

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 20日現在

機関番号：32663

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740236

研究課題名（和文） 強磁性ナノ金属における電流磁化応答の微視的理論

研究課題名（英文） Microscopic Theory of current-magnet response in a ferromagnetic metal

研究代表者

柴田 絢也 (SHIBATA JUNYA)

東洋大学・理工学部・准教授

研究者番号：20391972

研究成果の概要（和文）：本研究の主な成果は、微小な強磁性金属中の磁化と電流が相互に起因する現象についての詳細な知見を得たことである。具体的には、電流により誘起されるトルクの詳細な計算、磁化運動にともなうスピンの依存した起電力の微視的理論の構築が挙げられる。いずれの場合も、強磁性金属中に不純物磁性がある場合を想定し、伝導電子のスピン反転散乱が起こる機構を取り入れ、それが電荷及びスピンの輸送にどのような影響を与えるのかを考察した。

研究成果の概要（英文）：We theoretically clarified novel phenomena due to the interaction between magnetization and current in a ferromagnetic metal. Concretely, we worked out the detailed calculation of current-induced spin torques and spin-depended motive force accompanied by a magnetization dynamics. Both cases, we studied the spin and charge transports in a ferromagnetic metal, which is included in the effect of spin-flip scattering due to magnetic impurities.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

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、スピントルク、スピン起電力、ゲージ場の方法

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対して与えられたように、近年、電流と磁化（スピン）が相互に起因する現象に関する研究が国内外を問わず盛んに行な

われている。巨大磁気抵抗効果は磁化（スピン）が電流に与える影響を抵抗としてみている。これにより、高感度な磁気ヘッドの作成が可能となり、今日のハードディスクの大容量化につながっている。スピンと伝導が関与

する基礎物理的な現象が、即座に応用として用いられた格好の例である。最近では、微細加工技術の目覚ましい発展により、サブミクロンスケールないしはナノスケールの磁性体を人工的に加工することが可能になってきており、例えば、強磁性体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進められている。代表的な例としては、金属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。これらの動作原理は伝導電子スピン角運動量が磁化へ受け渡される効果、「スピン移行効果」で主に説明することが出来るが、次世代磁気デバイスへの応用を目指していくためには、物理的な機構の詳細をさらに明らかにしていかななくてはならない。その中で、

(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。また、このような研究背景の中で、磁化の運動によってスピンに依存した起電力が発生する現象にも注目が集まっている。これは電流により磁化にトルクがはたらくメカニズムと逆の現象である。この磁化ダイナミクスにより発生する起電力に関する現象としては、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（スピンプンピングによる電流生成）、強磁性細線中の磁壁の中心磁化回転にともなう起電力の発生などが実験により報告されている。これらの起電力は伝導電子スピンに依存していることからスピン起電力と呼ばれている。しかしながら、後者の空間的に非一様な磁化配置のダイナミクスに関するスピン起電力の理論的考察はまだ始まったばかりである。これらの研究は、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ので、今後ますます重要になっていくはずである。

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、強磁性金属において電流と磁化が相互に起因する現象の微視的な理論的考察を行なうのが本研究の主たる目的である。特に、伝導電子スピンの磁性不純物による反転の効果を検討していく。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な系を想定し、

(1) 伝導電子スピンの磁性不純物による反転が、スピン移行トルクにどのような影響を与えるのか。

(2) 磁化ダイナミクスにおいて発生する起電力とスピン流との関係はどのようなになっているのか。

(3) 同様に、起電力発生についてはどのような影響があるのか。

について、場の量子論に基づく厳密な計算によって微視的に明らかにしていく。

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量子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、本研究は将来的に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スピン分極や電流（スピン流）といった量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想定して、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。局在スピンについては、一様な状況以外にも、時間空間的に変化する任意の磁化を想定している。また、スピン軌道相互作用を考慮する場合は、スピンに依存しない不純物を、伝導電子スピンの反転を考察する場合は、スピンに依存する磁性不純物を、相互作用として導入する。計算は摂動的に扱うが、前者のスピン軌道相互作用に関してはその1次まで、不純物に関しては、第一ボルン近似の範囲で物理量を評価する。

強磁性金属における磁化と伝導電子スピン間の相互作用(s-d相互作用)の大きさは、フェルミエネルギー程度であり、この相互作用を摂動と扱うことはできない。このような強結合領域を扱う方法として、「ゲージ場の方法」がある。本研究では一貫してこの方法を用いる。これは、伝導電子スピンが時間空間変化する磁化に沿うように局所的な変換をスピン空間で行ない、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として扱う方法である。このSU(2)ゲ

ージ場は伝導電子の生成消滅を表す演算子の微分から現れ、時間空間変化する磁化を表すものである。

この変換の後、磁化が空間的・時間的に変化する状況において、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、近似計算の妥当性が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

一年目の主な成果は、スピンホール流によるスピントルクの計算を行ない、その表式を得たことである。これまでの研究によると、電流によって強磁性金属に誘起されるスピントルクの表式には、スピン偏極電流(スピン流)をともなった形で現れることが明らかになっている。一方、不純物によるスピン軌道相互作用によってスピンホール流が誘起されるので、これから、スピンホール流によるスピントルクが現れると予想される。この予想を微視的に明らかにする為に、まず、外部電場によって誘起されるスピンホール流の計算を行なった。まず、ゲージ場の方法により、電子系を回転系に変換する。この変換によって時間空間的に変化する磁化を一様磁化として扱うことが可能となるので、スピンホール流の評価については、一様磁化下における異常ホール効果の研究の結果を利用することができる。それによると、不純物によるスピン軌道相互作用の場合には、その1次の寄与として、skew 散乱機構と side-jump 機構と呼ばれる2つの機構があることが分かっている。本研究でもそれらの機構に基づくスピンホール流を計算した。したがって、これら2つのタイプのスピントルクが得られると予想される。この計算を下に、次に、伝導電子のスピン分極の期待値を計算しスピントルクがこれら2つの機構に基づくスピン流に比例する形で記述されるかを確かめ

た。結果は、skew 散乱機構については予想通りであったが、side-jump 機構については係数が完全に一致していない。これはスピン流の評価とは異なり、スピン分極の場合には、異常電流による寄与が半分しかないことなどが原因と考えられるが、現在のところ不明であり、今後の課題となっている。

二年目の主な成果は、スピン起強磁性金属の二つのゲージ場によって誘起される電荷およびスピンの輸送について研究を行った。ここで、二つのゲージ場というのは、一つは通常の電磁場、もう一方は、磁化ダイナミクスによって誘起される有効ゲージ場である(ゲージ場の方法)。これら二つのゲージ場によって誘起される電流およびスピン流をGreen 関数を用いたダイヤグラムの方法で、特に磁性不純物による伝導電子のスピン反転効果がある場合について、評価した。研究当初、スピン反転の効果により有効ゲージ場については、ゲージ不変でないという結果となった。このゲージ不変性は電流保存則と密接に関係しており、理論の正当性を示す一つの指針となっている。一方、スピン流については、スピン反転がある場合は一般に保存量ではないが、有効ゲージ場のゲージ不変性は、磁化方向の回転不変性にとまなうものであり、得られる結果がゲージの取り方に依存してはならず、これは理論的には看過できない問題である。最終的には、ゲージ不変でない項を打ち消す項を見いだすことによってこの問題を解決することができた。この打ち消し項の起源は従来のヴァーテックス補正では現れず、スピンの反転を誘起する不純物磁性が、ゲージ場の方法により時間的に変化するようになることで現れる。この結果は、ゲージ場の方法を用いる時には常に考慮すべきものであり、今回の研究でその重要性が認識された。

最終的な結果は、時間空間的に変化する磁化の下での伝導電子の電荷及びスピン輸送については、よく知られた2流体モデルに従うことが分かった。このモデルは、以前からこの分野で多用されていたにもかかわらず、その適用性の微視的考察はなかった。本研究により、それが明らかになったことが、一つの成果といえる。

最終年度は、前年度の研究から得られた知見を下に、拡散スピン流によるトルクの計算を行なった。この研究は昨年二つのゲージ場によって誘起される電荷およびスピンの輸送に関する研究からヒントを得たものである。電流によるスピントルクの反作用として、磁化ダイナミクスによるスピンに依存した起電力(スピン起電力という)の発生があるが、昨年の研究ではこの磁化ダイナミクスによるスピン起電力を詳細に調べることで、その中の一部である拡散電流がこの

起電力によって誘起されることを示した。したがって、この反作用現象、すなわち本年度の研究対象となった拡散スピン流によるトルクが期待される。そこで、このスピントルクを評価するためにスピン分極を電流が流れている非平衡状態において、Green 関数を用いたダイアグラムの方法で評価した。結果は予想通りであり、拡散スピン流によってスピントルクが任意の磁化構造を持つ磁化にはたらくことを微視的に明らかにすることができた。これまで強磁性体中の磁化にはたらくトルクは局所スピン流に比例して与えられていたが、この研究によって新たに拡散スピン流によっても磁化にトルクがはたらくことを微視的な解析計算により明らかにすることができた。また、この表式を下に、強磁性細線中の磁壁を拡散スピン流によって駆動させることが出来ることを理論的に予想した。

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 10 件)

- ① 細野一弘、柴田絢也、河野浩、能崎幸雄、
Spin torques due to diffusive spin current in magnetic texture、Phys. Rev. B、査読有、vol. 87、2013、094404-1-8
- ② 細野一弘、柴田絢也、河野浩、能崎幸雄、
Calculation of Nonlocal Spin Transfer Torque、IEEE Transactions on Magnetism、査読有、vol. 48、2012、4367-4370
- ③ 柴田絢也、河野浩、Spin and charge transport induced by gauge fields、Phys. Rev. B、査読有、vol. 84、2011、184408-1-12、
- ④ 柴田絢也、多々良源、河野浩、A brief review of field-and current-driven domain-wall motion、J. Phys. D: Appl. Phys.、査読有、vol. 44、2011、384004-1-384004-18
- ⑤ 柴田絢也、河野浩、多々良源、“スピントロニクス理論の基礎(その10)-スピン起電力-”、固体物理、査読有、2011、vol. 46、11-25

- ⑥ 柴田絢也、河野浩、多々良源、“スピントロニクス理論の基礎(その10)-スピン起電力-”、固体物理、査読有、2011、vol. 46、11-25
- ⑦ 竹内祥人、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9)”、固体物理、査読有、2010、vol. 45、81-791
- ⑧ 河野浩、多々良源、柴田絢也、“スピントロニクス理論の基礎(その8)”、固体物理、査読有、2010、vol. 45、427-438
- ⑨ 河野浩、多々良源、柴田絢也、“スピントロニクス理論の基礎(その7)”、固体物理、査読有、2010、vol. 45、295-306
- ⑩ 河野浩、多々良源、柴田絢也、“スピントロニクス理論の基礎(その6)”、固体物理、査読有、2010、vol. 45、193-204

[学会発表] (計 2 件)

- ① 柴田絢也、河野浩、Rashba 型スピン軌道相互作用によるスピントルクおよびスピン起電力の理論的解析、日本物理学会 2012 年年次大会 2013 年 3 月 28 日、広島大学
- ② 柴田絢也、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 2011 年 9 月 23 日、富山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田 絢也 (SHIBATA JUNYA)
東洋大学・理工学部・准教授
研究者番号：20391972

(2) 研究分担者 (0)

(3) 連携研究者 (0)