

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18340108

研究課題名（和文）

制限された空間における構造と相転移：X線、中性子線、NMR、計算機実験による研究

研究課題名（英文）

Materials in confined geometry: X-ray, neutron, NMR, and computer simulations studies

研究代表者

真庭 豊

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70173937

研究成果の概要：単層カーボンナノチューブ(CNT)の、分子数個分程度の小さな直径をもった空洞内部に、水や炭素のかご状フラーレン分子などを挿入して、その性質を調べた。水分子ではアイスナノチューブと呼ばれる特異な氷が形成され、その形成温度がCNT直径に対してどのように変化するかが明らかになった。また、CNT内部の水分子が雰囲気ガス分子と交換する交換転移が発見された。さらに、CNT内部におけるフラーレン分子の大振幅回転運動の存在や特異な水の誘電特性が明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2007年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	15,100,000	5,889,000	19,630,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：カーボンナノチューブ、水、アイスナノチューブ、計算機実験

1. 研究開始当初の背景

原子スケールの微細な空間内に閉じ込められた物質はバルクとは異なる構造や性質を示すと考えられる。実際、このような例として、アルカリ金属を吸蔵したゼオライトにおける強磁性や熱クロミズム（文献⑱）の発現がある。本研究と直接係る当初の研究としては、カーボンナノチューブ(CNT)内の水、フラーレン、ガス分子の研究が報告されていた。CNTは直径がサブナノメートルから数ナノメートルの原子レベルで均一な円筒1次元空洞を提供する。フラーレンは典型的直径のCNT内部において1次元フラーレン結晶を形成し、水はCNTが疎水壁であるにもかかわらず内部に吸着され、低温でアイスナノチューブと呼ばれ

る新しい水の結晶（氷）を形成することが明らかにされていた。しかし、その詳細な性質についてはほとんど明らかになっていなかった。また、計算機実験からアイスナノチューブの空洞内にガス分子を取り込んだガスハイドレート形成が予想されていた。窒素、酸素などの単独のガス分子もCNT内部へ吸着されるが、詳細な構造と相挙動は不明であった。軽元素では低温における量子効果が予想されていたが実験的報告は皆無であった。このように、CNTの擬1次元空洞内の物質の振る舞いに大きな関心が寄せられていた。

2. 研究の目的

本研究は、原子スケールの微細な空洞内部

に閉じ込められた物質の性質を系統的に明らかにすることが目的である。特に、CNTの擬1次元空洞内部の水、フラーレン、各種ガス分子の構造・相挙動・物性をCNTの直径をパラメータとして明らかにする。

3. 研究の方法

直径制御された高純度の単層カーボンナノチューブ (SWCNT) を用いて研究した。本研究者らの従来の研究では、SWCNTの平均直径が1.17から1.44nm程度であったが、本研究では新たに産総研斎藤毅博士のグループから試料が提供され、試料の平均直径として1.17から2.4nmまでをカバーした。これらの試料はバンドルがよく発達しており、X線(中性子線)回折の手法により、SWCNT内部空洞への物質の挿入、構造、相挙動を調べることが可能であった。内包分子のダイナミクスを明らかにするためにNMR実験を行った。また並行して構造、ダイナミクスの詳細を明らかにするために分子動力学(MD)計算を行った。

4. 研究成果

本研究期間において特に以下の点が明らかになった。

(1) フラーレンを内包したSWCNT (C60@SWCNT)

バルクの3次元フラーレン結晶では、各格子点にあるフラーレン分子の回転自由度が凍結する、ひとつ、あるいは複数の相転移が知られている。本研究では、このような3次元のバルク結晶と比較して、SWCNT内部の1次元結晶のC60分子の相転移および動的挙動を炭素核のNMRにより研究した。その結果、平均直径が~1.4nmのSWCNT内部のC60分子は、バルクのような配向相転移を示さず、室温から30K近傍の低温まで大振幅の回転運動を継続することが明らかになった。このような振る舞いは、大振幅の1次元揺らぎによるものであると考えられる。図1に、他の3次元フラーレン結晶と比較して、1次元結晶中のC60分子回転の相関時間の温度依存性を示す。

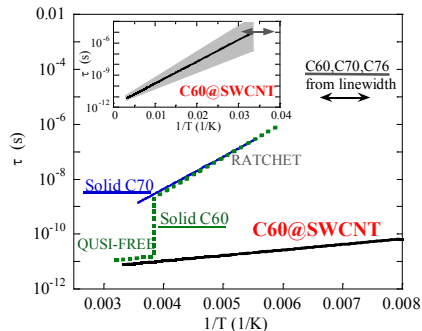


図1. フラーレン分子 (C60, C70, C76) の回転相関時間の温度 T 依存性。(文献③)

(2) SWCNT 内部の水の融点の空洞径依存

SWCNT内部の水は低温でアイスナノチューブを形成する。その融点のSWCNT直径依存性はきわめて興味深く、細いSWCNT内のアイスナノチューブほど高くなる。この振る舞いは、空洞径が大きいバルク領域(数nm以上)における融点の空洞径依存性と逆であり、理論的解明が強く望まれていた。本研究では、SWCNTの直径依存性について、丸山らが分子動力学(MD)計算を行った。従来のMD計算ではチューブ軸方向に高圧力がかけられていたのに対して、丸山らは圧力を印加することなくアイスナノチューブが形成できることを示し(すなわち1気圧で)、かつX線回折実験で得られた融点の空洞径依存性を良く再現することに成功した。(文献⑨)

さらに、平均直径が1.4nmから2.4nmの試料を新たに準備し、X線回折実験を行った。まず、本試料もバンドル構造が十分発達し、物質の内包を研究する実験に十分耐えられる良質の試料であることが確認された。ついで水の吸着実験を行い、直径が1.4nmから1.5nmの領域に水の融点についてクロスオーバーを示唆する結果を得た。すなわち、1.5nm以上では通常のパルクのキャピラリー内の水のように直径が大きくなると融点が上昇した。現在、この詳細を明らかにすべく、NMR、X線回折、分子動力学計算による研究を継続している。

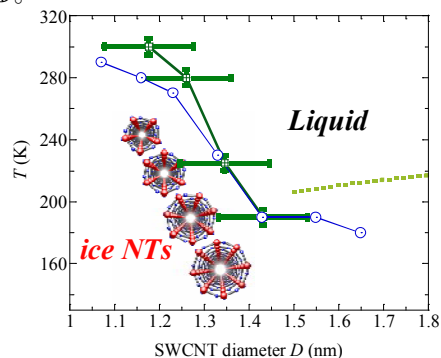


図2. SWCNT内部の水の相図。青○は計算機実験の結果。挿入図はアイスナノチューブをチューブ軸方向から見た概念図。

(3) 水内包SWCNTにおける分子交換転移

ガス中では水を内包したSWCNTはガス分子を取り込んでSWCNT内部にガスハイドレートを形成することが予想される。本研究では、さまざまな雰囲気ガス中の水内包SWCNT試料の電気抵抗、NMR、X線回折実験を行った。図3にガス中の水内包SWCNTフィルムの電気抵抗を示す。ガス中では、低温で異常が見られることがわかる。その起源の詳細を検討した結果、ガス中ではSWCNT内部の水と雰囲気ガ

ス分子が交換する「交換転移」が生じていることが明らかになった。図4に交換転移の分子動力学計算の結果を示した。

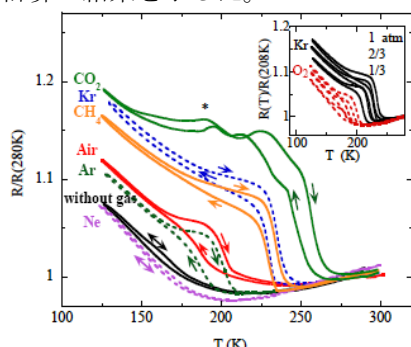


図3. 水内包 SWCNT フィルムのガス中電気抵抗の温度依存性。(文献⑬)

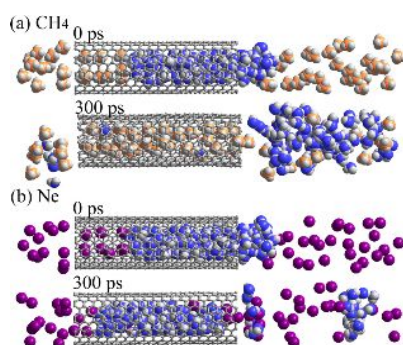


図4. 水内包 SWCNT における交換転移の分子動力学計算。時間の経過により、メタンでは水分子と交換して、メタンが SWCNT 内部に内包される。ネオンでは水が内包された状態が安定であり、交換は起こらない。(文献⑬)

(4) SWCNT に内包された水の誘電特性

水分子は、永久双極子モーメントをもつから、SWCNT 内部の水の誘電特性は大変興味深い。本研究では、電場中における水内包 SWCNT の分子動力学計算を行い、その誘電特性を調べた。その結果、電気分極は細いチューブにおいて時間とともに著しく揺らぐことが観察されたが、十分低温では奇数員環アイスナノチューブは一定の自発分極を有する強誘電体（フェリ誘電体）となり、偶数員環アイスナノチューブでは反強誘電体となることが明らかになった。その分極ヒステリシスは階段状の挙動を示し、アイスナノチューブを構成する水チェーンの分極が1本ずつ反転する、バルク物質では見られない特異な性質の誘電体であることが明らかになった。本計算機実験はまた、X線回折実験およびNMR実験（文献⑰）の結果を良く再現し、SWCNT 内にアイスナノチューブが形成されている極めて有力な証拠を与えた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① F. Mikami, K. Matsuda, H. Kataura, Y. Maniwa, Dielectric Properties of Water inside Single-Walled Carbon Nanotubes, ACS Nano, (2009) DOI:10.1021/nn900221. 査読有
- ② Y. Nakayama, S. Fujiki, Y. Hirado, H. Shiozawa, H. Ishii, T. Miyahara, Y. Maniwa, T. Kodama, Y. Achiba, H. Kataura, Y. Kubozono, M. Nakatake and T. Saitoh: Photoemission study of electronic structures of fullerene and metallofullerene peapods, Phys. Stat. Sol. (b), **245**, 2025-2028 (2008). 査読有
- ③ K. Matsuda, Y. Maniwa, H. Kataura, Highly rotational C60 dynamics inside single-walled carbon nanotubes: NMR observations, Phys. Rev. B **77** (2008) 075421. 査読有
- ④ Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, H. Kataura, Highly stabilized conductivity of metallic single wall carbon nanotube thin films, J. Phys. Chem. C **112** (2008) 3591-3596. 査読有
- ⑤ Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, T. Tanaka, H. Kataura, Diameter analysis of rebundled single-wall carbon nanotubes using X-ray diffraction: verification of chirality assignment based on optical spectra, J. Phys. Chem. C **112**(2008) pp. 15997 - 16001. 査読有
- ⑥ Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura, Optical properties of metallic and semiconducting single-wall carbon nanotubes, Phys. Stat. Sol. (b) **245** (2008) pp. 2233-2238. 査読有
- ⑦ Y. Miyata, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura, Optical evaluation of the metal-to-semiconductor ratio of single-wall carbon nanotubes, J. Phys. Chem. C **112**(2008)pp. 13187-13191. 査読有
- ⑧ 松田和之、花見圭一、真庭豊、「カーボンナノチューブ複合系の物性と計算機実験」, RIST NEWS No. 46 (2008) 3-12. 査読無
- ⑨ J. Shiomi, T. Kimura, S. Maruyama,

- Molecular Dynamics of Ice-Nanotube Formation Inside Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. C*, 111 (2007) 12188-12193. 査読有
- ⑩ Y. Miyata, T. Kawai, Y. Miyamoto, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura, Bond-curvature effect on burning of single-wall carbon nanotubes, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **244** (2007) 4035-4039. 査読有
- ⑪ Y. Miyata, T. Kawai, Y. Miyamoto, K. Yanagi, Y. Maniwa, and H. Kataura, Chirality-Dependent Combustion of Single-Walled Carbon Nanotubes, *J. Phys. Chem. C*, 111 (2007) 9671-9677. 査読有
- ⑫ K. Yanagi, K. Iakoubovskii, H. Matsui, H. Matsuzaki, H. Okamoto, Y. Miyata, Y. Maniwa, S. Kazaoui, N. Minami, and H. Kataura, Photosensitive Function of Encapsulated Dye in Carbon Nanotubes, *J. Am. Chem. Soc.* **129** (2007) 4992-4997. 査読有
- ⑬ Y. Maniwa, K. Matsuda, H. Kyakuno, S. Ogasawara, T. Hibi, H. Kadowaki, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kataura, Water-filled single-wall carbon nanotubes as molecular nanovalves, *Nature Materials* **6**, 135-141 (2007). 査読有
- ⑭ 真庭豊、松田和之、「ナノチューブ内に束縛された水分子の構造」、真空 50 (2007) pp264-269、査読無
- ⑮ 真庭豊、松田和之、客野遥、門脇広明、片浦弘道、「水内包カーボンナノチューブ：アイスナノチューブと交換転移」、固体物理 2007 年 7 号(新結晶・新物質), pp457-468 査読無
- ⑯ K. Yanagi, K. Iakoubovskii, S. Kazaoui, N. Minami, Y. Maniwa, Y. Miyata and H. Kataura, Light-harvesting function of β -carotene inside carbon nanotubes, *Phys. Rev.* **B74**, (2006)155420-5. 査読有
- ⑰ K. Matsuda, T. Hibi, H. Kadowaki, H. Kataura and Y. Maniwa, Water dynamics inside single-wall carbon nanotubes: NMR observations, *Phys. Rev.* **B74**, (2006) 073415. 査読有
- ⑱ S. Matsumoto, H. Matsui, A. Maeda, T. Takenobu, Y. Iwasa, Y. Miyata, H. Kataura, Y. Maniwa and H. Okamoto, Optical Stark Effect of Exciton in Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes, *Jap. J. App. Phys.* **45**, (2006) L513-L515 (Express Letter) 査読有
- ⑲ Y. Maniwa, S. Masubuchi, T. Minamisawa, H. Kira, T. Kodaira, S. Kazama, Thermochromism in sodium-loaded zeolite FAU(1.25), *Chem. Phys. Lett.* **424** (2006) 97-100. 査読有
- ⑳ H. Miyata, Y. Maniwa and H. Kataura, Selective oxidation of semiconducting single-wall carbon nanotubes by hydrogen peroxide, *J. Phys. Chem. B*, **110** (2006) 25-29. 査読有
- [学会発表] (計 37 件)
- ① 三上史記、松田和之、真庭豊、「カーボンナノチューブ(CNT)内包水の誘電特性」、日本物理学会第 64 回年次大会、東京、3 月 27 日-30 日、27pRF-4、(2009).
- ② 原田啓太郎、花見圭一、松田和之、真庭豊、手島正吾、中村壽、「単層カーボンナノチューブに内包された酸素の第一原理電子状態計算」、日本物理学会第 64 回年次大会、東京、3 月 27 日-30 日、29pYH-1、(2009).
- ③ 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「単一カイラリティを濃縮したカーボンナノチューブの X 線回折」、日本物理学会第 64 回年次大会、東京、3 月 27 日-30 日、30aYH-1、(2009).
- ④ 小中雄介、松田和之、真庭豊、松石聡、細野秀雄、「無機エレクトライド $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ の ^{27}Al NMR」、日本物理学会第 64 回年次大会、東京、3 月 27 日-30 日、27pPSB-44、(2009).
- ⑤ 三橋了爾、久保園芳博、神戸高志、池田直、太田洋平、山成悠介、鈴木雄太、藤原明比古、真庭豊、「アルカリドープ芳香族多環縮合炭化水素化合物の超伝導」、日本物理学会第 64 回年次大会、東京、3 月 27 日-30 日、29pYG-6、(2009).
- ⑥ 三上史記、松田和之、真庭豊、「単層カーボンナノチューブ内における水クラスターの誘電特性」、第 36 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム、名古屋、2009 年 3 月 2 日-4 日、1P-26、(2009).
- ⑦ 原田啓太郎、松田和之、真庭豊、手島正吾、中村壽、「第一原理計算による酸素内包単層カーボンナノチューブの電子状態予測」、第 36 回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム、名古屋、2009 年 3 月 2 日-4 日、1P-25、(2009).
- ⑧ 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、

- 「金属型および半導体型単層カーボンナノチューブの D-band ラマンスペクトル」、日本物理学会秋季大会、盛岡、9月20日～23日、23aTA-3、(2008).
- ⑨ 小中雄介、松田和之、真庭豊、松石聡、細野秀雄、「セメント超伝導体 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ の ^{27}Al NMR」、日本物理学会秋季大会、盛岡、9月20日～23日、22pWF-2、(2008).
- ⑩ 客野遥、三上史記、今泉利美、松田和之、齋藤毅、大島哲、湯村守雄、飯島澄男、宮田耕充、片浦弘道、真庭豊、「単層カーボンナノチューブ内部の水の相転移」、第35回記念フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム、東京、8月27日～29日、3P-45、(2008).
- ⑪ 松田和之、片浦弘道、真庭豊、「C60 ピーポッドの ^{13}C NMR」、第35回記念フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム、東京、8月27日～29日、3P-44、(2008).
- ⑫ 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「光学測定による金属および半導体単層カーボンナノチューブの比率評価」、第35回記念フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム、東京、8月27日～29日、3P-38、(2008).
- ⑬ 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「金属単層カーボンナノチューブ薄膜のシート抵抗」、第35回記念フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム、東京、8月27日～29日、3P-22、(2008).
- ⑭ 客野遥、宮田耕充、松田和之、門脇広明、真庭豊、片浦弘道、齋藤毅、大嶋哲、湯村守雄、飯島澄男、「単層カーボンナノチューブへの水分子吸着；吸着等温線」日本物理学会63回年次大会 2008年3月22日～26日近畿大学東大阪キャンパス (大阪府東大阪市)
- ⑮ 廣津智之、三上史記、松田和之、門脇広明、真庭豊、片浦弘道、「単層カーボンナノチューブに吸着したメタン分子の NMR 」日本物理学会63回年次大会 2008年3月22日～26日近畿大学東大阪キャンパス (大阪府東大阪市)
- ⑯ 小中雄介、松田和之、真庭豊、松石聡、細野秀雄、「無機エレクトライド $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ の ^{27}Al NMR」、日本物理学会63回年次大会 2008年3月22日～26日近畿大学東大阪キャンパス (大阪府東大阪市)
- ⑰ 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「フォトルミネッセンスから求めた SWCNT カイラリティ分布の実験的評価」、日本物理学会63回年次大会 2008年3月22日～26日近畿大学東大阪キャンパス (大阪府東大阪市)
- ⑱ 中山裕二、藤木伸一郎、塩沢秀次、石井廣義、宮原恒晃、真庭豊、兒玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦、「金属内包フラーレンを内包した単層カーボンナノチューブの光電子分光」、日本物理学会63回年次大会 2008年3月22日～26日近畿大学東大阪キャンパス (大阪府東大阪市)
- ⑲ 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「金属および半導体単層カーボンナノチューブの共鳴ラマン分光」第34回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2008年3月3日～5日 (名城大学)
- ⑳ 伊奈真吾、柳和宏、宮田耕充、真庭豊、片浦弘道、「密度勾配超遠心法による二層カーボンナノチューブの分離」第34回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2008年3月3日～5日 (名城大学).
- 21 客野遥、宮田耕充、真庭豊、片浦弘道、齋藤毅、大嶋哲、湯村守雄、飯島澄男、真庭豊、「直径 2nm-SWCNT への水分子吸着」日本物理学会第62回年次大会 2007年9月21日～24日 (北海道大学).
- 22 廣津智之、松田和之、門脇広明、真庭豊、片浦弘道、「単層カーボンナノチューブに吸着したメタン分子の NMR」日本物理学会第62回年次大会 2007年9月21日～24日 (北海道大学)
- 23 真庭豊：カーボンナノチューブにおける内包分子交換転移 (招待講演) 日本物理学会第62回年次大会 2007年9月21日～24日 (北海道大学).
- 24 梅崎智之、廣津智之、客野遥、宮田耕充、松田和之、片浦弘道、門脇広明、真庭豊、「単層カーボンナノチューブへ吸着した酸素分子の研究」、日本物理学会第62回年次大会 2007年9月21日～24日 (北海道大学).
- 25 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「金属型・半導体型カーボンナノチューブの光物性」日本物理学会第62回年次大会 2007年9月21日～24日 (北海道大学).
- 26 客野遥、小笠原俊介、日比寿栄、宮田耕充、松田和之、門脇広明、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、齋藤毅、大嶋哲、湯村守雄、飯島澄男、真庭豊、「水吸蔵単層カーボンナノチューブのガス吸着」、第33回フラーレン・ナノチューブ総合シン

- ポジウム 2007年7月11日～13日(九州大学).
- 27 廣津智之、松田和之、鷹子貴之、門脇広明、真庭豊、片浦弘道、「単層カーボンナノチューブに吸着したメタンのNMR」、第33回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2007年7月11日～13日(九州大学).
- 28 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「孤立単層カーボンナノチューブのバンドル再構成」、第33回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2007年7月11日～13日(九州大学).
- 29 片浦弘道、宮田耕充、真庭豊、柳和宏、「紫外ラマン分光による単層カーボンナノチューブの評価」、第33回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2007年7月11日～13日(九州大学).
- 30 宮田耕充、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「高純度単層カーボンナノチューブの光物性」第33回フラーレン・ナノチューブ総合シンポジウム 2007年7月11日～13日(九州大学).
- 31 廣津智之、谷津祥明、松田和之、門脇広明、真庭豊、片浦弘道、「単層カーボンナノチューブに吸着したメタンのNMR」、日本物理学会春季大会 2007年3月18日～21日(鹿児島大).
- 32 松田和之、真庭豊、片浦弘道、鈴木信三、阿知波洋次、「C60 ピーポッドのNMR」、日本物理学会春季大会 2007年3月18日～21日(鹿児島大).
- 33 久保寺利光、門脇広明、M. A. AdamsA、柴田薫、佐藤卓、松田雅昌、真庭豊、松田和之、片浦弘道、「カーボンナノチューブに吸着された水分子の状態」、日本物理学会春季大会 2007年3月18日～21日(鹿児島大).
- 34 客野遙、小笠原俊介、日比寿栄、松田和之、門脇広明、鈴木信三、阿知波洋次、真庭豊、片浦弘道、「水吸蔵単層カーボンナノチューブのガス吸着」、日本物理学会春季大会 2007年3月18日～21日(鹿児島大).
- 35 柳和宏、Konstantin Iakoubovskii、松井弘之、松崎弘幸、岡本博、宮田耕充、真庭豊、南信次、片浦弘道、「単層カーボンナノチューブに内包された色素からの光励起エネルギー移動」、日本物理学会春季大会 2007年3月18日～21日(鹿児島大).
- 36 中山裕二、藤木伸一郎、塩澤秀次、石井廣義、高山泰弘、宮原恒あき、真庭豊、

兒玉健、鈴木信三、阿知波洋次、片浦弘道、仲武昌史、齋藤智彦、「フラーレンピーポッドの光電子分光」日本物理学会春季大会 2007年3月18日～21日(鹿児島大).

- 37 宮田耕充、河合孝純、宮本良之、柳和宏、真庭豊、片浦弘道、「カーボンナノチューブの酸化における結合曲率の効果」、日本物理学会春季大会 2007年3月18日～21日(鹿児島大).

[図書] (計3件)

- ① 真庭豊、片浦弘道、有機・無機・金属ナノチューブ(清水敏美/木島剛編、フロンティア出版、2007)、第11章 水のナノチューブの合成と応用 pp265-271
- ② 真庭豊、有機貯蔵材料とナノ技術(市川勝監修、シーエムシー出版、2007) 3.2 ナノ細孔炭素材料の分子選択的吸着特性 pp100-112
- ③ 真庭豊、片浦弘道、電子ジャーナル、2007 インクジェット技術大全「CNT インクジェット技術によるnm配線の可能性」p102

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

特願 2008-311807(H20/12/08出願)

名称: 強誘電体及び記憶装置

国内特許

発明者: 真庭豊、松田和之、三上史記

出願人: 公立大学法人首都大学東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

真庭豊 (MANIWA YUTAKA)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 70173937

(2) 研究分担者

松田和之 (MATSUDA KAZUYUKI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 60347268

門脇広明 (KADOWAKI HIROAKI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 70194876

片浦弘道 (KATAURA HIROMICHI)

独立行政法人 産業技術総合研究所・グループ長

研究者番号: 30194757

丸山茂夫 (MARUYAMA SHIGEO)

東京大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 90209700