

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03736

研究課題名(和文) ジグザグ反強磁性金属の「隠れた電流誘起磁化」が生み出す新規な電気磁気効果

研究課題名(英文) Nobel type of electromagnetic effect caused by hidden current induced magnetization in zigzag antiferromagnetic metals

研究代表者

木俣 基 (Kimata, Motoi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：20462517

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では物質中の電気と磁気の結合である電気磁気効果の枠組みを従来の磁性絶縁体から伝導系物質へ拡張を目指し研究を行った。主な対象としては時間・空間反転対称性の破れた磁性伝導系を扱った。その結果、酸化物反強磁性体薄膜における熱励起アシストドメイン反転機構の解明、特殊な反強磁性スピン配列に起因した時間反転対称性の破れの放射光による検出、らせん型結晶構造を持つ半導体におけるスピン偏極状態の磁場制御などに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で達成した成果は、主に反強磁性磁気状態の制御や検出に関わるものである。スピンの互いに打ち消し合う反強磁性は正味の磁化を持たないため、磁気状態の検出や制御が従来困難であると考えられてきた。本研究はこれらの困難を克服する実験手法を提案、実証するものであり大きな学術的意義を有する。従って、今後さまざまな反強磁性体を用いたスピントロニクスや熱電変換など、新たな物質機能の開拓に対して貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we are aiming to expand the applicable region of electro-magnetic effects into magnetic conductors beyond the conventional magnetic insulators. The main target materials are time and spatially inversion-symmetry-broken conducting systems. We have mainly obtained following results. Firstly, we have revealed thermally assisted domain reversal mechanism in a oxide antiferromagnetic thin film. Secondly, we have succeeded to detect time-reversal-symmetry breaking associated with triangle antiferromagnetic structure. Thirdly, we have found the magnetic field induced spin polarized state in a chiral semiconductor.

研究分野：強磁場物性物理学

キーワード：電気磁気効果 非相反磁気抵抗 反強磁性スピントロニクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年スピン軌道相互作用の強い金属において、電流と伝導電子スピンの結合現象が注目を集めている。その代表が電流をスピン流に変換するスピンホール効果や電流誘起磁化である。これらはいずれも空間反転対称性破れとスピン軌道相互作用に深く関わる広義の電気磁気結合である。しかし従来は非磁性のパウリ常磁性金属の研究が主であり、磁性との複合現象は未開拓であった。そこで本研究では金属反強磁性体等の磁性金属に着目し、磁性と関連した金属系の電気磁気結合現象の開拓を目的に研究を開始した。

### 2. 研究の目的

上記の様に、本研究では金属系物質における電気磁気効果と磁気構造の結合が作る新物性開拓を目指し、具体例として、ジグザグ鎖物質等における電流誘起磁化が反強磁性秩序と結合することで初めて発現する非相反磁気抵抗の観測や、それによる反強磁性ドメインの検出、さらには電流による反強磁性スピン状態の制御などを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では空間反転対称性の破れた金属磁性体における非相反抵抗測定を実現するため、単結晶試料に微細加工を施し、高電流密度での精密抵抗測定を行う。また研究代表者の所属機関である東北大金研の強磁場施設を用いることで、磁場による反強磁性状態の制御が広いパラメータ領域で可能である。磁場角度の制御には代表者が独自開発した二軸回転機構を用いる。測定には交流法を用い、電流反転に対して非等価となる抵抗成分を高感度に検出する。

### 4. 研究成果

本研究では対称性の破れた系における磁性と伝導の結合現象に着目し、主に以下の成果を得た。

#### 1) 空間反転対称性の破れた酸化物反強磁性/重金属界面における磁気抵抗をプローブとした反強磁性ドメイン反転機構の解明

近年、従来から用いられてきた強磁性体のみならず、反強磁性体をスピントロニクスに利用する試みが盛んである。スピントロニクスは微小領域の磁性を活用するため、特にドメイン反転やダイナミクスを検出する手法の開発は重要である。本研究では酸化物反強磁性体 NiO と重金属 Pt の空間反転対称性の破れた界面でのスピン散乱に起因した磁気抵抗を 27 テスラまでの強磁場領域で測定した。また磁気抵抗振幅の磁場依存性を結晶性薄膜と多結晶薄膜と比較し、特に多結晶薄膜では、従来知られていなかった熱励起アシストによるドメイン反転が優勢であることを明らかにした。この成果は反強磁性薄膜のドメイン反転機構に新たなモデルを提案するものであり、今後様々な系への適用が期待できる。

#### 2) 時間反転対称性を破るカゴメ格子金属反強磁性体 $Mn_3Sn$ における高次多極子秩序の放射光 X 線磁気円二色性による検出

磁性体中のスピンの起源となる異常ホール効果や磁気熱効果（異常ネルンスト効果）が次世代のスピントロニクス、センサ、エネルギーハーベスティング技術の要素として注目を集めている。このような効果はこれまで主に強磁性体で多く研究がなされてきたが、近年反強磁性体でも大きな効果が発見され、その起源解明に注目が集まっている。本研究では、その起源として理論的に提案されていた時間反転対称性を破る高次多極子（磁気八極子）の秩序を、円偏光放射光 X 線磁気円二色性(XMCD)を用いて検出することに成功した。この結果は、これまで検出困難であった多極子秩序の新たな検出法を実証したものであり、今後他の系への適用など、多くの展開が期待できる。従って、本成果は高次多極子秩序を起源とした新しいタイプのスピントロニクス、熱電変換等の発展に貢献するものである。本成果は当初予想したものではなかったが、反強磁性金属における考察を進める中で得られた成果である。

#### 3) カイラル半導体における磁場誘起リフシツツ転移

上述の様に、空間反転対称性を破った伝導系物質では電流誘起磁化等の電流誘起現象が盛んに研究されている。一方で、磁場中の応答についてはこれまで開拓が進んでいなかった。本研究では空間反転対称性を破る典型例の一つとして、らせん結晶構造を持つ半導体に着目し、強磁場中での非相反抵抗測定を行なった。その結果、非相反抵抗が強磁場領域で飽和、減少する振る舞いを観測した。先行研究では非相反抵抗は基本的に磁場に対して線形に増加することが知られているため、この結果は非従来型の振る舞いである。モデル計算の結果、らせん構造によってスピン偏極したフェルミ面が、強磁場中では片方の偏極成分のみ生き残ることが明らかになり、この

フェルミ面の変化(リフシツ転移)に伴い、非相反抵抗の減少が定性的に説明できることを解明した。この結果は、空間反転対称性の破れた伝導系物質の新たな磁場応答を見出したものであり、このようなメカニズムが高スピン偏極状態の新たな指針となることも期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kimata Motoi, Moriyama Takahiro, Oda Kent, Ono Teruo	4. 巻 116
2. 論文標題 Distinct domain reversal mechanisms in epitaxial and polycrystalline antiferromagnetic NiO films from high-field spin Hall magnetoresistance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192402 ~ 192402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5142495	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Knebel Georg, Kimata Motoi, Valiska Michal, Honda Fuminori, Li DeXin, Braithwaite Daniel, Lapertot Gerard, Knafo William, Pourret Alexandre, Sato Yoshiki J., Shimizu Yusei, Kihara Takumi, Brison Jean-Pascal, Flouquet Jacques, Aoki Dai	4. 巻 89
2. 論文標題 Anisotropy of the Upper Critical Field in the Heavy-Fermion Superconductor UTe <sub>2</sub> under Pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 053707 ~ 053707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/jpsj.89.053707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kimata Motoi, Sasabe Norimasa, Kurita Kensuke, Yamasaki Yuichi, Tabata Chihiro, Yokoyama Yuichi, Kotani Yoshinori, Ikhlas Muhammad, Tomita Takahiro, Amemiya Kenta, Nojiri Hiroyuki, Nakatsuji Satoru, Koretsune Takashi, Nakao Hironori, Arima Taka-hisa, Nakamura Tetsuya	4. 巻 12
2. 論文標題 X-ray study of ferroic octupole order producing anomalous Hall effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 5582
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-021-25834-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 木俣基, 雀部矩正, 栗田謙亮, 山崎裕一, 田端千紘, 横山優一, 小谷佳範, Muhammad Ikhlas, 富田崇弘, 雨宮健太, 野尻浩之, 中辻知, 是常隆, 中尾裕則, 有馬孝尚, 中村哲也
2. 発表標題 軟X線磁気円二色性を用いた強制的拡張磁気八極子秩序の検証
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須藤健太, 柳有起, 高橋武士, 小林夏野, 鈴木通人, 木俣基
2. 発表標題 カイラル半導体における非相反磁気抵抗の強磁場効果
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須藤健太, 古川哲也, 小笠原直輝, 高橋武士, 小林夏野, 伊藤哲明, 木俣基
2. 発表標題 カイラル半導体Teにおける量子振動と非相反伝導
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Motoi Kimata, Takahiro Moriyama, Kent Oda, Teruo Ono
2. 発表標題 High magnetic field spintronics with antiferromagnetic materials
3. 学会等名 Asia-Pasific Research in High Magnetic Field 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木俣基, 須藤健太, 平井大悟郎, 松林康仁, 広井善二
2. 発表標題 Cd <sub>2</sub> Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> における非相反磁気抵抗
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須藤健太, 木俣基, 高橋武士, 小林夏野
2. 発表標題 カイラル半導体における量子極限状態での非相反磁気抵抗
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木俣基, 雀部矩正, 山崎裕一, 栗田謙亮, 田端千紘, 横山優一, 小谷佳範, Muhammad Ikhlas, 富田崇弘, 雨宮健太, 野尻浩之, 是常隆, 中辻知, 中尾裕則, 中村哲也
2. 発表標題 軟X線磁気円二色性による拡張磁気八極子の検出
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 (2020年)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------