

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26870304

研究課題名(和文) Study of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction on magnetic domain wall dynamics

研究課題名(英文) Study of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction on magnetic domain wall dynamics

研究代表者

金 甲鎮 (Kim, Kab-Jin)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号：40711776

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は磁壁駆動におけるDzyaloshinskii-Moriya相互作用(DMI)の影響を調べることであった。初年度は実験装置を構築した上、DMIの大きさを定量的に見積もる方法を提案した。さらに、磁壁を利用した共振器が可能になることを証明した。FY 2016にはDMIが磁壁駆動に与える影響を本格的に調べた。その結果、DMIが存在すると、磁壁ダイナミクスがソリトンのような様子を表すことを証明した。さらに、ソリトンのような磁壁駆動の場合は2次元の運動も1次元と同じような解析ができることが分かった。一方、フェリ磁性体の磁壁駆動の測定を行った結果、DMIの存在可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study was to elucidate the effect of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction (DMI) on the magnetic domain wall (DW) dynamics. In FY 2014, I developed DW measurement system to investigate the real time DW dynamics. Using this setup, I proposed several ways to quantify the DMI magnetic heterostructures. I have also shown an evidence of magnetic DW oscillator in FY 2014. In FY 2015, I tried to elucidate the underlying physics of DW dynamics in the presence of DMI. As a result, I have found that the DW motion becomes topologically protected in the presence of DMI. I also have found that the DW motion shows dimensional transition from 2 dimension to 1 dimension. Based on the soliton approach, I also found that the 2 dimensional DW motion can be simplified to 1 dimensional motion in the presence of DMI. I have also found the evidence of DMI in ferrimagnetic systems. Overall, all the goals, which were originally proposed in this project, have been successfully addressed.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：ジャロシンスキー・守谷相互作用 磁壁 磁気ソリトン 磁壁クリープ 次元変換 フェリ磁性体磁壁

1. 研究開始当初の背景

(1) ノーベル賞受賞となった巨大磁気抵抗効果の発見以降、電子のスピンと電荷の2つの自由度を利用するスピントロニクス研究分野が急速に発展してきた。巨大磁気抵抗効果がハードディスクの読み取りヘッドに利用され、トンネル磁気抵抗効果を利用した不揮発性磁気メモリが開発されるなど、スピントロニクスは基礎現象の発見と理解がイノベーションに直結する魅力的な研究分野である。

(2) スピントロニクス分野では磁壁駆動に関する研究が精力的に行われている。磁壁は磁石の中の磁区と磁区の境界であり、磁気メモリのビットを決める(図1)。磁壁を動かすことで情報の記録や伝達ができるため(図1)磁壁移動型メモリはハードディスクを越える次世代のメモリとして大きな注目を集めている。

(3) 近年、磁性/非磁性界面にジャロシンスキー・守谷相互作用が存在することが報告された。ジャロシンスキー・守谷相互作用とはねじれたスピンの向きを好む効果であって、磁壁駆動や磁化ダイナミクスに大きな影響を与えると予想されていた。

(4) しかし、いまだ実験報告例は少なく、その具体的な機構についてはよく分かっていたいままであった。特にジャロシンスキー・守谷相互作用大きさを定量的に測る方法がないため、研究の進行が困難であった。

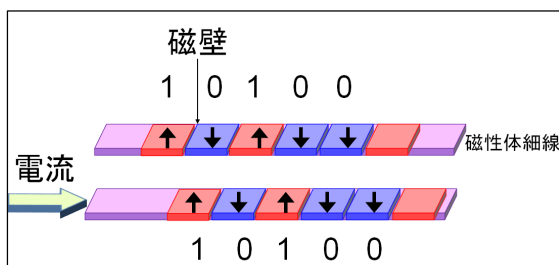


図1 磁性体中の磁壁と磁壁移動メモリの模式図

2. 研究の目的

この研究の目的は次の二つである。

(1) ジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさを定量的に測定する手法の確立。

(2) ジャロシンスキー・守谷相互作用が磁壁駆動や磁化ダイナミクスに与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) まず、高周波測定可能な電気測定装置を組み立てて、磁壁駆動を実時間で観測する。

(2) ジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさを測るため、磁壁駆動や磁壁衝突実験を行う。

(3) ジャロシンスキー・守谷相互作用を有する強磁性/非磁性界面又はフェリ磁性/非磁性界面においての磁壁駆動を実時間で観測する。

4. 研究成果

(1) ジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさを定量的に測定する手法を開発した。

磁壁衝突方法 (JJAP 53, 108001 (2014)).

→ジャロシンスキー・守谷相互作用存在している系では隣り合う磁壁の内部の磁化が半並行に向くことが分かっている。半並行に向かっている磁壁は安定され、消えにくくなる(図2)。ここで、外部磁場をかけて磁壁を衝突させると磁壁消滅磁場の大きさがジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさに比例することが分かった。この関係からジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさを定量的に測定することが可能になる。

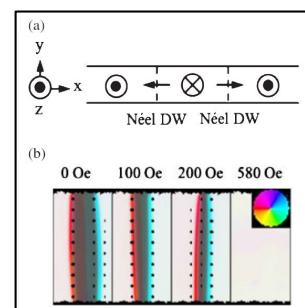


図2 (a)半並行になっている磁壁の様子。(b) 磁

壁を衝突させたシミュレーション結果。

面内磁場を利用したジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさ測定 (PRB 91, 060405(R) (2015)).

→ 我々は磁性体の膜厚を変えながら磁壁駆動の実験を行った。その結果、膜厚が厚くなるにつれて、電流駆動磁壁移動のメカニズムがスピン軌道トルクからスピントランスファトルクに変換することが分かった。さらに、ある膜厚の試料において面内磁場をかけることでジャロシンスキー・守谷相互作用の制御ができることを分かった。これらを利用してジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさを決めることに成功した(図3)。

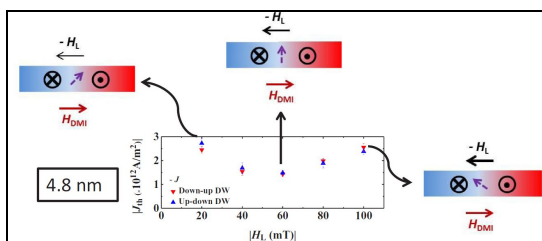


図3 (a)面内磁場による磁壁中の磁化状態および閾電流密度。閾電流密度が最低になる面内磁場の大きさがジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさに相応。

(2) ジャロシンスキー・守谷相互作用が磁壁駆動に与える影響を明らかにした。 (Nat. Phys. 12, 157 (2016)).

→ 磁壁が磁場によって動く場合、そのダイナミクスは二つに分けることができる。小さい磁場では、磁壁内部の磁化が固定されて磁壁が動き(steady motion)、ある磁場(Walker磁場)より大きくなると、磁壁内部の磁化が歳差運動を伴って磁壁が移動(precessional motion)します。このように磁壁が磁場で移動する機構はよく知られていますが、磁性層と非磁性層のジャロシンスキー・守谷相互作用における効果が磁壁の移動に与える影響はよく分かっていなかった。本研究者は、磁壁移動に対する ジャロシンスキー・守谷相

互作用を調査するため、2種類の異なるタイプの試料を用意した。磁壁駆動を実時間で観測した結果、ジャロシンスキー・守谷相互作用のある系では、Walker磁場より大きな磁場を印加した時、磁壁速度が一定になることが分かった。この結果は磁壁内部の磁化の方向が一定のまま動くソリトンのような運動をしていることを意味する(図4)。さらに、この移動機構は、細線が2次元の場合にのみ成り立ち、1次元の場合には成り立たないことも見出した。この新しい移動機構によって磁壁が従来機構の数倍の速さで移動することも明らかとなり、本研究は基礎的にも応用的にも重要な知見といえる。

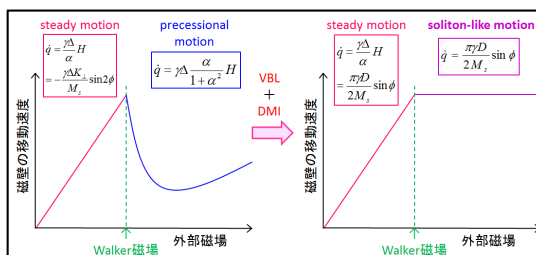


図4 ジャロシンスキー・守谷相互作用によって変化する磁壁速度の模式図。ジャロシンスキー・守谷相互作用が存在する時、Walker磁場より強い磁場をかけても磁壁速度を一定になることが分かる(ソリトンの動き)。

(3) ジャロシンスキー・守谷相互作用の影響で磁壁速度の非対称性が生じることを発見した。 (APL materials, 4, 032504 (2016)).

→ 上述したように、ジャロシンスキー・守谷相互作用の影響が強い場合、磁壁はソリトンのような動きを表す。このソリトンの動きをしている磁壁に面内磁場をかけると、面内磁場の方向によって速度が変わることが分かった(図5)。この結果は、磁壁内部の角度が面内磁場によって変わることをしめしており、2次元の磁壁運動を1次元に単純化できることを示す。

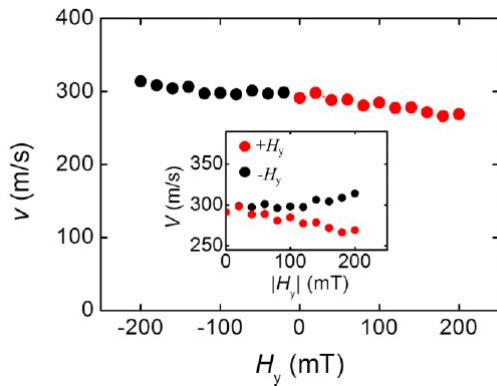


図5 磁壁速度の面内磁場依存性。磁壁速度は面内磁場の符号によって非対称的な振る舞いを示す。

(4) 磁化細線の幅を細くするにつれて、磁壁の移動機構が2次元から1次元に変化することを観測した。(APEX 8, 073004 (2015)).

→ 有限の温度の下で磁壁は熱活性によって確率的に移動することが知られており、それをクリープ現象と呼ぶ。本研究者はスピンホール効果による磁壁クリープ現象を調査した。スピンホール効果による磁壁移動が確認されているCo/Ni多層膜を様々な幅の細線に加工して、各細線における磁壁クリープ速度の分布を調査した。その結果を図6に示す。幅が細くなるとともに磁壁速度の分布の広がりが大きくなって、ある幅になると分布が一定になることが分かった。この結果は、磁壁移動機構が細線幅によって異なることを示し、2次元から1次元の変換が起こっていることを意味する。

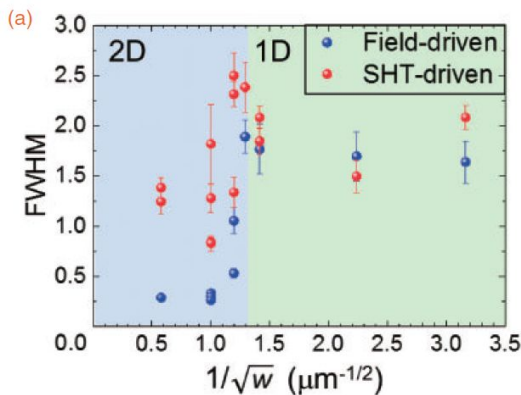
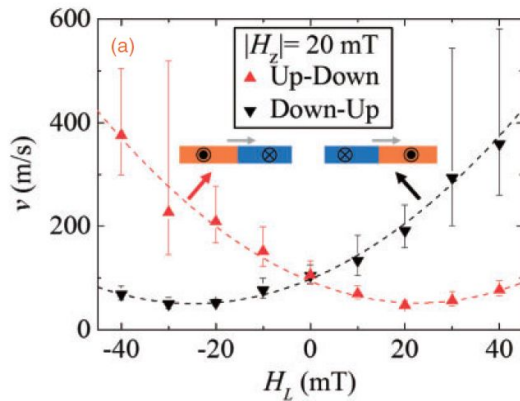


図6 磁壁クリープ速度分布の次元変換現象。幅が小さくなると分布の広がりが大きくなって、あ

る幅になると一定になることがわかる。

(5) フェリ磁性体/非磁性体の界面でもジャロシンスキー・守谷相互作用が存在することを明らかにした。(APEX, 8, 073001 (2015)).

→ 強磁性体/非磁性体界面でのジャロシンスキー・守谷相互作用は報告されていますが、フェリ磁性体/非磁性体の界面での結果はまだ報告されていなかった。我々は磁壁実時間測定方法を用いて、フェリ磁性体での磁壁移動を調査した。ジャロシンスキー・守谷相互作用があると、磁壁の中の磁化は細線の長さ方向を向く(ネール磁壁)ことが知られている。ここで、私たちは面内磁場を細線の長さ方向に印加してジャロシンスキー・守谷相互作用の存在を調査した。その結果、図7に示すように、磁壁タイプ(up-downとdown-up磁壁)によって非対称な磁壁速度が得られた。この結果は磁壁内部の磁化の向きがある方向になっていることを示しており、フェリ磁性体と非磁性体の界面にもジャロシンスキー・守



谷相互作用が存在していることを意味する。

図7 フェリ磁性体の磁壁速度の面内磁場依存性。

(6) 磁壁の歳差運動を用いることで磁壁発振器が可能になることを実証した。(APEX, 8, 023003 (2015)).

→ 近年、電流による磁壁の回転運動を利用した磁壁回転発振器が新しい高周波発振器として理論的に提案された。磁壁回転発振器を実現するためには磁壁が定まった位置に局在する必要がある。本研究では2つ目の条件を達成するために、ホールクロス構造を用いた磁壁位置制御を行った。Co/Ni 強磁性多層膜をホールクロス幅 90nm の細線に加工した(図8)。細線内に磁壁を導入し、磁壁移動を異常ホール効果を通してホール抵抗の変化として検出した。図9に磁壁導入後の磁場掃引によるホール抵抗変化を示す。-H 方向に磁場を掃引した時、-18.5 mT と -25 mT でホール抵抗の変化が見られた(図9(a)黒線)。各抵抗変化は磁壁が初期位置からホールクロスの入り口に移動したこと、および磁壁がホールクロスから抜け出したことを示している。次に電流値を-0.35 mA に変更し、-20 mT の磁場を印加して磁壁をホールクロス入り口に固定した後ゼロ磁場に戻した(図9(a)赤線)。ここから+H 方向に磁場を掃引したところ、図9(b)に示すように、ホールクロスからのデピンング磁場(25 mT)よりも十分大きな磁場を印加してもホール抵抗に変化が見られた。この特異な抵抗変化を明らかにするために、磁壁運動方程式の1次元モデルおよびマイクロマグネティックシミュレーションを用いて解析した。その結果、磁壁はホールクロス内に局在した状態で定常的な回転運動を誘起されていることを見出した。

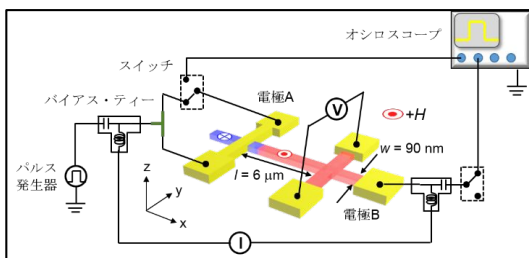


図8 測定に用いた素子構造および測定回路の模式図

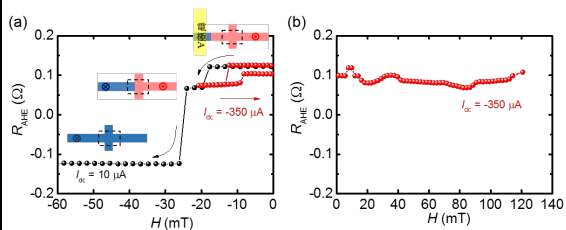


図9. 磁壁導入後の磁場掃引によるホール抵抗変化。挿入図は磁壁位置の模式図である。

(7) 磁壁メモリの動作精度を測定し、90%の正確度で動作していることが分かった。
(APEX 8, 073008 (2015)).

→ 磁壁メモリの実現に向けて、磁壁移動の位置精度に関する調査を行った。スピントランスファートルクおよびスピントルク磁壁を駆動できる2種類のCo/Ni多層膜を細線状に加工し、ナノ秒の電流パルスによる移動距離の精度を調査した。その結果10%の誤差範囲内で磁壁が移動していることが分かった。これは、スピントランスファートルクまたはスピントルクの両駆動方法において10%の精度で磁壁移動距離を制御できることを意味している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9件)

K. -J. Kim, Y. Yoshimura, T. Okuno, T. Moriyama, S.-W. Lee, K.-J. Lee, Y. Nakatani, and T. Ono, APL materials 4, 2016, 032504.

<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/aplmaterial/4/3/10.1063/1.4944897>

Yoko Yoshimura, Kab-Jin Kim, Takuya Taniguchi, Takayuki Tono, Kohei Ueda, Ryo Hiramatsu, Takahiro Moriyama, Keisuke Yamada, Yoshinobu Nakatani, and Teruo Ono, Nat. Phys. 12, 2016, 157-161.

<http://www.nature.com/nphys/journal/v12/n2/full/nphys3535.html>

Takuya Taniguchi, Kab-Jin Kim, Takayuki Tono, Takahiro Moriyama, Yoshinobu Nakatani, and Teruo Ono, Appl. Phys. Express. 8, 2015, 073008.

<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/APEX.8.073008/meta>

Takuya Taniguchi, Kab-Jin Kim, Takayuki Tono, Sanghoon Kim, Takahiro Moriyama, and Teruo Ono, Appl. Phys. Express. 8, 2015, 073004.

<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/APEX.8.073004/meta>

Takayuki Tono, Takuya Taniguchi, Kab-Jin Kim, Takahiro Moriyama, Arata Tsukamoto, and Teruo Ono, Appl. Phys. Express 8, 2015, 073001.

<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/APEX.8.073001/meta>

K. Ueda, K. -J. Kim, T. Taniguchi, T. Tono, T. Moriyama, and T. Ono, Phys. Rev. B 91, 2015, 060405(R).

<http://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.91.060405>

K. Ueda, R. Hiramatsu, K. -J. Kim, T. Taniguchi, T. Tono, T. Moriyama, and T. Ono, Jpn. J. Appl Phys. 54, 2015, 038004.

<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.54.038004/meta>

R. Hiramatsu, K. -J. Kim, T. Taniguchi, T. Tono, T. Moriyama, S. Fukami, M. Yamanouchi, H. Ohno, Y. Nakatani, and T. Ono, Appl. Phys. Express. 8, 2015, 023003.

<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/APEX.8.023003/meta>

R. Hiramatsu, K. -J. Kim, Y. Nakatani, T.

Moriyama, and T. Ono, Jpn. J. Appl Phys. 53, 2014, 108001.

<http://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.53.108001>

〔学会発表〕(計 3件)

Kab-Jin Kim, Soliton-like magnetic domain wall motion induced by the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction. The 9th International Conference on Advanced Materials and Devices, Jeju, Korea, 2015.12.07-09.

Kab-Jin Kim, Negligible transient effect for current-induced domain-wall motion in ferromagnetic Co/Ni nanowires. Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Honolulu, HI, USA, 2014.11.03-07.

Kab-Jin Kim, Wire-width dependence of threshold current density for magnetic domain wall motion driven by spin Hall torque. IEEE International Magnetism Conference, Dresden, Germany, 2014.05.04-08.

〔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.kuchem.kyoto-u.ac.jp/organization/member/kabjin_e.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金 甲鎮 (Kim, Kab-Jin)

京都大学・化学研究所・助教

研究者番号： 40711776