

## 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31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340104

研究課題名（和文） スピン流輸送現象の微視的理論

研究課題名（英文） Microscopic theory of spin transport phenomena

研究代表者

多々良 源 (TATARA GEN)

独立行政法人理化学研究所・創発スピン物性理論研究チーム・チームリーダー

研究者番号：10271529

研究成果の概要（和文）：

スピン伝導現象と制御（スピントロニクス）は基礎科学と応用の両面で緊急かつ重要な課題である。本研究ではスピントロニクス現象において本質的な役割を担っているスピンに作用する有効電場及び有効磁場に関する理論的解析をおこなった。その結果、それらの場は電荷に作用する通常の電磁気現象と同様の数学的構造をもち、これによりエレクトロニクスと同等な信頼性をもつデバイス設計が可能であることが明らかになった。また、スピンの運ぶ情報を電荷情報に変換するためにはスピン軌道相互作用が重要な役割をしていることもわかった。この変換をスピンの電磁気学の観点でみると、磁化の運動からモノポールが誘起されアンペール則により起電力が発生するという新たな現象であることがわかった。このことはスピントロニクスをエレクトロニクスに融合させる上での新たな可能性を示唆している。

研究成果の概要（英文）：

Spin current is a key concept of spintronics. So far, several methods has been known to generate spin current, including the spin pumping effect induced by magnetization dynamics. For detection of spin current, the inverse spin Hall effect has been widely used. We have studied these effects based on a microscopic theory, and discuss the spin-charge conversion mechanism. We have found that there is a novel monopole in the spin pumping + inverse spin Hall systems. The monopole, a spin damping monopole, induces the electric current via the Ampere's law and plays an essential role in converting spin transport to charge transport.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	3,200,000	960,000	4,160,000
総計	11,000,000	3,300,000	14,300,000

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, スピン流,

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクス現象において鍵となる概

念はスピン流、つまりスピンの流れである。スピン流は磁化構造にトルクを与え効率の良い磁化反転を引き起こし(スピン注入磁化反転)、またスピン軌道相互作用を通じて電流との相互変換を実現することができること(スピンHall 効果、逆スピンHall 効果)が、最近の研究により明らかになっている。スピン流の輸送現象には電流のそれとは致命的に異なる点が2つある。その1つ目は、スピン流は直接電氣的磁氣的な測定手段で観測することはできないこと、2つ目はスピンに対する緩和の存在である。電流は、それが蓄積して生じた電荷密度あるいはそれによって生じる電位差を測定したり、アンペールの法則により外に作られる磁場を測定することで検出可能である。これは電荷の保存則により可能となっている。ところがスピンに関しては物質中ではスピン軌道相互作用のようなスピンの保存を破る相互作用があるために緩和してしまい、保存則は成り立たない。このためスピン流の生成、伝達及び測定の全ての過程に不確定性が生じてしまい、スピン流を物理量から生成し、また物理量を測定することで観測する手段は、現時点では定量的な観点からは確立していない。

この問題は緩和項を現象論的パラメータにより記述し、物理量として適切に解析してこなかったことにある。したがって上の問題点は、緩和項を物理量として正しく扱い、スピン流、スピン分極と緩和項の関係について定量的な情報を得ることで解決されると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では緩和項を初めて微視的な解析の土俵にのせることでスピン流の不確定性という問題を解決することが最初の目標である。次にスピンにはたらく有効場の概念を用いてスピン流の輸送理論を統一的に記述する枠組みを確立し、スピントロニクス現象に対する信頼性と定量性のある理論を構築する。

## 3. 研究の方法

これまで現象論的にしか捉えられてこなかったスピンの緩和項を多体量子論に基づき計算し、スピンの輸送方程式を微視的立場で確立する。スピン流を駆動する場としては電場や温度勾配など多様な状況を考え、また緩和の原因となるスピン軌道相互作用も金属表面や接合など実験的に重要な状況も含めて解析を行う。得られた輸送方程式に基づき、スピン流の生成メカニズムを解明し、またスピン流から測定可能な物理量への変換公式を曖昧性なく導出する。また、スピン自由度にはたらく有効場を、磁化のダイナミクスにより誘起される電流や力、ホール効果などの輸送量の解析により同定する。これにより、物理場

である電氣的磁氣的量を入力とし、スピン流現象を利用して新たな電流磁気現象を生み出す可能性を開拓する。

## 4. 研究成果

### スピントロニクス現象の電磁気学的構造

磁化ダイナミクスからのスピン流生成(スピンポンピング効果)や、逆スピンホール効果を用いたスピン流の電気信号への変換メカニズムに対し、微視的理論に基づく解析を行った。

その結果、これらの現象は、電子スピンにはたらく有効電磁場を用いて明快に記述することができることが、明らかになった。この有効電磁場は、真空中の通常の電磁場とほぼ同じ数学的構造をもっているが、一般に磁気モノポール項をもっていることもわかった。今の系での逆スピンホール効果は、この文脈では、スピンダイナミクスによってモノポール流が発生し、それがアンペールの法則を通じて磁場を生成していると理解できることになる。この研究成果により、スピントロニクス現象、特に電気信号への変換においてモノポールが重要な役割を果たしていることが見いだされた。同時に、従来のスピン流描像で現象の理解また応用の観点において深刻な問題となっていた、スピン流の非保存性に伴う原理的問題も、モノポール描像ではその流れは保存しているため現れない。

スピン流に基づく解釈は様々な現象を定性的に理解するためには有用である。しかし我々の一連の解析により、その記述は近似的なものにすぎないことが示された。スピン流は非保存流である問題を抱えているだけでなく、起電力などの電気信号との変換が電磁気学のような普遍的な法則によって保証されているわけではない。これに対してモノポール描像では、通常の電磁気学と同じような普遍性のある理論構造が背後にあり、この描像が基礎物理として本質的なものであることを示唆している。同時に、この数学的構造は応用に向けても信頼性のある予言を保証するために重要である。

我々の発見したモノポールは、量子スピンに物質中でのみはたらく有効電磁場に存在するものであり、真空中の電磁気学を変えるものではない。真空中の電磁気学にもモノポールは存在すると考えられており、それは宇宙初期の対称性の破れにより生成されたと考えられている。我々のモノポールは、スピン軌道相互作用が  $SU(2)$  ゲージ対称性をあらわに破ることで生じているため、そうしたモノポールのもつ幾何学的構造をもっているという点が大きく異なる。このモノポールの特性を詳しく調べることは学術上、またスピントロニクスの基盤として、今後重要な課題

である。

一連の解析の過程で、スピン起電力の中でも、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発生するスピン起電力の理解も進んだ。これは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、Rashba 型が強い界面では、一様磁化の運動が 1mm の大きさの薄膜の場合で約 1V という大きな起電力を生み出すことが示された。

#### 幾何学的逆ファラデー効果による高速磁化反転

スピンの制御のひとつの可能性は光の利用である。円偏光した光や電磁場は角運動量を運んでいるので、これをうまく物質内のスピンに受け渡せれば光による磁化制御が可能である。このような円偏光度に比例した磁場や磁化が生成される効果は既に知られており、逆 Faraday 効果とよばれている。通常この効果ではスピン軌道相互作用が本質的な役割を担っている。このために、巨大な応答を実現するにはスピン軌道相互作用を強化する必要があるが、これには重い元素や希土類を用いる必要があり資源面コスト面での問題がある。そこで我々はスピン軌道相互作用を他の効果で置き換える可能性を考えた。我々が注目したのは磁気構造のもつスピン Berry 位相で、これは異常ホール効果においてスピン軌道相互作用と同じように座標空間とスピン空間を結びつけるはたらきをすることが知られている。我々はこのことから、幾何学的な磁気構造に対して円偏光の光を照射するだけでスピン軌道相互作用なしに逆 Faraday 効果が生じると予想し理論解析を行った。その結果確かにスピン Berry 位相と円偏光度によりきまる磁場が発生することがわかった。これを用いると磁気渦や skyrmion などの磁気構造を光で制御することができる。幾何学的逆 Faraday 効果の磁気渦に対しての効果の数値シミュレーションにより解析した結果、実現可能な光の強度内で磁気渦の反転を 150ps という短時間で起こすことができることがわかった。これは電流による反転と比べると 100 倍の速さである。我々の見出した幾何学的 Faraday 効果は光誘起磁化反転の新しいメカニズムで、産業化する上でコスト的な問題のある重い元素を用いることなく磁化構造を高速で反転する新たな可能性を示したものである。

#### スピントロニクスデバイスの電磁気現象への応用

スピントロニクスデバイスの電磁メタマテリアルへの応用の可能性を議論した。電磁メタマテリアルは屈折率の実部が負になる

物質で、これが実現すれば波長限界を超えた分解能をもつスーパーレンズや、物質を電磁波に対して透明にすることができ、応用上の可能性は多岐にわたる。屈折率を負にすることは、共鳴をもちいることで誘電率と透磁率の実部を負にすることで実現でき、実際電波領域ではある制限のもとではあるが負の屈折率が実現されている。透磁率に共鳴を起こすためには磁化の駆動が必要であるが、これには外部磁場だけでなく電流や光などいくつかの方法がある。我々が注目した点は、電流は磁場と異なったトルクを与えることで、このため電流下の磁化に光を照射した場合は負の屈折率の実現だけではなく、透磁率の虚部の符号反転も可能で電磁波の増幅も同時におこなえる可能性が明らかになった。この場合はこれまでの増幅原理と異なり微小な構造でも増幅が可能となり、高効率、省エネルギーの点で大きなメリットがあると予想される。

その他、トポロジカル絶縁体のもつ量子異常を強磁性体との接合で磁化ダイナミクスにより誘起される電流の整流効果として検出できることなどの理論的予言を行った。

#### 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 33 件) 全て査読有
- [1] Proposal for an active electromagnetic metamaterial based on spin-torque oscillators,  
G. Tatara, Hiroaki T. Ueda, Katsuhisa Taguchi, Yuta Sasaki, Miyuki Nishijima and Akihito Takeuchi, Phys. Rev. B, 87, 155102 (1-8) (2013).
- [2] Spin torques due to diffusive spin current in magnetic texture,  
K. Hosono, J. Shibata, H. Kohno and Y. Nozaki, Phys. Rev. B87, 094404-1-8 (2013).
- [3] Ultraviolet divergence and Ward-Takahashi identity in a two-dimensional Dirac electron system with short-range impurities,  
Junji Fujimoto, Akio Sakai and Hiroshi Kohno, Phys. Rev. B 87 No. 8 085437 1-5(2013).
- [4] Spin motive force induced by Rashba interaction in the strong sd coupling regime,  
G. Tatara, N. Nakabayashi and Kyun-Jin Lee, Phys. Rev. B 87 054403 (1-9) (2013).
- [5] Calculation of Nonlocal Spin Transfer Torque,

- K. Hosono, J. Shibata, H. Kohno and Y. Nozaki, *IEEE Transactions on Magnetics* 48, 4367-4370 (2012).
- [6] Spin motive force due to a gyrating magnetic vortex,  
K. Tanabe, D. Chiba, J. Ohe, S. Kasai, H. Kohno, S. E. Barnes, S. Maekawa, K. Kobayashi and T. Ono. *Nature Communications* 3 Article number: 845 (2012) (doi:10.1038/ncomms1824).
- [7] Current-induced magnetic domain wall motion below intrinsic threshold triggered by Walker breakdown, 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, *Nature Nanotechnology* 7 635-639 (2012).
- [8] Monopoles in ferromagnetic metals, G. Tatara, A. Takeuchi, N. Nakabayashi, and K. Taguchi, *J. Korean Phys. Soc.* 61 1331-1348 (2012).
- [9] Ultrafast magnetic vortex core switching driven by topological inverse Faraday effect,  
Katsuhisa Taguchi, Jun-ichiro Ohe and Gen Tatara, *Phys. Rev. Lett.* 109, 127204 (1-5) (2012).
- [10] Topological charge pumping effect by the magnetization dynamics on the Surface of Three-Dimensional Topological Insulators,  
Hiroaki T. Ueda, Akihito Takeuchi, Gen Tatara, Takehito Yokoyama, *Phys. Rev. B* 85, 115110 (1-6) (2012).
- [11] Spin Damping Monopole, Akihito Takeuchi, Gen Tatara, *J. Phys. Soc. Jpn.* 81 033705 (1-4) (2012). (Editors' Choice)
- [12] Magnetic Monopole Generated by Spin Damping with Spin-Orbit Coupling, Takeuchi, A. and Tatara, G., *Journal of Physics: Conference Series*, 400, 042058(1-4) (2012).
- [13] Theory of inverse Faraday effect in Rashba system,  
Taguchi, K. and Tatara, G., *Journal of Physics: Conference Series*, 400, 042055(1-4) (2012).
- [14] Magnetic monopole in spin pumping systems,  
Akihito Takeuchi and Gen Tatara, *J. Appl. Phys.* 111, 07C509(1-3) (2012).
- [15] Spin and charge transport induced by gauge fields,  
J. Shibata and H. Kohno, *Phys. Rev. B* 84, 184408-1-12, (2011).
- [16] Theory of inverse Faraday effect in disordered metal in THz regime,  
Katsuhisa Taguchi, Gen Tatara, *Phys. Rev. B* 84, 174433-(1-5) (2011).
- [17] Microscopic theory of diffusive spin current with spin-orbit interaction,  
Kazuhiro Hosono, Akinobu Yamaguchi, Yukio Nozaki, and Gen Tatara, *Phys. Rev. B* 83, 144428-(1-10) (2011).
- [18] Spin and charge transport induced by gauge fields,  
J. Shibata and H. Kohno, *Phys. Rev. B* 84, 184408-1-12, (2011)
- [19] Existence of vertical spin stiffness in Landau-Lifshitz-Gilbert equation in ferromagnetic semiconductors,  
Ka Shen, Gen Tatara and Ming-Wei Wu, *Phys. Rev. B* 83, 085203-(1-7) (2011).
- [20] Magnon Pumping by a Time-Dependent Transverse Magnetic Field in Ferromagnetic Insulators,  
Kouki Nakata and Gen Tatara, *J. Phys. Soc. Japan* 80 054602-(1-5) (2011).
- [21] Spin Currents Induced by Nonuniform Rashba-Type Spin-Orbit Field,  
Kazuhiro Tsutsui, Akihito Takeuchi, Gen Tatara and Shuichi Murakami, *J. Phys. Soc. Japan* 80, 084701(1-4) (2011).
- [22] Magnetic vortex wall motion driven by spin waves,  
Soo-Man Seo, Hyun-Woo Lee, Hiroshi Kohno and Kyung-Jin Lee, *Appl. Phys. Lett.* 98 No.1 012514 1-3(2011).
- [23] A brief review of field- and current-driven domain-wall motion,  
Shibata, J., Tatara, G. and Kohno, H. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44, 384004-(1-18) (2011).
- [24] Spin current driven by magnetization dynamics in Rashba systems,  
Akihito Takeuchi and Gen Tatara, *AIP Conf. Proc.* 1399, 733-734 (2011).
- [25] Current-driven domain wall motion across a wide temperature range in a (Ga,Mn)(As,P) device,  
Wang, K. Y.; Edmonds, K. W.; Irvine, A. C.; Tatara, G.; Ranieri, E. D.; Wunderlich, J.; Olejnik, K.; Rushforth, A. W.; Campion, R. P.; Williams, D. A.; Foxon, C. T. and Gallagher, B. L., *Appl. Phys. Lett.* 97, 262102-(1-3) (2010).
- [26] Theory of spin transport induced by a temperature gradient,  
Yuu Takezoe, Kazuhiro Hosono, Akihito Takeuchi and Gen Tatara, *Phys. Rev. B* 82, 094451-(1-9) (2010).

[27] Effect of spin-conserving scattering on Gilbert damping in ferromagnetic semiconductors,

Ka Shen, Gen Tataru and Ming-Wei Wu, Phys. Rev. B 81 193201 (1-4) (2010).

[28] Theory of spin relaxation torque in metallic ferromagnets,

Noriyuki Nakabayashi, Akihito Takeuchi, Kazuhiro Hosono, Katsuhisa Taguchi, Gen Tataru, Phys. Rev. B 82, 014403 (1-10) (2010).

[29] Diffusive versus local spin currents in dynamic spin pumping systems,

Akihito Takeuchi, Kazuhiro Hosono, Gen Tataru, Phys. Rev. B 81, 144405 (1-12) (2010). (Editors' Suggestion)

[30] Perturbation theory of the dynamic inverse spin Hall effect with charge conservation,

Kazuhiro Hosono, Akihito Takeuchi, and Gen Tataru, J. Phys. Soc. Jpn. 79 014708 (1-8) (2010).

[31] Current-induced domain wall motion, G. Tataru, H. Kohno and J. Shibata, in Exitaxial ferromagnetic films and spintronic applications (Eds. A. Hirohata, Y. Otani) (Research Signpost) 405-421 (2010).

[31] Spin relaxation torque and spin transport in metallic ferromagnets, Gen Tataru, Akihito Takeuchi and Noriyuki Nakabayashi, Proceeding of SPIE, 7760 "Spintronics III", 776006-(1-7) (2010).

[32] Current Pumping from Spin Dynamics, A. Takeuchi, K. Hosono, and G. Tataru, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism 23, 31 (2010).

[33] Spin-charge conversion via the Rashba spin-orbit interaction in spin pumping systems,

Akihito Takeuchi, Kazuhiro Hosono and Gen Tataru, Journal of Physics: Conference Series, 200, 062031 (4pp) (2010).

[34] 磁化ダイナミクスにより生じる磁気モノポール

竹内祥人、多々良源

固体物理47, 255-265 (2012).

[35] 誌上セミナースピントロニクス理論の基礎(連載全10回)

多々良源、河野浩、柴田純也

固体物理43, 1-7, 131-143, 265-276, 319-329, 617-627 (2008); 45 193-204, 295-306, 427-438 (2010); 46 11-25, 293-307 (2011).

竹内祥人、多々良源、河野浩、柴田純也

固体物理 45, 781-791 (2010).

[学会発表] (30件)

[1] 多々良源

磁化ダイナミクス誘起電流における磁気モノポールの可能性(招待講演)

応用物理学会春季学術講演会シンポジウム「スピンドイナミクス, スピン輸送現象の最前線」2013年3月29日(金)、神奈川工科大学

[2] 多々良源

スピン軌道相互作用から生じる起電力とモノポール(招待講演)

大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所シンポジウム(原子・分子レベルでの材料創製とキャラクターゼーション)「スピントロニクマテリアルの新しい展開」2013年1月11日

[3] G. Tataru

Magnetic monopole induced by spin-orbit interaction in ferromagnetic metals. (invited),

WPI-AIMR workshop Topological Functional Materials and Devices, Nov. 30th — Dec. 1st (2012).

WPI main building, Tohoku University, Sendai, Japan

[4] G. Tataru

Spin Damping Monopole. (invited)

The 2nd International Conference of the Asia Union of Magnetism Societies (ICAUMS2012), Nara. (Invited)

Prefectural New Public Hall, 2-5 October (2012).

[5] 柴田純也、細野一弘、河野浩

拡散スピン流によるスピントルク

日本物理学会2011年秋季大会 富山大学, 9月23日

[6] Gen Tataru

Spin damping monopoles in spin pumping + inverse spin Hall systems. (invited)

4th International Workshop on Spin Caloritronics, June 2-5 (2012), Institute for Materials Research, Tohoku University

[7] 多々良源

スピン流電流変換メカニズムに対する理論的知見(Mechanism of spin-charge conversion)

日本物理学会第67回年次大会シンポジウム

「スピン変換の物理とその関連現象(Physics of spin conversion and related phenomena)」関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス (2012年3月25日, 25pSA-2)

[8] Gen Tataru

Maxwell's equation and spin damping monopole in spintronics. (invited)

The 2nd ASRC International Workshop on Magnetic Materials and Nanostructures Advanced Science Research Center, Japan

Atomic Energy Agency (JAEA), 10-12 January, 2012

[9] Gen Tatara

Maxwell's equation and monopole in spintronics. (invited)  
CECAM-Workshop, Simulation and Modeling of Emerging Electronics -2011, December 12-16 2011, The University of Hong Kong.

[10] Gen Tatara

Maxwell's equation and monopole in spintronics. (invited)  
7th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD 2011), December 7-9, 2011 (Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea).

[11] 多々良源

スピントロニクスにおけるモノポール(招待講演)  
日本磁気学会第180回研究会「メタマテリアルからみた光と磁気」中央大学2011年10月21日

[12] A. Takeuchi and G. Tatara,

Magnetic Monopole Generated by Spin Damping with Spin-Orbit Coupling. (invited)  
26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), August 10 - 17, 2011 (Beijing, China)

[13] Gen Tatara

Introduction to microscopic theory of spin transport (invited)  
6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPIN-TECH6), Matusse, Japan, August 1-5 (2011).

[14] Gen Tatara

Monopole in spin pumping + inverse spin Hall system, (invited)  
5th International Workshop on Spin Currents, July 25 - 28, 2011, Sendai International Center, Sendai, JAPAN.

[15] 多々良源

スピントロニクスにおける電磁気学：再考が必要か？  
日本磁気学会 第175回研究会「ナノ構造物質の電磁気学」中央大学2010年12月17日.

[16] Gen Tatara

Spin relaxation in spin transport driven by electric field and temperature gradient. (invited) ARL forum "Future and Application of Spintronics", Advanced Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hatoyama, Japan, (5, November 2010).

[17] Gen Tatara

Spin relaxation torque and spin transport in metallic ferromagnets. (invited)  
SPIE NanoScience + Engineering Symposium,

Spintronics III, 1-5 August 2010, San Diego, CA, United States

[18] Gen Tatara

Spin transports induced by dynamic spin textures. (invited)  
The International Conference on Frustrated Spin Systems, Cold Atoms and Nanomaterials, Hanoi, Vietnam, 14-16 July 2010.

〔図書〕(計1件)

[1] ミニマム電磁気学

多々良源

培風館(175 ページ, 2011年11月).

〔産業財産権〕

○取得状況 (計2件)

[1] US patent

発明名称 Core-Rotating Element of Ferromagnetic Dot and Information Memory Element Using the Core of Ferromagnetic Dot, T. Ono, S. Kasai, K. Kobayashi, Y. Nakatani, H. Kohno and G. Tatara

特許番号 US 7,952,915 B2、発行日 2011/05/31

[2] 市村雅彦、多々良源、高橋宏昌

「磁気抵抗効果素子」

出願人：日立、大阪大学

特許大4932275号

平成24年2月24日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

多々良源 (TATARA GEN)

独立行政法人理化学研究所・創発スピン物性理論研究チーム・チームリーダー

研究者番号：10271529

(2) 研究分担者

河野 浩 (KOHNO HIROSHI)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：10234709

柴田 絢也 (SHIBATA JUNYA)

東洋大学・理工学部・准教授

研究者番号：20391972

(3) 連携研究者

なし