

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289229

研究課題名（和文）スピン流によるスピン波変調と磁気秩序制御の原理実証

研究課題名（英文）Spin current induced spin wave modulation and control of magnetic order

研究代表者

谷山 智康（TANIYAMA, Tomoyasu）

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：10302960

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：B2規則構造を有する高品質エピタキシャルFeRh規則合金薄膜におけるスピン流の磁気秩序への影響、スピン波伝播特性について調査した。その結果、Co/FeRh細線接合界面を通してFeRh細線にスピン偏極電子を注入することで反強磁性-強磁性磁気相転移を誘起できることが実証された。また、強磁性FeRh薄膜においてスピン波が27 $\mu\text{m}$ 以上の長距離に亘り伝播することが明らかとなり、スピン歳差運動の減衰定数が低減材料であるパーマロイよりも小さいことが見出された。

研究成果の概要（英文）：Effects of spin current on the magnetic order in high-quality B2 ordered FeRh alloy thin films and the spin wave transmission have been investigated. Injection of a spin-polarized current into FeRh across the Co/FeRh interface is shown to induce the antiferromagnetic-ferromagnetic phase transition of FeRh. Also, the long range transmission of spin waves over a distance of 27 $\mu\text{m}$  is demonstrated in ferromagnetic FeRh thin films and the damping constant of spin precession is found to be smaller than that of Permalloy.

研究分野：ナノ磁性

キーワード：スピン流 磁気秩序 スピン波 FeRh

1. 研究開始当初の背景

スピン流を制御することで従来にない様々な新規現象が見出されてきている。例えば、スピン流を電圧に変換するスピンホール効果や熱流をスピン流に変換するスピンゼーベック効果等はその典型と言える。一方で、強磁性体中でスピン波が形成された状態にスピン流を注入することで、スピン波がスピン角運動量を受け取り、スピン波の周波数が変調を受ける、いわゆるドップラーシフト現象が見出されている。また、研究代表者らは、スピン偏極した電子が近藤状態と呼ばれるスピン束縛状態を大きく変化させることが可能であることを報告している。このような既往研究は、スピン流、スピン波、磁気秩序等の間の相関を明確化することが可能となれば、磁性体の磁気秩序の形成過程の解明や、磁気秩序をスピン流により制御するための学術的に重要な指針が提供されることを示している。

2. 研究の目的

上記の観点から本研究では、B2規則化したFeRh規則合金に着目する。FeRh規則合金は反強磁性秩序と強磁性秩序とが拮抗した特異な磁気秩序状態を示し、磁場を印加することで室温においてメタ磁性転移を引き起こすことが知られている。この磁気秩序状態では伝導電子と原子スピンの間のスピン相関が本質的に重要であるため、スピン偏極した電流やスピン流を外部から注入することで、同一のFeRh規則合金においてスピン流、磁気秩序、磁気秩序の低エネルギー素励起としてのスピン波の間の相関を明確化することが可能となると期待される。本研究では、FeRh規則合金薄膜におけるスピン流、磁気秩序、スピン波、およびそれらの相関に関する知見の集約することで、磁気秩序を制御するための新手法の提案と実証を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、FeRh規則合金へのスピン注入とスピン波特性について主として調査した。具体的な研究項目を以下に記す。

- (1) 高品質エピタキシャル FeRh 薄膜の成長と磁気特性評価
- (2) FeRh 細線へのスピン偏極電子の注入効果の実証
- (3) 強磁性 FeRh 薄膜におけるスピン波励起とその伝播特性の評価

4. 研究成果

- (1) 高品質エピタキシャル FeRh 薄膜の成長と磁気特性評価

Fe, Rh組成が50atm.%でB2規則構造を持つFeRhエピタキシャル薄膜をMBE法によりMgO(001)基板上に作製した。作製した薄膜のX線回折および反射高速電子線回折より表面が平坦で良質なエピタキシャル薄膜が得られることが示された。また、B2規則化した

FeRh合金は基底状態が反強磁性であり、温度の上昇に伴って、370K付近で強磁性状態に磁気相転移することが知られている。また、B2規則構造を反映して、(001)面上ではFeスピンの反強磁性スピン配列をとり、(111)面上では強磁性スピン配列をとる。この磁気構造が作製したエピタキシャル薄膜において形成されていることを確認するために、Fe/FeRhヘテロ構造をMgO(001)基板およびAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)基板上に成長し、その磁気特性を調査した。具体的には、MgO(001)基板上では、FeRh(001)/Fe(001)界面が形成され、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)基板上ではFeRh(111)/Fe(111)界面が形成されることが期待されるため、両者の試料に対して交換バイアス効果を精査することで、FeRh薄膜試料のスピン配列を明確化することができる。その結果、いずれの基板上においても保磁力が反強磁性-強磁性相転移温度においてピークを示すのに対して、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)基板上ではFeRh(111)/Fe(111)においてのみ、反強磁性状態で交換バイアス効果が観測された(図1)。以上の結果は、本研究においてエピタキシャル成長したFeRh薄膜が構造的にも磁気的にもバルク状態を同様の特性を有することを実証している。

(2) FeRh 細線へのスピン偏極電子の注入効果の実証

(1)により作製した良質なエピタキシャルFeRh薄膜に対して、スピン偏極電子を注入し、スピン偏極電子が磁気秩序に与える影響を

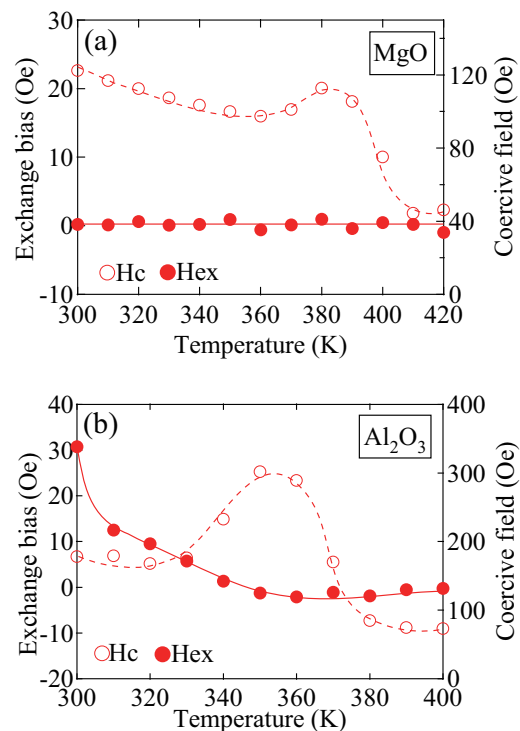


図1 (a) MgO(001)基板、(b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001)基板上に作製したFe/FeRhヘテロ構造における保磁力と交換バイアス磁場の温度依存性 (発表論文<sup>9</sup>)

調査した。具体的には強磁性 Co/FeRh 細線接合と非磁性 Cu/FeRh 接合を共に有する FeRh 細線に対してこれら二つの接合端から電流を注入し接合端付近の電気抵抗を測定して FeRh の磁気秩序状態を精査した。FeRh は反強磁性状態では高電気抵抗を示し、強磁性状態ではその値が約 40%程度減少することが知られている。そのため、電気抵抗をプローブとして磁気状態を調べることが可能となる。また、強磁性 Co と非磁性 Cu から電流を注入し、それぞれの場合に対して FeRh の電気抵抗を比較することでスピン偏極した電子の注入効果を観測することができる。測定の結果、反強磁性状態においては、Co から注入した場合と Cu から注入した場合とで I-V 特性に大きな変化が生じることが見出された。Cu から注入した場合には、電流密度 $\sim 20 \times 10^6 / \text{cm}^2$ 以上でジュール熱に起因する反強磁性-強磁性転移が確認された。一方、Co から注入した場合には、電流密度  $10 \times 10^6 / \text{cm}^2$ 程度の領域から徐々に電気抵抗の減少が確認された。この結果は、ジュール熱により磁気相転移が誘起されるその前段階でスピン偏極電子による磁気相転移が誘起されたことを示している。また、Co から注入した場合の電流電圧 (I-V) 曲線は不連続に変化することが示された (図 2)。この I-V 曲線の不連続変化は、反強磁性状態においてのみ観測され、強磁性状態では観測されない。以上の結果から、Co からスピン偏極電子を注入した際には、接合界面から徐々にスピン角運動量が FeRh に移行し、結果として強磁性状態が安定化することが明らかとなった。また、その遷移過程は不連続的であり、Barkhausen 的な反強磁

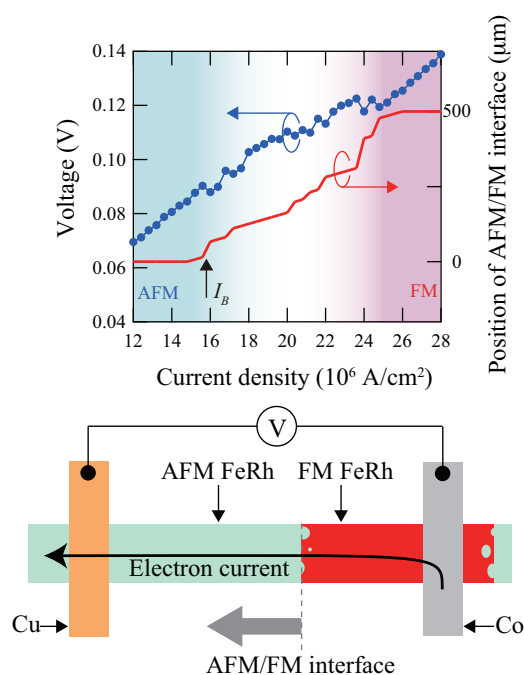


図 2 Co 端から FeRh にスピン偏極電子を注入した際の不連続電流電圧特性と反強磁性/強磁性界面の Barkhausen 的なダイナミクスの模式図 (発表論文©)

性/強磁性界面が電流密度の上昇とともに移動して、最終的に全体が強磁性状態に移行することまでが示された。一方、磁場中で電流によるジュール熱の効果を利用することで、反強磁性スピン配列の方向を制御することが可能であることも異方性磁気抵抗効果の測定から明らかとなっている。さらに、本研究において見出されたスピン偏極電流による磁気秩序変化が、電流を伴わない純スピンの注入に対しても発現することを確認するために、希薄磁性合金への純スピン流注入実験を行い、高効率な純スピンの注入技術までを確立している。

### (3) 強磁性 FeRh 薄膜におけるスピン波励起とその伝播特性の評価

Fe, Rh 組成がそれぞれ 60 atm.%, 40 atm.%の強磁性 FeRh 合金薄膜を MgO(001)基板上にエピタキシャル成長し、coplanar waveguide とベクトルネットワークアナライザを用いた電磁的スピン波検出法により、強磁性 FeRh 合金薄膜におけるスピン波特性を評価した。より具体的には、スピン波励起用の coplanar waveguide と検出用の coplanar waveguide との間隔を種々に変化させ、磁場を薄膜面内でスピン波伝播方向と垂直に印加して伝送パラメータ  $S_{21}$  を計測することで、スピン波の伝播特性を評価した。その結果、スピン波周波数と磁場との関係は全ての場合において、静磁表面波モードによる理論式で定性的に表すことができた。一方、スピン波の減衰長が  $27 \mu\text{m}$  と算出され、スピン波が極めて長距離に亘って伝播することが見出された。この結果に基づいて、さらにスピン歳差運動のギルバートダンピング定数を算出したところ、 $\alpha=0.003$  とパーマロイと比較しても小さなスピンドamping特性が見出された。この結果は、FeRh がスピン波を低消費電力情報伝送媒体として利用するマグノニクス技術においても有用であることを示している。

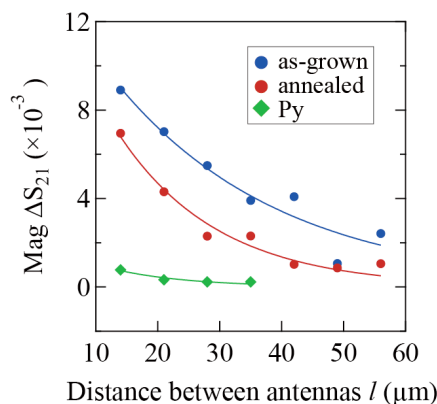


図 3 FeRh 合金薄膜、パーマロイ (Py) 薄膜における  $S_{21}$  パラメータの waveguide 間の距離  $l$  依存性

## 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 9 件)

① T. Usami, I. Suzuki, M. Itoh, and T. Taniyama, Transmission of spin waves in ordered FeRh epitaxial thin films, *Applied Physics Letters*, 査読有、 Vol. 108、2016、232404、DOI: 10.1063/1.4953464

② K. Hamaya, T. Kurokawa, S. Oki, S. Yamada, and T. Kanashima, and T. Taniyama, Direct evidence for suppression of the Kondo effect due to pure spin current, *Physical Review B*, 査読有、 Vol. 94、2016、140401(R)、DOI: 10.1103/PhysRevB.94.140401

③ S. Yamada, K. Tanikawa, J. Hirayama, T. Kanashima, T. Taniyama, and K. Hamaya, Exchange coupling in metallic multilayers with a top FeRh layer, *AIP Advances*, 査読有、 Vol. 6、2016、056115、DOI: 10.1063/1.4943606

④ I. Suzuki, T. Naito, M. Itoh, and T. Taniyama, Barkhausen-like antiferromagnetic to ferromagnetic phase transition driven by spin polarized current, *Applied Physics Letters*, 査読有、 Vol. 107、2015、504001、DOI: 10.1063/1.4929695

⑤ T. Taniyama, Electric-field control of magnetism via strain transfer across ferromagnetic/ferroelectric interfaces, *J. Phys.: Condens. Matter*, 査読有、 Vol. 27、2015、082408、DOI: 10.1088/0953-8984/27/50/504001

⑥ S. Yamada, K. Tanikawa, J. Hirayama, T. Kanashima, T. Taniyama, and K. Hamaya, Low-temperature B2 ordering and magnetic properties of Fe<sub>100-x</sub>Rh<sub>x</sub> films on bcc alloys, *Physical Review B*, 査読有、 Vol. 92、2015、094416、DOI: 10.1103/PhysRevB.92.094416

⑦ T. Moriyama, N. Matsuzaki, K.-J. Kim, I. Suzuki, T. Taniyama, and T. Ono, Sequential write-read operations in FeRh antiferromagnetic memory, *Applied Physics Letters*, 査読有、 Vol. 107、2015、122403、DOI: 10.1063/1.4931567

⑧ N. Matsuzaki, T. Moriyama, M. Nagata, K.-J. Kim, I. Suzuki, T. Taniyama, and T. Ono, Current induced antiferro-ferromagnetic transition in FeRh nanowires, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有、 Vol. 54、2015、073002、<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.073002>

⑨ I. Suzuki, Y. Hamasaki, M. Itoh, and T. Taniyama, Controllable exchange bias in

Fe/metamagnetic FeRh bilayers, *Applied Physics Letters*, 査読有、 Vol. 105、2014、172401、DOI: 10.1063/1.4900619

[学会発表] (計 25 件)

① T. Usami, T. Taniyama 他、Long Range Spin Wave Propagation in Ordered Ferromagnetic FeRh, SpinTECH IX (International school and conference 2017)、2017 年 6 月 7 日、Fukuoka International Congress Center (福岡県・福岡市)

② T. Taniyama, Multiferroic Heterostructures for Low-Energy Magnetism and Spintronics Applications, International Conference on Magnetic Materials and Applications (ICMAGMA-2017)、2017 年 2 月 2 日、Hyderabad (India) (Plenary Talk)

③ T. Taniyama, Manipulation of Antiferromagnetic-Ferromagnetic Phase Transition of Ordered FeRh and Beyond, The 3rd Conference on Magnetism and Its Applications (MIA2017)、2017 年 1 月 2 日、Bangkok (Thailand) (Invited Talk)

④ T. Usami, T. Taniyama 他、Long-range Propagation of Magnetostatic Surface Spin Waves in Ordered FeRh Epitaxial Thin Films, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2016)、2016 年 11 月 4 日、New Orleans (USA)

⑤ T. Usami, T. Taniyama 他、Long-range Propagation of Magnetostatic Surface Spin Waves in Ordered FeRh Epitaxial Thin Films, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2016)、2016 年 11 月 4 日、New Orleans (USA)

⑥ 谷山智康、FeRh 規則合金における磁気相転移とマグネティクス応用の現状と展開、日本磁気学会第 209 回研究会、2016 年 10 月 21 日、中央大学 (東京都・千代田区) (招待講演)

⑦ 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、2016 年 9 月 5 日、九州工業大学 (福岡県・北九州市) (招待講演)

⑧ T. Kurosawa, T. Taniyama 他、Pure Spin Current Transport in a Kondo Alloy Cu(Fe)、9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9)、2016 年 8 月 8 日、Kobe International Conference Center (兵庫県・神戸市)

⑨ T. Usami, T. Taniyama 他、B2 Ordering

Dependence of Spin-wave Frequency in Ferromagnetic FeRh Thin Films、9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Solids (PASPS9)、2016年8月10日、Kobe International Conference Center (兵庫県・神戸市)

◎ T. Taniyama、Multiferroic Heterostructures for Low Energy Spintronics and Magnonic Applications、Distinguished Lecture (University of Hyderabad)、2016年7月20日、Hyderabad (India)

◎ T. Taniyama、Electric Field Control of Magnetism in Multiferroic Heterostructures、IEEE Magnetics Society Tokyo Chapter Seminar & Nano-Magnetics Seminar of Magnetics Society of Japan、2016年7月15日、Tokyo (Japan) (Invited Talk)

◎ T. Taniyama、Tunable Magnetic Phases in Fe-Rh-based Thin Films、EMN Summer Meeting、2016年6月7日、Cancun (Mexico) (Invited Talk)

◎ 宇佐見喬政、谷山智康 他、FeRh 細線におけるスピン波励起とその組成依存性、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日、東北学院大学 (宮城県・仙台市)

◎ 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、2016年3月15日、新世代研究所 (東京都・千代田区) (招待講演)

◎ T. Usami、T. Taniyama 他、Atomic Ordering Dependence of Spin Wave Dispersion in Epitaxial Ferromagnetic FeRh Wires、2nd Conference on Magnetism and Its Applications (MIA 2016)、2016年3月1日、Beijing (China)

◎ T. Usami、T. Taniyama 他、Excitation and Detection of Spin Waves in Ordered FeRh Thin Films、MMM/Internmag 2016 Joint Conference、2016年1月12日、San Diego (USA)

◎ R. Iijima、T. Taniyama 他、Electric-Field-Induced Strain Transfer Effect on Magnetic Phase in FeRh/BaTiO<sub>3</sub> Heterostructures、MMM/Internmag 2016 Joint Conference、2016年1月13日、San Diego (USA) (Best Poster Award 受賞)

◎ N. Matsuzaki、T. Taniyama 他、Write-Read Operations in Antiferromagnetic Memory Resistor、MMM/Internmag 2016 Joint Conference、2016年1月14日、San Diego (USA)

◎ T. Kurokawa、T. Taniyama 他、Nonlocal Spin

Transport in a Kondo Alloy Cu(Fe) in Lateral Spin Waves with Co<sub>2</sub>FeSi、MMM/Internmag 2016 Joint Conference、2016年1月15日、San Diego (USA)

◎ T. Taniyama、Electric-Field-Induced Strain Transfer Effect in Multiferroic Heterostructures、Energy Materials and Nanotechnology Hong Kong Meeting (EMN Hong Kong Meeting)、2015年12月9日、Hong Kong (Hong Kong) (Invited)

◎ 飯島諒介、谷山智康 他、FeRh/BaTiO<sub>3</sub> 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、2015年9月10日、名古屋大学 (愛知県・名古屋市)

◎ 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、2015年9月13日、名古屋国際会議場 (愛知県・名古屋市) (招待講演)

◎ N. Matsuzaki、T. Taniyama 他、Current Induced Antiferro-ferromagnetic Transition and Anisotropic Magnetoresistance in FeRh Nanowires、22nd International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS)、2015年7月17日、Cracow (Poland)

◎ I. Suzuki、T. Taniyama 他、Temperature Controllable Exchange Bias in Fe/FeRh Heterostructures、59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference (MMM2014)、2014年11月7日、Honolulu (USA)

◎ 鈴木一平、谷山智康 他、FeRh 系合金/BaTiO<sub>3</sub> 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、2015年9月4日、慶応義塾大学 (神奈川県・横浜市)

[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・科学技術創成研究院・

准教授

研究者番号：10302960