

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820135

研究課題名（和文）磁性体への純スピン流注入による磁気特性の解明

研究課題名（英文）Magnetic dynamics of ferromagnets by pure spin current injections

研究代表者

本多 周太 (Honda, Syuta)

関西大学・システム理工学部・助教

研究者番号：00402553

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：磁性体への純スピン流注入による磁気特性の解明にむけて、主に磁化ダイナミクスシミュレーションを用いて解析をおこなった。強磁性薄膜への純スピン流注入による磁化反転において、注入する純スピン流の偏極方向を僅かに傾けることで高速かつ高確率に磁化を反転させることが出来ることを提案した。その他、純スピン流注入による磁気スキルミオンの駆動特性や、非対称な磁気ヒステリシス曲線の原因を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the magnetization dynamics with the pure spin current injection into the ferromagnetic metal by using the numerical simulator based on the Landau-Lifshitz equation. We have found that the magnetization switching time is decreased and the switching probability is increased by optimizing the spin polarization direction of the pure spin current. We have found that the magnetic skyrmion domain are driven in oblique directions when the pure spin current is injected.

研究分野：物性理論

キーワード：スピン注入磁化反転 純スピン流 マイクロマグネティクス スピントランスファートルク

1. 研究開始当初の背景

電子の電荷とスピンをエレクトロニクスに用いるスピントロニクス分野においては、ハードディスクドライブの読み取りヘッドに使われている磁気抵抗素子などの新機能素子が開発された。このようなスピントロニクスデバイスは素子の一部に強磁性金属が用いられ、その強磁性金属中の磁化の向きの変化で電気伝導が制御される。したがって、高効率に電気伝導を制御するためには高効率な磁化制御が望まれる。いくつかの磁化制御の方法があるが、最近ではスピン偏極した電流を用いた磁化の制御が特に着目されている。この方法では、より大きくスピン偏極した電流を用いることで、より少ない電流での磁化制御が可能になる。近年、大きくスピン偏極したスピン流のひとつである純スピン流を用いた磁化反転が観測された。純スピン流は上向きスピンと下向きスピンの逆の方向へ移動する正味の電流がゼロのスピン流である。純スピン流の注入を強磁性金属の磁化反転に用いる場合、強磁性金属に注入された純スピン流は強磁性金属中で急峻に減衰する。したがって、強磁性金属内での発熱が少なく熱擾乱が発生せずに強磁性金属中の磁化が安定すると考えられている。2008年に強磁性金属合金のパーマロイ薄膜への純スピン流注入による磁化反転が観測されて以来、この純スピン流を用いた磁化の制御は盛んに研究されている。しかし、純スピン流を考慮した磁化ダイナミクスのシミュレーションは存在せず、理論側からのアプローチが必要とされていた。

研究代表者は独自に純スピン流注入を取り入れた磁化ダイナミクスシミュレーターを開発した。これにより、シミュレーション側から実験への研究アプローチが可能となり、磁化反転だけにとどまらず、様々な物理現象の純スピン流注入の展開が期待される。

2. 研究の目的

(1) 強磁性金属への純スピン流の注入による磁化反転や磁化制御の高効率化に向け、低消費電力化、高速磁化反転、サンプルばらつき抑制、反転確率の増加などを実現する必要がある。しかし、純スピン流を強磁性金属へ注入した場合の強磁性金属中の磁化ダイナミクスはほとんど明らかになっていない。そこで、純スピン流の注入では様々な方向から様々な向きに偏極したスピンを注入することができるのが他のスピン注入と異なる点である。そこで、様々な純スピン流の注入による磁化反転をシミュレーションすることで強磁性金属中の磁化のダイナミクスを明らかにし最適な注入方法を考察する。

(2) 純スピン流を注入することによる磁化の制御として、磁化反転以外にも強磁性金属薄膜に形成される磁気渦の制御など目的は様々存在する。ここで、磁気渦は磁気メモリ

の記憶ビットへの使用や論理演算素子への応用が期待されている。この磁気渦の制御など磁化反転以外の目的や物理に対して純スピン流を注入することによる高効率な制御が望めるのかを検証する。

(3) 大きな純スピン流をターゲットの強磁性金属へ注入するためには、大きな純スピン流を生成源で生成し、その量をできるだけ保ったまま強磁性金属へと運ぶ必要がある。純スピン流をになう電子は拡散伝導により伝導する。スピン拡散長が短い素材では生成源から離れると純スピン流の大きさが急峻に減衰してしまい、大きな純スピン流がターゲットの強磁性金属まで流れない。したがって、スピン散乱長が長く、純スピン流を長距離まで維持できる素材や機構やそれに準ずる機構を探索する。

3. 研究の方法

(1) 強磁性体金属へ純スピン流を注入したときの強磁性体金属中の磁化の挙動を、磁化ダイナミクスシミュレーションを用いて検証する。強磁性金属へ純スピン流を注入した場合の磁化の挙動をシミュレーションし検証することで、問題点の解決や高性能な磁化反転の機構を提案する。シミュレーションでは、十数から数百ナノメートルの強磁性金属を数ナノメートルサイズの微小なセルに分割し、各セルの磁気モーメントの時間変化を、ランダウリフシッツ方程式を用いて解く。磁気モーメントが感じる磁場として全てのセルの磁気モーメントが作る静磁場による長距離相互作用、隣接するセルの磁気モーメント間に働く交換相互作用(短距離相互作用)、磁気異方性エネルギーによる異方性磁場に加えて、純スピン流注入によるスピントランスファトルクを取り入れる。純スピン流が注入面から指数関数的に減衰するモデルを用いる。高性能な磁化反転としては、少ない純スピン流注入によって磁化を反転させること、磁化の反転確率を増加させること、磁化の反転速度を速くすることに注目して考察する。

(2) 大きな純スピン流を強磁性金属へ注入するため生成源や伝導リードの電子状態や伝導特性を、量子論を用いた理論計算で検証する。生成源の強磁性金属の電子状態を第一原理バンド計算で計算する。第一原理バンド計算では接合系の原子構造を計算に取り入れる事で、各スピンの正確な電子状態が計算可能である。また各スピンチャンネルの電気伝導度をタイトバインディングモデル、久保ランダウア公式、リカーシブグリーン関数法を用いて計算する。

4. 研究成果

(1) 面内に磁化した強磁性金属薄膜へ純スピン流を注入して磁化を反転させる場合、反

転方向から僅かに傾いた方向に偏極した純スピン流を注入すると、高速に確実に磁化が反転することを提案した〔雑誌論文〕。さらに、純スピン流を注入する面にも磁化の反転時間が依存することを明らかにした〔雑誌論文〕。磁化ダイナミクスのシミュレーションでは強磁性薄膜金属としてパーマロイの物質パラメータを用いた。 $+y$ 方向に磁化した強磁性薄膜の磁化を $-y$ 方向に反転させる場合、 $-y$ 方向に偏極した純スピン流を注入するのが良いと考えられてきた。しかし、面内に磁化した磁性薄膜の場合、 $-y$ 方向に偏極した純スピン流を薄膜へラテラル方向に注入したとしても磁気渦形状が形成されて磁化が安定し磁化反転が起こらない場合があった。そこで、薄膜へ1方向から純スピン流を注入する場合(図1(a))と、2方向から注入する場合(図1(b))において、純スピン流の偏極方向を変えながら磁化反転をシミュレーションした。純スピン流を注入する場合、様々な方向に偏極したスピン流を注入することが可能である。したがって、 $-y, x, z$ 方向に偏極した純スピン流をそれぞれ注入した場合の磁化の挙動をシミュレーションした(図1(c))。その結果、 x 方向に偏極したスピンを注入した場合は、磁化がほとんど変化せず、 z 方向の偏極したスピンを注入した場合は、磁化が振動することが明らかになった。これらの結果を踏まえて、 $-y$ 方向から少し傾いた向きに偏極したスピンを注入すると、1方向からスピンを注入する場合においてはスピンの偏極方向が $-y$ 方向から 45° 傾いた向きの純スピン流を注入すると反転確率が100%に近づいた。このとき、 $-y$ 方向に偏極した純スピン流を注入する場合と比較して反転時間が1割以上減少した。2方向からスピンを注入する場合においては、片方の純スピン流の偏極方向は $-y$ 方向で固定し、もう一方の純スピン流の偏極方向を傾けることで反転確率を100%近くまで上げることが可能であることを明らかにした。これらの結果により、純スピン流注入によって磁化反転を制御すると、従来型のスピン偏極電流による磁化反転よりも高速に高確率で磁化を反転できることが明らかになった。

純スピン流注入では、強磁性金属の様々な面からスピンを注入可能である。そこで、面内に磁化した直方体の強磁性金属薄膜の各面に純スピン流を注入し、磁化反転を検証した〔雑誌論文〕。その結果、同一量のスピンを注入する場合、狭い面からスピンを注入すると最も速く磁化が反転することが明らかになった。これらの結果は純スピン流注入による磁化の制御で起こる結果である。また、スピンを注入する面を変えることで、磁化の反転途中で磁気渦形状が形成される場合や、磁壁形状が形成される場合など磁化の反転過程でのダイナミクスに大きな変化が現れることが明らかになった。純スピン流注入を用いた磁化反転技術を用いた新しい機能の

提案が期待される。

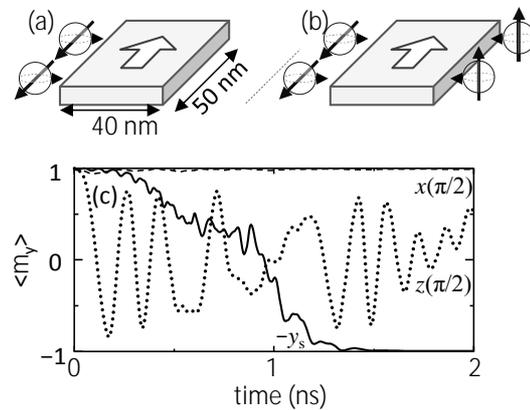


図1 面内磁化の強磁性金属薄膜へ純スピン流を(a) 1方向と(b) 2方向から注入する場合のイメージ図と(c) 1方向から純スピン流を注入した場合の強磁性体中の磁化のシミュレーション結果。

(2) 非対称な磁化ヒステリシス曲線が、非対称な形状への純スピン流注入が原因で起こることを明らかにした〔雑誌論文〕。強磁性体の磁化を純スピン流の注入によって安定して反転させる必要がある。純スピン流を注入しながら外部磁場を加えることで磁化を反転させる場合、上向き磁化から下向き磁化へと反転させる場合に必要な外部磁場と下向きから上向きへ反転させるのに必要な外部磁場の大きさが異なる非対称な磁気ヒステリシス曲線が実験結果で観測されていた。この原因は外部磁場による磁化反転やスピン偏極電流を用いた磁化反転では説明できていなかった。しかし、形状が非対称な強磁性金属へ純スピン流注入しながらの外部磁場印加による磁化反転をシミュレーションすることで非対称な磁気ヒステリシス曲線が得られた。この結果は非対称な形状における純スピン注入がない場合の磁化反転のシミュレーションでは再現できず、非対称な形状と純スピン流注入の二つの要因が重なることで起こることを明らかにした。このような新しい物理現象は新しい機能を持ったデバイスの開発に応用できると期待され注目される。

(3) 純スピン流注入による磁気スキルミオンの駆動について検証し、純スピン流の注入によってスキルミオンが斜めに移動することを明らかにした〔雑誌論文〕。最近、特殊な磁気状態である磁気スキルミオンが着目されている。強磁性細線に形成されたスキルミオンなどの磁区は、強磁性細線中を流れるスピン偏極した電流によって駆動する。磁気スキルミオンは垂直磁化膜に形成される磁気渦形状を持つ磁気パブルの一つであり、低電流で駆動することが可能である。強磁性細線は酸化を防ぐために金属のキャップ層によってコーティングされている。このキャ

ップ層に電流が流れると、キャップ層から強磁性細線の表面へ一様に純スピン流が注入されると考えられている。細線表面への一様な純スピン流注入による磁気スキルミオンの駆動は不明であった。ジャロシンスキー守谷相互作用を磁化ダイナミクスシミュレーションに導入した。シミュレーションの結果、純スピン流の注入によって磁気スキルミオンは細線斜め方向へ駆動することが明らかになった(図2)。また、その方向は磁気スキルミオンの磁壁の種類(プロットタイプやネールタイプ)や磁壁の磁気モーメントの向き(時計回り渦や湧き出し渦など)、磁気コアの磁気モーメントの向きに依存することを明らかにした。この結果はプラチナ層でキャップされた強磁性金属薄膜に生成された磁気バブルの挙動を観測した実験結果と定性的に合致した。したがって、測定実験ではプラチナ層から純スピン流が注入されていると考えられる。



図2 表面からのスピン注入によって(a)ネール磁壁と(b)プロット磁壁をもつ磁気スキルミオンが斜めに駆動するシミュレーション結果。

(4) 半無限表面グリーン関数の計算精度を飛躍的に向上させることにより強磁性金属を用いた接合の電気伝導計算をより正確に計算可能にした〔学会発表〕。この方法を利用することで、非磁性体に大きくスピン偏極した電流を流す方法を提案した〔雑誌論文〕。純スピン流は強磁性金属と非磁性金属の接合界面から非磁性金属へと流れ、非磁性金属に設置された他の強磁性金属へと注入される。微視的理論を取り入れた伝導計算においてはリカーシブグリーン関数法が用いられる。電気伝導の計算過程で表面グリーン関数を計算する必要がある。その計算過程の固有値の計算部分で計算の精度が大きく劣化しており、また、さらに場合によっては計算不能になることが知られていた。計算不能になる場合、これまでは物理的な仮定を用いて対処されていた。また、計算精度の改善は行なわれていなかった。本研究では計算精度悪化の原因が標準固有値問題の計算中に出現する逆行列計算にあると見定め、この計算を一般化固有値問題へと拡張することで逆行列の計算を排除した。これによって、物理的な仮定を用いず、計算不能になる例が物理的近似を用いず数学的な手法のみで著しく減少した。また表面電子状態や接合系の電気伝導度の計算精度を5桁以上改善した。これにより、大きな電気抵抗を持つ素材中の電

気伝導を計算することが可能になり、また僅かな電気伝導の変化に関して検証・議論することを可能にした。この手法は強磁性金属中を流れるスピン流やスピン偏極電流にたいする考察だけでなく、ナノスケールの半導体エレクトロニクスの伝導特性全般に用いることが可能である。

改善した計算手法を用いることでグラフェンナノリボン内に大きくスピン偏極した電流を流す方法を提案した〔雑誌論文〕。グラフェンはグラファイト単原子層物質である。グラフェンのスピン拡散長は100マイクロメートル以上あり、スピントロニクスデバイスの素子サイズよりも非常に長い。したがって、グラフェンはスピン伝導素子として着目されており、純スピン流の伝導にも適した物質であると考えられる。グラフェンの電子状態を第一原理バンド計算、電気伝導度を久保ランダウア公式による量子伝導計算を用いて計算することで、グラフェンナノリボンのスピン伝導特性を計算した。量子伝導計算にはパイ軌道とシグマ軌道の価電子を取り入れて計算した。シグマ軌道のエッジ状態がフェルミ準位近傍に形成されて伝導に大きく寄与することが明らかとなった。これまでの多くのグラフェンの研究ではシグマ軌道は大きなエネルギー幅のバンドギャップを持つと考えられ、電気伝導計算では無視されていた。しかし、数ナノメートル幅のナノリボンにおいては、このように無視できないことが明らかになった。さらに、このシグマ軌道のエッジ状態がスピン偏極し、スピン伝導に大きく影響を与えることが明らかになった。これらの結果から、グラフェンリボンのエッジに付加する水素の量を制御することでグラフェンに強磁性金属を接合すること無く大きくスピン偏極したスピン流を生成可能であることを明らかにした。

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21件)

M. Tanaka, S. Sumitomo, N. Adachi, S. Honda, H. Awano, and Ko Mibu, Electric-current-induced dynamics of bubble domains in a ferrimagnetic Tb/Co multilayer wire below and above the magnetic compensation point, AIP Advances, 査読有, Vol. 7, 2017, pp. 055916-1 – 055916-5
DOI: 10.1063/1.4974067

S. Oki, T. Kurokawa, S. Honda, S. Yamada, T. Kanashima, H. Itoh, and K. Hamaya, Robust spin-current injection in lateral spin valves with two-terminal Co₂FeSi spin injectors, AIP Advances, 査読有, Vol. 7, 2017, pp. 055808-1 – 055808-6
DOI: 10.1063/1.4972852

S. Yamada, S. Honda, J. Hirayama, M. Kawano, K. Santo, K. Tanikawa, T. Kanashima, H. Itoh, and K. Hamaya, Magnetic properties and interfacial characteristics of all-epitaxial Heusler-compound stacking structures, Physical Review B, 査読有, Vol. 94, 2016, pp. 094435-1 – 094435-7
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.094435

S. Honda, D. Yamamoto, T. Ohsawa, T. Gushi, K. Ito, and T. Suemasu, Controlling magnetic domain wall positions with an external magnetic field and a low spin-polarized current in chamfered L-shaped ferromagnetic thin ribbons, Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, Vol. 49, 2016, pp. 385002-1 – 385002-7
DOI: 10.1088/0022-3727/49/38/385002

S. Honda and T. Kimura, Magnetization reversal of permalloy film by pure spin current injection: relation between reversal time and injected surface, Journal of Physics Conference Proceedings, 査読有, Vol. 5, 2015, 011017, pp. 011017-1 – 011017-5
DOI:
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP.5.011017>

S. Honda, K. Inuzuka, T. Inoshita, N. Ota, and N. Sano, Magnetization and spin-polarized conductance of asymmetrically hydrogenated graphene nanoribbons: significance of sigma bands, Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, Vol. 47, 2014, pp. 485004-1 – 485004-6
DOI: 10.1088/0022-3727/47/48/485004

本多 周太, 伊藤 博介, 純スピン流注入磁化反転に対するスピン偏極方向の影響, Journal of the Magnetics Society of Japan, 査読有, Vol. 37, 2013, pp. 338 – 341
DOI: 10.3379/msjmag.1308R001

[学会発表] (計 20 件)

K. Sate, Y. Kayama, S. Honda, Y. Sonobe, and H. Itoh, Numerical Calculation of Magnetoresistance in MTJ containing Ferromagnetic Insulator, InterMag 2017, 2017 年 4 月 25 日, Dublin (Ireland).

M. Tanaka, S. Sumitomo, N. Adachi, S. Honda, H. Awano, and K. Mibu, Electric-current-induced dynamics of bubble domains in ferrimagnetic Tb/Co multilayer wires below and above the magnetic compensation point, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2016 年 10 月 1 日, New Orleans (USA)

S. Oki, T. Kurokawa, S. Honda, S. Yamada, T. Kanashima, H. Itoh, and K. Hamaya, Robust spin-current injection in lateral spin valves with two-terminal Co₂FeSi spin injectors. 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2016 年 10 月 1 日, New Orleans (USA)

T. Gushi, K. Ito, S. Honda, Y. Yasutomi, S. Higashikozono, K. Toko, H. Oosato, Y. Sugimoto, K. Asakawa, No Ota, and T. Suemasu, Control of domain wall position in L-shaped Fe₄N negatively spin polarized ferromagnetic nanowire, Management Committee of INTERMAG 2015, 2015 年 5 月 13 日, Beijing (China).

T. Miyata, R. Naito, S. Honda, Computing surface Green's function, International Workshop on Eigenvalue Problems: Algorithms; Software and Applications, 2014 年 3 月 7 日, エポカルつくば (つくば市).

[図書] (計 1 件)

J. Inoue, A. Yamakage, and S. Honda, Pan Stanford, Graphene in Spintronics: Fundamentals and Applications, 2016 年, 306

[産業財産権]

出願状況 (計 4 件)

名称: 磁気素子、磁気素子を製造する方法、および磁気メモリ装置
発明者: 本多周太, 田中雅章
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2016-049981
出願年月日: 2016 年 3 月 14 日
国内外の別: 国内

名称: 磁気装置
発明者: 本多周太, 末益崇, 伊藤啓太
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2013-209545
出願年月日: 2013 年 10 月 4 日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本多 周太 (HONDA, Syuta)
関西大学・システム理工学部・助教
研究者番号: 00402553