

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02583

研究課題名（和文）電流誘起磁性の機構解明および強相関効果による巨大化

研究課題名（英文）Study of the mechanism of current-induced magnetism and the enhancement of the effect by strong electron correlation

研究代表者

古川 哲也（Furukawa, Tetsuya）

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：10756373

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、空間反転対称性の破れた系におけるバルク電流誘起磁性の実証及び機構解明を行った。反転対称性の破れた、カイラルな結晶構造を持つ単体Teにおいて、右手結晶と左手結晶を用いた電流印加下核磁気共鳴実験を行い、電流誘起磁性の存在を理論的な洞察と整合する形で実証することに成功した。また電流誘起磁性の測定磁場方向依存性やキャリア密度依存性から、電流誘起磁性とバンド構造との関係に対する理解を深めることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、反転対称性を持たない結晶における電流誘起磁性の存在をより確実なものとする実験結果を得ることに成功し、さらにそのメカニズムについて、バンド構造との関係を理解することができた。これらの成果はバルク電流誘起磁性という新現象をいかに検出するかについての手段を確立し、また、この現象をより広い物質系について探索し考察する際の指針を与えるものであり、今後スピントロニクスなどへの応用が期待されるものである。

研究成果の概要（英文）：In this project, we demonstrate the bulk current-induced magnetization and study its mechanism. We performed the nuclear magnetic resonance (NMR) under an electric current for both right-handed and left-handed crystals of tellurium that has a chiral crystal structure with broken inversion symmetry. The magnetic-field-direction dependence and the carrier-density dependence of current-induced NMR shift provide the insight into the relation between the current-induced magnetization and a band structure.

研究分野：量子物性

キーワード：電流誘起磁性 電気磁気効果 スピン軌道相互作用 空間反転対称性の破れ

## 1. 研究開始当初の背景

電氣的な入力により磁氣的応答を得る「電気磁気効果」は、物質内の創発現象としての学術的価値のみならず、新たな機能性材料・デバイスの原理として応用の観点からも世界的に注目が集まっている。近年電気磁気効果の主な舞台は、マルチフェロイクス系と呼ばれる電気・磁気分極の両方を有する物質系であり、マルチフェロイクス電気磁気効果は電気・磁気分極間の結合を利用して、電場により磁化を動かすというシンプルな原理に立脚したものであり、電気磁気効果に強磁性・強誘電性が必要とされる点が特徴である。一方で、従来の電気磁気効果とは根本的に異なるものとして、非磁性体物質において電流印加によって、磁化を生じさせる電流誘起磁性が考えられた。電流誘起磁性はスピン軌道相互作用と反転対称性の破れに起因して起こることが表面・界面系の一部では知られているものの、バルク系での発現はない状況であった。そのような状況で、我々の研究グループは反転対称性の破れたカイラルな結晶構造を持つ単体 Te において、バルク電流誘起磁性が存在することを発見した。しかし、その発現機構の詳細については不明な点が多く、また、得られた電流誘起磁性の結晶カイラリティ依存性が不明であることから実験的証拠の確度も完全ではない状況であった。さらに他物質で同様の現象が見られるかは不明な状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、反転対称性の破れた構造を有するカイラル結晶である単体 Te における電流誘起磁性の実験的証拠をさらに確固としたものとし、電流誘起磁性のキャリア密度依存性等を調べることで、その発現機構およびバンド構造との関係を理解することを目標とした。また、強相関効果による電流誘起磁性の増強を視野に、単体 Te 以外の反転対称性の破れた結晶における電流誘起磁性を探索も目指した。

## 3. 研究の方法

バルク電流誘起磁性の実験的検出方法として、測定プローブに求められる条件としては、高感度な磁化測定が可能であること、バルク磁化が生じていることを示すためにバルク敏感なプローブであること、電流印加に伴う発熱の問題を最小限に抑えるために測定時間が短時間で済むプローブであること、が挙げられる。これらの条件を満たす電流誘起磁化の検出の測定プローブとして、本研究では電流パルス印加下の核磁気共鳴(NMR)を過去の研究に引き続き用いた。測定する結晶に電流印加用の電極をとりつけ、NMR 測定用のコイルを巻き付けた上で磁場を印加し測定を行った。パルス電流印加のもとで NMR スペクトルを測定し、電流によって局所磁化が誘起されることで NMR スペクトルがシフトすることを測定した。

## 4. 研究成果

(1) Te における電流誘起 NMR シフトが電流誘起磁性によるものであることの実証および、電流誘起磁性の結晶カイラリティによる反転  
(Physical Review Research 3, 023111 (2021) に掲載)

本研究以前に、カイラル結晶である単体 Te では電流印加下 NMR によってバルク電流誘起磁性の存在の兆候が捉えられていた。しかし、測定に磁場を印加する NMR においては、実験で得られた電流印加による NMR シフトの起源として、電流誘起磁性 ( $M \propto \alpha I, M$ :磁化,  $I$ :電流) によるものだけでなく、電流印加に不可欠な電場  $E$  と NMR 測定に必要な磁場  $H$  によって生じるその他の効果によるものである可能性が残っていた。そこで、我々は新たに対称性の議論を体系的に行うことで、電流印加 NMR シフトの起源が電流誘起磁性  $M \propto \alpha I$  と双二次電気磁気効果  $M \propto \beta EH$  に限られることを突き止めた。さらに実験的にどちらの効果が、主要であるかを明らかにするため、単体 Te において磁場を反転して、電流誘起 NMR シフトを測定した。その結果、電流誘起 NMR シフトの符号が磁場  $H$  の符号に依存しないことから、観測された電流誘起 NMR シフトが電流誘起磁性 ( $M \propto \alpha I$ ) によるものであることを実証することに成功した。この結果は、NMR によって電流誘起磁性を観測する方法を確立したものである。

さらに、我々は、Te における電流誘起磁性が右手構造の結晶と左手構造の結晶で反転するか否かを実験によって明らかにした。Te のようなカイラル結晶においては、右手結晶と左手結晶は反転対称操作で移り変わるため、そのスピン分裂バンドのスピン構造は左右の結晶で反転することが理論的に知られている。これは、カイラリティ反転によって電流誘起磁性の符号反転が起きなくてはならないことを意味するが、実験的な実証はなかった。一般にカイラリティの異なる単一ドメインの結晶を作り分けることは困難であるが、我々は左右それぞれの構造がランダムかつ単一ドメインの結晶として生成される気相法を用いることで、左右構造の単結晶を作り分けることに成功した。結果として電流印加 NMR の符号が右手結晶と左手結晶で反転することを実証することに成功し (図 1)、Te における電流誘起磁性の存在を確実なものとするのができた。

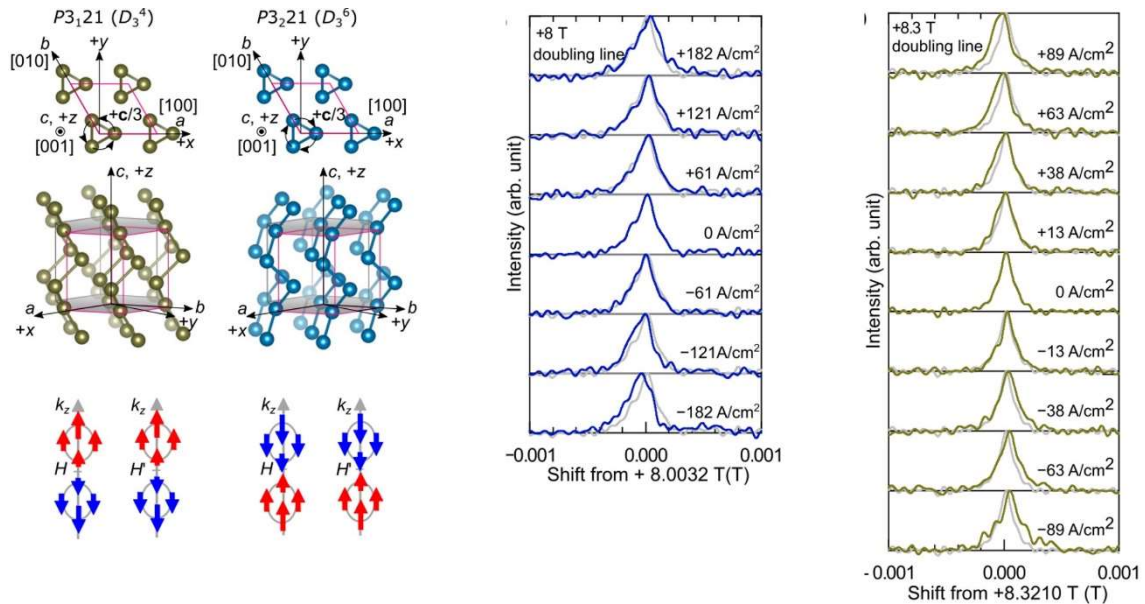


図1 カイラル結晶 Te におけるカイラリティ反転による電流誘起磁化の反転

(2) 単体 Te における電流誘起磁性について、電流方向、局所的な磁化構造、および超微細磁場の関係を整理することができた。

これまでの研究から、単体 Te はカイラルな結晶点群に属することに起因し、巨視的応答としての電流誘起磁性については、電流と磁化が平行になりえることがわかっていた。一方で結晶全体でなく局所的な磁気構造、あるいはその磁気構造のもとでの超微細磁場についての考察はなかったため、我々はその考察を行い、Te においては c 軸電流印加によって、c 軸に垂直でかつユニットセル内で 3 つの Te 原子によって打ち消されるような局所磁化が生じる可能性を見出した。実際に電流を c 軸に印加し、NMR 測定用の磁場を垂直に印加した状況での電流印加下 NMR 測定を行い、電流印加によるシフトが観測された。これは電流によって一様でない局所磁気構造が生じている可能性を示唆するものである。

### (3) キャリアドーピングされた単体 Te における電流誘起磁性

これまでの電流誘起磁性の研究では、キャリア密度が  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  のオーダーの極めて低キャリアの Te を用いてきた。Te はキャメルバック型と呼ばれるバンド構造を持つため、キャリア密度が  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  付近を境に、フェルミ面の構造及びそれに付随したスピン構造が変わることが知られている。よって電流誘起磁性のキャリア密度の違いを議論することを目指し、Bi をドーピングすることでキャリア密度が  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  を超える純良な単結晶試料を作成することに成功した。ドーピングされた試料において電流印加下 NMR 測定を行ったところ、電流誘起シフトの兆候を観測することができた。効果の大きさはこれまでの結果では非ドーピング系の試料と大きく変わらず、これは Te のバンド構造から半古典的な計算によって期待される傾向と一致するものである。

### (4) 極性半導体 CdSe における電流誘起磁性

反転対称性の破れた物質の中で Te のようなカイラルな構造以外にも、ポラーナすなわち極性を持った結晶構造の物質においても電流誘起磁性は生じうること注目し、我々は、スピン軌道相互作用が大きく、極性結晶構造を持つ系としてウルツ鉱 CdSe に注目して電流印加下 NMR をを行い、極性半導体における電流誘起磁化の検出を試みた。その結果、極性ドメインの影響が疑われるものの、電流誘起シフトの観測に成功し、ポラーナ系における電流誘起磁性の兆候を捉えることに成功した。

### (5) 磁性体における電流誘起磁性の検出の挑戦

非磁性半導体以外にも電流誘起磁性を舞台として磁性体を用いた電流誘起磁性を検討した。絶縁体では電流印加が困難なため半導体的伝導性を持つ磁性体で電流印加下 NMR が可能な系での電流誘起磁性検出を検討したが現在のところは成功していない。一方で、どのような磁気構造において電流誘起磁化が起こり得るかを磁気点群の観点から整理することには成功し、今後の磁性体における電流誘起磁性の検出への手がかりを得ることができた。

### (6) その他

バルクのカイラル結晶 Te は p 型半導体しか得ることができないことが知られてきた。理論的に n 型の Te ではフェルミ面のトポロジーが p 型と異なることから、p 型と異なる電流誘起磁性が得られる可能性が指摘されている。そこで、電気化学的な方法で単体 Te に電子をドーピングを試みた。Cu を Te 鎖間にインターカレートすることに挑戦したが、結果として結晶内に Cu

を適切にドーピングすることはできなかった。Li などのよりインターカレートに適すと考えられる元素を用いた試行が必要になることがわかった。

#### まとめ

以上、本研究では反転対称性をもたないカイラル結晶構造をもつ単体 Te における電流誘起磁性の存在を実験的に完全に実証することに成功し、さらに、磁場角度依存性、キャリア密度依存性から、電流誘起磁性とバンド構造・スピン構造との対応の理解を深めることができた。また Te 以外に極性半導体における電流誘起磁性の兆候を捉えることに成功し、磁性体における電流誘起磁性を考える際に磁気点群と電流誘起磁性の関係を示すことにも成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Yamamoto Riku, Furukawa Tetsuya, Miyagawa Kazuya, Sasaki Takahiko, Kanoda Kazushi, Itou Tetsuaki	4. 巻 124
2. 論文標題 Electronic Griffiths Phase in Disordered Mott-Transition Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 46404
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PHYSREVLETT.124.046404	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 Naijo Y., Hada K., Furukawa T., Itou T., Ueno T., Kobayashi K., Mazin I. I., Jeschke H. O., Akimitsu J.	4. 巻 101
2. 論文標題 Unusual electronic state of Sn in AgSnSe2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PHYSREVB.101.075134	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 Watanabe K., Naijo Y., Hada K., Furukawa T., Itou T., Ueno T., Kobayashi K., Akimitsu J.	4. 巻 30
2. 論文標題 Superconducting Properties of AgSnSe2 Studied by 77Se-NMR and 119Sn-NMR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11057
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.30.011057	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 Furukawa T., Watanabe Y., Ogasawara N., Kobayashi K., Itou T.	4. 巻 3
2. 論文標題 Current-induced magnetization caused by crystal chirality in nonmagnetic elemental tellurium	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 23111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.3.023111	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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 古川哲也, 小笠原直輝, 伊藤哲明, 平田倫啓, 佐々木孝彦
2. 発表標題 カイラル半導体Teにおける電流誘起NMRシフトの磁場角度依存性
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 須藤健太, 古川哲也, 小笠原直輝, 高橋武士, 小林夏野A, 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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 房前勲, 園部裕貴, 関澤拓也, 山本陸, 南館孝亮, 古川哲也, 伊藤哲明, 加藤礼三
2. 発表標題 急冷法による(d8-DMe-DCNQI)2Cuの準安定相の性質とその発現条件
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 佐藤直道, 桐野友輝, 井口敏, 古川哲也, 杉浦栞理, 米山直樹A, 池本夕佳, 森脇太郎, 佐々木孝彦
2. 発表標題 傾斜エックス線照射により分子欠陥を導入した強相関分子性導体の赤外反射スペクトル測定
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 桐野友輝, 佐藤直道, 井口敏, 古川哲也, 杉浦菜理, 米山直樹, 池本夕佳, 森脇太郎, 佐々木孝彦
2. 発表標題 エックス線照射した分子性ダイマーモット絶縁体 $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{Cu}_2(\text{CN})_3$ における赤外分光
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 佐々木孝彦, 佐藤直道, 古川哲也, 杉浦菜理, 井口敏, 米山直樹, L. Kang, 赤木和人, 池本夕佳, 森脇太郎
2. 発表標題 傾斜エックス線照射した分子性有機導体 $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{X}$ の赤外分光
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 佐藤直道, 桐野友輝, 井口敏, 古川哲也, 杉浦菜理, 米山直樹, 池本夕佳, 森脇太郎, 佐々木孝彦
2. 発表標題 傾斜エックス線照射により分子欠陥を導入した $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ の赤外反射スペクトル測定
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 T. Furukawa, Y. Watanabe, N. Ogasawara, K. Tanaka, K. Kobayashi, T. Itou
2. 発表標題 Symmetry considerations of current-induced bulk magnetization in gyrotropic material
3. 学会等名 International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Furukawa, Y. Watanabe, N. Ogasawara, K. Tanaka, K. Kobayashi, T. Itou
2. 発表標題 Bulk Edelstein effect in chiral semiconductor elemental tellurium
3. 学会等名 Summit of Materials Science 2019 and GIMRT User Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小笠原直輝, 渡邊悠太, 田中光児, 古川哲也, 小林夏野, 伊藤哲明
2. 発表標題 三方晶Telにおける電流誘起NMRシフトの磁場極性依存性と電流誘起磁性の関係
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 渡邊勘太, 小笠原直輝, 秋本慎之介, 上田桂右, 内條雄介, 古川哲也, 伊藤哲明
2. 発表標題 極性半導体ウルツ鉱CdSeのパルス電流下NMR測定
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
---------	---------