

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05410

研究課題名(和文) 化学修飾にもとづくトポロジー制御によるグラフェンの新規機能性の開拓

研究課題名(英文) Tuning topology of graphene toward new class of Graphene properties based on chemical modification strategy

研究代表者

高井 和之 (TAKAI, Kazuyuki)

法政大学・生命科学部・教授

研究者番号：80334514

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：電子物性が蜂の巣格子のトポロジーに大きく影響されるグラフェンに対して、1) イオン注入による窒素、ホウ素導入、2) 液相酸化による酸素導入という2つのアプローチにより、化学修飾によるトポロジーの制御を通じた新規機能性の発現を試みた。窒素、ホウ素の導入によりグラフェン骨格の欠陥をほとんど伴わずにそれぞれ電子、ホールドーピングを選択的に行うことができた。また、酸化剤を変えることにより選択的に化学状態を制御した酸素導入が可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ベンゼン環が無限に広がり、炭素原子が蜂の巣格子状に並んだ構造を持つ物質であるグラフェンは次世代の材料として期待されて来たが、トップダウン的な手法では構造の制御が難しく応用分野での進展に乏しい状態にあった。本研究ではボトムアップ的な手法である化学修飾によりグラフェンの構造制御を試みた結果、電子デバイスへの応用において重要な材料中で電荷を輸送するキャリアの振る舞いや、基本的な有機物質の反応であるニトロ基の還元反応を促進する触媒としての活性を制御可能であることを見出した。今回得られた成果により、今後グラフェンを用いた新規材料の開拓が進展し、希少資源に頼っていた材料などの代替が進むものと期待される。

研究成果の概要(英文)：Emerging new class of properties of graphene, of which electronic properties are significantly influenced by the topology of its honeycomb lattice, through its topology tuning by chemical modification is investigated by two approaches; 1) B and N introduction by ion beam irradiation, 2) oxygen introduction. Electron and hole doping without lattice deformation is achieved by chemical modifications with B and N. It is also clarified that changing oxidizing reagents enables selective functionalization of graphene.

研究分野：物性物理化学

キーワード：グラフェン 化学修飾 酸化剤 イオンビーム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

グラフェンの A, B 格子点の対称性が破られるとフロンティア軌道論において反応活性を持つとされる半占有軌道(SOMO)がフェルミエネルギー付近に大きな状態密度を持つ形で現れることから、多くの有機合成反応において触媒活性を示す遷移金属と類似した電子構造がグラフェンにおいて実現し、触媒としての機能性が発現することが期待される。実際、申請者らはすでに生理活性物質の原料として重要な芳香族イミンをアミンから合成する反応において、酸化グラフェンが顕著な触媒活性を示している。さらにこれが、触媒自体が示す局在スピン磁性と強い相関を持っていることを見出しており[1]、グラフェンへの酸素含有官能基の付加により付与された磁性局在状態が触媒活性の起源であると仮説を立てている。一方、これまでグラフェンの化学修飾はバンドギャップの導入や溶解性の向上といった観点で行われて来ており、これをトポロジー変調の手段として捉えられることがなかった[2]。また、これまでグラフェンのトポロジーを変調するため、イオンビーム照射や微細加工などで空孔や端構造を導入して物性への影響を調べる試みがいくつか行われて来たが、あくまで物理的な手法としての観点による研究がほとんどであった[3]。

これらの経緯と背景により、グラフェンへの酸化とイオンビーム照射という 2 通りの化学修飾により、蜂の巣格子上の隣接する A, B 格子点に架橋する形で同時に付加した誘導体と、ランダムな格子点に付加した誘導体を選択的に合成し、A, B 格子点の対称性が保たれた試料と破られた試料について電子構造、伝導性および、触媒活性を比較することにより、化学修飾を用いたトポロジー制御によるグラフェンの新規機能性の発現を実証する研究を実施するに至った。

[1] C. Su, et al, Nature Comm., 3, 1298 (2012). [2] M. Z. Hossain, et al, J. Phys. Chem. C, 118, 22096 (2014). [3] J. H. Zhao, Nuclear Inst. Methods Phys. Res., 365, 260 (2015).

2. 研究の目的

本研究ではグラフェンのトポロジーを変調する付加反応として、酸化による酸素の付加反応を行う。グラフェンにエポキシ基が付加され、A, B 格子点の対称性が保たれた試料と、ヒドロキシル基がラジカル付加され、A, B 格子点の対称性が確率的に破れている試料を合成し、それぞれ、Bohem 滴定による導入官能基の評価、酸化グラフェン触媒を利用した化学反応の収率見積もりを行って比較することにより、同じ化学種の付加においても、付加構造の違いにより電子構造が変わり、それに由来する機能性も異なることを示すことを目指す。

また、液相ではなく異なるイオン種のイオンビームを照射することにより、気相においてグラフェンの化学修飾を行い異種化学種のドーピングやトポロジー変調の効果を Raman 分光、電気伝導度などの測定により明らかにする。

3. 研究の方法

酸化グラフェンは HGO を濃硫酸と過マンガン酸カリウムを使用して酸化する Hummers 法、BGO を発煙硝酸と塩素酸カリウムで酸化する Brodie 法でそれぞれ合成した。Boehm 滴定法を HGO または BGO を、NaOH, Na₂CO₃, および NaHCO₃, に加え、上澄みのろ液に HCl (aq) を滴下して酸塩基滴定することにより行い、導入官能基量の定量評価を行った。GO を利用した触媒反応としてニトロベンゼンの水素化反応を、Nitrobenzene に触媒である HGO, BGO 試料を入れ 130 °C で 2 h 加熱し、Aniline を合成する反応を行った。得られた反

応液の GC-MS 測定を行い,収率,転化率を求めた.イオン照射を行うグラフェン試料を SiO₂ 基板上に機械的剥離法を用いて転写し,電界効果トランジスタ (FET) を電子線リソグラフィで形成した.試料への B⁺,N⁺の打ち込みは,法政大学イオンビーム工学研究所のタンデム型加速器を用いて加速電圧 200 keV, ドース量 1×10¹³ cm⁻²で行った.Raman 分光測定は顕微ラマン分光計 (LabRAM HR Evolution) を用いて,励起波長 532 nm にて行った.グラフェンの電気伝導度のゲート電圧 (V_g)依存性については,電子輸送測定用真空チャンバー内で 10⁻⁴ Pa まで排気して真空状態にし,その後脱ガスするための加熱処理をグラフェン (150°C, 2 h) で行い,その後測定を行った.

4. 研究成果

4.1 酸化グラフェン中の官能基量とニトロ基還元反応における触媒活性との相関

GO に含まれる官能基はそれぞれ pK_a が異なり, NaHCO₃, Na₂CO₃, NaOH などの pK_b が異なる塩基を使用して中和することで区別できる.一例として NaOH により HGO, BGO の中和を行った結果を Fig. 1 に示す.当量点に達するまでに必要な HCl の滴下量は HGO, BGO それぞれについて, 15.3 mL, 17.6 mL と求められた.滴定結果から得られた HCl の等量点に達するまでの添加量から, NaOH を用いて GO を中和した場合,全酸性官能基の量を計算で求めることができる. Na₂CO₃, NaHCO₃ についても同様に結果が得られた.

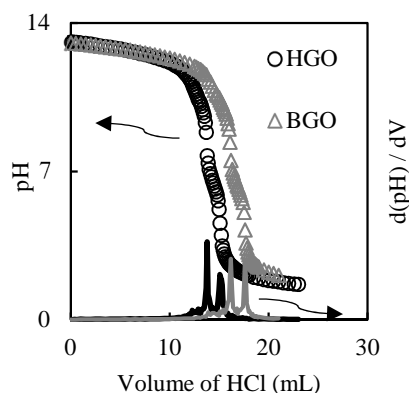


Fig. 1 The titration curves for HGO and BGO with NaOH (aq)

GO によって消費される水酸化物イオンの量は, NaOH (aq) によって中和されたときの総酸性官能基の量を示す.同様に,中程度および強酸基の量は, Na₂CO₃ (aq) によって中和されたときに得られる.強酸基の量は, NaHCO₃ (aq) によって中和されたときに得られる. HGO および BGO の酸性官能基, 強, 中酸性基の総量は, それぞれ 9 mEq/g および 5 mEq/g, 6 mEq/g および 3 mEq/g, 3 mEq/g および 2 mEq/g と求められた. HGO は BGO 酸性官能基よりも酸性官能基が多く, HGO と BGO の触媒活性の違いを示唆している.

Nitrobenzene の水素化反応に関して, H₂ ガスの圧力を変えたときの収率について, 圧力が 0.2 MPa の条件における収率は 1.5 MPa の約 11 倍, 0.8 MPa では約 17 倍の収率の値をとった.反応時間ごとの収率については, 19 h, 264 h の収率はそれぞれ 2 h の約 21 倍, 31 倍となった.反応時間が長いほど収率は大きくなるが 19 h と 264 h の差は小さいことから, 19 h より短い時間で反応はほぼ進行しきっているものと考えられる.

Table 1 に HGO, BGO を添加した場合における, Aniline の合成反応の各時間条件における GC 収率の相対値と転化率を示す.反応時間が 2 h において, HGO は BGO に比べて, Aniline の収率は約 5 倍となったが長時間の反応では差異は小さくなったことから HGO の

添加により反応速度が促進されている効果が観測されていると考えられる。HGOは、BGOよりも総酸性官能基が多いが、フェルミ準位でより多くの局在化した状態を持っており、これら両方の寄与によってHGOがより高い触媒活性を示すと考えられる。

Table 1 Relative values and conversion rates of Aniline synthetic reactions in BGO and HGO

Catalyst	Time (h)	Relative yield (%)	Conversion rate (%)
BGO	2	1	99.8
BGO	19	21	99.5
HGO	2	5	99.2
HGO	19	16	99.5

以上、Boehm 滴定により、HGOとBGOの酸性官能基の総量は、それぞれ9 mEq/gと5 mEq/gと決定できた。ニトロベンゼンの水素化反応ではHGOの収率はBGOと比較して約5倍の値をとった。HGOは、BGOよりも総酸性官能基が多く、フェルミ準位でより局在化した状態を持っているためHGOがより高い触媒活性を示すと考えられる。

4.2 グラフェンへのB⁺/N⁺ビーム照射による構造・電子輸送の変調 [4]

グラフェンに対するB⁺, N⁺照射前後のRamanスペクトルはいずれもグラフェン特徴的なラマンピークであるGバンド (~1580 cm⁻¹), 2Dバンド (~2670 cm⁻¹) に対応するピークが現れ、イオン照射後はグラフェンの欠陥構造に由来する、Dバンド (~1350 cm⁻¹), D'バンド (~1622 cm⁻¹) に対応するピークが現れた。B⁺, N⁺の10¹³ cm⁻²照射グラフェンのRamanスペクトルではG, 2Dバンドの大幅な形状の変化は見られず、生じたDバンドの強度は非常に小さいことから、犠牲層を用いたイオン注入によりグラフェンの基本的な構造が保たれていると言える。次に、B⁺及びN⁺照射前後のG, 2Dバンドの位置 (ω_G, ω_{2D})をFig. 2に示す。B⁺, N⁺照射ともに、Gバンドは低波数シフト、2Dバンドは高波数シフトした。これはイオン照射によるひずみの導入やキャリアドーピングに起因すると考えられる。

B⁺照射により、グラフェン中の電子キャリアとホールキャリア濃度が等しくなるゲート電圧を示す電荷中性点 V_{CNP} はホール側に約+4Vシフトした。一方で、N⁺照射により、電荷中性点は電子側に約-10Vシフトした。これらは、導入されたB⁺とN⁺がホールドーピング、電子ドーピングを引き起こすことを示している。また、電荷中性点のシフトからB⁺, N⁺照射によるフェルミエネルギーシフト ΔE_F を算出すると、B⁺照射では $\Delta E_F = -0.019$ eV、N⁺照射では $\Delta E_F = +0.038$ eVと求められた。移動度は、B⁺, N⁺照射前後でホール及び電子側で対称となり、絶対値も向上した。これは導入されたB, Nに由来する散乱ポテンシャルが、グラフェン中のキャリアで十分遮蔽されていることを示している。グラフェンFETにおいては斥力と引力に対するキャリアの散乱確率が異なるため、SiO₂基板に担持された場合、基板中の荷電不純物による散乱キャリアの符号に依存した移動度の低下が生じる。したがって、イオン照射やNaCl犠牲層の剥離プロセスによりグラフェンが基板からデカップルしたことで、基板からの散乱の影響が低下し、移動度が向上したと考えられる。

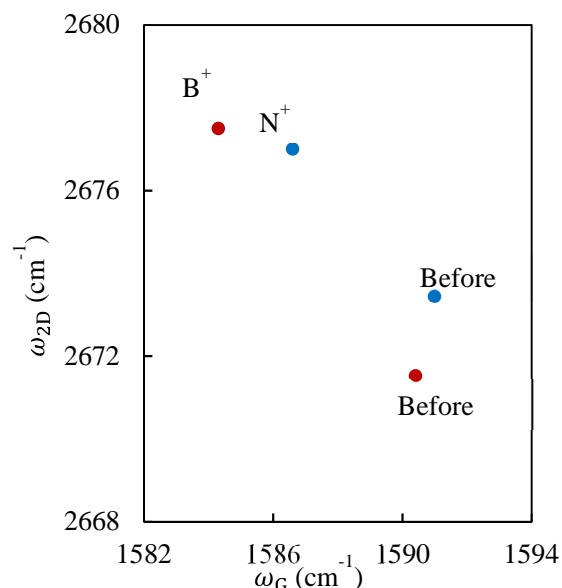


Fig. 2 The peak positions of the Raman G- (ω_G) and 2D-bands (ω_{2D})

以上, グラフェンに犠牲層を用いて B⁺, N⁺照射を行った. Raman スペクトルによって, グラフェンの基本的な構造を保ったまま B⁺, N⁺によって表面を修飾できることが分かった. また電気伝導度測定から, 導入された B⁺, N⁺はそれぞれ, ホールドーピング, 電子ドーピングを引き起こすことがわかった. さらに, 移動度がホール及び電子側で対称となり, 絶対値も向上したことから, イオン照射によりグラフェンが基板からデカップルし, 基板からの散乱の影響が低下することがわかった.

[4] T. Hidaka, K. Nakamura, H. Yoshimoto, R. Suzuki, Y. Zhao, Y. Ishiguro, T. Nishimura, and K. Takai, *Carbon Rep.*, **1**, 22-31 (2022).

4.3 まとめ

本研究では炭素材料のモデル物質であるグラフェンに対して, 有機化学的手法による液相酸化による酸素導入, 半導体工学的手法であるイオンビーム注入による窒素, ホウ素導入を実施して化学修飾によるトポロジーを変調することを試み, 構造, 電子物性への影響について評価を行うことにより, 新規炭素材料開発の指針を得ることを目指した. まず, グラフェンをそれぞれ KMnO₄, KClO₃ を用いて液相酸化してグラフェンに酸素が共有結合的に導入された酸化グラフェン (GO) を得た. XRD, XPS, IR の測定により同じ組成比で酸素が導入された GO において存在する酸素含有官能基が異なることは示唆されていたが, Bohem 滴定により直接的に官能基種ごとの定量測定を行うことにより, 明らかに異なる化学構造で酸素が導入されていることがわかった. また, ニトロベンゼンの還元反応において, 異なる官能基種で酸素含有官能基が導入されたグラフェンは触媒反応に違いが見られ, 化学修飾によるグラフェンのトポロジーの変調により, 電子構造が変化して触媒活性にも影響を及ぼすことが示唆された. また, 犠牲層として NaCl を用いた窒素, ホウ素ビーム照射により, 2次元物質であるグラフェンへ欠陥の導入を最小限に抑えながらヘテロ元素導入を行った. 電界効果トラジスタデバイス構造を利用した電気伝導度測定により, 窒素, ホウ素がそれぞれ電子, ホールドープを起こすと同時にそれぞれ荷電散乱源, 中性散乱源として働くことが明らかになった.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ishiguro Yasushi, Bogdanov Kirill, Kodama Naoko, Ogiba Mizuki, Ohno Tatsuya, Baranov Alexander, Takai Kazuyuki	4. 巻 124
2. 論文標題 Layer Number Dependence of Charge Density Wave Phase Transition Between Nearly-Commensurate and Incommensurate Phases in 1T-TaS ₂	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 27176 ~ 27184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c08414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Osipov Vladimir Yu., Boukhalov Danil W., Takai Kazuyuki	4. 巻 30
2. 論文標題 Gadolinium ion bonding on the surface of carboxylated detonation nanodiamond in terms of magnetochemistry and density functional theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mendeleev Communications	6. 最初と最後の頁 436 ~ 438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mencom.2020.07.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Osipov V. Yu., Boukhalov D. W., Takai K.	4. 巻 46
2. 論文標題 Structure and Magnetic Properties of Superoxide Radical Anion Complexes with Low Binding Energy at the Graphene Edges	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Russian Journal of Coordination Chemistry	6. 最初と最後の頁 738 ~ 745
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S107032842011007X	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Osipov Vladimir Yu., Shakhov Fedor M., Bogdanov Kirill V., Takai Kazuyuki, Hayashi Takuya, Treussart Francois, Baldycheva Anna, Hogan Benjamin T., Jentgens Christian	4. 巻 15
2. 論文標題 High-Quality Green-Emitting Nanodiamonds Fabricated by HPHT Sintering of Polycrystalline Shockwave Diamonds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale Research Letters	6. 最初と最後の頁 209
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s11671-020-03433-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Osipov Vladimir Yu., Romanov Nikolai M., Takai Kazuyuki	4. 巻 31
2. 論文標題 Irradiation of detonation nanodiamonds with γ -rays does not produce long living spin radicals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mendelevov Communications	6. 最初と最後の頁 227 ~ 229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mencom.2021.03.027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Osipov, N. Romanov, K. Kogane, H. Touhara, Y. Hattori, K. Takai	4. 巻 30
2. 論文標題 Intrinsic infrared absorption for carbon-fluorine bonding in fluorinated Nanodiamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mendelevov Commun.	6. 最初と最後の頁 84-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mencom.2020.01.028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Osipov, F. Treussart, S. Zargaleh, K. Takai, F. Shakhov, B. Hogan and A. Baldycheva	4. 巻 14
2. 論文標題 Photoluminescence from NV- Centres in 5 nm Detonation Nanodiamonds: Identification and High Sensitivity to Magnetic Field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nanoscale Res. Lett.	6. 最初と最後の頁 279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s11671-019-3111-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Osipov, D. Boukhvalov, K. Takai	4. 巻 29
2. 論文標題 Non-covalent bonding of copper atoms to the nitrogen containing sites of hydrogenated diamond surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mendelevov Commun.	6. 最初と最後の頁 452-454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mencom.2019.07.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Yu. Osipov, S. Abbasi Zargaleh, F. Treussart, K. Takai, N. M. Romanov, F. M. Shakhov, and A. Baldycheva	4. 巻 86
2. 論文標題 Nitrogen impurities and fluorescent nitrogen-vacancy centers in detonation nanodiamonds: identification and distinct features	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Opt. Tech.	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/JOT.86.000001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 D.Boukhalov, V. Osipov, K. Takai	4. 巻 23
2. 論文標題 Long range interactions and related Carbon-Carbon bond reconstruction between interior and surface defects in nanodiamonds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Chem. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 14592-14600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0cp05914e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Joly, K. Takai, M. Kiguchi, N. Komatsu, and T. Enoki	4. 巻 23
2. 論文標題 Anomalous spin relaxation in graphene nanostructures on the high temperature annealed surface of hydrogenated diamond nanoparticles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Chem. Chem. Phys.	6. 最初と最後の頁 19209-19218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1CP00921D	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Osipov, N. Romanov, I. Suvorkova, E. Osipova, T. Tsuji, Y. Ishiguro, K. Takai	4. 巻 32
2. 論文標題 Magnetic resonance tracking of copper ion fixation on the surface of carboxylated nanodiamonds from viewpoint of changes in carbon-inherited paramagnetism	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mendeleev Commun.	6. 最初と最後の頁 132-135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mencom.2022.01.043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Hidaka, K. Nakamura, H. Yoshimoto, R. Suzuki, Y. Zhao, Y. Ishiguro, T. Nishimura, K. Takai	4. 巻 1
2. 論文標題 Changing the structural and electronic properties of graphene and related two-dimensional materials using ion beam irradiation with NaCl sacrificial layers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Carbon Rep.	6. 最初と最後の頁 22-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7209/carbon.1.1_22	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計50件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 石黒 康志, 児玉 尚子, Kirill Bogdanov, Alexander Baranov, 高井 和之
2. 発表標題 TaS ₂ への水素吸着による電子物性への影響
3. 学会等名 第81回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上 禪, 石黒 康志, Baranov Alexander, Nabiev Igor, 高井 和之
2. 発表標題 グラフェンと量子ドットとの界面における相互作用の解明
3. 学会等名 第81回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasushi Ishiguro, Naoko Kodama, Kirill Bogdanov, Alexander Baranov, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Hydrogen adsorption effects on the electronic properties of TaS ₂
3. 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yangzhou Zhao, Hiroki Yokota, Haruna Ichikawa, Yasushi Ishiguro, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effects of defect formation in monolayer MoS ₂ by low energy Ar ⁺ ion beam irradiation
3. 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Riku Kondo, Yoshiaki Matsuo, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Difference of functional groups in Graphene oxide in terms of chemical activity
3. 学会等名 The 59th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 近藤里駆, 鈴木隆太郎, 田嶋健太郎, 松尾 吉晃, 高井 和之
2. 発表標題 酸化グラフェン中の官能基の定量評価と化学反応性
3. 学会等名 第47回 炭素材料学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井上禎, 重久雄大, 石黒康志, Baranov Alexander, Nabiev Igor, 高井 和之
2. 発表標題 グラフェンの光検出器への応用に向けた量子ドットとの界面相互作用の解明
3. 学会等名 第47回 炭素材料学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石黒康志, 重久 雄大, 小幡 吉徳, 高井 和之
2. 発表標題 グラフェンの電子物性における水素分子吸着と欠陥の効果
3. 学会等名 第47回 炭素材料学会年会プログラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 FU JIANWEI, Genki Hirobe, Yasushi Ishiguro, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Micro-patterning of graphite by Lithographic method
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Riku Kondo, Yoshiaki Matsuo, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Correlation between the amount of functional groups in graphene oxide and the catalytic activity in reduction of nitrobenzene
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zen Inoue, Yasushi Ishiguro, Alexander Baranov, Igor Nabiev, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Elucidation of charge interactions between graphene and quantum dots
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Hidaka, Tomoaki Nishimura, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effect of iron ion beam irradiation on MoS2 fluorescence
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuma Tsuji, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effects of liquid phase oxidation of Nanodiamond surface on its water dispersibility and photo-absorption
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Yoshida, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Gate-turning of carrier doping by oxygen molecule adsorption on MoS2
3. 学会等名 The 60th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日高 拓海, 高井 和之, 西村 智朗
2. 発表標題 MoS2の蛍光における鉄イオンビーム照射の影響
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高井和之
2. 発表標題 原子層物質の電子物性における化学修飾効果と反応性
3. 学会等名 日本表面真空学会講演大会シンポジウム～2次元表面・界面が創出する特異場の理解と応用～（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高井和之
2. 発表標題 カーボンマテリアルの電気伝導の基礎とエレクトロニクス応用への課題
3. 学会等名 新化学技術推進協会電子情報技術部会講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Takai, Takuya Isaka, Kentaro Tajima, Tomoki Yamashina
2. 発表標題 Correlation between Chemical structure and reactivity for GO regarding oxidative amine coupling reaction
3. 学会等名 The 11th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yangzhou Zhao, Hiroki Yokota, Haruna Ichikawa, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effects of defect formation in monolayer MoS2 by low energy Ar+ ion beam irradiation
3. 学会等名 The 11th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasushi Ishiguro, Naoko Kodama, Kirill Bogdanov, Alexander Baranov, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Layer-number dependence of NCCDW-ICCDW phase transition in 1T-TaS ₂
3. 学会等名 The 11th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (RPGR-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yudai Shigehisa, Yoshinori Obata, Yasushi Ishiguro, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effects of Hydrogen molecule adsorption and defects on the electronic properties of graphene
3. 学会等名 MRS Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jianwei Fu, Genki Hirobe, Yasushi Ishiguro, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Microfabrication of Graphite by Oxygen plasma etching
3. 学会等名 MRS Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyuki Takai, Ryutaro Suzuki, Takuya Isaka, Kentaro Tajima, Tomoki Yamashina
2. 発表標題 Identifying chemical structure responsible for the reactivity of GO regarding oxidative amine coupling reaction
3. 学会等名 MRS Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yangzhou Zhao, Hiroki Yokata, Haruna Ichikawa, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Ion-beam irradiation effects on the structure and electronic properties of MoS ₂
3. 学会等名 1&2DM 2020 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuyuki Takai, Yoshinori Obata, Koichi. Kusakabe, Gagus Ketut Sunnardianto, Toshiaki Enoki, Isao Maruyama, Tomoaki Nishimura, Yasushi Ishiguro
2. 発表標題 Hydrogen adsorption on atomic vacancies in Epitaxial Graphene toward Hydrogen storage
3. 学会等名 1&2DM 2020 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yangzhou Zhao, Hiroki Yokata, Haruna Ichikawa, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Ion-beam irradiation effects on the structure and electronic properties of MoS ₂
3. 学会等名 Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yudai Shigehisa, Yoshinori Obata, Yasushi Ishiguro, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 グラフェンの電子物性における水素分子吸着と欠陥の効果
3. 学会等名 第46回炭素材料学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryutaro Suzuki, Takuya Isaka, Kentaro Tajima, Kana Nakahara, Yoshiaki Matsuo, Nobuyuki Akai, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 異なる酸化方法で合成した酸化グラフェンの触媒活性の比較
3. 学会等名 第46回炭素材料学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Minakawa, Taichi Umehara, Akinori Izumiyama, Yasushi Ishiguro, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 グラフェンおよびMoS ₂ の伝導度における基板化学修飾効果
3. 学会等名 第46回炭素材料学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石黒 康志, 小幡 吉徳, 西村 智朗, 高井 和之
2. 発表標題 エピタキシャルグラフェンに導入した欠陥の化学構造の制御および電子物性への影響
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yurina Hikage, Satomi Nishijima, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 NO _x adsorption dynamics on Nanographene assembly system
3. 学会等名 The 58th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryutaro Suzuki, Takuya Isaka, Kentaro Tajima, Kana Nakahara, Yoshiaki Matsuo, Nobuyuki Akai, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Correlation between chemical structure and catalytic activity of graphene oxide
3. 学会等名 The 58th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yudai Shigehisa, Yoshinori Obata, Yasushi Ishiguro, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Adsorption effects of molecular Hydrogen on the electronic transport properties of Graphene
3. 学会等名 The 58th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Zen Inoue, Yasushi Ishiguro, Alexander Baranov, Igor Nabiev, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effects of interactions at the interface between graphene and quantum dots on their electronic properties
3. 学会等名 The 58th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Minakawa, Taichi Umehara, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Molecular adsorption effects on the electrical conduction of MoS ₂ on surface-modified substrates
3. 学会等名 The 58th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高井和之
2. 発表標題 グラフェンの化学修飾にもとづいたセンサーデバイス・有機合成用触媒の開拓
3. 学会等名 第58回炭素材料学会夏季セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuma Tsuji, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effects of liquid phase oxidation of Nanodiamond surface on water dispersibility and photo-absorption
3. 学会等名 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2020/2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Hidaka, Kousuke Nakamura, Tomoaki Nishimura, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Modulation of electronic properties of graphene and relative 2D materials by ion beam irradiation
3. 学会等名 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2020/2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Hidaka, Tomoaki Nishimura, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effect of iron ion beam irradiation on MoS2 fluorescence
3. 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials NT21（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Yoshida, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Modulation of oxygen molecule adsorption doping by Fermi energy control of MoS ₂
3. 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials NT21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yangzhou Zhao, Yasushi Ishiguro, Hiroki Yokota, Haruna Ichikawa, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effects of defect formation by low energy Ar ⁺ ion beam irradiation in monolayer MoS ₂
3. 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials NT21 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Hidaka, Kousuke Nakamura, Hiroki Yoshimoto, Yasushi Ishiguro, Tomoaki Nishimura, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Modulation of electronic properties of graphene by B ⁺ / N ⁺ beam irradiation
3. 学会等名 The 61th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Hidaka, Kousuke Nakamura, Hiroki Yoshimoto, Tomoaki Nishimura, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Modulation of electronic properties of graphene by B ⁺ / N ⁺ beam irradiation
3. 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成田 琳太郎, 高井 和之, 大山 智也
2. 発表標題 担持 SiO ₂ 基板の SAM 修飾によるグラフェン電界効果トランジスタ特性の変調
3. 学会等名 第48 回 炭素材料学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日高 拓海, 吉本 紘輝, 中村 康輔, Zhao Yangzhou, 石黒 康志, 西村 智朗, 高井 和之
2. 発表標題 グラフェンへの B+ / N+ビーム照射による構造・電子輸送の変調
3. 学会等名 第48回 炭素材料学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuma Tsuji, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Low temperature chemical modification of Nanodiamond and its effects on structure and magnetism
3. 学会等名 The 62th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Hidaka, Kousuke Nakamura, Tomoaki Nishimura, Kazuyuki Takai,
2. 発表標題 Effect of iron ion beam irradiation on MoS ₂ fluorescence
3. 学会等名 The 62th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yangzhou Zhao, Hiroki Yokota, Haruna Ichikawa, Yasushi Ishiguro, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Introducing lattice vacancies as adsorption sites in monolayer MoS2
3. 学会等名 The 62th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 巧、高井 和之
2. 発表標題 MoS2における酸素・水共吸着効果のフェルミエネルギー依存性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yangzhou Zhao, Hiroki Yokota, Haruna Ichikawa, Kazuyuki Takai
2. 発表標題 Effects of lattice vacancies introduced by ion-beam irradiation in monolayer MoS2
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Kazuyuki Takai, Seiya Tsujimura, Kang Feiyu, Inagaki Michio	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 620
3. 書名 Graphene: Preparations, Properties, Applications and Prospects	

1. 著者名 伊藤雄三, 高井和之 他	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 524
3. 書名 高熱伝導材料の開発～さらなる熱伝導率の向上のために～	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 アルカン脱水素触媒、及びこれを用いる水素製造方法	発明者 草部浩一, 高井和之, 西川正浩, 劉明	権利者 大阪大学, 法政大学, 株式会社ダイセル
産業財産権の種類、番号 特許、2019-135780	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

高井研究室 http://takailab.ws.hosei.ac.jp/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石黒 康志 (ISHIGURO Yasushi) (20833114)	東京電機大学・工学部・助教 (32657)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------

ロシア連邦	ITMO University	Ioffe Institute		
米国	Rutgers University			
中国	Nanjing Forestry University			