

1. 氏名	高橋 英史
2. 所属機関	大阪大学大学院基礎工学研究科
3. 研究題目	新しい電気-振動変換材料の創成の機能検証
4. 研究の目的:	<p>近年、高度な情報化社会や持続可能な社会のニーズとして、太陽光や廃熱及び環境振動といった未利用エネルギーを活用した発電素子や高速で動作する電子デバイス、量子コンピュータに代表される高付加価値デバイスの開発が課題となっている。そこで本研究では、トポロジカル半金属と呼ばれる物質群において新機能の創出を目指し、固体が持つ量子位相(ベリー位相)を制御することによる新しい電気-振動応答現象の確立とそのための材料開拓を行う。革新的な電子デバイスのための機能開拓において、近年、量子位相(ベリー位相)の重要性が高まっている。ベリー位相は物質内部にエネルギー散逸の少ない電流(トポロジカル電流)を生み出すため、これを効率的かつ簡便に制御できれば、これまでのような散逸電流を制御するエレクトロニクスを超える機能が期待できる。そこで本研究では、特に金属材料において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-振動応答現象を提案し、新規な振動発電や振動センサーの開拓を目指す。</p>

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):	<p>本研究では、巨大なフレキシエレクトリック効果を示す材料開発と正のフレキシエレクトリック効果の測定手法の開発を目指し研究を行う。</p> <p><u>巨大応答のための物質開発</u></p> <p>回提案する「フレクソエレクトリック効果」の場合、物質の対称性の制約は原理的になくなり物質候補が飛躍的に増大する。特にトポロジカルなバンド構造をもち、スピン軌道相互作用が強いと期待される材料が有望であると考えられる。さらに2次元的な結晶構造をもち曲がりやすい材料が良いと期待される。そこで本研究では重元素であるテルルを中心とした、2次元材料の物質探索と合成を行い巨大な逆ピエゾ効果を示す材料の開発を目指した。まず始めに MoTe_2、VTe_2、TiTe_2 の3種類の2次元テルル化合物において比較実験を行っている。これらの材料の中で MoTe_2 はワイル半金属、VTe_2 はディラック半金属と呼ばれるトポロジカル材料である。一方で TiTe_2 は通常の半金属であるため、それぞれを比較することでトポロジカルなバンド構造(ベリー位相)の影響を調べることが可能になる。さらに本研究はより巨大なフレキシエレクトリック効果を目指してランタノイドとテルルの2次元化合物の合成と測定を行っている。</p> <p><u>フレクソエレクトリック効果の測定装置開発</u></p> <p>フレクソエレクトリック効果には、空間的に非対称な電流を加え、その時の振動を測定する逆フレクソエレクトリック効果と空間的に非対称なひずみを加えた場合の電流応答を測定する正フレクソエレクトリック効果がある。逆フレクソエレクトリック効果の測定手法はすでに確立されつつある一方で、振動を用いた発電には、正フレクソエレクトリック効果の測定手法の確立が必要不可欠である。本研究では、ピエゾ素子を用いた動的「正」フレクソエレクトリック効果の計測技術の確立を目指し測定手法の開発を行った。</p>
---	--

6. 研究の成果と結論、今後の課題:

フレキシエレクトリック効果 (フレキシ効果) 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—機械応答である。この効果は、絶縁体 (誘電体) で観測される現象であるが、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用い、トポロジカル半金属での歪を測定する逆フレキシ効果の測定を行った。

実験はトポロジカル半金属である VTe_2 と MoTe_2 、さらに一般的な半金属 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」フレキシ効果 (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

観測された逆フレキシ効果の結果を示す。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 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 VTe_2 と 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、 VTe_2 と 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 (MoTe_2 と 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。

さらに本研究では新しい巨大フレキシ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。現在すでにいくつかの大型単結晶の合成に成功し、いくつかの材料で大きな「逆」フレキシ効果の観測に成功している (現在詳細な実験を進めている)。さらに歪を加えて電流 (電圧) を測定する、正フレキシ効果の測定手法の開発も行った。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。

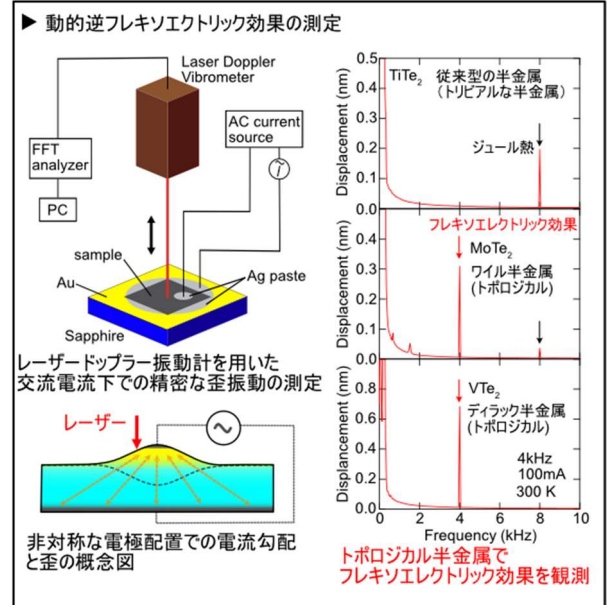


図: 動的逆フレキシエレクトリック効果の測定結果

7. 成果の価値

7.1_学術的価値:

研究の電気―振動応答は、本質的には、固体が持つベリー位相の量を測定することを意味する。一方、従来のベリー位相の測定手法は磁場や光を用い、高度な技術や装置が必要である。そこで、本研究において比較的容易にベリー位相を評価できる手法を実現することで、様々な研究者が物質開拓に参加できるようになり、将来的には、量子コンピュータに代表されるような超高速な情報処理デバイスの実現や、量子位相エンジニアリングのような新しい学理の開拓につながると期待される。

7.2_社会的価値:

本研究では、新しい原理による電気―振動応答の実現を目指す。これを達成することで、身の回りにある環境振動(自動車のモータやコンプレッサの振動等)による発電や、異常振動の観測による自律的なセンサーが実現可能になることが期待できる。特に本研究で対象とした現象では、デバイスの小型化が容易になることが期待できるため、小型の電子デバイスや生体材料と組み合わせた高機能・高付加価値材料への応用の可能性がある。

7.3_研究成果:

高橋英史、強磁場フォーラムフロンティア奨励賞、The 5th High Magnetic Field Forum Frontier Award for Young Researcher、強磁場フォーラム、2023 年