

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400339

研究課題名(和文) スピン軌道相互作用の生む新しい磁性体スピントロニクス現象の微視的理論

研究課題名(英文) Microscopic theory of magnetism-based spintronics enriched by spin-orbit coupling

研究代表者

河野 浩 (Kohno, Hiroshi)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：10234709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：強磁性金属においてRashba型スピン軌道相互作用(RSOC)が生む電流誘起スピン軌道トルクやスピン起電力を調べた。トルクについては磁化の空間微分の1次まで計算し、RSOCの効果により項が増大することを見出した。また、温度勾配で誘起されるスピン軌道トルクについても調べた。今後、スピン軌道相互作用の効果を探ると面白いと思われる現象(マグノンによるスピントルク、反強磁性金属におけるスピン起電力、トポロジカルホール効果)についても解析した。当初予期しなかった成果としては、双極子マグノンによる電子の異常ホール効果、光応答に対するRSOCの効果、がある。

研究成果の概要(英文)：We microscopically studied current-induced spin torques and spin motive forces in the presence of Rashba spin-orbit coupling (ROC) in ferromagnetic metals. By calculating torques up to the first order in spatial gradient of the magnetization, we found that the beta-term is enhanced by the Rashba SOC. Thermally induced spin-orbit torques are also examined. We also studied several phenomena that do not involve SOC, such as magnonic torques in ferromagnets, spin motive forces in antiferromagnetic metals, and topological Hall effect, all of which will be studied by including SOC in the future. Works that were unexpected at the beginning were also done, which include anomalous Hall effect driven by dipolar spin waves, and the effect of Rashba SOC on optical properties.

研究分野：物性理論

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用は、スピンホール効果やトポロジカル絶縁体、マルチフェロイックスといった新奇なスピン関連現象の源となっている。一方で、巨大磁気抵抗効果や、電流に駆動された磁化ダイナミクス、スピン起電力といった、磁性体をベースにしたスピントロニクスにおける現象は、電子がスピンと電荷をもつという素朴な事実（と交換相互作用）に由来し、スピン軌道相互作用は（第一義的には）重要でない。しかし、磁性体スピントロニクスにおいても、スピン軌道相互作用は新しい効果を生み、基礎的興味のみならず応用上も重要になる可能性が近年認識されてきた。たとえば、Rashba 型スピン軌道相互作用が存在する系では、電流を流すと伝導電子にスピン分極が生じ、磁化にトルクを及ぼすことができる。これはこの 10 年あまり研究されてきた「電流による磁化操作」の原理（スピン移行効果など）とは異なる新たな効果で、うまく利用すると効率的な磁化操作への応用が期待できる。また、磁化ダイナミクスによりスピン流が誘起される現象（スピン起電力）も、従来のベリ-位相に基づく微小な効果よりも大きな効果が Rashba 型スピン軌道相互作用により生じることが指摘されており、磁化構造（情報）やダイナミクスを電気的に検出する手段としてより現実味を増してきた。

2. 研究の目的

電流によるスピントルクに対するスピン軌道相互作用の理論解析は、当初は現象論が主であった。しかし、スピン軌道相互作用やスピン緩和の理論的取扱いには微妙な点が存在するため、より本格的な微視的解析が望まれる。本研究の目的は、磁性体スピントロニクス現象に対するスピン軌道相互作用やスピン緩和の効果について、微視的な解析を進展させることである。このような解析はまた、物質に即した理解や、応用を目指した物質デザインの観点からも重要で、たとえば第一原理計算へと橋渡しする上でも有用であろう。

3. 研究の方法

グリーン関数法や線形応答理論など場の量子論の手法に基づいて、種々の現象を微視的に解析する。自己エネルギーだけでなく、バーテックス補正など、現象論では見逃しやうすい効果も考慮して、丹念に計算する。磁化構造の扱いに関しては、「微小振幅の方法」(H. Kohno, J. Shibata and G. Tatara, J. Phys. Soc. Jpn., **75**, 113706 1-4 (2006)) と「ゲージ場の方法」(H. Kohno and J. Shibata, J. Phys. Soc. Jpn., **76**, 063710 1-4 (2007)) を整備してきたので、これらの方法を適宜用

いる。

4. 研究成果

主として、強磁性金属における電流誘起スピントルクやスピン起電力に対する Rashba 型スピン軌道相互作用の効果を調べた。とくに、磁化が一樣な場合だけでなく、磁化の空間変化（空間微分の 1 次）を含むトルクも計算した。また、温度勾配で誘起されるスピン軌道トルクについても解析した。一方で、当初予定していたスカーミオン系の解析や第一原理計算などのより現実的な計算については行うことはできなかった。

また、現段階ではスピン軌道相互作用とは無関係だが、今後、スピン軌道相互作用の効果を調べると面白いと思われる現象（マグノンによるスピントルク、反強磁性金属におけるスピン起電力、トポロジカルホール効果）についても解析した。

当初予期しなかった成果として、磁気双極子相互作用（広い意味のスピン軌道相互作用）に支配される強磁性スピン波が、電子の異常ホール効果を引き起こすことを見出した。また、光応答に対する Rashba スピン軌道相互作用の効果を調べた。

以下にそれぞれの概要を記す。

(1) Rashba 型スピン軌道相互作用をもつ 2 次元電子系が強磁性磁化に及ぼすスピントルク（電流誘起トルク、Gilbert 減衰定数、など）およびスピン起電力を計算した。磁化が基本的に 2 次元面に垂直な方向を向いているとして、磁化が空間的に一樣な場合のみならず、空間変化している場合、すなわち、磁化の空間微分を含むトルクについても計算を行うことができた。これにより、いわゆる「スピン軌道トルク」だけでなく、「スピン移行トルク」や「ベータ項」をも含めて総合的に議論することができた。その結果、Rashba 型スピン軌道相互作用によりベータ項が非常に増大する、それに駆動された磁壁の速度はスピン移行効果によるものの数十倍にもなり得る、などの結果を得た。計算は、微小振幅の方法に基づいた線形応答理論で、電子の自己エネルギーをボルン近似で、バーテックス補正をはしご近似の範囲で取り入れた。（論文準備中）

(2) Rashba 強磁性体における feedback 効果、特に feedback トルクと Gilbert damping の関係を調べた。これは、Rashba 系よりも理論的取扱いが容易な 2 次元 Dirac 系の結果（論文 2）、すなわち、Dirac 系の Gilbert damping は feedback 効果で 100% 説明できること、に着想を得たものであった。今回の計算で、Rashba 系では 100% ではないが、電子の散乱時間に比例する項については、feedback 効果で説明できる、という結果を得た。

(3) Rashba 型スピン軌道相互作用によるスピン軌道トルクについて、[A] と同じ近似のもと、磁化が空間的に一樣な場合に、種々のパラメータ（磁化の方向、化学ポテンシャル）への依存性を詳細に調べた。放物線分散のモデルは、不純物散乱のバーテックス補正を考慮するとフェルミ面が2枚ある場合には SOT に関する以下の量が消失するという点で非常に特殊であることを見出した。(a) 非散逸的スピン軌道トルク、(b) 散逸的スピン軌道トルクの化学ポテンシャル依存性、(c) 散逸的スピン軌道トルクの磁化方向依存性。他方、一般のバンド分散の場合にはそのようなことはないことを、強束縛モデルの計算で示した。(論文準備中)

(4) 温度勾配で誘起される（伝導電子による）スピン移行トルクおよび β 項を、スピン軌道相互作用が無い場合に対して計算した。とくに、Luttinger の方法を用いる際に必要となる久保公式への補正について詳細に議論した（論文8）。また、Rashba 型スピン軌道相互作用がある場合に、温度勾配で誘起される（伝導電子による）スピン軌道トルクや、その逆過程であるスピン起電力についても同様の計算および議論を行った（論文準備中）。

(5) 非磁性および強磁性 Rashba 電子系のバルク光応答を、電場、スピン磁場、軌道磁場に対する電流、電荷、スピン磁化、電流磁化の応答をすべて計算することにより微視的に調べた。強磁性の場合には、絶縁体マルチフェロイック物質で議論されていた有効モデルと同じモデルで記述できることを見出した。（論文7）

(6) 金属強磁性体において、双極子相互作用で支配される領域のスピン波が電子の異常ホール効果を引き起こすことを見出した。これは、スピン波にとって双極子相互作用が一種のスピン軌道相互作用として働くことに起因する効果と見ることができる。（論文6）

(7) 温度勾配で誘起されるスピン波によるスピントルクの計算を、スピン緩和の微視的機構まで立ち入った微視的モデルを設定して行った。これは、スピン緩和により生じる効果を曖昧さなくシステムティックに調べることを目指したものである。実際、現象論的モデルに基づく従来の計算結果が変更を受けることを見出した（論文9）。今後は、スピン軌道相互作用のある場合に計算を進める予定である。

(8) ビスマスのように有効的にディラック方程式で記述される電子系のスピンホール効果について、従来調べられていた内因的寄与に加えて外因的寄与（不純物に依存する寄与）を調べた（論文投稿中）。

(9) 反強磁性金属において、磁化ダイナミクスで誘起される起電力およびスピン起電力を、微視的モデルに基づき計算した。最近出版された現象論的議論による結果に、新しい項が付け加わることを見出した。スピン軌道相互作用のある場合については今後の課題である。

(10) スピンカイラリティーで誘起されるホール効果、とくに磁気スカーミオン格子におけるトポロジカルホール効果を、磁化との結合が弱い場合（弱結合領域）に対して摂動論で計算し、非局所スピンカイラリティーで決まることを見出した。（論文3；論文準備中）スピン軌道相互作用のある場合については今後の課題である。

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9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* **4** (2013) 2011 1-6 (doi: 10.1038/ncomms3011). 査読有。
2. A. Sakai and H. Kohno, “Spin torques and charge transport on the surface of topological insulator”, *Phys. Rev. B* **89** (2014) 165307 1-21. 査読有。
3. K. Nakazawa and H. Kohno, “Effects of Vertex Corrections on the Chirality-Driven Anomalous Hall Effect”, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** (2014) 073707 1-4. 査読有。
4. “Current-driven dynamics of coupled domain walls in a synthetic antiferromagnet”, H. Saarikoski, H. Kohno, C. H. Marrows and G. Tatara, *Phys. Rev. B* **90** (2014) 094411 1-8. 査読有。
5. J. Fujimoto and H. Kohno, “Transport properties of Dirac ferromagnet”, *Phys. Rev. B* **90** (2014) 214418 1-15. 査読有。
6. K. Yamamoto, K. Sato, E. Saitoh and H. Kohno, “Anomalous Hall effect driven by dipolar spin waves in uniform ferromagnets”, *Phys. Rev. B* **92** (2015) 140408(R) 1-4. 査読有。

7. J. Shibata, A. Takeuchi, H. Kohno and G. Tatara, “Theory of Anomalous Optical Properties of Bulk Rashba Conductor”, J. Phys. Soc. Jpn. **85** (2016) 033701 1-5. 査読有.

8. H. Kohno, Y. Hiraoka, M. Hatami, and G. E. W. Bauer, “Microscopic calculation of thermally induced spin-transfer torques”, Phys. Rev. B **94** (2016) 104417 1-12. 査読有.

9. T. Yamaguchi and H. Kohno, “Microscopic theory of spin-wave spin torques induced by temperature gradient”, J. Phys. Soc. Jpn. (2017) (印刷中) 査読有.

[学会発表] (計 77 件)

1. H. Kohno, Feedback effects in Dirac and Rashba ferromagnets, Workshop on Recent Developments of Current-driven Magnetization Dynamics, Osaka University, 2013. 4. 8-9.

2. A. Sakai and H. Kohno, “Spin torques and charge transport on the surface of topological insulator”, The 8th International Symposium on Metallic Multilayers, Kyoto, 2013. 5. 19-24.

3. J. Fujimoto and H. Kohno, “Transport Properties of Dirac Ferromagnet”, The 8th International Symposium on Metallic Multilayers, Kyoto, 2013. 5. 19-24.

4. 河野 浩, 酒井章雄, 藤本純治, 川端 優, 柴田絢也, Feedback effects in Dirac and Rashba ferromagnets, 基研研究会「固体中におけるディラック電子系物理の新展開」, 京都大学, 2013. 6. 19-21.

5. 酒井章雄, 河野 浩, ラッシュバ型スピン軌道相互作用を伴う系でのスピントルク, 同上

6. 藤本純治, 河野 浩, ディラック強磁性体の輸送係数, 同上

7. 川端 優, 酒井章雄, 藤本純治, 柴田絢也, 河野 浩, Dirac および Rashba 強磁性体における Gilbert 減衰とフィードバック効果, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, 2013 年 9 月.

8. 柴田絢也, 河野 浩, 金属強磁性体における Gilbert 減衰とフィードバック効果, 同上.

9. 藤本純治, 河野 浩, ディラック強磁性体におけるギルバート減衰トルク, 同上.

10. 酒井章雄, 河野 浩, スピントルク及びスピン起電力の微小振幅による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-II, 同上.

11. J. Fujimoto, H. Kohno, Transport properties of Dirac Ferromagnet”, KITP Conference: Concepts in Spintronics, KITP, UCSB, September 30 - October 4, 2013.

12. H. Kohno, A. Sakai, J. Fujimoto, S. Kawabata, J. Shibata, Feedback effects in Dirac and Rashba Ferromagnets, KITP program on Spintronics: Progress in Theory, Materials, and Devices, Santa Barbara, USA, 2013. 11. 8.

13. 藤本純治, 河野 浩, ディラック強磁性体の輸送係数, 第 3 回「固体中のディラック電子」研究会, 赤穂, 2013 年 12 月.

14. H. Kohno, A. Sakai, J. Fujimoto, S. Kawabata, J. Shibata, Feedback effects in Dirac and Rashba Ferromagnets, Workshop on Current-Driven Magnetisation Dynamics, Leeds, UK, 2014. 1. 9 (招待講演)

15. 仲澤一輝, 河野 浩, スピнкаイラリティによる異常 Hall 伝導度に対する vertex 補正の効果, 日本物理学会 2014 年春季大会, 東海大学, 2014 年 3 月.

16. 藤本純治, 河野 浩, ディラック強磁性体の輸送係数に対するバーテクス補正の効果, 同上.

17. 酒井章雄, 河野 浩, ラッシュバ強磁性体におけるスピントルクの微視的計算, 日本物理学会 (秋季), 中部大学, 2014 年 9 月.

18. 山口皓史, 河野 浩, 磁化構造まわりのスピン波の理論, 同上.

19. 仲澤一輝, 河野 浩, スピнкаイラリティによる拡散領域での永久電流, 同上.

20. K. Nakazawa, H. Kohno, Anomalous Hall effect and persistent current due to spin chirality in a diffusive regime, IGER International Symposium 2015, Nagoya University, 2015. 3. 1.

21. T. Yamaguchi, H. Kohno, Linear response theory of spin torques due to spin waves, IGER International Symposium 2015, Nagoya University, 2015. 3. 1.

22. N. Norizuki, A. Kobayashi, and H. Kohno,

Spin polarization induced by diamagnetic current in Rashba system, 同上.

23. J. Fujimoto, H. Kohno, Microscopic calculation of Rashba spin-orbit torques, APS March Meeting, 2015. 3. 3.

24. K. Nakazawa, H. Kohno, Anomalous Hall effect and persistent current due to spin chirality, APS March Meeting, 2015. 3. 5.

25. 仲澤一輝, 河野 浩, 磁気スカーミオン格子における異常ホール効果の理論, 日本物理学会(春季), 早稲田大学, 2015年3月.

26. 藤本純治, 河野 浩, Rashba スピン軌道トルクの微視的計算, 同上.

27. 山口皓史, 河野 浩, スピン波によるスピントルクの線形応答理論, 同上.

28. 法月直人, 小林晃人, 河野 浩, 非一様磁場により誘起される反磁性電流に対するスピン軌道相互作用の効果, 同上.

29. H. Kohno, K. Nakazawa, T. Yamaguchi, Spin Chirality Mechanics, ICC-IMR / 20th REIMEI International Workshop on "Spin Mechanics 2", IMR, Tohoku University, 2015. 6. 24 (招待講演)

30. T. Yamaguchi, H. Kohno, Linear Response Theory of Spin Torques due to Spin Waves, New Perspectives in Spintronics and Mesoscopic Physics, ISSP, Univ. Tokyo, 2015. 6.

31. K. Nakazawa, H. Kohno, Anomalous Hall effect and persistent current due to spin chirality, 同上.

32. T. Yamaguchi, H. Kohno, Linear Response Theory of Spin Torques due to Spin Waves, Spintech 8, Basel, Switzerland, 2015. 8.

33. K. Nakazawa, H. Kohno, Anomalous Hall effect and persistent current due to spin chirality, 同上.

34. 仲澤一輝, 河野 浩, 磁気スカーミオン格子における異常 Hall 効果 II, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学, 2015 年 9 月.

35. 山口皓史, 河野 浩, スピン波スピントルクの線形応答理論とゲージ不変性, 同上.

36. 藤本純治, 河野 浩, Rashba スピン軌道トルクに対する Dirac 点の効果, 同上.

37. 法月直人, 小林晃人, 河野 浩, 非一様磁場により誘起される平衡電流に対するラ

シュバ型スピン軌道相互作用の効果, 同上.

38. 柴田絢也, 竹内祥人, 河野 浩, 多々良源, バルクラッシュバ電子系における電気磁気光学効果, 同上.

39. 多々良源, 柴田絢也, 竹内祥人, 河野 浩, Rashba スピン軌道相互作用系の光学特性, 同上.

40. K. Nakazawa, H. Kohno, Anomalous Hall effect in magnetic skyrmion lattice, Toyota RIKEN international workshop 2015, Nagoya University, 2015. 11.

41. T. Yamaguchi, H. Kohno, Linear Response Theory of Spin-wave Spin Torques induced by Temperature Gradient, International Conference on Thermoelectric Materials Science 2015 (TMS2015), Nagoya University, 2015. 11.

42. J. Fujimoto, H. Kohno, E. van der Bijl, R. A. Duine, Microscopic Theory of Thermal Spin-orbit Torques, 同上.

43. H. Kohno, K. Yamamoto, K. Sato, E. Saitoh, Anomalous Hall Effect Induced by Dipolar Magnons, Spin Energy Materials, Sendai, 2015. 12 (招待講演)

44. 仲澤一輝, 河野 浩, 磁化構造による有効磁場がある系における電荷・スピン輸送の理論, 科研費特別推進研究「スピンオービトロニクス」平成 27 年度報告会, 小樽, 2016 年 2 月.

45. 山口皓史, 河野 浩, スピン波スピントルクの微視的理論, 同上.

46. 戸田雄太, 河野 浩, 反強磁性金属におけるスピン起電力の理論, 同上.

47. 法月直人, 小林晃人, 河野 浩, Rashba 型スピン軌道相互作用を持つ系での磁場応答の理論, 同上.

48. 仲澤一輝, 河野 浩, 磁化構造による有効磁場がある系における電荷・スピン輸送の理論, 日本物理学会第 71 回年次大会, 東北学院大学, 2016 年 3 月.

49. 山口皓史, 河野 浩, 温度勾配によるスピン波スピントルクの微視的計算, 同上.

50. 戸田雄太, 河野 浩, 反強磁性金属におけるスピン起電力の理論, 同上.

51. 藤本純治, 河野 浩, E. van der Bijl, R. A. Duine, 温度勾配によるスピン軌道トル

クの微視的計算, 同上.

52. 法月直人, 小林晃人, 河野 浩, ディラック電子系の磁場応答に対するラシュバ型スピン軌道相互作用の効果, 同上.

53. 山本 慧, 佐藤浩司, 齋藤英治, 河野 浩, スピン波の静磁モードに起因する異常ホール効果, 同上.

54. K. Sato, K. Yamamoto, E. Saitoh, H. Kohno, Anomalous Hall effect driven by dipolar spin waves in uniform ferromagnets, APS March Meeting 2016, Baltimore USA, 2016. 3.

55. 仲澤一輝, 河野 浩, スピンカイラリティーによる異常 Hall 効果: 強結合と弱結合のつながり, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 金沢大学, 2016 年 9 月.

56. 藤本純治, 深澤峻明, 河野 浩, 輸送現象に対する skew 散乱の効果, 同上.

57. 山口皓史, 河野 浩, 温度勾配によるスピン波スピントルクの微視的理論 II, 同上.

58. T. Yamaguchi and H. Kohno, Microscopic theory of spin-wave spin torque, Quantum Spintronics: Spin transport through quantum magnetic materials, Mainz, Germany, 2016. 9. 21-23.

59. J. Fujimoto, and H. Kohno, Effects of skew scattering on non-dissipative transport properties, International workshop on nano-spin conversion science & quantum spin dynamics, Univ. Tokyo, 2016 年 10 月.

60. 河野 浩, 熱誘起スピントルクの微視的理論, 第二回 ディラック電子系マルチフェロイクス研究会, 名古屋大学, 2016 年 11 月 17 日 (招待講演)

61. J. Nakane, H. Kohno, Dynamics of angular momentum in a spin-phonon system, International School on Spintronics and Spin-Orbitronics, Fukuoka, 2016. 12. 16.

62. T. Funato, H. Kohno, Microscopic derivation of spin-vorticity coupling in a Dirac fluid, 同上.

63. T. Yamaguchi, H. Kohno, Microscopic theory of spin-wave spin torque induced by temperature gradient, 同上.

64. 仲澤一輝, 河野 浩, スカーミオン系での異常 Hall 効果: 交換相互作用の弱い場合,

科研費特別推進研究「スピンオービトロニクス」平成 28 年度報告会, 小樽, 2017 年 2 月 19-21 日.

65. 戸田雄太, 河野 浩, 反強磁性金属におけるスピン起電力の微視的理論, 同上.

66. 今井悠介, 藤本純治, 河野 浩, ジャロシンスキー・守谷相互作用のスピン流描像へ補正, 同上.

67. 中根丈太郎, 河野 浩, Dynamics of angular momentum in a spin-phonon system, 同上.

68. 船戸 匠, 河野 浩, ディラック電子流体におけるスピン・渦度結合, 同上.

69. 藤本純治, 河野 浩, 非散逸的輸送現象に対する skew 散乱の効果, 同上.

70. 河野 浩, 熱誘起スピントルクの微視的理論, 同上.

71. K. Nakazawa, H. Kohno, Chirality-induced anomalous Hall effect: Bridging a gap between weak and strong coupling regimes, APS March Meeting 2017, New Orleans, USA, 2017. 3. 15.

72. 山口皓史, 河野 浩, 温度勾配によるスピン波スピントルクの微視的理論 III, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学, 2017 年 3 月.

73. 船戸 匠, 河野 浩, ディラック電子流体のスピン・渦度結合, 同上.

74. 今井悠介, 藤本純治, 河野 浩, ジャロシンスキー・守谷相互作用のスピン流描像への補正, 同上.

75. 中根丈太郎, 河野 浩, スピン・フォノン系の角運動量ダイナミクス, 同上.

76. 藤本純治, 河野 浩, 温度 Green 関数を用いた非線形応答理論, 同上.

77. H. Kohno, Microscopic approach to thermal spintronics theory, Spintronics and Core-to-Core Workshop 2017, Osaka, 2017. 3. 21.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野 浩 (KOHNO, Hiroshi)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 10234709