

令和 5 年 5 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05253

研究課題名(和文) 計算物質科学による共有結合性有機構造体の物性解明

研究課題名(英文) Physical properties of covalent organic frame materials

研究代表者

岡田 晋 (Okada, Susumu)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：70302388

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：量子論に立脚した計算物質科学の手法を用いて、種々のナノ炭素ネットワーク物質のエネルギー論と電子物性の解明を行った。特に、炭化水素分子が重合した2次元、3次元構造について、その構造の安定性と電子物性の解明を行い、これらの物質が極めてユニークな半導体であることを予言した。さらに、種々のナノ炭素物質に対して、その複合構造体の物性解明を行い、その電子物性が構成物質の物性の単純な足し合わせを超えることを明らかにした。さらに、ナノ炭素物質の外部電場に対する応答特性の解明も行い、ナノ物質の形状と電子物性に強く依存した電場遮蔽特性現象がみられることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、炭化水素分子からなる共有結合骨格を出発物質として種々の高次構造の電子物性の解明、とくに、高次構造形成時生じる骨格間の相互作用が電子物性に及ぼす影響の解明を行った。さらに、高次構造を用いた新奇物性発現の可能性の探索も併せて起こった。その結果、このような高次構造体においては、骨格間の束縛が非共有結合的な弱い相互作用によるものでも、骨格間の微小な波動関数の混成や分極効果により、有意な電子物性変調が期待できることが明らかになった。このことは、このような共有結合性有機骨格構造体を用いた新たな物質科学の発展を促すという点で、極めて学術的に意義のある成果である。

研究成果の概要(英文)：Using the density functional theory, we investigated the energetics and electronic structures of polymerized hydrocarbon molecules. In particular, we predicted that 2D and 3D covalent networks of polymeric hydrocarbon molecules those were semiconductors with unique band dispersion relation near the band edges. We also found that the electronic structures of heterostructures comprising nanocarbon materials exceeded the simple superposition of that of constituent nanomaterials. Finally, we reported that the electronic structures of nanocarbon materials under an external electric field are sensitive to their shape and size.

研究分野：物性理論

キーワード：炭素ナノ物質 複合構造 電子物性 エネルギー論

1. 研究開始当初の背景

近年、複数種の炭化水素分子を共重合化させることにより、種々の共有結合性有機構造体 (Covalent Organic framework: COF) の合成がなされている。ネットワークのバーテックス部となる Linker 分子と、エッジ部となる Linkage 分子の組み合わせにより、全ての次元性を網羅し、且つ任意の空隙サイズを有する共有結合ネットワークの構築が可能であり、これまでに数百種の COF の合成が報告されている。これらの COF は、共有結合のネットワークポロジリーが個々に異なることから、其々異なる π 電子物性を示し、種々の電子/光学材料として高いポテンシャルを有している。また、ネットワーク中にナノスケールの空隙を本質的に有していることから、非常に高い容量を有する、原子/分子吸蔵材料としての応用も期待されている。さらにこれらの物質は、ファンデルワールス力により凝集した、相互貫入構造と呼ばれる高次構造を形成することが可能である (図2)。このような相互貫入構造では、共有結合ネットワーク物質の次元性の組み合わせ、さらにそれらの間の相互作用による物性制御/変調も期待されている。

このような背景から、COF の合成と応用に関する研究は、今日、著しい進展を見せている。しかしながら、そのような合成/応用研究に比して、COF の基礎物性に関する研究、特に個々の構造と電子物性や光学物性との間の相関関係、さらに相互貫入構造形成による COF 間相互作用による物性変調についての基礎的な知見は未だほとんど得られていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、種々の炭化水素分子を linker 分子とした、既存の COF のエネルギー論と電子物性の解明にある。また、相互貫入構造を形成した COF のエネルギー論と電子状態の解明も目的である。さらに、得られた構造と電子状態の相関を基盤として、新奇電子系を実現する新しい COF の物質設計を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、量子論に立脚した計算物質科学の手法を用いて、主として sp^2 と sp^3 炭素からなる炭化水素分子に着目し、それらを linker 分子として構築される 2 次元ならびに 3 次元 COF のエネルギー論と電子物性の解明を行うものである (図3)。当該物質の構造安定性探索と電子状態の解明には、密度汎関数理論に基づく第一原理電子状態計算の手法を用いる。また、電子物性については、第一原理的に得られた電子構造を基に、強束縛近似計算等の経験的手法を用いることにより、特異な電子物性の物理的起源の解明を行い、幾何構造と電子物性との相関関係を明らかにする。

4. 研究成果

～立体炭化水素分子ポリマーのエネルギー論と電子物性～

炭素からなるネットワーク物質の電子物性は、その π 電子の形成するネットワーク構造に強く依存することが知られている。例えば、蜂の巣格子では線形の分散を有するバンド (ディラックコーン) がフェルミレベルに出現する。ここでは、Td 対象を有する炭化水素分子であるテトラフェニルメタン (TPM) を構成単位として、それらを互いに結合することで実現される 3 次元ダイヤモンドネットワーク物質の物質設計をおこなった (図1)。この炭素共有結合ネットワークの π 電子系は、ポリフェニルが sp^3 炭素で結合されたネットワークであり、ポリフェニル内の電子遷移確率と、 sp^3 により隔てられた近接するポリフェニル間の電子遷移確率の二つの異なる電子遷移確率を有する π 電子系とみなすことが可能である。このため、価電子バンドならびに伝導電子バンドにポリフェニルの分子軌道を起源とするパイロクロアバンドが出現することを発見した。さらに、ポリフェニル内の電子遷移の変調により、パイロクロアバンドの平坦バンド位置が変化することを示した。

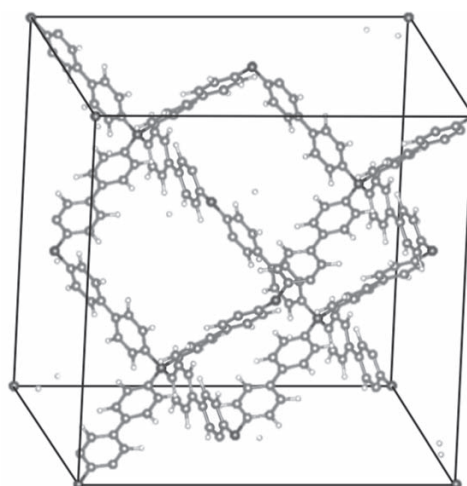


図1, TPM 重合構造の最適化された原子構造。

～ナノ炭素物質ヘテロ構造系の電子物性～

グラファイトの層間に原子や分子が挿入されたグラファイト層間化合物は、原子層物質複合系の代表例として古くから研究され、極めて得意な物性現象が発現することが知られている。ここでは、近年の原子層物質集積化技術の発展を受けて、2層グラフェンの層間にお椀状の炭化水素分子であるスマネンが挿入された、新しい、グラフェンと炭化水素分子からなる複合構造の物質設計と物性解明をおこなった。ここでは、スマネン分子はグラファイト層間において、稠密に2次元分子膜を安定に形成する可能性があることを示した。また層間への挿入により、分子のお椀構造反転の反応が起こりやすくなること、さらに、遷移状態である平面構造が著しく安定化することを示した。この系の電子状態は、挿入されたスマネンのお椀形状に起因して、極めて得意な性質を示すことが明らかになった。すなわち、分子鉛直方向の双極子モーメントにより、上下グラフェンディラック点が、それぞれ高/低エネルギーシフトし、上側グラフェンに電子、下側グラフェンに正孔が誘起される。誘起されるキャリアの濃度は 10^{13} 個/cm² である。この結果は、炭素のみから構築される複合構造において、グラフェンへのキャリア注入が可能であることを示したものであり、当該構造を用いた新しいデバイスの創出が期待される(図2)。

～電場下におけるナノ炭素物質の物性解明～

ダイヤモンドは炭素間の共有結合に起因する極めて高い構造と電子構造の安定性から、パワー半導体材料として注目されている。ここでは、ダイヤモンドデバイスの微細化を念頭に置いて、ダイヤモンドナノワイヤの外部電界に対する応答特性の表面終端とワイヤ形状依存性の解明を行った(図3)。計算の結果、ダイヤモンドナノワイヤの外部電界応答は、表面修飾、ワイヤ形状に強く依存することが明らかになった。清浄表面を有するナノワイヤは、その表面で外部電界を完全に遮蔽するのに対して、水素終端されたナノワイヤでは、ナノワイヤ内に有限の電界が分布し、遮蔽が完全でないことが明らかになった。これは、ナノワイヤの電子構造に起因する現象であり、金属的な電子構造が、清浄表面での電界遮蔽の起源である。また、ナノワイヤの鋭角なコーナにおいて、外部電界の強い集中が生じ、ナノスケール構造物に対しても古典電磁気学と同様の現象が観測されることを明らかにした。すなわち、ダイヤモンドナノワイヤの電界効果半導体デバイス応用においては、ワイヤ表面の処理と形状制御が重要であることを予言した。

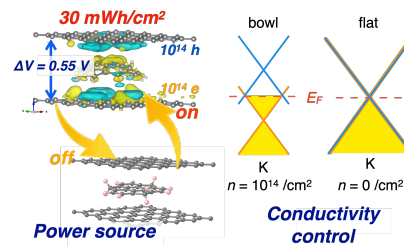


図2: スマネンが挿入された2層グラフェンにおける電荷移動とその応用例。

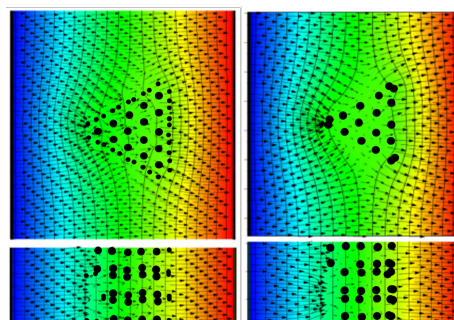


図3 水素終端表面(左図)と清浄表面(右図)を有するダイヤモンドナノワイヤ周辺の等電位面と電気力線。黒丸は原子位置を表す。各図の左右端に平行平板電極が存在する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Gao Yanlin, Okada Susumu	4. 巻 14
2. 論文標題 Carrier distribution control in bilayer graphene under a perpendicular electric field by interlayer stacking arrangements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 035001 ~ 035001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abdd76	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 -
1. 著者名 Okada Susumu, Gao Yanlin, Maruyama Mina	4. 巻 60
2. 論文標題 Modulation of intertube band dispersion relation of carbon nanotube bundles by symmetry and intertube wave function coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025002 ~ 025002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abda07	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 -
1. 著者名 Maruyama Mina, Okada Susumu	4. 巻 4
2. 論文標題 Carrier Redistribution in van der Waals Nanostructures Consisting of Bilayer Graphene and Buckybowl: Implications for Piezoelectric Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 3007 ~ 3012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c00131	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 -
1. 著者名 Hisama Kaoru, Maruyama Mina, Chiashi Shohei, Maruyama Shigeo, Okada Susumu	4. 巻 60
2. 論文標題 Indirect-to-direct band gap crossover of single walled MoS ₂ nanotubes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 065002 ~ 065002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abffc6	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 -

1. 著者名 Gao Yanlin, Okada Susumu	4. 巻 28
2. 論文標題 Dynamics of a charged Ne atom near graphene edges under a positive static electric field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 FlatChem	6. 最初と最後の頁 100265 ~ 100265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.flatc.2021.100265	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 -

1. 著者名 Okada Susumu, Cuong Nguyen Thanh, Gao Yanlin, Maruyama Mina	4. 巻 185
2. 論文標題 Spiro-graphene: A two-dimensional metallic carbon allotrope of fused pentagons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 404 ~ 409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2021.09.033	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 -

1. 著者名 Maruyama Mina, Gao Yanlin, Yamanaka Ayaka, Okada Susumu	4. 巻 29
2. 論文標題 Geometric structure and piezoelectric polarization of MoS ₂ nanoribbons under uniaxial strain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 FlatChem	6. 最初と最後の頁 100289 ~ 100289
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.flatc.2021.100289	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 -

1. 著者名 Hisama Kaoru, Gao Yanlin, Maruyama Mina, Kitaura Ryo, Okada Susumu	4. 巻 61
2. 論文標題 Continuous Fermi level tuning of Nb-doped WSe ₂ under an external electric field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 015002 ~ 015002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3726	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 -

1. 著者名 Okada Susumu, Cuong Nguyen Thanh, Gao Yanlin, Maruyama Mina	4. 巻 91
2. 論文標題 Geometric and Electronic Structures of Spiro-graphene Comprising Fused Pentagons and Octagons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024602-024602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.024602	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 -

1. 著者名 Maruyama Mina, Gao Yanlin, Thanh Cuong Nguyen, Okada Susumu	4. 巻 15
2. 論文標題 A two-dimensional magnetic carbon allotrope of hexagonally arranged fused pentagons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 035001 ~ 035001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac55e8	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 -

1. 著者名 Maruyama Mina, Okada Susumu	4. 巻 131
2. 論文標題 All carbon p-n border in bilayer graphene by the molecular orientation of intercalated corannulene	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 134303 ~ 134303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0083616	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 -

1. 著者名 Gao Yanlin, Okada Susumu	4. 巻 125
2. 論文標題 Electronic properties of diamond nanowires under an external electric field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 109029 ~ 109029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.diamond.2022.109029	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 -

1. 著者名 Maruyama Mina, Okada Susumu	4. 巻 739
2. 論文標題 Asymptotic behavior of the energetics and electronic structures of graphene with pyridinic defects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 136966 ~ 136966
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2019.136966	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 -

1. 著者名 Akita Masashi, Fujii Yasumaru, Maruyama Mina, Okada Susumu, Wakabayashi Katsunori	4. 巻 101
2. 論文標題 Momentum-selective optical absorption in triptycene molecular membrane	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085418 ~ 085418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.085418	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 -

1. 著者名 Yoneyama Kazufumi, Maruyama Mina, Gao Yanlin, Okada Susumu	4. 巻 59
2. 論文標題 Mechanical properties of carbon nanotube under uniaxial tensile strain	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S11D02 ~ S11D02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab7f5a	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 -

1. 著者名 Gao Yanlin, Okada Susumu	4. 巻 127
2. 論文標題 Structural effects on carrier doping in carbon nanotube thin-film transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 134301 ~ 134301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0004886	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 -

1. 著者名 Cuong N. T., Tateishi I., Cameau M., Niibe M., Umezawa N., Slater B., Yubuta K., Kondo T., Ogata M., Okada S., Matsuda I.	4. 巻 101
2. 論文標題 Topological Dirac nodal loops in nonsymmorphic hydrogenated monolayer boron	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195412 ~ 195412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.195412	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 -

1. 著者名 Gao Yanlin, Maruyama Mina, Okada Susumu	4. 巻 13
2. 論文標題 Influence of interlayer stacking arrangements on carrier accumulation in bilayer graphene field effect transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 065006 ~ 065006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab88c4	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 -

1. 著者名 Maruyama Mina, Nagashio Kosuke, Okada Susumu	4. 巻 2
2. 論文標題 Influence of Interlayer Stacking on Gate-Induced Carrier Accumulation in Bilayer MoS2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1352 ~ 1357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00139	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 -

1. 著者名 Okada Susumu, Maruyama Mina, Gao Yanlin	4. 巻 13
2. 論文標題 Asymmetric carrier penetration into hexagonal boron nitride in graphene field-effect transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 075005 ~ 075005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab9762	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 -

1. 著者名 Tomori Hikari, Maruyama Mina, Okada Susumu	4. 巻 59
2. 論文標題 Electronic structure of graphene under periodic uniaxial tensile strain	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 075002 ~ 075002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab984a	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 -

1. 著者名 Koyama Takeshi, Sugiura Junpei, Koishi Tomonari, Ohashi Ryosuke, Asaka Koji, Saito Takeshi, Gao Yanlin, Okada Susumu, Kishida Hideo	4. 巻 124
2. 論文標題 Excitation Energy Transfer by Electron Exchange via Two-Step Electron Transfer between a Single-Walled Carbon Nanotube and Encapsulated Magnesium Porphyrin	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 19406 ~ 19412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c06766	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 -

1. 著者名 Maruyama Mina, Nagashio Kosuke, Okada Susumu	4. 巻 14
2. 論文標題 Carrier Distribution Control in van der Waals Heterostructures of MoS ₂ and WS ₂ by Field-Induced Band-Edge Engineering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 044028-044028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.14.044028	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 -

1. 著者名 Okada Mitsuhiro, Maruyama Mina, Okada Susumu, Warner Jamie H., Kureishi Yusuke, Uchiyama Yosuke, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Shimizu Tetsuo, Kubo Toshitaka, Ishihara Masatou, Shinohara Hisanori, Kitaura Ryo	4. 巻 5
2. 論文標題 Microscopic Mechanism of Van der Waals Heteroepitaxy in the Formation of MoS ₂ /hBN Vertical Heterostructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 31692 ~ 31699
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.0c04168	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 -

1. 著者名 Lim Hong En, Nakanishi Yusuke, Liu Zheng, Pu Jiang, Maruyama Mina, Endo Takahiko, Ando Chisato, Shimizu Hiroshi, Yanagi Kazuhiro, Okada Susumu, Takenobu Taishi, Miyata Yasumitsu	4. 巻 21
2. 論文標題 Wafer-Scale Growth of One-Dimensional Transition-Metal Telluride Nanowires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 243 ~ 249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c03456	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 -

1. 著者名 Gao Yanlin, Okada Susumu	4. 巻 14
2. 論文標題 Carrier distribution control in bilayer graphene under a perpendicular electric field by interlayer stacking arrangements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 035001 ~ 035001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abdd76	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 -

1. 著者名 Okada Susumu, Gao Yanlin, Maruyama Mina	4. 巻 60
2. 論文標題 Modulation of intertube band dispersion relation of carbon nanotube bundles by symmetry and intertube wave function coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025002 ~ 025002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abda07	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 -

1. 著者名 Maruyama Mina, Okada Susumu	4. 巻 4
2. 論文標題 Carrier Redistribution in van der Waals Nanostructures Consisting of Bilayer Graphene and Buckybowl: Implications for Piezoelectric Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 3007 ~ 3012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c00131	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究業績一覧
<https://www.comas-tsukuba.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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------