

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13876

研究課題名（和文）スキルミオン結晶を利用したマグノン伝搬制御

研究課題名（英文）Magnon propagation control by using magnetic skyrmion crystal

研究代表者

高木 里奈 (Takagi, Rina)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：50742417

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：物質中の多数の電子スピンの振動によって作られる波であるマグノンは、絶縁体中でも利用可能なジュール損失のない情報伝送媒体の候補であり、低消費電力デバイスへの応用が期待されている。本研究は、スキルミオンと呼ばれる微小なスピン渦が自発的に形成する「スキルミオン結晶」を用いたマグノン特性の制御を目的としている。スキルミオン結晶を伴うキラル磁性絶縁体において、マグノンモード混成に由来するギャップ構造の観測に成功した。さらに、極性磁性絶縁体のスキルミオン結晶相において磁気共鳴ダイナミクスの観測に成功し、観測したモードの周波数分布や選択則を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質中のトポロジカル欠陥の一種であるスキルミオンは、安定な粒子としての性質を持つことから磁気記録・演算のための新しい情報担体としての応用が見込まれている。電流による制御を目指す観点から、金属中でのスキルミオンのダイナミクスが盛んに研究されている。一方、絶縁体中ではマグノン制御にスキルミオンを活用できる可能性があり、本研究では、絶縁体中のスキルミオンを用いてマグノンモードを制御できることを実証し、その微視的な機構を明らかにした。これは、マグノン制御法の確立に向けた新しい切り口を与えるものと考えられ、さらにマグノン研究の舞台となりうるスキルミオン物質の開拓にも繋がること期待される。

研究成果の概要（英文）：Magnon, a wave generated by the oscillation of a large number of electron-spins in a material, is a candidate for Joule-loss-free information carrier that can be used in insulators, and are expected to be applied to low-power devices. The aim of this work is to control magnon properties using “skyrmion crystals”, which are spontaneously formed by nanometric spin vortices called skyrmions. In the chiral magnetic insulator hosting skyrmion crystal, we have successfully observed a gap structure originating from magnon-magnon hybridization. We have also succeeded in revealing magnetic resonance dynamics in the skyrmion crystal phase of the polar magnetic insulator, and found the frequency distribution and selection rule of the observed modes.

研究分野：物性物理学

キーワード：磁気スキルミオン マグノン スピン波分光 ナノ周期構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

局在スピンの集団励起であるスピン波(マグノン)は、絶縁体中でも利用できるジュール損失のない新しい情報伝送媒体の候補として注目を集めている。マグノンを活用した高効率な情報技術の実現に向け、近年、マグノン制御に関する研究が盛んに行われている。これまでの研究ではもっぱら、微細加工によって作成した強磁性体の周期構造が利用されており、その典型的な周期は数百 nm から数百 μm である。より短い波長のマグノン制御に向けては数 nm から数十 nm の短周期構造が必要となるが、ナノスケールの微細デバイス中では強磁性そのものが不安定になる上、微細加工の技術的な難しさを伴うといった問題がある。

2. 研究の目的

本研究では、磁性体中の自己組織的なナノ周期構造であるスキルミオン結晶を活用したマグノン特性の制御を目指した。磁性体中では複数の磁気相互作用が拮抗することにより周期的な磁気構造が自発的に形成されることがある。例えばキラル・極性など空間反転対称性の破れた結晶構造を持つ磁性体中では、強磁性的な交換相互作用とジャロシンスキ・守谷相互作用の拮抗を起源としてらせん磁気構造やスキルミオン結晶といった周期的に変調された磁気秩序が安定化されることが知られている。スキルミオンは、直径数 nm ~ 数百 nm の渦状スピン構造であり、多数のスキルミオンが凝集すると自発的に格子を組んだ「スキルミオン結晶」を形成する。スキルミオン結晶を生じる物質の多くは金属であるが、いくつかの絶縁体物質においても数十 nm 周期のスキルミオン結晶が観測されており、マグノン制御の舞台となることが期待される。本研究では、スキルミオン結晶を伴う磁性絶縁体 Cu_2OSeO_3 および VOSe_2O_5 に着目し、磁気共鳴によって励起したマグノンモードの測定、評価を行った。

3. 研究の方法

本研究では、対象物質である Cu_2OSeO_3 および VOSe_2O_5 において磁気共鳴ダイナミクスの観測を通じて、マグノン特性の評価を行った。具体的には、各物質に対して下記のような実験方法を適用した。

(1) キラル磁性絶縁体 Cu_2OSeO_3 のスキルミオン結晶相におけるマグノンモード混成の観測

キラルな結晶構造を持つ磁性絶縁体 Cu_2OSeO_3 のスキルミオン結晶相では、スキルミオンが時計回り・反時計回りに回転する clockwise (CW) モードと counterclockwise (CCW) モード、またスキルミオンの伸縮運動に対応する breathing モードと呼ばれる 3 つの共鳴モードが GHz 帯の振動磁場によって励起されることが理論・実験の両面で明らかにされている。また最近の理論計算では、スキルミオン結晶相においてマグノンバンドがエネルギー的に縮退していることが指摘されており、外場によって磁気パラメータを制御することでマグノンモード混成が生じることが期待される。

Cu_2OSeO_3 のバルク結晶中では、磁気秩序温度直下の狭い温度・磁場領域においてのみスキルミオン結晶が安定に存在するが、薄片試料では磁場下冷却によって準安定状態のスキルミオン結晶を広い温度・磁場範囲で安定化できることが知られている。この準安定スキルミオン結晶を利用することで、温度・磁場による磁気パラメータの変化に伴ってマグノンモードを制御できることが期待される。そこで本研究では、集束イオンビーム (FIB) 法で切り出した Cu_2OSeO_3 薄片試料を、Si 基板上に作成したウェーブガイド上に固定し (図 1)、準安定スキルミオン結晶状態における磁気共鳴モードの詳細な温度・磁場依存性を測定した。

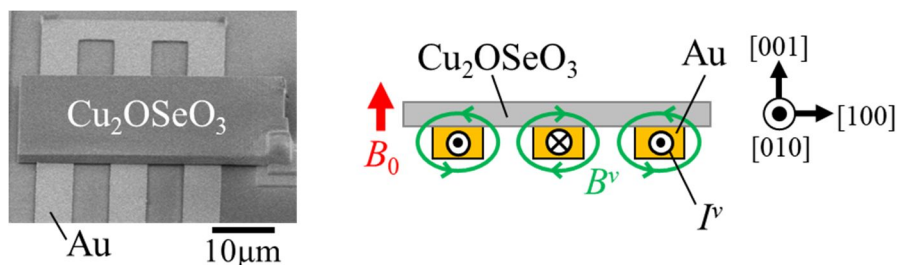


図 1. (左)磁気共鳴測定に用いたデバイスの SEM 画像。Si 基板上に作成したウェーブガイドの上に Cu_2OSeO_3 薄片試料を FIB によって固定した。

(右)側面から見たデバイスの模式図。ウェーブガイドに GHz 帯の周波数の振動電流を注入することで試料に振動磁場を印加し、磁気共鳴を励起した。

(2) 極性磁性絶縁体 VOSe_2O_5 のスキルミオン結晶相におけるマグノンダイナミクスの観測

スキルミオンのスピントクスチャは結晶構造の対称性に依存して変化し、キラル構造では

Bloch 型、極性構造では Neel 型と呼ばれるスキルミオンが発現することが知られている。スキルミオン結晶相におけるマグノンダイナミクスは、異なるスピネクスタチャに対して変化することが期待される。そこで本研究では、極性構造のもとで発現する Neel 型スキルミオン結晶のマグノンダイナミクスの解明を目指した。具体的には、極性構造を伴う磁性絶縁体 VOSe_2O_5 のバルク単結晶試料において、マイクロストリップラインを用いた磁気共鳴測定を行った。

4. 研究成果

(1) キラル磁性絶縁体 Cu_2OSeO_3 のスキルミオン結晶相におけるマグノンモード混成の観測

Cu_2OSeO_3 の準安定スキルミオン結晶状態において磁気共鳴スペクトルを測定したところ、スキルミオンの CCW モードと breathing モードにギャップが開いていることを発見した (図 2(a))。ギャップ近傍の構造を詳しく調べると、異なるモードと反交差しているような振舞いが観測され、さらにギャップの大きさは低温に向けて単調に増大していくことを明らかにした。このギャップの起源を明らかにするため、共同研究を通してスキルミオン結晶状態における磁気共鳴スペクトルの理論計算を行った。その結果、立方晶の磁気異方性を取り入れることで磁気共鳴に不活性なスキルミオンの六極子 (sextupole) モード・八極子 (octupole) モードが、CCW モード・breathing モードにそれぞれ混成することを発見した。 Cu_2OSeO_3 では低温に向けて立方晶の磁気異方性が増大することが報告されており、観測したギャップの大きさの温度依存性は、磁気異方性の温度変化によって説明できることを明らかにした。

Cu_2OSeO_3 はスキルミオン結晶相においてマルチフェロイクスの性質を示すことが知られており、電場印加によって対称性を破ることで、結晶磁気異方性と同様にマグノンモード混成を引き起こせる可能性がある。今後、こうした外場によるマグノン特性制御へと発展することが期待される。

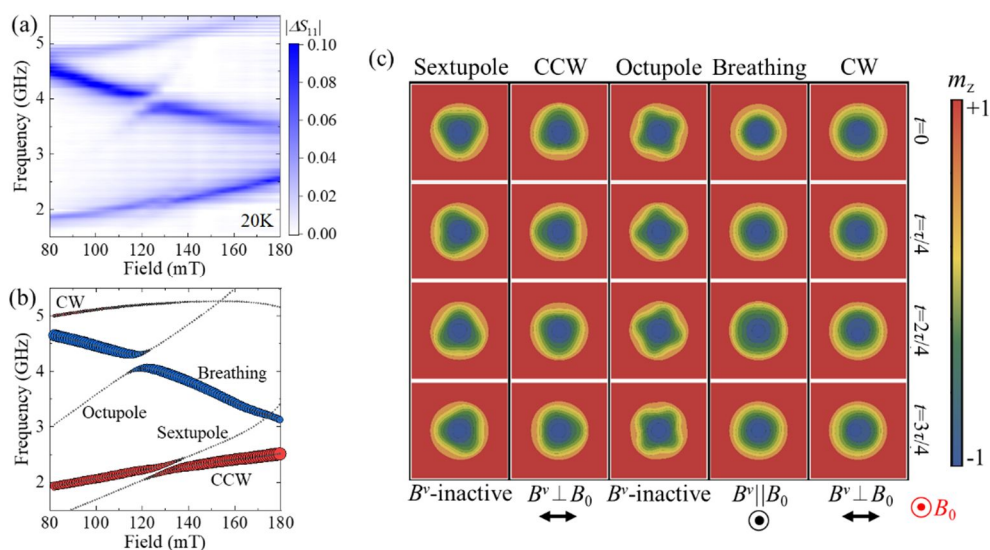


図 2. (a) 実験で得られた準安定スキルミオン結晶相における磁気共鳴スペクトル。(b) 磁気異方性を取り入れたモデルを用いた理論計算によって得られた磁気共鳴スペクトル。(c) 紙面垂直方向の局所磁化分布の時間発展の様子。本研究ではモード混成を通じて、新たに六極子 (sextupole) モードと八極子 (octupole) モードの検出に成功した。

(2) 極性磁性絶縁体 VOSe_2O_5 のスキルミオン結晶相におけるマグノンダイナミクスの観測

極性構造のもとで発現する Neel 型スキルミオン結晶のマグノンダイナミクスの解明に向け、 VOSe_2O_5 単結晶における磁気共鳴スペクトルを測定した。その結果、Neel 型スキルミオンの三角格子相に対応する温度・磁場領域において、CCW モードと breathing モードに対応する 2 種類の磁気共鳴モードを観測することに成功した。さらに、実験で観測した共鳴モードの周波数分布や選択則を理論計算によって再現することに成功し、従来の Bloch 型スキルミオンの三角格子相とは異なるダイナミクスを示すことが明らかになった。

また派生した成果として、中性子散乱実験によって 4 回対称な磁気反射が観測されている温度・磁場領域においてもスキルミオンの三角格子相と同様の共鳴モードを見出した。これは、Neel 型スキルミオンの四角格子相が発現していることを強く示唆しており、 VOSe_2O_5 では 2 種類のスキルミオン相が実現していることを支持する結果であると考えている。

これらの研究成果をもとに、今後 Neel 型スキルミオン結晶を用いたマグノン特性制御を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Rina Takagi, Markus Garst, Jan Sahliger, Christian H. Back, Yoshinori Tokura, Shinichiro Seki	4. 巻 104
2. 論文標題 Hybridized magnon modes in the quenched skyrmion crystal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.104.144410	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 S. Seki, M. Suzuki, M. Ishibashi, R. Takagi, N. D. Khanh, Y. Shiota, K. Shibata, W. Koshibae, Y. Tokura, T. Ono	4. 巻 21
2. 論文標題 Direct visualization of the three-dimensional shape of skyrmion strings in a noncentrosymmetric magnet	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Materials	6. 最初と最後の頁 181-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41563-021-01141-w	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 Nguyen Duy Khanh, Taro Nakajima, Satoru Hayami, Shang Gao, Yuichi Yamasaki, Hajime Sagayama, Hironori Nakao, Rina Takagi, Yukitoshi Motome, Yoshinori Tokura, Taka-hisa Arima, Shinichiro Seki	4. 巻 9
2. 論文標題 Zoology of Multiple Q Spin Textures in a Centrosymmetric Tetragonal Magnet with Itinerant Electrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/advs.202105452	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 Rina Takagi, Naofumi Matsuyama, Victor Ukleev, Le Yu, Jonathan S. White, Sonia Francoual, Jose R. L. Mardegan, Satoru Hayami, Hiraku Saito, Koji Kaneko, Kazuki Ohishi, Yoshichika Onuki, Taka-hisa Arima, Yoshinori Tokura, Taro Nakajima, Shinichiro Seki	4. 巻 13
2. 論文標題 Square and rhombic lattices of magnetic skyrmions in a centrosymmetric binary compound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-29131-9	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 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Fehmi Yasin, Licong Peng, Rina Takagi, Naoya Kanazawa, Shinichiro Seki, Yoshinori Tokura, Xiuzhen Yu
2. 発表標題 Identification of Topological Magnetic Spin Textures via Differential Phase Contrast
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第77回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木里奈
2. 発表標題 トポロジカルな磁気構造を伴う新物質の開拓
3. 学会等名 ISSP WOMEN'S WEEK 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高木里奈、松山直史、Victor Ukleev、Le Yu、Jonathan S. White、Sonia Francoual、Jose R. L. Mardegan、金子耕土、大石一城、大貫 惇睦、有馬孝尚、十倉好紀、中島多朗、関真一郎
2. 発表標題 空間反転対称性を有する遍歴磁性体EuAl ₄ における磁気スキルミオン格子相の観測
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 N. D. Khanh, T. Nakajima, S. Hayami, S. Gao, Y. Yamasaki, H. Sagayama, H. Nakao, R. Takagi, Y. Motome, Y. Tokura, T. Arima, S. Seki
2. 発表標題 Multiple-Q spin textures in tetragonal itinerant magnet GdRu ₂ Si ₂
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 周芝苑、吉持遥人、高木里奈、Nguyen D. Khanh、齋藤開、佐賀山基、中尾裕則、有馬孝尚、十倉好紀、関真一郎、中島多朗
2. 発表標題 量子ビームによる空間反転対称性を有するスキルミオン物質GdRu ₂ Ge ₂ の磁場誘起相の研究
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 吉持遥人、高木里奈、Ju Jiwon、Nguyen D. Khanh、齋藤開、佐賀山基、中尾裕則、有馬孝尚、十倉好紀、中島多朗、関真一郎
2. 発表標題 反転対称性を有するスキルミオン物質GdRu ₂ (Si _{1-x} Gex) ₂ における多彩な磁気相と創発磁気輸送現象
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 Rina Takagi
2. 発表標題 Square and rhombic lattice of magnetic skyrmions in a centrosymmetric itinerant magnet
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics 2021 (AC2MP2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関真一郎、鈴木基寛、石橋未央、高木里奈、Nguyen Duy Khanh、塩田陽一、柴田基洋、小椎八重航、十倉好紀、小野輝男
2. 発表標題 磁気スキルミオンストリングの3次元形状の観察
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高木寛貴、高木里奈、齋藤開、Nguyen Duy Khanh、大石一城、鬼柳亮嗣、野本拓也、見波将、鈴木通人、柳有起、平山元昭、軽部皓介、橋爪大輔、十倉好紀、有田亮太郎、中島多朗、関真一郎
2. 発表標題 異常ホール反強磁性体CoM3S6 (M=Nb, Ta)の偏極中性子散乱による磁気構造解析
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>超高密度な磁気渦を示すシンプルな二元合金物質を発見 - 次世代磁気メモリへの応用に期待 - https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-03-30-003 researchmap https://researchmap.jp/rtakagi</p>

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		
ドイツ	Karlsruhe Institute of Technology	Technische Universität München	Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
スイス	Paul Scherrer Institute (PSI)	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	