

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2007～2008

課題番号：19684011

研究課題名（和文） 強磁性金属および絶縁体における異常熱ホール効果

研究課題名（英文） Anomalous thermal Hall effect in ferromagnetic metal and insulator

研究代表者

小野瀬 佳文 (ONOSE YOSHINORI)

東京大学・工学系研究科・講師

研究者番号 80436526

研究成果の概要：

Ni, Fe など強磁性金属の異常熱ホール効果の観測に成功し、異常ホール流のビーデマンフランツ則を初めて確認した。また、熱ホール伝導度と電気ホール伝導度の比であるローレンツ数が非弾性散乱に敏感であることを利用して、異常ホール流が散乱に依存しない内因的なベリール位相によるものかもしくはスキュー散乱による外因的なものか判別できることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
20年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
年度			
年度			
年度			
総計	17,100,000	5,130,000	22,230,000

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

## 1. 研究開始当初の背景

異常ホール効果は、古くから知られた現象ではあるが、その起源については現在でも活発に議論されている。ホール効果の大きさは磁化の作り出す磁場の効果では説明できないため、スピン軌道相互作用が重要な役割を果たしているという点では一致しているが、どのようにスピン軌道相互作用を取り入れるかということに関してその理論的モデルは2流派に分かれる。そのひとつは、スピン

軌道相互作用の影響をうけた散乱によって異常ホール効果が起こるとするものである。これは、電子が散乱される際にスピン軌道相互作用の影響で、電子の進む方向がずれる（スキュー散乱）もしくは電子の位置が横にずれる（サイドジャンプ）といった効果である。もうひとつは、スピン軌道相互作用のために生じた、電流と磁化の両方に垂直な方向の異常速度によって異常ホール効果が生

じるといものである。最近になって、バンドの電子が感じるベリー位相によって生じた、散逸を受けない内因的(intrinsic)な電流が、この異常速度の起源であるという解釈がなされた。量子力学の一つの概念であるベリーの位相が身近な異常ホール効果に現れているという物理的興味と、散逸を受けない異常ホール電流ということのスピントロニクスへの応用の期待が相まって、精力的に研究が行われている。

上で述べた2つの理論モデルの基本的な違いは異常ホール効果が電子の散乱によって生み出されたものであるか、もしくは散乱に依存しないものであるかである。従来は、これを実験的に確かめるために、ホール伝導度の温度や組成による変化が、主に散乱確率によるものであると仮定し、ホール伝導度の(散乱確率に比例する量である)抵抗率に対する変化を議論していた。しかし、異常ホール効果はエネルギーに対して特異的に変化することが多く、これにより抵抗率の温度組成変化が散乱確率のみを通じて起こるとい仮定はしばしば明らかに破綻していた。

## 2. 研究の目的

本研究は、強磁性体の熱ホール伝導度と電気ホール伝導度を測定し、両者の比である(ホール成分に関する)ローレンツ数を用いて異常ホール効果の起源を検証することを目的とする。ローレンツ数は非弾性散乱に非常に敏感であるという特徴を持つため、異常ホール効果のローレンツ数の測定により、電子が受ける非弾性散乱の大きさを見ることが可能で、それにより異常ホール流の散乱の影響を調べることが出来る。

## 3. 研究の方法

磁場中に熱伝導測定系を立ち上げる。超伝

導マグネット中に、導入可能な測定プローブを作製し、それにレジスタンスブリッジ、ナノボルトメータ等を接続し、測定系をくみ上げる。測定系が立ち上がったら、Ni, Fe, Co等の基本的な強磁性金属やそれらに不純物ドーピングしたサンプルの熱ホール伝導度および電気ホール伝導度の測定を行う。得られた熱ホール伝導度、電気伝導度を正常項、異常項に分離してそれぞれの比をとり、正常項、異常項両方のローレンツ数の温度変化を導出する。

## 4. 研究成果

Niとそれに不純物Cuをドーピングしたサンプルの異常熱ホール効果の観測に成功し、正常項、異常項のローレンツ数を導出した。最低温では、異常項のローレンツ数は自由電子の値  $L_0=2.44 \times 10$  ( $W\Omega/K^2$ )に一致し、異常ホール効果のビーデマンフランツ則を初めて確認した。温度を上げていくと、正常項のローレンツ数は通常の縦成分のローレンツ数と同様に、温度を上げていくと非弾性散乱の増大に伴って大きく減少するが、異常項のローレンツ数はほとんど温度変化せず、非弾性散乱の影響がほとんど受けていないことが分かった。これは、この物質で散乱の影響がほとんどないベリー位相誘起の内因的なホール効果が起きていることを示している。

次にFeやそれに不純物添加を行ったサンプルの熱伝導度の測定を行った。この物質は、最近の理論的、実験的研究で、低温においてスキュー散乱誘起の異常ホール効果が起きていることが指摘されている。熱伝導度から導出した異常項のローレンツ数は100K以上の高温では自由電子の値と一致し、内因的ホール効果の描像と一致しているが、低温ではローレンツ数が大きく減少し、ホール効果の内因性 - 外因性のクロスオーバーが起きて

いることが明らかとなった。

このように、ローレンツ数というユニークなプローブを用いて、異常ホール流が散乱に依存しない内因的なベリ-位相によるものかもしくはスキュー散乱による外因的なものか判別できることを明らかにすることが出来た。

#### 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 9 件)

以下全て査読有

1, "Extrinsic anomalous Hall effect in charge and heat transport in pure iron,  $\text{Fe}_{0.997}\text{Si}_{0.003}$ , and  $\text{Fe}_{0.97}\text{Co}_{0.03}$ "  
Y. Shiomi, Y. Onose, and Y. Tokura  
Physical Review B 79, 100404 (2009).

2, "Charge dynamics in thermally and doping induced insulator-metal transitions of  $(\text{Ti}_{1-x}\text{V}_x)\text{TiO}_3$ "  
M. Uchida, J. Fujioka, Y. Onose, and Y. Tokura  
Physical Review Letters 101, 066406 (2009).

3, "Rotation of an Electric Polarization Vector by Rotating Magnetic Field in Cycloidal Magnet  $\text{Eu}_{0.55}\text{Y}_{0.45}\text{MnO}_3$ "  
H. Murakawa, Y. Onose, F. Kagawa, S. Ishiwata, Y. Kaneko, and Y. Tokura  
Physical Review Letters 101, 197207 (2009).

4, "Dynamics of Multiferroic Domain Wall in Spin-Cycloidal Ferroelectric  $\text{DyMnO}_3$ "  
F. Kagawa, M. Mochizuki, Y. Onose, H. Murakawa, Y. Kaneko, N. Furukawa, Y. Tokura  
Physical Review Letters 102, 057604 (2009).

5, "Unusual Hall effect anomaly in  $\text{MnSi}$  under pressure"  
M. Lee, W. Kang, Y. Onose, Y. Tokura, and N. P. Ong  
Physical Review Letters 102, 186601 (2009).

6, "Lorenz Number Determination of the Dissipationless Nature of the Anomalous Hall Effect in Itinerant Ferromagnets"  
Y. Onose, Y. Shiomi, and Y. Tokura

Physical Review Letters 100, 016601 (2008).

7, "Anomalous nernst effects in pyrochlore molybdates with spin chirality"  
N. Hanasaki, K. Sano, Y. Onose, T. Ohtsuka, S. Iguchi, I. Kezsmarki, S. Miyasaka, S. Onoda, N. Nagaosa, Y. Tokura  
Physical Review Letters 100, 106601 (2008)

8, "Low-magnetic-field control of electric polarization vector in a helimagnet"  
S. Ishiwata, Y. Taguchi, H. Murakawa, Y. Onose, Y. Tokura, Science 319, 1643 (2008).

9, "Crossover behavior of the anomalous hall effect and anomalous nernst effect in itinerant ferromagnets"  
T. Miyasato, N. Abe, T. Fujii, A. Asamitsu, S. Onoda, Y. Onose, N. Nagaosa, and Y. Tokura, Physical Review Letters 99, 86602 (2007).

[学会発表](計 5 件)

1, "Lorenz Number Study of Intrinsic and Extrinsic Anomalous Hall Effects" 小野瀬佳文 AIST-RIKEN joint workshop 2009/3/7 沖縄万国津梁館 (招待講演)

2, "Lorenz number study of dissipationless and dissipative anomalous Hall currents" 小野瀬佳文 Spin caloritronics workshop 2009/2/10 ライデン大学 (招待講演)

3, "Fe におけるスキュー散乱誘起異常ホール流" 塩見雄毅他 日本物理学会「秋季大会」 2008/9/28 岩手大学

4, "熱伝導から見た異常ホール流の非散逸性" 塩見雄毅他 日本物理学会「第63回年次大会」 2008/3/25 近畿大学

5, "強磁性体金属における異常熱ホール効果" 小野瀬佳文他 日本物理学会「秋季大会」 2007/9/27 北海道大学

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

小野瀬佳文 (ONOSE YOSHINORI)

研究者番号 80436526

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし