

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01820

研究課題名（和文）Twistedトンネル接合における量子輸送現象

研究課題名（英文）Quantum Transport Phenomena in Twist-Controlled van der Waals Tunnel Junctions

研究代表者

増淵 覚（Masubuchi, Satoru）

東京大学・生産技術研究所・特任准教授

研究者番号：50596195

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）：本研究では、単層グラフェンと結晶方位をずらして重ねたTwistedトンネル接合により、運動量空間において互いのバンド構造がシフトしたトンネル素子を作製し、量子輸送特性測定を行った。互いのバンド構造・フェルミエネルギーが一致した点で生じる共鳴トンネル伝導の観測を通じて、エネルギー（E）・運動量（k）・電子状態密度・ランダウ準位の観点から、種々の原子層物質－三層グラフェン・Twist二層グラフェン・多層遷移金属カルコゲナイドーのバンド構造を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

結晶方位をTwistして積み重ねることが可能な材料には、グラフェン以外にも多様な原子層物質が存在する。これまで原子層物質のバンド構造を決定するために用いられてきた面内輸送特性測定では、フェルミ面近傍の情報しか得られず、角度分解光電子分光では、エネルギー（10 meV）・運動量（0.01 \AA^{-1} ）分解能に限られ、走査型トンネル分光は運動量空間の分解能が無かった。本研究では、単一の固体素子内の電気伝導測定のみによって、エネルギー（1meV）・運動量（0.001 \AA^{-1} ）の両方向で高い分解能が実現する技術を確立した。二次元結晶を舞台とした多様な新奇電子物性探求が可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we fabricated twist-controlled van der Waals tunneling devices with a band structure shift in momentum space. By measuring the resonant tunneling with momentum conservation, we determined the energy (E), momentum (k), electronic density of states of two-dimensional materials; trilayer graphene, twisted bilayer graphene, and multilayer transition metal chalcogenides.

研究分野：原子層科学

キーワード：グラフェン

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

固体材料中において、バンド構造のトポロジーが変化する点では、電子状態密度に van Hove 特異点が形成され、マクロな物性値に離散的な変化が生じる [I. M. Lifshitz, JETP (1960)]。Lifshitz 転移と呼ばれるこの現象は、1960 年に理論的定式化がなされて以来、物性物理学の基礎を成す現象であったものの、実験的には、外場により van Hove 特異点を連続的に制御できる材料が無く、トポロジーの変化に伴う電子状態転移の探索が行えなかった。

三層グラフェンは、線形と放物線型の分散から成る多バンド系である [M. Serbyn, PRB (2013)]。各バンドの電子は層間非対称・対称状態から構成されるため [M. Koshino, PRB (2009)]、面直電場 (D) により電子状態の対称性を崩すと、バンドミキシングの効果により、放物線分散には C_3 回転対称性を有する複数の峰が形成される。それぞれの峰は独立した電子自由度を獲得し、面直磁場によりランダウ準位を形成すると、van Hove 特異点の前後において、各峰に形成されたランダウ準位が分裂する。三層グラフェンは Lifshitz 転移を探求するための理想的な舞台であるが、その各バンドを個別に、かつ運動量を分解しつつ測定する実験手法が無かった。

2. 研究の目的

本研究は、Twist 角を制御した単層グラフェン (MLG) / 六方晶窒化ホウ素 (hBN) / 三層グラフェン (TLG) トンネル接合を用いて、共鳴トンネル伝導測定を通じて三層グラフェンのバンド構造を解明することを目的とする。Twist トンネル接合は、劈開法により単原子層まで薄膜化した原子層物質を、結晶方位角をずらして機械的に貼り合わせた量子構造である。界面における原子拡散が無く、格子整合という制約から解放されるため、既存の結晶成長法では考えられなかった結晶方位角のズレ (θ) という新たな自由度が導入できる。運動量空間において、単層グラフェンと三層グラフェンのバンド構造がずれて重なるため、運動量・エネルギーの両自由度を保存したままトンネルする共鳴トンネル伝導を観測することで、バンド構造が定量的に決定できる。

具体的には、MLG/hBN/TLG トンネル素子を作製し、互いのバンド構造のオフセット (エネルギー: ΔE , 運動量 Δk) を制御しつつトンネル電流を測定することで、三層グラフェンの電子物性値の変化を、エネルギー・運動量・ランダウ準位の観点から定量的に解明する。さらに、本研究で確立する試料作製・データ解析技術を他の材料系へと展開し、強磁性・超伝導・Twisted 二層系など、原子層材料のバンド構造解析への道筋を開く。

3. 研究の方法

ガラス基板への接着性樹脂を用いてスタンプを押すように次々と原子層を積層する技術 (スタンプ法) を用いて MLG/hBN/TLG を積層する。バンド構造のシフト量 (Δk) は θ に対して $\Delta k = \sin(\theta/2)|K|$ となる。 $\theta < 3^\circ$ とすることで、ゲート電圧によりバンドの重なりが制御可能な範囲 ($\Delta E < 100$ meV) に設定した試料を作製する。微細加工技術を用いて、電気伝導測定用電極、トップゲート、バックゲート電極を取り付け、面直電場 (D)・フェルミエネルギー ($\mu_{S,D}$) を制御する。温度可変インサート・超伝導磁石を用いて極低温 ($T \sim 1.7$ K)・強磁場下 ($B = 12$ T) において量子輸送特性を測定する。

4. 研究成果

4-1. 三層グラフェンのバンド構造解明

スタンプ法を用いて TLG と MLG の結晶方位軸のずれ θ が約 1° となる TLG/h-BN/MLG トンネル素子を作製した(図 1(a))。バックゲート電圧 V_{bg} 、TLG/MLG 間の印加電圧を制御しつつトンネル電流を測定したところ、微分トンネル電流に、運動量が保存されたまま電子がトンネルすることによる共鳴トンネルピークが観測された[図 1(b)]。共鳴トンネルピークには MLG・TLG のフェルミエネルギーとバンド構造の相対位置を反映して複数の構造が現れた。単層・二層・三層グラフェンのバンド構造とランダウ準位を強束縛近似により数値計算を行う計算コード [Y. Asakawa, S. Masubuchi et al., PRL 119, 186802 (2017).] に、平行平板キャパシタモデル [TLM. Lane, APL 107, 203506 (2015)] を導入し、共鳴トンネルピーク位置を求めた[図 1(b)]。モデル計算の結果と測定結果の比較を定量的行うことで、三層グラフェンのバンド分散を決定した[図 1(c)]。本研究成果は、次の学術誌に報告した[Y. Seo, S. Masubuchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **120**, 083102 (2022)]。

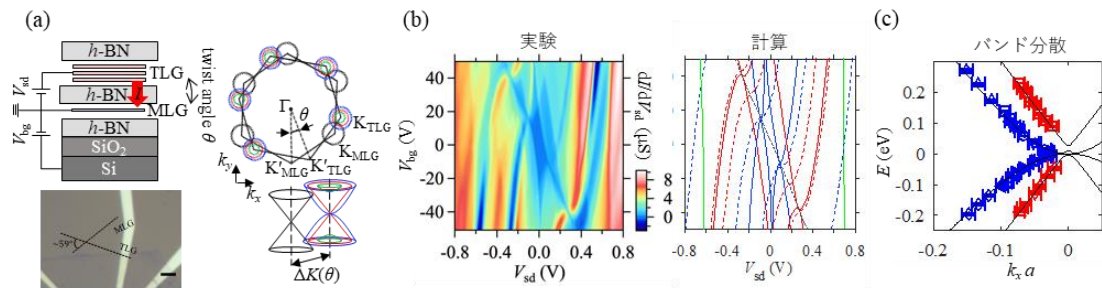


図 1. (a) TLG/hBN/MLG トンネル接合の模式図。(b) 左-三層/一層グラフェントンネル接合における dI/dV_{sd} の V_{bg} , V_{sd} 依存性。共鳴トンネルによるピーク構造が観測されている。右-強束縛近似モデルにより計算した共鳴トンネルピークの位置。各バンド構造を反映したピークが現れている。(c) 実験により求められた三層グラフェンのバンド構造。

4-2. グラフェン・六方晶窒化ホウ素の選択的エッチング

上記研究を進める過程で、CF₄およびO₂プラズマを用いて、六方晶窒化ホウ素 (h-BN) とグラフェンを選択的にエッチングする技術を確認した。プラズマエッチングを行う際に、CF₄ガスの分圧を上げることで、グラフェン/h-BN 間において高いエッチング選択比 (>1000) が得られた。CF₄/O₂をプラズマを交互に焚きつつ、電子線リソグラフィーと蒸着を繰り返すことで、グラフェン端にオーミック電極を形成することに成功した。ゲート絶縁膜として動作する hBN 表面はO₂プラズマ衝撃に晒されるにもかかわらず、その耐電圧性能は衝撃前と比較して低下しないことが特徴である。この試料作製方法によって、グラフェン層に独立に一次元オーミックコンタクトを形成することが可能となり、グラファイトバックゲートを有するホールバー素子・コルビノ・トンネル素子等、幅広い素子構造が実現できるようになった。本研究成果は、次の学術誌に報告した[Y. Seo, S. Masubuchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **117**, 243101 (2020)]。

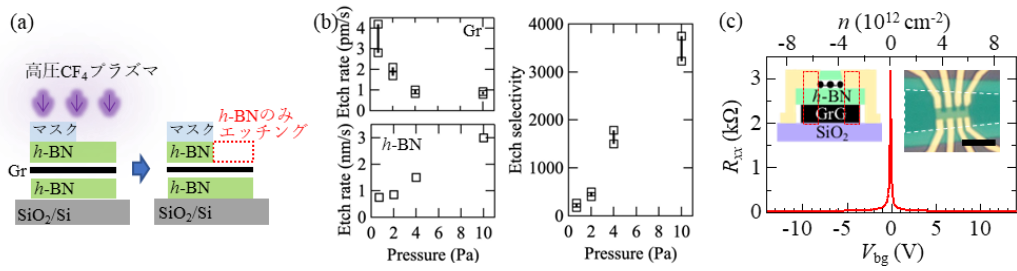


図 2. (a)CF₄ プラズマを用いた選択的エッチングの模式図。(b)エッチング選択比のプラズマ圧力依存性。(c)グラファイトバックゲートを有する二層グラフェン素子。未加工の hBN と同程度のバックゲートの耐電圧 $V_{bg} \sim 14$ Vが実現された。

4-3. Twisted 二層グラフェンファンデルワールストン素子の電子状態密度決定

上記エッチング技術が確立されたことで、1~2 nm の非常に薄い h-BN 上でもプラズマエッチングによるグラフェンの整形が可能になった。金属トップゲート/h-BN/twisted 二層グラフェン(TBG)/thin h-BN/graphite(Gr)/h-BN ファンデルワールストン素子を作製し、TBG/Gr 間のトンネル伝導測定及び TBG の面内方向での電気伝導測定が可能となった。面内伝導測定から TBG のツイスト角度を $\theta \sim 1.0^\circ$ と決定した。トンネル伝導測定(図 1d)では電荷中性点での電子状態密度の減少を反映した dI/dV_{sd} の抑制等、TBG のバンド構造を反映したトンネル伝導が観測された。さらに、h-BN 中の欠陥準位を介したトンネル伝導から TBG の状態密度 (DOS) を決定したところ、TBG の AA 積層・AB/BA 積層・およびドメイン壁部位に対応する 3 種類の DOS が得られた。本結果は、欠陥準位を用いることで、原子層材料の局所バンド構造が決定できることを示したもので、本研究成果は、次の学術誌に報告した[Y. Seo, S. Masubuchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **120**, 203103 (2022)]。

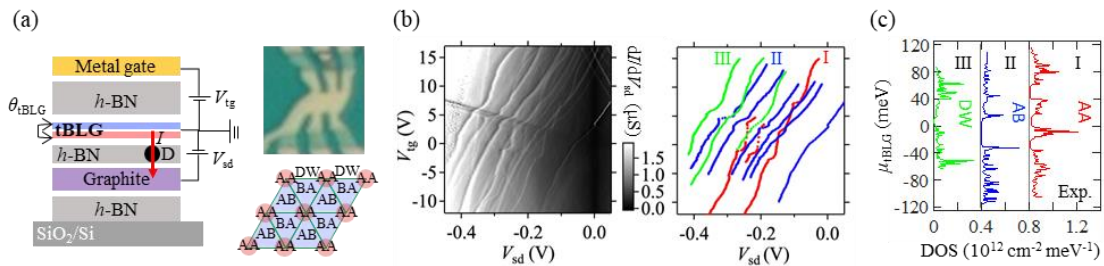


図 3. (a)ツイスト二層グラフェントンネル接合素子の模式図。(b) hBN 中の欠陥準位を介したトンネル伝導。(c) AA 積層・AB/BA 積層・およびドメイン壁の局所電子状態密度。

4-4. 他の原子層物質への展開。

さらに、本研究で開発した試料作製・データ解析基盤をもとに、遷移金属ダイカルコゲナイド系材料のバンド構造観測を行った。従来のトンネルスペクトロスコピーではアクセスできなかった、複数層 WSe₂ のサブバンド構造を解明した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

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 83102
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 Yijin Zhang, Rei Taniguchi, Satoru Masubuchi, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takao Sasagawa, Tomoki Machida	4. 巻 120
2. 論文標題 Switchable out-of-plane shift current in ferroelectric two-dimensional material CuInP2S6	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 13103
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 Kei Takeyama, Rai Moriya, Shota Okazaki, Yijin Zhang, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takao Sasagawa, Tomoki Machida	4. 巻 21
2. 論文標題 Resonant Tunneling Due to van der Waals Quantum-Well States of Few-Layer WSe2 in WSe2/h-BN/p+-MoS2 Junction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 3929
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 Rai Moriya, Sabin Park, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	4. 巻 104
2. 論文標題 Probing many-body interactions in the cyclotron resonance of -BN/bilayer graphene/-BN	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245137
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 増淵 寛、町田 友樹	4. 巻 75
2. 論文標題 複合原子層科学を支えるファンデルワールス接合技術	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 550 ~ 558
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.75.9_550	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 Kuroda Takashi, Hoshi Yusuke, Masubuchi Satoru, Okada Mitsuhiro, Kitaura Ryo, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Machida Tomoki	4. 巻 102
2. 論文標題 Dark-state impact on the exciton recombination of WS2 monolayers as revealed by multi-timescale pump-probe spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.195407	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 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 moiré superlattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-6
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

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) 10.1016/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 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 ~ 153101
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 無
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 Moiré 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) 10.1021/acs.nanolett.0c01427	査読の有無 無
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 ~ 243101
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 Kei Kinoshita, Rai Moriya, Momoko Onodera, Yusai Wakafuji, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	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 1
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 -

1. 著者名 Momoko Onodera, Kenji Watanabe, Miyako Isayama, Miho Arai, Satoru Masubuchi, Rai Moriya, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	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
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 Yusai Wakafuji, Rai Moriya, Sabin Park, Kei Kinoshita, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Mach	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
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 Momoko Onodera, Fumio Kawamura, Nguyen Thanh Cuong, Kenji Watanabe, Rai Moriya, Satoru Masubuchi, Takashi Taniguchi, Susumu Okada, Tomoki Machida	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
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 Kei Kinoshita, Rai Moriya, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	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
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 Momoko Onodera, Miho Arai, Satoru Masubuchi, Kei Kinoshita, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	4. 巻 19
2. 論文標題 Momoko Onodera, Miho Arai, Satoru Masubuchi, Kei Kinoshita, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano letters	6. 最初と最後の頁 8097
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 Momoko Onodera, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Miyako Isayama, Satoru Masubuchi, Rai Moriya, Tomoki Machida	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
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 Momoko Onodera, Satoru Masubuchi, Rai Moriya, Tomoki Machida	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 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 10101
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yusai Wakafuji, Rai Moriya, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	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
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 Satoru Masubuchi, Eisuke Watanabe, Yuta Seo, Shota Okazaki, Takao Sasagawa, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida	4. 巻 4
2. 論文標題 Deep-learning-based image segmentation integrated with optical microscopy for automatically searching for two-dimensional materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 npj 2D Materials and Applications	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41699-020-0137-z	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56件(うち招待講演 6件/うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Huang Xin, Yangyu Guo, Yunhui Wu, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Zhongwei Zhang, Sebastian Volz, Tomoki Machida, Masahiro Nomura
2. 発表標題 Investigation of phonon Poiseuille flow in purified graphite crystals
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 Sabin Park, Rai Moriya, Seo Yuta, Yijin Zhang, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki 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 金田讓, 増淵寛, 中辻直斗, 越野幹人, 張奕勁, 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 一般社団法人 日本物理学会 第77回年次大会(2022年)
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 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 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 のサブバンド単位における共鳴トンネル効果の観測
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 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 /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 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 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 坂野昌人, 田中佑磨, 増淵覚, 岡崎尚太, 野本拓也, 山本崇人, 渡邊賢司, 谷口尚, 有田亮太郎, 笹川崇男, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 ツイスト二層/二層WTe ₂ における電子状態の観測
3. 学会等名 一般社団法人 日本物理学会2021年秋季大会
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 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 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 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 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vdWトンネル素子での電気伝導測定
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 Yusai Wakafuji, Rai Moriya, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki 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 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoki Machida, Kei Takeyama, Rai Moriya, Yijin Zhang, Satoru Masubuchi, Shota Okazaki, Takao Sasagawa, Kenji Watanabe, and Takashi 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 (国際学会)
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, and Tomoki 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 (国際学会)
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, and Tomoki 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 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Momoko Onodera, Kei Kinoshita, Rai Moriya, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Tomoki 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 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 瑛介、増淵 覚、張 奕勁、岡崎 尚太、笹川 崇男、渡邊 賢司、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 単層WTe ₂ の電気伝導における強誘電的ヒステリシス
3. 学会等名 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 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 田中佑磨, 増淵覚, 坂野昌人, 野本拓也, 有田亮太郎, 岡崎尚太, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 武田和太, 大池広志, 賀川史敬, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 原子層1T'-MoTe ₂ における電子状態の観測と層数依存性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
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 第68回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金田謙, 増淵覚, 越野幹人, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹
2. 発表標題 ツイスト二層/二層グラフェンの第二電荷中性点における磁気抵抗振動の電場変調
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021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 第81回応用物理学会秋季学術講演会 2020年
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 第81回応用物理学会秋季学術講演会 2020年
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中佑磨, 増淵覚, 坂野昌人, 大島敦史, 野本拓也, 有田亮太郎, 岡崎尚太, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 原子層WTe ₂ における電子状態の観測と層数依存性,
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 2020年, オンライン開催 (2020).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野寺桃子, 木下圭, 守谷頼, 増淵寛, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹,
2. 発表標題 二重モアレグラフェンにおけるサイクロトロン共鳴吸収,
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会, オンライン開催 (2020).
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中佑磨, 増淵寛, 坂野昌人, 大島敦史, 野本拓也, 有田亮太, 岡崎尚太, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹, 石坂香子,
2. 発表標題 原子層WTe ₂ における層数依存した電子状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会, オンライン開催 (2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Machida, M. Onodera, S. Masubuchi, K. Kinoshita, R. Moriya, K. Watanabe, and T. Taniguchi
2. 発表標題 Mid-infrared photoresponse due to cyclotron resonance absorption in graphene/h-BN van der Waals heterostructures
3. 学会等名 SSDM2020, All-VIRTUAL conference (2020). (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Moriya, K. Takeyama, S. Masubuchi, K. Watanabe, T. Taniguchi, and T. 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 SSDM2020, All-VIRTUAL conference (2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名	S. Masubuchi, E. Watanabe, Y. Seo, M. Onodera, S. Okazaki, T. Sasagawa, K. Watanabe, T. Taniguchi, and T. Machida
2. 発表標題	Deep-learning-assisted robotic assembly of van der Waals superlattices
3. 学会等名	SSDM2020, All-VIRTUAL conference (2020) (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	M. Onodera, K. Watanabe, M. Isayama, S. Masubuchi, R. Moriya, T. Taniguchi, and T. Machida
2. 発表標題	Evaluation of hexagonal boron nitride crystals in terms of an insulating building block of van der Waals heterostructures
3. 学会等名	SSDM2020, All-VIRTUAL conference (2020) (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	Satoru Masubuchi
2. 発表標題	Robotic assembly of two-dimensional crystals to build van der Waals superlattices
3. 学会等名	2021 International Meeting on Thin Film Interfaces and Composite Crystals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	増淵寛, 町田友樹
2. 発表標題	深層学習を活用したファンデルワールス超格子の自動作製
3. 学会等名	第39回電子材料シンポジウム (招待講演)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 S. Masubuchi
2. 発表標題 Robotic searching and assembly of two-dimensional crystals to build van der Waals superlattices
3. 学会等名 MRS Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
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1,5
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 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CF4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 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 奕勳、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WSe2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 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 増淵寛
2. 発表標題 二次元層状物質の自動劈開・探索・積層によるファンデルワールス超格子の作製
3. 学会等名 2019年度夏学期 駒場 物性セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoru Masubuchi
2. 発表標題 Machine-learning autonomous robotic searching and assembly of two-dimensional crystals to build van der Waals superlattices
3. 学会等名 RPGR2019 (Recent Progress of Graphene and 2D materials 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 増淵寛
2. 発表標題 ファンデルワールス超格子の自動作製：ロボットによる二次元層状物質の劈開・探索・積層
3. 学会等名 産業科学ナノテクノロジーセンター若手セミナー、「物質科学と機械学習」（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Momoko Onodera, Miho Arai, Satoru Masubuchi, Kei Kinoshita, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida
2. 発表標題 Cyclotron resonance absorption in trilayer graphene
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 [CSW2019] (国際学会)
4. 発表年 2019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 ～うごかす、はがす、おりたたむ～ ”
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 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 渡邊 瑛介、増淵 覚、張 奕勳、岡崎 尚太、笹川 崇男、渡邊 賢司、谷口 尚、町田 友樹
2. 発表標題 WTe2ファンデルワールスヘテロ接合素子における量子輸送特性
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 田中佑磨, 増淵寛, 坂野昌人, 大島敦, 岡崎尚太, 笹川崇男, 渡邊賢司, 谷口尚, 町田友樹, 石坂香子
2. 発表標題 原子層WTe ₂ のフレーク試料作製とARPESによるバンド構造の観測
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuta Seo, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Tomoki Machida
2. 発表標題 Subband-resolved resonant tunneling in trilayer graphene/h-BN/graphene van der Waals heterostructures
3. 学会等名 Graphene Week 2019 (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 RPGR2019 (Recent Progress of Graphene and 2D materials 2019) (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 RPGR2019 (Recent Progress of Graphene and 2D materials 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Momoko Onodera, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Satoru Masubuchi, Tomoki Machida
2. 発表標題 Transport properties of graphene on h-BN grown with an alloy solvent at atmospheric pressure
3. 学会等名 RPGR2019 (Recent Progress of Graphene and 2D materials 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Seo, Satoru Masubuchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida
2. 発表標題 Subband-resolved resonant tunneling in trilayer graphene/h-BN/graphene heterostructures
3. 学会等名 RPGR2019 (Recent Progress of Graphene and 2D materials 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Momoko Onodera, Kenji Watanabe, Miyako Isayama, Miho Arai, Satoru Masubuchi, Takashi Taniguchi, Tomoki Machida
2. 発表標題 Influence of C-rich domain in h-BN on the carrier transport in graphene/h-BN van der Waals heterostructures
3. 学会等名 RPGR2019 (Recent Progress of Graphene and 2D materials 2019) (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 RPGR2019 (Recent Progress of Graphene and 2D materials 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Momoko Onodera, Kenji Watanabe, Miyako Isayama, Satoru Masubuchi, Rai Moriya, Takashi Taniguchi, and Tomoki Machida
2. 発表標題 Influence of the carbon-rich domain in hexagonal boron nitride on transport properties of adjacent graphene
3. 学会等名 第58回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム (FNTG学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 吾郷浩樹、齋藤理一郎	4. 発行年 2020年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 558
3. 書名 グラフェンから広がる二次元物質の新技术と応用 ~世界の動向、CVD合成、転写積層、量子物性、センサ・デバイス、THz応用~	

〔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
---------	---------