

令和元年6月14日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17801

研究課題名(和文) 反強磁性体の電子・スピン状態の実空間・逆格子空間における直接観測とコントロール

研究課題名(英文) Direct observation of antiferromagnetic spin in real space and momentum space and its electrical manipulation

研究代表者

羽尻 哲也(Hajiri, Tetsuya)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：80727272

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：反強磁性スピントロニクスに向け、交換スプリング効果を用いた反強磁性体異方性磁気抵抗効果、スピンホール磁気抵抗効果による反強磁性磁気モーメントの電気的検出、そしてX線磁気直線二色性-光電子顕微鏡測定を行った。強磁性体/反強磁性体積層膜においては、反強磁性異方性磁気抵抗効果の現れ方は反強磁性体の膜厚の影響を強く受けることを示唆する結果が得られた。またX線磁気直線二色性-光電子顕微鏡測定およびスピンホール磁気抵抗効果測定の結果より、反強磁性と弱強磁性が競合した系においては両者が競合したスピンホール磁気抵抗効果を示す事が分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代磁気メモリに向けて反強磁性体は有望な材料であるが、反強磁性体は各磁性元素でスピンの反平行に配列するために、反強磁性磁気モーメントの制御および検出が困難である。反強磁性体を主体とした反強磁性体スピントロニクスに向けて、異方性磁気抵抗効果およびスピンホール磁気抵抗効果を行い、反強磁性スピンの電気的な検出に成功し、その電気的な検出手法に関する知見を深めた。

研究成果の概要(英文)：For antiferromagnetic spintronics, electrical detection of antiferromagnetic spins using the anisotropic magnetoresistance combined with exchange-spring effect and spin Hall magnetoresistance were performed as well as X-ray magnetic linear dichroism-photoelectron Microscopic measurement. The results of anisotropic magnetoresistance of ferromagnet/antiferromagnet bilayers suggest that the appearance of the antiferromagnetic anisotropic magnetoresistance is strongly influenced by the thickness of antiferromagnet. On the other hand, the combined study of spin Hall magnetoresistance and X-ray magnetic linear dichroism-photoelectron Microscopic measurement, we reveal that the spin Hall magnetoresistance of AFM and weak FM components can compete.

研究分野：磁性薄膜

キーワード：反強磁性体 反強磁性スピントロニクス 異方性磁気抵抗効果 スピンホール磁気抵抗効果 XMLD-PEEM

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

反強磁性体の研究が進むにつれ、その応用への特性が強磁性体よりも優れている事が理論的に明らかにされはじめ、スピントロニクスの主役は強磁性体から反強磁性体へと取って代わる事が期待され反強磁性スピントロニクスという分野が築かれつつある。しかしながら、各磁性元素でスピンの反平行に配列するために、正味の磁化がゼロとなるために、磁気モーメントの制御・検出が困難であるため反強磁性体をスピントロニクスのメインとした研究報告は非常に少ない。

現在までの研究で強磁性体 / 反強磁性体積層膜における交換スプリング効果により反強磁性スピンを制御出来ることが報告されている。またスピンホール磁気抵抗効果により強磁性絶縁体のスピンを検出可能なことより、反強磁性絶縁体においても同様に検出出来ると考えた。そこで本研究では、交換スプリング効果を用いた反強磁性体異方性磁気抵抗効果、スピンホール磁気抵抗効果による反強磁性磁気モーメントの電気的検出を目指す。またそれらに加え、光電子分光および X 線磁気直線二色性 - 光電子顕微鏡を用いる事により、反強磁性体の電子・スピン構造を幅広く理解し、反強磁性スピントロニクスの土台を得ることを目指した。

2. 研究の目的

反強磁性体スピントロニクスに向けて、反強磁性体における異方性磁気抵抗効果、スピンホール磁気抵抗効果、光電子分光を用いた逆格子空間における電子構造、そして、X 線磁気直線二色性 - 光電子顕微鏡を用いた反強磁性体のスピン構造の直接観測を用いる事により、反強磁性体の電子・スピン構造を実空間・逆格子空間において解明する事を目指した。そして電流印可による反強磁性磁気モーメントの電気的制御を試みる事を目的とした。

3. 研究の方法

本研究ではこれまでに我々が見いだしてきたホイスラー合金強磁性体 Fe_2CrSi / ホイスラー合金反強磁性体 Ru_2MnGe 積層膜の交換結合に起因する交換スプリング効果を用いた Ru_2MnGe の異方性磁気抵抗効果のさらなる理解を目指し、詳細な異方性磁気抵抗効果測定を行う。さらに強磁性体の磁気異方性の影響を明らかにするために Fe_2CrSi と同じ 4 回対称の磁気異方性を有し、その容易軸方向が 45° 異なる $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{1-x}\text{Ge}_x)$ と Ru_2MnGe の積層膜において、同様に異方性磁気抵抗効果測定を行う。また異方性磁気抵抗効果の起源となる電子構造を解明するために、in-situ で角度分解光電子分光を行う。

一方でノンコリア反強磁性絶縁体 SmFeO_3 薄膜に関しては、X 線磁気直線二色性 - 光電子顕微鏡を用いた反強磁性体の電子・スピン構造の実空間の直接観測、スピンホール磁気抵抗効果による反強磁性磁気モーメントの電気的検出、および電流印加による反強磁性体磁気構造変化の観測・ダイナミクス測定などを行い、その特徴的な磁気特性を幅広く明らかにする事を目指した。

4. 研究成果

始めに Fe_2CrSi / Ru_2MnGe 積層膜の詳細な異方性磁気抵抗効果測定として温度依存性測定を行った。4K では従来観測されていた非対称な異方性磁気抵抗曲線が観測され、温度が上がるにつれて、その非対称性が徐々に崩れていき、強磁性体 / 反強磁性体間の交換結合が無くなるブロッキング温度で通常の異方性磁気抵抗曲線の対称的な曲線が得られた。また興味深いことに、異方性磁気抵抗比は 4K から 50K に向かって 1.1 倍ほど大きくなりそこからブロッキング温度に向かって単調に減少することを見いだした。このような異方性磁気抵抗効果比の増大は交換スプリング効果によって回転する反強磁性スピンの回転の仕方を表していると推察される。

Fe_2CrSi / Ru_2MnGe 積層膜の異方性磁気抵抗効果曲線においては、磁場を [100] 方向に印加した場合は非対称な曲線が、[110] 方向に印加した場合は対称的な曲線が得られている。この異方性磁気抵抗効果曲線の違いが強磁性体 Fe_2CrSi の結晶磁気異方性に起因する可能性が考えられるため、続いて強磁性体の磁気異方性の影響の調査を行った。 Fe_2CrSi は磁化容易軸が [100] 方向、磁化困難軸が [110] 方向であるために、比較として磁気異方性が 45° 異なる (磁化容易軸が [110] 方向、磁化困難軸が [100] 方向) $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{1-x}\text{Ge}_x)$ および面内で磁気異方性のない多結晶パーマロイを Ru_2MnGe 上に作製を行った。

詳細な $\text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{1-x}\text{Ge}_x)$ 作成条件は省略するが、 $\text{MgO}(001)$ 基板上および $\text{MgO} // \text{Ru}_2\text{MnGe}(001)$ 上で同等の磁気異方性を有する薄膜作製条件を見だし、磁気異方性の確認を行った。 $\text{Ru}_2\text{MnGe} / \text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{1-x}\text{Ge}_x)$ 積層膜で同様のシーケンスで異方性磁気抵抗効果測定を行った所、 Fe_2CrSi と比較して印加磁場方向による異方性磁気抵抗曲線の非対称性は顕著ではなかった。 Fe_2CrSi の結果より磁化容易軸の $[110]$ 方向で非対称な曲線が、磁化困難軸で対称的な曲線を期待していたが、測定した薄膜に依存して対称性 - 非対称性の方向依存性が逆になる結果が得られ、現時点では統一的理解は得られていない。一方で $\text{Ru}_2\text{MnGe} /$ 多結晶パーマロイ積層膜においては、異方性磁気抵抗曲線は印加磁場方向によらず全て対称的な曲線となった。 $\text{Ru}_2\text{MnGe} /$ 多結晶パーマロイ積層膜は交換結合による保磁力の増大がほとんど無いことより、交換スプリング効果は発現していないと考えられ、これにより、異方性磁気抵抗曲線の非対称性は交換スプリング効果と強く結びついている事が裏付けられた。また $\text{Fe}_2\text{CrSi} / \text{Ru}_2\text{MnGe}$ 積層膜では、 Ru_2MnGe の異方性磁気抵抗効果は Ru_2MnGe 膜厚が 10nm 以上で顕著に表れるが、 $\text{Ru}_2\text{MnGe} / \text{Co}_2\text{Fe}(\text{Ga}_{1-x}\text{Ge}_x)$ 積層膜においては 30nm 以上で観測され、強磁性体によって交換スプリング効果を引き起こす結合強度が大きく異なることが明らかになった。

交換スプリング効果を用いた異方性磁気抵抗効果測定により、反強磁性体 Ru_2MnGe の電子構造に異方性がある事が明らかになったので、続いて in-situ 角度分解光電子分光による電子構造の直接観測に取り組んだが、明瞭な分散は得られなかった。恐らく最表面がスパッタダメージ、あるいは Ar 1Pa 下で薄膜作製を行っているために汚れ、その結果、明瞭な分散が得られなかったと考えられる。

続いて反強磁性絶縁体 SmFeO_3 薄膜における結果にうつる。まず初めに X 線磁気直線二色性 - 光電子顕微鏡を用いた反強磁性磁区構造の直接観測を行い、反強磁性ネールベクトルの容易軸が薄膜面内方向にある事を見だした。続いて $\text{SmFeO}_3 / \text{Pt}$ 積層膜において、スピンホール磁気抵抗効果による反強磁性磁気モーメントの電氣的検出に取り組んだ。スピンホール磁気抵抗効果は強磁性絶縁体 / 重金属において発見された現象であり、外部磁場と印加電流の間の角度を θ とすると、外部磁場方向により抵抗が $\cos^2 \theta$ に比例する。反強磁性体においては反強磁性の容易面内に外部磁場を印加するとネールベクトルは磁場に対して 90° の方向を向く。そのため、強磁性体の角度依存性から 90° シフト、すなわち $\sin^2 \theta$ に比例した角度依存性が観測される。 SmFeO_3 においては Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用に起因した反強磁性スピンのキャントにより、弱強磁性が現れる。そのため反強磁性に由来したスピンホール磁気抵抗効果と弱強磁性に由来したスピンホール磁気抵抗効果の競合が期待されるため、その点に着目して実験を行った。

スピンホール磁気抵抗効果を 50~300K、 $\sim 10\text{T}$ の磁場で行った所、全ての温度・印加磁場下において $\sin^2 \theta$ に比例した角度依存性が観測された。また磁場スイープ測定においては、 $-0.7 \sim +0.7\text{T}$ の印加磁場下においてはスピンホール磁気抵抗効果はほぼゼロとなり、それ以上の磁場で直線的に増大することが分かった。磁化測定結果および反強磁性と弱強磁性が競合した際の磁区構造の印加磁場依存性の理論モデルとの比較により、 $-0.7 \sim +0.7\text{T}$ においては反強磁性と弱強磁性に起因するスピンホール磁気抵抗効果が打ち消しあった結果ゼロとなる事、 0.7T 以上の磁場においては外部磁場によって誘起されるキャントによる磁化の増大に起因したスピンホール磁気抵抗効果の直線的な増大に起因する事が分かった。反強磁性スピン方向と弱強磁性の方向は対応するため、弱強磁性が優勢的なスピンホール磁気抵抗効果を観測することにより、反強磁性ネールベクトルの挙動は調べることが出来る。そのため $\text{SmFeO}_3 / \text{Pt}$ 積層膜に電流印加する事によるスピントルクにより SmFeO_3 のネールベクトルを制御し、スピンホール磁気抵抗効果により検出する事が可能であると考えられる。現時点ではいくつかのサンプルで行っているが、系統的な結果が得られていないことより、電氣的制御は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

1. "Electromagnetic effects induced by a time-dependent axion field"
K. Taguchi, T. Imaeda, T. Hajiri, T. Shiraishi, Y. Tanaka, N. Kitajima, T. Naka
Phys. Rev. B **97**, 214409 (2018) [6 pages].
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.214409>
査読有り

2. "Strain effect on magnetic property of antiferromagnetic insulator SmFeO_3 "
M. Kuroda, N. Tanahashi, T. Hajiri, K. Ueda, H. Asano
AIP Advances **8**, 055814 (2018) [4 pages].
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5007332>
査読有り
3. "Preparation and evaluation of $\text{Mn}_3\text{GaN}_{1-x}$ thin films with controlled N compositions"
S. Ishino, J. M. So, H. Goto, T. Hajiri, H. Asano
AIP Advances **8**, 056312 (2018) [5 pages].
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5007333>
査読有り
4. "45° sign switching of effective exchange bias due to competing anisotropies in fully epitaxial $\text{Co}_3\text{FeN/MnN}$ bilayers"
T. Hajiri, T. Yoshida, M. Filianina, S. Jaiswal, B. Borie, H. Asano, H. Zabel, M. Kläui
J. Phys.: Condens. Matter **30**, 015806 (2017) [7 pages].
DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa9ba7>
査読有り
5. "Impact of anisotropy on antiferromagnet rotation in Heusler-type ferromagnet/antiferromagnet epitaxial bilayers"
T. Hajiri, M. Matsushita, Y. Z. Ni, H. Asano
Phys. Rev. B **95**, 134413 (2017) [5 pages].
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.134413>
査読有り

〔学会発表〕(計24件)

1. “ノンコリニア反強磁性絶縁体 SmFeO_3 におけるスピホール磁気抵抗効果”
羽尻哲也, L. Baldrati, R. Lebrun, M. Filianina, A. Ross, 棚橋直也, 黒田基規, W.L. Gan, T.O. Montes, F. Genuzio, A. Locatelli, 浅野秀文, M. Kläui
日本物理学会 第74回年次大会, 2019年
2. “反強磁性スピントロニクスに向けたノンコリニア反強磁性絶縁体 SmFeO_3 トンネル接合の作製と評価”
尹智誠, 棚橋直也, 羽尻哲也, 浅野秀文
第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年
3. “ワイル磁性体 Mn_3Sn のエピタキシャル薄膜作製と評価”
安藤優介, 羽尻哲也, 植田研二, 浅野秀文
第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年
4. “ $\text{NbN/Mn}_3\text{GaN}$ ヘテロ積層構造の作製と評価”
中村俊平, 強博文, 石野直, 羽尻哲也, 浅野秀文
第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年
5. “ノンコリニア反強磁性体 SmFeO_3 におけるスピホール磁気抵抗効果”
羽尻哲也, L. Baldrati, R. Lebrun, M. Filianina, A. Ross, 棚橋直也, 八田隼之介, 松浦健人, 黒田基規, W.L. Gan, T.O. Montes, F. Genuzio, A. Locatelli, M. Kläui, 浅野秀文
IEEE Magnetics Society, 名古屋支部若手研究会, 2019年
6. “Mn系窒化物磁性薄膜を用いたスピ軌道トルクスイッチング”
石野直, 松浦健人, 羽尻哲也, 植田研二, 浅野秀文
IEEE Magnetics Society, 名古屋支部若手研究会, 2019年
7. “ノンコリニア型反強磁性 SmFeO_3 / 垂直磁化 $\text{Mn}_3\text{GaN}_{1-x}$ ヘテロ構造の作製と特性評価”
棚橋直也, 石野直, 尹智誠, 黒田基規, 羽尻哲也, 浅野秀文

第 79 回日本応用物理学会秋季学術講演会，2018 年

8. “無限層超伝導 $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{CuO}_2$ 薄膜の La 組成依存性と構造安定性()”
中村俊平, 森岡亨平, 羽尻哲也, 浅野秀文
第 79 回日本応用物理学会秋季学術講演会，2018 年
9. “スピンホール磁気抵抗測定に向けたノンコリニア型反強磁性絶縁体 SmFeO_3 薄膜の作製”
八田隼之助, 棚橋直也, 松浦健人, 羽尻哲也, 浅野秀文
第 6 回応用物理学会名古屋大学学生チューデントチャプター東海地区学術講演会，2018 年
10. “Electrical Measurement of Antiferromagnetic Moments in Fully Epitaxial Heusler-type Ferromagnet/Antiferromagnet Bilayers”
T. Hajiri, M. Matsushita, Y. Z. Ni, H. Asano
Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2017 年
11. “Multiferroic properties of heterostructures using antiferromagnetic insulator SmFeO_3 ”
M. Kuroda, T. Hajiri, N. Tanahashi, K. Ueda, and H. Asano
Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2017 年
12. “Structural and magnetic properties of $\text{Mn}_3\text{GaN}_{1-x}$ thin films and bilayers”
S. Ishino, J. So, H. Goto, T. Hajiri, H. Asano
Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2017 年
13. “強磁性体 / 反強磁性体積層膜における反強磁性体異方性磁気抵抗効果の観測”
羽尻哲也, 松下将輝, 倪遠致, 浅野秀文
日本金属学会 2017 年秋季講演大会，2017 年
14. “ホイスラー合金強磁性体 / 反強磁性体エピタキシャル積層膜における異方性磁気抵抗効果を用いた反強磁性磁気モーメントの検出”
羽尻哲也, 松下将輝, 倪遠致, 浅野秀文
第 41 回日本磁気学会学術講演会，2017 年
15. “Angular-dependent exchange bias with competing anisotropies in epitaxial $\text{Co}_3\text{FeN}/\text{MnN}$ bilayers”
T. Hajiri, T. Yoshida, M. Filianina, S. Jaiswal, B. Borie, H. Asano, H. Zabel, M. Klaui
第 65 回応用物理学会春季学術講演会，2018 年
16. “ノンコリニア反強磁性体 SmFeO_3 薄膜の作製と磁気・電気特性評価”
羽尻哲也, 黒田基規, 棚橋直也, 植田研二, 浅野秀文
IEEE Magnetics Society 名古屋支部若手研究会，2018 年
17. “ホイスラー合金強磁性/反強磁性エピタキシャル積層膜における結晶異方性磁気抵抗効果”
倪遠致, 松下将輝, 羽尻哲也, 浅野秀文
IEEE Magnetics Society 名古屋支部若手研究会，2018 年
18. “窒化物 $\text{Co}_3\text{FeN}/\text{MnN}$ 交換結合膜における電流誘起磁化反転”
後藤大尚, 吉田拓也, 羽尻哲也, 浅野秀文
第 65 回応用物理学会春季学術講演会，2018 年
19. “スピン軌道トルク誘起磁化反転に向けた $\text{Mn}_3\text{GaN}/\text{Mn}_3\text{GaN}_{1-x}$ 積層膜の作製と評価”
石野直, 八田隼之介, 羽尻哲也, 浅野秀文
第 65 回応用物理学会春季学術講演会，2018 年
20. “反強磁性 MnN 薄膜のエピタキシャル成長と交換結合特性”
吉田拓也, 羽尻哲也, 倪遠致, 石野直, 浅野秀文
第 41 回日本磁気学会学術講演会，2017 年
21. “ノンコリニア型反強磁性絶縁体 SmFeO_3 のエピタキシャル薄膜における磁化のエンハンスメント”

棚橋直也，黒田基規，羽尻哲也，植田研二，浅野秀文
第 78 回日本応用物理学会秋季学術講演会，2017 年

22. “強磁性体/反強磁性体 Ru_2MnGe 積層膜における反強磁性磁気モーメントの挙動”
倪遠致，松下将輝，羽尻哲也，浅野秀文
第 78 回日本応用物理学会秋季学術講演会，2017 年
23. “ Mn_3GaN_{1-x} 薄膜の構造制御と Mn_3GaN/ Mn_3GaN_{1-x} 積層膜の作製と評価”
石野直，ソ ジョンミン，後藤大尚，羽尻哲也，浅野秀文
第 78 回日本応用物理学会秋季学術講演会，2017 年
24. “無限層超伝導 $Sr_{1-x}La_xCuO_2$ 薄膜の成長速度に対する構造安定性”
森岡享平，羽尻哲也，作間啓太，三浦正志，浅野秀文
第 78 回日本応用物理学会秋季学術講演会，2017 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.numse.nagoya-u.ac.jp/F5/>

<http://thajiri.web.fc2.com/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号 (8 桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：