

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14664

研究課題名（和文）磁性絶縁体のマグノンの凝縮と熱輸送に対するマグノン間相互作用の影響の解明

研究課題名（英文）Elucidation of effects of interactions between magnons on magnon condensation and thermal transport in magnetic insulators

研究代表者

荒川 直也（Arakawa, Naoya）

中央大学・理工学研究所・専任研究員

研究者番号：20736326

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：磁性絶縁体のマグノンの凝縮や輸送現象に対するマグノン間相互作用の影響について系統的な理論研究を行い、以下の成果を得ました。1. フェリ磁性絶縁体のマグノン輸送現象におけるマグノン間相互作用が誘起するバンド間マグノンドラッグの発見、2. キヤントした反強磁性絶縁体のマグノン輸送現象における新しいマグノンドラッグ（ノンコリニアな磁性絶縁体特有のマグノン間相互作用の影響）の発見、3. らせん磁性絶縁体のマグノンエネルギー分散やマグノンペア凝縮の安定性に対するマグノン間相互作用の影響の解明。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグノンの流れを使う磁性絶縁体のスピントロニクス理解にはマグノン間相互作用の理解が必要不可欠でしたが、これまでの多くの研究ではその影響は無視されていました。本研究により、磁性絶縁体のマグノンの輸送現象においてマグノン間相互作用があるからこそ実現する新しい性質を発見しました。本研究の成果は磁性絶縁体のスピントロニクスにおけるマグノン間相互作用の物理の学理構築として学術的意義があります。また、本研究で発見した新しい性質を利用することで磁性絶縁体のマグノンの熱流やスピン流の大きさの変調が可能になるため、社会的にも意義のある成果です。

研究成果の概要（英文）：We conducted the systematic, theoretical studies about the effects of magnon-magnon interactions on magnon condensation and transport phenomena of several magnetic insulators, and obtained the following results: 1. the finding of an interband magnon drag induced by the magnon-magnon interaction in magnon transport phenomena of a ferrimagnetic insulator, 2. the finding of a new magnon drag, an interaction effect characteristic of noncollinear magnets, in magnon transport phenomena of a canted antiferromagnetic insulator, and 3. the understanding of the effects of the magnon-magnon interaction on the magnon energy dispersion and pair condensation in a spiral magnetic insulator.

研究分野：物性物理学

キーワード：スピントロニクス マグノン 磁性絶縁体 マグノン間相互作用 輸送現象

## 1. 研究開始当初の背景

金属や半導体のエレクトロニクスでは電子の電荷の流れ(電流)を使うのに対し、磁性絶縁体のスピントロニクスではマグノンの流れを使います。磁性絶縁体では、強磁性などの磁気秩序によるスピン配列が基底状態で実現し、そのスピン配列からのずれをマグノンが記述します。そのため、金属中の電子と同じように、マグノンはエネルギーやスピン角運動量を運ぶことができます。つまり、マグノンは熱流やスピン流を生成できます。また、マグノンは Bose 粒子とみなすことができるので、低温で Bose-Einstein 凝縮 (BEC) を起こす場合があります。

本研究課題以前にも磁性絶縁体のマグノン BEC やマグノン輸送現象の研究は活発に行われていましたが、それらに対するマグノン間相互作用の影響の理解が不十分でした。金属や半導体中の電子が有限の電子間相互作用を持つと同様に、磁性絶縁体中のマグノンは有限のマグノン間相互作用を持ちます。そのため、磁性絶縁体のマグノン BEC は、マグノン間相互作用が斥力の場合には安定に保たれますが、引力の場合には不安定になります。また、金属の電気抵抗などの電荷輸送の輸送係数が電子間相互作用の影響を受けるのと同様に、磁性絶縁体のマグノンのスピン輸送や熱輸送の輸送係数もマグノン間相互作用の影響を受けると予想できます。したがって、マグノンを使うスピントロニクスの理解には、マグノン間相互作用の影響の理解が必要不可欠です。しかし、本研究課題以前の多くの理論研究では、解析を簡単にするため、マグノン間相互作用の影響は無視されてきました。

本研究課題の採択までの時点で、フェリ磁性絶縁体や反強磁性絶縁体のマグノン BEC の安定性に対するマグノン間相互作用の影響の解析を行い、それらの成果を国際誌で出版済みでした (Arakawa, Phys. Rev. Lett. 121, 187202 (2018); Arakawa, Phys. Rev. B 99, 014405 (2019) )

## 2. 研究の目的

本研究課題では、磁性絶縁体のマグノン BEC とマグノン輸送現象に対するマグノン間相互作用の影響を、磁性絶縁体の磁気構造の対称性の違いも含めて、系統的に解明し、マグノン間相互作用を利用する新しい研究の方向性の開拓を目的としました。異なる磁気構造を持つ磁性絶縁体の対称性の違いに由来する性質やそれらによらない普遍的な性質、これまでの解釈の妥当性や限界を解明し、今後の研究の指針の提示や新しい性質の予言を目指しました。

## 3. 研究の方法

### (1) マグノン輸送現象に対するマグノン間相互作用の影響を調べた方法

磁性絶縁体のマグノン熱輸送やスピン輸送の輸送係数に対するマグノン間相互作用の影響を調べるため、場の理論 (Green 関数の方法) と線形応答理論を組み合わせた手法を使いました。マグノン間相互作用を考慮したハミルトニアンを Holstein-Primakoff の方法で導出し、温度勾配や磁場勾配などの外場によってマグノンの熱流やスピン流を生成する輸送現象を線形応答理論で定式化し、それらの輸送現象の輸送係数の式を場の理論で導出しました。得られた輸送係数の式を数値計算で見積もり、その温度依存性や磁場依存性を調べました。

### (2) マグノンのエネルギー分散やペアー凝縮に対するマグノン間相互作用の影響を調べた方法

らせん磁性体のマグノンのエネルギー分散やマグノンのペアー凝縮に対するマグノン間相互作用の影響を調べるため、場の理論を使いました。Holstein-Primakoff の方法を使ってマグノン間相互作用の主要項を導出し、その主要項を場の理論で摂動として扱い、マグノンのエネルギー分散やマグノンペアー凝縮に対するマグノン間相互作用の影響を解析しました。

### (3) 非平衡マグノンケミカルポテンシャルを調べた方法

時間依存する磁場を含む二種類の磁場をかけたフェリ磁性絶縁体の非平衡状態におけるマグノンケミカルポテンシャルの生成機構を調べるため、マスター方程式の方法を使いました。Holstein-Primakoff の方法でマグノンのハミルトニアンを導出し、マグノンの密度演算子の運動方程式をマスター方程式の形に書き換え、非平衡定常状態のマグノンケミカルポテンシャルの値を求めました。(後述するように、本研究は本研究課題の構想段階では計画していなかったもので、学会発表で他の研究者の方々との議論をきっかけとして行なった研究です。)

#### 4. 研究成果

本研究課題の主要な成果は、以下の四つです。

##### (1) フェリ磁性絶縁体のマグノン輸送現象におけるバンド間マグノンドラッグの発見

コリニアな磁性絶縁体のマグノン輸送現象に対するマグノン間相互作用の影響として、あるバンドのマグノンが異なるバンドのマグノンのスピン流や熱流をドラッグする、バンド間マグノンドラッグを発見しました (Arakawa, Phys. Rev. B 105, 174303 (2022))。コリニアな磁性絶縁体的一种であるフェリ磁性絶縁体について、輸送係数としてスピンゼーベック係数とマグノン熱伝導度、マグノン伝導度の三つを対象とし、それらの輸送係数の温度依存性に対するマグノン間相互作用の影響を調べました。その結果、マグノン間相互作用が誘起する、異なるバンドのマグノン間の運動量移行のため、バンド間マグノンドラッグが誘起され、マグノン伝導度の増大とマグノン熱伝導度の減少を引き起こすことを発見しました。この結果は、バンド間マグノンドラッグがマグノンのスピン流を増大させ、マグノンの熱流を減少させることを示唆しています。また、スピンゼーベック係数に対する影響は、スピン流への影響と熱流への影響の相殺のため、ほとんどないことも分かりました。従来のマグノンドラッグは、マグノンが電子の流れをドラッグする現象なので、本研究で発見したバンド間マグノンドラッグは、マグノン間相互作用があるからこそ実現する、新しい性質と言えます。

##### (2) ノンコリニアな反強磁性絶縁体のマグノン輸送現象における新しいマグノンドラッグの発見

ノンコリニアな磁性絶縁体特有のマグノン相互作用の影響として、マグノンがマグノンのスピン流や熱流を誘起する、新しいマグノンドラッグを発見しました (Arakawa, Phys. Rev. B 106, 064306 (2022))。ノンコリニアな磁性絶縁体として (各サイトのスピニング) キャントした反強磁性絶縁体を考え、上記の研究と同様に三つの輸送係数の温度依存性に対するマグノン間相互作用の影響を調べました。ノンコリニアな磁性絶縁体では、フェリ磁性絶縁体などのコリニアな磁性絶縁体と異なり、各サイトの隣り合うスピン同士が有限の傾き角を持ちます。この異なる対称性のスピン構造のため、ノンコリニアな磁性絶縁体ではマグノン演算子の三次の項が有限になる場合があります。このノンコリニアな磁性絶縁体特有のマグノン間相互作用によるマグノン間の運動量移行のため新しいマグノンドラッグが誘起され、低温で三つの輸送係数の値の増大を引き起こすことを発見しました。また、磁場を強くすると、それらの輸送係数が (この新しいマグノンドラッグの影響により) 低温でピークを持つことも明らかにしました。この新しいマグノンドラッグが上述のバンド間マグノンドラッグと大きく異なるのは、低温でも非常に大きな影響がある点です。(バンド間マグノンドラッグはある温度以上でのみ影響があります。) 金属や半導体中の電子の電子間相互作用の影響も通常は低温で無視できるので、この低温でも無視できない性質は質的に新しい相互作用効果といえます。また、この性質はノンコリニアな磁気構造特有のマグノン間相互作用特有の性質のため、磁気構造の対称性の違いによる特殊な性質です。

##### (3) らせん磁性絶縁体のマグノンのエネルギー分散やペアー凝縮に対するマグノン間相互作用の影響の解明

Heisenberg 相互作用と Dzyaloshinsky-守谷相互作用を持つらせん磁性絶縁体のマグノン間相互作用の主要項を特定し、マグノンのエネルギー分散やマグノンペアー凝縮の安定性に対するその影響を解明しました (Arakawa, Phys. Rev. B 101, 064411 (2020))。まず、らせん磁性絶縁体がノンコリニアな磁性絶縁体であるにも関わらず、マグノン演算子の三次の項の係数がゼロになり、コリニアな磁性絶縁体と同様にマグノン間相互作用の主要項がマグノン演算子の四次の項になることを発見しました。(当初の計画では、ノンコリニアな磁性絶縁体としてらせん磁性絶縁体を対象とし、このノンコリニアな磁性絶縁体特有のマグノン間相互作用の影響を調べる予定でしたが、この結果のため計画を修正しました。) この結果は、ノンコリニアな磁性絶縁体でのみ有限になる、マグノン演算子の三次の項が、ノンコリニアな磁性絶縁体であれば必ずしもノンゼロになるとは限らないことを示唆しています。次に、マグノン間相互作用の主要項の主たる影響がマグノンのエネルギー分散の傾きの変調になることも明らかにしました。この結果は、これまでの多くの研究でマグノン間相互作用を無視した理論と実験が定性的に一致していた理由を説明できます。さらに、マグノン間相互作用によりマグノンペアーの振幅は有限になるが、マグノンペアーの凝縮は誘起しないこともわかりました。

##### (4) 二種類の磁場をかけたフェリ磁性絶縁体の非平衡マグノンケミカルポテンシャル発現機構の解明

時間に依存しない磁場と時間に依存する磁場の二つの磁場をあてたフェリ磁性絶縁体の非平衡定常状態で有限のマグノンケミカルポテンシャルが実現する機構を解明しました (Arakawa, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 084704 (2019))。通常の Bose 粒子の BEC と同様に、マグノンの BEC ではマグノンケミカルポテンシャルの値が重要になります。しかし、平衡状態ではその値がゼロになることが知られており、磁性絶縁体において実験で実現するマグノン BEC を理論的に理解するには有限のマグノンケミカルポテンシャルを実現する機構の理解が必要でした。(このことに、学会発表で他の研究者の方々との議論で気づき、当初の研究計画を変更し、本研究を行いました。) マグノン BEC の実験と同様の状況として、二種類の磁場をかけたフェリ磁性絶縁体の非平

平衡状態を解析する理論を構築し、その非平衡定常状態でのマグノンケミカルポテンシャルの値を見積もりました。そして、時間依存する磁場の影響で有限のマグノンケミカルポテンシャルが実現し、その値が時間に依存する磁場の振動数の半分の値になることがわかりました。本成果は、JPSJのEditors' Choiceに選ばれ、科学新聞(2019年9月6日号4面)で紹介されました。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Naoya Arakawa	4. 巻 106
2. 論文標題 Magnon drag induced by magnon-magnon interactions characteristic of noncollinear magnets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064306_1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.106.064306	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 Naoya Arakawa	4. 巻 129
2. 論文標題 Erratum: Stabilizing Mechanism for Bose-Einstein Condensation of Interacting Magnons in Ferrimagnets and Ferromagnets [Phys. Rev. Lett. <b>121</b>, 187202 (2018)]	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 259901_1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.129.259901	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 Naoya Arakawa, Kenji Yonemitsu	4. 巻 6
2. 論文標題 Symmetry-protected difference between spin Hall and anomalous Hall effects of a periodically driven multiorbital metal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-023-01153-9	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 Naoya Arakawa, Kenji Yonemitsu	4. 巻 104
2. 論文標題 Polarization-dependent magnetic properties of periodically driven $\text{-RuCl}_3$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214413_1-22
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.214413	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 Naoya Arakawa, Kenji Yonemitsu	4. 巻 103
2. 論文標題 Floquet engineering of Mott insulators with strong spin-orbit coupling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L100408	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 Naoya Arakawa	4. 巻 101
2. 論文標題 Effects of magnon-magnon interactions in a noncollinear magnet induced by combination of a symmetric and an antisymmetric exchange interaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064411_1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.064411	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 Naoya Arakawa	4. 巻 88
2. 論文標題 Mechanism for a Chemical Potential of Nonequilibrium Magnons in Parametric Parallel Pumping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 084704_1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.084704	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 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 荒川直也
2. 発表標題 反強磁性体のマグノン輸送現象の線形応答理論とバンド間ドラッグ
3. 学会等名 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒川直也
2. 発表標題 フェリ磁性絶縁体のマグノン輸送現象に対するマグノン間相互作用の影響
3. 学会等名 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒川直也、米満賢治
2. 発表標題 光照射した -RuC <sub>3</sub> の磁氣的性質の偏光依存性
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 荒川直也、米満賢治
2. 発表標題 光照射した -RuCl <sub>3</sub> のFloquet理論による解析
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 荒川直也
2. 発表標題 Dzyaloshinsky-守谷相互作用を持つらせん磁性体のマグノン間相互作用の影響
3. 学会等名 第75回年次大会（日本物理学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒川直也
2. 発表標題 2種類の磁場をかけたフェリ磁性体の非平衡定常状態と マグノンケミカルポテンシャル発現機構
3. 学会等名 第13回 東邦大学複合物性研究センターシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒川直也
2. 発表標題 フェリ磁性絶縁体のパラレルパンピングにおける非平衡定常状態とマグノンケミカルポテンシャル
3. 学会等名 2019年秋季大会（日本物理学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒川直也、米満賢治
2. 発表標題 二つの円偏光を重ねた光をあてた多軌道金属のスピンホール効果と異常ホール効果
3. 学会等名 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 荒川直也
2. 発表標題 多軌道金属のスピン輸送における多体効果とスピunkerロンドラッグ
3. 学会等名 2023年春季大会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 荒川直也
2. 発表標題 ノンコリニア反強磁性体における新しいマグノンドラッグとマグノンスピントロニクスの特異な温度・磁場依存性
3. 学会等名 カイラル物質科学の新展開
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒川直也、米満賢治
2. 発表標題 光を当てた多軌道金属のスピンホール効果と異常ホール効果
3. 学会等名 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------