

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－英国 研究交流）

1. 研究課題名：「UK-Japanese Collaboration on Current-Driven Domain Wall Dynamics
電流誘起磁壁ダイナミクスに関する日英共同研究」

2. 研究期間：平成 23 年 5 月～平成 25 年 3 月

3. 支援額： 総額 15,000,000 円

4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	多々良 源	独立行政法人 理化学研究所 創発物性研究センター	チームリーダー
研究者	河野 浩	前) 大阪大学 現) 名古屋大学理学研究科	前) 准教授 現) 教授
研究者	木野 日織	独立行政法人 物質・材料研究機構	主任研究員
研究者	柴田 絢也	東洋大学工学部電気電子情報工学科	准教授
研究者	植田 浩明	首都大学東京大学院理工学研究科	ポスドク研究員
研究者	高橋 宏明	首都大学東京大学院理工学研究科	大学院生
参加研究者 のべ 7 名			

相手側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	C. H. Marrows	University of Leeds, School of Physics and Astronomy	Professor of Condensed Matter Physics
研究者	G. Burnell	University of Leeds, School of Physics and Astronomy	Lecturer and EPSRC Advanced Research Fellow
研究者	S. Lepadatu	University of Leeds, School of Physics and Astronomy	Research Fellow
研究者	T. A. Moore	University of Leeds, School of Physics and Astronomy	Lecturer
研究者	J. S. Weaver	University of Leeds, School of Physics and Astronomy	Research Fellow
研究者	A. L. Whiteside	University of Leeds, School of Physics and Astronomy	PhD student
参加研究者 のべ 7 名			

5. 研究・交流の目的

本研究では日本側の理論的研究と英国側の実験的研究の間の交流を通じて、新奇な電流磁気光学現象を開拓することが目的である。磁性体中では電気特性と磁気特性（磁性）が様々な形で影響しあうことが古くから知られているが、最近はナノスケールでの構造の制御技術を使ったより顕著な効果を実現することが可能となっており、これまでにハードディスクに用いられている GMR, TMR 素子のように非常に大きなマーケットを占めるような量産素子や、MRAM のような次世代の大容量不揮発メモリの核となることが期待される素子の開発に結びついている。こうしたなか、現在新奇特性を考える上で注目すべき相互作用の1つはスピン軌道相互作用である。これは重い元素を含む物質内で特に顕著に生じる相対論的効果で、微小磁石であるスピンの担う磁性と電気伝導特性を強く結びつけるはたらきがある。特に近年はナノ構造の制御技術の進歩により、界面構造や表面制御により非常に強いスピン軌道相互作用を実現、制御することが可能になっており、これを用いてこれまで不可能であったような磁気情報と電気信号の間の変換が実現できる可能性がある。本研究ではこうした新奇電流磁気光学現象を日英のグループそれぞれの得意とする手法により研究するが、特にその過程で互いの人的交流を通じて email などの手段では期待できないような深い議論を行い研究の著しい推進を目指す。

6. 研究・交流の成果

6-1 研究の成果

日本側の理論的研究においては以下に示したような結果が得られた。

I. 電流駆動による磁壁移動

1. 不純物元素添加による効率化の可能性

理論（日本）側は強磁性体に Pt などの重くスピン軌道相互作用の強い元素を添加することで大きな効率化が期待できるという示唆をした。しかし実験的にはこれらの異種元素の間の混入における相性が悪いためこの実現は困難であることがわかり、3年間の期間では実験的検証はできなかった。また、理論側は第一原理計算により様々な元素の添加した場合のトルクの計算を行い、効率的な組み合わせの探索を試みた。強磁性体と Pt, Pd, Ru, Os などの重い元素との界面を作った際の界面の磁性の挙動を総括的に理解することができた。この準備的研究の結果は目下論文として出版準備をしている段階である。この結果により、界面で発生するトルクの定量的評価と磁化反転効率の評価は、次の段階の研究により容易に実現できる状況にある。

2. 界面の強いスピン軌道相互作用の利用

理論（日本）側は界面に生じる Rashba 型スピン軌道相互作用が磁性と電気伝導特性に与える効果についての解析を続けた。その結果、このスピン軌道相互作用は磁壁移動を高速化するだけでなく、逆に磁性の持つ情報を電気信号に変換する上でも重要なはたらきをしていることが明らかになった。このことは以下の項目 II で記述する。

II. スピン軌道相互作用によるスピン-電荷変換

界面で発生する強い Rashba 型スピン軌道相互作用が磁化のダイナミクスと組みあわせることで、電子スピンに対するスピン電場またそれに伴う起電力が発生するという新しい可能性を見出した。このスピン電場は、磁化の運動から生じるという点では電磁気における Faraday 則と似ているが、物質中の量子効果によって生みだされている新しい効果である。スピン電場だけではなくスピンに作用するスピン磁場も存在し、これら2つの場を合わせたスピン電磁場は電荷に対する電磁場と同じく Maxwell 方程式を満たすこともわかった。この有効スピン電磁場発生メカニズムはスピンのもつ量子的な Berry 位相を拡張した概念で理解することができる。通常の電荷に対する電磁気的効果と比べ、この物質中でスピンに作用する電磁場は非常に小さな領域に 1 kV/m ほどの高電場をかけることができ、また 100 Tesla の磁場に相当するほどの圧倒的に強い磁場を実現できる点も注目される。さらに、

スピン緩和の効果を考えると、スピン電磁場はモノポールをもった Maxwell 方程式を満たすことも明らかになった。このモノポールは、スピン情報と電気信号の間の変換において本質的役割を担っており、今後これを利用した信号変換及び情報伝達の可能性を探る予定である。

III. 2層構造における磁壁駆動

イギリス側グループは、薄い強磁性体を絶縁体層をはさんで2つ接合した構造で、2つの強磁性体の間に反強磁性的(AF)な結合が生じる状況(SAFDW)を実現し、この構造では電流下での磁壁(DW)の運動が大幅に促進されることを見出した。日本側グループはこの結果を説明するために、2つの磁壁が結合した場合の運動方程式を導出、数値的に解いた。非常に興味ふかいことに、結合した磁壁は外的ピンどめが重要な領域では孤立磁壁と比べて半分程度かそれ以下の低電流で動くことがわかった。この事実は、英国側の実験結果と整合するが、少々驚くべきもので、現在その解釈を日英で進めている。結合磁壁の駆動に必要な臨界電流の大幅な軽減は、磁壁を用いた不揮発メモリの実現の可能性を大きく広げることになると期待される。

IV. 光による高速磁化反転

光誘起磁壁駆動の可能性を理論的に議論し、細線中で実現される磁壁のうち渦磁壁とよばれるタイプに対しては、光による駆動が非常に有効であることを見出した。これは渦磁壁はスピン Berry 位相をもっており、これが円偏大した光と強い結合することで幾何学的逆 Faraday 効果が生じるためである。我々が見つけたこの新しいメカニズムを用いると、渦磁壁の磁性反転が 100ps 程度の短い時間で実現できることを理論的に確かめた。これは電流印加による場合と比べて 100 倍の高速化になる。産業化に向けた最終的な目標である効果率的磁化制御の観点からは、電流以外の効果も有効であることを示唆している。

IIV. 幾何学的磁化構造の電流駆動

磁壁以外の磁化構造の制御も重要な関連課題である。中でも、大きさが 10nm 程度と非常に小さい構造である skyrmion は、幾何学的要因のため安定な構造であること、低電流で駆動することができるなどの、デバイスとしての優れた特徴を持っているため、最近特に注目されている。英国側は実験的研究にも取り組み、日本側グループもこの skyrmion の電流下での挙動の解析も行った。論文として出版するにはもう少し時間がかかる見込みである。

6-2 人的交流の成果

本研究交流では両国の研究者が相互に訪問し十分な研究討論を行うことができ、研究の基本となる研究者同士の交流とそれに伴う信頼を大きく向上させることができた。今後も研究の過程で情報交換を密にとる体制ができた。先方のみならず先方チームと関わりの深い英国やヨーロッパのグループとの交流ももつことができ、研究における人脈の構築にも本研究は大きく寄与した。若手の派遣としては、日本側は当時日本側代表者が在籍していた首都大学東京の大学院学生を先方研究室に派遣した。その派遣により、研究成果はもとより、日英の研究姿勢の違い、研究環境の違いから文化の違いなど数多くの事柄について刺激と新しい視点を当該学生は得て帰国した。彼の今後の活躍において大きな糧となると期待している。

7. 主な論文発表・特許等（5件以内）

相手側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	<ul style="list-style-type: none"> ・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、出願番号、出願人、発明者等 	備考
論文	Akihito Takeuchi, Gen Tatara., Spin Damping Monopole., J. Phys. Soc. Jpn. 81 033705 (1-4) (2012). (Editors' Choice)	
論文	Katsuhisa Taguchi, Jun-ichiro Ohe and Gen Tatara., Ultrafast magnetic vortex core switching driven by topological inverse Faraday effect., Phys. Rev. Lett. 109 , 127204 (1-5) (2012).	
論文	Kim, K.-J.; Hiramatsu, R.; Koyama, T.; Ueda, K.; Yoshimura, Y.; Chiba, D.; Kobayashi, K.; Nakatani, Y.; Fukami, S.; Yamanouchi, M.; Ohno, H.; Kohno, H.; Tatara, G. & Ono, T., Two-barrier stability that allows low-power operation in current-induced domain-wall motion Nat Commun, 4 , 2011 (2013).	
論文	Tatara, Gen and Nakabayashi, Noriyuki, Emergent spin electromagnetism induced by magnetization textures in the presence of spin-orbit interaction (invited), Journal of Applied Physics, 115 , 172609 (2014).	