

# 有機ディラック電子系における電流誘起トポロジカル熱電効果

## [1] 要旨

本論文は、空間反転対称性のない結晶がゼロ磁場で示す新しい電流誘起熱電効果「非線形異常 Ettingshausen 効果」を提案するもので、有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の弱い電荷秩序状態の2次元 Dirac 電子系を例にとって議論している。非線形異常 Ettingshausen 効果は、電流を伴う非平衡分布に誘起された Berry 曲率効果で、電場の垂直方向に電場の自乗に比例した熱流を生成する。そのため電場反転に対し熱流が向きを変えない整流特性（非相反性）をもつ。これは $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>で最近観測された非線形異常 Hall 効果に対応する熱電効果であり、両効果は関連して現れることが期待される。

## [2] 本文

近年、バンドの Berry 曲率に由来した種々のトポロジカル輸送現象が盛んに研究されている。空間反転対称性がなくバンドの Berry 曲率が有限の結晶では、磁場や磁化の出現などにより時間反転対称性を破ると、ゼロ磁場で内因性の異常 Hall 効果や異常 Nernst 効果が生じる。これらは Berry 曲率を感じて外場下で電子が得る異常速度の和が有限に残るために生ずる。一方、時間反転対称性があると、平衡状態では実電流を伴うこれらの現象は現れない。これは Berry 曲率が波数空間で奇関数であるために、異常速度の占有状態についての総和が相殺するからである。

しかし定常電流を流した非平衡状態では、これらが非線形現象として現れる可能性がある。電流が流れた状態では占有状態の分布が平衡分布からずれるので、異常速度の相殺が破れる場合があるからである。2015年に Inti Sodemann と Liang Fu は、時間反転対称性がある系でも Berry 曲率双極子という量が有限になれば、異常 Hall 効果が非線形効果として電流誘起されることを示した。この非線形異常 Hall 効果は、実際に超薄膜 WTe<sub>2</sub>などで観測された。さらに歪を加えた MoS<sub>2</sub>超薄膜では Berry 曲率双極子に由来して軌道磁化が電流誘起される軌道 Edelstein 効果が発見された。

非線形異常 Hall 効果は有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の「弱い電荷秩序」状態でも観測されている。弱い電荷秩序状態は Dirac 半金属相直近の電荷秩序状態であるが、ギャップの開いた傾斜 Dirac コーンをもつ2次元 massive Dirac 電子系であることが最近実験的に確認された。これは Berry 曲率双極子をもつ最も単純な系で、新しい電流誘起現象を探索する上で理想的なプラットフォームとなる。

最近、東京大学物性研究所の研究グループは、新しい電流誘起トポロジカル現象である非線形異常 Ettingshausen 効果を初めて提案した。これは非線形 Hall 効果の熱電効果におけるアナロジーであり、電場に直交する熱流がゼロ磁場下で電場の自乗に比例して生ずる現象である。具体的な系として層状有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>の弱い電荷秩序状態を取り上げ、その2次元 massive Dirac 電子系について議論を行った。そこでは、非線形異常 Ettingshausen 効果が、熱電 Berry 曲率双極子が有限になれば起こること、電流応答が非線形異常 Hall 効果と連動して起こること、熱流が電場反転しても同じ方向に流れる整流特性（非相反性）を示すことを明らかにした。さらに現実の $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>結晶において観測可能であることも示した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の 2021年5月号に掲載された。

平衡分布におけるトポロジカル輸送現象については、これまで多くの研究がなされてきた。これに対し、平衡状態で時間反転対称性のため現れないトポロジカル現象を、電流下の非平衡分布を用いて誘起しようとする研究は新しい潮流である。しかし一般に（熱電）Berry 曲率双極子是对称性

の高い結晶では消えてしまうので、電流誘起トポロジカル現象が期待できる系は多くはない。そのような系の候補として有機導体 $\alpha$ -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の「弱い電荷秩序」状態に着目した点は、本論文の大きな特徴であり、有機導体分野では初の試みである。

非線形異常 Ettingshausen 効果の整流特性は、交流電場に対しても結晶内に一定方向の直流熱流が流れることを意味する。これは電磁波照射により結晶内に温度差を生み出す遠隔冷却技術に結びつく物性である。こうした応用可能性も含めて、今後、非線形熱電効果の研究が進展することが期待される。

原論文(4月15日オンライン公開済)

Possible Nonlinear Anomalous Thermoelectric Effect in Organic Massive Dirac Fermion System  
Toshihito Osada and Anadhika Kiswandhi, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 053704 (2021)

<情報提供 長田 俊人 (東京大学物性研究所) >

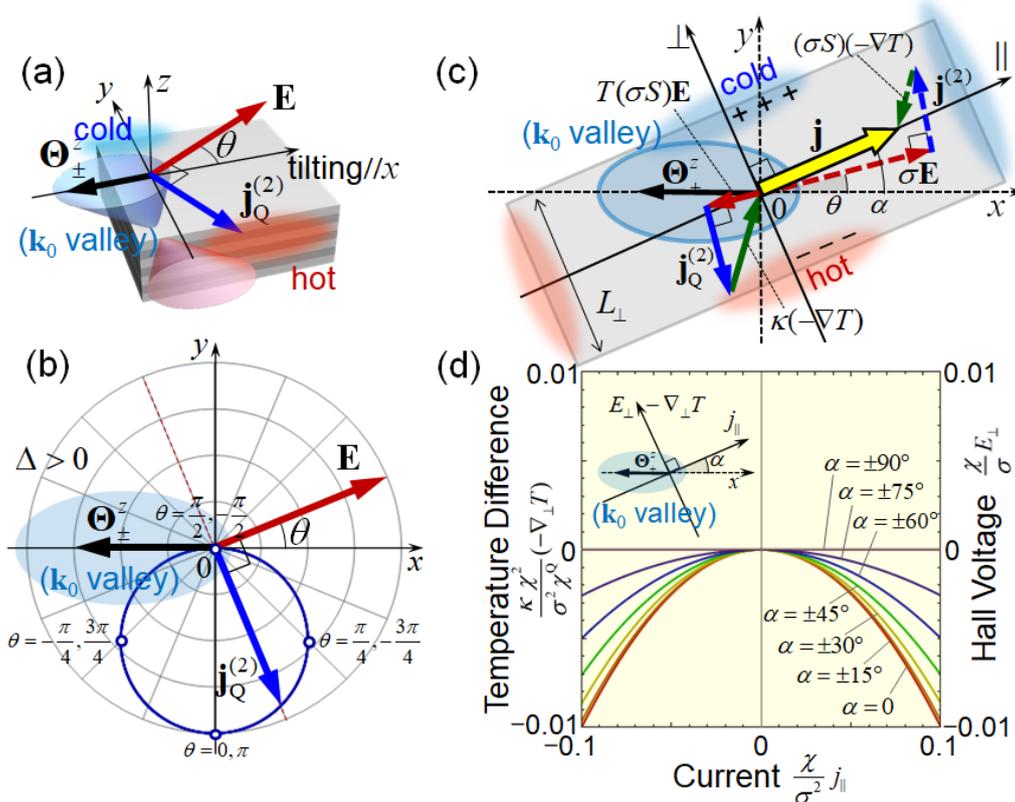


図1. 非線形異常 Ettingshausen 効果の整流特性：電場方向依存性(a, b)と電流依存性(c, d)