

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21540336

研究課題名（和文）

磁性体における電流－磁化相互作用の微視的理論の構築とその熱現象への展開

研究課題名（英文）

Microscopic theory of current-spin interaction in ferromagnets, and its extension to thermal phenomena

研究代表者

河野 浩 (KOHNO HIROSHI) 大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号：10234709

研究成果の概要（和文）：

磁石に直接電流を流すことにより磁石の向き（＝磁化）を変える、すなわち磁化を操作することができる。逆に、磁化を変化させると、磁石内部で電流が生じる。このように、磁化と電流は磁石内部で互いに影響し合っている。このような現象を、微視的なモデルに基づいて理論的に定式化した。更に、相対性理論の効果（スピン軌道相互作用）を利用した磁化操作や、温度差による磁化操作について、理論を拡張して調べた。

研究成果の概要（英文）：

A ferromagnetic moment can be manipulated by applying an electric current directly to a ferromagnet. Conversely, an electric current can be induced by the dynamics of magnetization. We have formulated a microscopic theory which describes such interplay between the magnetization and electric current in a ferromagnet. The theory is extended to study the manipulation which utilizes the relativistic effects (spin-orbit coupling) or temperature gradient.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

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：スピントロニクス、電流による磁化ダイナミクス、スピントルク、スピン起電力、スピン緩和、ギルバート減衰、ゲージ場、熱現象

1. 研究開始当初の背景

近年、微細加工した磁性体を用いて、磁化と電気伝導が相互に影響しあう現象の研究が盛んになされている。この分野は、電子のスピン自由度をエレクトロニクスに応

用しようという観点から「スピントロニクス」と呼ばれているが、基礎物理学的な観点からも重要で興味深い現象が多い。この分野の誕生のきっかけとなった巨大磁気抵抗効果は、磁化構造が電子輸送に及ぼす効果として一般的に捉えることができる。そ

の後、逆に磁性体中を流れる電流（正確には、それに伴うスピン流）が、磁化にトルクを及ぼすことにより磁化構造に影響を与えること、特に磁化ダイナミクスを駆動し磁化を制御できることが認識され、電流による磁化反転・磁壁移動・スピン波励起、といった現象が実験的・理論的に大変な興味をもって研究され、いくつかの顕著な発展があった。

これらの現象は、直感的には、角運動量保存則などに基づいて理解される。しかし実際の系では、保存則の破れの効果が多少なりとも存在し、これにより質的に新しい効果が生じることが知られている。そのような微妙な効果について、現象論的な議論は必ずしも正しい答を与えず、混乱を招いたこともあったが、現象論的な仮定を導入しない微視的なモデル計算により解決された。このようなことから、微視的理論の更なる展開が望まれていた。

2. 研究の目的

前項で説明した状況を踏まえ、本研究では、強磁性体における電流と磁化の相互作用、すなわちスピントルクとスピン起電力、に関する微視的理論を発展させることを目標とする。具体的には、以下の問題に取り組む。特に、熱的に誘起されたスピントルクの理論を開拓する。

(1) スピン起電力の微視的理論

スピントルクの逆過程である「スピン起電力」について、直感的理解と結びつきやすい「ゲージ場の方法」に基づいた微視的理論を構築する。

(2) スピントルクに対するスピン軌道相互作用の効果

スピン軌道相互作用の強い系では、それまで知られていたトルクとは質的に異なるトルクが存在し、磁化操作の効率化に寄与する可能性が期待される。本研究課題である微視的計算の観点からも重要な研究対象であるが、その計算は一般に複雑である。そこでまず、解析的に取り扱いやすいことに着目して、トポロジカル絶縁体表面に実現する2次元ディラック電子系について計算を行う。

(3) 熱誘起スピントルクの微視的計算

強磁性体の磁化をスピン流で制御できるが、

多くの場合、このスピン流として、通常の電流に付随するものが利用されている。一方で、スピン流は温度勾配によっても誘起することができる。したがって、温度勾配によってもトルクが生じ、磁化を制御することができる。本研究では、このような、温度勾配で誘起されるトルクの微視的理論を開拓する。

3. 研究の方法

各問題に適切な微視的モデルを設定し、グリーン関数法に基づいて虚心坦懐に計算する。

4. 研究成果

(1) スピン起電力の微視的理論

磁化ダイナミクスにより発生する「スピン起電力」の局所的な表式を微視的に導いた。用いたゲージ場の方法に存在する困難を解決し、微視的理論を完成・精密化した。

時間的・空間的に変動する磁化と相互作用する電子系を扱うのに便利な「ゲージ場の方法」を用いて、磁化ダイナミクスにより誘起される電流を計算すると、電子系にスピン緩和が存在する場合はゲージ場に関してゲージ不変でない(計算の際に選ぶ座標系に依存する)結果に導かれるという困難があった。これは、ハミルトニアンに陽に現れるゲージ場だけを考慮したことによるものであることを一般論(Onsagerの相反定理)で明らかにし、それを踏まえて、スピン緩和項に現れる別の因子(回転行列)の効果を検討すると、ゲージ不変な結果が得られることが分かった。このような機構は、以前、Gilbert dampingの計算において本研究代表者らにより認識されていたものである。これらの結果を論文として発表した。(J. Shibata and H. Kohno, Phys. Rev. B 84 (2011) 184408 1-12.)

(2) スピントルクに対するスピン軌道相互作用の効果

トポロジカル絶縁体表面に実現する2次元ディラック電子系が、それと近接する磁性体の磁化に及ぼすトルクを調べた。この系の特殊性である電子の速度とスピンの等価性から、得られたトルクの係数は全て輸送係数と等価であることを指摘した。一方で、更に、フィードバック効果を考慮すると、輸送係数との等価性が破れることを見出した(A. Sakai and H. Kohno, 論文投稿中)。副産物として、ディラック電子系

における紫外発散の取り扱いに関して新しい方法を提案し、論文として発表した。(J. Fujimoto, A. Sakai and H. Kohno, Phys. Rev. B 87 (2013) 085437 1-5.)

(3) 熱誘起スピントルクの微視的計算

熱的応答を、線形応答理論と通常のグリーン関数法で計算するための処方として、いわゆる Luttinger の方法という標準的な方法が知られている。しかし、これをトルクの計算に単純に適用すると、(応答関数が絶対零度で発散するなど)非物理的な結果に導かれるという理論的困難があった。この種の困難は、いわゆる“Fermi-sea term”が存在する場合に一般に存在し、量子ホール系や Berry 位相系の熱輸送係数において既に知られていた。今回、我々は、そこでの解決策(磁化電流の分離)を一般化することにより、スピントルクにおける問題も解決でき、いわゆる Mott 則を導くことができた。その成果は、国際ワークショップ(Spin Caloritronics 4, 2012.6.3-5, 仙台)で発表し、現在論文としてまとめている。

更に、Rashba 型スピン軌道が存在するとき存在する新しい型の電流誘起トルク、いわゆる「スピン軌道トルク」についても、その熱誘起版を解析した。これは、オランダの研究者(Mr. van der Bijl, ヌトレヒト大学)との共同研究で、現在、論文としてまとめている。

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 12 件)

- ① K.-J. Kim, R. Hiramatsu, T. Koyama, K. Ueda, Y. Yoshimura, D. Chiba, K. Kobayashi, Y. Nakatani, S. Fukami, M. Yamanouchi, H. Ohno, H. Kohno, G. Tatara and T. Ono, “Two-barrier stability that allows low power operation in current-induced domain wall motion”, Nature Communications, 査読有, accepted.
- ② K. Hosono, J. Shibata, H. Kohno and Y. Nozaki, “Spin torques due to diffusive spin current in magnetic texture”, Phys. Rev. B, 査読有, 87 (2013) 094404 1-8.
- ③ J. Fujimoto, A. Sakai and H. Kohno, “Ultraviolet divergence and Ward-Takahashi

identity in a two-dimensional Dirac electron system with short-range impurities”, Phys. Rev. B, 査読有, 87 (2013) 085437 1-5.

- ④ T. Koyama, K. Ueda, K.-J. Kim, Y. Yoshimura, D. Chiba, K. Yamada, J.-P. Jamet, A. Mougin, A. Thiaville, S. Mizukami, S. Fukami, N. Ishiwata, Y. Nakatani, H. Kohno, K. Kobayashi and T. Ono, “Current-induced magnetic domain wall motion below intrinsic threshold triggered by Walker breakdown”, Nature Nanotechnology, 査読有, 7 (2012) 635-639.
- ⑤ K. Hosono, J. Shibata, H. Kohno and Y. Nozaki, “Calculation of nonlocal spin transfer torque”, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, 48 (2012) 4367-4370.
- ⑥ K. Tanabe, D. Chiba, J. Ohe, S. Kasai, H. Kohno, S. E. Barnes, S. Maekawa, K. Kobayashi and T. Ono, “Spin motive force due to a gyrating magnetic vortex”, Nature Communications, 査読有, 3 Article number: 845 (doi:10.1038/ncomms1824) (2012)
- ⑦ J. Shibata and H. Kohno, “Spin and charge transport induced by gauge fields in a ferromagnet”, Phys. Rev. B, 査読有, 84 (2011) 184408 1-12.
- ⑧ J. Shibata, G. Tatara and H. Kohno, “A brief review of field- and current-driven domain wall motion”, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, 44 (2011) 384004 1-18.
- ⑨ S.-M. Seo, H.-W. Lee, H. Kohno, and K.-J. Lee, “Magnetic vortex wall motion driven by spin waves”, Applied Physics Letters, 査読有, 98 (2011) 012514 1-3.
- ⑩ J. Shibata and H. Kohno, “Spin Hall Current and Spin-transfer Torque in Ferromagnetic Metal”, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 200 (2010) 062026 1-4.
- ⑪ L. Heyne, J. Rhensius, Y.-J. Cho, D. Bedau, S. Krzyk, C. Dette, H. S. Korner, J. Fischer, M. Laufenberg, D. Backes, L. J.

Heyderman, L. Joly, F. Nolting, G. Tatara, H. Kohno, S. Seo, U. Rudiger, and M. Klauui, “Geometry-dependent scaling of critical current densities for current-induced domain wall motion and transformations”, Physical Review B, 査読有, 80 (2009) 184405 1-4.

⑫ J. Shibata and H. Kohno, “Inverse Spin Hall Effect Driven by Spin Motive Force”, Physical Review Letters, 査読有, 102 (2009) 086603 1-4.

[学会発表] (計 26 件)

① 酒井章雄, 河野 浩, 「スピントルク及びスピ起電力の微小振幅の方法による微視的解析 - ラッシュバ型スピン軌道相互作用を伴う系 -」日本物理学会, 2013.3, 広島大学 (口頭)

② 藤本純治, 河野 浩, 「ディラック強磁性体の秩序変数: 自己無撞着方程式による解析」日本物理学会, 2013.3, 広島大学 (ポスター)

③ A. Sakai and H. Kohno, “Spin torques and charge transport on the surface of topological insulator”, QS²C Theory Forum International Symposium on “Strongly Correlated Quantum Science”, 2013.1.26-29, Univ. of Tokyo, Japan (ポスター)

④ 藤本純治, 河野 浩, 「ディラック強磁性体の輸送係数Ⅱ」日本物理学会, 2012.9, 横浜国立大学 (口頭)

⑤ A. Sakai and H. Kohno, “Spin torques and charge transport on the surface of topological insulator”, The 7th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductor (PASPS-VII), 2012.8.5-8, Eindhoven, The Netherlands (ポスター)

⑥ J. Fujimoto and H. Kohno, “Transport

properties of Dirac Ferromagnet”, The 7th International Conference on Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductor (PASPS-VII), 2012.8.5-8, Eindhoven, The Netherlands (ポスター)

⑦ 河野 浩, “Microscopic Calculation of Thermal Spin Torques”, Spin Caloritronics 4, 2012.6.3-5, Sendai (招待)

⑧ 河野 浩, “Microscopic theory of current-spin interaction in ferromagnets with Rashba-type spin-orbit coupling”, International Symposium on the Dynamics of Domain Walls, 2012.5.30-6.1, Hamburg, Germany (招待)

⑨ A. Sakai and H. Kohno, “Spin torques and charge transport on the surface of topological insulator”, International conference on topological phenomena, E&S Building, Nagoya University, 2012.5.16-20, Nagoya, Japan (ポスター)

⑩ 酒井章雄, 河野 浩, 「トポロジカル絶縁体の表面電子系によるスピントルクの計算Ⅱ」日本物理学会, 2012.3, 関西学院大学 (口頭)

⑪ 藤本純治, 河野 浩, 「ディラック強磁性体の輸送係数」日本物理学会, 2012.3, 関西学院大学 (口頭)

⑫ 藤本純治, 酒井章雄, 河野 浩, 「2次元ディラック電子系の紫外発散と不純物効果」日本物理学会, 2012.3.26, 関西学院大学 (口頭)

⑬ 河野 浩, “Microscopic Study of Spin Motive Force”, The 2nd ASRC International Workshop on Magnetic Materials and Nanostructures, 2012.1.10-13, Tokai, Japan (招待)

⑭ A. Sakai and H. Kohno, “Spin torques due to topological surface state”, The 2nd ASRC

International Workshop on Magnetic Materials and Nanostructures, 2012.1.10-13, Tokai, Japan (ポスター)

⑮ 河野 浩, 「電流-スピン相互作用の微視的理論」日本物理学会, 2011.9.21, 富山大学. (招待)

⑯ 酒井章雄, 河野 浩, 「トポロジカル絶縁体の表面電子系によるスピントルクの計算」日本物理学会, 2011.9, 富山大学 (ポスター)

⑰ A. Sakai and H. Kohno, “Calculation of spin torques due to helical electrons”, 6th international School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, 2011.7.31-8.5, Matsue, Japan (ポスター)

⑱ A. Sakai and H. Kohno, “Calculation of spin torque for a system with spin-orbit interaction”, 5th International Workshop on Spin Currents, 2011.7.25-28, Sendai, Japan (ポスター)

⑲ 酒井章雄, 河野 浩, 「スピン軌道相互作用の強い系におけるスピントルクの計算」日本物理学会, 2011.3, 新潟大学 (ポスター)

⑳ 酒井章雄, 河野 浩, 「トポロジカル絶縁体によるスピントルク」新学術領域 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル現象 第2回領域研究会, 2011.3, 岡山大学 (ポスター)

21 河野 浩, ”Introduction to Current-Driven Magnetization Dynamics”, The 2nd International Conference on Advanced Micro-Device Engineering: AMDE 2010, 2010.12.9-10, 群馬県桐生市 (招待)

22 河野 浩, ”Microscopic Theory of Current-Spin Interaction in Conducting Ferromagnets”, Handai Global COE & ICNDR, 2010.5.30-6.4, 大阪大学 (口頭)

23 河野 浩, ”Diagrammatic Methods in Spintronics: Spin Torque and Spin Motive Force”, KITP-C Program on “Progress in Spintronics and Graphene Research”, 2010.5.19, 北京(中国) (招待)

24 柴田絢也, 河野 浩, 「スピン起電力の微視的理論 -ゲージ場の方法- II」日本物理学会, 2010.3.21, 岡山大学 (口頭)

25 河野 浩, ”Microscopic Calculation of Spin Motive Force - Spin relaxation and gauge invariance -”, 4th International workshop on Spin Currents and 2nd International workshop on Spin Caloritronics, 2010.2.8, 東北大学金属材料研究所 (口頭)

26 河野 浩, ”Microscopic Theory of Current-Spin Interaction in Ferromagnets”, International workshop, “Spin-Up 2009”, 2009.6.1, Longyearbyen, Norway (招待)

[図書] (計2件)

① 河野 浩, 多々良源, Nanomagnetism and Spintronics (Elsevier, 2009) pp.189-229.

② 河野 浩, 川端 優, 野口 毅, 上田昇平, 柴田絢也, 多々良源, Proceedings of the 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (World Scientific, 2009) pp.111-117.

[産業財産権]

○出願状況 (計 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 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 浩 (KOHNO HIROSHI)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授
研究者番号:10234709