

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32661

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740284

研究課題名(和文)非平衡系におけるスピン波スピン流に対する数値的研究

研究課題名(英文) Numerical study on the spin-wave spin current in non-equilibrium systems

研究代表者

大江 純一郎(OHE, Jun-ichiro)

東邦大学・理学部・講師

研究者番号：40510251

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、熱勾配や局所外場によって駆動される強磁性絶縁体中のスピン波について理論解析を行った。まず、熱勾配下で発生するスピントロニクス効果の起源を明らかにした。磁化の運動を表すLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を、温度勾配を有する系において数値的に解き、そこからプラチナ電極で観測される電圧を定量的に求めた。また、強磁性薄膜中の表面スピン波が熱流を運ぶことを明らかにし、強磁性絶縁体を用いたエネルギー輸送デバイスの提案を行った。さらに、異なる磁性体の超格子構造を考え、そこではトポロジカルに保護されたカイラルエッジスピン波モードが存在することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we worked on properties of the spin wave that is driven in the presence of the temperature gradient or the local magnetic field. We clarified the origin of the spin Seebeck effect that is observed in the ferromagnetic sample with temperature gradient. We numerically simulate the dynamics of the magnetization by employing the Landau-Lifshitz-Gilbert equation. Our results showed that the exchange spin wave mode carries the spin current and results the finite bias voltage in the Pt probes. We found that the energy flow and the surface spin wave mode are driven simultaneously by the local magnetic field. We also found the chiral edge spin wave mode in magnetic crystal.

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：磁性 スピントロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

電子の電荷・スピン両自由度を制御する新しいタイプのナノプロセッシング素子、スピントロニクスデバイスに関する研究が盛んに行われている。スピントロニクス分野では電荷の運ぶ電流に加えて、スピンの運ぶスピン流を積極的に活用する。現在までに行われているスピン流に関する研究では、金属中の伝導電子の運ぶスピン流の解析が主であった。しかしながら、金属中の伝導電子のスピン拡散長は、ナノメートルのオーダーであり、長距離に渡ってスピン流を伝搬させることは困難であった。これに対して、局在電子のスピン集団励起(スピン波)は、コヒーレント長が数ミリメートルに達するため、新しいスピン流を担うキャリアーとして注目されている。スピン波自体の研究は古くから行われており、特に磁性薄膜中の定在波モードに関しては非常に多くの知見がもたらされている。しかしながら、本研究で扱うような非平衡状態で発生する非定常スピン波、具体的には局所スピン波励起によるスピン波や、熱勾配下でのスピン波に関しては、研究は殆ど行われていない。このような非平衡系では、同時に様々なスピン波モードが関与しており、これまでの定常状態のスピン波を解析する手法は適用できない。またこのスピン波スピン流は、新しい情報伝達キャリアーとして応用面からも注目を集めているため、定量的な解析方法の確立が急務である。

## 2. 研究の目的

本研究では、強磁性絶縁体中のスピン波、特に熱勾配下や局所スピン波励起のような非平衡系で発生する非定常スピン波について理論的に解析することを目的とする。特に、角運動を運ぶキャリアー(スピン波スピン流)としての観点から研究を行ない、スピン波スピン流の効率的な発生・伝達・検出方法、磁化構造に与える影響を明らかにする。数値計算によって物質定数・サンプル形状まで考慮した強磁性体中の磁化ダイナミクスの定量的な解析を行う。本研究によって、ジュール熱を発生しない強磁性絶縁体を用いた新しいナノデバイス実現への指針を与える。

## 3. 研究の方法

研究ではまず、非平衡系における強磁性絶縁体中の磁化ダイナミクスを表す方程式を導き、計算プログラムを開発する。将来的には大規模並列スーパーコンピュータを利用することを念頭におき、プログラムの並列化を行う。実際のサンプル形状や、有限温度の効果を取り入れるためには、膨大な計算量、特にハードディスク容量を必要とするため、計算機を占有する必要がある。このため、1,000 千円程度のクラスタ計算機を購入す

る。これにより、非平衡系におけるスピン波スピン流の物質や形状の依存性を明らかにする。また、熱勾配中のスピン波スピン流の解析を行い、熱流・スピン流相互作用の起源を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 磁性絶縁体中のスピンゼーベック効果

本研究では、熱勾配によって駆動される強磁性絶縁体中のスピン波について解析を行った。これはスピンゼーベック効果と呼ばれ注目が集まっている。このスピンゼーベック効果を解析するために、強磁性体中の磁化の運動に注目した。具体的には磁化の運動を表す Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) 方程式を、温度勾配を有する系において数値的に解き、そこからプラチナ電極に入射されるスピン流を議論した。プラチナ電極を考えるのは、逆スピンホール効果を用いて、スピン流を観測可能な電圧に変換するためである。まず、スピン拡散方程式と LLG 方程式を組み合わせることにより、電極と強磁性体の界面を流れるスピン流を解析的に解き、次に数値解析で得られた磁化の運動を用いることで実際に観測される電圧を求めた。その結果、ミリメートルスケールの範囲で電気信号が現れることを初めて理論的に示した。(図1)この研究結果を Phys. Rev. B に投稿し掲載された。また、研究結果について、仙台で行われた応用物理学学会磁気学会共催のスピントロニクス研究会において招待講演を行った。

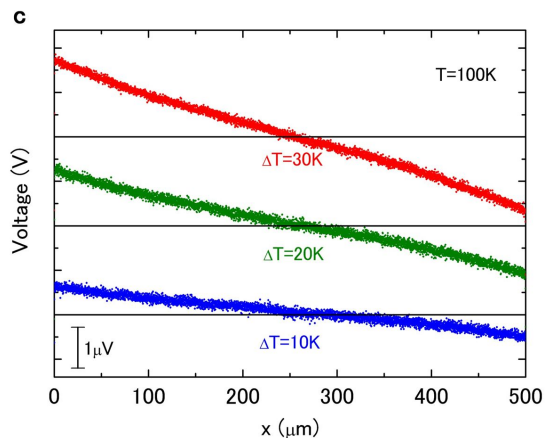


図1: 数値計算により求められたスピンゼーベックシグナル。温度勾配が大きくなると得られる電圧も大きくなる。

### (2) 表面スピン波による熱流移動

表面スピン波によって運ばれる熱流について数値解析を行った。その結果、指向性を持つスピン波を利用することで、強磁性体中の熱拡散をコントロールできることがあきらかになった。具体的には LLG 方程式を、双極子相互作用を正確に取り入れた数値計算を行い、マクロな系での表面スピン波を再現し、緩和校を導入することで熱発生メカニズムを明らかにした。この結果は、Nature

Materials 誌に掲載された。

(3) 磁気超格子中のカイラル表面スピン波  
人工磁気格子と呼ばれる複数の磁性材料を並べた試料において、特殊な表面スピン波の解析を行った。これはトポロジカルスピン波端状態と呼ばれ、その進行方向やチャンネル数が系の形状、物質定数によって変化する。このトポロジカルスピン波端状態が実際の試料中でどのように発生するか、数値計算を用いた解析によって明らかにした。計算には強磁性金属・強磁性絶縁体を用いた人工磁気格子を用いた。試料中の双極子相互作用を計算するために高速フーリエ変換を用いたため、サブミリメートルスケールの定量的な解析が可能になった。計算によって、系の内部が振動するバルクモードと系の端が振動するモードを明確に区別できることを示し、トポロジカルスピン端状態の存在を確かめた。(図2) また、この端状態が試料の厚さや飽和磁化などの物質定数によっても形を変えることを示し、観測するための実験系の提案をした。このスピン波の干渉効果を解析し、スピン波論理回路の可能性を示した。

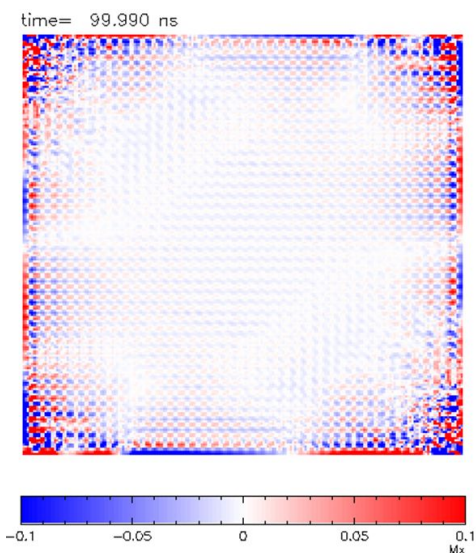


図2：磁気超格子中に現れるカイラルエッジスピン波モード。系の端にスピン波が局在しており、一方向に進行している。

#### 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 8 件)

- (1) Jun-ichiro Ohe and Yuhki Shimada  
“Cascaded spin motive force driven by the dynamics of the Skyrmion lattice”  
Appl. Phys. Lett. 103, 242403 (2013)  
査読あり
- (2) Ryuichi Shindou and Jun-ichiro Ohe  
“Magnetostatic wave analog of integer

quantum Hall state in patterned magnetic films”  
Phys. Rev. B 89, 054412 (2014)  
査読あり

- (3) Ryuichi Shindou, Jun-ichiro Ohe, Ryo Matsumoto, Shuichi Murakami, and Eiji Saitoh  
“Unidirectional spin-wave heat conveyer”  
Phys. Rev. B 87, 1774402 (2013)  
査読あり
- (4) Ryuichi Shindou, Ryo Matsumoto, Shuichi Murakami, and Jun-ichiro Ohe  
“Topological chiral magnonic edge mode in a magnonic crystal”  
Phys. Rev. B 87, 1774427 (2013)  
査読あり
- (5) T. An, V. I. Vasyuchka, K. Uchida, A. V. Chumak, K. Yamaguchi, K. Harii, J. Ohe, M. B. Jungfleisch, Y. Kajiwara, H. Adachi, B. Hillebrands, S. Maekawa, and E. Saitoh  
“Unidirectional spin-wave heat conveyer”  
Nature Materials 12, 549 (2013)  
査読あり
- (6) K. Tanabe, D. Chiba, J. Ohe, S. Kasai, H. Kohno, S. E. Barnes, S. Maekawa, K. Kobayashi and T. Ono  
“Spin-motive force due to a gyrating magnetic vortex”  
Nature Communications 3, 845 (2012)  
査読あり
- (7) Katsuhisa Taguchi, Jun-ichiro Ohe, and Gen Tatara  
“Ultrafast magnetic vortex core switching driven by topological inverse Faraday effect”  
Phys. Rev. Lett. 109, 127204 (2012)  
査読あり
- (8) Jun-ichiro Ohe, Hiroto Adachi, Saburo Takahashi, and Sadamichi Maekawa  
“Numerical study on Spin Seebeck effect”  
Phys. Rev. B 83, 115118, (2011)  
査読あり

〔学会発表〕(計 12 件)

- (1) 田辺賢士, 松本遼, 大江純一郎, 村上修一, 森山貴広, 千葉大地, 小林研介, 小野輝男 “マグノンホール効果の検出の試み IV”  
日本物理学会 2014.3.26 東海大学

- (2) 嶋田 裕樹、大江 純一郎  
磁気スキルミオン格子の集団励起に伴う  
スピン起電力の数値的研究  
日本物理学会 2013.9.27 徳島大学
- (3) 大江 純一郎、好田 誠、新田淳作  
ラシュバ超格子を用いたスピン分極電流  
日本物理学会 2013.9.26 徳島大学
- (4) 田辺 賢士，松本 遼，大江 純一郎，  
村上 修一，森山 貴広，千葉 大地，  
小野 輝男 ” マグノンホール効果の検出  
の試み III ”  
日本物理学会 2013.9.26 徳島大学
- (5) Yuhki Shimada and Jun-ichiro Ohe  
Numerical analysis on the spin-motive  
force induced by the resonant motion of  
a magnetic domain wall  
The 12<sup>th</sup> Asia Pacific Physics  
Conference 2013.7.18 幕張メッセ (千  
葉)
- (6) 大江 純一郎  
” スピントロニクス of 展望とカイラル磁  
性 ”  
カイラル磁性体研究会 2013.5.18 大阪
- (7) 大江 純一郎，進藤 龍一，松本 遼，  
村上 修一  
” 磁性薄膜超格子におけるカイラルスピ  
ン波端状態 ”  
日本物理学会 2013.3.27 広島大学
- (8) 田辺 賢士，松本 遼，村上 修一，大  
江 純一郎，森山 貴広，千葉 大地，  
小野 輝男  
” マグノンホール効果の検出 ”  
日本物理学会 2013.3.27 広島大学
- (9) 進藤 龍一，松本 遼，大江 純一郎，  
村上 修一  
” 強磁性薄膜におけるトポロジカルなカ  
イラルスピン波端状態の設計 ”  
日本物理学会 2013.3.27 広島大学
- (10) 進藤 龍一，松本 遼，大江 純一郎，  
村上 修一  
” 双極子相互作用のある強磁性結晶にお  
けるトポロジカルスピン波端状態の理  
論 ”  
日本物理学会 2012.9.20 横浜国立大学
- (11) 大江 純一郎，進藤 龍一，松本 遼，  
村上 修一  
” トポロジカルスピン波端状態に対する  
数値解析 ”  
日本物理学会 2012.9.20 横浜国立大学

(12) Hiroto Adachi, Junichiro Ohe, Saburo  
Takahashi, and Sadamichi Maekawa  
” Phonon-drag spin Seebeck effect ”  
International Conference on Magnetism  
(ICM2012) 2012.7.12 Busan, Korea

(13) 大江 純一郎  
” スピンゼーベック効果に対する数値解  
析 ”  
応用物理学会スピントロニクス研究会  
2011.11.14 東北大学 (宮城県仙台市)

〔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  
大江 純一郎 (OHE, Jun-ichiro)  
東邦大学・理学部・講師  
研究者番号：40510251

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：