

機関番号：22604

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048027

研究課題名（和文） 逆スピホール効果の微視的理論と応用

研究課題名（英文） Microscopic theory of inverse spin Hall effect

研究代表者

多々良 源 (TATARA GEN)

首都大学東京 大学院理工学研究科 准教授

研究者番号：10271529

研究成果の概要（和文）：

スピントロニクス重要な課題であるスピン流の生成と電流への変換メカニズムについて、スピンプンピング効果と逆スピホール効果を対象に理論解析を行った。その結果、生成されたスピン流からの電流生成現象は、スピンの感じる実効的電磁気学の枠組みで見通しよく理解できることを明らかにした。さらにこの実効電磁場には新種のモノポール（スピンドampingモノポール）が存在するという著しい特徴を見出し、このモノポールがスピン流と電流を結びつける上で本質的な役割を演じていることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Spin pumping effect and inverse spin Hall effect are studied theoretically. It is found that the pumping of spin current and its conversion into electric current are understood clearly in terms of an effective electromagnetic field for electron spin. The effective field was shown to contain new monopole (spin damping monopole), which plays an essential role in spin-charge conversion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,700,000	0	3,700,000
2008年度	4,600,000	0	4,600,000
2009年度	4,600,000	0	4,600,000
2010年度	3,700,000	0	3,700,000
年度			
総計	16,600,000	0	16,600,000

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、スピントルク、電流誘起磁化反転、磁壁

1. 研究開始当初の背景

近年、スピン偏極電流による磁化反転が非常に興味を持たれ積極的に研究されている。

その一方で、その反作用である、磁化構造のダイナミクスが電流やスピン流に与える効果

はまだあまり調べられていない。静的な磁化が与える磁気抵抗やホール効果に関してはかなり調べられているが、ダイナミクスが伴う現象に関しては、いくつかの実験的試みと現

象論的理論があるのみである。研究代表者と分担者はこれまで、電流誘起磁壁移動の理論的研究を行ってきた。特に、電子をフルに量子論的に扱う微視的定式化を用いて局在スピンの伝導電子との相互作用からスピン移行トルクや磁壁への力を求め、それに基づいて磁壁のダイナミクスを議論した。一方、強磁性接合においては2つの強磁性層磁化の外積に比例した平衡スピン流が流れることが、代表者らにより示されていた。本研究ではこのスピン流を何らかの形で電流に変換する可能性を探る。これは、スピン流の直接検出にあたる現象であるが、おそらく平衡のスピン流を電流に変換することは原理的にできないと考えている。そこで本研究では何らかの形で非平衡性を含んだスピン流を生む状況を考え、それを電流に変換することを考える。これにはスピン軌道相互作用を導入して、スピンホール効果の逆作用である逆スピンホール効果を用いれば可能であると考えている。これらはあくまでも予想であり、研究の目的はこれらを微視的定式化により示すことが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目標は、スピン情報の伝達の理論の微視的定式化、及びそれに基づいたスピン流制御法の理論的視点からの確立である。具体的な課題としては、強磁性接合において磁化から生じるスピン流と電流、及び磁壁ダイナミクスから生じるスピン流と電流を主に進める。接合については、2つの強磁性体(薄膜)の間に薄い常磁性金属薄膜をはさんだ構造や強磁性体と非磁性体の接合構造を考え、その際に生じるスピン流を何らかの形で電流に変換する可能性を探る。手法としてはこれまで研究代表者が行ってきた電流誘起磁壁移動の

定式化を利用して、磁化構造ダイナミクスから生じるスピン流と電流の理論的評価を行う。本研究では特に、スピントロニクスで用いられるスピン流をエレクトロニクスで用いている電流に変換する可能性が重要な位置づけであり、この部分のメカニズムを理論的に解明することが大きな目標である。得られた理論的結果を応用して磁化のエネルギーを電流に変換する新たな機構の提案も目指す。

3. 研究の方法

まずは、強磁性-常磁性-強磁性の金属接合で生じるスピン流の定式化を行う。流れそのものを直接計算できる非平衡グリーン関数を用いる。次に、常磁性領域に、不純物から生じるスピン軌道相互作用を入れ、これとスピン流の相乗効果から生じる電流期待値を計算する。得られた結果をみて、電流が本当に生じるのか、生じるならどのような状況で最大化されるのかなどを探る。磁壁のダイナミクスから生じるスピン流と電流は、電流誘起磁化反転の理論での定式化を応用して行う。我々の定式化では、ダイナミクスの情報は時間変動するゲージ場に全て含まれているので、生じる電流の評価はゲージ場についての摂動論で系統的に行うことができる。スピン軌道相互作用をダイアグラム上で取り入れることでスピン緩和の効果を考慮する。

4. 研究成果

スピントロニクスの重要な課題はスピン流の制御である。本研究において我々は、スピン流生成現象に関して、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、温度勾配を用いたスピン流生成の現象に関して、微視的な解析を進めた。結果として、スピンポンピング効果は、磁化ダイナミクスがある一定の普遍性に基づきスピン流を生成するという現象ではなく、スピン軌道相互作用の詳細に依存するような現象であることも明らかになった。そうした点で、スピントロニクス現象をスピンの

輸送としてみたばあい、電磁気学の普遍的法則にしたがっておきている電荷の輸送現象とは、物理現象としての意味が全く異なっている。このことはスピントロニクス現象の、スピン流による解釈の限界も示している。スピン流の測定に関しては、電気的な検出を用いる逆スピンホール効果の解析を行った。その結果、逆スピンホール効果はスピン流を電流に変換しているという従来の描像は、近似的、現象論的なもので、物理的には正当性がないものであることがわかった。本年度はそれらの研究成果を統合し考察することで、スピン電荷変換メカニズムにモノポールが本質的であるという新しいシナリオを見出した。この解釈によれば、スピンプンピングと逆スピンホール効果を組み合わせた現象は、磁化の運動がスピン流を生成しそれが電流に変化されているという見方よりは、むしろそれは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」とみると、非常にすっきりした理解ができる。しかもこの場合の理論は、電磁気学の体系とスピン輸送現象が既存の理論の枠内でうまく融合した体系となっている。スピン流に基づいた解釈では、その非保存性が物理的な解釈を混みいったものにしていくことはよく知られているが、この新しいシナリオではそうした不確実性は存在しない。この研究成果により、スピン輸送現象の新たな可能性が見出されたことになる。

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 44 件)

Akihito Takeuchi, Gen Tatara
Damping Monopole, J. Phys. Soc. Jpn. 81
033705 (1-4) 2012

Katsuhisa Taguchi, Gen Tatara
Theory of inverse Faraday effect in
disordered metal in THz regime Phys. Rev.
B 84, 174433-(1-5) (2011).

Kazuhiro Hosono, Akinobu Yamaguchi, Yukio
Nozaki, and Gen Tatara
Microscopic theory of diffusive spin
current with spin-orbit interaction Phys.
Rev. B 83, 144428-(1-10) (2011).

Ka Shen, Gen Tatara and Ming-Wei Wu
Existence of vertical spin stiffness in
Landau-Lifshitz-Gilbert equation in
ferromagnetic semiconductors Phys. Rev. B
83, 085203-(1-7) (2011).

Yuu Takezoe, Kazuhiro Hosono, Akihito
Takeuchi and Gen Tatara
Theory of spin transport induced by a
temperature gradient
Phys. Rev. B 82, 094451-(1-9) (2010).

Ka Shen, Gen Tatara and Ming-Wei Wu
Effect of spin-conserving scattering on
Gilbert damping in ferromagnetic
semiconductors Phys. Rev. B 81 193201
(1-4) (2010).

Noriyuki Nakabayashi, Akihito Takeuchi,
Kazuhiro Hosono, Katsuhisa Taguchi, Gen
Tatara
Theory of spin relaxation torque in
metallic ferromagnets
Phys. Rev. B 82, 014403 (1-10) (2010).

Akihito Takeuchi, Kazuhiro Hosono, Gen
Tatara
Diffusive versus local spin currents in
dynamic spin pumping systems Phys. Rev. B
81, 144405 (1-12) (2010). (Editors'
Suggestion)

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.
Current-driven domain wall motion across
a wide temperature range in a
(Ga,Mn)(As,P) device
Appl. Phys. Lett. 97, 262102-(1-3) (2010).

Lutz Heyne, Gen Tatara L. Joly, F. Nolting,
S. Seo and M. Klaui,
Geometry-dependent scaling of critical
current densities for current-induced
domain wall motion and transformations,
Phys. Rev. B 80, 184405-1/4 (2009).

Yoshisuke Ban and Gen Tatara
Spin-transfer torque in disordered weak
ferromagnets
Phys. Rev. B 80, 184406-1/5 (2009).

Yann Le Maho, Joo-Von Kim and Gen Tatara
Spin-wave contributions to
current-induced domain wall dynamics Phys.
Rev. B79, 174404-1-174404-17 (2009).

Katsuhisa Taguchi and Gen Tatara
Anomalous Hall conductivity due to vector
spin chirality in the weak coupling regime
Phys. Rev. B 79, 054423-1-054423-5 (2009).

Gen Tatara, Hiroshi Kohno and Junya Shibata
Microscopic Approach to Current-driven Domain Wall Dynamics Phys. Rep. 468 213-301 2008

Gen Tatara and Peter Entel
Calculation of current-induced torque from spin continuity equation Phys. Rev. B 78, 064429-1 -064429-6 (2008).

Katsunori Obata and Gen Tatara
Current induced domain wall motion in Rashba spin orbit system Phys. Rev. B 77, 214429-1- 214429-12 (2008).

[学会発表] (計 79 件)

多々良源、シンポジウム：スピン流電流変換メカニズムに対する理論的知見、日本物理学会 2012 年春季大会、大阪、2012 年 3 月 25 日 (Invited)

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

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

Gen Tatara, Introduction to microscopic theory of spin transport (invited lecture), 6th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECH6), Matsue, Japan, 1-5 August 2011 (Invited)

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

Gen Tatara

Spin damping monopoles in spin pumping + inverse spin Hall systems, Collaborative Conference on 3D & Materials Research June 27 - July 1, 2011, Ramada Plaza Jeju Hotel Jeju, South Korea (Invited)

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

Gen Tatara
Novel magneto-electric effects : Current-induced domain wall motion and inverse spin Hall effect JST-EPSC Workshop (Cambridge, 2010/02/15-19) (Invited)

Gen Tatara
Spin pumping and inverse spin Hall effect - Microscopic study
International workshop on Spin Currents and Spin Caloritronics (Sendai, 2010/02/08-10). (Invited)

多々良源、領域 3, 領域 4 合同シンポジウム：スピン流に関わる新現象-スピン流は電磁気学をどこまで変えるか-スピン伝導現象：微視的理論の現状、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 26 日 (Invited)

G. Tatara
Novel Current Pumping Mechanism by Spin Dynamics
The 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo' 08), Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Hatoyama (25-28 August, 2008) (Invited)

[図書] (計 2 件)
多々良源 新物理学シリーズ 40 スピン
トロニクス理論の基礎 培風館 2009 年

多々良 源 ミニマム電磁気学 培風館
2011年

研究者番号：

(3)連携研究者 ()

研究者番号：

[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 2 件)

名 称 : Core-Rotating Element of
Ferromagnetic Dot and Information Memory
Element Using the Core of Ferromagnetic
Dot

発明者：
権利者：Ono, S. Kasai, K. Kobayashi, Y.
Nakatani, H. Kohno and G. Tatara
種類：
番号：US 7,952,915 B2
取得年月日：2011/05/31
国内外の別：国外

名称：磁気抵抗効果素子
発明者：
権利者：市村雅彦、多々良源、高橋宏昌
出願人：日立、大阪大学
種類：
番号：大 4932275 号
取得年月
日：平成 24 年 2 月 24 日
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等
<http://sqcm.phys.se.tmu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

多々良 源 (TATARA GEN)
首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：10271529

(2)研究分担者

()

