

# 令和5年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：個人研究 研究期間：令和 5年 10月 ~ 令和 6年 3月（予定）  
研究課題名：半金属材料でのフレクソエレクトリック効果の検証と巨大応答材料の開拓  
ラボ長  
所属：大学院基礎工学研究科 物質創成専攻  
職位 講師 氏名：高橋英史

## 研究成果：

### (概要)

ベリー位相は固体中の伝導電子によるバンド構造や多数のスピンが作るスピン秩序において特異な構造(トポロジカル構造)がある場合や特殊な超伝導電子対(パリティ混成)の形成により有限になる。一方で、ベリー位相は「時間・空間」反転対称性がある場合、結晶全体で打ち消されてしまうため、ベリー位相に由来した機能応答を実現するには、何らかの方法で「時間」もしくは「空間」反転対称性を破る必要がある。絶縁体材料では空間反転対称性の破れた結晶において、電場や光を用いることで、ベリー位相に由来したトポロジカル電流(分極電流やシフト電流)を作り出すことが可能であり、強誘電材料や太陽光発電材料としての応用が期待されている。一方で、金属材料では光や電場といった外場は伝導電子の遮蔽効果により結晶内部まで影響を及ぼさないため、トポロジカル半金属ではベリー位相に由来した機能応答は限定されていた。本研究では、金属材料において磁性の有無や結晶の対称性によらないトポロジカル機能応答として、「フレクソエレクトリック効果」を用いた新しい電気-振動応答現象の開拓を行った。

### (本文)

フレクソエレクトリック効果とは、ひずみや電場の空間的な変化率(空間勾配)に比例した電場(トポロジカル電流)-機械応答である(誘電効果のような「空間的に一様」な電場やひずみによる応答とは異なる)。本来この効果は、絶縁体(誘電体)で観測される現象であり、結晶をひずませることで実質的に「空間」反転対称性が破れ、結晶内に分極が生じる現象である。しかしながら、結晶に加える外場(電場やひずみ)を、ある周波数で時間変化させることで、結晶表面だけでなく内部まで伝搬させることが可能になると期待される。そこで、交流電流を外場として使い、歪を測定する逆フレクソエレクトリック効果の測定を行った。

実験はトポロジカル半金属である  $\text{VTe}_2$  と  $\text{MoTe}_2$ 、さらに一般的な半金属  $\text{TiTe}_2$  において結晶表面に非対称に電極を付けることによる動的「逆」フレクソエレクトリック効果(非対称な交流電場印可による振動現象)を測定した。図に測定セットアップと実際に観測された逆フレクソエレクトリック効果の結果を示す。測定は試料の上面に銀ペーストと金線を用い点電極を設置し、試料下面は表面を金蒸着した基板に銀ペーストで試料接着させた面電極を実現した。そして、試料に交流電流を加えその時の試料上部の歪をレーザードップラー振動計で計測した。振動は上面の点電極付近とそこから離れた箇所での測定を行っている。図右に点電極付近での測定結果を示す。一般的な半金属である  $\text{TiTe}_2$  では、4 kHz の電流を加えた時

にその倍の周波数である 8 kHz において歪振動が計測された。これはジュール熱に伴う温度上昇により結晶体積が増大したために生じたと考えられる。一方で、トポロジカル半金属  $\text{VTe}_2$  と  $\text{MoTe}_2$  の場合、ジュール熱による歪が僅かに生じるが、印可した電流と同じ周波数である 4 kHz でも歪振動が計測された。さらにこの振動は電極から離れると急速に減衰することを明らかにした。この結果は図左下のように結晶の歪が電極付近で局所的に生じていることを示唆している。ここで特に重要な点として、 $\text{VTe}_2$  と  $\text{MoTe}_2$  は室温ではどちらも反転対称性を持つ結晶構造であるため、ピエゾ効果のような結晶の対称性の破れに起因した現象ではないことである。さらにトポロジカルなバンド構造を持つ結晶( $\text{MoTe}_2$  と  $\text{VTe}_2$ )において巨大な応答が観測されることから、トポロジカル材料特有のベリー位相に由来して巨大な応答が実現したことを示唆している。さらに温度依存性や周波数依存性の測定から、交流電流印可による歪応答を支持する結果を得ている。この結果については学会や研究会で発表している。また、現在論文を投稿中である。

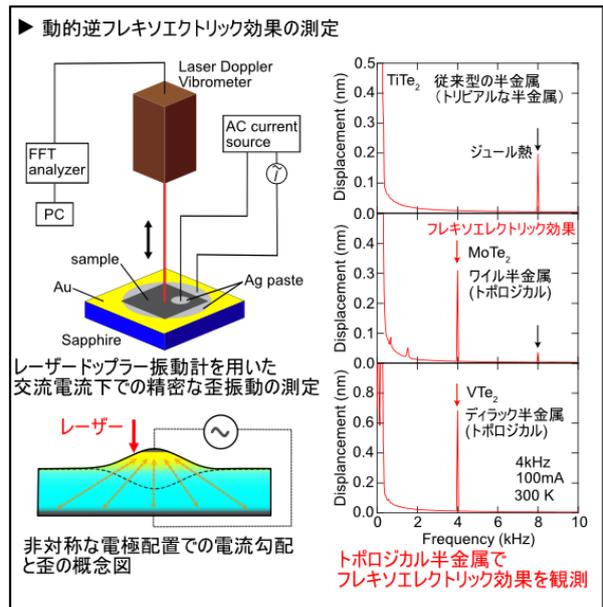


図: 動的逆フレキシエレクトリック効果の測定結果

さらに本研究では新しい巨大フレキシエレクトリック効果を示す新材料の開拓のため、層状 Te 化合物の合成に取り組んでいる。Te 化合物は強いスピン軌道相互作用が期待されるため、大きなベリー位相に由来した巨大応答が期待できる。さらに層状化合物の場合には、フレキシエレクトリック効果のような結晶の歪みに関連する物性が顕著になることが期待できる。現在すでにいくつかの大型単結晶の合成に成功し、物性測定を進め「逆」フレキシエレクトリック効果の観測に成功している。さらに歪を加えて電流（電圧）を測定する、正フレキシエレクトリック効果の測定手法の開発も進めている。現在測定手法はある程度めどがついており、まず予備実験として絶縁体試料でのフレキシエレクトリック効果の観測を目指す。

研究経費（R5 年度）の内訳：

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
684,750 円	15,250 円	円	円	円	700,000 円

共同研究者等：

(1) 共同研究者（氏名・所属）

なし

(2) 研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

# 令和5年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

黒坂祐介 物質創成専攻 修士2年

豊福拓海 物質創成専攻 修士1年

発表論文等（令和6年3月31日現在）：

〔雑誌論文〕

〔著書〕

〔学会発表〕

1. 黒坂祐介, 高橋英史, 木村健太, 石渡晋太郎: 「層状トポロジカル半金属  $\text{MTe}_2$  における動的電気機械応答の観測」 学術変革領域研究(A) アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出 A01・A02 トピカルミーティング (2023年)
2. 黒坂祐介, 高橋英史, 木村健太, 石渡晋太郎: 「層状トポロジカル半金属  $\text{MTe}_2$  における動的電気機械応答の観測」 日本物理学会第78回年次大会 (2023年)
3. 黒坂祐介, 高橋英史, 木村健太, 石渡晋太郎: 「テルル化物系トポロジカル半金属における新規な電気機械応答の観測」 学術変革領域研究(A) アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出 トピカルミーティング (2024年)
4. 黒坂祐介, 高橋英史, 木村健太, 石渡晋太郎: 「層状トポロジカル半金属  $\text{MTe}_2$  における動的電気機械応答の観測」 第6回固体化学フォーラム研究会 (2024年)

〔その他〕

外部資金獲得状況・申請状況：

科学研究費補助金（基盤研究B）採択

参考となるHP等：