

# 論文の内容の要旨

## マグノンペアによる熱ホール効果についての理論研究 (Theory of paired-magnon thermal Hall effect)

氏名 高田 えみか

整数量子ホール効果の発見とそれを解釈する為の Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs 公式が構築されて以来、電子物性研究においてトポロジーの考え方の有用性が広く認識されるようになった。特に、固体結晶においてエネルギーバンド描像でよく記述される弱相関電子系の (特に波数空間における) トポロジカルな性質が注目を集めている。近年、この波数空間におけるトポロジーの考え方が、電子系以外の量子多体系へも普及・拡散をはじめている。その重要な例として、Katsura らと Onose らによる理論・実験研究を挙げる。2010 年、Katsura らは温度勾配を適当な磁性体に印加することでマグノンの熱ホール効果を実現することを理論的に予言し、その後 Onose らがパイロクロア強磁性体において実際にマグノン熱ホール伝導度を検出した。さらにその後の Matsumoto らの理論研究により、熱ホール効果の理論が整備されている。これにより、相互作用のない自由なボソン系において、その熱ホール伝導度は分散関係と波数空間で定義されるベリー曲率によって計算できることが明らかになった。また熱ホール伝導度を解析する上で、ボソンの統計性により、特に低エネルギーになる波数領域でのベリー曲率が重要であることや、マグノンのベリー曲率をもたらすためには、十分な大きさのジャロシンスキー・守谷 (DM) 相互作用が重要であることが認識されている。

マグノンは磁性体における代表的な準粒子の一つであるが、磁性絶縁体、特に低次元量子磁性体やフラストレート磁性体には、マグノンの他にも、スピノンやマグノンペア (2つのマグノンが束縛状態を形成したもの) などの長寿命の準粒子がしばしば登場する。したがって磁性絶縁体では、マグノンだけでなく、ほかの多様な磁気準粒子の波動関数のトポロジーに関わる物理現象が期待される。しかしながら、マグノン熱ホール効果の研究が盛んにおこなわれている一方で、マグノンペアの輸送現象全般はほぼ解明されていないと言ってよい。このような背景から、本研究で我々は、マグノンペアによる熱ホール効果を理論的に探索する。

マグノンペアが現れる系は幾つか知られているが、本研究では、双2次相互作用を持つパイロクロア反強磁性体と弱く結合した  $S = 1/2$  フラストレート zigzag スピン鎖の2次元スピン系の2つの系(以下、それぞれパイロクロア系と zigzag スピン鎖系と呼ぶ)を考える。これらの系には、強磁場下飽和磁化状態において、マグノンに加えてマグノンペアも低エネルギー励起状態として現れることが知られている。本研究の主要な目的は、マグノンペアは熱ホール効果を起こし得るのかを明らかにすることである。さらに、マグノンペアがどのような場合に有意なベリー曲率を持ち、如何なる条件の下で熱ホール効果に寄与するのかを明らかにする。

第1章では、本研究の研究背景の概要を述べ、論文の構成を簡潔にまとめた。

第2章では、我々が解析する熱ホール効果の理論的な道具について解説した。まず、電子系の量子ホール効果のレビューをし、複素数のホッピングがベリー曲率を与えることを Haldane のハニカムモデルを用いて解説する。続いて確立されているマグノン熱ホール効果の理論をレビューし、電子系のホール効果との類似点と相違点について述べる。また本研究で用いた、Fukui らが提案したベリー曲率とチャーン数の数値的な見積もり方法を紹介する。最後に、先行研究から知られているマグノン熱ホール効果における DM 相互作用のはたらきについて解説する。

第3章と第4章で、本研究の具体的な結果を詳細に述べた。先行研究から、相互作用のない寿命の長い磁気準粒子(ボソン)における熱ホール伝導度は、その分散関係と波数空間におけるベリー曲率から計算できることが明らかにされている。まず第3章では、DM 相互作用を導入したパイロクロア系と zigzag スピン鎖系のモデルの詳細を解説し、飽和磁場以上の強磁場領域におけるマグノン及びマグノンペアの分散関係を示す。マグノンペア状態の解析では、マグノン間引力が短距離力であることから、マグノンペア状態が実空間において2つのマグノンが近接サイトにある状態で書かれるとした。また、外部磁場周りのスピンの回転対称性を破るような DM 相互作用は一般にマグノンとマグノンペアの混成をもたらす。この混成を考慮した場合の分散関係についても解析している。

次に第4章では、第2章で紹介した Fukui らの方法を用いてマグノンとマグノンペア、それらの混成状態に関するベリー曲率を計算した。パイロクロア系、zigzag スピン鎖系において、DM 相互作用がないときはマグノン、マグノンペアバンドのベリー曲率が0であり、DM 相互作用を導入すると両者のバンドに有限のベリー曲率が現れることを明らかにした。最後に、求めた分散関係とベリー曲率の結果を用いて、2つの系の飽和磁化相におけるマグノンとマグノンペアが混在する状況での熱ホール伝導度を理論的に解析した。この解析では、以下の2点に留意して、Matsumoto らによる熱ホール伝導度の公式を用いた。一つは、磁場を印加した方向の  $U(1)$  対称性を破る DM 相互作用についてである。そのような DM 相互作用はマグノンとマグノンペアの混成状態をもたらすが、本研究では DM 相互作用を摂動として取り扱うことで、カレント  $\mathbf{J}$  とエネルギー流  $\mathbf{J}^E$  をマグノンがマグノンとマグノンペアによるものの和で書けるものとした。もう一つはマグノンペアのボソンとしての取り扱いである。マグノンペアは厳密にはボソンの交換関係を満たさないが、マグノンペアが十分希薄な低温領域ではマグノンペア同士の重なりを無視できるため、ボソンとして取り扱うことができる。

図1は、パイロクロア系における熱ホール伝導度の磁場依存性の結果である。橙色、緑色の曲線

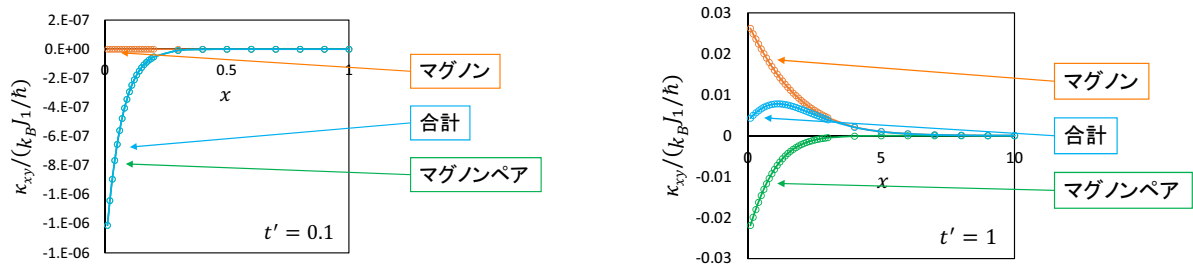


図1 マグノン熱ホール伝導度とマグノンペア熱ホール伝導度の磁場温度依存性。 $t' \equiv k_B T / J_1$ ,  $x \equiv h / J_1 - h_{c2} / J_1$  はそれぞれ、温度、磁場に相当する。左図と右図はそれぞれ温度  $t' = 0.1$ ,  $t' = 1$  における磁場依存性である。橙色と緑色の曲線はそれぞれマグノン、マグノンペアの熱ホール伝導度を表し、水色の曲線はそれらの合計である。

はそれぞれマグノン、マグノンペアの熱ホール伝導度に対応し、それらを足し合わせたパイロクロア系全体の熱ホール伝導度が水色の曲線である。図中の  $t'$  は温度に相当し、左図の方がより低温の結果である。また、横軸の磁場  $x$  はマグノンペアの臨界磁場を原点としている。 $t' = 0.1$  ではマグノンの熱ホール伝導度がほぼ0で、マグノンペアの熱ホール伝導度によって系全体の熱ホール伝導度が与えられる。また、 $t' = 1$  では、マグノンとマグノンペアの熱ホール伝導度が逆符号を持つために、系全体の熱ホール伝導度が磁場に対して非単調な振る舞いを示している。これは先行研究で知られているパイロクロア強磁性体におけるマグノン熱ホール伝導度とは定性的に異なる振る舞いである。

zigzag スピン鎖系に関する熱ホール伝導度の温度依存性の主要な結果を図2に示す。このモデルではマグノンペアバンドのチャーン数が0であることに起因して、マグノンペア熱ホール伝導度が有意に現れない。しかしながら、磁場方向の  $U(1)$  対称性を破る DM 相互作用がもたらすマグノンとマグノンペアの混成状態を考慮すると、マグノンのみによる熱ホール伝導度とは大きく異なる結果が得られた。特に、混成状態を考慮した熱ホール伝導度の温度依存性には低温領域にショルダー構造が現れる。これらの結果は本文中で議論しているバンドのチャーン数から理解することができる。最後に、実験的検出の可能性を確かめるために、理論的に解析して得られたパイロクロア系と zigzag スピン鎖系における熱ホール伝導度から、現実物質における熱ホール伝導度を見積もった。その結果、先行研究で測定に成功しているパイロクロア強磁性体の熱ホール伝導度と同程度の大きさになり得ることを確かめた。

第5章では、主要な結果をまとめ、その意義について議論した。本研究では具体的な2つの系(パイロクロア系と zigzag スピン鎖系)を解析し、系の熱ホール伝導度にマグノンペアがどのように寄与するかを調べ、以下のことを明らかにした。まず、マグノンペアが熱ホール伝導度を与えるために必要である有限のベリー曲率は、マグノンと同様、DM 相互作用によって生じることを明らかにした。すなわち、DM 相互作用がない場合、マグノンペアバンドのベリー曲率は0であるが、DM 相互作用を導入することで有限のベリー曲率が生じる。また、熱ホール伝導度の定量的な考察から、通常の単一マグノンだけでなく、マグノンペアまで考慮することが本質的に重要な場合があることを明らかにした。特に、パイロクロア系の十分低温領域において、マグノンペアが熱ホール

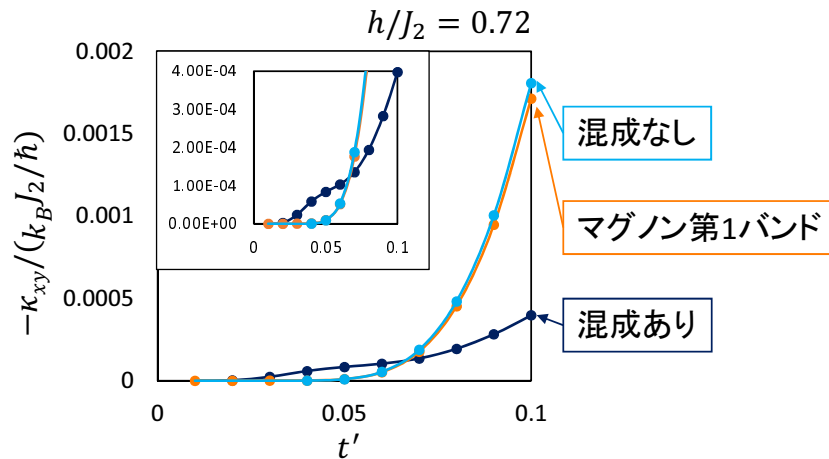


図2 zigzag スピン鎖系の熱ホール伝導度の温度依存性。 $t' \equiv k_B T/J_2$ である。橙色、水色、紺色の曲線はそれぞれマグノンの熱ホール伝導度、混成を無視した熱ホール伝導度、混成を考慮した熱ホール伝導度で、挿入図は低温領域を拡大したものである。

効果のキャリアとして本質的に重要であることを示した。最後に、本研究で採り上げた2つの系に対応する現実物質において、強磁場下での測定が必要であるものの、その熱ホール伝導度は観測可能である大きさを持つことを明らかにした。このことは、新しい準粒子であるマグノンペアが実際の磁性体の熱ホール効果を通じて観測されることを示唆するものであり、今後の実験研究が期待される。

また、マグノンペアはこれまでスピンネマティック秩序の観点から考察されることが主であったが、我々の研究から、最近注目を集めている熱ホール伝導度という物理量においても重要な役割を果たすことを初めて明らかにした。さらに、最近著しい発展を続けているスピントロニクス of 視点に立つと、マグノンの熱ホール効果はスピン流を伝搬する新しい方法を提供している。我々の予言するマグノンペアの熱ホール効果は、さらに新しいスピン流輸送方法を提供している、と言える。すなわち、我々の成果は、理学的な視点からだけでなく、工学的 (スピントロニクス) な視点からも新しい輸送現象の研究に貢献することが期待できる。