

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14649

研究課題名（和文）反転対称性の破れた磁性体における非線形応答の理論

研究課題名（英文）Theory of nonlinear response phenomena in noncentrosymmetric magnets

研究代表者

石塚 大晃 (Ishizuka, Hiroaki)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：00786014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題を通して、反転対称性の破れた磁性体におけるスピン流の整流効果について研究し、2スピノン過程や2マグノン過程による非線形スピン流の整流が可能であることを明らかにした。さらに、1マグノン過程を用いた非線形応答理論の一般公式の導出と、この機構によって大きな光誘起スピン流をCrハライド系物質の2層系を用いて生成できる可能性を明らかにすることができた。加えて、トポロジカル絶縁体における軌道応答の発見など、当初の計画を超える成果を多数挙げることができた。以上のように、当初の計画を全て達成できたと共に、計画を超える成果を多数あげることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、光によるスピン流の整流効果に関する先駆的研究である。磁気秩序した磁性体や1次元スピン鎖を対象として、光によるスピン流の整流効果が実現可能なことを明らかにした。さらに、光誘起スピン流の一般公式を導出し、様々な物質における光誘起スピン流を評価するための基礎理論を整備した。そして、この理論を用いて、Crハライド系が光誘起スピン流を実現するための有力物質であることを明らかにした。加えて、トポロジカル絶縁体において光誘起起動流が見られることを明らかにした。以上のように、本研究は光誘起スピン流・軌道流を理論的に提案し、理論的研究を行うための基礎理論を構築した点で、学術的に大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：Through this research project, we investigated the rectification effect of spin currents in magnetic materials with broken inversion symmetry. We revealed the possibility of rectifying nonlinear spin currents via processes such as two-spinon or two-magnon processes. In addition, we derived a general formula for one-magnon processes using nonlinear response theory and demonstrated the potential to generate a large light-induced spin currents using the bilayer system of Cr halide materials. Additionally, we achieved numerous results beyond the initial plan, including the discovery of orbital responses in topological insulators. Thus, we not only achieved all the initial goals of the project, but also surpassed them with numerous additional accomplishments.

研究分野：物性理論

キーワード：スピン流 光起電効果 シフト流 スピントロニクス ベリー位相 非線形応答 トポロジカル絶縁体

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

電磁場は例外的に極めて高度な制御が可能な外場である。特に近年ではテラヘルツ光など周波数の低い電磁波の高輝度光源が比較的容易に得られるようになり、これらの光源を用いた物性制御や高次応答に関する研究を可能としつつある。これらの電磁波のエネルギーは磁性体の励起状態のそれに近い為、磁性絶縁体の磁気励起の研究や制御に応用できると期待される。実際、電磁波による磁性制御に関する理論研究が近年盛んに行われている。こうした近年の動向は磁性絶縁体における光物性研究の発展を予見させるとともに、電荷を持たない準粒子ダイナミクスの電磁波による制御の実現が大きな潜在的意義を持つことを示唆する。

電荷を持たない準粒子の電磁波による制御は一見困難に見えるが、一方で電子系では非線形応答を用いて外場による電子の加速以外の方法でも電流を生成できること(光起電効果)が知られている。光起電効果は半導体などを対象として多くの研究の蓄積があり、その機構は(1)光によって励起された準粒子の運動に由来する効果(シリコン太陽電池などpn接合系)と(2)光による遷移過程や断熱的過程における電子位置の非自明なシフトに由来する効果(シフト電流、断熱ポンプなど)とに大別される。特に後者は波動関数の非自明な構造が本質にあり、ポテンシャル勾配による電子の加速を用いない点で通常の電気伝導や(1)の光電流と本質的に異なる。応募者のこれまでの研究でも、ワイル半金属におけるBerry位相による断熱ポンプと関連した新しい光電流や、シフト電流に特有の光照射位置に対する光電流強度の依存性など、(2)の機構が(1)とは本質的に異なる性質をもつことを見出した。また、これらの研究からBerry位相が(2)の機構による電流生成に本質的な役割を果たす一方で、電場が電流の共役場であることは本質的に重要で無いことを見出した。さらに、これまでの応募者による研究は(2)による光電流が通常の準粒子流とは異なる特異な特徴を示唆していた。

## 2. 研究の目的

本課題では上述の準粒子制御に関する未解決課題、および磁性絶縁体における光物性研究の潜在的な重要性から、磁性体における遷移過程における非自明な準粒子のシフトに由来する効果を中心に、電磁波によるスピン流の整流および制御に関する基礎理論の開拓を目的とした研究を行う。近年の応募者らによる研究は、準粒子のシフトに由来する非線形応答が従来の光電流とは異なる性質を持つことを示している。その為、本課題で研究するスピン流はスピン・ゼーベック効果など、マグノンの準古典的運動として理解できる現象とは本質的に異なる。この顕著な特徴から、本課題は磁性体の光物性研究に新たな側面を生み出す可能性がある。

## 3. 研究の方法

非線形応答理論と非平衡グリーン関数法を主な計算手法として用い、磁性絶縁体を中心にテラヘルツ光による新奇な非線形応答の定式化を行った。そして、この一般公式を用いて(1)スピン流生成の可能性とその基本的性質、および(2)有力な候補物質を明らかにした。

## 4. 研究成果

4-1. スピノンのシフト・スピン流の生成とその性質 1次元スピン鎖におけるスピノン励起を用いた非線形スピン流の計算公式を導出した。さらに、1次元スピン鎖のVBS状態におけるスピン流の非線形伝導度を計算した。そして、縦偏光を用いてスピン流の生成が可能であることを示した。縦偏光は角運動量を持たない為、光から物質への角運動量転写が無くても、スピン流を生成できることを意味する。さらに準粒子の寿命と応答強度の関係を解析し、非線形スピン流が準粒子寿命に依存しないことを確認した。この結果は、非線形スピン流が熱揺らぎで減衰しにくいことを意味する。

4-2. マグノンによるシフト・スピン流の生成 強磁性秩序およびフェリ磁性秩序を示す磁性絶縁体における、マグノンによるスピン流の整流効果を解析した。そして、フェリ磁性体では、ゼロ点振動によるマグノンが絶対零度で存在することを明らかにした。この磁気揺らぎを用いて光スピン流を作れることと関連している。一方で、強磁性体では、スピン流が生じないことが解った。以上の結果は、2マグノン過程によるシフト・スピン流の生成には、量子揺らぎが必要なことを示唆する。

続いて、マグノン数を保存しない励起過程を用いた共鳴機構による光誘起スピン流が生じることを確認した。この機構はマグノンを励起する機構であり、強磁性体でも光誘起スピン流が生じる。しかし、選択的にマグノンを励起する方法とは異なり、波数0のマグノン励起(群速度ゼロ)から光誘起スピン流が生成される。実際に、非線形スピン流の強度が準粒子寿命に依存しない等、従来の光誘起スピン流と異なる性質を持つことを確認した。

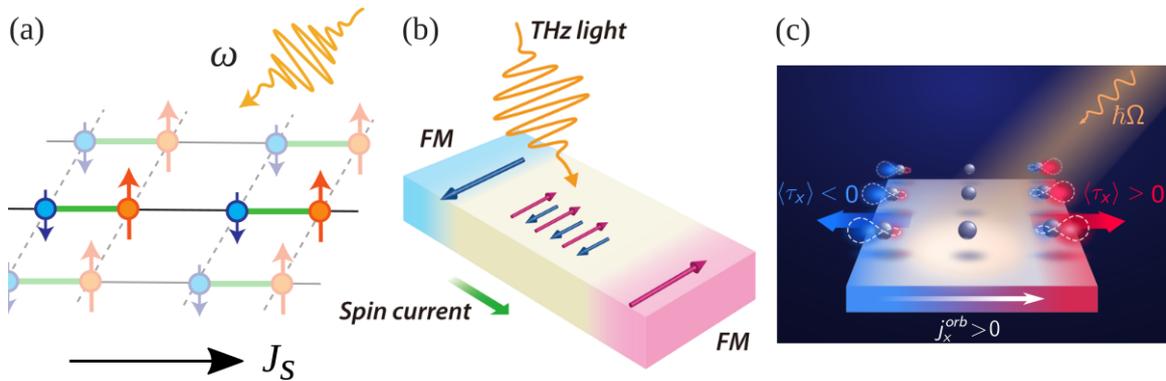


Figure 1: (a) 光誘起スピンの概念図. 光の照射によってスピン流 ( $J_s$ ) が生じる. (b) 実際の物質では, 試料の両端にスピンの蓄積が生じる. (c) 半導体における軌道流の概念図. スピン流同様, 試料の両端に誘電分極が生じる.

後者の場合についてより詳細な解析を行うため, マグノン数を保存しない励起過程における非線形応答理論の一般公式を導出した. この公式を用いて, マグノンのバンド1枚のみを介してスピン流が生じる1バンド過程と2つのバンドを介する2バンド過程の二つがあることを確認した. これらの過程のうち, 1バンド過程では波数ゼロのマグノンの群速度がゼロの場合にはスピン流が整流しない. 最近の関連した研究においてスピン流整流におけるジャロシンスキー・守屋 (DM) 相互作用の必要性が議論されているが, 上記の結果はこの結果と合致している. 一方で, 2バンド過程はマグノンの群速度に依存しないため, DM相互作用がない系でも見られる可能性があることを確認した. これが上述の共鳴機構による光誘起スピン流である.

4-3. 候補物質の探索 光誘起スピン流の実験的観測に向けて候補物質の探索を行った. 特に, 中性子散乱から有効模型が知られているCrハライド系の磁性絶縁体に着目し, この系の光誘起スピン流を解析した. 特に, 上述の1マグノン過程に着目した解析を行い, 2層Crハライドの有効模型において, 昨年発見した2バンド過程 (2つのマグノン・バンドを介した過程) によるスピン流が生じることを確認した. この系のスピン流密度はトイ・モデルを用いた先行研究の予測よりも大きく, Crハライド系物質の2層系を用いて大きな光誘起スピン流が生成できる可能性を明らかにすることができた. さらに, このスピン流は反強磁性秩序状態のみで生じ, 強磁性相では見られないこと, 磁気異方性や磁場を用いてマグノンの寿命を制御することでスピン流の強度を制御できることを見出した. これらの研究により, 光によるスピン流の整流効果の存在と候補物質が明らかとなった.

4-4. トポロジカル絶縁体における誘電分極と関連した非線形軌道応答 テラヘルツ光による非線形応答は, 磁性絶縁体以外にも, ナロー・ギャップ半導体などでも見られる. そこで, 反転対称性のある物質における軌道流の整流効果について解析を行った. トポロジカル絶縁体の代表的なモデルでもあるBHZ模型や, 2次元ディラック電子, 遷移金属カルコゲナイド系の有効模型を用いて応答強度や測定方法に関する解析を行った. その結果, 現在使用可能な強度のTHz光源でも測定可能な大きさの誘電分極を生成できることを見出した. 最後に, 計画外の成果として, トポロジカル絶縁体における, 光による誘電分極の生成が出来ることを見出した. 本結果は反転対称性のある物質でも非自明な光誘起現象が観られることを示した.

4-5. モアレ・グラフェンにおける相互作用と光応答 グラフェンのモアレ超構造は多彩な強相関効果が見られる興味深い系であると共に, 電子系のエネルギー・スケールが1-10 meV程度の物質であり, テラヘルツ光と同程度のエネルギー・スケールにあたる. 本研究では, モアレ超構造の一つである, 2層グラフェンのモアレ超構造における光起電効果と関連した電子格子冷却率の理論研究を行った. 具体的には, 昨年度行ったフラッドバンドの理論研究を拡張して, モアレ超構造の多バンド効果を考慮したモデルを立てた. そして, パーセル効果によるバンド間散乱の増幅効果を考慮した電子格子冷却率の公式を導出し, (1) この系の特殊な電子状態により光励起された電子の緩和時間が数桁早まること, (2) この効果が電子・フォノン相互作用におけるパーセル効果の一種として理解できることを明らかにした.

また, 同様の効果が電子間相互作用にも見られることを明らかにした. モアレ超構造の電気伝導におけるパーセル効果の有効模型を用いた評価から, この現象に起因して40K程度の高温までフェルミ液体的挙動が見られることを指摘した.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 10件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Akira Harada and Hiroaki Ishizuka   | 4. 巻<br>-                     |
| 2. 論文標題<br>Spin motive force by adiabatic charge pumping in Weyl semimetals   | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Phys. Rev. B  | 6. 最初と最後の頁<br>-               |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Sato Masahiro   | 4. 巻<br>129                   |
| 2. 論文標題<br>Large Photogalvanic Spin Current by Magnetic Resonance in Bilayer Cr Trihalides  | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>107201          |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevLett.129.107201   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Levitov Leonid  | 4. 巻<br>24                    |
| 2. 論文標題<br>Wide-range $T^2$ resistivity and umklapp scattering in moire graphene  | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>New Journal of Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>052001 ~ 052001 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1088/1367-2630/ac688c   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Jaoui Alexandre, Das Ipsita, Di Battista Giorgio, Diez-Merida Jaime, Lu Xiaobo, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Ishizuka Hiroaki, Levitov Leonid, Efetov Dmitri K. | 4. 巻<br>18                    |
| 2. 論文標題<br>Quantum critical behaviour in magic-angle twisted bilayer graphene   | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Nature Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>633 ~ 638       |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1038/s41567-022-01556-5   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Ueda Kentaro, Ishizuka Hiroaki, Kriener Markus, Kitou Shunsuke, Maryenko Denis, Kawamura Minoru, Arima Taka-hisa, Kawasaki Masashi, Tokura Yoshinori | 4. 巻<br>105           |
| 2. 論文標題<br>Experimental signatures of a versatile Weyl semimetal in a pyrochlore iridate with spin-ice-like magnetic orders                                    | 5. 発行年<br>2022年       |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B  | 6. 最初と最後の頁<br>L161102 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.105.L161102   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Davydova Margarita, Serbyn Maksym, Ishizuka Hiroaki   | 4. 巻<br>105               |
| 2. 論文標題<br>Symmetry-allowed nonlinear orbital response across the topological phase transition in centrosymmetric materials | 5. 発行年<br>2022年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B   | 6. 最初と最後の頁<br>L121407-1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.105.L121407  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名<br>Uchida Masaki, Sato Shin, Ishizuka Hiroaki, Kurihara Ryosuke, Nakajima Taro, Nakazawa Yusuke, Ohno Mizuki, Kriener Markus, Miyake Atsushi, Ohishi Kazuki, Morikawa Toshiaki, Bahramy Mohammad Saeed, Arima Taka-hisa, Tokunaga Masashi, Nagaosa Naoto, Kawasaki Masashi | 4. 巻<br>7                  |
| 2. 論文標題<br>Above-ordering-temperature large anomalous Hall effect in a triangular-lattice magnetic semiconductor  | 5. 発行年<br>2021年            |
| 3. 雑誌名<br>Science Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>eabi5381-1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1126/sciadv.abi5381  | 査読の有無<br>有                 |
| オープンアクセス<br>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<br>-                  |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Fahimniya Ali, Guinea Francisco, Levitov Leonid  | 4. 巻<br>21                |
| 2. 論文標題<br>Purcell-like Enhancement of Electron-Phonon Interactions in Long-Period Superlattices: Linear-Temperature Resistivity and Cooling Power | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Nano Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>7465 ~ 7471 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acs.nanolett.1c00565   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kitaori A., Kanazawa N., Ishizuka H., Yokouchi T., Nagaosa N., Tokura Y.                 | 4. 巻<br>103               |
| 2. 論文標題<br>Enhanced electrical magnetochiral effect by spin-hedgehog lattice structural transition | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B  | 6. 最初と最後の頁<br>L220410-1-5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.103.L220410   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Nagaosa Naoto   | 4. 巻<br>103              |
| 2. 論文標題<br>Large anomalous Hall effect and spin Hall effect by spin-cluster scattering in the strong-coupling limit | 5. 発行年<br>2021年          |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B   | 6. 最初と最後の頁<br>235148-1-8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.103.235148   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Nagaosa Naoto                           | 4. 巻<br>118               |
| 2. 論文標題<br>Theory of bulk photovoltaic effect in Anderson insulator | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Proceedings of the National Academy of Sciences           | 6. 最初と最後の頁<br>e2023642118 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1073/pnas.2023642118                 | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|  |                   |
|--|-------------------|
| 1. 著者名<br>Fujishiro Yukako, Kanazawa Naoya, Kurihara Ryosuke, Ishizuka Hiroaki, Hori Tomohiro, Yasin Fehmi Sami, Yu Xiuzhen, Tsukazaki Atsushi, Ichikawa Masakazu, Kawasaki Masashi, Nagaosa Naoto, Tokunaga Masashi, Tokura Yoshinori | 4. 巻<br>12        |
| 2. 論文標題<br>Giant anomalous Hall effect from spin-chirality scattering in a chiral magnet   | 5. 発行年<br>2021年   |
| 3. 雑誌名<br>Nature Communications  | 6. 最初と最後の頁<br>317 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41467-020-20384-w   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する      |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Nagaosa Naoto  | 4. 巻<br>11         |
| 2. 論文標題<br>Anomalous electrical magnetochiral effect by chiral spin-cluster scattering | 5. 発行年<br>2020年    |
| 3. 雑誌名<br>Nature Communications  | 6. 最初と最後の頁<br>2986 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41467-020-16751-2                                 | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Taniguchi Hiroki, Watanabe Mori, Tokuda Masashi, Suzuki Shota, Imada Eria, Ibe Takashi, Arakawa Tomonori, Yoshida Hiroyuki, Ishizuka Hiroaki, Kobayashi Kensuke, Niimi Yasuhiro | 4. 巻<br>10         |
| 2. 論文標題<br>Butterfly-shaped magnetoresistance in triangular-lattice antiferromagnet Ag <sub>2</sub> CrO <sub>2</sub>  | 5. 発行年<br>2020年    |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>5247 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-020-59578-z  | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Taniguchi Hiroki, Watanabe Mori, Tokuda Masashi, Suzuki Shota, Imada Eria, Ibe Takashi, Arakawa Tomonori, Yoshida Hiroyuki, Ishizuka Hiroaki, Kobayashi Kensuke, Niimi Yasuhiro | 4. 巻<br>10         |
| 2. 論文標題<br>Butterfly-shaped magnetoresistance in triangular-lattice antiferromagnet Ag <sub>2</sub> CrO <sub>2</sub>  | 5. 発行年<br>2020年    |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>2525 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-020-59578-z  | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Shang-Shun, Ishizuka Hiroaki, Zhang Hao, Halasz Gabor B., Batista Cristian D.   | 4. 巻<br>101         |
| 2. 論文標題<br>Real-space Berry curvature of itinerant electron systems with spin-orbit interaction | 5. 発行年<br>2020年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B   | 6. 最初と最後の頁<br>24420 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.101.024420   | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する        |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Sato Masahiro   | 4. 巻<br>100          |
| 2. 論文標題<br>Theory for shift current of bosons: Photogalvanic spin current in ferrimagnetic and antiferromagnetic insulators | 5. 発行年<br>2019年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review B   | 6. 最初と最後の頁<br>224411 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevB.100.224411   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Mori Shigeo, Ishizuka Hiroaki, Cheong Sang-Wook, Nagaosa Naoto, Yamada Yasusada | 4. 巻<br>88                    |
| 2. 論文標題<br>A New Aspect of the Charged Domain Wall in Hexagonal RMnO3 Systems (R: Y, In)  | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Physical Society of Japan  | 6. 最初と最後の頁<br>124603 ~ 124603 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.7566/JPSJ.88.124603  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Nagaosa Naoto   | 4. 巻<br>9           |
| 2. 論文標題<br>Tilting dependence and anisotropy of anomaly-related magnetoconductance in type-II Weyl semimetals | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>16149 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-019-51846-x  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Kato Yasuyuki, Ishizuka Hiroaki  | 4. 巻<br>12          |
| 2. 論文標題<br>Colossal Enhancement of Spin-Chirality-Related Hall Effect by Thermal Fluctuation | 5. 発行年<br>2019年     |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Applied  | 6. 最初と最後の頁<br>21001 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevApplied.12.021001                                 | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>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<br>-           |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Yang, Holder Tobias, Ishizuka Hiroaki, de Juan Fernando, Nagaosa Naoto, Felser Claudia, Yan Binghai | 4. 巻<br>10         |
| 2. 論文標題<br>Switchable magnetic bulk photovoltaic effect in the two-dimensional magnet CrI3                          | 5. 発行年<br>2019年    |
| 3. 雑誌名<br>Nature Communications   | 6. 最初と最後の頁<br>3738 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41467-019-11832-3  | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する       |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Okumura Shun, Ishizuka Hiroaki, Kato Yasuyuki, Ohe Jun-ichiro, Motome Yukitoshi | 4. 巻<br>115                   |
| 2. 論文標題<br>Spin-current diode with a monoaxial chiral magnet                              | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>012401 ~ 012401 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5097866   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Ishizuka Hiroaki, Sato Masahiro  | 4. 巻<br>122          |
| 2. 論文標題<br>Rectification of Spin Current in Inversion-Asymmetric Magnets with Linearly Polarized Electromagnetic Waves | 5. 発行年<br>2019年      |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>197702 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1103/PhysRevLett.122.197702   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 15件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Photocurrent induced by the momentum-space Berry phase in magnetic materials at a microwave frequency |
| 3. 学会等名<br>13th International Conference on Metamaterials, Phononic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)        |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Skew scattering by magnetic monopoles and anomalous Hall effect in spin-orbit coupled systems |
| 3. 学会等名<br>8th International Conference on Superconductivity and Magnetism (国際学会)                        |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka   |
| 2. 発表標題<br>Spin motive force by adiabatic charge pumping in Weyl semimetals |
| 3. 学会等名<br>APS March Meeting 202  |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Skew scattering by magnetic monopoles and anomalous Hall effect in spin-orbit coupled systems |
| 3. 学会等名<br>ISSP Workshop on Chirality  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Skew scattering by magnetic monopoles and anomalous Hall effect in spin-orbit coupled systems |
| 3. 学会等名<br>Asia-Pacific Conference on Condensed-Matter Physics 2022 (国際学会)                               |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>石塚大晃、佐藤正寛               |
| 2. 発表標題<br>2次元磁性絶縁体を用いた光誘起マグノン流の理論 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2022年秋季大会        |
| 4. 発表年<br>2022年                    |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>石塚大晃、原田明                   |
| 2. 発表標題<br>ワイル半金属の波数空間のベリー位相によるスピン駆動力 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2022年秋季大会           |
| 4. 発表年<br>2022年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>持田隼、石塚大晃                           |
| 2. 発表標題<br>スピン軌道相互作用による磁気モノポールのskew散乱と異常ホール効果 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2022年秋季大会                   |
| 4. 発表年<br>2022年                               |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Purcell-like enhancement of interactions and wide-range $T^2$ resistivity in moire graphene |
| 3. 学会等名<br>MSI Singapore (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Purcell-like enhancement of interactions and wide-range $T^2$ resistivity in moire graphene |
| 3. 学会等名<br>Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka   |
| 2. 発表標題<br>Wide-range $T^2$ resistivity and umklapp scattering in moire graphene  |
| 3. 学会等名<br>29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>石塚 大晃, 佐藤 正寛                        |
| 2. 発表標題<br>CrA3 (A=I,Br)における磁気共鳴による非線形マグノン流の理論 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第77回年次大会                     |
| 4. 発表年<br>2022年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Anomalous Hall effect and nonreciprocal transport phenomena due to magnetic multiple scattering |
| 3. 学会等名<br>Young Leaders Workshop: Emerging Quantum Spintronics (招待講演) (国際学会)                              |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Anomalous Hall effect and nonreciprocal transport phenomena in chiral magnets     |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Frustration, Topology and Spin Textures (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka, Masahiro Sato                              |
| 2. 発表標題<br>Photogalvanic spin current of magnons in magnetic insulators |
| 3. 学会等名<br>March Meeting 2022 of American Physical Society (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka, Ali Fahimniya, Francisco Guinea, Leonid Levitov |
| 2. 発表標題<br>モアレ超構造におけるフォノンのパーセル効果：電気抵抗と電子格子冷却の増幅                              |
| 3. 学会等名<br>NIMS ワークショップ - Strongly-correlated and topological materials 2021 |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka, Ali Fahimniya, Francisco Guinea, Leonid Levitov  |
| 2. 発表標題<br>Purcell-like enhancement of electron-phonon interactions in long-period superlattices: Linear-T resistivity and cooling power                                    |
| 3. 学会等名<br>24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems and 20th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka, Ali Fahimniya, Francisco Guinea, Leonid Levitov   |
| 2. 発表標題<br>Purcell-like enhancement of electron-phonon interactions in long-period superlattices: Linear-T resistivity and cooling power |
| 3. 学会等名<br>International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2020/2021 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka, Leonid Levitov |
| 2. 発表標題<br>電子間相互作用を起源とした非線形電気抵抗の理論          |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2021年度秋季大会                |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka, Ali Fahimniya, Francisco Guinea, Leonid Levitov |
| 2. 発表標題<br>Tunable electron-phonon interactions in moire graphene            |
| 3. 学会等名<br>March Meeting 2021 of American Physical Society (国際学会)            |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|                                |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名<br>石塚 大晃、永長 直人         |
| 2. 発表標題<br>アンダーソン絶縁体におけるバルク光電流 |
| 3. 学会等名<br>, 日本物理学会 第76回年次大会   |
| 4. 発表年<br>2021年                |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>石塚 大晃                   |
| 2. 発表標題<br>磁気揺らぎによる非対称散乱と磁気輸送現象の理論 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第76回年次大会 (招待講演)  |
| 4. 発表年<br>2021年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka   |
| 2. 発表標題<br>Asymmetric magnetic scattering and transport phenomena in chiral magnets |
| 3. 学会等名<br>Correlated Electrons Virtual International Seminars 2020 (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|                             |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名<br>石塚 大晃、永長 直人      |
| 2. 発表標題<br>磁気揺らぎによる非相反電流の理論 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2020年秋季大会 |
| 4. 発表年<br>2020年             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>石塚 大晃、Ali Fahimniya、Francisco Guinea、Leonid Levitov |
| 2. 発表標題<br>モアレ・グラフェンにおける電子フォノン相互作用の制御                          |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2020年秋季大会                                    |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka   |
| 2. 発表標題<br>Optical rectification of spin current in magnetic insulators |
| 3. 学会等名<br>3rd Asia Pacific Workshop on Quantum Magnetism (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka          |
| 2. 発表標題<br>トポロジカル半金属におけるベリー位相効果と輸送現象 |
| 3. 学会等名<br>TMS連携研究会 (招待講演)           |
| 4. 発表年<br>2019年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka  |
| 2. 発表標題<br>Theory of photovoltaic effect in the THz frequency domain: Application to Weyl semimetals and magnetic insulators |
| 3. 学会等名<br>CEMS Research Camp: Energy harvesting and information transforming  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroaki Ishizuka, Masahiro Sato                               |
| 2. 発表標題<br>Theory of spin-current solar cells using quantum spin systems |
| 3. 学会等名<br>CEMS Symposium on Emergent Quantum Materials 2019 (国際学会)      |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>谷口 祐紀, 渡邊 杜, 徳田 将志, 井邊 昂志, 荒川 智紀, 吉田 紘行, 石塚 大晃, 小林 研介, 新見 康洋 |
| 2. 発表標題<br>三角格子反強磁性体Ag <sub>2</sub> CrO <sub>2</sub> 薄膜における磁気伝導測定       |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2019年秋季大会   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>石塚 大晃, 永長 直人               |
| 2. 発表標題<br>スカラー・カイラリティによる大角度スキュー散乱の理論 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2019年秋季大会           |
| 4. 発表年<br>2019年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>石塚 大晃, 佐藤 正寛                |
| 2. 発表標題<br>直線偏光テラヘルツ光によるシフト・マグノン流生成の理論 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2019年秋季大会            |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐藤 正寛, 石塚 大晃                  |
| 2. 発表標題<br>レーザー駆動スピン流生成装置としてのフェリおよび反強磁性体 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 2019年秋季大会              |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

巨大な磁場応答を示す三角格子磁性半導体  
<https://www.titech.ac.jp/news/2021/062706>

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|