

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390008

研究課題名(和文) スピン電流駆動磁壁移動のシミュレーション解析

研究課題名(英文) Simulation analysis of the domain wall motion by spin current

研究代表者

仲谷 栄伸 (Nakatani, Yoshinobu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20207814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年磁性細線上に現れる磁壁と呼ばれる構造を情報の表現媒体として利用するストレージが提案され、磁壁についての研究が盛んに行われている。特に磁壁の移動速度はストレージの動作速度に大きく関係するため、高速移動条件の調査や移動メカニズムの解明が必要とされている。本研究ではシミュレーションを用いて、近年特に注目されているジャロシンスキー守谷相互作用による高速磁壁移動条件を求め、そのメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Recently a storage system, which uses a magnetic domain wall as an information carrier was proposed, and the domain wall have been studied intensively. Because the domain wall motion velocity is related to the operation speed of the storage system, it is required to obtain the conditions for fast domain wall motion, and to investigate the domain wall motion mechanism. In this research, the effect of the Dzyaroshinskii-Moriya interaction on the domain wall motion induced by a spin current, a magnetic field, and an electric field were investigated by computer simulation, and obtained the conditions for fast domain wall motion, and revealed the domain wall motion mechanism.

研究分野：シミュレーション科学

キーワード：nano spintronics domain wall motion micromagnetics

1. 研究開始当初の背景

スピン偏極電流注入による磁気モーメントの運動に関する理論的予想を受け、本現象に関する理論的解析や実験が盛んに行われている。研究が開始された当初は、磁性細線の加工精度の問題から磁壁の外的ピン留め効果が非常に大きく、また細線内の磁壁は二次元的な広がりを持った構造を有する為に、実験結果が理想的な一次元の解析モデルとは全く一致せず、そのメカニズムの解明が困難であった。我々は磁壁の二次元構造を表現し、外因性の磁壁のピン留め効果の組み込みや磁壁構造の動的な変化も取り扱うことができるマイクロマグネティックシミュレーションを用い、スピン電流による磁壁移動にはそれまで理論的に提案されていたスピントルク項だけではなく、その補正項が必要であることを示した。提案したモデルは、その後行われた精度の高い実験結果とよく一致しており、スピン電流による磁壁移動を表す一般的なモデルとして利用されている。

しかしながらその後行われた特に極薄膜を用いた実験からは、非常に速い磁壁移動速度や、移動方向の変化等、従来のモデルでは説明出来ない磁壁移動現象が観測されており、スピンホール効果等の新たな効果の可能性が指摘されていた。これらの報告では、実験結果を一次元磁壁を用いた解析モデルや理想的な一次元細線を用いたマイクロマグネティックシミュレーションを用いて現象が説明されていた。しかしながら前述のように、現実の細線では磁壁の動的な変形や外的ピン留め効果のため、これらを考慮しないモデルやシミュレーションでは定性的にすら移動の様子を再現出来ない。

図1、2は我々が行ったスピンホールと電流磁界を組み合わせた磁壁移動の計算結果である。外的ピン留め効果を考慮しないモデルでは(図1) 両者の効果を組み合わせることにより磁壁が電子の向きと逆方向に移動しているが( $C_{Hy}=10, AP: \Theta_H=0.014$ ) この効果は外的ピン留め効果により消失する(図2)。

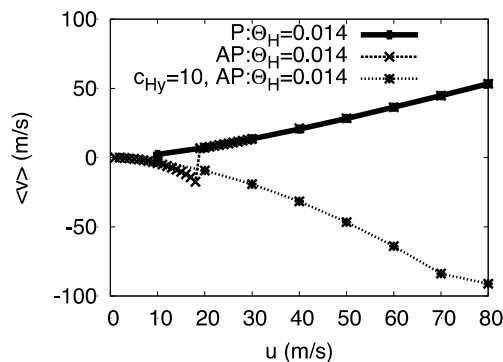


図1 電流による磁壁移動速度の変化(スピンホールと電流磁界を考慮)

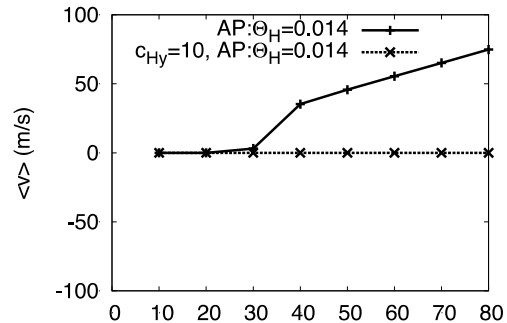


図2 電流による  $u$  (m/s) 磁壁移動速度の変化(スピンホール、電流磁界、外的ピン留め効果を考慮)

以上より本現象の解析のためには、現実の細線に現れる効果を考慮した2次元のシミュレーションによる解析が必要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、スピンホール効果に加え、近年注目を浴びているジャロシンスキー守谷効果(DMI 効果)による磁壁移動への影響を、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて調査する。特に解析モデルでは扱いにくい磁壁の外的ピン留め効果についての検討も行う。現在磁壁移動の研究では、スピン電流による磁壁移動が最も多く研究されているが、スピン電流駆動の場合、磁壁に対して多くの効果が同時に加わるために、基本的な現象の解析が困難となる。このために、本研究では磁界駆動についての検討も行う。さらに近年注目を浴びている、電界による磁壁移動現象についての検討も行う。

3. 研究の方法

すべての研究は、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて行う。本シミュレーションでは、計算対象である磁壁を含む細線を等間隔で離散化し、各離散点に原子磁気モーメントを配置し、その運動は Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式より求める。スピンホール効果や DMI 効果は、原子磁気モーメントに加わる実効磁界として取り入れる。電界効果は、電界により一軸異方性定数のみが変わるものと仮定して、シミュレーションに取り入れる。これらのシミュレーションにおいて、磁性細線の材料定数は Co/Ni 多層膜の値を用いた。

4. 研究成果

(1) 電流駆動現象におけるスピンホール及び DMI の影響

ここではスピン電流による磁壁移動現象に対する、スピンホール及び DMI の効果について検討した。

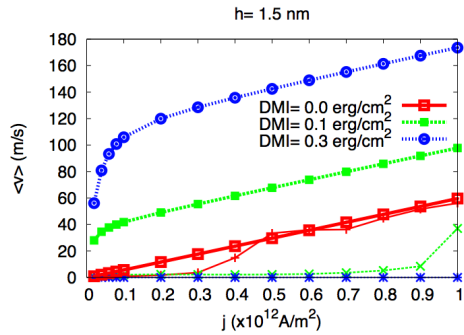


図 3 DMI と電流による磁壁移動速度の変化 (細線: スピンホール 0, 太線: スピンホール 0.1deg)

図 3 に DMI と電流による磁壁移動速度の変化を示す。スピンホールがない場合 (細線) は、磁壁移動のために大きな電流が必要であり、また DMI の増加と共に磁壁移動に必要な電流 (閾電流) が増加することがわかる。一方スピンホールにより閾電流は 0 となり、小さな電流でも磁壁が移動することがわかる。さらに DMI とスピンホール効果の組み合わせにより 100m/s 以上の非常に速い速度で磁壁が移動することがわかった。

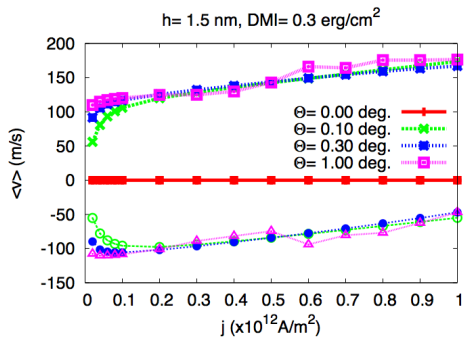


図 4 DMI の符号による磁壁移動方向の変化 (太線: DMI > 0, 細線: DMI < 0)

図 4 に DMI の符号による磁壁移動方向の変化を示す。DMI が負の場合、磁壁移動方向が逆転することがわかる。しかしながら、この場合、電流密度の増加とともに移動速度の絶対値が減少することもわかる。またスピンホール効果の有無により移動速度は大きく変化するが、特に電流密度の高い領域では移動速度はスピンホールの値にあまり依存しないことがわかる。

次に膜厚効果について検討した。スピンホール効果は磁性層の膜厚にわたって作用する効果であるために、膜厚の増加と共に磁気モーメントに加わるスピンホールによるトルクが減少する。この影響を調査した。

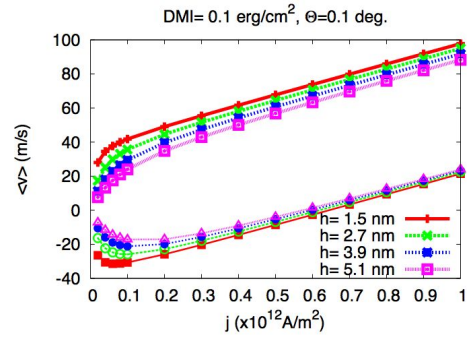


図 5 膜厚による磁壁移動速度の変化 (太線: DMI > 0, 細線: DMI < 0)

図 5 に膜厚による磁壁移動速度の変化を示す。膜厚の増加と共に、磁壁移動速度が減少することが分かる。しかしながら前述のように、本効果はスピンホール効果の変化によるものであり、磁壁移動速度はスピンホール効果の有無で大きく変化するが、特に電流密度が大きい場合スピンホールの大きさにはあまり影響しないために、低電流密度の場合に膜厚による移動速度の変化が顕著に見られる。

図 6 に、外的磁壁ピン留め効果としてラフエッジ効果を取り入れた場合の磁壁移動速度を示す。ピン留め効果により、低い電流密度では磁壁は移動しないが、閾電流以上では磁壁は DMI の符号によってその移動方向が決定されることがわかる。このことは図 2 に示したのスピンホールのみの場合と異なる結果である。但し、図 5 の結果では電流密度が高い場合は磁壁移動速度は膜厚にほとんど依存しなかったが、この場合は、膜厚の増加と共に移動速度が減少することがわかった。

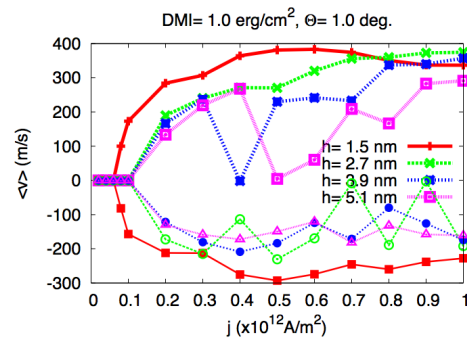
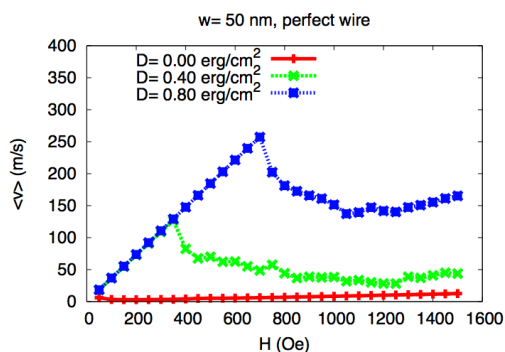


図 6 膜厚による磁壁移動速度の変化 (外的ピン留め効果を考慮)

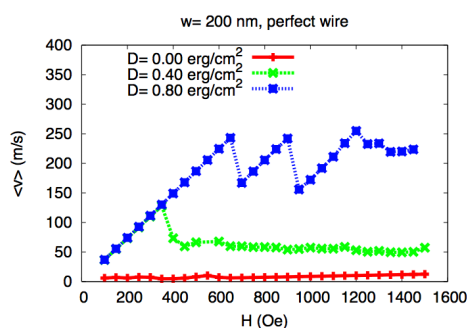
## (2) 磁界駆動現象における DMI の影響

ここでは外部磁界による磁壁移動現象に対する DMI の効果について検討した。これまで磁界駆動による磁壁移動への DMI 効果は、1次元の解析モデルや、小規模な 2次元シミュレーションによる検討が行われており、

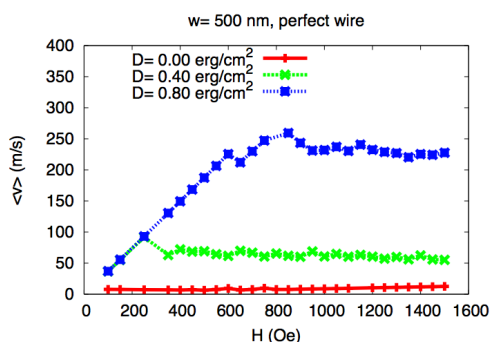
DMI によって Walker field が増加することが指摘されていた。しかしながら、Walker field より強い磁界での移動速度はこれまで議論されてこなかった。このため、幅 50~500nm の細線に対し 1.6kOe までの強い磁界を加え、DMI による磁壁移動メカニズムの変化を調べた。



(a) w= 50 nm



(b) w=200 nm



(c) w=500 nm

図 7 DMI 及び細線幅による磁壁移動速度の変化 (外的ピン留め効果なし)

図 7 に、DMI と細線幅による磁壁移動速度の変化を示す。線幅 50nm の場合は (図 7(a))、従来研究と同様の結果である、DMI による Walker field の増加が見られた。しかしながら線幅 200nm の場合は (図 7(b))、大きな DMI では複数回 breakdown が発生することがわか

った。さらに線幅 500nm の場合は (図 7(c))、breakdown が発生せずに、強い磁界でも速い移動速度を保つことがわかった。磁壁移動中の磁化構造の変化の調査より、本現象は以下のメカニズムで発生することがわかった。breakdown が発生した場合、細線端から垂直ブロッホライン (VBL) が発生し、VBL は磁壁を移動して他方の線端で消滅し、またこの VBL の発生・移動・消滅により磁壁の移動速度が低下することが知られている。線幅が 200nm の場合、DMI により磁壁が湾曲し、VBL の移動が妨げられ、線端から次々と発生した VBL が湾曲部で対消滅することによって、完全な移動速度の低下が起こらない。このためさらに強い磁界では、他方の線端からも VBL が発生するが、同様のメカニズムにより磁壁移動速度の完全な低下が起こらない。これが複数回 breakdown 発生の原因であった。線幅が 50nm の場合、線幅が細いために DMI によって磁壁が湾曲することができず、この現象は起こらない。また線幅 500nm の場合は、線端だけではなく細線中央部より VBL が発生し、VBL の対消滅が複数箇所と同時に発生するために、磁壁移動速度が全く低下しないことがわかった。以上は理想的な細線を用いた結果であったが、現実の細線に存在する外的ピン留め効果を考慮したシミュレーションにおいても同様の効果が得られることを確認した (図 8)。

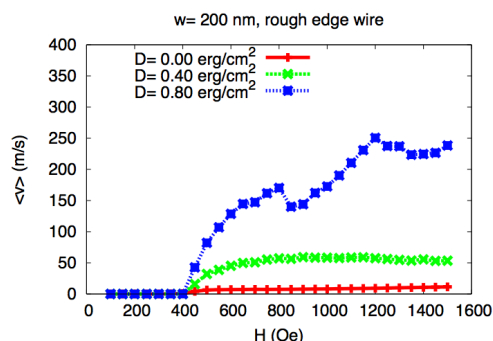


図 8 DMI 及び細線幅による磁壁移動速度の変化 (外的ピン留め効果考慮)

### (3) 電界駆動現象における DMI 効果

近年新たな技法として注目されている電界駆動方式に着目し、細線長さ方向にその強度が変化する電界 (傾斜電界) による磁壁移動現象の調査と、本現象に対する DMI の効果についての検討を行った。

図 9 に傾斜電界による磁壁中心位置の時間変化を示す。磁壁中心位置が時間とともに増加することから、傾斜電界による磁壁移動が確認できる。また傾斜率が大きい場合、磁界駆動の場合と同様に、磁壁位置が時間とともに振動する breakdown 現象が起こることもわかった。

図 10 に傾斜率による磁壁移動速度の変



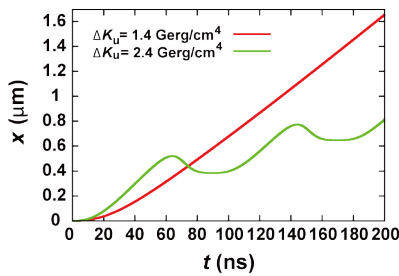


図9 傾斜電界による磁壁位置の時間変化

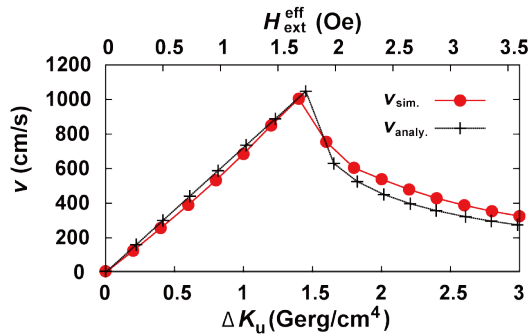


図10 電界の傾斜率による移動速度の変化

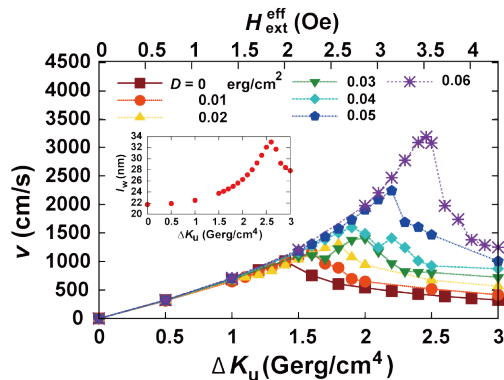


図11 DMI と電界の傾斜率による移動速度の変化

化をまとめた。またここでは電界による異方性の変化率より、磁壁に加わる実効磁界を見積もり、またその磁界から見積もった磁壁移動速度を示した。図より、今回の計算で想定した傾斜電界による実効磁界は数 0e 程度であることがわかる。また両者の速度の一致より、実効磁界及び移動速度の見積りの妥当性が確認できた。

最後に図 11 に DMI 効果を考慮した場合の結果を示す。磁界駆動の場合と同様に、DMI により Walker field が増加し、そのためにより速い移動速度が実現できることがわかった。

## 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 5 件)

K. Yamada, S. Murayama, Y. Nakatani, Magnetic domain wall motion in Co/Ni nanowires induced by a sloped electric field, Appl. Phys. Lett, 108, 2016, 202405, 査読有, DOI: 10.1063/1.4950865

K. Yamada, S. Irie, S. Murayama, Y. Nakatani, Depinning field of domain walls with a misaligned grain boundary in iron-based soft magnets, Appl. Phys. Express, 9, 2016, 053003, 査読有, DOI: 10.7567/APEX.9.05303003

Y. Yoshimura, K.-J. Kim, T. Taniguchi, T. Tono, K. Ueda, R. Hiramatsu, T. Moriyama, K. Yamada, Y. Nakatani, and T. Ono, Soliton-like magnetic domain wall motion induced by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya Interaction, Nature Physics, 12, 2016, pp.157-161, 査読有 DOI: 10.1038/NPHYS3535

K.-J. Kim, Y. Yoshimura, T. Okuno, T. Moriyama, S.-W. Lee, K.-J. Lee, Y. Nakatani, and T. Ono, Observation of asymmetry in domain wall velocity under transverse magnetic field, APL Materials, 4, 2016, 32504, 査読有 DOI: 10.1063/1.4944897

K. Yamada, and Y. Nakatani, Excitation of magnetic domain wall velocity in (Co/Ni) nanowires induced by blocking the motion of vertical Bloch lines, Appl. Phys. Express, 8, 2015, 93004, 査読有 DOI: 10.7567/APEX.8.093004

〔学会発表〕(計 11 件)

平野安彦、山田啓介、仲谷栄伸、シミュレーションによるジャロシンスキー守谷相互作用の簡易測定法の検討、日本磁気学会、2016年9月5日、金沢大学(石川県・金沢市)

K. Yamada, Y. Nakatani, Excitation of magnetic domain wall velocity in (Co/Ni) nanowires induced by blocking the motion of vertical Bloch lines, ICAUMS 2016, 2016年8月1日、台南(台湾)

K. Yamada, S. Murayama, Y. Nakatani, Magnetic domain wall motion in Co/Ni nanowires induced by a sloped electric field, ICAUMS 2016, 2016年8月1日、台南(台湾)

K. Yamada, and Y. Nakatani, Excitation of magnetic domain wall velocity in (Co/Ni) nanowires induced by blocking the motion of vertical Bloch lines, 2016

MMM-Intermag Joint Conference , 2016 年  
1 月 11 日, San-Diego(米国)

村山創、山田啓介、仲谷栄伸、傾斜電界による磁壁移動のシミュレーション解析、日本磁気学会、2015 年 9 月 8 日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

山田啓介、仲谷栄伸、DMI 相互作用した磁壁磁場駆動における磁壁移動のシミュレーション解析、日本磁気学会、2015 年 9 月 8 日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

K. Yamada, and Y. Nakatani, Simulation of the field-driven magnetic domain wall motion under the Dzyaloshinskii-Moriya interaction, ICMFS2015, 2015 年 7 月 12 日, Krakow(ポーランド)

S. Murayama, K. Yamada, and Y. Nakatani, Computer simulation of domain wall motion induced by a slope electric field, 20<sup>th</sup> International conference on magnetism, 2015 年 7 月 6 日, Barcelona(スペイン)

山田啓介、仲谷栄伸、DMI 相互作用下の磁壁磁場駆動に受ける磁壁移動のシミュレーション解析、日本物理学会、2015 年 3 月 24 日、早稲田大学(東京都・新宿区)

Y. Yoshimura, K.-J. Kim, T. Taniguchi, K. Ueda, R. Hiramatsu, T. Moriyama, H. Tanigawa, E. Kariyada, Y. Nakatani, T. Ono, Field-driven domain wall dynamics in the presence of Dzyaloshinskii-Moriya interaction: velocity enhancement by the spin wave emission, MMM conference, 2014 年 11 月 4 日、Honolulu(米国)

吉村遥子、Kab-Jin Kim、谷口卓也、上田浩平、平松亮、森山貴広、谷川博信、鈴木哲広、苅谷田英嗣、仲谷栄伸、小野輝男、ジャロシンスキー・守谷相互作用存在下の磁壁ダイナミクス、日本物理学会、2014 年 9 月 7 日、中部大学(愛知県・春日井市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hnl.cs.uec.ac.jp>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

仲谷 栄伸 (Nakatani, Yoshinobu)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：20207814

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし