

令和元年5月23日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05151

研究課題名(和文) スピンゼーベック効果の微視的理解とその可視化に関する理論研究

研究課題名(英文) Theoretical research for microscopic understanding and visualization of the spin Seebeck effect

研究代表者

安立 裕人 (ADACHI, Hiroto)

岡山大学・異分野基礎科学研究所・准教授

研究者番号：10397903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題で対象とするのは、磁性体に印加した熱流から磁気の流れであるスピン流を作り出す「スピンゼーベック効果」という現象である。

研究期間内に、磁気相転移点近傍におけるスピンゼーベック効果の振る舞いを理論的に研究した。具体的には、時間依存ギンツブルグ・ランダウ方程式を用いたモデル計算により、強磁性体および反強磁性体のどちらの場合にも、磁気転移点近傍においてスピンゼーベック効果は磁性体の磁化に比例する、という点を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で対象とするスピンゼーベック効果は、磁性体の熱エネルギーから非磁性体にスピン流を注入する現象であり、2008年に日本で発見されて以降、新しく簡便なスピン流の生成手法として大変大きな注目を集めている。この現象の磁気転移点近傍での振る舞いを明らかにすることは、学術的には、スピンゼーベック効果に対する我々の理解が正しいか否かの一つの判定基準となる。また応用上でも、スピンゼーベック効果を高温領域で使用する際のデバイスの設計指針を与えることに繋がる。このように、本研究課題で明らかにした磁気転移点近傍でのスピンゼーベック効果の振る舞いは極めて大きな意義を持っている。

研究成果の概要(英文)：Spin Seebeck effect refers to the generation of spin current by a heat current applied to a magnet. In this project, we have theoretically investigated the spin Seebeck effect near the magnetic phase transition point. By means of a model calculation using a time-dependent Ginzburg-Landau equation, we have shown that in both ferromagnets and antiferromagnets, the spin Seebeck effect signal is proportional to the magnetization in the sample.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピンゼーベック効果 スピン流 熱流 マグノン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究を開始した2015年当初、スピントリック効果の発現機構に関しては、温度勾配に駆動された非平衡のマグノンがスピントリック流を生成する、という理解がスピントリック研究者の間で形成されていた。これに一石を投じたのは、イットリウム鉄ガーネットのキュリー温度 T_c 近傍におけるスピントリック効果の実験 [Uchida et al., Phys. Rev. X 4, 041023 (2014)] である。この実験ではスピントリック効果が $(T_c - T)^3$ に比例すると報告されている一方で、ハイゼンベルグモデルの数値シミュレーション [Barker and Bauer, Phys. Rev. Lett. 117, 217201 (2016)] では $(T_c - T)^{1/2}$ に比例する結果が結論されており、このシミュレーション結果はそもそも正しいのか、また実験と数値シミュレーションの違いは何に起因するのか、などが未解決の問題として残っていた。これは、スピントリック効果の発現機構を非平衡マグノンに求める理解が正しいかどうかを左右する大問題である。

2. 研究の目的

本研究では、スピントリック効果のマグノン描像の成否の判定に関わる以下の問題を理論的に解明する。

- (1) 温度勾配で駆動された非平衡マグノンによりスピントリック流が生成されるのであれば、その反作用として、マグノンの緩和時間にも何らかの変調が現れるはずである。そこで、温度勾配の存在下で強磁性共鳴実験を行った際に、磁気共鳴の線幅にどのような影響が現れるのかを明らかにする。
- (2) スピントリック効果は、スピントリックホール効果を組み合わせることで温度勾配から電流を作り出せるため、新しい熱電発電現象だとみなすことが可能である。そこで、スピントリック熱電発電素子の熱機効率の定式化を行う。
- (3) 磁気相転移点近傍でのスピントリック効果の温度依存性を理論的に明らかにし、報告されている実験結果および数値シミュレーション結果との比較を行う。マグノンが駆動するスピントリック効果のプロセスが臨界磁気揺らぎによってどのような影響を受けるのかを解明し、スピントリック効果のマグノン描像の正当性を検証する。特に、理想化された単純な強磁性体の計算からスタートする。

3. 研究の方法

本プロジェクトは理論研究であり、スピントリック効果を記述するモデルを設定し、そのモデルから導かれる物理量を理論的に計算するというアプローチを採用する。そして計算には、量子多体物理で発展させられて来た場の理論手法に基づく摂動展開法(ダイアグラム計算法)を採用する。より具体的に述べると、上記2.(1)に関しては、低温領域でのマグノンハミルトニアンから出発し、温度勾配の効果を用いて評価する。また上記2.(2)に関しては、磁気相転移点近傍で正当化される、スピン自由度を粗視化した時間依存ギンツブルグ・ランダウ方程式のダイアグラム展開によりスピントリック効果を計算する。

4. 研究成果

- (1) スピントリック効果によるマグノンの緩和変調:

研究開始直後に、海外の研究グループとの競争によりこのテーマの重要性が高くなったため、当初の予定を変更してこの問題に取り組んだ。考察する系は、スピントリック効果の研究で広く用いられているイットリウム鉄ガーネット(磁性絶縁体)と白金(非磁性金属)の二層膜である。この系に温度勾配を印加すると、スピントリック効果によって磁性体から非磁性金属にスピントリック流が注入される。このスピントリック効果は温度勾配により駆動された非平衡マグノンにより引き起こされると考えられているが、そうであれば、スピントリック効果を生じたことによってマグノン自身に何らかの反作用が現れるはずである。

現在着目している状況、すなわち磁性体に白金のようなスピン軌道相互作用の強い金属を接着すると、白金におけるスピン緩和により磁性体中のマグノンの緩和因子が増大することが知られている。これをスピントリック流の言葉で表現すると、磁性体から白金に向けてスピントリック流がポンプされたために磁性体が失ったスピン角運動量の分だけマグノンの緩和因子が増大した、ということができる。同様に、温度勾配を印加してスピントリック効果によるスピントリック流をポンプしても、マグノンの緩和因子が変調できるはずである。我々は、このような予想が実際に実現することを、マグノングリーン関数の自己エネルギーのダイアグラム計算により具体的に証明した。重要なのは、温度勾配の向きを操作することで、マグノンの緩和因子を「減少」させることも可能である点である。これは、温度勾配によってマグノンの緩和因子を実効的にゼロとし、マグノンの動的不安定性に伴うマイクロ波発振が可能であることを意味している。最近の実験により、このシナリオに沿ったマイクロ波発振が報告されている。

なお、本研究成果を Physical Review B 誌に発表直後に、カリフォルニア大学ロサンゼルス校から類似の成果が出版されており、研究計画を変更して本研究に取り掛かったのは妥当な判断であったと言える。

- (2) スピントリック熱電発電素子は、広い意味では、従来知られている異常ネルンスト熱電発電素子と同じく、温度勾配と出力電圧が直交する「横型熱電素子」だと言える。文献上に

異常ネルンスト熱電発電素子の熱機関効率の理論が存在しないため、まずはこの点について定式化を行なった。次に、この定式化をスピンゼーベック熱電発電素子へ拡張することを試みたが、異常ネルンスト熱電発電素子とスピンゼーベック熱電発電素子の大きな違いは、前者が単一の物質から構成されるのに対して、後者は磁性体と非磁性電極の二つの物質から成る点である。この違いは、スピンゼーベック熱電発電素子では電流は非磁性電極のみを流れ、熱流は主に磁性体内を流れる、という電流・熱流分離に大きく反映される。本研究では、この点に留意してスピンゼーベック熱電発電素子の熱機関効率を定式化した。結果として、スピンゼーベック熱電発電素子の熱機関効率はWiedemann-Franz 則の縛りを受けないことを示した。

(3) キュリー温度近傍での強磁性スピンゼーベック効果：

我々は、強磁性体の微視的なハイゼンベルグモデルではなく、これを粗視化して得られるギンツブルグ・ランダウモデルに基づくスピンゼーベック効果の解析的アプローチを試みた。強磁性体のキュリー点近傍では磁化の長波長揺らぎが重要となることが知られているので、これを適切に記述できるギンツブルグ・ランダウモデルによるアプローチは非常に有効だと考えられる。結果として、単純な強磁性体に対しては、ハイゼンベルグモデルの古典ランジュバンシミュレーションの結果と同様に、スピンゼーベック効果はキュリー点近傍で磁化に比例するという結果を得た。それゆえ、実験で観測されている磁化の6乗に比例する結果を説明するためには、我々の解析では取り込まれていない要因、すなわちイトリウム鉄ガーネットの複数の磁気副格子の効果、もしくは界面での磁気異方性の効果、などを考慮する必要があると結論した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

H. Adachi, Y. Yamamoto, and M. Ichioka, "Spin Seebeck effect in a simple ferromagnet near T_c : a Ginzburg-Landau approach", *Journal of Physics D: Applied Physics* (査読有り) 51, 144001(1)-144001(5) (2018).

<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aab1d1>

T. Taira, M. Ichioka, S. Takei, and H. Adachi, "Spin diffusion equation in superconductors in the vicinity of T_c ", *Physical Review B* (査読有り) 98, 214437(1)-214437(9) (2018).

<https://doi.org/10.1103/physrevb.98.214437>

M. Inoue, M. Ichioka, and H. Adachi, "Spin pumping into superconductors: A new probe of spin dynamics in a superconducting thin film", *Physical Review B* (査読有り) 96, 024414(1)-024414(9) (2017).

<http://doi.org/10.1103/physrevb.96.024414>

K. Uchida, H. Adachi, T. Kikkawa, A. Kirihara, M. Ishida, S. Yorozu, S. Maekawa, E. Saitoh, "Thermoelectric Generation Based on Spin Seebeck Effects", *Proc. IEEE* (査読有り) 104, 1946-1973 (2016).

<https://doi.org/10.1109/jproc.2016.2535167>

S. Geprags, A. Kehlberger, F. D. Coletta, Z. Qiu, E.-J. Guo, T. Schulz, C. Mix, S. Meyer, A. Kamra, M. Althammer, H. Huebl, G. Jakob, Y. Ohnuma, H. Adachi, J. Barker, S. Maekawa, G. E. W. Bauer, E. Saitoh, R. Gross, S. T. B. Goennenwein, M. Kläui, "Origin of the spin Seebeck effect in compensated ferrimagnets", *Nature Communications* (査読有り) 7, 10452(1)-10452(6) (2016).

<https://doi.org/10.1038/ncomms10452>

Y. Ohnuma, H. Adachi, E. Saitoh, S. Maekawa, "Magnon instability driven by heat current in magnetic bilayers", *Physical Review B* (査読有り) 92, 224404(1)-224404(8) (2015).

<https://doi.org/10.1103/physrevb.92.224404>

R. Ramos, T. Kikkawa, M. H. Aguirre, I. Lucas, A. Anadón, T. Oyake, K. Uchida, H. Adachi, J. Shiomi, P. A. Algarabel, L. Morellón, S. Maekawa, E. Saitoh, and M. R. Ibarra, "Unconventional scaling and significant enhancement of the spin Seebeck effect in multilayers", *Physical Review B* (査読有り) 92, 220407(1)-220407(5) (2015).

<https://doi.org/10.1103/physrevb.92.220407>

[学会発表](計 11 件)

山本督, 市岡優典, 安立裕人, 「反強磁性ネール点近傍におけるスピンゼーベック効果」, 日本物理学会第74回年次大会, 九州大学伊都キャンパス(博多)2019年3月14-17.

H. Adachi, Y. Yamamoto, T. Taira, M. Inoue, and M. Ichioka, "Spin pumping/Seebeck effect across a phase transition point", *Spin Caloritronics IX*, Columbus, June 25-29, 2018.

H. Adachi, M. Inoue, and M. Ichioka, "Theory of spin pumping into superconductors", *Reimei/GP-Spin/ICC-IMR International Workshop: New excitations in Spintronics*, Sendai, January 10-14, 2018.

T. Taira, M. Ichioka, and H. Adachi, "Microscopic derivation of spin diffusion equation: A Green's function approach", Reimei/GP-Spin/ICC-IMR International Workshop: New excitations in Spintronics, Sendai, January 10-14, 2018.

Y. Yamamoto, M. Ichioka, and H. Adachi, "Spin Seebeck effect in simple ferromagnets near T_c : A Ginzburg-Landau approach", Reimei/GP-Spin/ICC-IMR International Workshop: New excitations in Spintronics, Sendai, January 10-14, 2018.

山本督, 市岡優典, 安立裕人, 「強磁性キュリー点近傍におけるスピントロニクス効果」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学 (京田辺) 2018 年 9 月 9-12.

平拓也, 市岡優典, 安立裕人, 「超伝導体におけるスピン拡散方程式: T_c 近傍の解析」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学 (京田辺) 2018 年 9 月 9-12.

H. Adachi, M. Inoue, M. Ichioka, "Spin pumping into superconductors (poster)", 9th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, Fukuoka, June 4-8, 2017.

井上優志, 安立裕人, 市岡優典, 「超伝導体へのスピンポンピングの理論」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (豊中) 2017 年 3 月 17-20 日.

M. Inoue, H. Adachi, M. Ichioka, "Spin pumping into superconductors (poster)", International School on Spintronics and Spin-Orbitronics, Kyushu University Hakozaki Campus, December 16-17, 2016.

H. Adachi, "Theory of spin Seebeck effect in magnetic multilayers", Magnetism and Optics Research International Symposium (Moris 2015), Penang, December 2, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.physics.okayama-u.ac.jp/mp/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8 桁):

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。