

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03874

研究課題名(和文) 次世代超高速デバイス実現に向けた新規ディラック原子層材料の開発

研究課題名(英文) Development of novel materials of atomic layers with Dirac fermions for realizing the next-generation ultrafast devices

研究代表者

松田 巖 (Matsuda, Iwao)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号：00343103

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,800,000円

研究成果の概要(和文)：超高速デバイス実現に向けて、ホウ素の単原子シート「ポロフェン」とグラフェンの誘導体を中心に新たなディラック電子系原子層材料の開発を行なった。準結晶2層グラフェンについて光誘起で過渡的に起電力が発生することを観測し、層間の「ねじれ角」がキャリアダイナミクスに影響することが分かった。ポロフェンの水素化物「ポロファン(HB)」の多形体を研究し、トポロジカルの数理論を元に5,7員環から構成されるものに大きなキャリア濃度が実現するディラックノーダル線半金属を発見し、GHz-THz帯応答材料として役立つことが分かった。6員環ポロファンは水素輸送や化学センサーとして高い材料特性を示すことを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、次世代材料だけでなく物質としても珍しいディラック電子系原子層について、準結晶2層グラフェンやポロファンなどの新規物質群を開拓し、それらの電子状態とキャリアダイナミクスを明らかにした。新しい物質の理解は物質科学の発展に大きく貢献し、学術的意義は高い。また、本研究では超高速デバイス、水素輸送、化学センサーなど新物質の機能性を見出した。これらは将来的に材料として我々の社会で利用されることが期待される。そして、本研究を通じて、我々は原子層と最先端の分析技術に関する2冊の英文教科書を出版し、科学知識のグローバルな普及に尽くした。

研究成果の概要(英文)：Toward the realization of ultra-high-speed devices, we have investigated novel atomic layers with Dirac fermions by focusing on derivatives of the boron monatomic sheet "borophene" or graphene. A quasi-crystalline bilayer graphene shows photo-induced transient voltage and the "twist angle" between layers seemingly influences the carrier dynamics significantly. In polymorphs of the HB sheet "borophane (HB)", based on topology, the one with a network of 5, 7-membered rings was found to be Dirac nodal line semimetal. The material realizes a large carrier concentration and it can be used as an opto-electronic material for the GHz-THz band. The 6-membered ring borophane exhibits functionalities as a hydrogen transport material and as a chemical sensor.

研究分野：原子層科学

キーワード：原子層 ディラック電子 ホウ素 ダイナミクス ポロフェン ポロファン グラフェン 準結晶

1. 研究開始当初の背景

科学技術、特にデバイス素子の微細化・多機能化などのナノテクノロジーの発展は、現代社会を支えてきた。最近では情報・通信に対するニーズが特に高まり、通信速度は第5世代(5G)を超えただけではなく、IoT コンセプトにおける「ヒト」と「モノ」のネットワークを介したつながりも必要となり、さらなるコミュニケーション技術の発展が求められている。そんな中、GHz-THz 帯応答に対応した次世代デバイスの材料として、ディラック電子系(ディラックコーン)を有するグラフェンに注目が集まっていた。我々は世界に先駆けて、このグラフェンの時間分解光電子分光実験を行い、本物質のディラックフェルミオン(質量のないキャリア)について、光応答時における時間変化をリアルタイムで直接追跡に成功した。そしてグラフェンにおける超高速キャリアダイナミクスの全貌を明らかにすると共に、デバイス開発に必要な本物質の動的パラメータ(緩和時間など)を決定してきた [T. Someya, *IM et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 165303 (2017).]。ディラック電子系を有した物質はグラフェン以外にも存在し、実際、ホウ素単原子シート「ポロフェン」においてもディラックコーンが形成されていることを我々自身で発見し(図1)、大きな注目を集めた [B. Feng, *IM et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 096401 (2017).]。このようにディラック電子系を有した原子層は未だ開拓段階にあり、将来的な超高速デバイスに最適な物質を探索する必要がある。

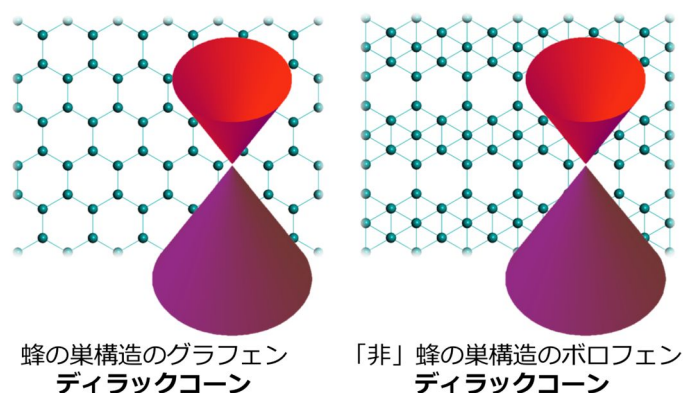


図1 グラフェンとポロフェンのディラックコーン

2. 研究の目的

次世代超高速デバイス実現に向けて、グラフェンを超えるディラック電子系原子層材料の開発を目的として研究を行なった。対象となる物質は、i) 豊富な資源を有し、ii) 輸送エネルギー消費の少ない超軽量で、iii) 環境負荷フリーという観点から「軽元素」に注目し、グラフェン(C)とポロフェン(B)の誘導体を基にした。

3. 研究の方法

本研究ではディラック電子系原子層材料の開発にあたり、物質設計・合成・評価の各プロセスを系統的に進めて実施した。

物質設計では理論物理と第一原理計算を相補的に使用することで、候補物質の構造及び物性の理解を深めながら進めた。そして候補物質について、類似物質の存在を調査すると共に、動力学シミュレーションで安定性を確認した。

合成はこれまでの成膜技術の経験を元に、原子層の化学的性質に合わせて化学気相成長(CVD)法、分子線エピタキシー(MBE)法、溶液反応法を使い分けて実施した。CVD及びMBE法で作成した試料は時間がかかるものの大面積で結晶性も高いため、原子層物質の電子状態(ディラックフェルミオン)を詳細に調べることができた。一方、溶液法では多結晶試料

になるが、容易に大量合成ができるので原子層物質の材料特性を網羅的に評価することができた。

試料評価は主に X 線放射光及びレーザーを用いた散乱・分光実験で行なった。本研究の核となる電子状態は吸収分光と光電子分光で精密に調べられた。光電子分光ではフェムト秒時間分解測定も実施され、光応答時における超高速キャリアダイナミクスをリアルタイムで追跡した。評価実験で得られたデータや情報は物質設計へフィードバックさせ、その研究に役立てた。

4. 研究成果

本研究を通じて多数の研究成果をあげることができた。本報告書ではそのハイライトを紹介する。

1) 準結晶 2 層グラフェンにおけるディラックフェルミオンの超高速変化の直接観測と次世代光デバイス制御に新たな自由度の提言

グラフェンは 2 層、3 層と重ねることができるが、そのままではなく「ねじれ角(twisted angle)」をつけて積層するとモアレ構造が生まれ、新しい電子状態が生成される。2018 年、1.1 度のねじれ角で積層した 2 層グラフェンが超伝導転移することが発見され、さらに同年、共同研究者の J.R.Ahn のグループより 30 度のねじれ角で積層することで 2 層グラフェンの準結晶が発見された。通常の二層グラフェンでは層間相互作用によってディラックコーンが変形してしまうが、この準結晶二層グラフェンでは各層のディラックコーンが保存され、さらに運動量空間にて 1 2 回対称に配置する珍しい特徴がある。そこで、本物質に対して時間分解光電子分光実験を行い、光応答後のディラックフェルミオンの動的変化を追跡した。

図 2 は通常の 2 層グラフェンと今回の「ねじれ」積層の 2 層グラフェンの測定結果である。縦軸のケミカルポテンシャルの変化とは光照射で高いエネルギーとなった電子の分布に相当する。通常の 2 層グラフェンではケミカルポテンシャルに変化しないが、ねじれた積層で準結晶となっている 2 層グラフェンでは、0~0.4 ps (ピコ秒、 10^{-12} 秒)の時間で上の層と下の層で逆の変化をしていた。これは超高速の時間スケールで、通常とは異なり

大きな電子分布変化があり、さらに過渡的に起電力が光誘起で発生したことに対応する。これは「ねじれ角」がディラックフェルミオンのダイナミクスに大きく影響したことを意味し、本パラメーターが次世代光デバイス制御の新たな自由度となることが示唆された。本研究成果は論文発表され [T. Suzuki, *IM et al.*, ACS Nano 13, 11981 (2019).]、プレスリリースを通じて様々なメディアに取り上げられた。

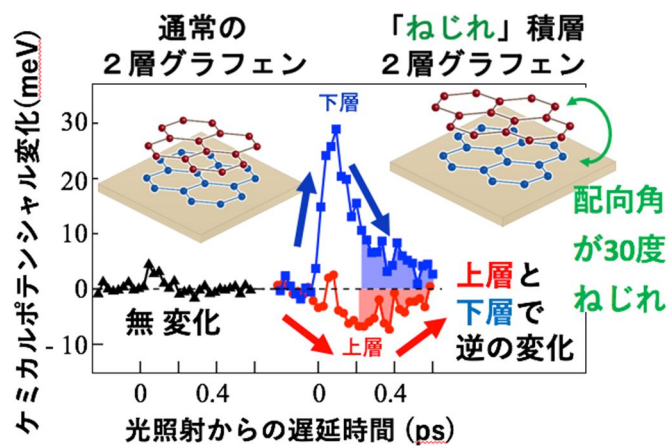


図 2 通常の 2 層グラフェンとねじれ積層(準結晶)グラフェンにおけるキャリアダイナミクス変化

2) トポロジーに基づくディラックノーダル線半金属原子層の設計

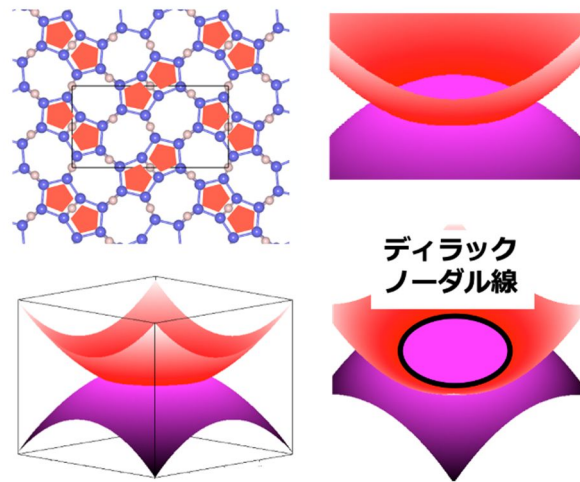
現代の物質科学では結晶空間群に時間反転対称性などの条件を加えることでトポロジカルな新奇電子状態の予言と検証が行われ、その結果、自然科学が探究されるとともに本特性を活かした新技術の開発が進められてきた。本研究ではポロフェンの水素化物「ポロファン(HB)」に注目し、結晶空間群に局所的な化学結合の条件を導入することでトポロジーの学理を展開し、そこから新規ディラック原子層の設計を行なった。ホウ素原子は特異な多中心二電子結合を形成し、さらに無数の多形体を成すことから、本アプローチに意義が生まれる。

よく知られるジボラン分子(B_2H_6)では、2つのホウ素原子と1つの水素原子は2個の電子を共有する3中心2電子結合が2個形成されている。ポロファンはこの結合状態が実現される B_2H_2 が局所的な基本ユニットとなっており、そのため2次元結晶全体の電子数は4の整数倍となる。一方、ポロファンの多形体候補の中にはノンシンモルフィック対称群に属するもの(例えば、5,7員環型HB, 図3)がある。そのバンド構造はゾーン境界に2つに縮退した(スピンを含めると4つに縮退した)電子状態が存在し、これによってディラックノーダル線を成す電子状態を予言することができる。そして化学結合の条件で決められた電子数でバンド構造のフェルミ準位はディラックノーダル線上かバンドギャップ中のどちらかに“ロック”される。その結果、ポロファンはディラック線半金属か絶縁体しか存在し得ないことが導き出され、その状態はトポロジカル量 Z_2 で予言することができる。

ディラックノーダル線半金属の材料は大きなキャリア濃度(10^{15} cm^{-2})が実現されており、これはキャリア濃度が極端に小さいグラフェン(現在の導電性原子シート)に対して大幅に電流密度を向上させることができる。すなわち、今後の通信技術で重要となるGHz-THz帯応答における単原子層物質で最大の弱点「キャリア密度の低さ」をノンシンモルフィック対称群に属するポロファン結晶は克服することができる。

本理論研究の成果は論文発表しており[N. T. Cuong, *IM et al.*, Phys. Rev. B **101**, 195412 (2020).]、現在、その具体的な物質合成を行なっている。なお、ポロファン(HB)については、本研究を通じて、6員環型のものが水素輸送[R. Kawamura, *IM, TK et al.*, Nature Commun. **10**, 4880 (2019).]及び化学センサー [S. Tominaka, *IM, TK et al.*, Chem **6**, 406 (2020).]として高い材料特性を示すことも分かった。

3) 原子層に関する国際的な教科書の出版



5,7員環型 HB
ディラックノーダル線半金属 ($Z_2=-1$)

図3 トポロジー量で決められるディラック線。図中のポロファン(HB)構造モデルでは、ホウ素原子と水素原子をそれぞれ青とピンクで示している。

近年、無数の原子層について世界中で理論計算及び実験が実施されている。本研究の物質設計にあたり、原子層群のライブラリー化と最先端の分析技術の情報整理を行った。共同研究者の勧めで、本内容を教科書として出版した [Iwao Matsuda ed., *Monatomic Two-Dimensional Layers: Modern Experimental Approaches for Structure, Properties, and Industrial Use*, (Elsevier, 2019)]. さらに本研究を通じて、我々が開拓した 2 次元ホウ素の科学を深めることができたので、その内容を教科書として出版した [I. Matsuda and K. Wu ed., *2D boron: Boraphene, Borophene, Boronene* (Springer, 2021)]. いずれも英文で執筆し、科学知識のグローバルな普及に尽くした。

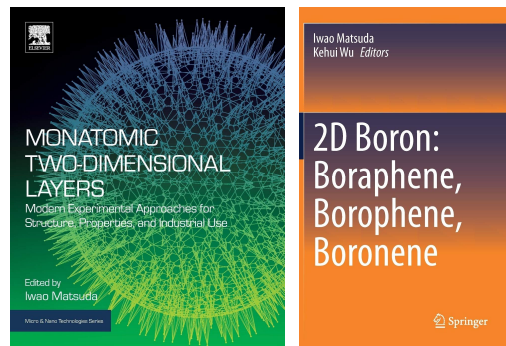


図 4 研究代表者(松田巖)の英文教科書
[左] *Monatomic Two-Dimensional Layers*
(Elsevier, 2019).
[右] *2D boron: Boraphene, Borophene,
Boronene* (Springer, 2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kawamura Reiya, Cuong Nguyen Thanh, Fujita Takeshi, Ishibiki Ryota, Hirabayashi Toru, Yamaguchi Akira, Matsuda Iwao, Okada Susumu, Kondo Takahiro, Miyauchi Masahiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Photoinduced hydrogen release from hydrogen boride sheets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4880-1,10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-019-12903-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki Takeshi, Iimori Takushi, Ahn Sung Joon, Zhao Yuhao, Watanabe Mari, Xu Jiadi, Fujisawa Masami, Kanai Teruto, Ishii Nobuhisa, Itatani Jiro, Suwa Kento, Fukidome Hirokazu, Tanaka Satoru, Ahn Joung Real, Okazaki Kozo, Shin Shik, Komori Fumio, Matsuda Iwao	4. 巻 13
2. 論文標題 Ultrafast Unbalanced Electron Distributions in Quasicrystalline 30° Twisted Bilayer Graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 11981 ~ 11987
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnano.9b06091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Cameau M., Yukawa R., Chen C.-H., Huang A., Ito S., Ishibiki R., Horiba K., Obata Y., Kondo T., Kumigashira H., Jeng H.-T., D'angelo M., Matsuda I.	4. 巻 3
2. 論文標題 Electronic structure of a monoatomic Cu ₂ Si layer on a Si(111) substrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 044004-1.-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.3.044004	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 Tateishi I., Cuong N. T., Moura C. A. S., Cameau M., Ishibiki R., Fujino A., Okada S., Yamamoto A., Araki M., Ito S., Yamamoto S., Niibe M., Tokushima T., Weibel D. E., Kondo T., Ogata M., Matsuda I.	4. 巻 3
2. 論文標題 Semimetallicity of free-standing hydrogenated monolayer boron from MgB ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 024004-1,-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevMaterials.3.024004	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 Feng Baojie, Zhou Hui, Feng Ya, Liu Hang, He Shaolong, Matsuda Iwao, Chen Lan, Schwier Eike F., Shimada Kenya, Meng Sheng, Wu Kehui	4. 巻 122
2. 論文標題 Superstructure-Induced Splitting of Dirac Cones in Silicene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 196801-1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.196801	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 Tominaka Satoshi, Ishibiki Ryota, Fujino Asahi, Kawakami Kohsaku, Ohara Koji, Masuda Takuya, Matsuda Iwao, Hosono Hideo, Kondo Takahiro	4. 巻 6
2. 論文標題 Geometrical Frustration of B-H Bonds in Layered Hydrogen Borides Accessible by Soft Chemistry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chem	6. 最初と最後の頁 406 ~ 418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chempr.2019.11.006	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 195412-1,11
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 Liu Ro-Ya, Lin Meng-Kai, Chen Peng, Suzuki Takeshi, Clark Pip C. J., Lewis Nathan K., Cacho Cephise, Springate Emma, Chang Chia-Seng, Okazaki Kozo, Flavel Wendy, Matsuda Iwao, Chiang Tai-Chang	4. 巻 100
2. 論文標題 Symmetry-breaking and spin-blockage effects on carrier dynamics in single-layer tungsten diselenide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214309-1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.214309	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 Tateishi I., Cuong N. T., Moura C. A. S., Cameau M., Ishibiki R., Fujino A., Okada S., Yamamoto A., Araki M., Ito S., Yamamoto S., Niibe M., Tokushima T., Weibel D. E., Kondo T., Ogata M., Matsuda I.	4. 巻 3
2. 論文標題 Semimetallicity of free-standing hydrogenated monolayer boron from MgB2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 024004-1, -8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.024004	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 Cameau M., Yukawa R., Chen C.-H., Huang A., Ito S., Ishibiki R., Horiba K., Obata Y., Kondo T., Kumigashira H., Jeng H.-T., D'angelo M., Matsuda I.	4. 巻 3
2. 論文標題 Electronic structure of a monoatomic Cu ₂ Si layer on a Si(111) substrate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 044004-1, -5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.044004	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 Feng Baojie, Zhou Hui, Feng Ya, Liu Hang, He Shaolong, Matsuda Iwao, Chen Lan, Schwier Eike F., Shimada Kenya, Meng Sheng, Wu Kehui	4. 巻 122
2. 論文標題 Superstructure-Induced Splitting of Dirac Cones in Silicene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 196801-1, -6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.196801	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 Ang Artoni Kevin R., Fukatsu Yuichiro, Kimura Koji, Yamamoto Yuta, Yonezawa Takahiro, Nitta Hirokazu, Fleurence Antoine, Yamamoto Susumu, Matsuda Iwao, Yamada-Takamura Yukiko, Hayashi Kouichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Time-resolved X-ray photoelectron diffraction using an angle-resolved time-of-flight electron analyzer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 100902 ~ 100902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abb57e	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11件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 Chronology of photoexcited carriers in atomic layers
3. 学会等名 韓国真空学会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 表面超構造で制御する原子層の電子物性
3. 学会等名 日本物理学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 Evolutions of the Dirac Fermions in Monatomic Layers
3. 学会等名 Graphene Flagship EU-Japan 2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 Evolutions of the Dirac Fermions in Monatomic Layers
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 ポストグラフェン、2次元新材料の進展と展望
3. 学会等名 第148回結晶工学分科会研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 Two-dimensional Dirac nodal line fermions in a monatomic layer
3. 学会等名 Tsinghua-UTokyo Joint Symposium 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 Dirac π -Cones in $\sqrt{3}$ Borophene
3. 学会等名 Materials Science & Technology 2018 (Columbus, Ohio, USA)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 Discovery of Dirac Monolayers and Elucidation of Functionalities by Advanced Soft X-ray Spectroscopy
3. 学会等名 American Vacuum Society International Symposium & Exhibition（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 固体表面上単原子層におけるディラック電子系の進化
3. 学会等名 応用物理学会春季大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 ディラックフェルミオンを有した新規単原子層の開拓
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田巖
2. 発表標題 Topological Dirac nodal loops in nonsymmorphic hydrogenated monolayer boron
3. 学会等名 The 7th International Workshop on 2D Materials(on-line)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Iwao Matsuda 他	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 232
3. 書名 Monatomic Two-Dimensional Layers: Properties, Fabrication and Industrial Applications	

1. 著者名 Iwao Matsuda 他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 171
3. 書名 2D boron: Boraphene, Borophene, Boronene	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究室ホームページ https://imatsuda.issp.u-tokyo.ac.jp/ 研究所HP https://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/organization/labs/i._matsuda_group.html 研究室ホームページ https://imatsuda.issp.u-tokyo.ac.jp/</p>

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	近藤 剛弘 (Kondo Takahiro) (70373305)	筑波大学・数理物質系・准教授 (12102)	
研究分担者	富中 悟史 (Tominaka Satoshi) (90468869)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテク トニクス研究拠点・主任研究員 (82108)	

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

中国	Chinese Academy of Sciences			
フランス	Sorbonne Universite			
韓国	Sungkyunkwan University			