

整流特性の新原理を発見 —エキゾチックな結晶における新機能の開拓—

1. 発表者：

井手上敏也（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター 助教）
濱本 敬大（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 博士課程1年）
越川 翔太（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 修士課程1年）
江澤 雅彦（東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 講師）
清水 直（理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム 研究員）
金子 良夫（理化学研究所 創発物性科学研究センター 強相関物性研究グループ 上級技師）
十倉 好紀（理化学研究所 創発物性科学研究センター センター長／東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授）
永長 直人（理化学研究所 創発物性科学研究センター 副センター長／東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授）
岩佐 義宏（東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター、同研究科物理工学専攻 教授／理化学研究所 創発物性科学研究センター 創発デバイス研究チーム チームリーダー）

2. 発表のポイント：

- ◆従来のpn接合（注1）に由来する機構とは異なる、新しい原理の整流特性（注2）を発見。
- ◆結晶の空間反転対称性の破れに特有の整流特性であり、微視的機構を解明。
- ◆本研究成果が、エキゾチックな結晶における上記の新機能を開拓し、一般の空間反転対称性の破れた結晶における非線形電気伝導研究という新たな学術分野を切り開くことに期待。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の井手上敏也助教、同研究科物理工学専攻の濱本敬大大学院生、越川翔太大学院生、同研究科の岩佐義宏教授（理化学研究所 創発物性科学研究センターチームリーダー兼任）、永長直人教授（理化学研究所 創発物性科学研究センター副センター長兼任）、十倉好紀教授（理化学研究所 創発物性科学研究センターセンター長兼任）らの研究グループは空間反転対称性の破れた三次元層状化合物であるBiTeBr（Bi：ビスマス、Te：テルル、Br：臭素）が磁場を加えた状況下で整流特性を示すことを発見した。

従来の整流特性は電子型の半導体（n型半導体）とホール型の半導体（p型半導体）を接合（pn接合）させたダイオード素子や界面デバイス等で実現されていたが、本研究で観測した整流特性は結晶構造における空間反転対称性の破れに起因した物質固有の性質であり、整流特性の新しい原理を見出したと言える。本研究ではさらに、整流特性の磁場・電流・キャリア数（電荷を運ぶ粒子の数）・温度依存性等を詳細に測定することにより、観測された整流特性が極性構造（注3）を持つ結晶に特有の現象であり、極性構造に由来する固体電子状態によって定量的に説明できることを明らかにした。

本研究成果は、エキゾチックな結晶構造が示す機能性の探索を推進させるだけでなく、一般の空間反転対称性の破れた結晶における非線形電気伝導研究という新たな学術分野を切り開くものとして期待される。

本研究成果は、英国科学雑誌『Nature Physics』（3月6日イギリス時間）に掲載される。

4. 発表内容：

①背景

空間反転対称性が破れた結晶は、非線形光学応答や非従来型超伝導状態等、さまざまな物理現象の舞台である。特に、結晶対称性の電気伝導への影響は基礎・応用の両面から重要であり、整流特性は空間反転対称性が破れた物質で期待される特徴的な電荷輸送現象の一つである。

物質固有の整流性が巨大になれば、単一物質でダイオード特性を実現できる他、物質内の相互作用等、従来まで測定が難しかった物理量を見積もるための適切な手法となる可能性がある。しかしながら、現在までにキラルな構造（注4）を持つナノ構造体や有機導体といった、ごく限られた物質での報告例しかなく、微視的機構も解明されていなかったため、シグナル増大のための指針が不明瞭であった。

②研究内容

本研究では、空間反転対称性の破れた極性結晶構造を持つ縮退半導体である **BiTeBr** において、結晶対称性の破れに起因する整流特性の観測を行った。**BiTeBr** (図A) は、**Bi** (ビスマス)、**Te** (テルル)、**Br** (臭素) の各原子層が積層した層状化合物である。積層方向への鏡像反転対称性が破れており、結晶全体で電気分極を持つような極性物質である。このような極性物質においては、特有の電子状態が実現されることが知られており、面内に磁場を印加すると分極方向と磁場方向の両方に垂直な方位へ電子状態が歪み、その方向へ整流特性が生じることが期待できる。実験では、**BiTeBr** 試料を基板上に劈開（へきかい、注5）してマイクロ（100万分の1）メートルサイズの試料を得た後、電子線描画装置を用いて電極を作製し、単一極性ドメインであると期待されるデバイスを作製した（図B）。

作製したデバイスの磁場下電気伝導特性を測定したところ、磁場を電流と平行に加えた場合には整流特性は観測されず、磁場を電流に対して垂直に加えた場合（図C）にのみ整流特性が観測されることが分かった。この整流特性の磁場方位依存性は、極性構造を持つ物質に特有の性質であり、極性物質において初めて結晶対称性の破れに起因した整流特性を観測したと言える。本研究では、さらに観測された整流特性の温度・キャリア数依存性等を詳細に測定することにより、低温領域やキャリア数の少ない試料において、整流特性が著しく増大することを発見した。これら低温・低キャリア数領域での整流特性の増大の振る舞いやその定量的な大きさは、前述した極性物質に特有の電子状態に基づいた微視的なモデルによって、適切に説明できることが明らかになった。

その結果、本研究で発見した結晶対称性の破れに起因する整流特性は、空間反転対称の破れた物質における新機能であるだけでなく、電子状態を決定している微視的な相互作用を決定する手段としても有用であることが示唆された。

③今後の展望

本研究では、空間反転対称性が破れた結晶で観測される新しい原理の整流特性を発見し、微視的な機構を明らかにした。このような整流特性や電流の非線形応答は、空間反転対称性が破れた結晶に普遍的な現象であると考えられる。今後、さまざまな空間反転対称性の破れた結晶において、整流特性も含めた非線形電気伝導現象の包括的な研究・新機能性開拓が飛躍的に進展することが期待される。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Physics」（オンライン版：3月6日午後4時：イギリス時間）

論文タイトル：Bulk rectification effect in a polar semiconductor

著者：T. Ideue*, K. Hamamoto, S. Koshikawa, M. Ezawa, S. Shimizu, Y. Kaneko,
Y. Tokura, N. Nagaosa, Y. Iwasa*

DOI 番号：10.1038/NPHYS4056

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター
助教 井手上 敏也（いでうえ としや）

東京大学大学院工学系研究科附属量子相エレクトロニクス研究センター
教授 岩佐 義宏（いわさ よしひろ）

7. 用語解説：

注1：pn 接合

電気伝導を担うキャリアが電子型の半導体（n型半導体）とホール型の半導体（p型半導体）を接合させた部分・構造。整流特性や電界発光、光起電力効果等の性質を示し、ダイオードやトランジスタ等さまざまなエレクトロニクスデバイスに応用されている。

注2：整流特性

電流を特定の方位へ流す場合に、正方向に流す場合と逆方向へ流す場合で電気伝導特性が異なるような現象。

注3：極性構造

分子や結晶内に電氣的な偏りがある構造。

注4：キラルな構造

物体が、その鏡像と重ね合わせることができない性質。（対）掌性。

注5：劈開（へきかい）

断面観察や薄膜試料を作製するときの試料作製法の一つ。結晶性試料が特定の結晶面に沿って割れる劈開性を持っているときに利用される。

8. 添付資料：

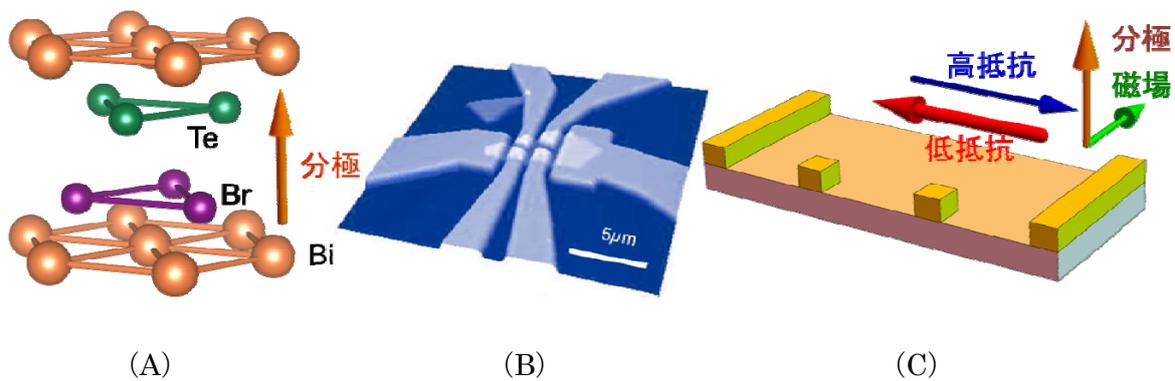


図. 極性半導体 BiTeBr の結晶構造 (A)、BiTeBr マイクロサイズデバイス試料の原子間力顕微鏡像 (B) および整流特性の模式図 (C)