

平成 22年 6月 23日現在

研究種目：若手研究(B)
研究期間：2008～2009
課題番号：20740204
研究課題名（和文） 強磁性金属磁化ダイナミクスにおける電流及びスピンの生成に関する理論的研究
研究課題名（英文） Theoretical study on electric and spin current generation induced by magnetization dynamics in ferromagnetic metal
研究代表者 柴田 絢也 (SHIBATA JUNYA)
神奈川工科大学・基礎教養教育センター・准教授
研究者番号：20391972

研究成果の概要（和文）：

本研究の成果は、磁化と電流が相互に起因する現象について詳細な知見を得たことである。具体的には、空間的に非一様な磁化のダイナミクスが誘起するスピン起電力によって、逆スピンホール効果が起こりうることを理論的に示したことである。また、この結果を受けて、スピン起電力による逆スピンホール効果の反作用的現象であるスピンホール流によるスピン移行トルクの存在についても理論的計算によって示した。

研究成果の概要（英文）：

We theoretically clarified novel phenomena due to the interaction between magnetization and current. Concretely, we carried out the microscopic estimation of inverse spin Hall effect (ISHE) driven by spin motive force induced by time-dependent magnetic texture. Furthermore, from this result, we also microscopically calculated the spin-transferred torque induced by spin Hall current, which is the reaction to the ISHE.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	1,000,000	300,000	1,300,000
21年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

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、スピン起電力、逆スピンホール効果

1. 研究開始当初の背景

2007年のノーベル物理学賞が巨大磁気抵抗の研究に与えられたように、近年、電流と磁化(スピン)が相互に起因する現象を対象とした研究が国内外を問わず盛んに行われている。巨大磁気抵抗は磁性多層薄膜中の磁化(スピン)が電流に与える影響を抵抗として見ているのに対し、最近では、強磁性金属に直接電流を流すことにより、その磁化配置を駆動し、その運動を制御しようとする研究が精力的に行われている。代表的な例としては、磁性多層薄膜に電流を流し磁化を反転させるスピン注入磁化反転や強磁性金属や磁性半導体を用いて作成された細線に電流を流し、その中の磁区と磁区の境界である磁壁を駆動する電流駆動磁壁運動などである。これらの研究は、メモリーやハードディスクなどの次世代磁気デバイスへの応用として大変期待されている。その中で、我々は

(1) スピン偏極電流による磁壁生成の理論

(2) 強磁性ナノディスクにおける磁気渦構造の電流駆動に関する理論

(3) 電流が磁化に与えるトルクや力に関する微視的理論

に関する研究を行ってきた。

このような研究背景の中で、今までとは逆の現象、すなわち、磁化の運動によって電流が生成される実験的研究が行われ始めている。これは、強磁性金属層と非磁性金属層の接合系において、磁気共鳴を利用し空間的に一様な磁化を歳差運動させることによって、非磁性金属層に電流が流れる現象である(スピンポンピングによる電流生成)。しかしながら、磁化ダイナミクスにおける電流生成メカニズムに関する理論は、スピンポンピングによる電流生成の理論があるのみで、空間的に非一様な磁化配置のダイナミクスに関してはまだ行われていない。これら電流生成に関する研究は、基礎物理学的に重要であるばかりでなく、次世代磁気デバイスの開発に関する基礎研究と密接に関係しているため、今後ますます重要になっていくと考えている。

2. 研究の目的

これらの状況を踏まえ、今までの研究によ

って培ってきた経験と技法を駆使して、強磁性金属中の空間的に非一様な磁化のダイナミクスにおける電流及びスピン流生成の微視的理論の定式化を行っていくことを目的とする。

具体的には、単一の微小な強磁性金属を考え、その磁化配置が磁壁や磁気渦などのように空間的に非一様で、且つ、時間的に変化している場合を想定して、電流およびスピン流がどのようなメカニズムで生成されるのかを明らかにし、特に、

(1) 電流及びスピン流がどのようなメカニズムで生成されるのか?

(2) どのようなメカニズムで生成されるのか?

を微視的計算によって定量的に明らかにしていくことである。また、これまでの研究において、電流が磁化に与えるトルクや力に関しては、伝導電子のスピン緩和が重要な役割を演じていることを明らかにした。電流生成はこの反作用と考えられる現象であるので、本研究においても伝導電子のスピン緩和が重要な役割を演じると予想されるので、(1)の電流(スピン流)生成メカニズムに関しては、特にその点に着目して研究を行っていく。

これまで、磁気抵抗や異常ホール効果などの磁性と伝導に関する研究は古くから行われていたが、その磁化配置に関しては静的であった。また、空間的にも一様な場合が多かった。本研究の特色は、磁化配置が空間的に非一様で時間的に変化している状況を想定している点である。そのような研究はまだほとんど行われていないので、この微視的な定式化が本研究の主な目的である。

3. 研究の方法

本研究の理論的手法の特色としては、一貫して解析手法が場の理論的視点に立っており、電流及びスピン流生成の理論的評価に関しては、多体量子系を記述するグリーン関数によるダイアグラム法を用いることである。これによって、不確かな現象論的仮定を一切導入することのない厳格な理論展開が可能である。したがって、第一原理計算と組み合わせることが可能であり、より現実的な物質に対して定量的な予言が可能である。また、今までの多くの研究では電流(スピン流)の評価は線形応答理論に基づいてなされてきたが、本研究では、磁化のダイナミクスが線

形でない状況もありうるので、新たに非線形応答理論に基づく理論展開を行っていく。この為の計算手法は、これまでの研究によって着想を得たものであり、この分野ではまだ用いられていない。

具体的な理論モデルとして、電流(スピン流)を担う伝導電子を s-電子、磁化を担うのは局在スピン(d-電子)とする s-d モデルを採用する。また、伝導電子のスピン緩和の影響を考察していくために、伝導電子のスピン反転散乱を引き起こす相互作用として磁性不純物を導入する。このモデルを解析していくために、伝導電子に関して局所ゲージ変換を行い、時間空間変化する局在スピンと相互作用した電子系を、一様な磁化背景の下で SU(2) ゲージ場と相互作用する電子系へ変換する(ゲージ場の方法)。この変換の後、磁化が空間的・時間的に変化している状況において、電流(スピン流)の期待値を非平衡グリーン関数を用いて計算していく。そこで用いられる手法が非線形応答理論である。この理論は、従来の線形応答理論から一歩進んだ、時間的・空間的に変化する外場の影響を高次の摂動展開で求めていくものである。これによって、従来では見過ごされていた電流生成への影響が現れることが期待できる。しかしながら、計算はかなり複雑になることが予想されるので、慎重に行っていかななくてはならない。したがって、本研究が計画通りにいかない場合を想定して、ゲージ場の方法ではなく、微小振幅の方法を用いて電流(スピン流)を評価することも念頭に置いておく。この方法は、磁化の空間的・時間的変化が微小であることを仮定するので、一般的な非一様な磁化を記述することはできない。しかしながら、近似計算の妥当性ははっきりしていること、計算がゲージ場の方法に比べ容易であることから、ゲージ場の方法との整合性を問う上で重要な指針となる。

4. 研究成果

第一の成果として、磁化ダイナミクスによる電流生成に関して、特にスピン・軌道相互作用の影響を明らかにしたことである。

空間的に非一様な磁化が時間的に変化すると、伝導電子のスピン分極に依存した起電力(スピン起電力)が発生する。これにより、互いに逆向きスピンの伝導電子は互いに逆方向へ駆動されるがスピン・軌道相互作用により同方向の散乱を受け、正味のホール電流が流れると予想される。本研究ではスキュー散乱及びサイドジャンプ機構を考察し、確かにこれらの二つ機構によってホール電流が生成されることを示した。また、ホール伝導率は、異常ホール伝導率に比べ、伝導電子のスピン分極の逆二乗だけ増加することが明

らかになった。

このように空間的に非一様な磁化のダイナミクスにおいて誘起された起電力によって逆スピンホール効果が起こりうる可能性は、従来にない新しい見地であり、非常に重要な結果と考えられる。この研究成果は、国際的に評価の高い学術雑誌の一つである Physical Review Letters に掲載された。

第二の成果は、スピンホール流によるスピン移行トルクが存在することを示したことである。

これまで、スピン移行トルクにはスピン流が伴っていることは認識されていたが、スピン・軌道相互作用による寄与については計算されてこなかった。そこで、スピン・軌道相互作用の一次までの寄与を考慮して、スピン移行トルクの評価をおこなった。最初に、空間的に変化する磁化背景の下での外場によって誘起されるスピン流を評価し、それから、スピン移行トルクを評価した。また、伝導電子のスピン分極を直接計算することによって、スピン移行トルクを評価した。これらの二つの方法による結果は一致するべきものであるが、スキュー散乱機構によるスピン移行トルクについては結果が一致したもの、サイドジャンプ機構については、両者の一致がみられなかった。これは、スピン分極に寄与する電子の相互作用過程の見落としが原因と考えられるが、より確かな原因を突き止めることが出来ず、今後の課題として残っている。これら結果については、磁性の国際会議で発表を行い、論文として出版した。

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 6 件)

- ① 柴田絢也、河野浩、Spin Hall Current and Spin-transfer Torque in Ferromagnetic Model, J. Phys. Conf. Ser. 査読有, Vol.200, No. 2, 2010 pp. 062026-1-4.
- ② 柴田絢也、河野浩、Inverse Spin Hall Effect Driven by Spin Motive Force, 査読有, Vol.102, No. 8, Phys. Rev. Lett. 2009, pp. 086603-1-4.
- ③ 多々良源、河野浩、柴田絢也、Microscopic approach to current-driven domain wall dynamics, Physics Report, 査読有, Vol.468, No. 6, 2008, pp. 213-301.

- ④ 多々良源、河野浩、柴田絢也、スピントロニクス理論の基礎(その5)、固体物理、査読有、Vol 43, No. 10, 2008 pp. 617-627
- ⑤ 柴田絢也、多々良源、河野浩、スピントロニクス理論の基礎(その4)ー径順序Green関数ー、固体物理、査読有、Vol.43, No. 6, 2008, pp. 319-329.
- ⑥ 柴田絢也、多々良源、河野浩、スピントロニクス理論の基礎(その3)ー磁壁、磁気渦ー、固体物理、査読有、Vol.43, No. 5, 2008, pp. 265-276.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 柴田絢也、スピン起電力の微視的理論ーゲージ場の方法ーII、日本物理学会第65回年次大会、2010年3月21日、岡山大学
- ② 柴田絢也、スピンホール流によるスピントルク、日本物理学会第64回年次大会、2009年9月22日、立教大学
- ③ 柴田絢也、スピン電場によるホール効果ーゲージ場の方法ー、日本物理学会秋季大会、岩手大学
- ④ 柴田絢也、Spin Hall Current and Spin-Transfer torque in Ferromagnetic Metal, International conference on magnetism, 2008年7月28日、Karlsruhe, Germany

[図書] (計 0 件)

[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 0 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

柴田 絢也 (SHIBATA JUNYA)
神奈川工科大学・基礎教養教育センター・
准教授
研究者番号：20391972