

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分  
平成28年3月18日現在

電界効果による磁性の制御と誘起

Controlling and Inducing Magnetism with Electric Field Effects

課題番号：25220604

千葉 大地 (CHIBA DAICHI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授



研究の概要

本研究の根本にある狙いは、電氣的に材料の機能開拓を可能にする手段・電界効果-を、材料の枠を超えて活用し、省エネ・高効率な利用展開・材料間の融合的な新機能の創発を図るものである。その広い目的の中で、本研究では磁性に焦点を当て、身近な金属の磁性を電界効果で自在に操る手法を確立する。

研究分野：応用物性

キーワード：スピントロニクス、電界効果

1. 研究開始当初の背景

磁性体を一方の電極としたキャパシタンス構造などに電圧を加えることで、磁性体に電界を加え、そのキャリア濃度変化を介して磁性を制御する試みが注目を浴びている。代表者らは、将来の省電力磁気記録技術に応用可能なデバイス動作の原理実証を行ってきた。特に、身近な金属の磁石であるCoの磁力を室温付近で消したり元に戻したりできるなど、非常に興味深い現象が見つかっている。強磁性金属のキュリー温度 $T_C$ の電界制御が可能であること自体が容易には予想できなかった現象であり、そのメカニズムの解明に興味が集まっている。金属では、遮蔽効果により表面一原子層程度の領域でのみ電子濃度の変化が起こっているはずである。それが $T_C$ の変化の原因の一つであると推察される。つまり理解すべき現象の舞台は金属と絶縁膜界面のナノレベルでの現象である。現状では電子数を表面一原子当たり約0.1個程度増減でき、金属元素においても、電子数の変化量が特性変化の要因となりうるオーダーであることを想像させる。素朴な疑問ではあるが、磁石ではないCu原子から電子を1個抜くことができれば、Niの特性(磁石)を持つようなこと(元素特性の電氣的変換)が起こりえるのだろうか？つまり、天然には磁石として存在しない金属をも電氣的に磁石にできる可能性を追求すべき段階にあると考えられる。

2. 研究の目的

このような背景の中、電氣的に材料の機能開拓を可能にする手段・電界効果-を、材料の枠を超えて活用し、省エネ・高効率な利用展開・材料間の融合的な新機能の創発を図ることは極めて重要な課題である。本研究では、その広い枠組みの中でも、身近な金属の磁性を電界効果で自在に操る手法を確立し、その背景に眠るサイエンスの理解と応用展開を目指すことを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は、研究代表者が主要実験を担当し、様々なバックグラウンドを有する研究分担者や連携研究者・研究協力者との緊密なパートナーシップを構築している。各々の高度な技術を融合して研究体制を築くことによって、磁性の電界効果の原理解明、非磁性金属における電界効果の実証、電界による磁壁駆動、電界によるナノ構造形成などの実現を目指す。

4. これまでの成果

非磁性体における電界効果

非磁性金属であるPdに誘起された磁気モーメントを電界制御することに成功した[6]。また、強磁性Pd/MgOの界面の磁気異方性が電界で制御可能であることを示した[4]。非磁性体における磁性の電界制御を成功させた点や、4d遷移金属における磁性の電界効果を開拓し、材料や(バンド)構造のチューニングにより電界効果を格段に増大できる可能性

を示した点が、大きな学術的なインパクトをもつと考えている。

#### 磁性の電界効果の原理解明

また、CoやCu、Ptなどに対し、X線磁気円二色性測定を活用し、電界印加下での元素選択的なスピン/軌道モーメントの変化などを調べ、電界効果のメカニズムに迫っている。同時に電界効果による酸化還元などの化学反応についての理解も進み、電界印加による構造変化も検出限界以下であることが明らかとなった[3]。これら実験を通して、磁性の電界効果の原理の理解が一段と進んだ。

#### ゲート絶縁酸化物と強磁性金属

電界印加による磁性体中の電子濃度変化量はゲート絶縁体の誘電率に比例するが、高い誘電率を示す酸化物をこれに用いることで、電界による磁気異方性の変化率を桁違いに向上させることに成功した。また、極性酸化物上にCoを直接製膜すると、その極性面に応じて磁気異方性やキュリー温度が大きく異なることが分かった。自発分極によるピルトインされたバックゲート効果の可能性も期待でき、界面一原子層の磁性膜におけるラッシュバ効果や、内部歪みによるバンド構造変化などを研究する理想的な系としての価値も高い。

#### 電界による磁壁駆動

垂直磁気異方性を有するCoに固体ゲートにより電界を加えると、磁区サイズを大幅に制御できることがわかった。また、磁壁が入りやすい状況を作り、磁界や電流を使わずに、電界のみにより磁壁を動かすデモンストラーションに成功した。

#### 磁壁駆動当初の目標の枠を超える結果

電界によるCoの強磁性相転移を利用し、磁気光学効果をスイッチすることに成功した。また、フレキシブル基板上に製膜した高品質の磁性超薄膜では、2-3%程度の大きな引っ張り応力を加えても特性がリバーシブルに復元し、垂直面内の磁化容易軸制御に成功した。磁気異方性エネルギーの変化量にすると、 $10^5 \text{ J/m}^3$ を超え、逆磁歪効果を利用した方法としては史上最大級の値である[1]。歪みによるバンド構造のチューニングと電界効果の合わせ技により、電界効果を多角的に理解する新たなツールとしての価値も非常に高い。

#### 5. 今後の計画

研究は当初の計画にそって順調に進行しているばかりではなく、当初の目標の枠を超える成果も上がりつつある。それらは当初目標を最終的に達成するために必要な新たなツールともなりうるものであるが、より発展的な成果をあげることを目指して研究を加速していく予定である。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] S. Ota, Y. Hibino, D. Bang, H. Awano, T. Kozeki, H. Akamine, T. Fujii, T. Namazu, T. Takenobu, T. Koyama, and D. Chiba, "Strain-induced reversible modulation of the magnetic anisotropy in perpendicularly magnetized metals deposited on a flexible substrate", *Appl. Phys. Exp.* **9**, 043004(1)-(4) (2016).
  - [2] T. Koyama and D. Chiba, "Determination of effective field induced by spin-orbit torque using magnetic domain wall creep in Pt/Co structure", *Phys. Rev. B* **92**, 220402(R)(1)-(4) (2015).
  - [3] Y. Wakabayashi, H. Fujii, T. Kimura, O. Sakata, H. Tajiri, T. Koyama, and D. Chiba, "Confirmation of no Structural and Chemical Changes in Curie Temperature Variable Co Ultrathin Films by Electric Field", *Zeit. Phys. Chem.* **229** (1)-(7) (2015).
  - [4] Y. Hibino, T. Koyama, A. Obinata, K. Miwa, S. Ono, and D. Chiba, "Electric-Field Modulation of Magnetic Anisotropy in Perpendicularly Magnetized Pt/Co Structure with a Pd Top Layer", *Appl. Phys. Exp.* **8**, 113002(1)-(3) (2015).
  - [5] D. Chiba, "Electric Field Effect on Magnetism in Metallic Ultra-thin Films", *Front. Phys.* **3**, 83(1)-(6) (2015).
  - [6] A. Obinata, Y. Hibino, D. Hayakawa, T. Koyama, K. Miwa, S. Ono, and D. Chiba, "Electric-field control of magnetic moment in Pd", *Scientific Rep.* **5**, 14303(1)-(9) (2015).
  - [7] T. Koyama, A. Obinata, Y. Hibino, A. Hirohata, B. Kuerbanjiang, V. K. Lazarov, and D. Chiba, "Dependence of Curie temperature on Pt layer thickness in Co/Pt system", *Appl. Phys. Lett.* **106**, 132409(1)-(4) (2015).
  - [8] S. Ono, R. Häusermann, D. Chiba, K. Shimamura, T. Ono, and B. Batlogg, "High performance organic field-effect transistors with ultra-thin HfO<sub>2</sub> gate insulator deposited directly onto the organic semiconductor", *Appl. Phys. Lett.* **104**, 013307(1)-(4) (2014).
  - [9] T. Koyama, A. Obinata, Y. Hibino, and D. Chiba, "Sign Reversal of Electric Field Effect on Coercivity in MgO/Co/Pt System", *Appl. Phys. Exp.* **6**, 123001(1)-(3) (2013).
  - [10] 平成25年度矢崎学術賞 (奨励賞)
  - [11] 平成26年度第18回丸文学術賞
- ホームページ等  
<http://chiba-lab.t.u-tokyo.ac.jp/>