

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400344

研究課題名(和文) スピン輸送現象における磁気モノポールの有効理論

研究課題名(英文) Effective theory of magnetic monopole in spin transport

研究代表者

多々良 源 (Tatara, Gen)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：10271529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：スピントロニクスにおいて基本的技術となるのはスピン流と他自由度との変換である。本研究ではスピン流と電流や光などの変換メカニズムの微視的視点からの理論的解明を進め以下の成果を得た。まず、スピン軌道相互作用を用いたスピン流から電流への変換は電子スピンにはたらく有効電磁場が引き起こしていることを示した。この電磁場はモノポールももつ物質に特有のものである。次にこの有効電磁場が作る電子の流れがドップラー効果により、光応答において入射方向により透過率が変化する方向二色性を生み出していることを明らかにした。また、温度勾配によって生じる輸送現象を記述する熱ベクトルポテンシャル理論の定式化をおこなった。

研究成果の概要(英文)：Conversion of spin to other degrees of freedom is essential in spintronics. We have studied the conversion mechanisms of spin to electric current and light by a microscopic theory and obtained the following results. We have shown that the spin-charge conversion induced by spin-orbit interaction is described in terms of an effective electromagnetic field acting on electron spin. This effective field is an extension of spin Berry's phase to include spin-orbit interaction. We further demonstrated that the effective electromagnetic field results in a directional dichroism for light by causing the Doppler shift with respect to the intrinsic flow of electron spin. We have also presented a thermal vector potential formulation for describing thermal transport phenomena.

研究分野：スピントロニクス理論

キーワード：スピン電荷変換 スピン流

1. 研究開始当初の背景

従来のエレクトロニクスが物質中の電子の電荷と電流を用いているのに対して、スピントロニクスは電子のスピンのもつ情報も利用しようという技術である。これが確立すればスピン自由度により多くの情報の伝達が可能となり、また高速読み書きが可能な超高集積度不揮発メモリの実現につながる。

スピントロニクス現象は、非可換ゲージ場であるスピングージ場、ベリー位相、スピンの緩和(散逸)、量子異常などの概念がスピンおよび電荷の輸送現象に現れるなど、非常に豊富な現象を含んだ基礎科学としても重要なテーマである。

スピントロニクスにおける基本的で重要な課題はスピン流の生成と制御、検出である。スピン流生成に関しては、これまでにスピン蓄積を用いたスピン注入、磁化ダイナミクスを用いたスピンポンピング効果、及び温度勾配を用いたスピン流生成などの方法が知られ、実験的にも半定量的に確認されている。しかし、スピン流の物理にはよく知られているように致命的なジレンマがある。それはスピン緩和に伴うスピン流の非保存性によるものである。スピン緩和がない状況ではスピン流は保存されたがってその定義も一意であるが、スピン流をエレクトロニクスなどで利用するには必ずスピン軌道相互作用を用いて電気信号に変換する必要がある。この際にはスピン緩和が必ず発生してしまい、スピン流の定義の不確実性が生じてしまう。つまり、スピン流を利用しようとする際には必ずその不確実性を避けては通れないのである。物理法則としてスピン流の生成や検出のメカニズムを理解するためにはこのことは本質的な障害となりうる。ここ数年間我々のグループでは微視的な解析を行い、スピンポンピング効果によるスピン流生成と逆スピンホール効果による電氣的検出のメカニズムは、ある条件下での近似的描像であり、

普遍法則とはみなせないことを明らかにした(Phys.Rev.B(2010))。このことはスピン流によるスピン輸送現象の解釈には限界があることを具体的に示したものである。スピントロニクス現象を物理的に理解する上でも、またエレクトロニクスに組み込む応用のためにも、スピンの流れと電流との変換メカニズムの解明は本質的に重要で緊急な課題であることはいうまでもない。この問題に対して、2012年に我々はさらに研究を深め、スピン電荷変換においてはスピン電磁場に存在するモノポールが本質的な役割を担っているという理論的結果を得、スピン電荷変換の新しいシナリオを与えた(J.Phys.Soc.Jpn.(2012))。それによると、スピンポンピングと逆スピンホール効果を組み合わせたこの現象は、磁化の運動がモノポールを生成し、そのモノポールがアンペール則により電流を発生していることになる。この解釈ではスピン流の定義の不確実性は当然ながら物理量に何ら影響を与えず、一方モノポール流は保存流であり Maxwell 方程式により電場と直接結合できるため、モノポールシナリオは現象の非常に物理的に明快な説明になっている。この仕事はスピントロニクスをエレクトロニクスに組み込む際のスピン電荷変換に対して非常に重要な概念を開拓したものである。スピンの流れと電流との変換メカニズムの解明はいうまでもなく緊急な課題であるが、これらの方向性に基づき有効電磁場の観点から物理的に整理することは基礎物理学的観点から極めて重要な意義を持つと期待される。

2. 研究の目的

電子のスピンのもつ情報を利用することを目的とするスピントロニクスでは、現在基礎物理的視点からの研究が重要な段階であるが、なかでもスピンの流れと電流との変換メカニズムの解明は緊急な課題である。この問題に対して代表者らは弱結合領域におい

てスピンの結合する有効電磁場に基づく新しい解釈を提示し、その有効電磁場とそこに存在するモノポールがスピンと電流の変換において本質的な役割を担っているという新しい可能性を見出した。本研究の目的は、強結合領域も含めた総合的解析によりこの磁気モノポールのゲージ理論的意味付けとその性質を明らかにし、モノポールのスピン輸送およびスピン-電荷の変換における役割を完全に解明することである。最終的に、スピントロニクスにおけるモノポールの役割について統合された理解をし、制御法とスピン-電荷変換における応用手法を確立することを目指す。また、モノポールのみにとらわれず、スピンと他自由度との変換現象を広い視点から整理することも目標とする。

3. 研究の方法

強結合領域でのモノポールの存在及びふるまいを明らかにするために、磁気構造（局在スピン）と伝導電子の結合が強い強結合領域で、スピンゲージ場とスピン軌道相互作用のもとでの有効作用を解析的に求める。これは虚時間形式に基づいたグリーン関数を用いた摂動論（崎田吉川「経路積分による多自由度の量子力学」などの教科書にある標準的手法）で実行でき原理的な問題はない。解析では特に電子に不純物散乱がないクリーン極限でのふるまいに注目することで、内因的で本質的な効果を見出すことを目指す。得られる有効作用は、スピン軌道相互作用がスピンゲージ場の対称性を破るために、ゲージ不変性をもたないものになっていると予想され、このゲージ不変性の破れがモノポールの寄与を表すことになる。

求めた有効作用からモノポールのある有効電磁場を導出し、昨年度の輸送特性から読み取った有効電磁場との一致、もしくは相違点を明らかにする。さらに、有効電場は、電子スピンにはたらいている力を電流の時間微分から直接計算することも可能であり、こ

の方法による計算も行い、輸送特性と有効作用の2つの方法の結果と比較、それぞれに手法のメリットデメリットを明らかにする。

一方、モノポールのもつ有効磁場は特異な異常ホール効果も生み出すと予想され、この定量的予言もおこない実験との連携による検証を目指す。一方モノポールに伴う有効電場についても、磁壁などの磁気構造の運動により発生する新たな起電力として検出するための理論的裏付けも行う。

次いで、通常電磁場と、モノポールが存在するスピン電磁場との相互作用を明らかにし、通常電磁気あるいはエレクトロニクスによってモノポール場を生成、制御する可能性を明らかにする。この相互作用は2種の電磁場の間を電子対励起がつかなくことで生じると予想している。この解析の過程でモノポールの緩和の有無などの特性や、物質中のモノポール場を通常電磁場の測定から検出する可能性なども明らかになる。この問題を発展させて、モノポールを用いてスピンの情報とエレクトロニクスをつなぐ新しい原理のデバイスを提案することも目指す。

スピン電荷変換においてはスピン軌道相互作用が重要な役割を担っているため、重い元素やレアメタルを用いることが必要になると考えられているが、金属表面や界面に特有に現れるラシュバ型とよばれる特別なまた非常に強いスピン軌道相互作用を用いる可能性も議論する。ラシュバ型のスピン軌道相互作用は、Pt/Co/AlO₂などの複合構造において存在を示唆する実験データ（Miron et al., Nature Mater. (2010)）が最近報告され、スピントロニクス現象の効率化に大きく役立つという理論的示唆（Obata&Tatara, Phys. Rev. B (2008)）をサポートする実験的結果が得られている。こうした方向性を理論的にさらに追求し、レアメタルフリーのスピントロニクスデバイスを実現するための知見を得る。この観点は産業上非常に重要な意

味を持つと期待される。

4. 研究成果

2013 年度は、スピン軌道相互作用のうち特に界面で発生する強い Rashba 型スピン軌道相互作用が、磁性と電気伝導特性に与える効果を強結合領域で解析した。その結果、磁化のダイナミクスと Rashba 型スピン軌道相互作用が組みあわさることで、起電力と有効磁場が発生するという事実を見出した。この起電力は、磁化の運動から生じるという点では、電磁気における Faraday 則と似ているが、物質中の量子効果によって生みだされている新しい効果で、電磁気的效果と比べ物質中では圧倒的に強い効果である。この起電力のメカニズムはスピンのもつ量子的な Berry 位相を拡張した概念で理解することができる。有効電場だけではなく有効磁場も発生することはこれまでの研究で示唆されていたが、本研究ではスピンホール効果の解析をすることでその表式を具体的に求めた。Rashba 型相互作用に起因する有効電場磁場は、Rashba 相互作用の最低次で Maxwell 方程式を満たすことも確認できた。また、Rashba 相互作用のみの場合は通常の Maxwell 方程式で記述されるが、それに加えてスピン緩和が存在するときにはモノポール項が現れることも確認できた。これによりスピン軌道相互作用と磁化から発生するモノポールの強結合領域での存在も示され、そのスピン-電荷変換における普遍的役割が明らかになった。

高密度記録素子や演算素子において温度上昇に伴う排熱の処理は避けられない問題である。特に集積化により微細化した素子にとってはこの問題は性能向上において致命的な障害となりうる。この観点では熱によって引き起こされる輸送現象は、熱輸送により排熱の処理を効率的に行うだけでなく、排熱をデバイス動作のために再利用する可能性を実現しうる非常に重要な課題である。微小

領域での熱輸送や熱誘起輸送現象の理論的定式化は 1964 年に Luttinger により提案されており、原理的にはこれに沿って微小領域での熱輸送は記述できるはずである。しかしながらこの枠組みによる解析は計算が煩雑であり、それだけでなく、平衡流に伴って生じる非物理的寄与を物理的考察により正しく取り除く処理をしない限り絶対零度に向けて発散する誤った答えを出してしまうという致命的な欠陥をもつことが、多種の熱輸送現象への適用例により明らかになっている。2014 年度我々は温度駆動スピン依存伝導現象の解析を進める上で、Luttinger の枠組みのもつ本質的欠点を改善した熱輸送を記述する理論体系の構築をおこなった。

これにより従来の熱輸送現象における理論の難解さはなくなり、エレクトロニクスの基盤となっている電子輸送の理論体系と同等に、使いやすく正確な理論体系を熱輸送現象についても実現することができた。また、これまで直感的な期待であった「金属中の電子に対して電場と温度差の効果は同様に働く」という推測を、今回構築した理論により裏付けた。この理論はスピンと熱の間の変換の解析において重要となるものである。

2015 年度は、電気伝導性物質において対象性の破れに伴い現われうる Rashba 型のスピン軌道相互作用により誘起される特異なスピン-電気交換特性、輸送特性及び光学的特性を理論的に解析し、金属系物質のスピン-電気交差相関現象を統一的に記述、理解することに成功した。電流やスピン、スピン流などの応答関数を場の量子論に基づき厳密に計算し、DC 極限から光の振動数領域までの電気及び磁気の交差相関応答を明らかにした。またそれらの相関関数から誘電率、透磁率、さらに交差相関を表す係数を同定し、それに基づき電磁波の分散関係を解析、円偏光の挙動や方向二色性などの特性、また電磁メタマテリアルとしてのふるまいなどを明ら

かにした。その結果、スピン軌道相互作用に基づく電磁交差相関特性を持つ物質の電磁波に対する挙動は、スピン軌道相互作用と磁化から生じるスピン電磁場がトロイダルモーメントとよばれる量になっており、それが光に対しても有効電磁場（ベクトルポテンシャル）としてはたらくことで説明されることが明らかになった。電子スピンに対してのスピン電磁場により光学特性を理解するという本成果は、新しい物理学的視点を提供しており、今後光学特性に対するモノポールの役割など、総合的に解析する価値のある新しい方向性を示したものである。

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 17 件)

Junya Shibata, Akihito Takeuchi, Hiroshi Kohno, and Gen Tatara, Theory of Anomalous Optical Properties of Bulk Rashba Conductor, Journal of the Physical Society of Japan, Volume 85, Number 3, 033701(5 Pages), 2016, 査読有

DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.85.033

701

Nguyen Thanh Phuc, Gen Tatara, Yuki Kawaguchi and Masahito Ueda, Controlling and probing non-abelian emergent gauge potentials in spinor Bose-Fermi mixtures, Nat Commun, 6, 8135 (8 pages), 2015, 査読有

DOI: 10.1038/ncomms9135

Gen Tatara, Thermal vector potential theory of magnon-driven magnetization dynamics, Phys. Rev. B, 92, 064405(1-10), 2015, 査読有

DOI:

http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.92.064405

Gen Tatara, Thermal vector potential theory of transport induced by temperature gradient,

Phys.Rev.Lett.114,196601(1-5),2015,査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.196601

Henri Saarikoski, Hiroshi Kohno, Christopher H. Marrows, Gen Tatara, Current-driven dynamics of coupled domain walls in a synthetic antiferromagnet, Phys. Rev. B 90, 094411(1-8), 2014, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.90.094411

Hideo Kawaguchi, Gen Tatara, Coupling Theory of Emergent Spin Electromagnetic Field and Electromagnetic Field, J.Phys.Soc.Jpn., Vol.83, No.7, 074710(1-6), 2014, 査読有

DOI:

http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.074710,

DOI: 10.7566/JPSJ.83.074710

N. Nakabayashi, Gen Tatara, Rashba-induced spin electromagnetic fields in the strong sd coupling region, New J. Phys., vol. 16, 015016(1-18), 2014, 査読有
DOI: 10.1088/1367-2630/16/1/015016

Gen Tatara, Noriyuki Nakabayashi, Emergent spin electromagnetism induced by magnetization textures in the presence of spin-orbit interaction (invited), J. Appl. Phys. 115, 172609, 2014, 査読有

DOI: http://dx.doi.org/10.1063/1.4870919

Kab-Jin Kim(全 14 名の内 13 番目に記載), Two-barrier stability that allows

low-power operation in current-induced domain-wall motion, Nat

Commun, 4, 2011, 2013, 査読有

DOI: 10.1038/ncomms3011

Gen Tatara(全 7 名の内 1 番目に記載), Proposal for an active electromagnetic metamaterial based on spin-torque oscillators, Phys. Rev. B, 87, 155102(1-8), 2013, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.87.155102

Gen Tatara, Noriyuki Nakabayashi and Kyung-Jin Lee, Spin motive force induced by Rashba interaction in the strong sd coupling regime, Phys.Rev.B., 87, 054403(1-9), 2013, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB.87.054403

〔学会発表〕(計 26 件)

多々良 源, Rashba-induced spin motive force, 13th RIEC International Workshop, 2015/11/18, 東北大(宮城県仙台市)

多々良 源, Theory of electron transport in the presence of magnetization textures, 日本磁気学会学術講演会, 2015/9/11, 名古屋大学 東山キャンパス(愛知県名古屋市)

多々良 源, Emergent spin electromagnetism induced by magnetization textures in the presence of spin-orbit interaction, The AIMR international symposium 2014 (招待講演), 2014/2/18, 仙台国際センター(宮城県仙台市)

多々良 源, Emergent spin electromagnetism induced by magnetization textures in the presence of spin-orbit interaction, FIRST International Symposium on

"Topological Quantum Technology" (招待講演), 2014/1/30, 東京大学(東京都文京区)

多々良 源, Emergent spin
electromagnetism induced by
magnetization textures in the presence of
spin-orbit interaction., 58th Annual
Magnetism and Magnetic
Materials Conference,2013/11/18,コロラド
(アメリカ)

多々良 源, Effective theory of spin
electromagnetic field,the Gordon
Research Conferences(GRC):Spin
Dynamics in Nanostructures,2013/8/22,香
港(中国)

[その他]

ホームページ等

<http://spinphys.riken.jp/sptrt/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

多々良 源 (TATARA, Gen)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性
科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：10271529

(2)研究分担者

なし

研究者番号：

(3)研究協力者

柴田 絢也 (SHIBATA, Junya)

東洋大学・理工学部・准教授

研究者番号：20391972

竹内 祥人 (TAKEUCHI, Akihito)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：80738328

河野 浩 (KONO, Hiroshi)

名古屋大学・理学部・教授

研究者番号：10234709