

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630303

研究課題名(和文) 格子・電荷変調に伴う磁気相転移の電界制御と機構解明

研究課題名(英文) Electric field control of magnetic phases via lattice and charge modulation and its underlying mechanisms

研究代表者

谷山 智康 (Tomoyasu, Taniyama)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・准教授

研究者番号：10302960

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)：FeRh/強誘電体BaTiO₃ヘテロ構造において、BaTiO₃の構造相転移および電界誘起ドメイン配向スイッチングに起因する界面歪みがFeRhの磁気秩序に与える影響を調査した。その結果、BaTiO₃が正方晶相から斜方晶相、菱面体晶相へと構造相転移する温度において磁化の急激な減少が観測され、構造相転移に伴う界面圧縮歪みによりFeRhの反強磁性状態が安定化することを明らかにした。また、室温で電界を印加することで、BaTiO₃のa-cドメイン配向スイッチングに起因してFeRhの反強磁性状態が安定化することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have studied strain effects on the magnetic phases of FeRh in FeRh/ferroelectric BaTiO₃ heterostructures due to the structural phase transitions and domain switching of BaTiO₃. A sharp drop in the magnetization was observed at the tetragonal to orthorhombic and the orthorhombic to rhombohedral phase transitions, clearly indicating that the antiferromagnetic phase is stabilized by the compressive strain due to the structural phase transitions of BaTiO₃. Also, we have demonstrated that electric field induced a-c domain switching makes the antiferromagnetic phase stable at room temperature.

研究分野：ナノ磁性、スピントロニクス

キーワード：磁性 マルチフェロイクス スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

磁気応用においては強磁性体を持つ磁化の配向を制御することでデバイス機能を創出してきており、最近では例えば、CoFeB/MgO 接合界面等で発現する電界による磁化配向変調効果等が注目を集めている(引用文献①)。また、Fe/強誘電体 BaTiO₃ ヘテロ界面において生じる電気-磁気結合効果に関する研究を通して、界面歪みに伴い強磁性体の磁気異方性が明瞭に変化することが実証されている(引用文献②)。

一方、磁性体は強磁性ばかりでなく、反強磁性やフェリ磁性等多彩な磁気秩序を呈することが知られている。これらの磁気秩序状態の制御機能をデバイスに組み込むことが可能となれば、磁化配向方向を「0」「1」に対応させる既存のデバイス構成原理とは一線を画し、常識を覆すような革新的テクノロジー体系を構築することが可能となる。このような観点から、我々は、反強磁性秩序と強磁性秩序が拮抗した FeRh 合金においてスピン偏極電流を注入することで反強磁性-強磁性メタ磁性転移を誘起させる研究を推進し、メタ磁性転移が外部摂動に極めて敏感にตอบสนองすることを見出した(引用文献③)。

2. 研究の目的

本研究では、反強磁性秩序と強磁性秩序が拮抗した FeRh 合金に焦点を当て、その磁気秩序および磁気相転移(反強磁性-強磁性メタ磁性転移)を格子・電荷変調により制御するための物理機構の解明を目的とする。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために本研究では、巨大格子変形効果を利用することでメタ磁性転移を誘導することを狙い、まず初めに、(1) BaTiO₃ の構造相転移に伴う格子変形が FeRh/強誘電体 BaTiO₃ ヘテロ構造の磁気秩序に与える影響を調査した。BaTiO₃ は 278K、190K 付近においてそれぞれ、tetragonal 構造から orthorhombic 構造、orthorhombic 構造から rhombohedral 構造への構造相転移を示すため、これら構造相転移温度において BaTiO₃ の格子変形が界面を通して FeRh 薄膜に伝達され、FeRh に磁気的な変調効果が生じると期待される。この変調効果を SQUID 磁力計による磁気測定により調べた。次に、(2) BaTiO₃ の電界誘起ドメインスイッチングによる格子変形が磁気秩序に与える影響を調査した。BaTiO₃ は室温において tetragonal 構造を持ち、FeRh/強誘電体 BaTiO₃ ヘテロ界面には、長方形の格子を持つ BaTiO₃ の a-ドメイン、または正方形の格子を持つ c-ドメインが現れる。この a-ドメインと c-ドメインの境界は電界を印加することでそう掃引することができ、結果として a-c ドメインスイッチングにより約 1%の圧縮歪みが FeRh に伝達される。そこで、この圧縮歪みが FeRh の磁気特性に与える影響について磁気光学 Kerr 効果を用いて調査

した。いずれの実験においても、FeRh/BaTiO₃ ヘテロ構造は研究代表者が実績を有する MBE 法によりエピタキシャル成長により作製した。成長プロセスの詳細については、発表論文の③④を参照されたい。

4. 研究成果

図 1 に FeRh/BaTiO₃(100)ヘテロ構造の磁化の温度依存性を示す。370K 付近に FeRh 規則合金が示す明瞭な強磁性-反強磁性転移の様子が見られる。一方で、磁気転移は MgO 基板上に成長した薄膜と比較して散漫であり、室温付近においても強磁性的な磁化信号が見られる。この残留強磁性信号は表面や界面における格子歪みや格子緩和に起因すると推測され、最近の X 線磁気円二色性(XMCD)の実験結果、第一原理計算の結果とも定性的に一致する(引用文献④)。磁化の温度依存性における他の特徴として、290K および 180K 付近の磁化の飛びを挙げるができる。これらの温度は BaTiO₃ の tetragonal 構造から orthorhombic 構造、orthorhombic 構造から rhombohedral 構造への構造相転移温度と一致しており、構造相転移により磁化(もしくは磁気異方性)が変化したことを示している。構造相転移点では、それぞれ 0.1%、0.7%の圧縮歪みが生じ FeRh に伝達されることになるため、磁化の減少は圧縮歪みに起因すると考えられる。さらに、190K 以下では昇温、降温過程で磁化の温度依存性が全く変化しないことから、少なくとも 190K での磁化の減少は、圧縮歪みによる強磁性秩序状態から反強磁性秩序状態への磁気転移と関連づけられる。

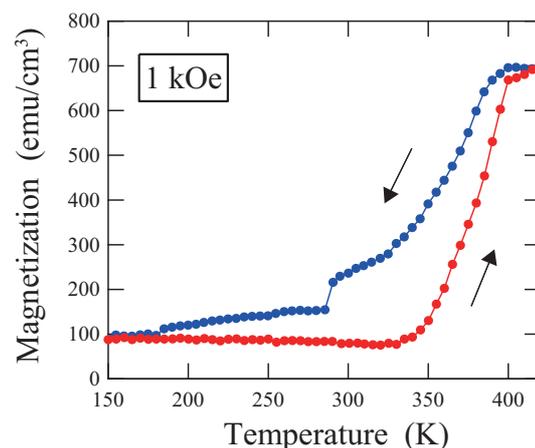


図 1 FeRh/BaTiO₃ ヘテロ構造の磁化の温度依存性

図 2 に FeRh/BaTiO₃ (100)ヘテロ構造に対して種々の電界下において室温で測定した磁化の磁場依存性を示す。0.3kV/cm 程度の電界を印加することで保磁力が急激に減少することが分かる。この保磁力の減少は、電界の印加に伴って界面における BaTiO₃ のドメイン構造が a-ドメインから c-ドメインに変化した

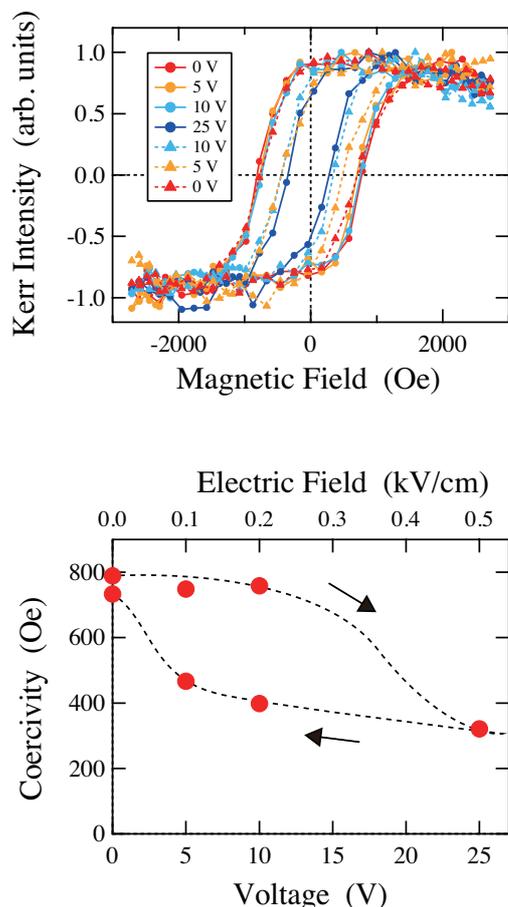


図2 電圧印加下における FeRh/BaTiO₃ の磁化曲線 (上図) と保磁力の電界依存性 (下図)

ことで圧縮歪みが FeRh に伝達され、結果として反強磁性秩序が安定化したことを示唆しており、BaTiO₃ の構造相転移に伴う圧縮歪みが反強磁性秩序を安定化した上記の結果とも整合するものである。さらに、強磁性-反強磁性転移における格子変形の観点からより定量的に本解釈の妥当性を検討する。一般に、FeRh 合金における温度の低下に伴う強磁性-反強磁性転移は磁気と格子の強い相関により生じ、結果として磁気転移に伴い約 0.7% の等方的な格子収縮が生じることが知られている。そのため、外部から 0.7% 以上圧縮歪みを誘起することができれば磁気転移を誘起できると考えられる。本研究における電界により誘起される a-ドメインから c-ドメインへのドメインスイッチングの過程では、1% の圧縮歪みが印加されたと考えられるので、電界により強磁性-反強磁性転移が誘起されたことは十分妥当な結果と考えられる。

以上の結果から、本研究では、構造相転移もしくは電界印加により圧縮歪みを FeRh に加えることで強磁性秩序状態から反強磁性秩序状態への磁気相転移を誘起させることが可能であることを実証した。FeRh の強磁性-反強磁性転移が構造と密に関連していることから、磁気転移の微視的な起源として軌道磁気モーメントの変調効果が推察されるが、その詳細については今後の XMCD 等を用い

た研究の進展に委ねたい。

<引用文献>

- ① W. -G. Wang, et al., "Electric-field-assisted switching in magnetic tunnel junctions", Nat. Mater., 11 巻, 2012, 64-68.
- ② Y. Shirahata, et al., "Switching of the symmetry of magnetic anisotropy in Fe/BaTiO₃ heterostructures", Appl. Phys. Lett., 99 巻, 2011, 022501.
- ③ T. Naito, et al., "Effect of spin polarized current on magnetic phase transition of ordered FeRh wires", J. Appl. Phys., 109 巻, 2011, 07C911.
- ④ F. Pressacco, et al., "Stable room-temperature ferromagnetic phases at the FeRh(100) surface", Sc. Rep., 6 巻, 2015, 22383.

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 4 件)

- ① T. Taniyama, "Electric-field control of magnetism via strain transfer across ferromagnetic/ferroelectric interfaces", J. Phys.: Cond. Matter, 査読有, 27 巻, 2015, 504001-1-20; doi:10.1088/0953-8984/27/50/504001
- ② S. Savitha Pillai, H. Kojima, M. Itoh, and T. Taniyama, "Lateral electric control of giant magnetoresistance in Co/Cu/Fe/BaTiO₃ multiferroic heterostructure", Appl. Phys. Lett., 査読有, 107 巻, 2015, 072903-1-5; doi: 10.1063/1.4929339
- ③ I. Suzuki, T. Naito, M. Itoh, and T. Taniyama, "Barkhausen-like antiferromagnetic to ferromagnetic phase transition driven by spin polarized current", Appl. Phys. Lett., 査読有, 107 巻, 2015, 082408-1-5; doi: 10.1063/1.4929695
- ④ I. Suzuki, Y. Hamasaki, M. Itoh, and T. Taniyama, "Controllable exchange bias in Fe/metamagnetic FeRh bilayers", Appl. Phys. Lett., 査読有, 105 巻, 2014, 172401-1-5; doi: 10.1063/1.4900619

[学会発表] (計 18 件)

- ① 谷山 智康, "磁性の電界制御—マルチフェロイクヘテロ構造を中心として—", 平成 28 年度電気学会 基礎・材料・共通部門大会 (北九州市・九州工業大), 2016 年 9 月 5 日 (招待講演)

② T. Taniyama, "Tunable Magnetic Phases in Fe-Rh-based Thin Films", EMN Summer Meeting (Cancun, Mexico), 2016年6月7日(招待講演)

③ T. Taniyama, "Electric Field Induced Magnetization Switching in Multiferroic Heterostructures", EMN Meeting on Magnetic Materials (Hawaii, USA), 2016年3月22日(招待講演)

④ 谷山 智康, "界面マルチフェロイクにおける磁性の電界制御", 新世代研究所 界面ナノ科学研究会(東京・新世代研究所), 2016年3月15日(招待講演)

⑤ R. Iijima, I. Suzuki, M. Itoh, and T. Taniyama, "Electric-Field-Induced Strain Transfer Effect on Magnetic Phase in FeRh/BaTiO₃ Heterostructures", MMM/Internmag 2016 Joint Conference (San Diego, USA), 2016年1月13日 (Best Poster Award)

⑥ T. Taniyama, "Electric-Field-Induced Strain Transfer Effect in Multiferroic Heterostructures", Energy Materials and Nanotechnology Hong Kong Meeting (EMN Hong Kong Meeting) (Hong Kong), 2015年12月9日(招待講演)

⑦ 谷山 智康, "マルチフェロイクスヘテロ構造が拓く磁性の電界制御", 電気学会 ナノスケール磁性体の新物性と新機能性の応用調査専門委員会(東京), 2015年10月23日(招待講演)

⑧ 谷山 智康, "マルチフェロイクスヘテロ構造における磁性制御研究の最近の動向", 第172回スピニクス研究会(仙台市・東北大), 2015年10月2日(招待講演)

⑨ 谷山 智康, "ヘテロ構造系マルチフェロイクス-磁性の電界制御の現状と課題", 第76回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋市・名古屋国際会議場), 2015年9月13日(招待講演)

⑩ 飯島 諒介, 鈴木 一平, 伊藤 満, 谷山 智康, "FeRh/BaTiO₃ ヘテロ構造において電界が磁気秩序に与える影響", 第39回日本磁気学会学術講演会(名古屋市・名古屋大学), 2015年9月10日

⑪ I. Suzuki, R. Iijima, T. Usami, J. Okada, M. Itoh, and T. Taniyama, Artificial Control of Magnetic Phase Transition of B2 Ordered FeRh-based Thin Films, New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP2015) (Kashiwa, Japan) 2015年6月10日

⑫ 谷山 智康, "マルチフェロイクスヘテロ構造における界面磁性の電界制御", 第15回四セラミックス研究機関合同講演会(名古屋市・名古屋工業大学), 2014年10月23日(招待講演)

⑬ 鈴木 一平, 伊藤 満, 谷山 智康, "FeRh 系合金/BaTiO₃ ヘテロ構造における磁気相転移に与える格子歪の影響", 第38回日本磁気学会学術講演会(横浜市・慶応義塾大学), 2014年9月4日

[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.msl.titech.ac.jp/~itohlab>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷山 智康 (TANIYAMA, Tomoyasu)
東京工業大学・応用セラミックス研究所・
准教授
研究者番号: 10302960