

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2011

課題番号：19054001

研究課題名（和文） プラズマプロセス制御による機能性カーボンナノチューブ創製

研究課題名（英文） Creation of Functional Carbon Nanotubes by Plasma Process Control

研究代表者

畠山 力三 (HATAKEYAMA RIKIZO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00108474

研究成果の概要（和文）：単層(SWNT)と二層カーボンナノチューブ(DWNT)の電気磁気光学的新機能化を目指して、拡散プラズマ化学気相堆積(CVD)法とプラズマイオン注入法を開発・適用・駆使した。その結果、SWNT のカイラリティ分布狭小化等の構造制御成長、各種の電荷とスピン活用原子・分子内包 SWNT と DWNT の創製、及び半導体伝導型自在制御に成功し、高性能負性微分抵抗素子、究極の pn 接合ダイオード、半導体磁性融合素子、光電子融合(スイッチ、光電変換)素子、n 型薄膜トランジスタ等の環境安定ナノデバイス原理を実証した。

研究成果の概要（英文）：In order to electrically, magnetically, and optically functionalize single-walled (SWNT) and double-walled (DWNT) carbon nanotubes, methods of diffusion plasma chemical vapor deposition (CVD) and plasma-ion injection were developed, applied, and made the best use of. As a result, we succeeded in the structure-controlled growth of SWNT such as narrow-chirality distributed growth, creation of various charge- /spin-exploited atoms and molecules encapsulated SWNT and DWNT, and universal control of SWNT/DWNT semiconducting properties. Moreover, we demonstrated the principles of novel surrounding-stable nanodevices such as high-performance negative differential resistance element, ultimate pn-junction diode, semiconductor-magnetism fusion element, electrooptic fusion (optoelectronic switch, photoelectric conversion) element, and n-type thin film transistor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	24,000,000	0	24,000,000
2008 年度	21,800,000	0	21,800,000
2009 年度	16,400,000	0	16,400,000
2010 年度	15,100,000	0	15,100,000
2011 年度	11,300,000	0	11,300,000
総計	88,600,000	0	88,600,000

研究分野：複合領域・プラズマ応用ナノ科学技術

科研費の分科・細目：プラズマ科学、ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：プラズマプロセス、構造制御配向成長、内包ナノチューブ、電気磁気光機能

1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブの次世代ナノエレクトロニクスへの応用指向研究は、国内外で極めて精力的に展開されている。そこで、申請者らが提唱する原子・分子レベルの物理・化学視点に立つ新たなデバイス創出プロセスであるナノス

コピックプラズマプロセスを体系的に駆使して、新機能性 SWNT 及び DWNT 創製を目指す研究を開始する。

2. 研究の目的

申請者らが開発した SWNT を成長・合成する

拡散プラズマ CVD 法とその機能化のためのプラズマイオン注入法から成るナノスコピックプラズマプロセスの体系的制御・駆使により、超高度ナノ構造を有する単独・孤立配向 SWNT、DWNT による 1 次元ナノデバイス (ダイオード、共鳴トンネル伝導体、磁性半導体、光電子融合体、超伝導体等) 創成に資することを目的とする。

3. 研究の方法

目的達成のためのナノスコピックプラズマプロセス制御は、(1) 拡散プラズマ CVD による SWNT の成長機構解明・構造制御成長、(2) プラズマ曝露開端・閉端、(3) 新プラズマ源を用いるイオン注入による内包ナノチューブの創製、及び (4) 内包 SWNT と DWNT の特性測定・評価から構成される一貫した工程を、系統的・収束的年次計画で実施する。

4. 研究成果

(1) ナノチューブの拡散プラズマ CVD 成長及び TEM-EELS による局所構造評価:

標記独自開発プラズマ CVD 法による高品質単独・孤立垂直配向 SWNT の損傷効果を含む成長時間発展方程式を導出し、これを用いて実験結果を解析した結果、エッチングを誘発するプラズマから成長基板への入射イオンエネルギー領域 (炭素間の結合エネルギーに関連する 10 eV 程度) とその因子 (原子状水素) の実験的同一化に成功し、SWNT の成長機構を解明することができた。また発光現象に関して、成長した基板上から明確な蛍光特性を観測することに成功し、更に SWNT の形状が完全孤立状態から小規模束状構造に変化するに伴い、励起子エネルギー移送機構に基づいて蛍光強度が増大することを初めて見出した。

次に SWNT の構造制御に向けて、プラズマ CVD における気圧と温度上昇によってその直径が大きくなる傾向を見出すと共に、SWNT 本来の磁気特性解明にも必須の Au 等非磁性金属触媒による SWNT の低温、高速、高結晶性成長を実現した。そこで、この拡散プラズマ CVD 中で微量の水素添加を行ったところ、(6,5) SWNT が支配的なカイラリティ分布の極めて狭い SWNT の選択合成に世界で初めて成功した。これは、プラズマ中

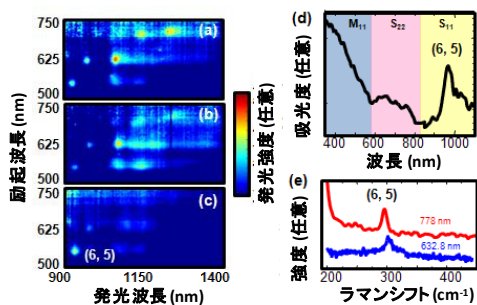


図 1: SWNT カイラリティ分布の狭小化。

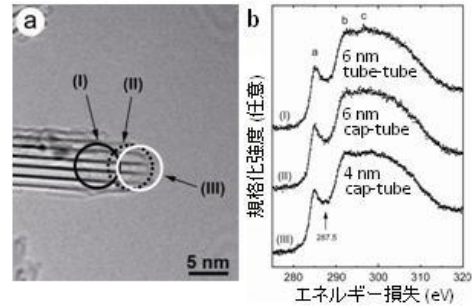


図 2: TEM 像と炭素 K 1s の ELNES スペクトル。

の活性水素による化学的エッチング作用と、炭素と Au 触媒との微弱な結合エネルギーに起因しているものと考えている。また、非磁性金属触媒を使わない場合においても、プラズマ CVD 中の SWNT 成長時間を精密に制御した結果、SWNT の成長初期過程ではカイラリティ分布が極めて狭くなることを発見した。更に、SWNT 合成時に効果的に水素イオンを導入することにより、各カイラリティに対する核成長過程でのインキュベーションタイムの差を増大させることに成功した。この結果は、水素イオンが SWNT カイラリティ精密制御に極めて重要な働きを持つことを示していると共に、特定のカイラリティ SWNT のみの大量合成が可能であることを意味している。

なお、非磁性触媒からプラズマ CVD 合成した SWNT を用いた電界効果トランジスタ (FET) の電気伝導の伝達特性は、高いオンオフ比を示すことが判明した。これはプラズマ CVD により半導体的 SWNT が優先的に成長した可能性を示唆している。

ここで成長後の SWNT の長さや電子状態の関係を解明すべく TEM-EELS 評価を試み、“6 nm-long tube-to-tube (縦横比 4.44)”、“6 nm-long cap-to-tube (同 4.44)”、“4 nm-long cap-to-tube (同 2.96)” の局所部分について、その炭素 K 1s の ELNES スペクトルを測定した。その結果、チューブの理論計算では、縦横比 4.36 以上で SWNT の電子状態が現れ始めていることを考慮すると、直径 1.35 nm の SWNT においては、先端を含めて長さ 6 nm もあれば、SWNT の電子状態が強く出現することが判明した。

(2) 新種プラズマ中の選択的イオン注入:

アルカリフラーレン (A-F)、アルカリハロゲン (A-H) の異種異極性イオンプラズマに加えて、カルシウムや強磁性金属プラズマ生成法を確立し、単極性基板バイアス法によってカーボンナノチューブ内部空間に選択的にイオンを注入し、各種電荷又はスピン活用の原子・分子を内包 (@) する実験を行った。その結果、Cs@SWNT、Cs@DWNT、Ca@SWNT、I@SWNT、Fe@SWNT、C₆₀@SWNT、C₆₀@DWNT、C₇₀@SWNT、C₇₀@DWNT、C₈₄@SWNT、C₈₄@DWNT、C₅₉N@SWNT、C₆₉N@SWNT を創製し、更に A-F 及び A-H プ

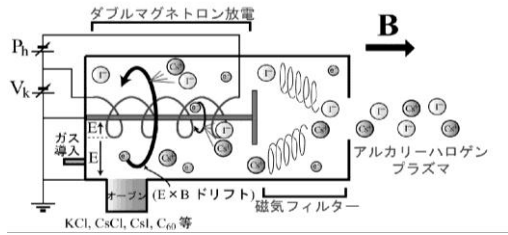


図3: 異極性イオンプラズマ生成装置の例。

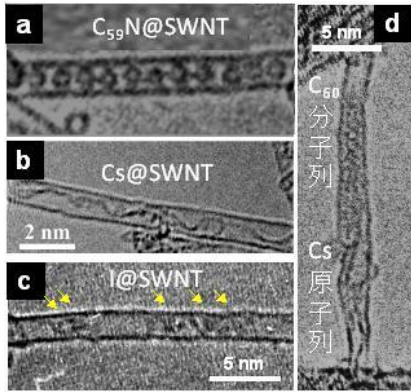


図4: 原子・分子内包 SWNT の TEM 像。

ラズマ中で極性反転基板バイアス法を駆使して、電子ドナー・アクセプタ接合内包の (Cs/C₆₀)@SWNT、(Cs/C₆₀)@DWNT、(Cs/I)@SWNT、(Cs/I)@DWNT を創製した。

一方、走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いて Cs@SWNT に対する高分解能 STS による内部局所電子構造測定を行った結果、内包された空間位置で伝導体と価電子帯が局所的にシフトし、かつ伝導体近傍に新しい局所的ギャップ状態が際立って現われ、内包原子と SWNT 間での局所電荷移動が実証された。

(3) ナノチューブの内包化新機能創出:

FET 配位での電気特性の測定により、内包 SWNT 及び内包 DWNT の電子物性を解明した。その結果、Cs@SWNT、Cs@DWNT、Ca@SWNT、Fe@SWNT、C₅₉N@SWNT、C₆₀N@SWNT は n 型半導体であり、I@SWNT、C₆₀@SWNT、C₆₀@DWNT、C₇₀@SWNT は強固な p 型半導体、C₈₄@SWNT は両極性半導体であることが判明した。これらのいずれにおいて大気安定性が検

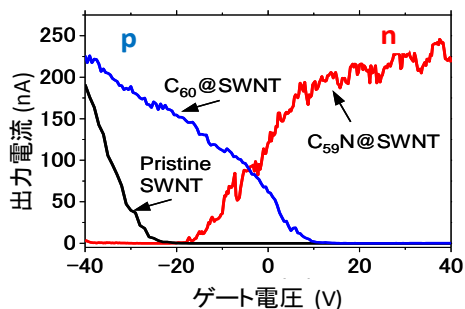


図5: C₆₀@SWNT-と C₅₉N@SWNT-FET 特性。

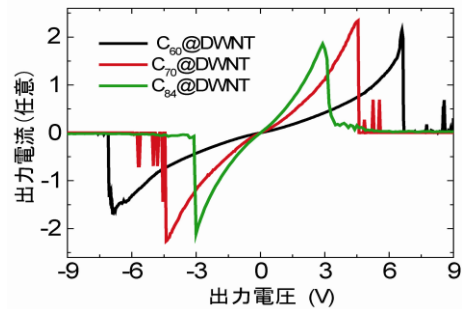


図6: フラーレン@DWNT の負性微分抵抗特性。

証された。一方、フラーレン内包の金属 DWNT では室温動作の高性能負性微分抵抗特性が発見され、出力電流-電圧特性上の電流ピークを与える閾値電圧がゲート電圧で制御され、かつ内包されるフラーレンのサイズが大きく (バンドギャップが小さく、1.6→1.1 eV) なるにつれて、C₆₀@DWNT、C₇₀@DWNT、C₈₄@DWNT の順に小さくなることが実験的に明らかにされた。

続いて、(Cs/I)@SWNT と (Cs/C₆₀)@SWNT は大気安定ナノ pn 接合ダイオードとして機能することが実証された。両者の詳細比較実験と解析に関し後者においては、前者において観測された FET 伝達特性上の山状特性曲線は観測されずに、低温ではキャリアが正孔と電子の場合で大きく異なるクーロンダイヤモンド特性が観測された。これは SWNT と電子ドナー、アクセプタ物質間の電荷移動率及び内包原子・分子サイズの違いにより内包物質が SWNT に与えるキャリア密度、すなわち空乏層構造 (ポテンシャル分布) に大きな違いが生じることで説明できた。このドーパント組み合わせの結果、(Cs/I)@SWNT は理想的な pn トンネルダイオード特性を発揮し、(Cs/C₆₀)@SWNT はキャリアの型に依存して異なる量子ドットサイズを有することが判明した。

電気特性と磁気特性の観点からは、Fe@SWNT は高性能の n 型伝導を示すと共に、超伝導量子干渉素子 (SQUID) 測定により室温では超常磁性で低温下では強磁性を発現することが初めて見出され、両特性を併せ持つ磁性半導体の可能性があることが分った。しかし、元になる空の SWNT には成長時に用いられた触媒金属 Fe が残留していたので、まずは非磁性金属 Au 触媒を用いて合成された SWNT の測定を行った結果、空の SWNT 薄膜の磁化率が正となることを見出した。その理由に関しては、SWNT 欠陥中の不対電子由来の局所的効果であると考えている。

更に光電子融合デバイス特性については、C₆₀@SWNT と C₅₉N@SWNT は各々、紫外可視域光照射に対する光誘起電子輸送現象として、室温動作の FET 電流-電圧性上で大きなゲート電圧シフトと急峻な電気伝導低下の応答を示し、光スイッチ特性を発現することが初めて見出された。逆に、10 K という低温下では

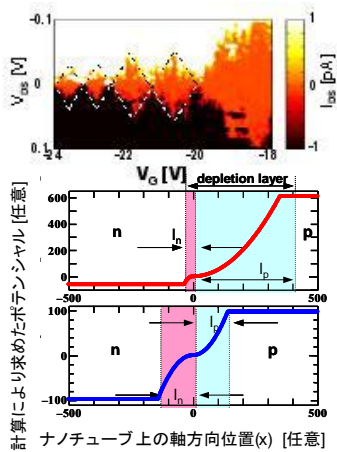


図 7: (Cs/C₆₀)@SWNT のクーロンダイヤモンド特性と n/p 密度依存ポテンシャル分布。

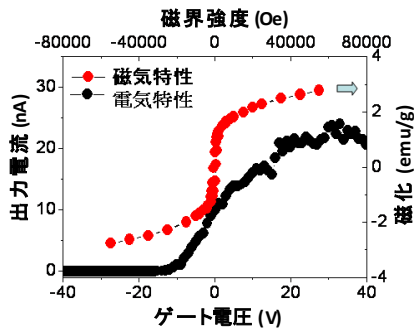


図 8: Fe@SWNT の半導体と磁性体両特性。

C₅₉N@SWNT は光照射によりその伝導が著しく増大し、温度を上昇すると共に反比例してこの光誘起電流は徐々に減少することが明らかになった。これらの現象をフラーレンと SWNT 間での電荷交換モデルにより説明を試みている。次に、n 型シリコン(n-Si)と p 型 SWNT あるいは C₆₀@SWNT から成る pn 接合を用いる、赤外光領域の新しい光電エネルギー変換素子機能を創出するべく系統的实验を行った。太陽電池の電極配位のもとで、SWNT が赤外光(1550 nm)を電気エネルギーに変換可能であることを実証し、更に C₆₀@SWNT を利用することで空の SWNT に比べ赤外光に対するエネルギー変換効率が増大することを初めて見出した。ここで、光エネルギーが SWNT のバンドギャップの 2 倍以上の場合変換効率が最大となることが観測され、1 個の光子で 2 個以上の電子-正孔対が形成される多重励起子生成の可能性を示唆する結果が得られた。また、内包 SWNT 一本を用いて作製された pn 接合内臓 SWNT 光電変換素子は、赤外領域の光入射に対して高効率(~10%)で光起電力を発生することを実証した。

(4) 単独成長から薄膜合成への展開 :

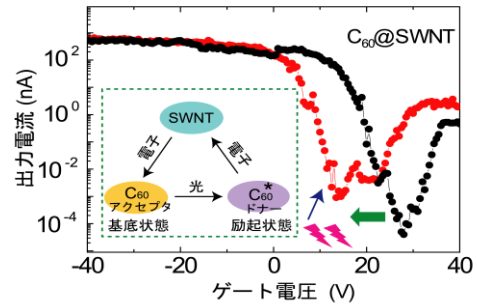


図 9: 光照射有無における C₆₀@SWNT-FET 特性。

これまでの主として、ナノチューブ 1 本を対象とするデバイス応用に集中してきたが、内包 SWNT と内包 DWNT による超伝導現象の研究にはそれらの薄膜状配置が優位であることが理解できたので、まずは超伝導研究とは直結させずにその基盤となる高性能薄膜合成と電気特性測定の実験を先行させた。

SWNT の応用で最も実用化の期待が高まっているものの一つが薄膜トランジスタ(TFT)である。SWNT 本来の高い柔軟性とキャリア移動度を最大限活用することで既存の TFT の性能を大きく凌ぐ超高性能 SWNT-TFT の実用化が期待されている。しかしながら、このような産業応用の実現には通常 p 型を示す SWNT-TFT を n 型へと変調する技術の確立が必要不可欠である。そこでここでは、プラズマイオン注入法を用いてアルカリ金属を SWNT に内包させることにより SWNT-TFT の特性制御を行った。SWNT-TFT に対して Cs⁺の照射実験を行い、同一デバイスに対する Cs⁺照射前後の特性比較を行った。その結果、Cs⁺を照射することで、明らかな n 型チャンネル電流の増加とゲート閾値電圧の負方向シフトが見られた。内包効率においては照射エネルギー約

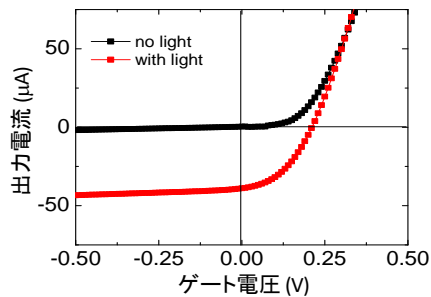


図 10: 内包 SWNT の高効率光電変換特性。

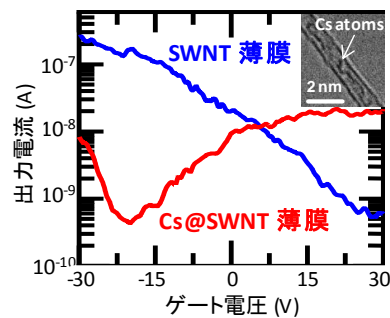


図 11: 内包 SWNT の n 型薄膜トランジスタ特性。

50 eV に最適値が存在することが判明した。さらに、耐環境効果では大気中、純水中、高温下 (< 400°C) いずれの環境下においても n 型伝導特性が安定であることを実証した。また、上記 (1) の範疇のプラズマ CVD による半導体 SWNT の優先的成長制御に関する研究において、新たな反応性ガスを添加することで原子置換型 SWNT が合成可能となり、CF₄ と N₂ ガス添加に対して各々強固な p 型 SWNT-TFT、n 型 SWNT-TFT の作製が実現された。

最後に、内包 SWNT の超伝導現象の追究については、プラズマイオン注入法によって創製された Ca@SWNT を用いて、その薄膜電気伝導特性評価を FET 配位のもとで行った。

コンダクタンスの温度変化に関するアレニウスプロットの結果から、Ca を内包することで超伝導への転移温度が空の SWNT に比べ数 K 程度上昇する傾向があることが判明した。本結果から、今後 Ca の内包条件の最適化により、更なる転移温度の高温化、すなわち高温超伝導実現への可能性が期待できると言える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 133 件)

- ① Y. Sato, H. Nishizaka, S. Sawano, A. Yoshinaka, K. Hirano, S. Hashiguchi, T. Arie, S. Akita, G. Yamamoto, T. Hashida, H. Kimura, K. Motomiya, and K. Tohji, "Influence of the Structure of the Nanotube on the Mechanical Properties of Binder-Free Multi-Walled Carbon Nanotube Solids", *Carbon*, 査読有, Vol. 50, No. 1, pp. 34-39, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2011.07.047>.
- ② Y. F. Li, S. Kodama, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, "Harvesting Infrared Solar Energy by Semiconducting-Single-Walled Carbon Nanotubes", *Applied Physics Express*, 査読有, Vol. 4, pp. 065101-1-3, 2011, DOI: 10.1143/APEX.4.065101.
- ③ 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*, 査読有, Vol. 4, No. 12, pp. 7395-7400, 2010, DOI: 10.1021/nn102379p.
- ④ Z. Ghorannevis, T. Kato, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, "Narrow-Chirality Distributed Single-Walled Carbon Nanotubes Growth from Nonmagnetic Catalyst", *Journal of the American Chemical Society*, 査読有, Vol. 132, No. 28, pp. 9570-9572, 2010, DOI: 10.1021/ja103362j.
- ⑤ Y. F. Li, T. Kaneko, S. Miyanaga, and R. Hatakeyama, "Synthesis and Property Characterization of C₆₀N Azafullerene Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes", *ACS Nano*, 査読有, Vol. 4, No. 6, pp. 3522-3526, 2010, DOI: 10.1021/nn100745a.
- ⑥ R. Hatakeyama, Y. F. Li, T. Y. Kato, and T. Kaneko, "Infrared Photovoltaic Solar Cells Based on C₆₀ Fullerene Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes", *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol. 97, No. 1, pp. 013104-1-3, 2010, <http://dx.doi.org/10.1063/1.3462313>.
- ⑦ T. Kato, R. Hatakeyama, J. Shishido, W. Oohara, and K. Tohji, "P-N Junction with Donor and Acceptor Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes", *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol. 95, No. 8, pp. 083109-1-3, 2009, <http://dx.doi.org/10.1063/1.3207742>.
- ⑧ Y. F. Li, R. Hatakeyama, W. Oohara, and T. Kaneko, "Formation of p-n Junction in Double-Walled Carbon Nanotubes Based on Heteromaterial Encapsulation", *Applied Physics Express*, 査読有, Vol. 2, No. 9, pp. 095005-1-3, 2009, DOI: 10.1143/APEX.2.095005.
- ⑨ Y. F. Li, T. Kaneko, J. Kong, and R. Hatakeyama, "Photoswitching in Azafullerene Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotube FET Devices", *Journal of the American Chemical Society*, 査読有, Vol. 131, No. 10, pp. 3412-3413, 2009, DOI: 10.1021/ja810086g.
- ⑩ Y. F. Li, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, "High-Performance Negative Differential Resistance Behavior in Fullerenes Encapsulated Double-Walled Carbon Nanotubes", *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol. 116, No. 12, pp. 124316-1-6, 2009, <http://dx.doi.org/10.1063/1.3273496>.
- ⑪ Y. Sato, M. Ootsubo, G. Yamamoto, G. Van Lier, M. Terrones, S. Hashiguchi, H. Kimura, A. Okubo, K. Motomiya, B. Jeyadevan, T. Hashida, and K. Tohji, "Super-Robust, Lightweight, Conducting Carbon Nanotube Blocks Cross-Linked by De-fluorination", *ACS Nano*, 査読有, Vol. 2, No. 2, pp. 348-356, 2008, DOI: 10.1021/nn700324z.
- ⑫ T. Kato and R. Hatakeyama, "Exciton Energy Transfer-Assisted Photoluminescence Brightening from Freestanding Single-Walled Carbon Nanotube Bundles", *Journal of the American Chemical Society*, 査読有, Vol. 130, No. 25, pp. 8101-8107, 2008, DOI: 10.1021/ja802427v.
- ⑬ Y. F. Li, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, "Electrical Transport Properties of Fullerene Peapods Interacting with Light", *Nanotechnology*, 査読有, Vol. 19, No. 41, pp. 415201-1-7, 2008, doi:10.1088/0957-4484/19/41/415201.
- ⑭ T. Kaneko, Y. F. Li, S. Nishigaki, and R. Hatakeyama, "Azafullerene Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes with n-Type Electrical Transport Property", *Journal of the American Chemical Society*, 査読有, Vol. 130, No. 9, pp. 2714-2715, 2008, DOI: 10.1021/ja077396o.
- ⑮ Y. F. Li, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, "Photoinduced Electron Transfer in C₆₀ Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotube", *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol. 92, No. 18, pp. 183115-1-3, 2008, <http://dx.doi.org/10.1063/1.2924300>.
- ⑯ T. Kato and R. Hatakeyama, "Kinetics of Reactive Ion Etching upon Single-Walled Carbon Nanotubes", *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol. 92, No. 3, pp.

031502-1-3, 2008, DOI: 10.1063/1.2837463.

- ⑰ 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 Nanowires: Scanning Tunneling Spectroscopy Study", Physical Review Letters, 査読有, Vol. 99, No. 25, pp. 256407-1-4, 2007, DOI:10.1103/PhysRevLett.99.256407.
- ⑱ Y. F. Li, R. Hatakeyama, T. Kaneko, T. Kato, and T. Okada, "Negative Differential Resistance in Tunneling Transport Through C₆₀ Encapsulated Double-Walled Carbon Nanotubes", Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 90, No. 7, pp. 073106-1-3, 2007, DOI: 10.1063/1.2535817.
- ⑲ Y. F. Li, T. Kaneko, T. Ogawa, M. Takahashi, and R. Hatakeyama, "Magnetic Characterization of Fe-Nanoparticles Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes", Chemical Communications, 査読有, No. 3, pp. 254-256, 2007, DOI: 10.1039/B611256K.
- ⑳ S. Iwata, Y. Sato, K. Nakai, S. Ogura, T. Okano, M. Namura, A. Kasuya, and K. Tohji, K. Fukutani, "Novel Method to Evaluate the Carbon Network of Single-Walled Carbon Nanotubes by Hydrogen Physisorption", The Journal of Physical Chemistry C, 査読有, Vol. 111, No. 41, pp. 14937-14941, 2007, DOI: 10.1021/jp076275j.

[学会発表] (計 450 件)

- ① R. Hatakeyama, T. Kato, and T. Kaneko, "Plasma Processing Challenge toward Carbon-Nanotube Chirality Control (Plenary Invited)", The Second International Symposium on Plasma Nanoscience, South Durras, Australia, 2010 年 12 月 13 日.
- ② R. Hatakeyama, T. Kaneko, T. Kato, Y. F. Li, and Q. Chen, "Plasma Processing Power for Nanocarbon Nanobioelectronics (Plenary Invited)", The 7th International Conference on Reactive Plasmas and 63rd Gaseous Electronic Conference, Paris, France, 2010 年 10 月 6 日.
- ③ R. Hatakeyama, T. Kaneko, T. Kato, and Y. FLI, "Nanoelectronically Functional Carbon Nanotubes Created by Plasma Processing (Invited)", The 5th International Conference on Materials for Advanced Technologies, Singapore, 2009 年 6 月 29 日.
- ④ R. Hatakeyama, T. Kaneko, and Y. F. Li, "Electrical and Photoinduced Transport Properties of Atom and Molecule Encapsulated Carbon Nanotubes Created by Plasma Process (Invited)", The 8th IEEE Conference on Nanotechnology, Arlington, USA, 2008 年 8 月 20 日.
- ⑤ R. Hatakeyama, "Novel-Structured Carbon Nanotubes Creation by Nanoscopic Plasma Control (Plenary Invited)", 28th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Prague, Czech Republic, 2007 年 7 月 16 日

[図書] (計 15 件)

- ① R. Hatakeyama and T. Kato, CRC Press, Taylor & Francis Group, "Structure Control of Single-Walled Carbon Nanotubes by Plasma CVD", 「Plasma

Processing of Nanomaterials」, edited by R. M. Sankaran, pp. 219-230, 2011.

- ② 畠山力三, 加藤俊郎, コロナ社, "CNT 合成へのプラズマ応用", 「カーボンナノチューブ・グラフィックハンドブック」, pp. 28-32, 2011.
- ③ R. Hatakeyama, and T. Kaneko, American Institute of Physics, "Q-Machine Plasmas Yielding New Experimental Methodologies of Sheared-Flow ad Nano-Quantum Physics", 「Frontiers in Modern Plasma Physics」, edited by P. K. Shukla, B. Eliason, L. Stenflo, pp. 152-167, 2008.
- ④ R. Hatakeyama, CRC Press, Taylor & Francis Group, "Carbon Derivatives", 「Nano and Molecular Electronics Handbook」, edited by S. E. Lyshevski, pp. 4-1-4-36, 2007.

[産業財産権]

○出願状況 (計 13 件)

① 名称: 単層カーボンナノチューブフィルムおよびその製造方法

発明者: 佐藤義倫, 田路和幸, 名村 優

権利者: 同上

種類: 特許権

番号: 特願 2009-210370

出願年月日: 2009 年 9 月 11 日

国内外の別: 国内

② 名称: ヘテロフラーレン内包カーボンナノチューブを用いた電子デバイス

発明者: 金子俊郎, 畠山力三, 李永峰, 笠間泰彦, 表研次

権利者: 同上

種類: 特許権

番号: 特願 2007-181340

出願年月日: 2007 年 7 月 10 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ、機関リポジトリ

<http://www.plasma.ecei.tohoku.ac.jp>

<http://ir.library.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

畠山 力三 (HATAKEYAMA RIKIZO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00108474

(2) 研究分担者

金子 俊郎 (KANEKO TOSHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30312599

田路 和幸 (TOHJI KAZUYUKI)

東北大学・大学院環境科学研究科・教授

研究者番号: 10175474

(3) 連携研究者

なし