

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01810

研究課題名(和文) 低次元物質中における特異な円偏光物性

研究課題名(英文) Anomalous optical properties by circularly polarized light in low-dimensional materials

研究代表者

齋藤 理一郎 (Saito, Riichiro)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：00178518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：円偏光の光子は角運動量を持ち、回転対称性を持つ2次元物質との相互作用において、擬角運動量(離散的な角度の運動で定義される角運動量)が保存する。このとき、共鳴ラマン分光において、入射光と散乱光が円偏光の場合に、円偏光のヘリシティが変わらないラマン散乱と符号が反転するラマン散乱がある。本研究では、この現象を理論的に解析し、(1)角運動量保存の法則からラマン散乱におけるヘリシティの符号の関係を明らかにした。(2)またラマンテンソルの式から、現象を回転対称性を持たない系でも説明できることを示した。(3)さらに、第一原理計算から円偏光共鳴ラマン強度を計算するプログラムを作成し、計算した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、固体の共鳴ラマン分光強度を第一原理計算でできるようになった点である。また、円偏光を用いたラマン分光が従来のラマン分光よりも、格子振動の対称性などを直接観測できるようになったことを示したことに意義がある。これらの計算を拡張することによって、回転対称性を持たない、カイラルな物質を円偏光で測定すると、右巻きと左巻きのカイラルな物質をラマン分光で区別することができるなど新奇な学理を生み出した。今日、新物質の評価として、ラマン分光が非常に多く使われているので、一般の材料科学、物理学、化学など幅広い学問や産業に貢献すると期待している。

研究成果の概要(英文)：A circularly polarized photon has angular momentum, and pseudoangular momentum (angular momentum defined by motion of only discrete angles) is conserved in the interaction with two-dimensional materials with rotational symmetry. In resonance Raman spectroscopy, when the incident and scattered light are circularly polarized, there is Raman scattering in which the helicity ( $\pm\hbar$ ) of the circularly polarized light does not change and Raman scattering in which the sign reverses. In this study, we theoretically analyzed this phenomenon and clarified (1) the relation between the sign of helicity in Raman scattering from the law of conservation of angular momentum. (2) From the equation of the Raman tensor, we showed that the phenomenon can be explained by a system even without rotational symmetry. (3) Furthermore, we developed a program to calculate the circularly polarized, resonant Raman intensity from first-principles calculations.

研究分野：物性物理学

キーワード：円偏光 共鳴ラマン分光 ヘリシティ 2次元物質 第一原理計算

## 1. 研究開始当初の背景

古くから円偏光に関連する物性として、偏光面が回転する旋光性や、左右円偏光で光吸収に差がある円偏光二色性などが知られている。このような現象は工学的に応用されるだけでなく、生物の生命活動においても巧みに利用されていることがわかっている。このような現象を起こす物質は、一般に鏡映操作に関して非対称な物質(キラル、光学活性な物質)であると理解されてきた。しかし、申請者は原子層物質の理論的な研究を行った結果、物質がキラルな構造でなくても、円偏光に特異な物性を示す現象が少なからずあることに気づいた。具体的には、遷移金属ダイカルコゲナイド物質( $\text{MoS}_2$ など、以下 TMD)はキラルな物質でないが、(1)円偏光に対するバレー偏極光吸収(2つあるエネルギーバンド端の一方でのみ起こる光吸収)、(2)電流方向によって発光する円偏光の向きが反転するエレクトロルミネセンス(EL)、(3)TMD 物質の共鳴ラマン分光スペクトルで入射光と散乱光の円偏光の向きが反転するラマン散乱、などの現象が起きる。また申請者は、らせん構造を持つカーボンナノチューブの円偏光二色性の計算を行い、(4)逆にキラルなナノチューブであっても電子状態の高い対称性の為に、従来の円偏光二色性の表式では計算値がゼロになること示した。この問題を解決するために新たな円偏光二色性の式を導出し、数値的に計算し実験と比較した。これらの研究は、円偏光に対する特異な光物性という点で共通であり、円偏光の持つ角運動量が低次元物質と相互作用を通じて、やり取りすることを示している。

これらの円偏光の新規現象は、既存の理論では十分に説明できない点があり、光と物質との相互作用を解明する固体物理学(光物性)において新しい知見(創造性)を与える。申請者は、独自に理論的な式や計算プログラムを開発し(独自性)計算を行ってきた。しかし、TMD やナノチューブのような低次元物質では、室温でも存在する励起子が観測されるため、我々の光吸収の計算で励起子の効果を取り入れる必要がある。しかし、現状は励起子の効果を取り入れていないので、実験と定量的な比較ができない問題点があった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、(1)励起子の計算を導入し、円偏光に対する光物性の定量的な計算を行い、実験に有用な情報を提供すること、また(2)円偏光の角運動量と物質固有の自由度(バレー、擬スピン、スピン自由度など)と、どのように相互作用するかについて統一的な描像を構築し、逆に新規現象を利用した光素子を設計することである。

## 3. 研究の方法

本研究は、理論的に円偏光と2次元物質との相互作用を議論するものである。具体的な方法として、(1)群論と対称性を用いて、物質の持つ回転対称性と円偏光の持つ対称性において光の角運動量をどのように理解し、保存則があるかを解明する。(2)ラマン分光における強度を計算するために、ラマンテンソルを用いて偏光ラマン分光の解析を行う。(3)タイとバインディング法をと第一原理計算の結果を合わせて、エレクトロルミネッセンスの歪依存性を計算する。(4)第一原理計算を用いて、electron-photon および electron-phonon 相互作用を計算するプログラム

を開発し、円偏光に対する共鳴ラマン分光強度を直接計算する、などを提案した。

#### 4. 研究成果

2018年から2023年まで、59編の論文を発表した。以下に、本研究の主な成果を年度ごとに報告する。

##### 2018年度

(1) 第一原理計算プログラムの更新に合わせて、同プログラムを用いる共鳴ラマン分光スペクトルを計算するプログラムを修正した。修正したプログラムを用いて、過剰に電子をドーピングし、状態発散するM点のエネルギーを超えるフェルミエネルギーのグラフェンのラマンスペクトルを計算した。実験で観測された、通常と反対のラマンスペクトル形状の非対称性(ブライト・ウイグナーファノ効果)の起源を理論的に解明して、Nano Lett. に発表した。

(2) 共鳴ラマン分光における角運動量保存則の論文を Phys. Rev. B に発表した。この理論的結果を実験的に検証するために、北京大学のグループと共同研究を行っている。いくつかの低次元物質が理論的な予想を再現した。現在論文にまとめているところである。また遷移金属ダイカルコゲナイド物質である、WS<sub>2</sub>の紫外線を用いた共鳴ラマン分光を台湾の師範大学グループと共同研究を行った。その成果を Sci. Rep. に報告した。

(3) グラフェンのエッジプラズモンが、回転する電磁場を発生することを理論的に見出し、Phys. Rev. B に発表した。

(4) 誘電体多層膜に光を通したときに、界面の多重反射によって電場の大きさが増大する。各層の大きさを光の波長の4分の1にした場合には、2種類の多層膜をランダムな順番に並べたとしても、電場の増強効果を解析的に求められることを見出した。この結果を Phys. Rev. Appl. に発表した。

(5) ハルデン模型の電子状態が、100%円偏光二色性を示すことを見出した。この結果を J. Phys. Soc. Jpn. に発表した。

##### 2019年度

(1) 修正されたハルデンモデルをハミルトニアンとして採用し、2次元物質における円偏光二色性について議論し、Phys. Rev. B に発表した。修正されたハルデンモデルは、ブリルアン領域のK点とK'点におけるエネルギーギャップの値が異なるように変化することができるので、円偏光二色性を変調することができることを示した。

(2) 2次元の物質中に、磁場をかけなくてもホール伝導度が存在する場合を考えると、この物質に、ファラデー効果とカー効果が起こるだけでなく、円偏光二色性が起きることを理論的に示した。この結果も Phys. Rev. B に発表した。

(3) 半導体カーボンナノチューブをドーピングすると、ドーピングしない場合のエネルギーバンド間の光吸収スペクトルは、伝導帯に電子が占有する(または価電子帯にホールが占有する)ために消失する。さらにドーピングをすると、別のエネルギーのところに強い光吸収が起きる。この光吸収は、表面プラズモン励起による光吸収であることを、誘電率の計算によって示した。表面プラズモン励起による光吸収は、ナノチューブの(n,m)の値に依存し、フェルミエネルギーの関数として与えられる。この結果も Phys. Rev. B に発表した。

そのほかの研究成果としては、(4) 2次元物質 InSe、テトラダイマイトやスズカルコゲナイドの熱電性能を理論的に計算し3編の論文 J. Appl. Phys., Nano Energy, Phys. Rev. Materials

に発表した。(5)ナトリウムイオン電池の性能に関する理論的研究を、第一原理計算を用いて行い J. Phys. Chem. C に発表した。(6)グラフェンのナノリボン上に電磁波をあてると、エッジプラズモンが励起され、その結果誘起された電場が回転することを理論的計算で明らかにし Phys. Rev. Applied に発表した。(7)ナノチューブの熱電性能に関してレビュー論文を Energies に発表した。

#### 2020 年度

(1)円偏光を用いたラマン分光を用いて、遷移金属ダイカルコゲナイド物質のラマンスペクトルの解析を行い、特に散乱光の円偏光が変わるか、保存されるかの結果が単にフォノンモードの対称性によるものではなく、励起子由来の対称性を反映していることを見出し、共同研究者との実験結果を説明した。ACS Nano に発表した。

(2)遷移金属ダイカルコゲナイド物質の EL 発光は、電流の向きによって左右の円偏光が出てくることが実験で観測されているが、この現象を理論的に解析し物質に歪を加えた場合により鮮明に円偏光が得られることを見出した。Phys. Rev. Res. に発表した。

(3)ドーピングしたカーボンナノチューブの円偏光二色性の計算を行い、ドーピングしたカーボンナノチューブの光吸収が表面プラズモンによること、また円偏光二色性の大きさが非常に大きくなることを見出した。J. Appl. Phys. に発表した。

そのほかの研究成果としては、(4)表面プラズモンに関する Review 論文を Carbon に発表した。

(5)Janus 型遷移金属ダイカルコゲナイド物質の電子状態計算結果に関する論文を Appl. Surf. Sci. に発表した。(6)遷移金属ダイカルコゲナイドの光吸収スペクトルの温度依存性を計算で明らかにし、実験と一緒に Sci. Rep. に発表した。(7)Weyl 半金属におけるファノ共鳴に異方性があることを実験結果とともに理論的に解析し Phys. Rev. B に発表した。(8)遷移金属ダイカルコゲナイドのラマンスペクトルの歪依存性の計算結果を論文に発表した。(9)2次元物質の熱電特性に関する Review 論文を Adv. Quantum Technol. に発表した。

#### 2021 年度

(1)円偏光が光のスピン角運動量を持つのにに対し、光渦は軌道角運動量を持つ。光渦を入射光としてラマン分光を測定したときにも、物質の回転対称性と関係して、選択則があるはずである。2019年の台湾で開かれたラマン分光に関する会議のときに、質問を受けこの問題に着手した。すでにスピン角運動量に対する選択則に関しては論文に発表しているので、同様な手法を用いて群論的な考察をすることで、2回、3回、4回、6回回転対称性に対する選択則を求めた。この成果は Phys. Chem. Chem. Phys. に発表した。

(2)グラフェンナノリボンをボロンと窒素で周期的にドーピングした pn 接合系において、I-V 特性や動作時間などを理論的に解明した。これらの結果は常温で動作する FET として有効であることを示している。この論文は Phys. Rev. Applied に発表した。

(3)グラフェンナノリボンの端に発生する edge plasmon は、ナノリボン面に垂直方向にスピン角運動量を持ち、これによってナノリボン中にスピン流が発生することを理論的に見出した。スピン流の方向は edge plasmon の振動数や、Fermi エネルギーによって調整できることも示した。この成果は、Phys. Rev. B に発表した。

(4)黒リンの原子層における層間隔が振動するフォノンモードのラマン分光を測定し、理論的に第一原理計算により共鳴ラマン分光スペクトルを層数の関数として求めた。この研究は米国 MIT

との共同研究で、成果は Nano Lett. に発表した。

2022 年度

(1) グラフェンの端に円偏光を照射すると、表面プラズモンによる光吸収が起き、その結果スピン流が発生することを見出した。このスピン流が発生する機構を理論的に解明した。さらに、光を当て、その後切ったときのスピン流に関するスイッチング特性を評価した。この結果は、Phys. Rev. B に発表した。

(2) 黒リンに円偏光を照射して得られたラマンスペクトルは、円偏光のヘリシティに依存する特性を示す。散乱光を4分の1波長板に通し、偏光子を通して測定した Polarized Raman 測定結果が、ラマン活性モードは通常のラマンテンソルで記述できないことが分かった。この問題を解決するために、複素数のラマンテンソルを用いると実験を再現できることが分かり、カイラルな物質に対して円偏光ラマン分光の重要性を指摘できた。この結果は、J. Phys. Chem. Lett. に発表した。

(3) 二重共鳴ラマン分光は、ラマン分光の微弱なスペクトルを解析するとき有効であるが、従来第一原理計算で計算することはできなかった。我々は、中国金属材料研究所との共同研究で、このプログラムの開発に成功し、MoTe<sub>2</sub> の計算結果を Phys. Rev. B に発表した。

(4) 国立台湾師範大学との共同研究で、単結晶グラファイトの光学吸収スペクトルを分光エリプソメトリ法で測定し、その結果を第一原理計算の結果と比較することで、光学吸収には電子が1個励起するモードだけではなく表面プラズモンが4-6eV のエネルギー領域で吸収が起きていることを見出した。この結果は Carbon に発表した。

## 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 26件/うちオープンアクセス 28件）

1. 著者名 N. T. Hung, A. R. T. Nugraha, T. Yang, R. Saito	4. 巻 5
2. 論文標題 Confinement Effect in Thermoelectric Properties of Two-Dimensional Materials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MRS Advance	6. 最初と最後の頁 469- 479
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/adv.2020.128	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. Gresik, M. S. Ukhtary, R. Saito	4. 巻 89
2. 論文標題 Scaling laws in synchronization of metronomic oscillatory systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 054002-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.054002	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 V. V. Thanh, N. D. Van, D. V. Truong, R. Saito	4. 巻 526
2. 論文標題 First-principles study of mechanical, electrical, and optical properties of Janus structure in transition metal dichalcogenides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Appl. Surf. Sci.	6. 最初と最後の頁 146730-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apsusc.2020.146730	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 M. S. Ukhtary, R. Saito	4. 巻 167
2. 論文標題 Surface plasmon in graphene and carbon nanotubes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 455-474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2020.05.019	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 M. S. Ukhary, R. Saito	4. 巻 32
2. 論文標題 Step-like conductance of a silicene pseudospin junction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Cond. Matt.	6. 最初と最後の頁 425301-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab9d50	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 Y. Zhao, S. Zhang, Y. Shi, Y. Zhang, R. Saito, J. Zhang, L. Tong	4. 巻 14
2. 論文標題 Characterization of excitonic nature in Raman spectra using circularly polarized light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 10527-10535
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.0c04467	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 Y. Zhang, H. Guo, W. Sun, H. Sun, S. Ali, Z. Zhang, R. Saito, T. Yang	4. 巻 51
2. 論文標題 Scaling law for strain dependence of Raman spectra in transition-metal dichalcogenides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Raman Spectrosc.	6. 最初と最後の頁 1353-1361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/jrs.5908	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 . S. Wang, M. S. Ukhary, R. Saito	4. 巻 2
2. 論文標題 Strain effect on circularly polarized electroluminescence in transition metal dichalcogenides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Res.	6. 最初と最後の頁 033340-1- 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033340	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 H. L. Liu, T. Yang, J. H. Chen, H. W. Chen, H. Guo, R. Saito, M. Y. Li, L. J. Li	4. 巻 10
2. 論文標題 Temperature-dependent optical constants of monolayer MoS <sub>2</sub> , MoSe <sub>2</sub> , WS <sub>2</sub> , and WSe <sub>2</sub> : spectroscopic ellipsometry and first-principles calculations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 15282-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-71808-y	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 R. Saito, M. S. Ukhtary, S. Wang, Y. Iwasaki	4. 巻 128
2. 論文標題 Circular dichroism of doped carbon nanotubes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys.	6. 最初と最後の頁 164301-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0028011	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 K. Zhang, T. Wang, X. Pang, F. Han, S.-L. Shang, N. T. Hung, A. R. T. Nugraha, Z.-K. Liu, M. Li, R. Saito, S. Huang	4. 巻 102
2. 論文標題 Anisotropic Fano resonance in a Weyl semimetal candidate LaAlSi	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 235162-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.235162	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 A. Jorio, R. Saito	4. 巻 129
2. 論文標題 Raman Spectroscopy for Carbon Nanotube Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 021102-1-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0030809	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 T. Hung Nguyen, Nugraha Ahmad R. T., Yang Teng, Zhang Zhidong, Saito Riichiro	4. 巻 125
2. 論文標題 Thermoelectric performance of monolayer InSe improved by convergence of multivalley bands	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 082502 ~ 082502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5040752	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 Dong Baojuan, Wang Zhenhai, Hung Nguyen T., Oganov Artem R., Yang Teng, Saito Riichiro, Zhang Zhidong	4. 巻 3
2. 論文標題 New two-dimensional phase of tin chalcogenides: Candidates for high-performance thermoelectric materials	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 013405-1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.3.013405	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 Satco Daria, Nugraha Ahmad R. T., Ukhtary M. Shoufie, Kopylova Daria, Nasibulin Albert G., Saito Riichiro	4. 巻 99
2. 論文標題 Intersubband plasmon excitations in doped carbon nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 075403-1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.075403	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 Hung Nguyen T., Nugraha Ahmad R.T., Saito Riichiro	4. 巻 58
2. 論文標題 Designing high-performance thermoelectrics in two-dimensional tetradymites	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Energy	6. 最初と最後の頁 743 ~ 749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nanoen.2019.02.015	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 Vila Marc、Hung Nguyen Tuan、Roche Stephan、Saito Riichiro	4. 巻 99
2. 論文標題 Tunable circular dichroism and valley polarization in the modified Haldane model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161404(R)-1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.161404	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 Pratama F R、Ukhtary M Shoufie、Saito Riichiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Non-vertical optical transition in near-field enhanced spectroscopy of graphene	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 265701 ~ 265701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab1335	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 Ukhtary M. Shoufie、Maruoka Masato、Saito Riichiro	4. 巻 100
2. 論文標題 Planar rotation of electric field induced by edge-plasmon in a graphene nanoribbon	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155432-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.155432	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 Hung Nguyen T.、Nugraha Ahmad R. T.、Saito Riichiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Thermoelectric Properties of Carbon Nanotubes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 4561 ~ 4561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en12234561	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 Hung Nguyen T., Yin Li-Chang, Tran Phong D., Saito Riichiro	4. 巻 123
2. 論文標題 Simultaneous Anionic and Cationic Redox in the Mo3S11 Polymer Electrode of a Sodium-Ion Battery	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 30856 ~ 30862
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b09325	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 K. Ghalamkari, Y. Tatsumi, R. Saito	4. 巻 87
2. 論文標題 Perfect circular dichroism in the Haldane model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 063708-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.063708	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 Y. Tatsumi, T. Kaneko, R. Saito	4. 巻 97
2. 論文標題 Conservation law of angular momentum in helicity-dependent Raman and Rayleigh scattering	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 195444-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.195444	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 H. S. Liu, T. Yang, Y. Tatsumi, Y. Zhang, B. Dong, H. Guo, Z. D. Zhang, Y. Kumamoto, M. Y. Li, L. J. Li, R. Saito, S. Kawata	4. 巻 8
2. 論文標題 Deep-ultraviolet Raman scattering spectroscopy of monolayer WS <sub>2</sub> ,	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 11398-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-018-29587-0	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 M. G. Hell, N. Ehlen, B. V. Senkovskiy, E. H. Hasdeo, A. Fedorov, D. Dombrowski, C. Busse, T. Michely, G. di Santo, L. Petaccia, R. Saito, A. Gruneis	4. 巻 18
2. 論文標題 Resonance Raman spectrum of doped epitaxial graphene at the Lifshitz transition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nano Lett.	6. 最初と最後の頁 6045-6056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b02979.	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 Q. D. Truong, N. Hung, Y. Nakayasu, K. Nayuki, Y. Sasaki, K. Murukanahally, L. Yin, T. Tomai, R. Saito, I. Honma	4. 巻 8
2. 論文標題 Inversion domain boundaries in MoSe <sub>2</sub> layers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 RCS Adv.	6. 最初と最後の頁 33391-33397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c8ra07205a	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 M. S. Ukhtary, R. Saito	4. 巻 255
2. 論文標題 Quantum description of surface plasmon excitation by light in graphene	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Stat. Solidi B	6. 最初と最後の頁 1800181-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201800181	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. Blumberg, M. S. Ukhtary, R. Saito	4. 巻 10
2. 論文標題 Enhancement of the electric field and diminishment of the group velocity of light in dielectric multilayer systems: a general description	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Appl.	6. 最初と最後の頁 064015-1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.10.064015	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

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 R. Saito
2. 発表標題 Helicity-changing Raman spectra in two-dimensional materials
3. 学会等名 International symposium on physical properties for nano functional materials (ISNFM 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤 理一郎
2. 発表標題 グラフェンと 2次元物質の基礎と 2020 年代の重点課題
3. 学会等名 2020 年第 81 回応用物 理学会秋季学術講演会チュートリアル (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤 理一郎
2. 発表標題 原子層物質における円偏光物性
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会、シンポジ ウム『グラフェン物性科学の新展開』 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Saito
2. 発表標題 Tunable circular dichroism and valley polarization in two dimensional materials
3. 学会等名 Recent progress in graphene and 2D materials research (RPGR2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Saito
2. 発表標題 原子層材料における円偏光発光
3. 学会等名 第23回V B Lシンポジウム(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Saito
2. 発表標題 Edge plasmon of two-dimensional materials
3. 学会等名 The 4th Graphene Flagship EU-Japan/Workshop on Graphene and related 2D materials(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤 理一郎
2. 発表標題 Enhancement of electric field for measuring optical response in two-dimensional materials
3. 学会等名 The 9th Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Energy and Electronics(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. S. Ukhtary
2. 発表標題 In-plane rotation of electric field induced by edge-plasmon in graphene ribbon
3. 学会等名 The 9th Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Energy and Electronics(国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 R. Saito	4. 発行年 2019年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 30
3. 書名 Optical properties of carbon nanotubes : a volume dedicated to the memory of Professor Mildred S. Dresselhaus	

1. 著者名 R. Saito, Y. Tatsumi, T. Yang, H. Guo, L. Zhou, M.S. Dresselhaus	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 32
3. 書名 Raman Spectroscopy of Two-Dimensional Materials, Springer Series in Materials Science	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Saito's Group Home Page <a href="https://flex.phys.tohoku.ac.jp/japanese/">https://flex.phys.tohoku.ac.jp/japanese/</a>
--

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