matano, T. Shishido, K. Yoshida, T. Ogawa, S. Isoda, K. Stranius, V. Chukharev, \*N. V. Tkachenko, H. Lemmetyinen, \*H. Imahori, "Photophysics and Photoelectrochemical Properties of Nanohybrids Consisting of Fullerene-Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes and Poly(3-hexylthiophene)", *Energy Environ. Sci.* 4 (2011) 741. (被引用回数,3)
5. T. Umeyama, K. Kawabata, N. Tezuka, Y. Matano, Y. Miyato, K. Matsushige, \*H. Imahori, "Dispersion of Carbon Nanotubes by Photo- and Thermal-Responsive Polymers Containing Azobenzene Unit in the Backbone", *Chem. Commun.* 46 (2010) 5969. (被引用回数,10)

藤原明比古

1. \*M. A. Azam, M. A. Mohamed, E. Shikoh and A. Fujiwara, "Thermal degradation of single-walled carbon nanotubes during alcohol catalytic CVD process", 49 (2010) 02BA04. (被引用回数,3)
2. \*M. A. Mohamed, M. A. Azam, E. Shikoh and A. Fujiwara, "Fabrication and Characterization of Carbon Nanotube Field-Effect Transistors using Ferromagnetic Electrodes with Different Coercivity", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49 (2010) 02BD08. (被引用回数,2)
3. N. Inami, M. A. Mohamed, E. Shikoh and \*A. Fujiwara, "Device characteristics of carbon nanotube transistor fabricated by direct growth method", *Appl. Phys. Lett.* 92 (2008) 43115. (被引用回数,7)

喜多 隆

1. M. Kawamura, Y. Tanaka, \*T. Kita, O. Wada, H. Nakamura, H. Yanagi, A. Magario and T. Noguchi "Flexible Field Emission Device Using Carbon Nanofiber Nanocomposite Sheet", (*Appl. Phys. Express.* Vol. 1, 074004-1~3, 2008). (被引用回数,3)
2. H. Tanaka, H. Nakamura, H. Yanagi, \*T. Kita, K. Yokoyama, A. Magario and T. Noguchi "Side electron emission device using a composite of carbon nanofibers and aluminum" (*Thin Solid Films* Vol. 518, pp. 530-533, 2009). (被引用回数,2)

竹延大志

1. H. Okimoto, \*T. Takenobu, K. Yanagi, Y. Miyata, H. Shimotani, H. Kataura, Y. Iwasa "Tunable Carbon Nanotube Thin-Film Transistors Produced Exclusively via Inkjet Printing", *Advanced Materials* 22 (2010) 3981. (被引用回数,18)
2. D. Fu, H. Okimoto, C. W. Lee, \*T. Takenobu, Y. Iwasa, H. Kataura, \*L.-J. Li, "Ultrasensitive Detection of DNA Molecules with High On/Off Single-Walled Carbon Nanotube Network", *Advanced Materials* 22 (2010) 4867. (被引用回数,12)

A02 機能性カーボンナノチューブの創製

丸山茂夫

1. S. Chiashi, H. Okabe, T. Inoue, J. Shiomi, T. Sato, S. Kono, M. Terasawa, \*S. Maruyama, "Growth of Horizontally Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes on the Singular R-Plane (10-11) of Quartz", *J. Phys. Chem. C* 116 (2012) 6805. (被引用回数,0)
2. S. Aikawa, E. Einarsson, T. Thurakitserree, S. Chiashi, E. Nishikawa, \*S. Maruyama, "Deformable Transparent All-Carbon-Nanotube Transistors", *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012), 063502. (被引用回数,0)
3. P. Zhao, E. Einarsson, G. Lagoudas, J. Shiomi, S. Chiashi, \*S. Maruyama, "Tunable Separation of Single-Walled Carbon Nanotubes by Dual-Surfactant Density Gradient Ultracentrifugation", *Nano Res.* 4 (2011), 623. (被引用回数,0)
4. Y. Miyauchi, H. Ajiki and \*S. Maruyama, "Electron-Hole Asymmetry in Single-Walled Carbon Nanotubes Probed by Direct Observation of Transverse Quasi-Dark Excitons", *Phys. Rev. B (Rapid Comm.)* 81 (2010), 121415. (被引用回数,2)

5. R. Xiang, E. Einarsson, J. Okawa, Y. Miyauchi and \*S. Maruyama, Acetylene-Accelerated Alcohol Catalytic CVD Growth of Vertically Aligned Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. C* 113 (2009) 7511. (被引用回数,26)

篠原久典

1. Y.Miyata, K.Shiozawa, Y.Asada, Y.Ohno, R.Kitaura, T.Mizutani and \*H.Shinohara, "Length-Sorted Semiconducting Carbon Nanotubes for High-Mobility Thin Film Transistors" *Nano Res.* 4 (2011) 963. (被引用回数,4)
2. Y.Miyata, M.Suzuki, M.Fujihara, Y.Asada, R.Kitaura and \*H.Shinohara, "Solution-Phase Extraction of Ultrathin Inner Shells from Double-Wall Carbon Nanotubes" *ACS Nano*, 4 (2010) 5807. (被引用回数,4)
3. Y.Asada, Y.Miyata, Y.Ohno, R.Kitaura, T.Sugai, T.Mizutani and \*H.Shinohara, "High-Performance Thin-Film Transistors with DNA-Assisted Solution Processing of Single-Walled Carbon Nanotubes" *Adv.Mater.* 22 (2010) 2698. (被引用回数,12)
4. N.Fukui, Y.Suwa, H.Yoshida, T.Sugai, S.Heike, M.Fujimori, Y.Terada, T.Hashizume and \*H.Shinohara, "Moire Image Patterns on Double-Walled Carbon Nanotubes Observed by Scanning Tunneling Microscopy" *Phys.Rev.B* 79 (2009) 125402. (被引用回数,4)
5. R.Kitaura, N.Imazu, K.Kobayashi and \*H.Shinohara, "Fabrication of Metal Nanowires in Carbon Nanotubes via Versatile Nano-Template Reaction" *Nano Letters* 8 (2008) 693. (被引用回数,41)

畠山力三

1. \*T. Kato and R. Hatakeyama, "Direct growth of short single-walled carbon nanotubes with narrow-chirality distribution by time-programmed plasma chemical vapor deposition", *ACS Nano* 4 (2010) 7395. (被引用回数11,)
2. Z. Ghorannevis, \*T. Kato, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, "Narrow-chirality distributed single-walled carbon nanotubes growth from nonmagnetic catalyst" *J. Am. Chem. Soc.* 132 (2010) 9570. (被引用回数22,)
3. \*Y. F. Li, T. Kaneko, J. Kong, and R. Hatakeyama, "Photoswitching in azafullerene encapsulated single-walled carbon nanotube FET devices", *J. Am. Chem. Soc.* 131 (2009) 3412. (被引用回数,7)
4. \*T. Kaneko, Y. F. Li, S. Nishigaki, and R. Hatakeyama, "Azafullerene encapsulated single-walled carbon nanotubes with n-type electrical transport property", *J. Am. Chem. Soc.* 130 (2008) 2714. (被引用回数, 16)
5. S.H. Kim, W.I. Choi, G. Kim, Y.J. Song, G. -H. Jeong, R. Hatakeyama, J. Ihm, and \*Y. Kuk, "Cesium-filled single wall carbon nanotubes as conducting nanowire scanning tunneling spectroscopy study", *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 256407. (被引用回数,10)

阿知波洋次

1. Y. Sato, T. Kodama, H. \*Shiromaru, J. H. Sanderson, T. Fujino, Y. Wada, T. Wakabayashi, Y. Achiba, "Synthesis of polyyne molecules from hexane by irradiation of intense femtosecond laser pulse", *Carbon*, 48, 1673 (2010). (被引用回数,0)
2. S. Suzuki, T. Mizusawa, T. Okazaki, Y. Achiba, "Mono-dispersed single-walled carbon nanotubes made by using arc-burning method in nitrogen atmosphere" *Eur. Phys. J., D52*, 83 (2009). (被引用回数,2)
3. T. Mori, S. Sato, K. Omura, S. Yajima, Y. Tsuruoka, K. Uchida, Y. Achiba, Y. Yajima, K. Ishibashi, "High-temperature operation of single-electron transistors based on single-walled carbon nanotubes" *Sensors and Materials*, 21, 385 (2009). (被引用回数,0)

小松直樹

1. F. Wang, K. Matsuda, A. F. M. M. Rahman, T. Kimura, \*N. Komatsu, "Improved selectivity in discriminating handedness and diameter of single-walled carbon nanotubes with N-substituted 3,6-carbazoylene-bridged chiral diporphyrin nanotweezers" *Nanoscale*, 3 (2011) 4117. (被引用回数,1)

2. A. F. M. M. Rahman, F. Wang, K. Matsuda, T. Kimura, \*N. Komatsu, "Diameter-based separation of single-walled carbon nanotubes through selective extraction with dipyrone nanotweezers" Chem. Sci., 2 (2011) 862. (被引用回数,5)
3. F. Wang, K. Matsuda, A. F. M. M. Rahman, X. Peng, T. Kimura, \*N. Komatsu, "Simultaneous Discrimination of Handedness and Diameter of Single-Walled Carbon Nanotubes (SWNTs) with Chiral Diporphyrin Nanotweezers Leading to Enrichment of Single Enantiomer of (6,5)-SWNTs", J. Am. Chem. Soc., 132 (2010) 10876. (被引用回数,14)
4. X. Peng, F. Wang, T. Kimura, \*N. Komatsu and A. Osuka, "Optical Resolution and Diameter-Based Enrichment of Single-Walled Carbon Nanotubes through Simultaneous Recognition of Their Helicity and Diameter with Chiral Monoporphyrin", J. Phys. Chem. C, 113 (2009) 9108. (被引用回数,10)
5. X. Peng, \*N. Komatsu, T. Kimura and A. Osuka, "Simultaneous Enrichments of Optical Purity and (n, m) Abundance of SWNTs through Extraction with 3,6-Carbazolyene-Bridged Chiral Diporphyrin Nanotweezers", ACS Nano, 2 (2008) 2045 (被引用回数,38)

小林慶裕

1. \*Ryota Negishi, Hiroki Hirano, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Kazuhiko Matsumoto, Yoshihiro Kobayashi, "Layer-by-layer growth of graphene layers on graphene substrates by chemical vapor deposition", Thin Solid Films 519(2011)6447-6452. (被引用回数,1)
2. \*Ryota Negishi, Hiroki Hirano Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Kazuhiko Matsumoto, Yoshihiro Kobayashi, "Thickness control of graphene overlayer via layer-by-layer growth on graphene templates by chemical vapor deposition", Jpn. J. Appl. Phys. 50(2011)06GE04-1-4. (被引用回数,1)
3. \*小林慶裕, 郡山翔二、阿形省吾、根岸良太、有福達治、新本昭樹、今泉雅裕、清柳典子、"高純度カーボンナノチューブ、その製造方法及びそれを用いた透明導電膜", 特願 2 0 1 2 - 2 7 9 7 0 (平成 2 4 年 2 月 1 3 日)

保田 諭

1. S. Yasuda, K. Ikeda, L. Yu, and \*K. Murakoshi, "Characterization of an Isolated Individual Single-walled Carbon Nanotube using Electrochemical STM", Jpn. J. Appl. Phys. accepted. (被引用回数,0)
2. S. Yasuda, D. N. Futaba, T. Yamada, M. Yumura, \*K. Hata, "Gas Dwell Time Control for Rapid and Long Lifetime Growth of Single-Walled Carbon Nanotube Forests", Nano lett., 11, 3617 (2011). (被引用回数,1)
3. \*保田諭, 高瀬舞、並河英紀、村越敬, "局在プラズモン増強場を用いた単一単層カーボンナノチューブの局所分光" 表面科学, 31 (2010) 531. (被引用回数,0)
4. A. Shawky, S. Yasuda, and \*K. Murakoshi, "Room-temperature synthesis of single-wall carbon nanotubes by an electrochemical process" Carbon, in press. (被引用回数,0)
5. 村越敬、保田諭、アハマドシャウキイ"カーボンナノチューブの製造方法" PCT/JP2011/055689, 2011年3月22日出願

A03 機能性カーボンナノチューブの物性評価

本間芳和

1. J. Xie, T. Inaba, R. Sugiyama, Y. Homma, "Intrinsic exciton diffusion length in long single-walled carbonnanotubes from photoluminescence spectra", Phys. Rev. B, 85 (2012) 085434. (被引用回数,0)
2. K. Nagatsu, S. Chiashi, S. Konabe, \*Y. Homma, "Brightening of triplet dark excitons by atomic hydrogen adsorption in single-walled carbon nanotubes observed by photoluminescence spectroscopy", Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 157403. (被引用回数,8)
3. D. Takagi, Y. Kobayashi and \*Y. Homma, "Carbon Nanotube Growth from Diamond", J. Am. Chem. Soc. 131 (2009) 6922. (被引用回数,42)
4. \*Y. Homma, S. Chiashi, Y. Kobayashi, "Suspended single-wall carbon nanotubes: synthesis and optical properties", Rep. Prog. Phys. 72 (2009) 066502. (被引用回数,10)
5. \*S. Chiashi, S. Watanabe, T. Hanashima and Y. Homma "Influence of Gas Adsorption on

Optical Transition Energies of Single-Walled Carbon Nanotubes”, *Nano Lett.* 8 (2008) 3097. (被引用回数,17)

秋田成司

1. R. Senga, K. Hirahara, \*Y. Nakayama, "Nanotorsional actuator using transition between flattened and tubular states in carbon nanotubes", *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012) 083110. (被引用回数,0)
2. S. Sawaya, T. Arie, \*S. Akita, "Diameter-dependent dissipation of vibration energy of cantilevered multiwall carbon nanotubes", *Nanotechnology* 22 (2011) 165702. (被引用回数,1)
3. \*K. Hirahara, K. Inose, Y. Nakayama, "Determination of the chiralities of isolated carbon nanotubes during superplastic elongation process", *Appl. Phys. Lett.* 97 (2010) 051905. (被引用回数,2)
4. S. Sawano, \*T. Arie, S. Akita, "Carbon Nanotube Resonator in Liquid", *Nano Lett.* 10 (2010) 3395-3398. (被引用回数,10)
5. H. Somada, K. Hirahara, S. Akita, \*Y. Nakayama, "A Molecular Linear Motor Consisting of Carbon Nanotubes", *Nano Lett.* 9 (2009) 62. (被引用回数,23)

片山光浩

1. S. Inoue, H. Suto, W. Wongwiriyan, T. Kimura, Y. Murata, S. Honda and \*M. Katayama, "Density of States of Single-Walled Carbon Nanotubes Grown on Metal Tip Apex", *Applied Physics Express* 2 (2009) 035005. (被引用回数,2)
2. K. Yoshihara, K. Ishida, W. Wongwiriyan, S. Inoue, Y. Okabayashi, S. Honda, Y. Nishimoto, Y. Kuwahara, K. Oura and \*M. Katayama, "Hydrogen Interaction with Single-Walled Carbon Nanotubes", *Applied Physics Express* 1 (2008) 094001. (被引用回数,1)
3. W. Wongwiriyan, S. Inoue, T. Ito, R. Shimazaki, T. Maekawa, K. Suzuki, H. Ishikawa, S. Honda, K. Oura and \*M. Katayama, "Highly Sensitive Detection of Carbon Monoxide at Room Temperature Using Platinum-Decorated Single-Walled Carbon Nanotubes", *Applied Physics Express* 1 (2008) 014004. (被引用回数,13)

末永和知

1. \*K. Suenaga, H. Kobayashi and M. Koshino, "Core-Level Spectroscopy of Point Defects in Single Layer *h*-BN", *Physical Review Letters*, 108 (2012) 075501. (被引用回数,0)
2. \*T. Okazaki, Y. Iizumi, S. Okubo, H. Kataura, Z. Liu, K. Suenaga, Y. Tahara, M. Yudasaka, S. Okada and S. Iijima, "Coaxially Stacked Coronene Columns inside Single-Walled Carbon Nanotubes", *Angewandte Chemie Int. Ed.* 50 (2011) 4853. (被引用回数,6)
3. \*Z. Liu, K. Suenaga \*, Z. Wang, Z. Shi, E. Okunishi and S. Iijima, "Identification of active atomic defects in a monolayered tungsten disulphide nanoribbon", *Nature Communications*, 2:213 doi:10.1038/ncomms1224 (2011). (被引用回数,1)
4. \*Z. Liu, K. Suenaga \*, P.J.F. Harris and S. Iijima, "Open and closed edges of graphene layers", *Phys. Rev. Lett.* 102 (2009) 015501. (被引用回数,119)
5. \*Y. Sato, K. Yanagi, Y. Miyata, K. Suenaga, H. Kataura and S. Iijima, "Chiral-angle distribution for separated single-walled carbon nanotubes", *Nano Lett.* 8 (2008) pp. 3151-3154. (被引用回数,31)

山田啓文

1. M. Ito, Y. Hosokawa, R. Nishi, and Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige \*H. Yamada, "Effect of Trapped Charges on Local Potential Measurement of Carbon Nanotubes Using Frequency-Modulation Kelvin-Probe Force Microscopy", *e-J. Surf. Sci. Nanotech.* 9 (2011) 210. (被引用回数,0)
2. E. Tsunemi, K. Kobayashi, K. Matsushige, \*H. Yamada, "Development of dual-probe atomic force microscopy system using optical beam deflection sensors with obliquely incident laser beams", *Rev. Sci. Instrum.*, 82 (2011) 033708. (被引用回数,1)
3. K. Kaneko, Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige, \*H. Yamada, "Position Control and

- Electrical Characterization of Single-Walled Carbon Nanotubes Debundled by Density Gradient Ultracentrifugation”, Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 02BD04. (被引用回数,1)
4. Y. Miyato, K. Kobayashi, K. Matsushige, \*H. Yamada, “Surface Potential Investigation of Carbon Nanotube Field-Effect Transistor by Point-by-Point Atomic Force Microscope Potentiometry”, Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 02BD03. (被引用回数,1)
  5. T. Nishio, Y. Miyato, \*K. Kobayashi, K. Matsushige, H. Yamada, “Piezoresistive properties of carbon nanotubes under radial force investigated by atomic force microscopy”, Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 063117. (被引用回数,6)

中村新男

1. \*T. Koyama, Y. Miyata, K. Asaka, H. Shinohara, Y. Saito, A. Nakamura, “Ultrafast energy transfer of one-dimensional excitons between carbon nanotubes: a femtosecond time-resolved luminescence study”, Phys. Chem. Chem. Phys, 14 (2012) 1070. (招待論文) (被引用回数,1)
2. \*T. Koyama, Y. Asada, N. Hikosaka, Y. Miyata, H. Shinohara, A. Nakamura, “Ultrafast exciton energy transfer between nanoscale coaxial cylinders: Intertube transfer and luminescence quenching in double-walled carbon nanotubes”, ACS Nano, 5 (2011) 5881. (被引用回数,4)
3. \*T. Koyama, K. Asaka, N. Hikosaka, H. Kishida, Y. Saito, A. Nakamura, “Ultrafast exciton energy transfer in bundles of single-walled carbon nanotubes”, J. Phys. Chem. Lett., 2 (2011) 127. (被引用回数,3)
4. \*T. Koyama, Y. Miyata, Y. Asada, H. Shinohara, H. Kataura, A. Nakamura, “Bright luminescence and exciton energy transfer in polymer-wrapped single-walled carbon nanotube bundles”, J. Phys. Chem. Lett., 1 (2010) 3243. (被引用回数,6)

松田一成

1. R. Matsunaga, \*K. Matsuda, \*Y. Kanemitsu, “Observation of charged excitons in hole-doped carbon nanotubes using photoluminescence and absorption spectroscopy”, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 037404. (被引用回数,19)
2. T. Sakashita, Y. Miyauchi, \*K. Matsuda, Y. Kanemitsu, “Plasmon-assisted photoluminescence enhancement of single-walled carbon nanotubes on metal surfaces”, Appl. Phys. Lett. 97 (2010) 063110. (被引用回数,3)
3. R. Matsunaga, \*K. Matsuda, \*Y. Kanemitsu, “Evidence for dark excitons in a single carbon nanotube due to the Aharonov-Bohm effect”, Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 147404. (被引用回数,27)
4. A. Ueda, K. Matsuda, T. Tayagaki, \*Y. Kanemitsu, “Carrier multiplication in carbon nanotubes studied by femtosecond pump-probe spectroscopy”, Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 233105. (被引用回数,16)

高橋厚史

1. Y. Ito, Masato Inoue and \*K. Takahashi, “One-dimensionality of phonon transport in cup-stacked carbon nanofiber”, J. Phys.: Condensed Matter 22 (2010) 065403. (被引用回数,1)
2. \*K. Takahashi, Y. Ito, T. Ikuta, X. Zhang and M. Fujii, “Experimental and numerical studies on ballistic phonon transport of cup-stacked carbon nanofiber”, Physica B: Condensed Matter, 404 (2009) 2431. (被引用回数,4)
3. \* H. Ago, N. Ishigami, N. Yoshihara, K. Imamoto, S. Akita, K. Ikeda, M. Tsuji, T. Ikuta and K. Takahashi, “Visualization of Horizontally-Aligned Single-Walled Carbon Nanotube Growth with <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C Isotopes”, J. Phys. Chem. C. Letters, 112 (2008) 1735. (被引用回数,12)

A04 機能性カーボンナノチューブ物性の理論解析とデザイン

斎藤 晋

1. \*K. Kato, T. Koretsune, and S. Saito, "Energetics and electronic properties of twisted single-walled carbon nanotubes", Phys. Rev. B 85, 115448 (2012). (被引用回数,0)
2. \*Y. Sakai, T. Koretsune and S. Saito, "Electronic structure and stability of layered superlattice composed of graphene and boron nitride monolayer", Phys. Rev. B 83, 205434 (2011). (被引用回数,0)
3. K. Umemoto, R. M. Wentzcovitch, \*S. Saito, and T. Miyake, "Body-Centered Tetragonal C<sub>4</sub>: A Viable sp<sup>3</sup> Carbon Allotrope", Phys. Rev. Lett. 104, 125504 (2010). (被引用回数,42)
4. Y. Tanaka, Y. Hirana, Y. Niidome, K. Kato, S. Saito and \*N. Nakashima, "Experimentally Determined Redox Potentials of Individual (n,m) Single-Walled Carbon Nanotubes", Angewandte Chemie 121, 7791 (2009). ; Angewandte Chemie – International Edition **48**, 7655 (2009) (被引用回数,33)
5. \*T. Koretsune and S. Saito, "Electronic structure of boron-doped carbon nanotube", Phys. Rev. B 77, 165417 (2008). (被引用回数,29)

安藤恒也

1. \*M. Koshino and T. Ando, "Anomalous orbital magnetism in Dirac-electron systems: Role of pseudospin paramagnetism", Phys. Rev. B 81 (2010) 195431. (被引用回数,19)
2. T. Ando, "Environment effects on excitons in semiconducting carbon nanotubes", J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 024706. (被引用回数,9)
3. \*T. Ando and M. Koshino, "Field effects on optical phonons in bilayer graphene", J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 034709. (被引用回数,26)
4. \*S. Uryu, H. Ajiki, and T. Ando, "Excitonic two-photon absorption in semiconducting carbon nanotubes within an effective-mass approximation", Phys. Rev. B 78 (2008) 115414. (被引用回数,5)
5. \*H. Suzuura and T. Ando, "Zone-boundary phonon in graphene and nanotube", J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) 044703. (被引用回数,22)

安食博志

1. H. Ajiki, "Exciton States and Optical Properties of Carbon Nanotubes," J. Phys. Cond. Mat. (in press). (総説論文)
2. \*T. Ono, T. Ota, and Y. Egami, "Fully spin-dependent transport of triangular graphene flakes", Phys. Rev. B 84 (2011) 224424. (被引用回数,0)
3. \*K. Toyoda, I. Hamada, K.-H. Lee, S. Yanagisawa, and Y. Morikawa, "Density Functional Theoretical Study of Pentacene/Noble Metal Interfaces with van der Waals Corrections: Vacuum Level Shifts and Electronic Structures," J. Chem. Phys. 132 (2010) 115452. (被引用回数,15)
4. \*T.A. Searles, Y. Imanaka, T. Takamasu, H. Ajiki, J.A. Fagan, E.K. Hobbie, and J. Kono, "Large anisotropy in the magnetic susceptibility of metallic carbon nanotubes," Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 017403. (被引用回数,5)
5. \*H. Ajiki, T. Iida, T. Ishikawa, S. Uryu, H. Ishihara, "Size- and orientation-selective optical manipulation of single-walled carbon nanotubes: A theoretical study," Phys. Rev. B 80 (2009) 115437. (被引用回数,4)

岡田 晋

1. \*N. T. Cuong, M. Otani, Y. Iizumi, T. Okazaki, G. Rotas, N. Tagmatarchis, Y. Li, T. Kaneko, R. Hatakeyama, S. Okada, "Origin of the n-type Transport Behavior of Azafullerenes Encapsulated in Single-walled Carbon Nanotubes", Appl. Phys. Lett.. 99, 053105 (2011). (被引用回数,0)
2. \*S. Konabe, S. Okada, "Method for probing the magnetic state of nanomaterials encapsulated in carbon nanotubes", Appl. Phys. Lett. 98, 073109 (2011). (被引用回数,1)
3. \*N. T. Cuong, M. Otani, S. Okada, "Semiconducting Electronic Property of Graphene Adsorbed on (0001) Surfaces of SiO<sub>2</sub>" Phys. Rev. Lett. 106, 106801 (2011). (被引用回数,16)
4. \*M. Otani, Y. Takagi, M. Koshino, S. Okada, "Phase Control on Magnetic State of Graphite Thin Films by Electric Field", Appl. Phys. Lett. 96, 242504 (2010). (被引用回数,4)

中西 毅

1. \*Yoshiyuki Miyamoto, Hong Zhang, and Angel Rubio, "Pulse-induced non-equilibrium dynamics of scetylene inside carbon nanotube studied by an ab initio approach" Proc. Natl Acad. Sci. USA, accepted for publication (2012). (被引用回数,0)
2. \*Takeshi Nakanishi, Mikito Koshino and Tsuneya Ando, "Role of evanescent wave in valley polarization through junction of mono- and bi-layer graphenes", J. Phys.: Conf. Ser., 302 (2011) 012021. (被引用回数,0)
3. \*Takeshi Nakanishi, Mikito Koshino and Tsuneya Ando, "Transmission through a boundary between monolayer and bilayer graphene", Phys. Rev. B 82 (2010) 125428-1~14. (被引用回数,14)
4. \*Mikito Koshino, Takeshi Nakanishi and Tsuneya Ando,, "Interface Landau levels in graphene monolayer-bilayer junction", Phys. Rev. B 82 (2010) 205436-1~12. (被引用回数,4)
5. \*Ken-ichi Sakai, Kazuyuki Takai, Ken-ichi Fukui, Takeshi Nakanishi and Toshiaki Enoki, "Honeycomb superperiodic pattern and its fine structure near the armchair edge of graphene observed by low-temperature scanning tunneling microscopy", Phys. Rev. B 81 (2010) 235417-1~7. (被引用回数,7)

斎藤 峯雄

1. K. Sawada, F. Ishii, and \*M. Saito, "Magnetism in dehydrogenated armchair graphene nanoribbon", J. Phys. Soc. Jpn., 80 (2010) 044712. (被引用回数,0)
2. K. Sawada, F. Ishii, and \*M. Saito, "Magnetism in graphene nanoribbons on Ni(111): First-principles density functional study", Phys. Rev. B 82 (2010) 245426 1-5. (被引用回数,3)
3. Y. Uramoto and \*M. Saito, "Stability and dynamical process of graphene adatom and its Dimer", J. Phys. Soc. Jpn., 79 (2010) 074605. (被引用回数,0)

山本 貴博

1. Fumio Nishimura, Toru Takahashi, Kazuyuki Watanabe and \*Takahiro Yamamoto, "Bending Robustness of Thermal Conductance of Carbon Nanotubes: Nonequilibrium Molecular Dynamics Simulation", Appl. Phys. Exp. 2 (2009) 035003. (被引用回数,4)
2. \*Takahiro Yamamoto, Satoru Konabe, Junichiro Shiomi and Shigeo Maruyama, "Crossover from Ballistic to Diffusive Thermal Transport in Carbon Nanotubes", Appl. Phys. Exp. 2 (2009) 095003. (被引用回数,4)
3. \*Takahiro Yamamoto, Kenji Sasaoka, Satoshi Watanabe, and Kazuyuki Watanabe, "Two Chirality Classes of AC Quantum Transport in Metallic Carbon Nanotubes", Phys. Rev. B.81 (2010) 115448. (被引用回数,5)

## (2) ホームページ

本特定領域のホームページ (<http://qed63.qd.nuge.nagoya-u.ac.jp/CNTNE2012/>) は領域発足直後に立ち上げた。そこでは研究内容、研究組織、行事予定（全体会議、国際会議、班会議等）を紹介するとともに、全研究成果リストを掲示している。また定期的に発刊したニュースレター（研究成果の紹介、行事予定の掲載、開催行事の報告等）は、特定メンバー以外に関連学会（フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会、応用電子物性分科会、学術振興会 151 委員会等）関係者に配信したほか、ホームページにアップロードしてきた。2010 年 1 月にサーバーを更新して以降の 2 年 3 カ月間におけるニュースレターのダウンロード実績は表 1 のとおりである。

表 1 ニュースレターのダウンロード数（2010 年 1 月以降）

号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ダウンロード数	29	253	222	163	200	235	383	144	108

またホームページの総アクセス数は1,631であった。

サーバー更新前のデータがわからないため正確な数値は把握できていないが、サーバーを更新して以降の2年3カ月は特定領域の設定期間5年の半分以下であることから、ダウンロード数、総アクセス数のいずれもこれらの数値の2倍程度はあったものと推定される。

なおホームページの活用方法として、特定領域の予算で購入した大型装置（おおむね500万円以上）については、メンバー専用ページを設け、そこで見られるようにした。これにより領域としての装置情報を共有化し、共同研究の推進に役立てた。

### (3) 公開発表について

領域の全体会議での研究発表はすべて公開とし、7回行った。開催日時等は以下のとおりである。

1. 平成19年9月12日～13日、名古屋大学
2. 平成20年6月9日～10日、メルパルク名古屋
3. 平成20年12月19日～21日、KKR ホテル熱海
4. 平成21年6月9日～12日、松島（国際会議形式）
5. 平成21年度 11月19～21日、淡路夢舞台国際会議場
6. 平成22年8月2～4日（水）、名古屋大学
7. 平成23年9月14日～16日、東工大

また国際会議は以下のとおり共催も含めて合計5回開催し、成果を広く世界に発信した。なお5件目の国際会議は、ナノチューブ発見20周年を記念して、発見者の飯島博士をはじめとして、世界で有数の著名な研究者の参加を得て行ったものである。

1. International Carbon Nanotube Conference in NU, February 14~15, 2008, Nagoya
2. Carbon Nanotube Nanoelectronics (CNTNE 2009), June 9~12, 2009, Matsushima,
3. WONTON (Workshop on Nanotube Optics and Nanospectroscopy) 2009, June 7-10, 2009, Matsushima
4. Pacifichem 2010, December 16-20, 2010, Hawaii
5. Workshop on Carbon Nanotube in Commemoration of the 20th Anniversary of its Discovery ("2011-CNT20"), December 12-13, 2011, Tokyo

また以下のとおり応用物理学会のシンポジウムを2回企画した。

1. 2008年9月2日、中部大学、「カーボンナノチューブナノエレクトロニクス」
2. 2010年9月14日、長崎大学、「ナノチューブナノエレクトロニクスはどこまで進んだか」

### (4) 「国民との科学・技術対話」について

化学工学会関東支部に本特定領域メンバーが協力して開催された高校生を対象にした寺子屋講座において、炭素繊維とナノチューブに関する講演や実習を実施した。(2010年7月、高校生106、教諭8、中学生1、一般2、計117人が参加、女子学生がやや多い。)最先端の内容をわかりやすく説明し、簡単な実験もおこなったこともあり、大変良好なアンケート結果であった(難しかった

たけれど、とても興味深く面白かった等アンケート回収率 96%において、ほとんどが好意的回答)。その結果、本寺子屋講座が化学工学会の地域 CT(coordination team)賞を受賞した。

また合計 96 回の新聞報道により、一般国民に向けた成果発信を行った。

## 7. 研究組織と各研究項目の連携状況

本特定領域研究では、表 2 に示すとおり以下の 4 つの研究項目を設定し、平成 19 年度秋より 16 の計画研究がスタートした。計画研究でカバーしていないところを公募研究で補う方針のもと、平成 20 年度から 8 件が 2 年間、平成 22 年度からは再参画も含めて 10 件の公募研究が参画した。

A01 「新機能カーボンナノチューブデバイスの開発」

A02 「機能性カーボンナノチューブの創製」

A03 「機能性カーボンナノチューブの物性評価」

A04 「機能性カーボンナノチューブ物性の理論解析とデザイン」

このように本特定領域では、デバイス、成長、評価、理論という異なる分野の研究者を結集し、各分野の専門家が連携して研究を推進できる体制とした。

研究組織は A01 班から A04 班までの 4 つの研究実行グループに加えて、それを統括する総括班を設けた。総括班会議は、年に 2 回、合計 10 回開催し、本特定の計画・運営方針を議論した。なお、エレクトロニクスへの展開を図るには、科学としての視点のみではなく、産業応用等のこれとは異なる視点も持って研究を推進していくことが重要であり、産業界から 3 人の研究者に特別委員として参加してもらう体制をとった。

各研究者間の有機的連携による課題の解決と新機軸の創出は重要な柱であり、全体会議で連携研究の推進を訴えるとともに、計 13 回の班会議、欠陥にテーマを絞った班横断討論会（1 回）で、研究発表に加えて、研究課題の共有化と連携の方策を図った。その結果、サンプルのやり取り、作製装置・評価装置の共同利用、試料・デバイスの提供、実験結果の理論解析等で共同研究が活発に実施され、領域設定期間内で計 52 件の連携研究が行われた。その一部について、連携内容・進展状況・研究費の効率的使用の観点でまとめたものを表 3 に示す。以上の結果、研究グループ間連名の論文が合計 53 件、連名の講演が 104 件と、本特定を組織した効果が大きい発揮された。

表 2 研究組織

総括班	
領域代表者 水谷 孝 (名古屋大学・教授)	
(研究分担グループ)	(評価グループ)
丸山茂夫 (東京大学・教授)	菅野卓雄 (東京大学・名誉教授)
本間芳和 (東京理科大学・教授)	青柳克信 (立命館大学・教授)
斎藤 晋 (東京工業大学・教授)	塚田 捷 (東北大学・教授)
松本和彦 (大阪大学・教授)	
岡田 晋 (筑波大学・准教授)	

<p style="text-align: center;"><b>研究項目 A01</b></p> <p><b>新機能カーボンナノチューブデバイスの開発</b></p> <p>○水谷 孝・名古屋大学・教授（班長） 大野雄高・名古屋大学・准教授 岸本 茂・名古屋大学・助教</p> <p>○松本和彦・大阪大学・教授 井上恒一・大阪大学・准教授 前橋兼三・大阪大学・准教授 大野恭秀・大阪大学・助教</p> <p>○石橋幸治・理化学研究所・主任研究員 落合勇一・千葉大学・教授</p> <p>○齋藤弥八・名古屋大学・教授 中原 仁・名古屋大学・助教 安坂幸師・名古屋大学・助教 佐藤英樹・三重大学・准教授</p> <p>*藤原明比古・北陸先端科学技術大学院大学・准教授(H20-21)</p> <p>*喜多 隆・神戸大学・教授(H20-21)</p> <p>*竹延大志・早稲田大学・准教授(H22)</p> <p>*梅山有和・京都大学・助教(H22-23)</p>	<p style="text-align: center;"><b>研究項目 A02</b></p> <p><b>機能性カーボンナノチューブの創製</b></p> <p>○丸山茂夫・東京大学・教授（班長） 佐野正人・山形大学・教授 大久保達也・東京大学・教授 野田 優・東京大学・准教授 塩見淳一郎・東京大学・准教授 千足昇平・東京大学・助教(H21-23)</p> <p>○篠原久典・名古屋大学・教授 北浦 良・名古屋大学・准教授 宮田耕充・名古屋大学・助教</p> <p>○畠山力三・東北大学・教授 金子俊郎・東北大学・准教授 田路和幸・東北大学・教授</p> <p>*小松直樹・滋賀医科大学・准教授(H20-23)</p> <p>*阿知波洋次・首都大学東京・教授(H20-23)</p> <p>*保田 諭・北海道大学・講師(H22-23)</p> <p>*小林慶裕・大阪大学・教授(H22-23)</p>
<p style="text-align: center;"><b>研究項目 A03</b></p> <p><b>機能性カーボンナノチューブの物性評価</b></p> <p>○本間芳和・東京理科大学・教授（班長） 徳永英司・東京理科大学・准教授 市田正夫・甲南大学・准教授 千足昇平・東京大学・助教(H19)</p> <p>○末永和知・産総研・研究チーム長 佐藤雄太・産総研・研究員 岡崎俊也・産総研・研究員 劉 崢・産総研・研究員</p> <p>○片山光浩・大阪大学・教授 本多信一・兵庫県立大学・准教授 桑原裕司・大阪大学・教授 田畑博史・大阪大学・助教</p> <p>○秋田成司・大阪府立大学・教授 中山喜萬・大阪大学・教授</p> <p>○山田啓文・京都大学・准教授 小林 圭・京都大学・助教 佐藤宣夫・京都大学・助教</p> <p>*中村新男・名古屋大学・教授(H20-23)</p> <p>*松田一成・京都大学・教授(H20-23)</p> <p>*高橋厚史・九州大学・准教授(H20-21)</p>	<p style="text-align: center;"><b>研究項目 A04</b></p> <p><b>機能性カーボンナノチューブ物性の理論解析とデザイン</b></p> <p>○齋藤 晋・東京工業大学・教授（班長）</p> <p>○安藤恒也・東京工業大学・教授 瓜生誠司・岩手大学・准教授 越野幹人・東京工業大学・助教</p> <p>○岡田 晋・筑波大学・准教授 押山 淳・東京大学・教授(H19-21) 大谷 実・産総研・研究員(H19-21) 山本貴博・東京大学・助教(H22-23)</p> <p>○安食博志・大阪大学・特任教授 赤井久純・大阪大学・教授 笠井秀明・大阪大学・教授(19-22) 広瀬喜久治・大阪大学・特任教授 草部浩一・大阪大学・准教授 森川良忠・大阪大学・教授</p> <p>*山本貴博・東京大学・助教(H20-21)</p> <p>*齋藤峯雄・金沢大学・教授(H22-23)</p> <p>*中西 毅・産総研・研究員(H22-23)</p>

(○：計画研究代表者、\*：公募研究代表者、無印：分担者)

表3 連携研究・共同研究（合計52件の一部）

連携者	連携内容、成果・進展状況、設備・研究費の効率的な使用
水谷 孝(A01) — 篠原久典(A02) (名古屋大学) (名古屋大学)	半導体/金属分離ナノチューブを用いた薄膜トランジスタを作製し、高い移動度とドレイン電流の大きなオン/オフ比を実現した。デバイス作製装置、電気特性測定装置を共同利用として、研究費を効率的に使用した。
丸山茂夫(A02) — 岡田 晋(A04) (東京大学) (筑波大学)	カーボンナノチューブ合成機構を探るシミュレーションにおいて、分子動力学法と密度汎関数法を組み合わせた共同研究を行い、ACS Nano に発表するなどの成果を得た。
丸山茂夫(A02) — 本間芳和(A03) (東京大学) (東京理科大学)	カーボンナノチューブのCVD過程のその場ラマン分光によって、成長メカニズムの解明を目指した共同研究を行った。ナノダイヤモンドを触媒とするCVD合成による直径制御などの成果がある。
畠山力三(A02) — 岡田 晋(A04) (東北大学) (筑波大学)	C <sub>59</sub> N@SWNT-FETにおけるn型伝導特性の発現起源の解明。実験配置を理論解析用にモデル化し、外部電場下の電子構造を第一原理計算すると、オンサイトのクーロン反発が起源であることが見出された。議論のための旅費として研究費を効率的に使用した。
阿知波洋次(A02) — 岡崎俊也(A03) (首都大学東京) (AIST)	種々の条件下で作成したカーボンナノチューブについて、吸収スペクトルは首都大で、発光スペクトルはAISTにて測定し、吸収、発光両データからチューブカイラリティの帰属を行った。
本間芳和(A03) — 岡田 晋(A04) (東京理科大学) (筑波大学)	励起子発光に対する環境効果を解析し、水素吸着効果を解明した。実験、理論、それぞれの研究成果を有機的に結び付けることにより、論文にまとめた。
秋田成司(A03) — 篠原久典(A02) (大阪府立大学) (名古屋大学)	2層ナノチューブによる層間相互作用のナノメカニクス解明に関して高品質2層ナノチューブの提供を受け、測定用デバイスを試作し共振状態の測定が可能になった。試料作製、購入、処理に関する費用が不必要となり、研究費を効率的に使用した。
末永和知(A03) — 小松直樹(A02) (産総研) (滋賀医科大学)	単層カーボンナノチューブとポルフィリン化合物との錯体構造のTEMによる解明。試料作成中、近く測定開始予定。TEM装置の共同利用により、設備を効率的に使用した。
松田一成(A03) — 小松直樹(A02) (京都大学) (滋賀医科大学)	小松グループで作製・分離されたサンプルの発光スペクトル測定を行った。その成果は、J. Am. Chem. Soc.を含む論文2報として発表された。試料作製と評価を分担し、研究費を効率的に使用した。

## 8. 研究費の使用状況

主要購入設備（概ね500万円以上）の一部を表4にまとめる。ほぼ当初計画どおりに研究費を使用した。他の研究費の多くは人件費、消耗品費、旅費として使用している。また表3にその一部をまとめたとおり、52件と多くの連携研究を実施した結果、試料の提供、試料作製装置および評価装置の共同利用により経費削減効果をもたらした。本領域全体として、効率的に研究費を使用できた。なかでも東大のカーボンナノチューブ用ラマン・PL分光システムは、多くの共同研究者に利用されている。

また高額購入設備（概ね500万円以上）については共同利用を促進すべく、本特定領域のメンバー専用ホームページで情報を開示した。

表4 主要購入設備（概ね500万円以上の一部）

主要購入設備	用途	設置者 (設置機関)	研究計画との対応。 設備の有効活用、研究費の効果的使用との 関係
グローブボックス装置	超ドライ超低酸素環境でのCNT成長と電極形成。	水谷 孝 (名古屋大学)	研究計画通り。素子作製に一部は既存装置を活用し、予算・設備を有効活用。
ラマン・PL分光システム	単層CNT分光評価	丸山茂夫 (東京大学)	研究計画通り。科研費で購入済み装置の一部を再利用して有効に高性能な装置としている。また、領域内での共同研究にも活用している。
ボトム CCD カメラ	CNTの透過電子顕微鏡観察と記録	齋藤弥八 (名古屋大学)	CNT電子エミッタの動作状況の高分解能観察のために導入。既存装置と組み合わせて有効に活用。
磁場発生コイル用電源	CNTの磁気特性評価	畠山力三 (東北大学)	計画通り。既存の装置と組み合わせることにより、原子・分子内包CNTの磁気物性評価に有効活用している。
真空型フーリエ変換型赤外分光装置	CNT複合物質の構造評価	岡崎俊也 (産総研)	研究計画どおり進捗し、本装置による評価結果と電子顕微鏡評価と対比する方法で有効に活用。
クライオプローバ	ナノチューブの精密伝導特性評価	松本和彦(大阪大学)	研究計画通り設備を購入。測定の一部は既存装置を活用し、予算・設備を有効活用。
薄膜作成装置	高品質ゲート誘電体膜の形成	山田 啓文(京都大学)	研究計画通り設備を購入。素子作製においては一部現有装置を活用し、予算・設備を有効活用。
リアルタイムイメージングシステム	CNTの発光の空間分布の評価に用いる。	本間芳和 (東京理科大学)	計画どおり設備を購入。既存の顕微発光分光装置に付加し、研究費を効果的に使用した。

## 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度

CNT 薄膜トランジスタの集積規模、動作速度はナノカーボンではいずれも世界最大であり、薄膜トランジスタのディスプレイへの応用可能性を実証したものであり、本分野に非常に大きなインパクトを与えた。

さらにカーボンナノチューブ電界効果トランジスタを用いて、溶液トップゲート構造での確率共鳴現象の発現を世界で初めて観測した。信号解析 にとっては障害であるノイズを逆に利用することで、微弱信号の検出が可能であることを応用すれば、カーボンナノチューブを用いた低消費電力・高感度センサデバイスへの開発へ繋がると期待される。

CNTの成長・分離については、各種CNT成長法(熱CVD、プラズマCVD、レーザー蒸発)により単一カイラリティ成長(多くは(6,5)のカイラリティ)を実証するとともに、金属/半導体CNT分離技術による高純度化(99%以上:検出限界以下)を実現した。これまでのCNTの最も重要な課題について、解決の糸口を示すものであり、今後のCNTデバイス応用に大きく貢献することが期待できる。

また荷電励起子(トリオン)の室温での観測(固体材料で初めて)、光学活性単層カーボンナノチューブの分離と物性科学におけるhandednessの概念の提案、熱エネルギーによるカプセルのCNT

内振動の初めての観測と新たな熱エネルギー運動エネルギー変換デバイスに関する研究領域開拓、谷分極伝導の提案等、学術誌のトップページを飾ったり、発表間もない段階での多数の被引用等、今後の研究方向を示すものとして高く評価された。

理論面においては、ナノチューブの光スペクトルに関する研究では世界に先駆けて電子間相互作用と励起子効果の重要性を理論的に示し、その後のナノチューブの光学的性質の研究の隆盛へと導くとともに、その詳細な理論的研究へと発展させており、ナノチューブ物性解明の理論からのアプローチにおいて世界の指導的役割を果たした。

またナノチューブの幾何構造パラメータの詳細、バンド構造、さらには、全エネルギーを世界で初めて系統的に解明した結果は、各種ナノチューブの応用研究において、データベースとなり得る系統的研究成果であり、学問的に価値が高いだけでなく、今後の新奇ナノチューブデバイス設計に重要な役割を果たすことが期待される。特に、(6, 5)のカイラリティのCNTが多く成長する実験結果と対応する計算結果を得たのは、今後の単一カイラリティ成長を実現する上で重要な計算結果である。一方、重要ではあるが無視されてきたファン・デル・ワールス力を加味した第一原理計算手法の開発は、すべてのデバイスにとって重要な課題であるコンタクトに関して、その特性解析に適用可能であり、今後の種々のデバイス設計で大変重要な役割を果たすことが期待される。

一方、総計 627 件の招待講演・依頼講演は、本領域における研究成果のレベルの高さと先導性を示すとともに、関連分野の発展に大きな貢献を果たしたことを示している。

これら本特定で得られた研究成果の一部は、本特定領域のメンバーが中心となって編集・執筆した書籍、ハンドブックとして出版された。これにより、当該分野における知識の体系化と今後の発展に大いに貢献できたと考える。以下はその一部である（分担執筆を含む）。

1. 化学同人、「炭素学—基礎物性から応用展開まで」（2011）、（田中、東原、篠原編）（執筆：特定メンバー多数）
2. コロナ社、「カーボンナノチューブ・グラフェンハンドブック」（2011）、（飯島、遠藤監修）（執筆：特定メンバー多数）
3. 名古屋大学出版会、「フラーレンとナノチューブの科学」（2011）（篠原、齋藤弥八著）
4. シーエムシー出版「カーボンナノチューブの機能・複合化の最新技術」普及版（監修 中山喜萬）2011年
5. 朝倉書店、物性物理学ハンドブック、「8.4.1 カーボンナノチューブ・グラフェン」川畑有郷、鹿児島誠一、北岡良雄、上田正仁 編、2012年、安食分担執筆
6. 現代表面科学シリーズ4 表面新物質創製，日本表面科学会編，共立出版，2011:表面を利用した炭素系ナノ材料の創製，本間芳和
7. Koji Ishibashi: "Nanoelectronics" (pp451-480) in "Nanofabrication Handbook" edited by Stefano Cabrini and Satoshi Kawata (CRC Press, Florida, 2012)
8. S. Maruyama : Topics in Applied Physics 111: Carbon Nanotubes, (Ed.) Ado Jorio, M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus Advanced Topics in the Synthesis, Structure, Properties and Applications Springer, 2008
9. N. Komatsu et al., "Separation of Left- and Right-Handed Structures of Single-Walled Carbon Nanotubes through Molecular Recognition" Handbook of Biomedical Applications of Carbon Nanomaterials; K. M. Kadish and F. D'souza, Eds.; World Scientific: vol. 3, 203-232

(2012).

10. "Structure Control of Single-Walled Carbon Nanotubes by Plasma CVD", "Plasma-Liquid Interactions for Fabrication of Nanobiomaterials",

Plasma Processing of Nanomaterials, edited by R. M. Sankaran, CRC Press, pp. 219-230, 359-370, 2011. R. Hatakeyama

11. "Carbon Nanotube and Related Field Emitters: Fundamentals and Applications",

Wiley-VCH, 2010, Y. Saito 編著

#### 10. 研究計画に参画した若手研究者の状況

本特定領域において若手研究者（学生、ポスドク、助教、准教授）の受賞は26件に上っており、若手研究者の活躍が目立った。研究計画に参画した学生のうち学部学生のほとんどはそのまま大学院に進学し、そのうち多くの学生が博士課程後期課程に進学し、これまでに34人の学生が博士号を取得している。一方、現在博士後期課程に在学中の学生の数は37名であり、本特定領域のテーマについて研究を継続して順調に研究成果が得られており、博士号取得見込みである。すなわち本特定領域研究の遂行で、総数71名と非常に多くの博士研究者を育成できる見込みである。

すでに博士号を取得した人のうち、外国からの留学生は、母国（中国、タイ、シンガポール等）に帰国し、副教授、講師、研究員として同じ分野で活躍している。他の博士号取得者の現状はまちまちであるが、大学の助教、研究員、研究機関の研究員として類似の研究内容で活躍中の人が1/3、残りの人は企業等で、それまでの研究で培った能力を活かして材料・デバイス・基礎物性の研究開発に携わっている。

一方、特定領域研究に携わっている間に既に職を得ていた若手研究者（ポスドク、助教）では、多くの人が研究業績を認められて、助教、講師、准教授、教授（中国）に昇格任用され、類似の研究を継続・発展させて活躍し、その数は10人に上っている。また本特定領域に参画した助教が、科学技術振興機構さきがけ領域研究員（兼任）に採択されたり、あるいは科学技術振興機構の研究成果最適展開支援事業A-STEPに採択されたりした。引き続きナノカーボンに着目した材料やデバイスの研究開発に従事している。

#### 11. 総括班評価者による評価の状況

評価委員の先生には総括班会議および全体会議にご出席いただき、本領域の運営および研究成果に対して種々のご意見とアドバイスをいただいた。また本特定領域設定期間内における研究活動・成果に対して、以下のようなご意見をいただいた。

菅野卓雄 委員（東京大学・名誉教授）

本報告書項目1に記載されている本特定領域研究の設定目的は達成されたと判断する。即ちCNTの物性に関する第一原理電子構造計算、有効質量理論による研究成果は国際的に先導的研究として高く評価されたのみならず、CNTの構造に関するエネルギー論的考察に例を見るようにCNTの成長技術について重要な指針を与えるなど本特定領域研究は多分野の専門家を糾合して優れた成果を挙げている。CNTの成長技術に関しても分子動力学法と密度汎関数法を組み合わせたシミュレーションの如く分野間の共同研究が行われCNT成長技術に関する微視的な研究が行われると共に成長核の寸法制御によるCNTの直径制御、パターン構造を有する結晶性基板を使用し

た CNT の成長方向制御、CNT の選別技術等の確立に向けた長足の進展が達成されている。CNT デバイスの応用に関しては既存の Si CMOS LSI と競合するよりもむしろ相補的役割を果たす個別及び小規模の集積デバイスとして優れた特性を示す CNTFET, CNT センサ、単電子デバイスが報告されており正鵠を得たデバイス研究である。

本特定領域研究の終了後も産業的なイノベーションへの途が継続して拓かれることを期待する。

青柳克信 委員 (立命館大学・教授)

5年前に本特定研究が開始されたとき、カーボンナノチューブ (以下 CNT) エレクトロニクスを実現する上で以下が主要な課題であった。

1. CNT の電气的特性の解明
2. CNT のカイラリティ制御
3. CNT の半導体並びに金属の分別
4. 実際のデバイス応用の原理実証

これらの課題については年度ごとの報告会、総括班会議でも議論され、班会議並びに全体会議を通してその解決実現に向けて努力がなされた。通常このような問題点が指摘されていてもそれを特定研究全体として解決していこうとする機運が出るのは難しい場合が多かったが、本特定領域研究では全員の得意分野と相互協力ですべての課題を克服した。

具体的には、1. CNT の電气的特性が BN のナノチューブも含めかなりの部分が明らかになった。2. カイラリティ制御ができるようになり、(6, 5) カイラリティのみ選択的に成長できる条件を見だし、それが理論的にも妥当であることを見いだしたことは高く評価される。また半導体 CNT と金属 CNT の分離も 99% 以上の純度で実現できたことは、これからの CNT のエレクトロニクスへの応用の重要な第一歩である。また CNT-FET を用いたリングオシレーターを作製しその発振に成功したことは CNT エレクトロニクスデバイスの集積化の可能性を示しており、本特定研究の大きな前進であった。今後、これらの成果を踏まえ、企業との共同研究を実現し実際の CNT エレクトロニクスデバイスの実用化に努力していただきたい。

全体として本特定研究は当初目的とした CNT エレクトロニクスの実現に向け成功裏に終わったと高く評価できる。

塚田 捷 委員 (東北大学・教授)

カーボンナノチューブ(CNT)は、そのユニークな構造に由来する独特な電子状態や電子的・磁氣的・光学的・化学的性質を発現し、それらの機構解明、生成・制御法の開発、およびデバイスなどへの応用展開は、近年における世界的にしのぎを削る最先端の研究目標であった。特に本研究では、CNT の発見から基本的な構造・物性の理解に至る黎明期の研究段階を承けて、ナノエレクトロニクスデバイスの開発までに至る、基礎から応用までを切れ目なくつなげ、確固とした基礎に裏付けられた画期的な応用研究の基盤を形成することをめざした。

そのため、機能性 CNT の創製、その物性評価、物性の理論解析、CNT デバイスの開発という基礎から応用に至る物理、化学、工学の有数な研究者を結集して、密接な異分野間の協力関係のもと研究がすすめられた。5年間にわたる研究期間の間に、多くの研究課題について目覚ましい研究成果が得られ、また CNT を用いたナノデバイスの基本形が得られたことは特筆に値する成果である。今後、CNT はエレクトロニクスデバイスをはじめとする様々な応用領域へと展開され

ナノテクノロジーの重要な柱となると期待されるが、本研究の多くの研究成果がそのための重要な知見を与え、技術展開の基礎的なツールやヒントを提供することになると思われる。

本研究の推進に当たっては、国際的な広がりをもって最前線の研究が推進されており、日本発の研究成果の世界的な広がりにも期待できる。また研究の推進にあたって、理論、物性計測、試料生成、デバイス展開など、異なる背景をもった研究者が結集する場を構築したことでも、我が国における今後の基礎・応用融合研究の模範例を示すことができた。この点でも、高く評価したい。