

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02542

研究課題名(和文) グラフェンを用いた電子系の熱工学

研究課題名(英文) Electron heat engineering using graphene

研究代表者

守谷 頼 (Moriya, Rai)

東京大学・生産技術研究所・特任准教授

研究者番号：30548657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：グラフェンは電子と格子の相互作用が他の材料と比較して非常に小さい。そのためグラフェンの電子系は温度が容易に上昇し、さらに電子温度は格子温度とは独立に変化する。この性質を利用して、格子系を経由しない電子系を用いた熱伝達の制御技術を確立するのが本課題の目的である。研究機関を通じてグラフェンの電子系を用いた熱輻射源や熱検出器技術の確立に成功した。これらの技術は市販品が殆ど存在しない波長15ミクロン以上の遠赤外・テラヘルツ光の光発生・検出機の応用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの材料において、熱は格子を伝達する。格子の熱伝導は制御が困難であり容易に拡散してしまう。炭素1原子層のグラフェンでは電子と格子の相互作用が小さいため、電子系のみを用いた格子を介さない熱伝達制御が可能である。本研究では1) グラフェンに電流を流した際の電子系の黒体輻射が非常に効率の良い輻射熱源であること、2) グラフェンの電子系の熱電効果が、感度の良い熱輻射検出器として利用可能であること、を実証した。これらの成果により、グラフェンは今後の熱エネルギー利用に向けて有用な材料であることが確かめられた。

研究成果の概要(英文)：Graphene is known to have small electron heat capacity and electron-phonon interaction. Hence, an electron temperature of the graphene is very sensitive to the external stimuli and can be controlled nearly independent from its lattice temperature. By using this property, we developed a method to control electron heat transfer in graphene. We demonstrate a black body radiation and infrared photo-detection using graphene devices. These finding could be useful for the application to a far-infrared to terahertz optoelectronic devices.

研究分野：二次元材料物性

キーワード：グラフェン 窒化ホウ素 長波長赤外光

1. 研究開始当初の背景

固体中において、熱は電子よりはむしろ格子(フォノン)によって伝達されると考えられている。格子は電子に比べて平均自由行程が短いため、熱伝導は指向性が弱く、空間的に広がりやすい。これは多くの物質において正しく、またこの事実のために熱伝達の制御は難しい。

一方で、物質の中には電子と格子の相互作用が非常に小さいものがある。例えば本研究で調べようというグラフェンである。グラフェンでは、電子と格子の間の熱伝達小さく、電子温度と格子温度は多くの場合一致しない。このような材料においては格子を介さずに電子系のみを用いた熱伝導が実現できるはずである(図1のオレンジ色の矢印)。電子系は格子より平均自由行程が長くさらに伝導制御が容易であるため、電子熱伝導を用いることで指向性や局在性を高めた熱伝達が可能となる。さらに、グラフェンにおいては電子の比熱が小さいため、格子温度がほぼ変化しない状態で電子温度だけ非常に高温まで上昇させることができる。これは上記の電子系の熱伝達を実験的に証明するために非常に有利である。

以上の理由により本研究では、グラフェンを用いて格子系を介さない電子系のみを用いた熱伝達および熱検出技術の基盤を築くことを目的とする。将来的には、電子系だけを用いた、効率のよいエネルギー変換技術の確立につながると考えている。

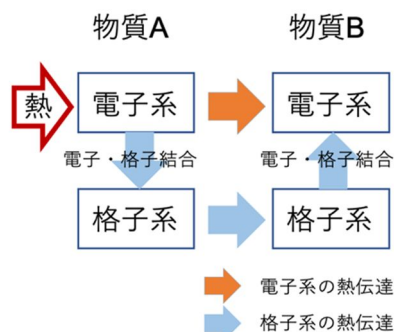


図1：電子系と格子系の熱伝達

2. 研究の目的

本研究で最終目的とする実験を図示したものが右図2である。2つの単原子層グラフェンを数~数十nmの厚みの二次元物質絶縁体である六方晶窒化ホウ素(h-BN)により隔てた構造を作製する。層間はファンデルワールス力によって積層されている。h-BNにより2つのグラフェンの間は電氣的に完全に絶縁されている。

Topグラフェンを熱発生源として、電流を印加することジュール熱により発熱する。グラフェンは電子温度が容易に上昇するため、高温の電子系からの黒体放射により赤外光が放出される。電子-格子相互作用が弱いグラフェンにおいては格子系の冷却が弱いため、印加したエネルギーを高い効率で放射に変換することが可能である。

Bottomグラフェン熱検出器にて、放射により伝わってきた熱を電子系の熱電効果(ゼーベック効果)によって電圧に変換し検出する。グラフェンを用いるメリットは3つある i)グラフェンは電子比熱が小さいため、電子温度は容易に上昇する。ii)グラフェンは熱電効果が大きいため、光検出に最適である。iii)グラフェンはバンドギャップがないため、ほぼ全波長において光吸収が起こる。よってTopグラフェンの黒体放射を他の材料より高い効率で吸収することができる。

上記の実験を通じてグラフェンの電子系を用いた熱発生源、熱検出器の原理検証ができる。さらにそれらを組み合わせることにより、2つのグラフェン間の熱エネルギーを用いた情報伝達が検証可能となっている。

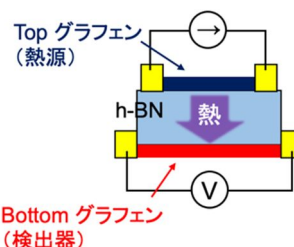


図2：グラフェン熱輸送素子

3. 研究の方法

研究は3段階に分けて行う。

(計画1) グラフェンの光熱電効果を用いた長波長赤外光検出

図3の構造のグラフェンデバイスを用いて赤外光の検出を試みた。熱放射は赤外の波長領域の放射光として放出されるので、赤外領域の光を高感度で検出できれば熱検出に適用できる。

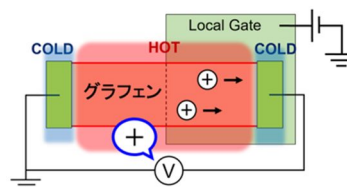


図3：光熱電効果デバイス

(計画2) グラフェンからの熱放射の検出

同一基板上に2つのグラフェンデバイスを作製し、一方のグラフェンを電流のジュール熱により発熱させる(熱源グラフェン)。他方のグラフェンを抵抗検出による温度計として使用する。検出器グラフェンで測定された信号から、熱源グラフェンの熱放射を定量的に理解する。

(計画3) ナノ空間におけるグラフェン間の熱エネルギー伝達

2つのグラフェンデバイスを縦方向に積層し、間を絶縁体である窒化ホウ素で電的に隔離する。窒化ホウ素の膜厚を nm オーダーまで薄くすることで、ナノメートルの距離における2つのグラフェン間の熱エネルギー伝達を観測する。

4. 研究成果

前節で述べた3つの研究計画について以下のような成果を得た。

(計画1) 光ネルンスト効果を用いたグラフェン赤外光検出の実現

光ネルンスト効果の原理を図4に示す。単層グラフェン素子において、金属のマスク(metal mask)を活用することにより、光照射によるグラフェンの発熱を、測定電極と直交方向の熱勾配に変換することに成功した。これは従来の電極と平行の方向に熱勾配を生成する光ゼーベック効果とは異なる新しい赤外検出原理である。磁場中において、波長9.2 ~ 10.6 ミクロンの範囲で大きな光ネルンストシグナルの検出に成功し、この手法がグラフェンの赤外光検出手法として優れていることを示し、論文として発表した。さらに波長を広げる手法として、二層および三層グラフェンの赤外光検出に成功した。二層・三層グラフェンは単層グラフェンと異なる波長感度を示すため、異なる検出方法、グラフェンの層数を組み合わせることで幅広い波長の赤外光検出、つまり熱の検出が可能であることを示した。

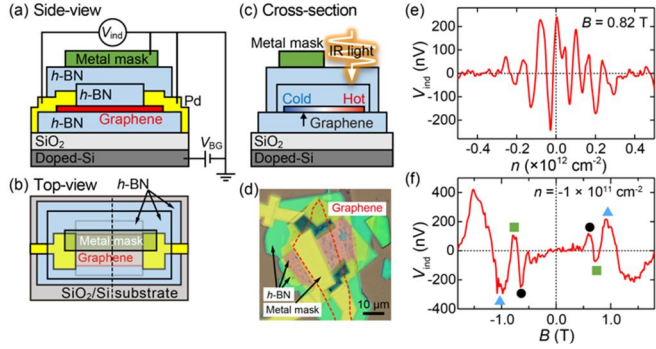


図4：光ネルンスト効果の概要

(計画2) 面内に近接して配置したグラフェンデバイスを用いたグラフェンの熱輻射の検出

素子の概要を図5に示す。同一基板上に2つのグラフェンデバイスを作製し右のグラフェン(Right-Gr)を電流によるジュール熱を利用した熱源、左のグラフェン(Light-Gr)を検出機としてRight-Grの熱輻射の評価を行なった。2つのグラフェン間の距離は10ミクロンとした。初めにLeft-Grの抵抗の温度依存性を測定し(c)、さらにRight-Grに一定の電力の電流を印加した際のLeft-Grの抵抗変化を測定した。まとめて得られたRight-GrとLeft-Grの温度上昇の関係を図6に示す。グラフェン間に十分な熱のやりとりがあることがわかった。グラフェン間の距離を変えた実験なども行い、2つのグラフェン間の熱輸送が主に基板である六方晶窒化ホウ素によるものであると判断した。

一連の実験の途中で、検出器グラフェン側で異常なネルンスト効果の振る舞いを発見した。詳細に調べた結果、グラフェン/窒化ホウ素ヘテロ構造で生じる軌道磁気モーメントの寄与であることを突き止めた。これはグラフェンにおける軌道磁気モーメントの初めての検出例であり、Nature communication という著名な雑誌に論文として掲載された。

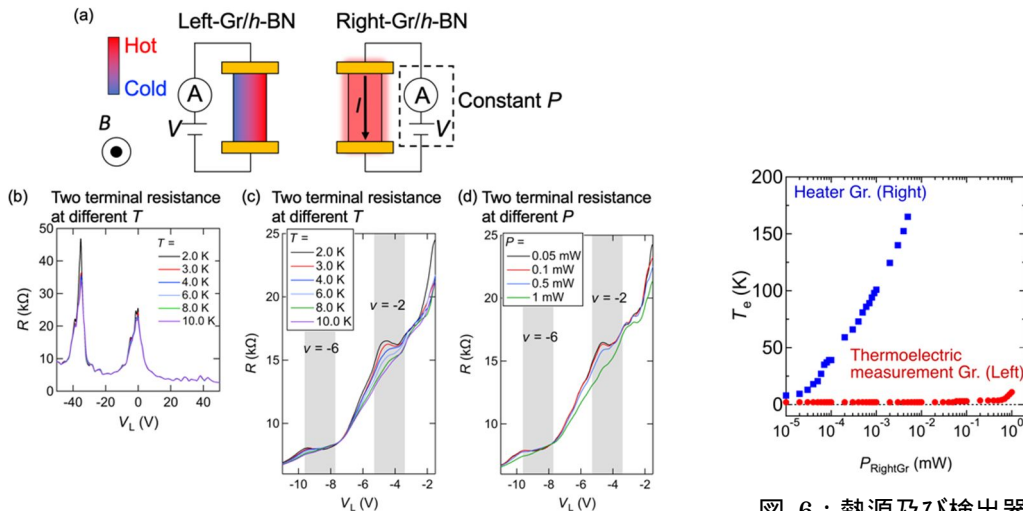


図5：グラフェン熱源の評価素子の構造

図6：熱源及び検出器グラフェンの温度上昇

計画3) ナノ空間におけるグラフェン間の熱エネルギー伝達

研究の最終目標であった、2つのグラフェンデバイスを縦方向に積層し、間を絶縁体である窒化ホウ素で電氣的に隔離したデバイスを作成した。素子の写真を図7に、その構造を図8に示す。上のグラフェン(Top Gr)をジュール熱による熱源、下のグラフェン(Bottom Gr)を計画1で作成したグラフェン光熱電効果検出器とした。Top GrとBottom Grそれぞれの温度上昇とTop Grへ印可した電力の関係を図9に示す。Top Grの温度上昇に伴いBottom Grの温度も上昇する様子がわかり、2つのグラフェン間に熱のやりとりがあることがわかる。窒化ホウ素の膜厚を41nmオーダーまで薄くすることで計画2と比べて格段に大きなグラフェン間の熱輸送を実現することができた。これは熱輻射によるグラフェン間の熱輸送を示唆するものである。

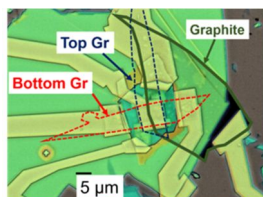


図7: 素子写真

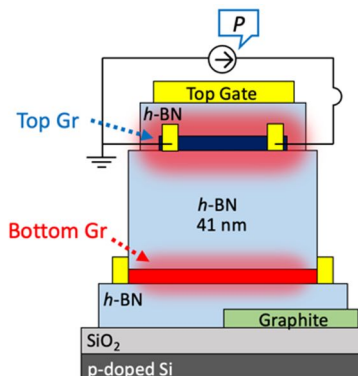


図8: 素子構造

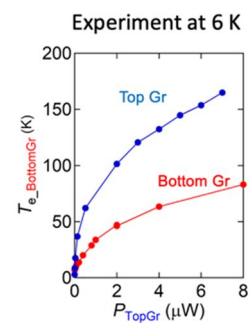


図9: 測定結果

まとめとして、一連の研究によりグラフェンが熱源、熱検出器として非常に優れた特性を示すことが分かった。実験結果はグラフェンの電子系の熱輻射、熱電効果に起因することも分かった。これらはグラフェンの電子系を用いた熱工学の基礎構築につながる成果であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 20件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 K. Takeyama, R. Moriya, S. Okazaki, Y. J. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida	4. 巻 21
2. 論文標題 Resonant tunneling due to van der Waals quantum-well states of few-layer WSe ₂ in WSe ₂ /h-BN/p+-MoS ₂ Junction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3929-3934
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.nanolett.1c00555	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 Y. J. Zhang, R. Taniguchi, S. Masubuchi, R. Moriya, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Sasagawa, T. Machida	4. 巻 120
2. 論文標題 Switchable out-of-plane shift current in ferroelectric two-dimensional material CuInP ₂ S ₆	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 013103-1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0074371	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 R. Moriya, S. Park, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida	4. 巻 104
2. 論文標題 Probing many-body interactions in the cyclotron resonance of h-BN/bilayer graphene/h-BN	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245137-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.245137	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 Yuta Seo, Satoru Masubuchi, Momoko Onodera, Yijin Zhang, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	4. 巻 120
2. 論文標題 Subband-resolved momentum-conserved resonant tunneling in monolayer graphene/h-BN/ABA-trilayer graphene small-twist-angle tunneling device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 083102-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0080215	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 Seo Yuta, Masubuchi Satoru, Watanabe Eisuke, Onodera Momoko, Moriya Rai, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 117
2. 論文標題 Selective etching of hexagonal boron nitride by high-pressure CF4 plasma for individual one-dimensional ohmic contacts to graphene layers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 243101-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0080215	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 Moriya Rai, Kinoshita Kei, Crosse J. A., Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Masubuchi Satoru, Moon Pilkyung, Koshino Mikito, Machida Tomoki	4. 巻 11
2. 論文標題 Emergence of orbital angular moment at van Hove singularity in graphene/h-BN moire superlattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5380-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0022557	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 Onodera Momoko, Isayama Miyako, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Masubuchi Satoru, Moriya Rai, Haga Taishi, Fujimoto Yoshitaka, Saito Susumu, Machida Tomoki	4. 巻 167
2. 論文標題 Carbon annealed HPHT-hexagonal boron nitride: Exploring defect levels using 2D materials combined through van der Waals interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 785 ~ 791
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-19043-x	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 Takeyama Kei, Moriya Rai, Watanabe Kenji, Masubuchi Satoru, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 117
2. 論文標題 Low-temperature p-type ohmic contact to WSe2 using p+-MoS2/WSe2 van der Waals interface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 153101-1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.05.032	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 Onodera Momoko, Kinoshita Kei, Moriya Rai, Masubuchi Satoru, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 20
2. 論文標題 Cyclotron Resonance Study of Monolayer Graphene under Double Moire Potentials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 4566 ~ 4572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0016468	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 Moriya Rai, Yabuki Naoto, Machida Tomoki	4. 巻 101
2. 論文標題 Superconducting proximity effect in a NbSe ₂ /graphene van der Waals junction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054503-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c01427	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 Wakafuji Yusai, Moriya Rai, Masubuchi Satoru, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 20
2. 論文標題 3D Manipulation of 2D Materials Using Microdome Polymer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2486 ~ 2492
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.054503	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 Onodera Momoko, MASUBUCHI Satoru, Moriya Rai, MACHIDA Tomoki	4. 巻 59
2. 論文標題 Assembly of van der Waals heterostructures: exfoliation, searching, and stacking of 2D materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 010101-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b05228	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 Onodera Momoko, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Isayama Miyako, Masubuchi Satoru, Moriya Rai, Machida Tomoki	4. 巻 20
2. 論文標題 Hexagonal Boron Nitride Synthesized at Atmospheric Pressure Using Metal Alloy Solvents: Evaluation as a Substrate for 2D Materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 735 ~ 740
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab5ee0	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 Onodera Momoko, Arai Miho, Masubuchi Satoru, Kinoshita Kei, Moriya Rai, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 19
2. 論文標題 Electrical Control of Cyclotron Resonance in Dual-Gated Trilayer Graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 8097 ~ 8102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b04641	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 Kinoshita Kei, Moriya Rai, Masubuchi Satoru, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 115
2. 論文標題 Photo-Nernst detection of cyclotron resonance in partially irradiated graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 153102-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b03280	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 Onodera Momoko, Kawamura Fumio, Cuong Nguyen Thanh, Watanabe Kenji, Moriya Rai, Masubuchi Satoru, Taniguchi Takashi, Okada Susumu, Machida Tomoki	4. 巻 7
2. 論文標題 Rhenium dinitride: Carrier transport in a novel transition metal dinitride layered crystal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 101103-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5119722	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 Wakafuji Yusai, Moriya Rai, Park Sabin, Kinoshita Kei, Masubuchi Satoru, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 115
2. 論文標題 Detection of cyclotron resonance using photo-induced thermionic emission at graphene/MoS2 van der Waals interface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 143101-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5118713	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 Onodera Momoko, Watanabe Kenji, Isayama Miyako, Arai Miho, Masubuchi Satoru, Moriya Rai, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 19
2. 論文標題 Carbon-Rich Domain in Hexagonal Boron Nitride: Carrier Mobility Degradation and Anomalous Bending of the Landau Fan Diagram in Adjacent Graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7282~7286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5119932	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 Kinoshita Kei, Moriya Rai, Onodera Momoko, Wakafuji Yusai, Masubuchi Satoru, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 3
2. 論文標題 Dry release transfer of graphene and few-layer h-BN by utilizing thermoplasticity of polypropylene carbonate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 npj 2D Materials and Applications	6. 最初と最後の頁 22-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b02879	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 Kinoshita Kei, Moriya Rai, Onodera Momoko, Wakafuji Yusai, Masubuchi Satoru, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 3
2. 論文標題 Dry release transfer of graphene and few-layer h-BN by utilizing thermoplasticity of polypropylene carbonate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 npj 2D Materials and Applications	6. 最初と最後の頁 22-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41699-019-0104-8	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 -

[学会発表] 計46件(うち招待講演 5件/うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Sabin Park
2. 発表標題 Photo-thermoelectric response in Landau-quantized graphene-based van der Waals heterostructures
3. 学会等名 The 9th International Workshop on 2D Materials(A3 foresight program) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K.Kinoshita,R.Moriya,S.Masubuchi,K.Watanabe,T.Taniguchi,T.Machida
2. 発表標題 Detection of cyclotron resonance in graphene using Photo-Seebeck and photo-Nernst effects
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rai Moriya
2. 発表標題 Generation of orbital angular moment at van Hove singularity in rotationally aligned graphene/h-BN moire superlattice
3. 学会等名 5th EU-Japan Workshop on Graphene and Related 2D Materials (EU-JP 2D Workshop2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Onodera, K. Watanabe, S. Masubuchi, R. Moriya, T. Taniguchi, T. Machida
2. 発表標題 Influence of the Carbon-Rich Domain in Hexagonal Boron Nitride Single Crystals on Transport Properties of Adjacent Graphene
3. 学会等名 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2020/2021(NDNC 2020/2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬尾 優太、増淵 覚、守谷 頼、渡邊 賢司、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 Twisted二層グラフェンvdWトンネル素子での電気伝導測定
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬尾 優太、増淵 覚、守谷 頼、渡邊 賢司、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 Twisted二層グラフェン/h-BNモアレ超格子での非局所負抵抗の観測
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小野寺 桃子、瀬尾 優太、増淵 覚、守谷 頼、渡邊 賢司、谷口 尚、越野 幹人、町田 友樹
2. 発表標題 ツイスト積層二層グラフェンにおけるサイクロトロン共鳴吸収の観測
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 守谷 頼、朴 士彬、増淵 覚、渡邊 賢司、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 ランダウ量子化二層グラフェンのサイクロトロン共鳴における多体効果
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sabin Park, Rai Moriya, Yuta Seo, Yijin Zhang, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida
2. 発表標題 Detection of cyclotron resonance using bulk-contacted graphene device
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若藤 祐斉、守谷 頼、小野寺 桃子、増淵 覚、渡辺 賢司、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 家庭用 PVC ラップを用いた二次元層状ヘテロ構造の作製
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Onodera, K. Kinoshita, R. Moriya, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida
2. 発表標題 Cyclotron resonance absorption in monolayer graphene under double moire potentials
3. 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Park, R. Moriya, Y. Seo, Y. J. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida
2. 発表標題 Quantum Hall photo-thermoelectric effect in inner contact graphene device
3. 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR 2021)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 R. Moriya, K. Kinoshita, J. A. Crosse, K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Masubuchi, P. Moon, M. Koshino, T. Machida
2 . 発表標題 Large orbital angular moment at van Hove singularity in graphene/h-BN moire superlattice probed by magneto-thermoelectric measurement
3 . 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR 2021)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Wakafuji, R. Moriya, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida
2 . 発表標題 Transfer method in the liquid phase for two-dimensional materials
3 . 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR 2021)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Machida, K. Takeyama, R. Moriya, Y. J. Zhang, S. Masubuchi, S. Okazaki, T. Sasagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi
2 . 発表標題 Resonant tunneling and negative differential resistance in fewlayer WSe ₂ /h-BN/p ⁺ -MoS ₂ van der Waals junctions
3 . 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR 2021)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Rai Moriya, Kei Kinoshita, J. A. Crosse, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Satoru Masubuchi, Pilkyung Moon, Mikito Koshino, Tomoki Machida
2 . 発表標題 Emergence of orbital moment at van Hove singularity in graphene/h-BN moire superlattice probed by magneto-thermoelectric measurement
3 . 学会等名 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 守谷 頼
2. 発表標題 遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるサブバンド量子化物性
3. 学会等名 令和4年 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会 「固体中のスピン・軌道ダイナミクスとその制御」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田謙、増淵覚、中辻直斗、越野幹人、張奕勤、守谷頼、渡邊賢司、谷口尚、町田友樹
2. 発表標題 ツイスト単層/二層グラフェンにおけるトポロジカルエッジ伝導の観測
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiaohan Yang, Yijin Zhang, Eisuke Watanabe, Satoru Masubuchi, Rai Moriya, Shota Okazaki, Takao Sasagawa, Mina Maruyama, Susumu Okada, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida
2. 発表標題 Anomalous hysteresis in dual-gate h-BN/WTe ₂ /h-BN van der Waals junction devices
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下 圭、守谷 頼、岡崎 尚太、張 奕勤、増淵 覚、渡邊 賢司、谷口 尚、笹川 崇男、町田 友樹
2. 発表標題 4層WSe ₂ /h-BN二重量子井戸における共鳴トンネル効果
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹山 慶、守谷 頼、岡崎 尚太、張 奕勁、増淵 覚、渡邊 賢司、谷口 尚、笹川 崇男、町田 友樹
2. 発表標題 複数層WSe ₂ のサブバンド準位における共鳴トンネル効果の観測
3. 学会等名 2021年第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Park, R. Moriya, Y. Seo, Y. J. Zhang, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida
2. 発表標題 Tunneling photo-thermoelectric effect under cyclotron resonance in graphene-based van der Waals heterojunction
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 木下 圭、守谷 頼、岡崎 尚太、張 奕勁、増淵 覚、渡邊 賢司、谷口 尚、笹川 崇男、町田 友樹
2. 発表標題 4 層 WSe ₂ の伝導帯サブバンドを利用した共鳴トンネル効果
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 Rai Moriya, Kei Takeyama, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida
2. 発表標題 Degenerately doped p+-MoS ₂ as a high work function electrode material in van der Waals heterostructure
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2021) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺桃子, 渡邊賢司, 諫山都子, 増淵覚, 守谷頼, 谷口尚, 町田友樹
2. 発表標題 グラフェンのキャリア輸送特性をプローブとしたh-BN結晶の評価
3. 学会等名 2020年第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 竹山慶, 守谷頼, 増淵覚, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹
2. 発表標題 p+-MoS ₂ /WSe ₂ 接合を用いたWSe ₂ への低温オーミック電極の実現
3. 学会等名 2020年第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 守谷頼, 木下圭, Crosse J. A., 渡邊賢司, 谷口尚, 増淵覚, Moon Pilkyung, 越野幹人, 町田友樹
2. 発表標題 グラフェン/h-BNモアレ超格子における電子の軌道角運動量の観測
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬尾優太, 増淵覚, 渡邊瑛介, 小野寺桃子, 守谷頼, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹
2. 発表標題 高圧CF ₄ プラズマによるh-BNの選択エッチングとグラフェン素子作製
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹山慶, 守谷頼, 岡崎尚太, 張奕勁, 増淵覚, 渡邊賢司, 谷口尚, 笹川崇男, 町田友樹
2. 発表標題 複数層WSe ₂ のサブバンド準位における共鳴トンネル効果の観測
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 若藤祐斉, 守谷頼, 増淵覚, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹
2. 発表標題 液相中における二次元層状物質転写手法の開発
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬尾優太, 増淵覚, 守谷頼, 渡邊賢司, 谷口尚, 越野幹人, 町田友樹
2. 発表標題 Twisted二層グラフェン/h-BN接合における特異な電場スクリーニング
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rai Moriya
2. 発表標題 Emergence of orbital angular moment at van Hove singularity in graphene/h-BN moire superlattice
3. 学会等名 7th International Workshop on 2D Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 守谷 頼
2. 発表標題 グラフェンのバレー依存物性の検出とTMDにおけるファンデルワールス量子井戸の実現
3. 学会等名 令和3年 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会 「固体中のスピン・軌道ダイナミクスとその制御」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 守谷 頼
2. 発表標題 グラフェンのバレー依存物性
3. 学会等名 令和2年 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会 「固体中のスピン・軌道ダイナミクスとその制御」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 守谷 頼
2. 発表標題 New directions in two-dimensional materials
3. 学会等名 第24回半導体におけるスピン工学の基礎と応用研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rai Moriya
2. 発表標題 Magneto-thermoelectric Phenomenon in h-BN Graphene van der Waals Heterostructure
3. 学会等名 APPC2019(14Th ASIA-PACIFIC PHYSICS CONFERENCE)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rai Moriya, Kei Kinoshita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Tomoki Machida
2. 発表標題 Heat Transfer between Graphene Layers in Graphene/h-BN/Graphene van der Waals Heterostructure
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rai Moriya, Kei Kinoshita, Momoko Onodera, Yusai Wakafuji, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Tomoki Machida
2. 発表標題 Dry Release Transfer of Graphene and Few-layer h-BN by utilizing Thermoplasticity of Polypropylene Carbonate for Fabricating van der Waals Heterostructures
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusai Wakafuji, Rai Moriya, Sabin Park, Kei Kinoshita, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Tomoki Machida
2. 発表標題 Cyclotron Resonance-induced Thermionic Emission in Graphene/MoS ₂ van der Waals Schottky Junctions
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Kinoshita, Rai Moriya, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Tomoki Machida
2. 発表標題 Detection of cyclotron resonance in graphene using Photo-Seebeck and photo-Nernst effects
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sabin Park, Rai Moriya, Yusai Wakafuji, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Tomoki Machida
2. 発表標題 Cyclotron Resonance and Landau Level Spectroscopy in Graphene/MoS2 heterostructure
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Momoko Onodera, Miho Arai, Satoru Masubuchi, Kei Kinoshita, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Tomoki Machida
2. 発表標題 Electrical tuning of cyclotron resonance magnetic field in a dual-gated trilayer graphene/h-BN vdW heterostructure
3. 学会等名 The 11th annual Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野寺 桃子、渡邊 賢司、諫山 都、増淵 覚、守谷 頼、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 グラフェン量子輸送特性から見たh-BN結晶中不純物過多領域の影響評価
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 竹山 慶、守谷 頼、増淵 覚、渡邊 賢司、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 p+-MoS2を用いたWSe2へのvdWコンタクト作製
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 若藤 祐斉、守谷 頼、増淵 覚、渡辺 賢司、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 マイクロポリマードームを用いた二次元層状物質の操作
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林田 隼弥、渡邊 賢司、谷口 尚、増淵 覚、守谷 頼、町田 友樹、澤野 憲太郎、星 裕介
2. 発表標題 hBN/1L-WSe ₂ /hBN構造の光取り出し効率の改善
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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