

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14656

研究課題名(和文) 二色性伝導測定と元素置換による電気磁気効果が電気抵抗に与える影響の解明

研究課題名(英文) Relationship between electromagnetic effect and electrical resistance investigated by dichroic conduction and element substitution

研究代表者

浦田 隆広 (Urata, Takahiro)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：30780530

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)：電気磁気効果と電気抵抗の間にある関係に関する知見を得ることを目的とし、反転対称性が破れた反強磁性体CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>及びその元素置換系の二色性伝導特性を測定、評価した。二色性伝導の温度依存性からは、反強磁性転移温度付近でジュール熱に起因するピークが観測された。一方低温ではジュール熱の影響では説明できない上昇が観測された。しかし、この振る舞いが持つ試料依存性に悩まされ、本研究期間中には起源を解明するには至らなかった。最終年度途中で状況を鑑みて方針を転換し、上記と同時並行で新規物質開発も行った。その結果、反強磁性体LnMnSb<sub>2</sub> (Ln = Pr, Ce)の単結晶育成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピントロニクス応用を見据え、反強磁性体の磁気状態制御・検出に関する研究が盛んに行われている。本研究では特殊な対称性を持つ反強磁性体における、磁気構造と電流との相互作用を調べた。得られた成果は主には測定時に発生するジュール熱や試料依存性という実験的なエラーの蓄積となったが、これによって今後様々な系で本手法を拡張する際の基盤となる知見を得ることが出来た。

研究成果の概要(英文)：We measured dichroic conduction properties of an antiferromagnet CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub> and its element substitution system in order to get insight into the relationship between the electro-magnetic effect and electrical resistance. From the temperature dependence of the dichroic conduction, a peak due to Joule heating was observed around the antiferromagnetic transition temperature. On the other hand, at low temperatures, an increase was observed which cannot be explained by the Joule heating effect. However, during this research period, the origin of this behavior could not be clarified due to the sample dependence of this behavior. In the middle of the final year of the project, we changed our schedule considering the situation, and developed new materials as well. As a result, we succeeded in growing a single crystal of the antiferromagnet LnMnSb<sub>2</sub> (Ln = Pr, Ce).

研究分野：物性物理

キーワード：電気磁気効果 磁性 輸送現象 強相関電子系

### 1. 研究開始当初の背景

電気分極と磁化の間で生じる交差相関現象は、電気磁気効果と呼ばれ、古くから盛んに研究が行われてきた。従来の対象は主に絶縁体であったが、近年、反強磁性体のスピントロニクス応用に対する期待を背景に、伝導系における新たな電気磁気効果に注目が集まっている。最近では特殊な磁気対称性をもつ反強磁性体において、相次いで電流によるスピン配列の制御が報告され、反強磁性の制御手法として有望視されている[1]。

本研究では、上記とは逆の電気磁気効果、即ち磁場で磁化を変調することで、電流の変化は引き起こせるのだろうかという問題について考える。もしこれが起これば、磁場中での抵抗、すなわち磁気抵抗効果が変化するはずである。しかし、この問題を調べるためには、まず解決すべき課題がある。それは、ローレンツ力に起因する正常磁気抵抗効果や、古くから知られる異方性磁気抵抗効果などの影響を取り除き、どうやって電気磁気効果の大きさそのものを評価するかということである。

### 2. 研究の目的

本研究では、CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>に着目した。この物質は反強磁性体であり、Mn 原子に着目すると、歪んだ八ニカム格子を形成することから、磁気的なフラストレーションを有すと考えられる。さらに、磁気点群は空間と時間反転対称性が共に破れたものになっているため、電気磁気効果の発現が期待できる。申請者らはCaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>において、巨大かつ異方的な磁気抵抗効果を発見した[2]。図1に示す様に、結晶のc軸方向に磁場を印加したとき、磁気抵抗効果は低磁場で急峻に増大し、その後減少し、さらなる高磁場では増加するという特異な振る舞いを見せる。この振る舞いは従来の機構では理解できず、磁気フラストレーションと電気磁気効果が折り重なることで生じた新奇量子輸送現象を観測した可能性がある。

本研究は、CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>における巨大な異方的磁気抵抗効果と電気磁気効果の関係性を明らかにすることを目的とする。しかし、前述の通り、通常の輸送特性には他の効果が混じってしまう問題がある。そこで、本研究では、電気磁気効果の評価として、電流の整流現象である、二色性伝導[3]の精密測定を行う。以上から、電気磁気効果に対する理解を進展させることを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では、CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>単結晶試料の育成を行い、さらにピコ秒レーザー及び集束イオンビームによる微細加工を行った。その後、交流電流電及びロックインアンプを用いた二色性伝導の測定を行った。二色性伝導は、電流の方向に依存して抵抗が変化する現象であり、交流の2倍波電圧を測定することで評価可能である[4]。

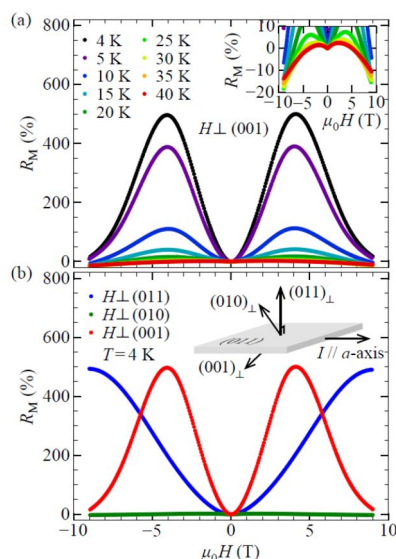


図1. CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>における異方的な磁気抵抗効果[2].

#### 4. 研究成果

図2に、微細加工を行った後の試料の写真を示す。共に、研磨を行った後に加工を行った。集束イオンビームによる加工の後に輸送特性の評価を行った結果、電気抵抗率の温度依存性はバルク単結晶のものとは異なる振る舞いを示した。この原因は、加工の際に生じた削りカスが伝導パスを形成してしまったことに加え、試料へのダメージが蓄積されたことが原因として考えられる。以降、測定はピコ秒レーザーによって加工した試料に対して行ったものである。

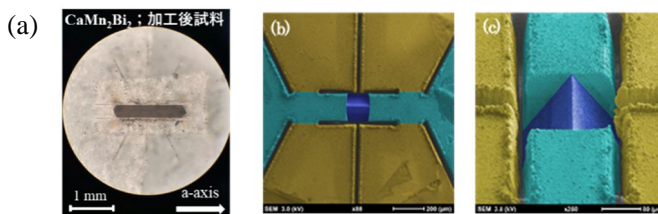


図 2. (a)ピコ秒レーザー及び(b)集束イオンビームによる加工を行った試料. (a)光学顕微鏡像、(b)走査イオン顕微鏡像(False color).

図3に、CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>における電気抵抗率及び2倍波抵抗の温度依存性を示す。電気抵抗率には150 K付近で折れ曲がりが見られるが、これは反強磁性転移に対応する。2倍波抵抗を見ると、反強磁性転移温度付近でピークを持つ事が分かる。これは、発見当初は転移温度付近での揺らぎに起因した現象であると考察していたが、ゼーベック測定などを合わせて検討した結果、ジュール熱による影響であると結論付けた。電流印加を行うと、ジュール熱によって試料温度が変化する。さらに、試料形状や電極の避けられない不均一性によってその温度には勾配が生じてしまう。この効果が抵抗値の温度係数が大きくなる領域で増強された結果、ピークとして現れてしまったと考えられる。一方、低温での上昇はジュール熱による影響では説明できない。

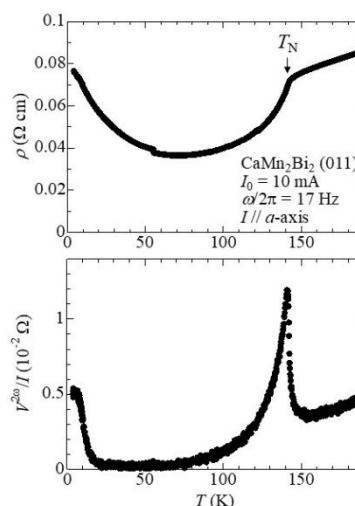


図 3. CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub> における電気抵抗率及び 2 倍波抵抗の温度依存性.

図4に、複数の試料で計測した低温における2倍波抵抗の結果を示す。但し、2倍波抵抗は試料形状に依存しない様に規格化を行っている。

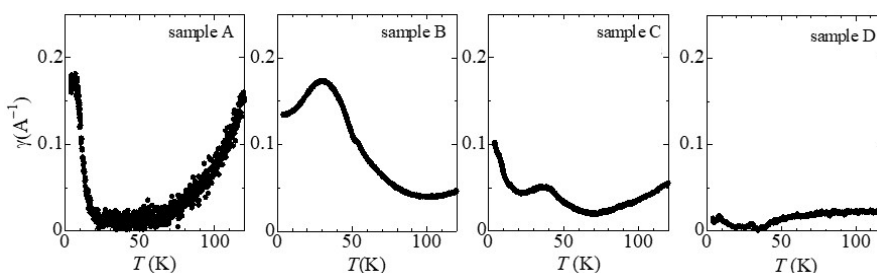


図 4. 複数の試料で測定した非相伝導パラメータの温度依存性.

低温での上昇の仕方は試料依存性が存在することが見て取れる。現時点ではこの起源について結論を得ることは出来ていないが、試料中にランダムに形成される反強磁性ドメインや、微量に含まれる磁性不純物による散乱などが影響を与えたことが考えられる。同様に、磁場中の振る舞いにも試料依存性が存在し、当初の目的である磁気抵抗効果との関係を解明するには至っていない。

最後に、CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>の測定と平行して、他の物質系の探索を行った。その結果、CaMn<sub>2</sub>Bi<sub>2</sub>同様に電気磁気効果を生じ得る LnMnSb<sub>2</sub> (Ln = Pr, Ce)の単結晶育成に成功した。本研究期間中に得た測定系及びノウハウを活かし、これらの系での測定も推進していく。

<参考文献>

- [1] P. Wadley *et al.*, *Science* **351**, 587 (2016).
- [2] N. Kawaguchi, *et al.*, *Phys Rev. B* **97**, 140403(R) (2018).
- [3] H. Watanabe and Y. Yanase, *Phys. Rev. B* **98**, 245129 (2018).
- [4] T. Ideue *et al.*, *Nat. Phys.* **13**, 578 (2017).

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 Baek Seung-Ho, Ok Jong Mok, Kim Jun Sung, Aswartham Saicharan, Morozov Igor, Chareev Dmitriy, Urata Takahiro, Tanigaki Katsumi, Tanabe Yoichi, Bchner Bernd, Efremov Dmitri V.	4. 巻 5
2. 論文標題 Separate tuning of nematicity and spin fluctuations to unravel the origin of superconductivity in FeSe	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 npj Quantum Materials	6. 最初と最後の頁 8-1 ~ 8-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41535-020-0211-y	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 該当する

1. 著者名 Kondo Keisuke, Motoki Seiya, Hatano Takafumi, Urata Takahiro, Iida Kazumasa, Ikuta Hiroshi	4. 巻 33
2. 論文標題 NdFeAs(O,H) epitaxial thin films with high critical current density	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 09LT01 ~ 09LT01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aba353	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 Hatano T, Nakamura I, Ohta S, Tomizawa Y, Urata T, Iida K, Ikuta H	4. 巻 32
2. 論文標題 Thin film growth of CaAgAs by molecular beam epitaxy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 435703 ~ 435703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aba6a7	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹内啓喜, 浦田隆広, 生田博志
2. 発表標題 反転対称性の破れた反強磁性体CaMn <sub>2</sub> Bi <sub>2</sub> における非相反伝導特性
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内啓喜, 浦田隆広, 生田博志
2. 発表標題 空間及び時反転対称性の破れた反強磁性体CaMn <sub>2</sub> Bi <sub>2</sub> における二倍波抵抗の起源
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 高橋佑輔, 浦田隆広, 生田博志
2. 発表標題 反強磁性体LnMnSbO (Ln = Ce, Pr)の単結晶育成と基礎物性評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋佑輔, 浦田隆広, 生田博志
2. 発表標題 反転対称性の破れた希土類-遷移金属化合物の 単結晶育成及び基礎物性測定
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 畑野敬史, 近藤圭祐, 本木聖也, 浦田隆広, 飯田和昌, 生田博志
2. 発表標題 トポタクティック反応による鉄系超伝導体NdFeAs(O,H)薄膜の作製と物性評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋佑輔, 浦田隆広, 生田博志
2. 発表標題 キヤント反強磁性体PrMn1-xSb2における磁気及び輸送特性
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浦田隆広
2. 発表標題 Search for Mn-pnictogen compounds that show novel transport phenomena due to locally broken inversion symmetry
3. 学会等名 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」 量子物質開発フォーラム
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
---------	---------