



## 磁性金属における圧電効果を世界で初めて観測

1. 発表者： 塩見 雄毅 （東京大学 大学院総合文化研究科広域科学専攻 准教授）

2. 発表のポイント：

- ◆ 半導体や絶縁体でしか観測されてこなかった圧電効果（注1）を、金属材料で初めて観測しました。
- ◆ 磁性の発現による空間反転対称性（注2）の破れに起因する磁気圧電効果（注3）に注目したことが成功の鍵です。
- ◆ 鉛フリー圧電材料開発の新しい設計指針となるだけでなく、導電性、圧電性、および磁性を有した複合機能材料の開発につながります。

3. 発表概要：

東京大学大学院総合文化研究科の塩見雄毅准教授（元 工学系研究科特任講師）らは、磁性金属において圧電効果を世界で初めて観測することに成功しました。圧電効果はセンサーやアクチュエーターなどの電子機器に利用されており実用上重要な物理現象ですが、主流である圧電効果材料は有害な鉛を含んでおり、環境負荷の低減のために鉛フリーの圧電効果材料開発が熱望されています。本成果は、基礎研究として鉛フリーの圧電効果材料開発へ向けた新しい設計指針を提示するものです。また、今後の材料開発により、これまでの圧電材料にはない導電性、圧電性、磁性の全てを併せもつ複合機能材料の実現が期待されます。

今回の成果は、2017年に共同研究者である渡邊光博士課程学生と柳瀬陽一准教授（共に京都大学理学研究科物理学専攻）によって理論提案された磁気圧電効果と呼ばれる物理現象を、石渡晋太郎准教授ら（東京大学工学系研究科物理工学専攻）のグループで合成された磁性金属材料  $\text{EuMnBi}_2$  において世界初観測することにより達成されました。

4. 発表内容：

[研究背景]

圧電効果とは、特定の種類の物質材料に圧力を加えて歪みを生じさせることで、電圧が発生する現象をいいます。身近な応用としてライターの着火石があり、圧力を加えて高電圧を発生させることでガスに着火しています。圧電効果を発現する物質材料は、ひずんだ結晶構造（空間反転対称性のない結晶構造）を有することを特徴とします。空間反転対称性のない結晶においては、規則的に並んだ陽イオンと陰イオンの重心が一致しません。その位置のずれが圧力を加えることで大きくなり、物質材料は電荷の偏り（電気分極）を帯びます。

物質材料が金属である場合には、圧電効果により生じた電気分極が、動き回る多量の電子により打ち消されてしまいます。そのため金属材料は圧電効果を発現しないと考えられてきました。しかし、共同研究者である渡邊と柳瀬は、2017年に空間反転対称性の破れた磁性金属における磁気圧電効果の理論予測を発表しました。通常、圧電効果はフェルミ準位にエネルギーギャップをもつ半導体や絶縁体でしか観測されませんが、磁気圧電効果は物質材料の磁氣的性質（磁性）を利用することでフェルミ面を有する金属材料で観測されることを特徴とします。

## [研究内容]

塩見准教授は、石渡らのグループ（増田、高橋、石渡）により良質な単結晶試料が合成され物理的性質が研究されてきた磁性金属  $\text{EuMnBi}_2$  が磁気圧電効果を発現する条件を満たすことに着目し、実際に磁気圧電効果の実証実験を行いました。実験として、石渡らのグループが合成した  $\text{EuMnBi}_2$  単結晶に交流電流を結晶の面直方向に印加し、そのときに発生する動的変位信号をレーザードップラー振動計（注4）により計測しました。これは圧電効果の逆向きの応答（電圧印加により材料の歪みが生じる現象）である逆圧電効果（注5）の測定に相当します。液体窒素温度（ $-200^\circ\text{C}$ ）から室温まで試料温度を変化させることで、詳しい実験を行いました。

液体窒素温度において、試料に交流電流を印加し、レーザードップラー振動計により試料の振動運動の有無を計測したところ、面内方向にのみ試料の歪みが生じていることがわかりました。これは試料の対称性から期待される磁気圧電効果の発現方向と一致します。また、発生した歪みは印加する電流の大きさに比例して増大し、磁性をもたない  $\text{EuZnBi}_2$  では歪みが見られないことから磁性と関係した現象であることがわかりました。以上の結果は、渡邊らによる磁気圧電効果の理論予測と完全に合致しており、磁気圧電効果が観測されたことが示されました。

今回の成果では、 $\text{EuMnBi}_2$  の導電性が室温付近で比較的悪くなることから、 $-100^\circ\text{C}$  以下の低温でしか磁気圧電効果は観測されませんでした。また、その大きさも実用的な圧電効果材料と比べると 1000 分の 1 程度と小さいものです。しかし、理論的には導電性に比例して磁気圧電効果は大きくなると予測され、多くの磁性合金材料が室温以上の磁気転移点を有することから、今後の材料開発により室温で動作する磁気圧電効果材料の実現が期待されます。

## [本成果の意義]

本成果は、物質材料の磁性に着目することで、今までにない視点から鉛フリー圧電効果材料開発の設計指針を提示します。さらに、理論提案によれば導電性がよいほど圧電性能が上がることを期待されるため、従来は圧電特性との共存が難しかった導電性と磁性を合わせ持った複合機能材料の開発が可能となり、スピントロニクス応用も期待されます。

基礎物理学的には、磁気圧電効果という新現象を世界で初めて観測したことは以下の2つの点で重要な意義をもちます。1つ目に、フェルミ面を有する金属材料において初めて圧電効果が観測されたことは、従来の物理学の常識を打ち破るものです。電荷の偏りによる電気分極と関係した圧電効果は絶縁体や半導体で研究されてきましたが、その研究舞台が伝導電子を有する金属材料に広がりました。

2つ目に、磁気圧電効果が近年の物性物理学で注目を集める複数のキーワードと深く関係していることが挙げられます。磁気圧電効果は、電気磁気効果（注6）の金属への拡張と見なすことができ、トポロジー効果（注7）との関係も理論的に議論されています。さらには、ネマティック秩序（注8）や奇パリティ多極子（注9）が磁気圧電効果の物理的機構の鍵であることも理論的に指摘されており、さまざまな方向への今後の研究発展が見込まれます。

## 5. 発表雑誌：

雑誌名：「Physical Review Letters」（2019年3月29日オンライン版掲載）

論文タイトル：Observation of a Magnetopiezoelectric Effect in the Antiferromagnetic Metal EuMnBi<sub>2</sub>

著者：Yuki Shiomi\*, Hikaru Watanabe, Hidetoshi Masuda, Hidefumi Takahashi,  
Yoichi Yanase, and Shintaro Ishiwata

DOI 番号：10.1103/PhysRevLett.122.127207

アブストラクト URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.122.127207>

## 6. 問い合わせ先：

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

准教授 塩見 雄毅（しおみ ゆうき）

東京大学大学院総合文化研究科ウェブサイト：<http://www.c.u-tokyo.ac.jp/>

塩見准教授研究室ウェブサイト：<http://yukishiomi.com/>

## 7. 用語解説：

（注1） 圧電効果

圧電効果とは、特定の種類の物質材料に圧力を加えることで生じる歪みに比例して、電圧が発生する現象をいいます。1880年に、ノーベル物理学賞受賞者のピエール・キュリーとその兄のジャック・キュリーが発見しました。

（注2） 空間反転対称性

大抵の物質材料の結晶構造を見てみると対称性よく原子が周期的に並んでいます。しかし、物質材料の中には空間を反転させたときに原子位置が元の結晶構造と一致しない物質材料も存在します。このような状態を空間反転対称性が破れたと言います。このような特殊な物質材料では低い対称性に起因した特別な物理現象が起きることが知られています。

（注3） 磁気圧電効果

**Magnetopiezoelectric effect** の日本語訳。空間反転対称性が破れた磁性金属において、電流により歪みが生じる現象、およびその逆で歪みにより電流が誘起される現象を指します。2016年と2017年に、異なった文脈でバージャスら (*Phys. Rev. Lett.* 117, 257601 (2016)) と渡邊・柳瀬 (*Phys. Rev. B* 96, 064432 (2017)) が独立に理論的に提案しました。

（注4） レーザードップラー振動計

レーザーのドップラー効果を利用して試料の振動を測定する計測器。ピコメートルレベルの微小な動的変位を計測できます。

（注5） 逆圧電効果

圧電効果が発生する物質材料に電圧をかけると、結晶が変形します。これを、逆圧電効果とよびます。逆圧電効果は、圧電効果が発見された翌年の1981年、リップマンにより熱力学の法則から数学的に導かれ、キュリー兄弟により実験的に確認されました。

(注6) 電気磁気効果

通常は電場（磁場）の印加によって電気分極（磁化）が誘起されますが、対称性の低い物質材料では電場（磁場）の印加によって磁化（電気分極）が誘起されることがあります。この現象のことを電気磁気効果と呼びます。19世紀末にピエール・キュリーによって提案されました。

(注7) トポロジー効果

トポロジーは「連続変形に対する不変性」に関する数学の概念ですが、近年では物質科学においても重要な概念であることが見出されています。電子の波動関数のトポロジー的性質が非自明な物理現象をもたらすことが明らかになり、活発に研究されています。

(注8) ネマティック秩序

電子系のネマティック秩序とは、結晶格子から期待される回転対称性を電子系が自発的に破るような非自明な状態を指します。高温超伝導体などで観測されており、高い超伝導転移温度との関連が議論されています。

(注9) 奇パリティ多極子

多極子は物質内部の異方的な電荷・磁荷分布を記述する物理量です。空間反転対称性のない物質材料では奇パリティ多極子が現れ、電流により磁化が誘起されるなど非自明な物理現象をもたらします。

8. 添付資料：

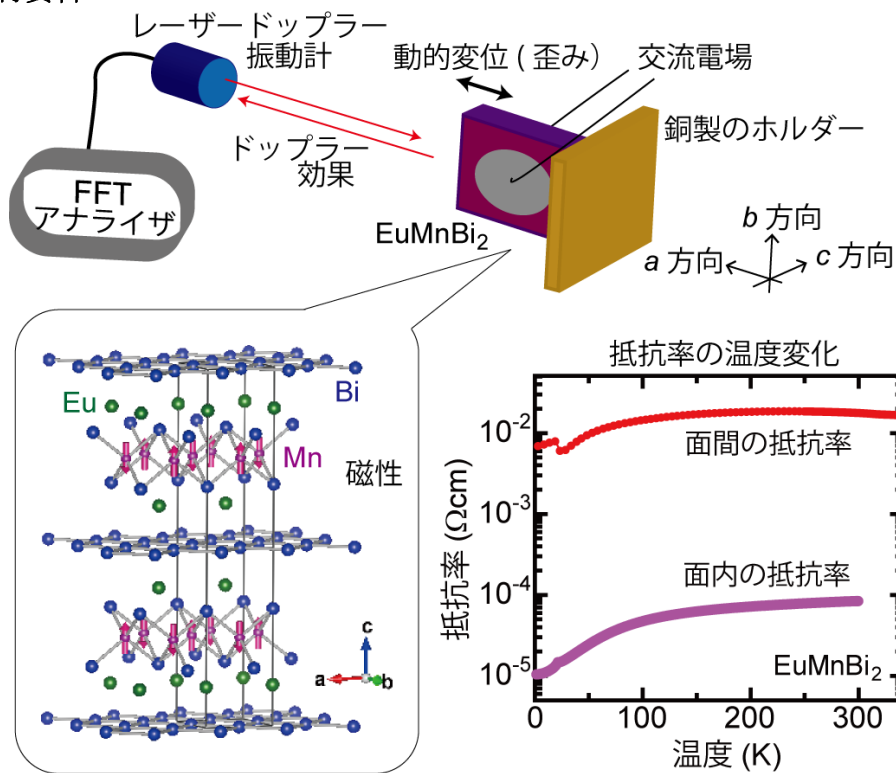


図1.  $\text{EuMnBi}_2$  試料の性質と逆圧電効果測定概念図。 $\text{EuMnBi}_2$  試料は室温以下で磁性金属である。交流電場を印加することで誘起される動的変位（歪み）をレーザードップラー振動計で測定する。

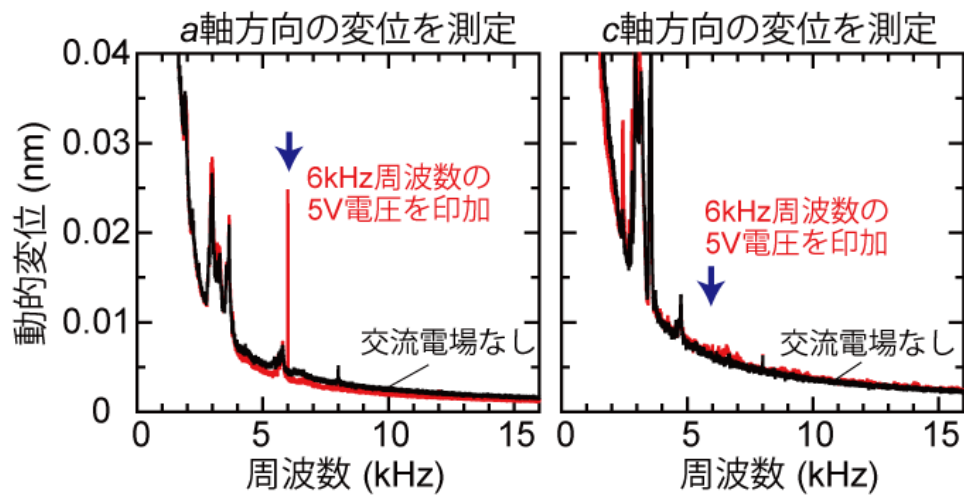


図2. 液体窒素温度における実験結果の一例。試料の面間方向 (c 軸方向) に周波数 6kHz の交流電場を印加したとき、面内方向 (a 軸方向) には同じ周波数に動的歪みが観測されるが、面間方向 (c 軸方向) には観測されない。これは  $\text{EuMnBi}_2$  試料の対称性から理論的に予測される磁気圧電効果の方向依存性と合致する。