

整理番号	2018-J-144	報告者氏名	小山 知弘
------	------------	-------	-------

研究課題名 ジャロシンスキー・守谷相互作用の電界変調を利用した磁壁移動制御

<代表研究者> 機関名：東京大学工学系研究科 職名：助教 氏名：小山 知弘

<共同研究者> 機関名： 職名： 氏名：  
 機関名： 職名： 氏名：  
 機関名： 職名： 氏名：  
 機関名： 職名： 氏名：

<研究内容・成果等の要約>

強磁性体中の磁壁移動に基づくメモリデバイスが近年注目されており、その高性能化を目指して盛んに研究が行われている。研究代表者(以下代表者)は、絶縁体を介して材料と金属電極間に電圧を加えることにより材料の特性を外部から制御する「電界効果」という手法を用いて、強磁性体中の磁壁移動速度を制御することに成功した。本研究では、磁石であるコバルト (Co) 薄膜と白金 (Pt) の積層構造を材料として用い、絶縁体 (酸化ハフニウム)、金電極からなるコンデンサ構造を作製し実験を行った。その結果、秒速 100 メートルを超える高速な磁壁移動を、電圧を加えることにより明確に制御できることがわかった。Co/Pt 系での高速磁壁移動の電界制御は世界で初めての成果である。さらに詳細な測定を行った結果、Co と Pt の界面におけるジャロシンスキー・守谷相互作用の大きさが電界より変化していることが、磁壁速度変化の起源であることを突き止めた。本成果は、電圧による磁壁移動の高速化の可能性を、メモリとして実用可能な速度領域で実証したものであり、磁壁メモリの高速化・省エネ化を実現するための大きな一歩である。

<研究発表（口頭、ポスター、誌上別）>

-学術雑誌(査読有)-

1. A. Obinata, T. Hirai, Y. Kotani, K. Toyoki, T. Nakamura, T. Koyama, and D. Chiba, Electric field effect on magnetism in a MgO/Pd/Co system with a solid-state capacitor structure, *AIP Advances* **8**, 115122 (2018).
2. F. Ando, M. Ishibashi, T. Koyama, Y. Shiota, T. Moriyama, D. Chiba, and T. Ono, Magnetic domain writing defined by electrical gating in Pt/Co film, *Applied Physics Letters* **113**, 252402 (2018)
3. T. Koyama, Y. Nakatani, J. Ieda, and D. Chiba, Electric field control of magnetic domain wall motion via modulation of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction, *Science Advances* **4**, 0265 (2018)
4. T. Ohkochi, K.-J. Kim, S. Kim, Y. Yoshimura, H. Tanigawa, N. Ohshima, T. Koyama, M. Kotsugi, D. Chiba, T. Ono, and T. Kinoshita, Real-space and pulse-by-pulse analysis of domain wall creep induced by spin-Hall torque, *Japanese Journal of Applied Physics* **58**, 023001 (2019)
5. Kosuke Takiguchi, Le Duc Anh, Takahiro Chiba, Tomohiro Koyama, Daichi Chiba and Masaki Tanaka, Giant gate-controlled proximity magnetoresistance in semiconductor-based ferromagnetic–non-magnetic bilayers, *Nature Physics* **15**, 1134 (2019)

-口頭発表-

6. Y. Hibino, T. Koyama, D. Chiba, "Observation of unconventional spin-orbit torque in Py/Pt/Co tri-layer structure", 第66回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 東京都目黒区, 2019年3月11日.

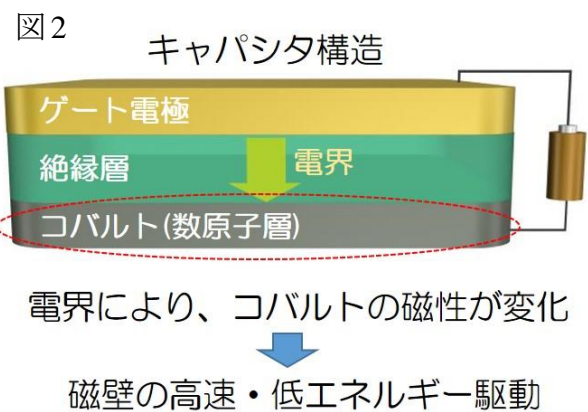
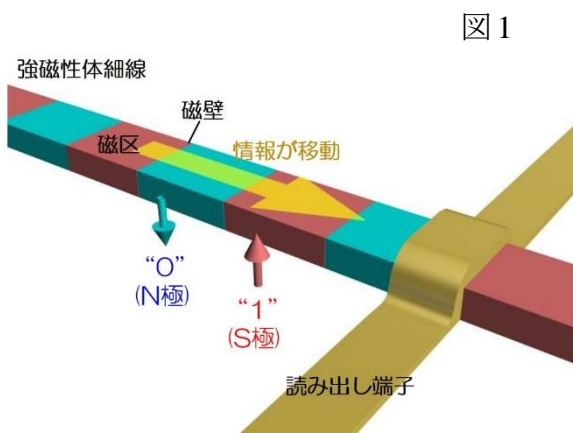
-ポスター発表-

7. T. Hirai, T. Koyama, and D. Chiba, "Electric-field control of perpendicular magnetic anisotropy and exchange bias in Co/CoOx/HfO<sub>2</sub>", Joint European Magnetic Symposia (JEMS) conference 2019, Uppsala (Sweden), 2019年8月28日

<研究の目的、経過、結果、考察（5000 字程度、中間報告は 2000 字程度）>

### 【目的】

磁石(強磁性体)の N 極、S 極(磁極)の向きをそれぞれ“0”および“1”のビットに対応させ、その境界領域である「磁壁」を移動させて情報を操作する次世代情報処理デバイスが盛んに研究されている(図 1)[1]。そうしたメモリには、磁壁が速く動くこと(高速動作)および小さい電力で動くこと(省エネルギー)が要求される。本研究の目的は、ゲート電界による磁性の電界制御を利用して、そうした情報処理デバイスの高機能化を実現することである。本研究ではありふれた金属強磁性材料であるコバルト(Co)を用いる。一見すると高機能材料とは無縁のように思われるが、重要なのはその膜厚であり、数原子層レベルまで極薄化した Co を用いる。この超薄膜 Co を図 2 のようなコンデンサ構造に加工したデバイスこそが高度機能発現の舞台である。超薄膜 Co に電界を印加することで磁性を担う電子状態が強く変調され、結果として磁気特性が制御される(磁性の電界効果)[2,3]。これにより、情報処理デバイスに要求される磁壁の高速かつ省エネルギー動作という機能が、電界効果の力によって引き出されると期待される。電界効果では充放電時を除いて流れる電流はほぼゼロであるため、高機能性のみならず省エネルギーが極めて小さいという特性を併せ持つ点も実用上特筆すべき点である。



### 【経過】

磁壁駆動の高効率化を電界によりどのように行うかについて検討した結果、薄膜強磁性体において磁壁のダイナミクスを支配するパラメータである「ジャロシンスキー・守谷相互作用(DMI)」の電界制御が鍵となるのではないかと考えた。DMI は強磁性金属薄膜と重金属(白金など)の接合界面において生じ、磁壁の内部構造を安定化させる役割を持つ。さらに近年、強い DMI を有する材料系において非常に高速な磁壁移動が報告されている。電界効果は界面磁性を制御する有力な手法であるため、電界効果により外部から DMI を電界制御することにより、磁壁駆動を制御できると考えられる。材料を変えることなく電気的な手法で磁壁駆動をコントロールできれば、電界効果の有効性が示されることになる。加えて重要な点として、この機能は電界を加えている間にしか発現しないことが挙げられる。すなわち磁壁を動かしたい時だけ電界を加えてピンニングを下げるという自在な動作が可能であり、これは外部制御ならではの特徴である。本研究では、最初のステップとして、電界効果による磁壁移動速度変調の実証を行った。

### 【試料構造と実験手法】

本研究では数原子層レベルの膜厚を有する超薄膜 Co を用いた。これを白金(Pt)上に製膜した Co/Pt 構造は界面に由来する強い DMI を示す系であり、本研究ではこれを研究対象とした。Co/Pt 膜はシリコン基板上にスパッタにより製膜した。Co 界面に電界を印加するため、高誘電絶縁膜(酸化ハフニウム:  $\text{HfO}_2$ )およびゲート電極を Co/Pt 膜上に形成し、コンデンサ構造に微細加工した(図 3)。 $\text{HfO}_2$  層の製膜温度は  $150^\circ\text{C}$  とした。

本研究では  $100\text{ m/s}$  を超える高速磁壁移動の電界制御をターゲットにしており、そのような高速移

動をとらえるために高電圧パルスと微小コイルを組み合わせたパルス磁界発生装置を用いる。電界印加下での磁壁移動は磁気光学カー効果顕微鏡(MOKE)を用いて直接観察する。パルス印加前後の磁壁位置を示す画像を図4に示す。左はパルス磁界印加前、右は印加後である。両者の差分をとることにより、画像データとパルス時間から磁壁速度を評価できる。本研究ではゲート電圧強度を変化させながら磁壁移動を観測することで、電界による磁壁速度の変化について調べた。ちなみに、ここでは正(負)のゲート電圧印加は、界面電子濃度を増加(現象)させる方向である。

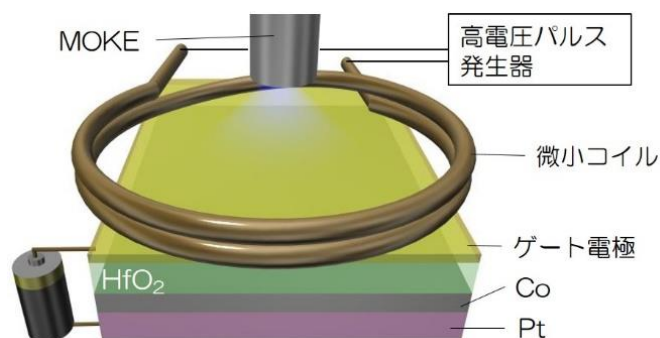


図3: 素子構造およびセットアップ

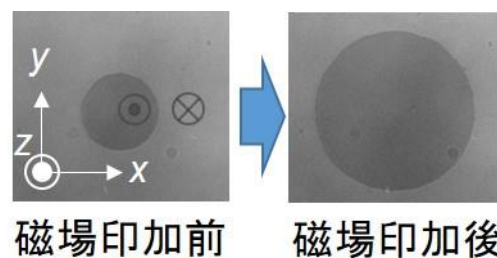


図4: パルス印加前後のMOKE画像

### 【結果】

パルス磁界と磁壁速度の関係を図5に示す。磁界強度とともに磁壁速度は増加していくが、高磁界領域では速度が飽和する様子が見られた。これは強いDMIを持つ系において見られる傾向である。本研究では100 m/sを超える磁壁速度が測定されており、本セットアップにより高速磁壁移動が測定可能であることがわかる。±15 Vのゲート電圧印加下における測定結果も同じグラフに示してある。+15 Vの電圧下では速度が小さくなっており、一方で-15 V印加下では電圧をかけていない状態に比べて速度が上昇している。すなわち、ゲート電圧により磁壁速度が明瞭に変調されている。特に重要な点として、代表的なスピントロニクス材料であるCo/Pt系において高速磁壁移動の電界制御に成功した例はこれまでになく、本研究が世界初である。速度が飽和している領域に注目すると、電界による速度変調量は約7%である。

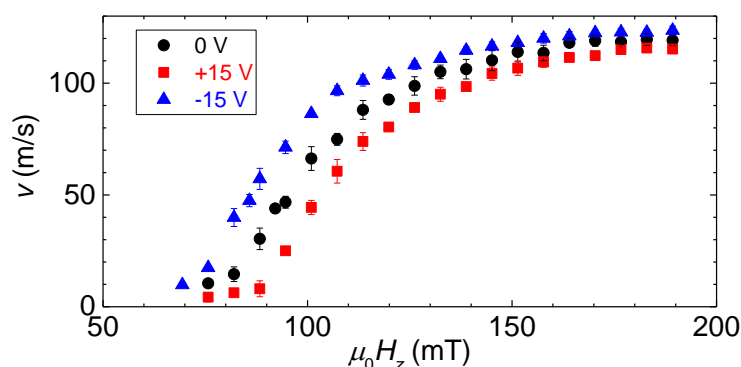


図5: ゲート電圧下における磁壁移動速度のパルス磁界依存性

さらに本研究では、速度が電界変調されるメカニズムに迫った。そのために飽和領域における磁壁速度(飽和速度)に注目した。先述したように、速度の飽和は大きなDMIによるものと考えられている。本研究で用いたCo/Pt系では、磁壁内部でDMIが実効的な磁界として作用し、旋回性(カイラリティ)が固定されたネール磁壁が安定となっている。DMIの存在下において、飽和速度はDMIエネルギーに比例することが理論的に示唆されている。つまり、電界によりDMIが変調を受けたことが速度変化の起源となっている可能性がある。しかしながら、飽和速度は材料の持つ飽和磁化にも依存する。そのため、電界印加により飽和磁化が変調を受け、それにより飽和速度が変化した可能性もある。幸い、飽和磁化はSQUID装置を使って直接計測することができる。そこでゲート電圧下で飽和磁化を測定するセットアップを立ち上げ、実際にどの程度変化しているかを定量的に調べた。そ

の結果、 $\pm 15$  Vでの飽和磁化の変化量は高々1%程度であることがわかった。この変化量では、前述の7%の飽和速度を説明できない。従って、電界によるDMIの変化が速度変化の主要な要因であると結論付けることができる。本研究におけるDMIの電界変調効率を定量的に見積もったところ、変調効率は6.6%となった。電界当たりの界面DMI変調量を計算すると、約 $5.0 \times 10^{-11}$  pJ/Vとなる。この値は、過去に鉄(Fe)/MgO系にて報告されている値に近い。

DMIへの電界効果を直接的に調べるために、ゲート電界下でのDMI実効磁界の測定を行った。その方法として最も一般的なものは、面内磁界を印加しながら速度を測定する手法である。ネール磁壁内部の磁化方向(すなわち $H_D$ の向き)と反平行に磁界を印加すると速度が減少し、面内磁界と実行磁場が互いに打ち消しあうところで速度が極小をとることが知られている。本実験では、磁壁駆動パルス磁界の大きさを100 mTとし、面内磁界を印加しながら速度を測定した。その結果を図6に示す。面内磁界を増加させていくと、それに伴い速度が減少しその後わずかに増加する様子が見られた。ここで重要な点は、速度が極小値をとる面内磁場の値がゲート電圧によって変化していることである。すなわち、+15(-15) V印加時において、-88(-95) mTの面内磁界を印加したときに極小値を示している。この結果はDMI実効磁界が電界により変調を受けていることを意味している。実効磁界の変調量は~8%である。ここで磁気異方性も実効磁界に寄与するが、詳細な実験により異方性の影響を加味しても説明できないことが明らかになった。従って、DMI磁界の直接測定からもDMIが電界変調を受けていることが確認された。

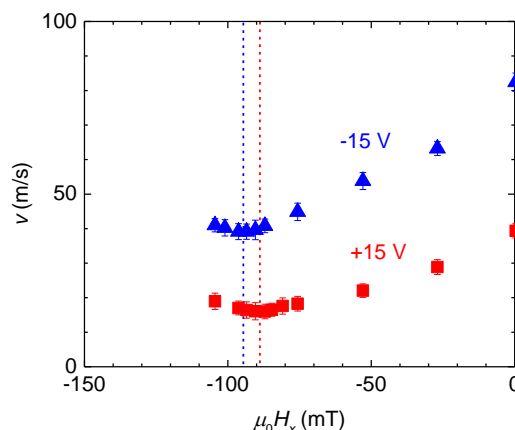


図6: 面内磁場印加下での磁壁移動速度

### [まとめ]

本研究では、Pt/Co構造において、電界効果を用いて高速磁壁移動の電界制御に成功した[4]。特に、100 m/sを超える高速領域においても電界効果が有効であることを実証した。さらに電界による速度変化の原因がDMIの電界変調によるものであることを明らかにした。この成果は、電圧による磁壁移動の高速化の可能性を、メモリとして実用可能な速度領域で実証した世界で初めての成果であり、磁壁メモリの高速化・省エネ化を実現するための大きな一歩である。

[1] S. S. P. Parkin *et al.*, *Science* **320**, 190 (2008). [2] H. Ohno *et al.*, *Nature* **408**, 944 (2000).

[3] D. Chiba *et al.*, *Nature Materials* **10**, 853 (2011). [4] T. Koyama *et al.*, *Science Advances* **4**, eaav0265 (2018).