

研究報告書

「デバイス応用に向けたスピン流と熱流の結合理論」

研究期間：平成19年10月～平成23年3月

研究者：村上 修一

1. 研究のねらい

スピン流は電流と違い特異な性質があり注目されているが、スピン流の物理は熱流の物理とは別々に論じられてきた。しかしこれらの間には隠れた関係が示唆されるため、これら2つの物理を統合することで、熱電変換材料、スピントロニクス双方の分野での物性理解を深め、新規な物性を開拓する。新原理に基づく熱電変換材料・デバイスの探索と性能の向上、またスピントロニクスデバイスにおける熱散逸の評価とその最適化への道を探る。

2. 研究成果

以下の2項目について研究を行った。

(a) トポロジカル絶縁体での熱電輸送

トポロジカル絶縁体とは、バルク(試料内部)では絶縁体であるが試料の縁(エッジ)や表面に金属的な状態がありスピン流を運ぶものである。こうしたエッジ状態・表面状態はトポロジカル保護という機構により弾性散乱を受けにくく、特異的に良い伝導性を保つことが知られている。 Bi_2Se_3 , Bi_2Te_3 などの物質がトポロジカル絶縁体として実験的にも観測されている。

一方でこれらの物質はよい熱電変換材料として知られているため、熱電変換とトポロジカル絶縁体との関係が示唆される。トポロジカル絶縁体では、不純物を入れた際にフォノンの熱輸送を阻害しつつエッジ・表面での電子輸送はそのまま保持されることが期待されるため、熱電変換に関しては理想的であると考えられ、こうした視点から熱電変換に関するブレイクスルーを狙うべく理論研究を行った。

ここで注目するのは(a-1)2次元トポロジカル絶縁体のエッジ状態、(a-2)3次元トポロジカル絶縁体の結晶の転位に伴う1次元ギャップレス状態、の2つである。こうした状態は非磁性不純物から弾性散乱を受けず、「完全伝導チャンネル」を形成するので、うまくデザインすればこうしたチャンネルがよい熱電特性に寄与するのではないかと予想される。研究の結果その予想が理論的に確かめられた。(a-1)のエッジ状態に関しては、nm程度の細いリボン状の系を考えると低温で熱電輸送に優勢に効くことが分かった。また(a-2)の転位上では、転位が密に走っているような系を考えると、やはり熱電輸送を向上させることが分かった。(a-1)(a-2)の結果についてはそれぞれ Physical Review B 81, 161302(R) (2010), Appl. Phys. Lett. 97, 073108 (2010)に掲載された。このように、低温においてはトポロジカル絶縁体の特異な伝導状態を利用して熱電変換性能指数を向上させることが可能であることが分かった。



図1：2次元トポロジカル絶縁体の熱電輸送の模式図

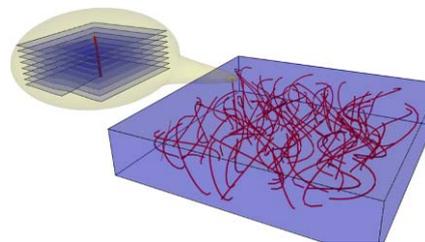


図2：3次元トポロジカル絶縁体内の転位の模式図

(b) 磁性絶縁体でのスピン波の熱輸送

磁性絶縁体では、スピン波(マグノン)が素励起としてコヒーレンスを保ちながら物質の中を伝播する。この状態は時間反転対称性が破れており、ここにスピン軌道相互作用等が加わ

ればホール効果が期待できる。研究の結果、先行研究ではマグノンの軌道運動に関連する項が抜けていることを発見し、この項を入れることで線型応答理論に基づいた結果と、半古典理論による結果が一致することが分かった。またこの結果から、マグノンの波束は2種類の回転運動、つまり自転運動と、試料の外縁に沿って回る運動との2種の運動を両方同時に行うことが分かった。イットリウム鉄ガーネット(YIG)などの強磁性体ではマグノンの波束の運動を空間分解・時間分解で観測することができるため、これらの結果を実際に見ることができると考えられる。またこのマグノンの運動は熱ホール効果として観測することができる。この結果は、平成23年1月末現在投稿中である(R. Matsumoto, S. Murakami, preprint).

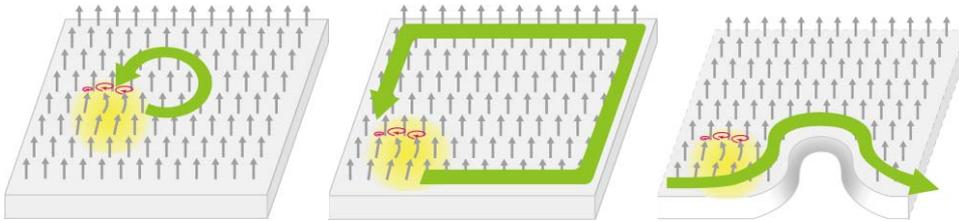


図3: 強磁性絶縁体中のマグノンの2種類の回転運動: 自転運動(左図)およびエッジ流(中図)。エッジ流はトポジカルな起源を持ち、エッジが曲がっていてもそれに沿って進む(右図)。

3. 今後の展開

(a) トポジカル絶縁体での熱電輸送

2次元および3次元トポジカル絶縁体の熱電輸送について考察を深める。これまでの研究により大まかな振る舞いは理解できたので、さらに定量化することで、実際の熱電輸送がどのような値になるか、またどのくらい性能向上の余地があるか検討する。特に、フォンドラッグ効果や細線化などは通常の熱電材料の性能向上につながる事が知られているので、これらがどの程度トポジカル絶縁体の熱電輸送に影響するか調べる。これは、電子のバンド構造をスピン軌道相互作用によってデザインすることで、不純物散乱の影響を制御するという方向性であり、広範な方向に応用可能であろうと予測される。

(b) 磁性絶縁体でのスピン波の熱輸送

YIG(イットリウム鉄ガーネット)など、マグノンのコヒーレンスがよい物質でどのような波束の運動が出るかを計算する。理論計算を実験研究へとフィードバックして共同で研究を進める。また、ジャロシンスキー守谷相互作用が効いている磁性体の具体的物質についても同様の形で研究を進める。またこれらを発展させて、周期的に試料に穴を開けてマグノンバンド構造を変える技術を積極的に用いて、マグノンのバンド構造を制御してホール効果を増大させる可能性について理論的に検討を行う。

4. 自己評価

(a)トポジカル絶縁体の熱電輸送については、計画していたことはほぼ達成できたと考えている。トポジカル絶縁体のエッジ・表面状態は低温でより優勢に寄与することを見出したが、一方で室温での良好な熱電変換にはまだ課題が残る。この点は、今後数値計算を用いたフォノン・電子伝導の計算によりある程度克服できると考えている。

(b)磁性絶縁体でのスピン波の熱輸送については、本領域の齊藤研究者の研究に触発されて生まれたものであり、「さきがけ」なくしては発見に至らなかったものである。理論としてまだ解明すべき点が残っており、今後理論と実験との共同研究によりさらに研究が発展すると思っている。

5. 研究総括の見解

村上研究者は、スピンホール効果の理論を打ち立てた先駆的な研究を進めた研究者で

す。本さがけ研究では、熱流とスピン流の関係を明らかにすることを目的としています。これまで、スピン流の物理は熱流の物理とは別々に論じられてきましたが、これらの間には隠れた関係が示唆されるため、これら2つの物理を統合することで、熱電変換材料、スピントロニクス双方の分野での物性理解を深め、新規な物性を開拓できるという研究内容です。

村上研究者は、バルク自体は絶縁体であるが、試料の縁(エッジ)や表面に金属的な状態がありスピン流を運ぶ「トポロジカル絶縁体」(Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ などが実験的にトポロジカル絶縁体であると知られる)に着目し、その熱電輸送を理論的に論じました。2次元トポロジカル絶縁体のエッジ状態、3次元トポロジカル絶縁体の結晶の転位に伴う1次元ギャップレス状態は、そのパスに非磁性不純物があっても、弾性散乱が起きない「完全伝導チャネル」を形成します。研究の結果、エッジ状態を用いると、nm 程度の細いリボン状の系において低温で熱電輸送に優勢に効くことが明らかになりました。

村上研究者は、領域会議における齊藤研究者とのディスカッションを通じて、絶縁体中のスピン波スピン流の熱輸送に着目し、先行理論の欠陥(マグノンの軌道運動に関連する項が抜けていること)を発見し、これを補完する新しい理論を打ち立てました。この理論によれば、マグノンの波束は、自転運動と、試料の外縁に沿って回る運動との2種の運動を両方同時に行うことが明らかになりました。イットリウム鉄ガーネット(YIG)などの強磁性体ではマグノンの波束の運動を空間分解・時間分解で観測することができることや、熱ホール効果として観測することができることの提案も行いました。

村上研究者は、本領域における貴重な 2 名の理論家の一人として実験家からの期待が高く、上記齊藤研究者だけでなく、塚本研究者、小林研究者の研究にも関心をもって、ミニワークショップなどを通じて議論してくれましたが、研究分野全体を牽引するような理論提案には至っていないのが現状です。今後、さがけでの研究者間のネットワークを通じて、熱スピントロニクスの先導者になることが囑望されます。

6. 主要な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. R. Takahashi, S. Murakami, Thermoelectric transport in perfectly conducting channels in quantum spin Hall systems, Physical Review B 81, 161302(R) (2010).
2. O. A. Tretiakov, Ar. Abanov, Shuichi Murakami and Jairo Sinova Large thermoelectric figure of merit for three-dimensional topological Anderson insulators via line dislocation engineering, Appl. Phys. Lett. 97, 073108 (2010)
3. G.Y. Guo, S. Murakami, T.-W. Chen, N. Nagaosa, Intrinsic Spin Hall Effect in Platinum: First-Principles Calculations, Phys. Rev. Lett. 100, 096401 (2008)
4. R. Shindou, S. Murakami, Disorder effect on 3-dimensional Z ₂ quantum spin Hall systems, Phys. Rev. B 79, 045321 (2009).
5. T. Hirahara, Y. Sakamoto, Y. Saisyu, H. Miyazaki, S. Kimura, T. Okuda, I. Matsuda, S. Murakami, and S. Hasegawa, Topological metal at the surface of an ultrathin Bi _{1-x} Sb _x alloy film, Physical Review B 81, 165422 (2010).

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0件

(3) その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

受賞:

- 平成 20 年 東京工業大学挑戦的研究賞
- 平成 22 年 丸文研究奨励賞
- 平成 22 年 科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞
- 平成 22 年 本多記念研究奨励賞
- 平成 22 年 サー・マーティン・ウッド賞

主要な招待講演:

- “Spin Hall and quantum spin Hall effects”, YKIS2007 “Interaction and Nanostructural Effects in Low-Dimensional Systems”, 京都大学, 2007/11
- “Spin current in nanostructures — Spin Hall effect and quantum spin Hall effect—”, 11th Sanken International Symposium, 淡路島, 2008/2
- “Quantum Spin Hall Effect --- Surface Spin Current on an Insulator ---”, International Workshop on Spin Current, 東北大学, 2008/2
- “Universal phase diagram for the quantum spin Hall systems”, Topological Aspects of Solid State Physics, 京都大学, 2008/6
- “Spin Hall effect and quantum spin Hall effect — spin current in metals and insulators—”, Gordon Research Conference “Magnetic Nanostructures”, Aussois, France, 2008/9
- 「トポロジーに起因した新奇な表面状態」、第28回表面科学学術講演会、早稲田大学, 2008/11/14
- “Universal Phase Diagrams for Quantum Spin Hall Phases”, Novel Topological States in Condensed Matter Physics(2009), Hong Kong, China, 2009/6
- 「半導体および金属でのスピホール効果の理論」、第70回応用物理学会学術講演会、富山大学, 2009/9
- 「トポロジカル絶縁体と表面ディラック電子」、物性研究所短期研究会 “ディラック電子系の物性—グラフェンおよび関連物質の最近の研究”, 東京大学物性研究所, 2009/10
- “Spin Hall effect and Berry phase”, 5th CAS Cross-Strait and International Conference on Quantum Manipulation, Beijing, China, 2009/12
- “Physics of surface states in topological insulators”, Symposium on Surface and Nano Science, Shizuoka, Japan, 2010/1
- “Thermoelectric transport in 2D quantum spin Hall systems”, 4th International Workshop on Spin Currents, Sendai, Japan, 2010/2
- 「トポロジカル絶縁体研究の進展:理論」、日本物理学会第65回年次大会, 岡山大学, 2010/3
- “Spin Hall effects”, Progress in Spintronics and Graphene Research, Beijing, China, 2010/6
- “Edge-state transport in two-dimensional topological insulators”, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology, Fukuoka, Japan, 2010/8
- 「トポロジカル絶縁体での特異な熱電輸送の理論的探索」、第5回 KEK 連携研究会、つくば、2010/12
- 「トポロジカル絶縁体のエッジ状態・表面状態による輸送現象」、第15回半導体スピ工学の基礎と応用(PASPS-15)・半導体スピントロニクス of 展開、つくば、2010/12

著作物、解説記事:

- 「スピホール効果の理論」(「スピントロニクス of 基礎と材料・応用技術 of 最前線」第13章, シーエムシー出版、2009年)
- 「トポロジカル絶縁体 of 物理」、村上修一, 平原徹, 松田巖, 日本物理学会誌 65, 840 (2010).
- 「トポロジカル絶縁体とディラックコーン」、村上修一, 固体物理 45, 477 (2010).