

グラフェンにおける界面相互作用を用いた新規伝導性・反応性の探究

高井, 和之 / TAKAI, Kazuyuki

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2016-06

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25410088

研究課題名(和文) グラフェンにおける界面相互作用を用いた新規伝導性・反応性の探究

研究課題名(英文) Investigation of novel electron transport and chemical reactivity by interfacial interaction in Graphene

研究代表者

高井 和之 (TAKAI, Kazuyuki)

法政大学・生命科学部・准教授

研究者番号：80334514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：巨大芳香族分子の極限であり、相対論的電子状態を有するグラフェンに対して導入したさまざまな異種化学種との間の界面相互作用を精密に制御することにより、グラフェンの電子状態を変調し、新規機能性(伝導性・磁性・反応性)の発現を目的とする。特に外部電場および磁場により機能性を精密に変調可能な新たな物質系の開拓を目的として研究を行った。(1) グラフェンの微細化および官能基導入による触媒活性の発現(2) グラフェンへの分子吸着による原子層複合体の形成と界面相互作用の解明(3) 欠陥導入により生じる局在状態を用いたグラフェンにおける物性制御を達成した。

研究成果の概要(英文)：Atomic layer materials is significantly influenced by slight interactions with external chemical species because of its two dimensional geometry, where all parts belong to the surface. In this study, guest chemical species and defects are introduced to atomic layer materials manners toward development of graphene-based catalyst and tuning of electron transport properties of graphene-FET. (1) evaluation of chemical activity for graphene derivatives in terms of magnetism (2) Interfacial interactions of graphene layers by molecular adsorption (3) Chemical modulation of the defect-induced states in graphene have been achieved.

研究分野：物性物理化学

キーワード：グラフェン 界面相互作用 触媒 電荷移動

1. 研究開始当初の背景

グラフェンは化学の視点からの研究がほとんど進展しておらず、これを機能性に富んだ共役系ホストとして捉えて、ゲスト物質を導入するという物理化学的アプローチにより、新たな伝導性・反応性を引き出すことを試みる研究はほとんど行われていなかった。また、グラフェン自体の新奇な物理的性質についても、実際には基板界面や表面吸着種など化学的な環境が与える影響が非常に大きい点が認識されつつも見逃されて来た経緯があり、グラフェンに対して導入したさまざまな異種化学種との間の界面相互作用を精密に制御することにより、グラフェンの電子状態を変調する研究が必要とされていた。

2. 研究の目的

巨大芳香族分子の極限であり、相対論的電子状態を有するグラフェンに対して導入したさまざまな異種化学種との間の界面相互作用を精密に制御することにより、グラフェンの電子状態を変調し、新規機能性(伝導性・磁性・反応性)の発現を目的とする。特に外部電場および磁場により機能性を精密に変調可能な新たな物質系の開拓をねらう。

3. 研究の方法

(1)グラフェンにおいて、端部位や酸素含有官能基に由来する局在磁性電子状態がグラフェンの電子授受に関わる反応性においても重要な役割を果たすことに注目しグラフェンの触媒反応機構を明らかにする。

(2)フェルミエネルギーの位置を自在に変調できる制御電界効果トランジスタ(FET)構造を有するグラフェンに対して、別種の化学種あるいは欠陥を導入し、これらとグラフェンの間のさまざまな界面相互作用を解明する。

4. 研究成果

(1) グラフェンの微細化および官能基導入による触媒活性の発現

グラフェンは炭素原子を蜂の巣状に配置した2次元物質であり、本来、化学的に不活性である。しかし、グラフェンに端や官能基などを与えることで化学反応性を付与することが可能である。実際、端の割合が多いナノグラフェンではバルクのグラフェンと比較して、フェルミ準位近傍に大きな状態密度を形成するエッジ状態が出現する。このエッジ状態は巨大芳香族分子の半占有軌道(SOMO)に由来し、その局所状態密度は端において大きな値を持っている。このため、端を導入したグラフェンはスピン磁性と化学反応性を持つ。またグラフェンに官能基を導入することによっても欠陥が導入されスピン磁性と化学反応性を示すようになる。つまり、

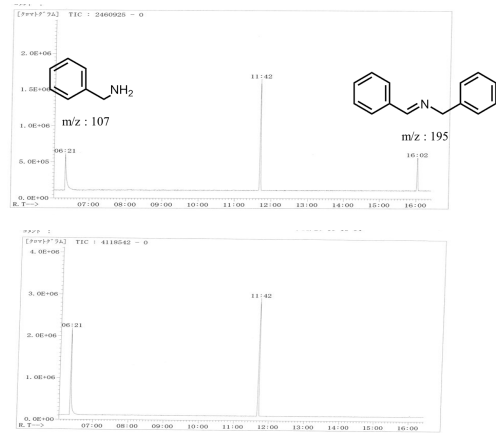


図1 HGOを触媒としたベンジルアミンのカップリング反応後の濾液のGC-MS(上段)触媒無しの対照実験(下段)

グラフェンにおいて局在スピン磁性を示す電子状態は、化学反応性においても重要な役割を果たしている。本研究では、端および酸素含有官能基の導入したグラフェン誘導体であるナノグラフェン・酸化グラフェン(GO)のスピン磁性と化学反応性を評価した。ナノグラフェンのモデル物質として活性炭素繊維ACFs用い、GOはGraphiteを出発物質としてBrodie法(BGO)とHummers法(HGO)で酸化した。また、ACFs, BGO, HGOを触媒として用いてベンジルアミンをベンジリデンベンジルアミンにする反応を行った。

ACFs, GOは局在スピン磁性に由来するCurie-Weiss則に温度非依存の反磁性が加わった挙動を示しており、Graphiteでは半金属に特徴的にみられる温度の低下とともに減少する伝導電子による軌道反磁性が大きく寄与している。局在磁性を示すACFs, GOについてCurie-Weiss則に基づいて解析を行いスピン濃度 N_{spin} 、Weiss温度 \square_{Weiss} 、温度非依存の磁化率 χ_{const} を求めたところ、ACFsは内殻電子の反磁性と伝導電子による軌道反磁性に加え、端構造によって現れるエッジ状態由来の局在スピン磁性を示している。GOは内殻反磁性と酸素含有官能基の安定ラジカルの局在スピン磁性のみで構成されており、GOでは酸化により \square 共役がほぼ消失していることがわかる。BGOのスピン磁性はHGOと比較して非常に小さいことから合成方法に依存して異なる状態を持つことがわかる。実際、HGO, BGOでは含有する官能基の種類と割合が異なり、吸収スペクトルにおいても差異が生じている。ESR強度の損失角のマイクロ波出力依存性においてもACFs, HGOではESR強度の損失角のマイクロ波出力依存性はほとんど見られなかった。一方、BGOではマイクロ波出力を上げるにつれて損失角が変化していることから、自由度が高いプロトンを多く含有していることがわかり、ここでも酸化方法に依存して含有官能基が異なることが示唆される。また、観測されてい

る線幅が鋭いことから GO の構造は大きく乱れていると考えられる。さらに、ACFs の g 値が 2.0023 より低いことから、電子の遮蔽効果が見られているのに対し、GO では π 電子の消失により g 値が 2.0023 より大きくなっている。表 1 にベンジルアミンをベンジリデンベンジルアミンにするカップリング反応の GC 収率を示す N_{spin} によりグラフェンにおける活性サイトの数が見積もられると考えられるが、この反応では中程度の N_{spin}

表 1 ナノグラフェンとグラフェン誘導体における反応性と磁性の対応

Sample	N_{spin} (g^{-1})	GC-Yield (%)
BGO	1.5×10^{18}	7.9
HGO	2.8×10^{18}	20.5
ACFs	2.9×10^{19}	5.2

を示す HGO の触媒活性が最も高い。グラフェンの反応活性点の数に加えて、電子の存在が反応収率に大きな影響を与えていることが示唆される。ナノグラフェンと酸化グラフェンにおけるスピン磁性と化学反応性の相関について評価した。スピン濃度 N_{spin} と化学反応性の対応が見られなかったことから、ナノグラフェンのエッジ状態と酸化グラフェンのラジカル状態は化学反応において異なる活性や役割を示すことが考えられる。また反応収率においてはスピン濃度の他にも伝導電子などの寄与も考慮する必要があると考えられる

2) グラフェンへの分子吸着による電子輸送の界面相互作用を介した電子輸送の変調

吸着は本質的に自己集積的な現象であり、特に 2 次元的な基板への吸着においては基板との界面において、吸着子間および基板との相互作用に特徴づけられる形で基板に積層した膜形成が起きる。これまで我々はグラフェンへの酸素分子の吸着に伴うホールドーピングと外部電場による吸着反応の kinetics の制御について明らかにして来たが、今回は強い還元性を持ち電子ドープが期待される Hydrazine 分子の吸着とこれに伴うグラフェンとの電荷移動について調べた。一般に作製直後のグラフェン FET デバイスはレジスト残渣や大気中の分子の吸着の影響により、 p ドープされた挙動を示す。一方、チャンネル部へ Hydrazine 吸着させると大きく電子ドープされ、真空排気を行ってもドープ量は保たれたままとなった(図 2)。バルクでは Hydrazine は水分子などと同様に蒸気圧の高い分子(b.p. 380 K)であることを考えると、酸素分子でも見られたようにグラフェン上において Hydrazine は電荷移動相互作用によるイオン結合的な化学吸着をしているものと考えられる。今後はグラフェンの E_f と電荷

移動の kinetics の相関を調べることにより、Hydrazine-グラフェン複合体の界面相互作用について明らかにしていく。

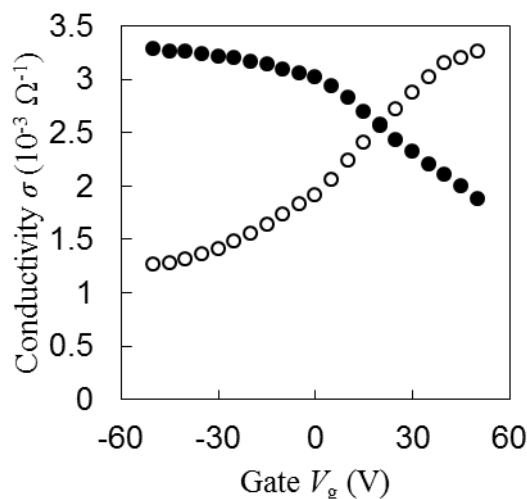


図 2 Hydrazine 吸着前()後()のグラフェン伝導度のゲート電圧依存性

3) 欠陥導入により生じる局在状態を用いたグラフェンにおける物性制御

Ar イオン照射を用いて原子空孔を導入した EG に対する酸素曝露前後の XPS 測定を行った。欠陥に由来したグラフェンにおける局在状態の性質が欠陥の終端化学構造により変調しうることが示唆された。

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 8 件)

D. Boukhalov, V. Osipov, A. Shames, T. Hayashi, K. Takai, T. Enoki, Charge transfer and weak bonding between molecular oxygen and graphene zigzag edges at low temperatures, Carbon, in press (査読有)

K. V. Bogdanov, V. Yu. Osipov, M. A. Zhukovskaya, C. Jentgens, F. Treussart, T. Hayashi, K. Takai, A. V. Fedorov, A. V. Baranov, Size-dependent Raman and SiV-center luminescence in polycrystalline nanodiamonds produced by shock wave synthesis, RSC Advances, 6, 51783-51790 (2016) (査読有)

DOI:10.1039/C6RA09317E

V. Yu Osipov, A. E. Aleksenskiy, K. Takai, and A. Ya. Vul', Magnetic studies of a detonation nanodiamond with the surface modified by gadolinium ions, Physics of the Solid State, 57, 2314-2319 (2015) (査読有)

DOI: 10.1134/S1063783415110268

J. Ribeiro-Soares, M. E. Oliveros, C.

Garin, M. V. David, L. G. P. Martins, C. A. Almeida, E. H. Martins-Ferreira, K. Takai, T. Enoki, R. Magalhães-Paniago, A. Malachias, A. Jorio, B. S. Archanjo, C. A. Achete, and L. G. Cançado, Structural analysis of polycrystalline graphene systems by Raman spectroscopy, Carbon, 95, 646-652 (2015) (査読有)

DOI:10.1016/j.carbon.2015.08.020

A. M. Panich, V. Yu. Osipov, and K. Takai, Diamagnetism of carbon onions probed by NMR of adsorbed water, New Carbon Mater., 29, 392-397 (2014) (査読有)

DOI:10.1016/S1872-5805(14)60145-1

T. Ishii, S. Kashihara, Y. Hoshikawa, J. Ozaki, N. Kannari, K. Takai, T. Enoki, and T. Kyotani, A quantitative analysis of carbon edge sites and an estimation of graphene sheet size in high-temperature treated, non-porous carbons, Carbon, 80, 135-145 (2014) (査読有)

DOI:10.1016/j.carbon.2014.08.048

J. Takashiro, Y. Kudo, S. J. Hao, K. Takai, D. N. Futaba, T. Enoki, and M. Kiguchi, Preferential oxidation-induced etching of zigzag edges in nanographene, Phys. Chem. Chem. Phys., 16, 21363-21371 (2014) (査読有)

DOI:10.1039/C4CP02678K

J. Takashiro, Y. Kudo, S. Kaneko, K. Takai, T. Ishii, T. Kyotani, T. Enoki and M. Kiguchi, Heat treatment effect on the electronic and magnetic structures of nanographene sheets investigated through electron spectroscopy and conductance measurements, Phys. Chem. Chem. Phys., 16, 7280-7289 (2014) (査読有)

DOI:10.1039/c4cp00023d

[学会発表](計 50 件)

鈴木 大輔, 高井 和之, グラフェン/電解質溶液の界面における電気化学相互作用, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 3 月 19-22 日, 2016, 東京工業大学, 目黒区, 東京

Takuya Isaka, Tomoki Yamashina, Kentaro Tajima, Yutaka Ohta, Kazuyuki Takai, Evaluation of Graphene Oxide Catalyst regarding Organic reaction in Aqueous media, FNTG シンポジウム 20-22, February, 2016, 東京大学, 文京区, 東京

Daisuke Suzuki, Kazuyuki Takai, Electrochemical Interaction at the Interface between Graphene and Electrolyte, FNTG シンポジウム 20-22, February, 2016, 東京大学, 文京区, 東京

Akira Suzuki, Kazuyuki Takai, Host-Guest interactions between nanographene host and magnetic guest molecule, FNTG シンポジウム 20-22,

February, 2016, 東京大学, 文京区, 東京
Tomoki Yamashina, Takuya Isaka, Kentaro Tajima, Yoshiaki Matsuo, Kazuyuki Takai, Evaluation of spin magnetism and chemical activity for graphene derivatives, FNTG シンポジウム 20-22, February, 2016, 東京大学, 文京区, 東京

Kenta Kogane, Hidekazu Touhara, Yoshiyuki Hattori, V. Yu. Osipov, N. Romanov and Kazuyuki Takai, Fluorination and annealing effects on magnetism and structure of nanodiamond, FNTG シンポジウム 20-22, February, 2016, 東京大学, 文京区, 東京

Kenta Kogane, Hidekazu Touhara, Yoshiyuki Hattori, V. Yu. Osipov, N. Romanov and Kazuyuki Takai, Fluorination of Nanodiamond / Nanographene-Shell Structure, PACIFICHEM 2015, 15-20, DECEMBER, 2015, Honolulu, USA

T. Yamashina, T. Isaka, K. Inoue, Y. Matsuo, K. Takai, Correlation between spin magnetism and chemical activity in graphene oxide / nanographene, PACIFICHEM 2015, 15-20, DECEMBER, 2015, Honolulu, USA

K. Nakamoto, K. Takai, T. Akatsu, Bromine adsorption effects on epitaxial graphene, PACIFICHEM 2015, 15-20, DECEMBER, 2015, Honolulu, USA

T. Umehara, K. Takai, Tuning molecular adsorption kinetics in graphene by gate-bias voltage, PACIFICHEM 2015, 15-20, DECEMBER, 2015, Honolulu, USA

K. Takai, T. Umehra, K. Nakamoto, A. Izumiyama, Molecular-based proximity effects in graphene, PACIFICHEM 2015, 15-20, DECEMBER, 2015, Honolulu, USA

Naoki Morishita, Gagus Ketut Sunnardianto, Koichi Kusakabe, Isao Maruyama, Kazuyuki Takai, Toshiaki Enoki, Temperature dependence of momentum distribution in a correlated Dirac sea with the zero mode of a hydrogenated graphene vacancy, NT15, 29, June - 3, July, 2015, Nagoya University, Nagoya, Japan

Koichi Kusakabe, Gagus Ketut Sunnardianto, Naoki Morishita, Isao Maruyama, Kazuyuki Takai, Toshiaki Enoki, A theoretical proof for electrically enhanced desorption of hydrogen chemisorbed on graphene, NT15, 29, June - 3, July, 2015, Nagoya University, Nagoya, Japan

Tomoki Yamashina, Takuya Isaka, Kadumi Inoue, Yoshiaki Matsuo, Kazuyuki Takai, Correlation between spin magnetism and catalytic activity in graphene oxide / nanographene, NT15, 29, June - 3, July, 2015, Nagoya University, Nagoya, Japan

A. Izumiyama, K. Takai, Influence of the

surface structure of substrate for proximity effect on Graphene, NT15, 29, June - 3, July, 2015, Nagoya University, Nagoya, Japan

A. Suzuki, K. Takai, Magnetic interactions between nanographene host and guest molecules with localized d electron, NT15, 29, June - 3, July, 2015, Nagoya University, Nagoya, Japan

T. Umehara, K. Takai, Gate-bias modulation of charge-transfer rate in hydrazine-adsorbed graphene, NT15, 29, June - 3, July, 2015, Nagoya University, Nagoya, Japan

T. Umehara, K. Takai, Fermi energy dependence of charge transfer kinetics in molecular adsorption on graphene, NT15 Satellite Symposia GSS15, 28, June, 2015, Nagoya University, Nagoya

N. M. Romanov, V. Yu. Osipov, J.-P. Boudou, T. Hayashi, K. Takai, High resolution TEM and infrared absorption studies of commercial polycrystalline nanodiamonds with twinning boundaries, ACNS2015, 29, June - 3, July, 2015, St. Petersburg, Russia

T. Isaka, T. Yamashina, K. Takai, Elucidation of the Interlayer structure of water-introduced graphene oxide, NDNC2015, 24-28, May, 2015, Shizuoka GRANSHP, Shizuoka, Japan

②① T. Yamashina, T. Isaka, K. Inoue, Y. Matsuo, K. Takai, Correlation between spin magnetism and chemical activity in graphene oxide / nanographene, NDNC2015, 24-28, May, 2015, Shizuoka GRANSHP, Shizuoka, Japan

②② K. Takai, A. Izumiya, Influence of the surface structure of substrate for proximity effect on Graphene, NDNC2015, 24-28, May, 2015, Shizuoka GRANSHP, Shizuoka, Japan

②③ Kenta Kogane, Hidekazu Touhara, Yoshiyuki Hattori, V. Yu. Osipov, N. Romanov and Kazuyuki Takai, Effect of Thermal Annealing and Fluorination on the Structure and Magnetic properties of Nanodiamond, NDNC2015, 24-28, May, 2015, Shizuoka GRANSHP, Shizuoka, Japan

②④ T. Umehara, K. Takai, Effect of hydrazine adsorption for electron transport properties on graphene, NDNC2015, 24-28, May, 2015, Shizuoka GRANSHP, Shizuoka, Japan

②⑤ K. Nakamoto, T. Akatsu, K. Takai, Host-Guest interactions on epitaxial graphene, NDNC2015, 24-28, May, 2015, Shizuoka GRANSHP, Shizuoka, Japan

②⑥ F. M. Shakhov, K. Takai, S. V. Kidalov, V. T. Lebedev, D. V. Shamshur, A. A.

Krasilin, E. Lähderanta and A. Ya. Vul', Boron Doped Diamonds Produced at High Pressure with Metal Catalyst, NDNC2015, 24-28, May, 2015, Shizuoka GRANSHP, Shizuoka, Japan

②⑦ 梅原 太一, 高井 和之, ヒドラジン吸着によるグラフェンの電子輸送特性の変調, 日本物理学会第 70 回年次大会, 3 月 21-24 日, 2015, 早稲田大学, 新宿区, 東京

②⑧ Kazuyuki Takai, Kenta Kogane, Hidekazu Touhara, Yoshiyuki Hattori, Structure and electronic properties of nanodiamond and its fluorination effect, APS March meeting, 2-6, March, 2015, Henry B. Gonzalez Convention Center, San Antonio, USA

②⑨ Akinori Izumiya, Kazuyuki Takai, Influence of the surface structure of substrate for proximity effect on Graphene, FNTG シンポジウム 21-23, February, 2015, 東京大学, 文京区, 東京

③⑩ Kenta Kogane, Hidekazu Touhara, Yoshiyuki Hattori, Kazuyuki Takai, Structure and electronic properties of nanodiamond and its fluorination effect, FNTG シンポジウム 21-23, February, 2015, 東京大学, 文京区, 東京

③⑪ Keisuke Nakamoto, Takashi Akatsu, Kazuyuki Takai, Structure and electronic properties of epitaxial graphene and its molecular adsorption effect, FNTG シンポジウム 21-23, February, 2015, 東京大学, 文京区, 東京

③⑫ Tomoki Yamashina, Takuya Isaka, Kadumi Inoue, Yoshiaki Matsuo, Kazuyuki Takai, Evaluation of magnetism of chemically active sites in graphene oxide / nanographene, FNTG シンポジウム 21-23, February, 2015, 東京大学, 文京区, 東京

③⑬ Taichi Umehara, Kazuyuki Takai, Effect of hydrazine adsorption on Graphene FET characteristic, FNTG シンポジウム 21-23, February, 2015, 東京大学, 文京区, 東京

③⑭ 黄金健太, 東原秀和, 服部義之, 高井和之, ナノダイヤモンドの電子物性と構造及びそのフッ素化効果, 炭素材料学会第 41 回年会, 12 月 8-10 日, 2014, 大野城まどかぴあ, 大野城市, 福岡

③⑮ 山科智貴, 井坂琢也, 井上和美, 松尾吉晃, 高井和之, 酸化グラフェン/ナノグラフェンにおける化学活性点の磁性による評価, 炭素材料学会第 41 回年会, 12 月 8-10 日, 2014, 大野城まどかぴあ, 大野城市, 福岡

③⑯ S. Gagus Ketut, I. Maruyama, K. Kusakabe, Y. Kudo, K. Takai, T. Enoki, Electronic state and charge analysis calculation of H₂ adsorption on graphene with vacancy, 日本物理学会第 69 回年次大会, 3 月 27-30 日, 2014, 東海大学湘南キャンパス, 平塚市, 神奈川

③⑦ F. Shakhov, V. Osipov, S. Kidalov, K. Takai, T. Enoki, A. Vul', Structural and magnetic changes of nanodiamond-copper composites during HPHT Sintering, FNTG シンポジウム, 3月3-5日, 2014, 東京大学伊藤国際学術センター, 文京区, 東京

③⑧ S. Gagus Ketut, N. Morishita, I. Maruyama, K. Kusakabe, Y. Kudo, K. Takai, T. Enoki, Charge distribution of hydrogenated graphene with a vacancy, 日本物理学会 2013 秋季大会, 9月25-28日, 2013, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島市, 徳島

③⑨ S. Gagus Ketut, I. Maruyama, K. Kusakabe, Y. Kudo, K. Takai, T. Enoki, Curious structure dependence of charge distribution and localized electron modes in hydrogenated graphene and hydrogenated graphene vacancy, RPGR2013, 9-13, September, 2013, Tokyo, Japan

④⑩ Y. Kudo, K. Takai, T. Enoki, S. Gagus Ketut, I. Maruyama, K. Kusakabe, Transport properties of graphene with hydrogenated atomic vacancies, RPGR2013, 9-13, September, 2013, Tokyo, Japan

④⑪ K. Takai, Y. Horie, Y. Nakazawa, T. Enoki, Specific heat study on the edge localized spins in nano-sized graphene, RPGR2013, 9-13, September, 2013, Tokyo, Japan

④⑫ V. Osipov, D. Boukhalov, A. Shames, K. Takai, T. Enoki, A. Vul', Formation of ionic bond between zigzag edge of graphene and molecular oxygen in defective carbon onions, RPGR2013, 9-13, September, 2013, Tokyo, Japan

④⑬ N. M. Romanov, V. Yu. Osipov V. Yu, A. Ya. Vul', J. P. Boudou, Y. Hattori, K. Takai, Infrared absorption studies of chemically modified nanodiamonds of dynamic synthesis, ACNS2013, 1-5, July, 2013, St. Petersburg, Russia

④⑭ V. Yu. Osipov, A. Ya. Vul', V. Yu. Dolmatov, K. A. Rudometkin, K. Takai, A. Vehanen, V. Myllymäki, S. A. Dushenok O. V. Bazanov, E. V. Nikitin, Electron paramagnetic resonance studies of modified detonation nanodiamonds with low ash content, ACNS2013, 1-5, July, 2013, St. Petersburg, Russia

④⑮ K. Takai, Y. Horie, V. Yu. Osipov, A. Ya. Vul', Y. Nakazawa, T. Enoki, Calorimetric Study of Multi-Shell Nanographite derived from Nanodiamond, ACNS2013, 1-5, July, 2013, St. Petersburg, Russia

④⑯ A. I. Shames, V. Yu. Osipov, K. Takai, T. Enoki, A. Ya Vul', Spin-spin interactions between pi-electronic edge-localized spins and molecular oxygen in defective carbon nano-onions, ACNS2013, 1-5, July, 2013, St. Petersburg, Russia

④⑰ K. Takai, Y. Ishibashi, T. Enoki, Structure and the electronic structure of step part on the epitaxial graphene surface, ACNS2013, 1-5, July, 2013, St. Petersburg, Russia

④⑱ V. Osipov, A. I. Shames, A. Baranov, K. Bogdanov, T. Makarova, K. Takai, T. Enoki, T. Hayashi, Magnetic resonance and Raman studies of multishell nanographites with and without oxygen-sensitive edge-localized spins, NDNC2013, 19-23, May, 2013, Singapore

④⑲ K. Takai, Interface Effect on the Electronic Properties of Graphene, NDNC2013, 19-23, May, 2013, Singapore (招講演)

⑤⑰ K. Takai, Chemical modification and Calorimetric study on the Magnetism of Nanographene, ISIC17, 12-16, May, 2013, Sendai, Japan (招待講演)

〔図書〕(計 1 件)

高井和之,「産業応用を目指した無機・有機新材料創製のため構造解析技術」"4章 走査プローブ顕微鏡によるグラファイトグラフェンの解析", 米澤徹, 陣内浩司 監修, シーエムシー出版, p295(p182-p191) (2015)

〔その他〕

ホームページ等

<http://takailab.ws.hosei.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高井 和之 (TAKAI, Kazuyuki)

法政大学・生命科学部・准教授

研究者番号: 80334514

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし