

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01812

研究課題名(和文) グラフェン量子閉じ込め構造で発現されるバレースピン偏極電流の観測と制御

研究課題名(英文) Observation and control of valley-spin-polarized current at quantum confinement structures in graphene

研究代表者

青木 伸之 (Aoki, Nobuyuki)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60312930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、六方晶窒化ホウ素(h-BN)と二層グラフェン(BLGr)で構成されるh-BN/BLGr/h-BN積層構造による高移動度化、およびスプリット型トップゲートとボトムバックゲートのデュアルゲート構造による電界閉じ込め型の量子ポイントコンタクト(QPC)構造を形成した。この積層構造に対してエッジコンタクトを実現した。このように形成したBLGr-QPC構造では、 $2e^2/h$ を単位とするバレー偏極した量子化伝導度の観測に至った。また3層WSe2をチャンネルとしたp型QPC構造を世界で初めて作製に成功し、ゼロ磁場で e^2/h を単位とするバレーとスピンの両方の縮退が解けた伝導現象の観測に至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、トポロジカル現象への注目が高くなってきている中で、電荷・スピンに次ぐ自由度としてバレーの効果を利用したバレーとロニクスが注目されている。円偏光の光照射を、垂直電場の印加によりK点とK'点のバレーの対称性を意図的に崩すことで幾何学的位相(ベリー位相)に差が生じ、結果的に試料内部に内部磁場が発生し、これがホール効果に類似したバレーホール効果として観測されてきている。本研究では、スプリットゲート構造という電気的な制御法によりバレー偏極のみならずスピンまで偏極した電流を実現したことから、新たなスピントロニクス/バレートロニクスの実現に役立つ成果といえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a high mobility bi-layer graphene (BLGr) laminated by hexagonal boron-nitride (h-BN) was used for a study of quantum point contact (QPC) which is electro-statically confined one-dimensional (1-d) channel with a dual gate structure. In the QPC structure formed by BLGr, a valley-polarized quantization in units of $2e^2$ divided by h has been observed, which suggests a valley polarized transport by the 1-d confinement. In addition, in the QPC structure with the 3-layer WSe2 as the channel, we have observed the quantized conductance steps with the units of e^2 divided by h , which suggest both valley and spin polarized transport at zero-magnetic field condition.

研究分野：半導体物性

キーワード：量子ポイントコンタクト、二層グラフェン、量子化伝導度、遷移金属ダイカルコゲナイド、WSe2、バレー偏極、スピン偏極、スピン・軌道相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、トポロジカル現象への注目が高くなってきている中で、電荷・スピンの自由度としてバレーの効果を利用したバレーとロニクスが注目されている。円偏光の光照射を、垂直電場の印加により K 点と K' 点のバレーの対称性を意図的に崩すことで幾何学的位相（ベリー位相）に差が生じ、結果的に試料内部に内部磁場が発生し、これがホール効果に類似したバレーホール効果として観測されてきている。スピンホール効果と同様にバレーホール効果も電荷の流れを伴わないため、電気伝導特性として直接に観測できないのが原則といわれている。その観測には逆バレーホール効果を利用した電圧への変換が必要であり、東大・樽茶らのグループでは非局所抵抗の観測によってバレー流の存在を観測したと報告している。しかしながら、我々が注目する六方晶窒化ホウ素 (h -BN) で挟まれた 2 層グラフェン (BLGr) に対して上下からの垂直電場の印加により形成される量子ポイントコンタクト (QPC) では、 $2e^2/h$ での量子化現象が観測されてきており、バレー偏極された電流の実現が示唆されている。バレースピン偏極現象はこれまで MoS_2 等の遷移金属ダイカルコゲナイド (TMDC) での円偏光照射や、BLGr の非局所抵抗によって観測されてきているが、QPC を使った方法はその作製の難しさから未だ研究例がほとんどなく、その利用についてもこれからの課題といえる。

一方で、走査ゲート顕微法 (SGM) を低温環境で実現したのは、我々のグループを含めて世界で数グループしかなく、先端的なイメージング手法である。BLGr-QPC からバリスティックに放出されるバレー偏極電流のイメージングは、我々が世界で初めて行うチャンスがあることから意義が高く、早急に着手することが望まれる。しかしながら、SGM は基本的に電荷の流れを捉えるイメージング手法であり、この電流がバレースピン偏極しているかの判断はできない。そこで研究分担者の音が有する顕微 Kerr 効果を相補的に用いることで、電荷を伴ったバレースピン流の存在が初めて立証可能となることから意義が高い。

さらに、これまで報告されているグラフェンにおける磁場による電子フォーカシング実験では、従来の高移動度半導体基板に比べると反射率が非常に悪く、ピークが不明瞭であった。この原因の一つは、酸素プラズマエッチングで形成されたホールバーを利用しているため、試料端部での反射特性が悪いこと、従来のような QPC が使われていないためにコリメーションが不十分なことが挙げられる。本研究では電界で空乏化された反射面と、出入口の QPC 構造の組み合わせにより、明瞭な電子フォーカシングピークの観測を期待している。これにより、前述の時間反転対称性の破れによるバレー・スピン分離が実空間でどのように観測されるかが非常に興味もたれる。また、BLGr で SGM を行うと、探針直下には量子ドットを形成することが可能になり、これまでの研究よりも明瞭な SGM 像が観測される可能性も期待される。

2. 研究の目的

BLGr に垂直電場を印加してバンドギャップを形成することで電界閉じ込め量子構造を実現し、バレースピンの依存した量子伝導現象の観測と理解を目的とする。 h -BN を用いた高移動度化と、バックゲートとスプリット型トップゲートによって形成される QPC 構造では、その内部も反転対称性が破れていることが期待される。本研究では、BLGr に QPC 構造を形成し、量子化伝導度の観測を通して、バレー・スピン偏極状態の実現と観測を目指す。その手法としては、これまで研究代表者と分担者が確立してきた、電荷の流れを捉える「走査ゲート顕微法」とスピンの偏極を捉える「局所 Kerr 効果観察」といった局所プロービング技術を相補的に用いることで、バレー偏極された電流の直接観測を実現し、バレーとロニクス応用に向けた新展開を促す。また、近年高品質化が進んでいる TMDC にも注目し、スピン軌道相互作用の強い TMDC で作製した QPC と BLGr で作製した QPC の動作特性がどのように異なるのかについても調査していく。

3. 研究の方法

本研究では、 h -BN/BLGr/ h -BN 積層構造によって高移動度を実現し、スプリット型トップゲートとボトムバックゲートのデュアルゲート構造により QPC 構造を形成し、そこで生じるバレー偏極電流の生成と観測をめざした。その実現には上記積層構造に対して側面から BLGr に対して電気的なコンタクトを取るエッジコンタクトの実現が必須であることからエッジコンタクト技術の確立に取り組んだ。また、バレー偏極電流の観測には SGM や局所 Kerr 効果観察技術が有効と考えられるが、どのような形で適用できるのかについて検証を進めた。また、TMDC の QPC の実現には TMDC に対するオーミック接触の実現が必要であり、様々な方法の検討を行うと共に、すでに他グループで先行して報告されている MoS_2 を使用した QPC の研究との差別化、更には層数やスピン軌道相互作用の強さなどにも注目して材料の選定から進めた。

4. 研究成果

(1) エッジコンタクト技術の確立 (初年度～2年目)

量子ポイントコンタクト (QPC) 構造の実現に不可欠な高移動度化を目的とし、 h -BN/BLGr/ h -

BNの3層スタック構造に対するエッジコンタクト技術の確立を目指して研究を進めた。研究室に既存の高周波プラズマ発生装置に対して、 CHF_3/O_2 ガスを導入し、電子線描画によってパターンニングしたPMMAをマスクとした反応性イオンエッチングができるように改良を行った。圧力と流量を様々な条件で調整し、 $h\text{-BN}$ と SiO_2 のエッチングレートを出し、接触抵抗値の低減を目指した。その結果、室温で $3000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の移動度と、最小の接触抵抗率としては $400\ \Omega\mu\text{m}$ が得られたが、時としてコンタクトが取れないこともあり、不安定性を残す結果となった。その原因としては、PMMAレジストの残渣による汚染や、プラズマエッチング時の副生成物が取り切れていないことが挙げられる。これに対しては、ガスの供給経路やシャワー構造の見直しや、エッチング時のガス圧の調整を試み、改善を図った。とくに、プラズマエッチング中の温度上昇の問題に着目し、試料とステージの間に高温対応の真空グリースを付けて熱接触を取ることで温度上昇を抑えることが可能になり、これによりエッチングレートや歩留まりが格段に上昇した。以上より、エッジコンタクト技術の確立に至った。

(2) BLGr-QPCにおける量子化伝導度の観測 (初年度～2年目)

2層グラフェンにおけるQPC構造については、本研究の開始時には研究室での実働素子の作製が困難であったため、共同研究をしている韓国・成均館大学のキムギルホ教授の研究室に学生と共に滞在し、プロセス技術の調査と習得、およびQPC試料の作製を行った。図1に示すように、 $h\text{-BN}/\text{BLGr}/h\text{-BN}$ の3層スタック構造に対してホールパー形状にプラズマエッチングを行い、エッジコンタクト技術によって電極を取り付けた。さらに、試料を千葉大に持ち帰り、電子線描画によってゲート間隔約 100 nm のスプリットゲート構造を取り付けた。その際、テーパ部分以外のスプリットゲートの長さを $1\ \mu\text{m}$ に取った。これにより、ゲート直下に存在するバブルの大きさよりの長くすることで、バブルによって絶縁化が取れなくなってしまう問題を回避することが可能となった。

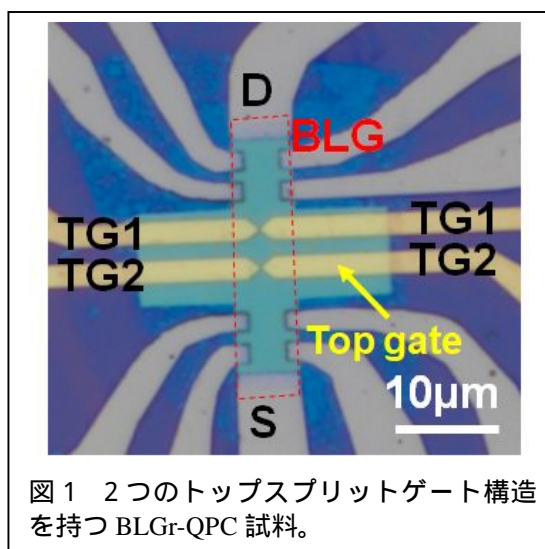


図1 2つのトップスプリットゲート構造を持つBLGr-QPC試料。

この試料に対して、 0.3 K での磁気輸送特性の観測を行った。Siバックゲート (V_{BG}) に -80 V の電圧を印加し、スプリットゲートに正の電圧 (V_{SG}) を印加していき、伝導度が徐々に減少していき、 9.2 V で極小値を取ってその後伝導度が上昇する結果が得られた。このとき、 $V_{\text{SG}} = 7\text{ V} \sim 9.2\text{ V}$ の範囲では階段状の伝導度の変化が観測され、 $2e^2/h$ を単位とした伝導度の量子化現象の観測に成功した。しかし、その試料ではチャンネルが完全にピンチオフされる前にゲート下の伝導が回復してしまい、ピンチオフさせることができなかった。その際の伝導度の最小値は $2.7 \times 2e^2/h$ であった (図2)。これはスプリットゲート間隔が 100 nm であったため、細線中央部の垂直電場が十分でないことが考えられ、電界シミュレーションを行った結果、幅 50 nm 程度のスプリットゲートの作製が必要であることが分かった。また、 9 T の垂直磁場を印加すると、これらの階段の高さが半分の e^2/h に変化することが観測され、ゼーマン分裂が生じていることが確認された。これらの結果から、スプリットゲート電圧を掃引することは、ゲート間隔を電界効果によって狭めることに加えて、1次元チャンネルのポテンシャルを上げる(チャンネル領域のフェルミエネルギーを下げる)ことに対応するが、BLGr-QPCでは4重縮退したバレーがスプリットゲートで 100 nm 程度に狭窄されることで、ゼロ磁場でバレー縮退に分裂を生じ、さらに高磁場ではスピン縮退の分裂が生じていると考えられる。また、スプリットゲートをBLGr層の下側に入れて、バックゲートによってスプリットゲート間の垂直電場を補強した構造も行ったが、結果としては伝導度の量子化現象は同様に $2e^2/h$ を単位として観測された。以上より、BLGr-QPCでは1次元狭窄化することでバレー偏極電流が生成されていると結論付けた。

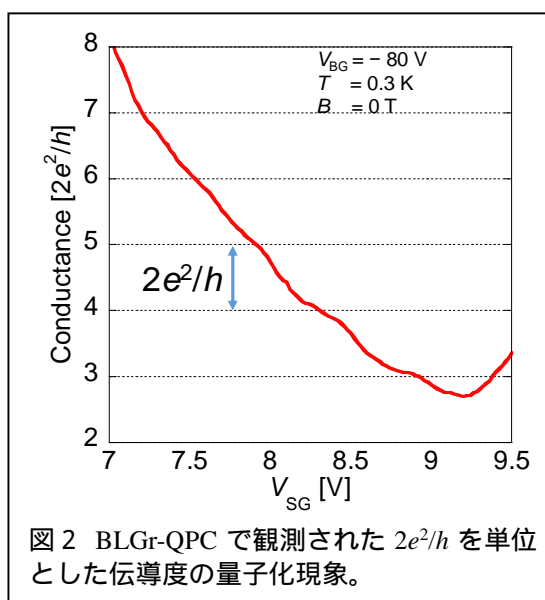


図2 BLGr-QPCで観測された $2e^2/h$ を単位とした伝導度の量子化現象。

(3) WSe₂-QPC の作製と低温磁気輸送現象の観測 (3 年目 ~ 4 年目)

遷移金属ダイカルコゲナイド (TMCD) の一種である WSe₂ における QPC の動作特性を評価するため、3 層 WSe₂ を用いた QPC 素子の作製に取り組んだ。WSe₂ のバンド構造を考慮して p 型での動作を目指し、Nb ドープ多層 p⁺-MoS₂ をコンタクト材料に用いることでホール注入障壁を下げ、更に h-BN によるカプセル化をすることで量子化伝導度の観測に必要な高移動度化を図るなど、様々な工夫を取り入れて試料の作製に取り組んだ。

その結果、3 層 WSe₂-QPC において極低温にて e^2/h を単位とした伝導度の量子化現象を観測するに至った (図 3)。またバイアス電圧依存特性では、ゼロ磁場スピン分裂を示唆するプラトーおよびゼロバイアス異常を観測するに至った。これらの結果から、WSe₂-QPC では 1 次元狭窄化することでバレーおよびスピンの両方の縮退が解けた状況にあり、スピン偏極電流の生成が可能であるという結果が得られた。このように、世界で初めて p 型で動作する TMDC-QPC の量子伝導特性評価に成功した。これらの結果をまとめ、American Chemical Society の Nano Letters 誌に投稿して掲載が決定した。本研究は、2 次元物質における QPC における量子伝導現象の研究を切り拓き、当該分野における顕著な研究成果と共に高い評価を得たと考える。

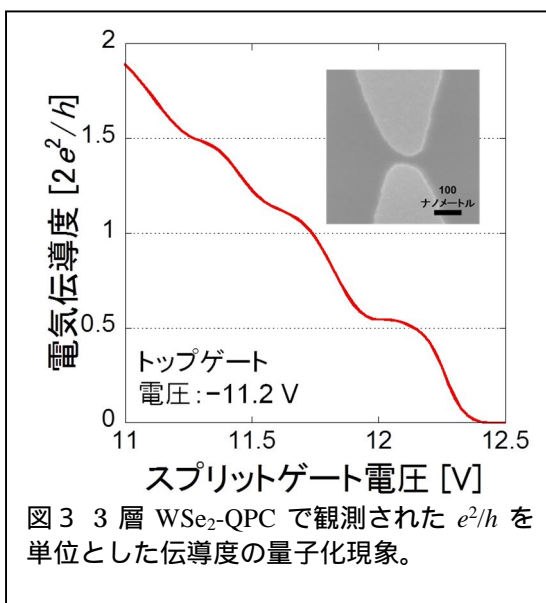


図 3 3 層 WSe₂-QPC で観測された e^2/h を単位とした伝導度の量子化現象。

(4) その他の取り組み

A. ツイスト構造を利用した量子閉じ込め構造の作製

1 枚の単層グラフェンを半分に切って、所定の角度を付けて重ねたツイスト型 2 層グラフェン (TwBLGr) の研究にも取り組んだ。ツイスト角度を調節することでモアレ長周期構造が発現し、1.08° 付近では超伝導現象や Mott 絶縁体的現象も観測されるのに加え、超格子ギャップなど、通常のグラフェンでは想像がつかない新奇な現象の発現が報告されている。とくに、超格子ギャップの存在は、本研究における QPC 構造の形成にも役立つのに加え、ツイスト系における伝導度の量子化現象がどのように表れるかの興味が持たれたことから当研究室でも TwBLGr の研究に取り組んだ。図 4 は、1.25° で積層した TwBLGr の 2 K でのゲート電圧特性であるが、± 12 V 付近に抵抗値の大幅な上昇が見られ、この付近でフェルミレベルが超格子ギャップに入っていると考えられる。しかし、その抵抗値は最大で 40 kΩ 程度で、またスパイク状に現れていることがわかる。この原因は、ツイスト試料の中の不均一性に起因していると考えられ、バブルの存在によるツイスト構造の乱れが主な原因と考えられる。このように、いくつかの TwBLGr 試料を作製してきたものの、完全に絶縁状態を取ることができた試料はついに作製できなかった。超格子ギャップを利用した量子閉じ込め構造の形成は、ツイスト角度の均一性やバブルフリー積層の問題の解決が必要との結論に至った。

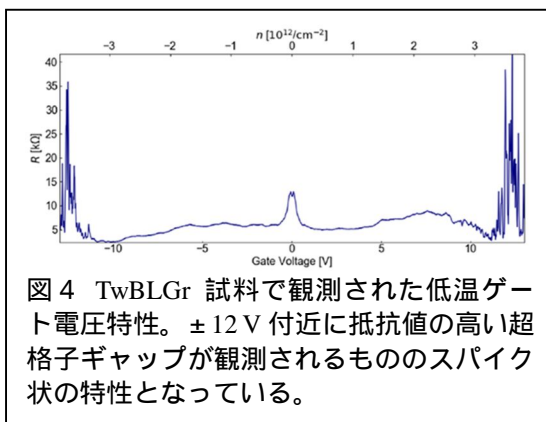


図 4 TwBLGr 試料で観測された低温ゲート電圧特性。± 12 V 付近に抵抗値の高い超格子ギャップが観測されるもののスパイク状の特性となっている。

B. 銀ナノワイヤーをシャドーマスクに用いたグラフェンナノリボンの作製

グラフェンを sub-100nm の幅に切り出したグラフェンナノリボン (GNR) は、本来のグラフェンに存在しないエネルギーギャップを発現させられるため半導体デバイスに向けた工業的応用が期待されている。GNR のトップダウン法による作製方法は電子線リソグラフィ法や触媒エッチング法などがあるが、エッジ形状が均一に定まらないという問題がある。そこで、我々は表面が極めて滑らかな銀ナノワ

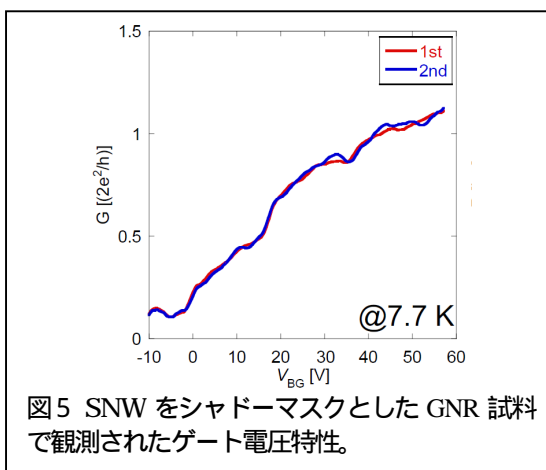


図 5 SNW をシャドーマスクとした GNR 試料で観測されたゲート電圧特性。

イヤー (SNW)をグラフェンのエッチングシャドーマスクに用いること、でエッジ形状が均一な GNR の作製を目指した。作製した単層グラフェン (MLGr) の h -BN/MLGr/ h -BN の 3 層スタック構造試料の移動度は最大で $1.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ となっており、GNR 領域のチャンネル長 500 nm と比較すると伝導がバリスティックな状態であると考えられる。また、原子オーダーで均一な直径約 30 nm の銀ナノワイヤーマスクを用いたエッチングでは得られた GNR も同様に原子オーダーで均一なエッジを有すると期待したが、図 5 に示すようにゲート電圧の印可に対して伝導度のゆらぎが観測されたことから、不均一性の存在が示唆される結果となった。それでも最小伝導度は $0.1 \times 2e^2/h$ となっており、またステップ上の伝導度の変化も観測された。

C. スピン偏極電流の SGM および顕微 Kerr 効果による観察の検討

BLGr-QPC から放出されるバレー偏極電流がどのように伝搬するかについては、SGM や局所 Kerr 効果観察技術が有効と考えられ、当初はこれらの観測を検討していた。しかし、BLGr におけるバレー流の観測には垂直電場が印加されて反転対称性の破れた状態が必要となり、それには試料全体に電場を印加するためのゲート構造が必要となる。しかし、SGM 観察でも顕微 Kerr 効果観察においても全面を覆うグローバルな金属ゲート構造の下を観察することはできず、トップゲートが必要のない材料系での QPC の実現が必要であることが分かった。そのため、上記の TMDC をチャンネルとした QPC 構造の作製に取り組み、バレーおよびスピンの偏極現象の観測まではできたものの、研究期間内に SGM 観察までには至ることはできなかった。この観測は、次の研究における継続課題としたい。

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 12件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 N. Arabchigavkani, R. Somphonsane, H. Ramamoorthy, G. He, J. Nathawat, S. Yin, B. Barut, K. He, M. D. Randle, R. Dixit, K. Sakanashi, N. Aoki, K. Zhang, L. Wang, W.-N. Mei, P. A. Dowben, J. Fransson, and J. P. Bird	4. 巻 126
2. 論文標題 Remote Mesoscopic Signatures of Induced Magnetic Texture in Graphene	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 086802-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.086802	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 Chiashain Chuang, Masahiro Matsunaga, Tian-Hsin Wang, Prathik Roy, Rini Ravindranath, Meenakshi Ananthula and Nobuyuki Aoki	4. 巻 32
2. 論文標題 Investigation of plant leaf-derived graphene quantum dot clusters via magnetic force microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 245704-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/abeadb	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 Chuang Chiashain, Mineharu Masaaki, Matsunaga Masahiro, Liu Chieh-Wen, Wu Bi-Yi, Kim Gil-Ho, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Liang Chi-Te, Aoki Nobuyuki	4. 巻 154
2. 論文標題 Conductance interference effects in an electron-beam-resist-free chemical vapor deposition graphene device sandwiched between two h-BN sheets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 238 ~ 243
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2019.07.057	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 Kohei Sakanashi, Hidemitsu Ouchi, Kota Kamiya, Peter Kruger, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu, Keiji Ueno, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Jonathan P. Bird, and Nobuyuki Aoki	4. 巻 31
2. 論文標題 Investigation of laser-induced-metal phase of MoTe2 and its contact property via scanning gate microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 205205-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/ab71b8	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 C. Chuang, M. Mineharu, N. Matsumoto, M. Matsunaga, C.-W. Liu, B.-Y. Wu, Gil-Ho Kim, L.-H. Lin, Y. Ochiai, K. Watanabe, T. Taniguchi, C.-T. Liang and N. Aoki	4. 巻 2018
2. 論文標題 Hot carriers in CVD-grown graphene device with a top h-BN layer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2018/5174103	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 Chiashain Chuang, C.-T. Liang, Gil-Ho Kim, R.E. Elmquist, Y. Yang, Y.P. Hsieh, Dinesh K. Patel, K. Watanabe, T. Taniguchi, and N. Aoki	4. 巻 136
2. 論文標題 Large, non-saturating magnetoresistance in single layer chemical vapor deposition graphene with an h-BN capping layer	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 211-216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2018.04.067	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 J. Nathawat, M. Zhao, C.-P. Kwan, S. Yin, N. Arabchigavkani, M. Randle, H. Ramamoorthy, G. He, R. Somphonsane, N. Matsumoto, K. Sakanashi, M. Kida, N. Aoki, Z. Jin, Y. Kim, G.-H. Kim, K. Watanabe, T. Taniguchi, J. P Bird	4. 巻 4
2. 論文標題 Transient Response of h-BN-Encapsulated Graphene Transistors: Signatures of Self-Heating and Hot-Carrier Trapping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 4082-4090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.8b03259	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 Yuto Kajino, Kohei Sakanashi, Nobuyuki Aoki, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kenichi Oto, and Yasuhiro Yamada	4. 巻 103
2. 論文標題 Quantized exciton-exciton annihilation in monolayer on substrate with atomically flat terraces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L241410-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L241410	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 Kohei Sakanashi, Naoto Wada, Kentaro Murase, Kenichi Oto, Gil-Ho Kim, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Jonathan P. Bird, David K. Ferry, Nobuyuki Aoki	4. 巻 118
2. 論文標題 Valley polarized conductance quantization in bilayer graphene narrow quantum point contact	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 263102-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0052845	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 Vilas Patil, Jihyun Kim, Khushabu Agrawal, Tuson Park, Junsin Yi, Nobuyuki Aoki, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Gil-Ho Kim	4. 巻 32
2. 論文標題 High mobility field-effect transistors based on MoS2 crystals grown by the flux method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 325603-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/abf6f1	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 Kohei Sakanashi, Peter Kruger, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Gil-Ho Kim, David K. Ferry, Jonathan P. Bird, and Nobuyuki Aoki	4. 巻 21
2. 論文標題 Signature of spin-resolved quantum point contact in p-type trilayer WSe2 van der Waals heterostructure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 7534-7541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c01828	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 Nhat Anh Nguyen Phan, Hamin Noh, Jihoon Kim, Yewon Kim, Hanul Kim, Dongmok Whang, Nobuyuki Aoki, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Gil-Ho Kim	4. 巻 2022
2. 論文標題 Enhanced Performance of WS2 Field-Effect Transistor through Mono and Bilayer h-BN Tunneling Contacts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nano Micro Small	6. 最初と最後の頁 2105753-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/smll.202105753	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

〔学会発表〕 計49件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 18件）

1. 発表者名 青木伸之, 村瀬健太郎, 坂梨昂平, 紙田祐吉, G.-H.キム, 渡邊賢司, 谷口尚, J.P.バード, D.K.フェリー
2. 発表標題 第3のゲート構造を有する2層グラフェン量子ポイントコンタクトの作製と特性評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂梨昂平, X. Chen, 和田直人, D. K. Ferry, J. P. Bird, G-h. Kim, 渡邊賢司, 谷口尚, L. Huang, 青木伸之
2. 発表標題 グラフェンパリスティック開放系量子ドットにおける量子伝導現象
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤雄一朗, 坂梨昂平, 青木伸之, Peter Kruger
2. 発表標題 MoTe2に高強度レーザー照射した時の構造に関する理論研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福島 僚, 坂梨 昂平, 和田 直人, 渡邊 賢司, 谷口 尚, Gil-Ho Kim, バード ジョナサン, 青木 伸之
2. 発表標題 量子デバイス応用に向けたツイスト型2層グラフェンの作製と特性評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂梨 昂平, 和田 直人, キム ギルホ, パード ジョナサン, フェリー デイビッド, 渡邊 賢司, 谷口 尚, 青木 伸之
2. 発表標題 単層グラフェンにおける開放系量子ドットの輸送特性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 謝 天順, 大内 秀益, 坂梨 昂平, 上野 啓司, 青木 伸之
2. 発表標題 低バリアの実現に向けた1T'-MoTe2と2H-MoTe2のコンタクト特性の評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池田 駿太郎, 大内 秀益, 坂梨 昂平, クリュウガー ピーター, 渡邊 賢司, 谷口 尚, パード ジョナサン, 青木 伸之
2. 発表標題 hBNをゲート絶縁膜としたTMD-TFETの高性能化に関する研究
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐々木 遥晃, 池田 駿太郎, 宮本 克彦, 尾松 孝茂, 青木 伸之
2. 発表標題 OVLIFT法で転写したグラフェンインクの物性評価
3. 学会等名 第30回日本MRS年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 紙田祐吉, 坂梨昂平, 紙田祐吉, G.-H.Kim, 渡邊賢司, 谷口尚, J.P.バード, D.K.フェリー, 青木伸之
2. 発表標題 強誘電物質でアシストされた2層グラフェン量子ポイントコンタクトの輸送特性
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 謝 天順, 池田 駿太郎, 坂梨 昂平, 上野 啓司, 青木 伸之
2. 発表標題 真空中でレーザー照射により得られた1T-MoTe2と2H-MoTe2のコンタクト特性の評価
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 坂梨 昂平, クリュウガー ピーター, バード ジョナサン, 渡邊 賢司, 谷口 尚, キム ギルホ, 青木 伸之
2. 発表標題 p型WSe2における量子ポイントコンタクトの実現
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 池田 駿太郎, 大内 秀益, 坂梨 昂平, クリュウガー ピーター, 渡邊 賢司, 谷口 尚, バード ジョナサン, 青木 伸之
2. 発表標題 MoTe2-TFET におけるp 型動作の実現に向けた取り組み
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 Kohei Sakanashi, Naoto Wada, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Gil-Ho Kim, David K. Ferry, Jonathan P. Bird, Liang Huang, and Nobuyuki Aoki
2 . 発表標題 Open quantum dot in encapsulated graphene
3 . 学会等名 APS March Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Nobuyuki Aoki, Hidemitsu Ouchi, Kohei Sakanashi, Kota Kaniya, Peter Kruger, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu, Jonathan P. Bird
2 . 発表標題 Laser Doping Effect and TFET Device Application of MoTe2 Crystal
3 . 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors (EDISON21) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kohei Sakanashi, Naoto Wada, Kentaro Murase, Younsub Kim, Gil-ho Kim, Jonathan P. Bird, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Nobuyuki Aoki
2 . 発表標題 Electrostatically Confined Quantum Structures in Bilayer Graphene
3 . 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors (EDISON21) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kensuke Aoki, Kohei Sakanashi, Nobuyuki Aoki
2 . 発表標題 Fabrication of high-quality graphene nanoribbon via silver nanowire shadow-masking
3 . 学会等名 The 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors (EDISON21) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 坂梨昂平, 村瀬健太郎, 和田直人, G.-H. Kim, 渡邊賢司, 谷口尚, J.P. Bird, 青木伸之
2. 発表標題 高移動度2層グラフェンに対する電界閉じ込めによる量子構造の形成
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂梨 昂平, 和田 直人, バード ジョナサン, 渡邊 賢司, 谷口 尚, キム ギルホ, 青木 伸之
2. 発表標題 二層グラフェンにおける電界閉じ込めによる量子構造の実現
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大内 秀益, 神谷 航太, 坂梨 昂平, ゲエヌエ トーマス, クリュウガー ピーター, 宮本 克彦, 尾松 孝茂, バード ジョナサン, 青木 伸之
2. 発表標題 レーザー照射によるTMDC結晶へのp/nドーピング制御とモノリシックTFET応用
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大内 秀益, 坂梨 昂平, クリュウガー ピーター, バード ジョナサン, 青木 伸之
2. 発表標題 MoTe ₂ を用いたIn-Plane TFETの作製
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuyuki Aoki, Hidemitsu Ouchi, Kohei Sakanashi, Kota Kamiya, Peter Kruger, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu, and Jonathan P. Bird
2. 発表標題 Heavy Doping Effect in MoTe2 Crystal by High Density Laser Irradiation and TFET Device Application
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 Kohei Sakanashi, Naoto Wada, Yukichi Kamita, Ryo Fukushima, Gil-Ho Kim, Jonathan P. Bird, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi and Nobuyuki Aoki
2. 発表標題 Electrostatically Confined Quantum Structures in Bilayer Graphene
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 N. Aoki, H. Ouchi, K. Sakanashi, K. Kamiya, P. Kruger, K. Miyamoto, T. Omatsu, and J. P. Bird
2. 発表標題 Doping effect and phase transition of MoTe2 by laser irradiation and TFET application
3. 学会等名 International Symposium on Spectro-Microscopy of Functional Materials and Interfaces (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木 健輔, 坂梨 昂平, 青木伸之
2. 発表標題 銀ナノワイヤーのシャドーマスクを用いた短チャネルグラフェンナノリボンの作製
3. 学会等名 第29回日本MRS年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 謝 天順、大内 秀益、坂梨 昂平、上野 啓司、青木 伸之
2. 発表標題 1T'-MoTe2と2H-MoTe2のコンタクトの特性の評価
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田直人, 坂梨昂平, G.-H. Kim, 渡邊賢司, 谷口尚, J.P.バード, 青木伸之
2. 発表標題 ツイスト型二層グラフェンFETの作製と磁気輸送特性評価
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 Nobuyuki Aoki
2. 発表標題 Control of Electrical Properties of MoTe2-FET by Laser Irradiation and Device Application
3. 学会等名 SAINT Seminar, SKKU (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sakanashi, H. Ouchi, K. Kamiya, T. Yamanaka, T. Omatsu, K. Ueno, J. P. Bird and N. Aoki
2. 発表標題 Evaluation of contact properties for semiconducting 2H phase of MoTe2 via scanning gate microscopy
3. 学会等名 9th Graphene and 2D Materials Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名	K. Kamiya, H. Ouchi, K. Sakanashi, K. Ueno, T. Guehenneux, P. Kruger, T. Omatsu, J. P. Bird and N. Aoki
2. 発表標題	Control of FET Property by Laser Irradiation and Device Application of MoTe2 Crystal
3. 学会等名	9th Graphene and 2D Materials Symposium (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	荒川友貴, 村瀬健太郎, 坂梨昂平, 松本直樹, Y.-S. Kim, G.-H. Kim, 渡邊賢司, 谷口尚, D.K. Ferry, J.P. Bird, 青木伸之
2. 発表標題	垂直電場印加による2層グラフェンにおける量子ポイントコンタクトの形成
3. 学会等名	日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	神谷航太, 大内秀益, 坂梨昂平, ゲエヌエ トーマス, クリュウガー ピーター, ジョナサン P. バード, 青木伸之
2. 発表標題	MoTe2に対するレーザー照射によるp/nドーピング
3. 学会等名	第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	大内秀益, 神谷航太, 坂梨昂平, ゲエヌエ トーマス, クリュウガー ピーター, ジョナサン P. バード, 青木伸之
2. 発表標題	MoTe2を用いたトンネル電界効果トランジスタの作製
3. 学会等名	第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	K. Kamiya, H. Ouchi, K. Sakanashi, K. Ueno, P. Kruger, K. Miyamoto, T. Omatsu, J.P. Bird and N. Aoki
2. 発表標題	Carrier Polarity Control of MoTe2 Crystal by Laser Irradiation and Device Application
3. 学会等名	31st International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2018) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Kentaro Murase, Kohei Sakanashi, Tomoki Arakawa, Naoki Matsumoto, Yong S. Kim, Geun H. Kim, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Jonathan P. Bird, D. K. Ferry, Kenichi Oto and Nobuyuki Aoki
2. 発表標題	Fabrication of quantum point contact in bilayer graphene by application of vertical electric field
3. 学会等名	2018 Ajou University-Chiba University Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Kensuke Aoki, Benjamin S. Piazza, and Nobuyuki Aoki
2. 発表標題	Fabrication of ultra-fine graphene nanoribbons by silver nanowire shadowmasking
3. 学会等名	2018 Ajou University-Chiba University Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Nobuyuki Aoki, Kota Kamiya, Hidemitsu Ouchi, Kohei Sakanashi, Peter Kr?ger, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu and Jonathan P. Bird
2. 発表標題	Carrier Control and Device Application of MoTe2 Crystal by Laser Irradiation
3. 学会等名	2018 Ajou University-Chiba University Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 青木健輔, 青木伸之
2. 発表標題 エネルギーギャップの導入にむけた銀ナノワイヤーを用いた高品質グラフェンナノリボンの作製
3. 学会等名 第56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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木健輔, 青木伸之
2. 発表標題 エネルギーギャップの導入にむけた銀ナノワイヤーによるグラフェンナノリボンの作製
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂梨昂平, 和田直人, バード ジョナサン, キム ギルホ, 渡邊賢司, 谷口尚, 青木伸之:
2. 発表標題 二層グラフェンにおける電界閉じ込めによる電子波ダイナミクスの観測
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村瀬健太郎, 荒川友貴, 坂梨昂平, 音賢一, キム コンサム, キム ギルホ, 渡邊賢司, 谷口尚, 青木伸之
2. 発表標題 垂直電場印加による2層グラフェンにおける量子ポイントコンタクトの形成と磁場印加効果
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	大内秀益, 神谷航大, 坂梨昂平, グエヌエ トマス, クリュウガー ピーター, パード ジョナサン, 渡邊賢司, 谷口尚, 青木伸之
2. 発表標題	TMD材料を用いたトンネル電界効果トランジスタの作製
3. 学会等名	第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Tianshun Xie, Shuntaro Ikeda, Kohei Sakanashi, Keiji Ueno, Peter Kruger and Nobuyuki Aoki
2. 発表標題	Study on the contact properties between the semi-metallic phase and the semiconducting phase of MoTe2
3. 学会等名	ICN+T 2021 (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	青木伸之
2. 発表標題	モノリシックデバイス応用に向けたレーザー照射によるMoTe2 の構造制御と極性制御
3. 学会等名	グラフェンコンソーシアム第26回研究講演会(招待講演)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	横井和史, 坂梨昂平, Gil-Ho Kim, 渡邊賢司, 谷口尚, 青木伸之
2. 発表標題	グラフェン/WSe2ヘテロ接合における磁気輸送特性評価
3. 学会等名	日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 Nobuyuki Aoki, Kohei Sakanashi, Yukichi Kamita, Kenichi Oto, Gil-Ho Kim, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Jonathan P. Bird and David K. Ferry
2. 発表標題 Valley polarized transport at quantum point contact in bilayer graphene
3. 学会等名 The 12th Annual 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 Kohei Sakanashi, Peter Kruger, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Gil-Ho Kim, David K. Ferry, Jonathan P. Bird, and Nobuyuki Aoki
2. 発表標題 Fully spin-resolved quantum point contact in trilayer WSe ₂ van der Waals heterostructure
3. 学会等名 The 12th Annual 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 佐々木 遥晃, 川口 晴生, 宮本 克彦, 尾松 孝茂, 青木 伸之
2. 発表標題 光渦レーザー誘起前方転写法によってプリントされたグラフェン
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 謝 天順, 坂梨 昂平, 上野 啓司, 青木 伸之
2. 発表標題 剥離により得られた2H-NbS ₂ 薄膜におけるBKT相転移の評価
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 坂梨昂平, 柯梦南, 青木伸之
2. 発表標題 有機単分子膜の挿入によるTMDC-FETにおけるコンタクト特性の改善
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 Yuichi Ochiai, and Nobuyuki Aoki	4. 発行年 2019年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 22
3. 書名 Fullerene Nanowhiskers Second Edition, Chapter 16	

1. 著者名 Nobuyuki Aoki	4. 発行年 2019年
2. 出版社 John Wiley & Sons	5. 総ページ数 17
3. 書名 Molecular Technology, Volume 3: Materials Innovation: Chapter 1 Control of Electronic Property of C60 Fullerene via Polymerization	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Quantum Nanodevice Laboratory Aoki Group https://adv.chiba-u.jp/nano/qnd/index.html

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	音 賢一 (Oto Kenichi) (30263198)	千葉大学・大学院理学研究院・教授 (12501)	

	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
研究協力者	渡邊 賢司 (WATANABE Kenji) (20343840)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員 (82108)	
研究協力者	谷口 尚 (TANIGUCHI Takashi) (80354413)	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・拠点長 (82108)	
研究協力者	上野 啓司 (Ueno Keiji) (40223482)	埼玉大学・理工学研究科・教授 (12401)	

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			
米国	ニューヨーク州立大学バッファロー校	アリゾナ州立大学		
韓国	成均館大学			
日本	物質・材料研究機構	埼玉大学		