

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011~2012

課題番号：23684023

研究課題名（和文） ベリー位相によるマグノンの異常輸送現象と新機能開拓

研究課題名（英文） Anomalous magnon transport phenomena induced by the Berry phase and exploration of related material functionality

研究代表者

小野瀬 佳文 (ONOSE YOSHINORI)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：80436526

研究成果の概要（和文）：研究代表者らが発見したマグノンのベリー位相による新現象「マグノンホール効果」の測定を多くの強磁性体について行った。その結果、マグノンホール効果には顕著な結晶格子依存性が存在し、それがジャロシンスキー守谷相互作用に由来するベリー位相によるものであると考えるとよく理解できることが明らかになった。また、マグノンを共鳴励起できるマイクロ波の応答を低温・磁場下で測定できる実験装置を立ち上げ、トポロジカル磁気構造体スキルミオンのユニークなマグノンモード（スキルミオン回転モードやスキルミオンブリージングモード）などそのトポロジカルな磁気構造を反映した得意な磁気励起状態を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Magnon Hall effect, which was discovered by Onose et al., have been investigated for various ferromagnetic insulators. We have observed the distinctive effect of lattice geometry on magnon Hall effect and show that it can be explained in terms of the Berry phase of magnons induced by Dzyaloshinskii-Moriya interaction. In addition, we have setup the microwave measurement system, in which we can measure the resonant excitation of magnons by microwave under the magnetic field at low temperature. With use of it, we have observed unique magnon modes (skyrmion rotation mode, skyrmion breathing mode) in a topological magnetic state of skyrmion lattice.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	17,100,000	5130,000	22,230,000
2012年度	5,600,000	1680,000	7,280,000
年度			
年度			
年度			
総計	22,700,000	6,810,000	29,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：強相関係、スピントロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

近年、相対論的スピン軌道相互作用により顕在化したバンド電子の波動関数のトポロ

ジーに由来する量子物性が大変注目を集めている。古くから観測されているにもかかわらずその起源に関する論争が続いていた異

常ホール効果がバンド電子のベリー位相の効果で理解されたのを皮切りに、スピントロニクスの分野でスピン流（磁気モーメントの流れ）発生法として注目を集めることとなったスピンホール効果が発見され、さらにはバンド構造のトポロジーが通常の半導体とは異なるために、バルクではギャップが開いているが、表面ではスピン偏極した金属状態が現れるという特異な性質を示すトポジカル絶縁体が発見されるに至っている。

こうした波動関数のトポジカルな性質は、電子のみならず他の粒子においても共通に存在するはずである。実際、光（フォトン）のベリー位相に由来するホール効果が理論的に予測され、実際に実験で観測されている（Onoda *et al.*, PRL **93**, 083901 (2004), Hosten *et al.*, Science **319**, 787 (2008))。研究代表者らはスピン波の量子であるマグノンがベリー位相による仮想磁束を感じてホール効果を起こすマグノンホール効果を世界で初めて観測した（Onose *et al.*, Science (2010))。この結果は、マグノンの波動関数のトポジカルな性質による新現象といった純粋な物理学的な興味に加えて、トポジカルな性質による新規機能を用いた磁性絶縁体の磁気状態制御の可能性を考える上でも重要な意味を持つ。

## 2. 研究の目的

マグノンホール効果の発見を契機にベリー位相によって現れたマグノンの異常輸送現象の集中的な研究を行うことを目的とした。まず、申請者らによって発見されたマグノンホール効果の学理構築を行い、その知見をもとにマグノンのトポジカルな性質によって発現した新機能を開拓することを目指した。

## 3. 研究の方法

この研究課題の契機となったマグノンホール効果の発見は、パイロクロア構造を持つ強磁性絶縁体である  $\text{Lu}_2\text{V}_2\text{O}_7$  においてマグノンが運ぶ熱流の曲がり（熱ホール効果）を観測したものである。理論的には、パイロクロア構造の局所的な反転対称性の破れが重要であることが示唆されていた。本研究課題では、マグノンホール効果の学理構築を目的として様々な強磁性絶縁体における熱ホール効果を測定し、その結晶格子依存性などを明らかにした。

また、マグノンに関する新機能を開拓するためにはマグノンを共鳴励起できるマイクロ波を活用することが必要である。その目的で、超伝導マグネットを用いて低温磁場下のマイクロ波測定系を立ち上げ、それによりマグノンの新現象、新機能の開拓を行った。

## 4. 研究成果

### (1) マグノンホール効果の学理構築

様々な強磁性絶縁体の作成を行い、マグノンによる熱ホール効果の測定を行った。

パイロクロア酸化物の  $\text{Ho}_2\text{V}_2\text{O}_7$ 、 $\text{In}_2\text{Mn}_2\text{O}_7$  では、有限の熱ホール伝導度を観測することに成功した。その温度磁場依存性は、マグノンホール効果の描像と一致するものであった。マグノンのベリー位相理論では、ジャロシンスキー守谷相互作用による有効磁束が重要であるが、パイロクロア構造は図1に示したように三角形と六角形の二種類のループ構造からなっており、その非等価性によってマグノンホール効果が有限になることが示されていることから、実験結果はベリー位相理論と一致するものである。

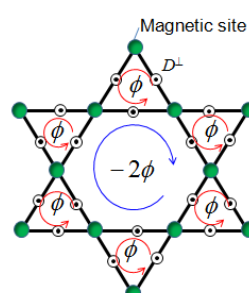


図 1:パイロクロア構造の(111)面におけるジャロシンスキー守谷相互作用による仮想磁束

一方で、ペロブスカイト型酸化物の場合、 $\text{YTiO}_3$ 、 $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ では有限の熱ホール効果は観測されなかったが、 $\text{BiMnO}_3$ では小さいながらも有限のホール効果が観測された。 $\text{YTiO}_3$ 、 $\text{La}_2\text{NiMnO}_6$ は、単位胞に4つの磁性元素がある $\text{GdFeO}_3$ 型の結晶構造をしており、マグノンの有効磁束は図2のように互い違いになる。この場合、対称性からベリー位相誘起のマグノンホール効果がゼロになる。

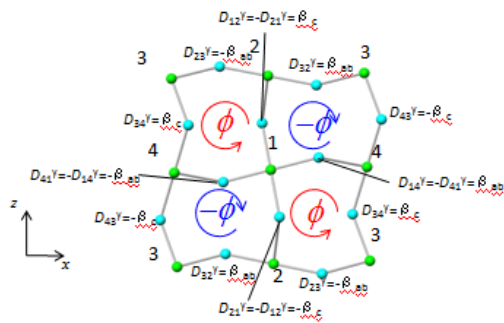


図2  $\text{GdFeO}_3$ 型ペロブスカイト構造の(110)面におけるジャロシンスキー守谷相互作用による仮想磁束

$\text{BiMnO}_3$ では軌道整列の影響で、Mnイオンを16個含むような大きな単位胞を持ち元の対称性が破れているため有限のマグノンホール効果が観測されると考えられる。以上のように、マグノンホール効果における結晶構造の効果を明らかにし、ベリー位相理論の有用性を確認することが出来た。

## (2) マイクロ波測定系の構築とそれを用いた新現象・機能の開拓

マイクロ波によるマグノンの共鳴励起を用いた研究を展開するため購入したネットワークアナライザ、超伝導マグネット、シグナルジェネレータを利用して低温、磁場下でマイクロ波応答の測定系を立ち上げた。そして、これを用いたマグノン新現象・機能の開拓を試みた。特に、トポロジカル磁気構造体であ

るスキルミオンが結晶を組むスキルミオン格子が観測される $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$ において、図3に示したようなスキルミオン回転モードやスキルミオンブリージングモードなどそのトポロジカルな磁気構造を反映した得意な磁気励起状態を明らかにした。これらのモードはマイクロ波の方向二色性などユニークな機能性を示すことが理論的に指摘されており、今後、このマイクロ波測定系を用いてさらなるマグノン新機能の開拓が見込まれる。また、関連した研究として、 $\text{Ba}_2\text{XGe}_2\text{O}_7$  (X=Mn, Co, Cu)の電気磁気結合に関する知見を誘電率測定から得ることに成功した。さらには、 $\text{MnGe}$ におけるスキルミオン結晶の磁気状態に関する知見を中性子散乱のグループと共同で得ることに成功した。

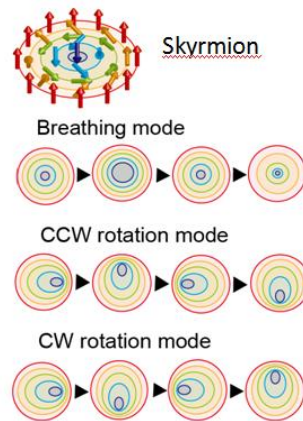


図 3: スキルミオン格子相における特異なマグノンモード

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① "Possible skyrmion-lattice ground state in the B20 chiral-lattice magnet  $\text{MnGe}$  as seen via small angle neutron scattering"

N. Kanazawa, J.-H. Kim, D. S. Inosov, J. S. White, N. Egetenmeyer, J.L. Gavilano, S. Ishiwata, Y. Onose, T. Arima, B. Keimer, Y. Tokura

Physical Review B 86, 134425 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevB.86.134425

② "Observation of magnetic Excitations of skyrmion crystal in a helical insulator  $\text{Cu}_2\text{OSeO}_3$ "

Y. Onose, Y. Okamura, S. Seki, S. Ishiwata, and Y. Tokura

Physical Review Letters 109, 037603 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.037603

③ Comprehensive study of the ferroelectricity induced by the spin-dependent d-p hybridization mechanism in  $\text{Ba}_2\text{XGe}_2\text{O}_7$  (X=Mn, Co, and Cu) H. Murakawa, Y. Onose, S. Miyahara, N. Furukawa, and Y. Tokura

Physical Review B 85, 174106 (2012).

DOI: 10.1103/PhysRevB.85.174106

④ "Effect of lattice geometry on magnon Hall effect in ferromagnetic insulators"

T. Ideue, Y. Onose, H. Katsura, Y. Shiomi, S. Ishiwata, N. Nagaosa, and Y. Tokura

Physical Review B 85, 134411 (2011).

(Editor's Choice)

DOI: 10.1103/PhysRevB.85.134411

⑤ "Band-filling dependence of thermoelectric properties in B20-type  $\text{CoGe}$ "

N. Kanazawa, Y. Onose, Y. Shiomi, S. Ishiwata, and Y. Tokura

Applied Physics Letters 100, 093902 (2012).

DOI: 10.1063/1.3691260

⑥ "Pulsed Laser deposition and Ionic Liquid gate control of epitaxial  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  Thin films"

Y. Onose, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, H. Yuan, T. Hidaka, Y. Iwasa, M. Kawasaki, and Y. Tokura

Applied Physics Express 4, 083001 (2011).

DOI: 10.1143/APEX.4.083001

[学会発表] (計6件)

① 空間反転対称性が破れた格子におけるらせん磁性とスキルミオン

小野瀬佳文

2012年12月17日 第三回 CROSSroads 研究会「カイラル磁性体—起源と機能—」

いばらき量子ビーム研究センター

(招待講演)

② "Berry phase induced Hall effects of electrons and magnons"

Y. Onose

International workshop on spin-orbit driven transverse transport phenomena

2012/12/3 Bad Honnef, Germany

(招待講演)

③ スキルミオン格子におけるマイクロ波を用いた低エネルギー励起の観測

小野瀬佳文

2012年9月18日 日本物理学会秋季大会 横浜国立大学

④ "Topological Hall effect of electrons and magnons" Y. Onose

DPG spring meeting

2012/3/26 Berlin, Germany

(招待講演)

⑤ "Magnon Hall effect in ferromagnetic insulators" Y. Onose

ULT2011 the new frontiers of low temperature physics

2011/8/19 Daejeon, Korea

(招待講演)

⑥ "Magnon Hall effect in ferromagnetic insulators" Y. Onose

31st CNLS Annual Conference, "Novel Phenomena in Frustrated Systems"

2011/5/26 Santa Fe, USA

(招待講演)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小野瀬 佳文 (ONOSE YOSHINORI)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：80436526