

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740210

研究課題名(和文)熱によるスピンの生成メカニズムの解明

研究課題名(英文)Research on the thermal spin current generation

研究代表者

安立 裕人(Adachi, Hiroto)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・副主任研究員

研究者番号：10397903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円、(間接経費) 630,000円

研究成果の概要(和文)：スピンゼーベック効果とは強磁性体中の温度勾配によりスピン圧が生成される現象であり、これにより強磁性体に貼付けられた非磁性金属内へ、数ミリメートルという巨視的スケールに渡って熱によるスピン流注入が可能となる。スピンゼーベック効果によって得られたスピン流はスピンホール効果と呼ばれる現象を通して横方向の電圧に変換されるため、スピンゼーベック効果を用いて通常の電荷ゼーベック効果と同様に熱電変換素子を構成することが可能である。この課題ではスピンゼーベック効果の微視的発現機構について理論的に研究を行い、非平衡のマグノンとフォノンがスピンゼーベック効果に重要である事を明らかとした。

研究成果の概要(英文)：The spin Seebeck effect refers to the generation of a spin voltage caused by a temperature gradient in a ferromagnet, which enables the thermal injection of spin currents from the ferromagnet into an adjacent nonmagnetic metal over a macroscopic scale of several millimeters. The inverse spin Hall effect converts the injected spin current into a transverse charge voltage, thereby producing electromotive force as in the conventional charge Seebeck device. The basic mechanism of the spin Seebeck effect has been theoretically investigated in this project, and it has been shown that non-equilibrium magnons and phonons play crucial roles in the spin Seebeck effect.

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：磁気共鳴 スピントロニクス スピン流 スピンゼーベック効果

1. 研究開始当初の背景

この研究プロジェクトは、熱からスピン流を生成するスピントロニクス効果と呼ばれる現象に焦点をあてている。熱によって生成されたスピン流は、スピントロニクス効果と呼ばれる現象を用いることで電気の流れに変換されるため、スピントロニクス効果を用いれば通常の熱電現象と同じように熱エネルギーから電気の流れを作り出すことが可能となる。そのため、スピントロニクス効果は新たな熱電現象として大きな発展の可能性を秘めている。しかし、このスピントロニクス効果は2008年に日本で発見されたばかりの現象であり、本研究プロジェクトのスタートした2010年には、その発現メカニズムについてすら全く分かっていない状況であった。

2. 研究の目的

前述のように熱からスピン流を生成するスピントロニクス効果は大変大きな注目を集めていたが、一方で、現象の理解は非常に混沌とした状況にあった。特に大きな問題となっていたのは、現象を司るスピン流の長さスケールである。電流とは異なりスピン流は非保存流であるので、スピン流は電子のスピン反転に由来する微視的な長さスケール(通常は数十から数百ナノメートルの程度)で減衰してしまう。一方で、スピントロニクス効果ではミリメートルという巨視的な長さにわたるスピン流の分布が観測されるとして、大きな問題となっていた。このようにスピントロニクス効果の理解は非常に混沌とした状況にあったため、本研究プロジェクトではスピントロニクス効果の発現機構の理解を目指した研究を推進した。

3. 研究の方法

本プロジェクトは理論研究であり、スピントロニクス効果を記述する微視的モデル(ハミルトニアン)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し、その理論結果を実験事実と比較しながらモデルを取捨選択かつ精緻化する、というアプローチを採用する。微視的モデルからスタートして物理量を計算するプロセスには、量子多体系の物理で発展させられてきた場の理論的手法に基づく摂動展開法(ダイアグラム計算法)を用いる。

4. 研究成果

(1)絶縁体スピントロニクス効果:

これまで、スピントロニクスの分野ではスピン流といえばスピン偏極した伝導電子が運ぶものだというのが常識であった。しかし本研究プロジェクトでは局在スピンの集団運動(スピン波)が運ぶスピン流が重要であることを指摘した。更に実験グループと共同で、伝導電子の存在しない磁性絶縁体における「絶縁体スピントロニクス効果」が存在する

ことを明らかとした。

(2)フォノン駆動スピントロニクス効果:

また、室温よりも十分に低温では格子振動(フォノン)が熱を運ぶ過程でスピン波スピン流を励起してスピントロニクス効果を引き起こす「フォノンドラッグ・スピントロニクス効果」が重要であることを指摘し、スピントロニクス効果が低温でピークを持つ事を理論的に予測した。この理論予測はその後の東北大学とオハイオ州立大学のグループの実験によって見事に実証され、スピントロニクス効果の背後にある物理現象の理解を大きく前進させた。

(3)音波によるスピン流生成:

上記のフォノンドラッグで主役を演じるのは熱的に励起された非平衡フォノンであるが、熱的揺動と機械的揺動は同じ線型応答を引き起こすため、熱的フォノンではなく機械的に発生させた音波からもスピン注入が可能なのである。本プロジェクトではこの事実を理論的に指摘し、この指摘をもとに共同研究者である東北大学金属材料研究所の齊藤教授のグループと音波によるスピン注入の実験を計画し、見事に成功した。

(4)反強磁性体および補償されたフェリ磁性体におけるスピントロニクス効果:

スピントロニクス効果に用いられるのは局在スピンが一方を向いた強磁性体(もしくはそのようなモデル化が許される磁性体)であるが、対称な副格子で反対向きを向いたスピンを持つ反強磁性体、および対称性の崩れた副格子で反対向きを向いたスピンを持つフェリ磁性体は、強磁性体と並んで代表的な磁性物質である。本研究プロジェクトでは、反強磁性体および磁気補償点(副格子磁化がキャンセルする温度)近傍のフェリ磁性体でのスピントロニクス効果についてスピン波スピントロニクス効果の観点から研究を行い、反強磁性体ではスピントロニクス効果は消失する事、および磁気補償点近傍のフェリ磁性体ではスピントロニクス効果の絶対値は必ずしも消失しない事、を理論的に予測した。これらの理論予測はごく最近の実験によって確認されつつある。

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17件) [全て査読有]

H. Adachi, K. Uchida, E. Saitoh, and S. Maekawa, "Theory of the spin Seebeck effect", Reports on Progress in Physics 76, 036501[1-20] (2013). doi:10.1088/0034-4885/76/3/036501
T. An, V. Vasyuchka, K. Uchida, A. V. Chumak, K. Yamaguchi, K. Harii, J.

Ohe, M. Jungfleisch, Y. Kajiwara, H. Adachi, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Unidirectional spin-wave heat conveyer", *Nature Materials*, 12, 549-553 (2013). doi:10.1038/nmat3628

Y. Ohnuma, H. Adachi, E. Saitoh, and S. Maekawa, "Spin Seebeck effect in antiferromagnets and compensated ferrimagnets", *Phys. Rev. B* 87, 014423[1-7](2013). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.014423>

S. Maekawa, H. Adachi, K. Uchida, J. Ieda and E. Saitoh, "Spin Current: Experimental and Theoretical Aspects", *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, 102002[1-23] (2013). <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.102002>

H. Adachi and S. Maekawa, "Linear-response theory of the longitudinal spin Seebeck effect", *J. Korean Phys. Soc.* 62, 1753-1758 (2013). DOI: 10.3938/jkps.62.1753

S. Maekawa and H. Adachi, "Heat and Spin", *J. Korean Phys. Soc.* 62, 1985-1989(2013). DOI: 10.3938/jkps.62.1985

K. Uchida, H. Adachi, Y. Kajiwara, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Spin-Wave Spin Current in Magnetic Insulators", *Solid State Physics* 64, 1-27 (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-408130-7.00001-0>

R. Ramos, T. Kikkawa, K. Uchida, H. Adachi, I. Lucas, M. Aguirre, P. Algarabel, L. Morellon, S. Maekawa, E. Saitoh, and M. Ibarra, "Observation of the spin Seebeck effect in epitaxial Fe₃O₄ thin films", *Appl. Phys. Lett.* 102, 072413[1-4] (2013). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4793486>

K. Uchida, T. Ota, H. Adachi, J. Xiao, T. Nonaka, Y. Kajiwara, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Thermal spin pumping and magnon-phonon-mediated spin-Seebeck effect", *J. Appl. Phys.* 111, 103903[1-12] (2012). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4716012>

K. Uchida, H. Adachi, T. An, H. Nakayama, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Acoustic spin pumping: Direct generation of spin currents from sound waves in Pt/Y₃Fe₅O₁₂ hybrid structures", *J. Appl. Phys.* 111, 053903[1-8] (2012). <http://dx.doi.org/10.1063/1.3688332>

H. Adachi, S. Maekawa, "Spin Waves,

Spin Currents and Spin Seebeck Effect", *MAGNONICS: From Fundamentals to Applications*, (Springer Topics in Applied Physics), 125, 119-128 (2013). DOI: 10.1007/978-3-642-30247-3_9

K. Uchida, H. Adachi, T. An, T. Ota, M. Toda, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh, "Long-range spin Seebeck effect and acoustic spin pumping", *Nature Materials*. 10, 737-741 (2011). doi:10.1038/nmat3099

H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa, "Linear-response theory of spin Seebeck effect in ferromagnetic insulators", *Phys. Rev. B* 83, 094410[1-6] (2011). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.094410>

J. Ohe, H. Adachi, S. Takahashi, and S. Maekawa, "Numerical study on the spin Seebeck effect", *Phys. Rev. B* 83, 115118[1-5] (2011). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.115118>

H. Adachi, K. Uchida, E. Saitoh, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa, "Gigantic enhancement of spin Seebeck effect by phonon drag", *Appl. Phys. Lett.* 97, 252506[1-3] (2010). <http://dx.doi.org/10.1063/1.3529944>

K. Uchida, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G. E.W. Bauer, S. Maekawa and E. Saitoh, "Spin Seebeck insulator", *Nature Materials* 9, 894-897 (2010). doi:10.1038/nmat2856

K. Uchida, H. Adachi, T. Ota, H. Nakayama, S. Maekawa and E. Saitoh, "Observation of longitudinal spin-Seebeck effect in magnetic insulators", *Phys. Lett* 97, 172505[1-3] (2010). <http://dx.doi.org/10.1063/1.3507386>

[学会発表](計13件)

H. Adachi, "Theory of Spin Heat Conveyer and Spin Seebeck Effect", REIMEI Workshop 2014 (February 10-13, 2014, ILL, Grenoble, France)

H. Adachi, "Spin Seebeck Effect and Spin Heat Conveyer", RIKEN-APW Joint Workshop (January 23-25, 2014, RIKEN, Wako, Japan).

H. Adachi, "Efficiency of a spin-Seebeck thermoelectric device", Spin Caloritronics V Conference (May 13-15, 2013, Columbus, U.S.A.)

H. Adachi, "Theory of the longitudinal spin Seebeck effect", Spin Caloritronics IV, (June 5, 2012, IMR Tohoku Univ.)

H. Adachi, "Theory of phonon-drag spin Seebeck effect", The 4th annual showcase of materials-allied research at The Ohio State University, (September 12, 2011, Columbus, Ohio, USA)

H. Adachi, "Are only phonons relevant to the long-range nature of the spin Seebeck effect?" Spin Caloritronics III (May 9-13, 2011, Lorentz Center, Leiden, Netherlands)

安立裕人「スピン波による一方向性熱輸送の理論」日本物理学会第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 28 日、東海大学湘南キャンパス)

安立裕人「熱とスピン流」日本磁気学会第 193 回研究会/第 47 回スピンエレクトロニクス専門研究会(2013 年 12 月 17 日、お茶の水)

安立裕人、「音響スピンポンピングの理論」、日本物理学会 2013 年秋季大会、(2013 年 9 月 26 日、徳島大学)

安立裕人「フォノンとスピンゼーベック効果」日本物理学会第 68 回年次大会シンポジウム"フォノンの理解・制御によるエレクトロニクスの新展開" (2013 年 3 月 27 日、広島)

安立裕人、「スピンゼーベック熱電素子の効率の理論」、日本物理学会 2012 年秋季大会(2012 年 9 月 19 日、横浜国立大学)

安立裕人、「縦型スピンゼーベック効果の理論」、日本物理学会第 67 回年次大会 (2012 年 3 月 24-27 日、関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス)

安立裕人「スピンゼーベック効果」日本磁気学会第 33 回スピンエレクトロニクス専門研究会, (2011 年 1 月 23 日、御茶の水)

〔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：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/mori-gr/adachi/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安立 裕人(Adachi Hiroto)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・副主任研究員

()

研究者番号：10397903

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：