

令和 5 年 5 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01860

研究課題名（和文）強磁場極限におけるトポロジカル半金属の新しい量子熱電効果

研究課題名（英文）New Quantum Thermoelectric Effects in Topological Semimetals under High Magnetic Fields

研究代表者

長田 俊人 (Osada, Toshihito)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：00192526

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：強磁場量子極限のトポロジカル半金属で期待される量子熱電Hall効果（QTHE）について、2次元massless Dirac電子系-(BEDT-TTF)213と直線的nodal lineを持つ3次元半金属のグラファイトを対象に実験的・理論的研究を行った。前者では基底Landau準位のスピン分裂の結果QTHEは痕跡を残して抑制されることを示した。後者ではDirac/Weyl半金属と同様にQTHEが現れることを確立した。さらに-(BEDT-TTF)213の弱い電荷秩序状態において非線形異常Hall効果を実証し、その熱電効果版である非線形異常Ettingshausen効果を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

冷却や発電などエネルギー変換に用いる熱電材料の探索は近年進んでいるが、宇宙空間などの低温環境でも使用可能な熱電材料は未知である。そのため低温でも有限の熱電性能を示すトポロジカル半金属の強磁場量子極限における量子熱電Hall効果（QTHE）が注目されてきた。本研究は2次元系ではスピン分裂がQTHEを抑制すること、3次元系ではnodal-line系にもQTHEが拡張できることを示したもので、QTHEの物理の基礎学術的理解を深めると共に、応用上の限界と材料選択の自由度についての新たな知見を与えた。

研究成果の概要（英文）：We conducted experimental and theoretical studies on the quantized thermoelectric Hall effect (QTHE) expected in topological semimetals under the high-magnetic-field quantum limit, using a two-dimensional massless Dirac fermion system -(BEDT-TTF)213 and the three-dimensional semimetal graphite with straight nodal lines. In the former, we showed that QTHE is suppressed with traces due to the spin splitting of the ground Landau level. In the latter, we established the appearance of QTHE similar to Dirac/Weyl semimetals. Furthermore, we demonstrated the nonlinear anomalous Hall effect in the weak charge ordered state of -(BEDT-TTF)213 and proposed its thermoelectric analogue, the nonlinear anomalous Etingshausen effect.

研究分野：物性物理学（低次元物質の量子輸送現象・トポロジカル量子物性）

キーワード：量子熱電ホール効果 トポロジカル半金属 ディラック電子系 有機導体 ノーダルライン半金属 グラファイト 強磁場 非線形異常ホール効果

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トポロジカル輸送現象は現代物性物理学の重要なトピックスの1つであり、量子 Hall 効果や量子スピン Hall 効果などのトポロジカル伝導効果を中心に研究が展開してきた。一方、冷却や発電などのエネルギー変換に利用できる熱電効果は、近年 energy harvesting など応用的観点から材料探索が盛んに行われている。しかし一般に熱電効果は低温で小さくなるため、宇宙空間などの低温環境で使用可能な熱電材料は未開拓である。この問題をトポロジカル熱電効果を用いて解決する処方箋が、米国 MIT の Liang Fu 教授らによって 2018 年に提案された。これは強磁場量子極限下の 2 次元および 3 次元トポロジカル半金属における新機構の熱電効果である「量子化された熱電 Hall 効果 (量子熱電 Hall 効果)」を利用するものである。

[A] 2 次元 massless Dirac 電子系の強磁場量子極限における量子熱電 Hall 効果 (QTHE) [Liang Fu, arXiv: 1909.09506] とは、2 次元 Dirac 電子系特有のエネルギーゼロの $n = 0$ 基底 Landau 準位に Fermi 準位が位置する量子極限で、熱電 Hall 伝導度 $\alpha_{xy} (= j_x / (-yT))$ が低温で (単一のスピン・バレーあたり) 普遍的な一定値 $(\log 2)k_B e/h$ に量子化される現象である。このとき系がクリーンならば、十分強磁場で Seebeck 係数 $S_{xx} \sim \alpha_{xy} / \sigma_{xy}$ が磁場に比例して際限なく増大する非飽和熱電能が期待できる。

[B] 3 次元トポロジカル半金属の強磁場量子極限における量子熱電 Hall 効果 [B. Skinner and Liang Fu, Sci. Adv. 4, eaat2621 (2018), V. Kozii et al, Phys. Rev. B 99, 155123 (2019)] は、ノード点を持つ 3 次元 Weyl/Dirac 半金属に特有の $n = 0$ カイラル Landau サブバンドのみが Fermi 準位を横切る量子極限で、熱電 Hall 伝導度 α_{xy} が低温で温度に比例した (磁場やキャリア数に依存しない) 一定値に量子化される現象である。この場合も系がクリーンならば十分強磁場では S_{xx} が磁場に比例する非飽和熱電能が期待できる。

本代表者は 2019 年 9 月に有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ を対象とした[A]に関する問い合わせを Liang Fu 教授より受け、本研究課題への興味を喚起された。一方、[B]については現在までに幾つかの検証実験が試みられ、スピン軌道相互作用由来の微小ギャップを持つ Dirac 半金属 Pb_{1-x}Sn_xSe で非飽和熱電能 [T. Liang et al., Nat. Comms. 4, 2696 (2013)] が、Dirac 半金属 ZrTe₅ で量子熱電 Hall 効果のプラトー [W. Zhang et al., Nat. Comms. 11, 1046 (2020)] が、また Weyl 半金属 TaP で非飽和熱電能と量子熱電 Hall 効果 (外挿) [F. Han et al, Nat. Comms. 11, 6167 (2020)] が報告されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強磁場量子極限におけるトポロジカル半金属の「量子熱電 Hall 効果 (QTHE)」の実験的検証を行い、低温での応用可能性を見極めることである。具体的には、[A]に関連して、圧力下の有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ の 2 次元 massless Dirac 電子系を対象に、QTHE の兆候を探索すること、[B]に関連して、グラファイトなど広義の 3 次元トポロジカル半金属にまで範囲を広げて QTHE の探索をより一般的に行うことを目標とした。

3. 研究の方法

本研究では[A]有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ と[B]半金属グラファイトを具体的な対象物質として、熱電特性に関する実験的および理論的研究を進めた。

実験では、長方形平板状に整形した単結晶に電極・熱電対・ヒータを取り付けた試料を準備し、13T 超伝導磁石と ³He 冷凍機、2GPa ピストンシリンダー型圧力セルによる強磁場・低温・高圧環境に置いて熱電効果の測定を行った。熱電能テンソル S (Seebeck 係数 S_{xx} と Nernst 係数 S_{xy}) を交流法により測定すると同時に、同一試料について電気抵抗 (縦抵抗 R_{xx} と Hall 抵抗 R_{xy}) 測定を行い電気伝導度テンソル σ を求めた。試料サイズ、ヒータ・熱浴間隔 (温度勾配)、電極間隔等を顕微鏡写真から正確に決定した。これらから熱電伝導度テンソル $\alpha = \alpha S$ を算出し、その非対角要素として熱電 Hall 伝導度を得た。

一方、Liang Fu らの理論を拡張し、[A] 2 次元 massless Dirac 電子系の $n = 0$ Landau 準位のスピン・バレー縮退が解けた場合の QTHE の振舞いと、[B] (点ノードではなく) 直線ノードを持つ 3 次元トポロジカル半金属 (nodal-line 半金属) における QTHE の理論的考察を行った。[A] α -(BEDT-TTF)₂I₃ と[B]グラファイトの実験結果をこれらの理論計算と比較することにより、現実の物質における QTHE の発現に関する知見を得た。

4. 研究成果

(1) 2 次元 massless Dirac 電子系における準位分裂による量子熱電 Hall 効果の抑制

Liang Fu による 2 次元 massless Dirac 電子系の量子熱電 Hall 効果 (QTHE) の理論は、 $n = 0$ Landau 準位の中心座標に関する巨大な縮退とスピン・バレー縮退を仮定しており、この巨大な縮退自由度のために熱電 Hall 伝導度 α_{xy} は絶対零度でもゼロにならず有限の量子化値が残る。これは絶対零度で自由度が凍結するとする熱力学第三法則の想定を外れるものである。現実の系では自由度は相互作用や乱れにより必ず凍結し、低温極限では最終的に α_{xy} はゼロとなる。

圧力下 ($P > 1.5$ GPa) の有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ では、2 次元 massless Dirac 電子系が実現

し、強磁場量子極限 ($B > 3$ T) では Zeeman 効果や電子間相互作用により $n = 0$ Landau 準位のスピン (バレー) 縮退が解けた $\nu = 0$ 量子 Hall 強磁性 (絶縁体) 状態が実現している。この系の熱電 Hall 効果を議論するために、準位分裂が量子熱電 Hall 効果に及ぼす影響を、Liang Fu と同様に Girvin-Jonson のエッジ描像を用いて調べた[1]。クリーン極限のみを考え散乱効果は取り入れなかった。図 1 (a) に熱電 Hall 伝導度 α_{xy} の温度依存性を示す。破線は準位分裂がない場合で低温で α_{xy} が量子化値 $4(\log 2)k_B e/h$ に漸近してプラトーになる QTHE が見られる。実線は Zeeman

効果による準位分裂がある場合で、低温で α_{xy} は量子化値に漸近しようとするが、温度 (分布幅) が準位分裂より小さくなると α_{xy} はさらに減少するため、量子化値にプラトーの痕跡として「肩状構造」を残す。図 1 (c) は Seebeck 係数 S_{xx} の磁場依存性で、破線は準位分裂がない場合の QTHE に対応する。破線の傾きは補償キャリア数 $n - p$ に反比例し、 S_{xx} は磁場に比例して際限なく増大する非飽和熱電能を示す。実線は Zeeman 効果による準位分裂がある場合で、高磁場で S_{xx} は破線から外れて「こぶ状構造」を残して減少し、非飽和熱電能を示すことはない。

α -(BEDT-TTF)₂I₃ についての熱電効果の測定[J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 073601 (2013)]から算出した α_{xy} の温度依存性を図 1(b) に、測定された S_{xx} の磁場依存性のプロットを図 1(d) に示す。 α_{xy} の温度依存性における量子化値付近の「肩状構造」、 S_{xx} の磁場依存性における「こぶ状構造」が見られ、QTHE が痕跡を残して抑制されていたことが確認された。

[1]"Thermoelectric Effect at Quantum Limit in Two-Dimensional Organic Dirac Fermion System with Zeeman Splitting", T. Osada, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 113703 (2021).

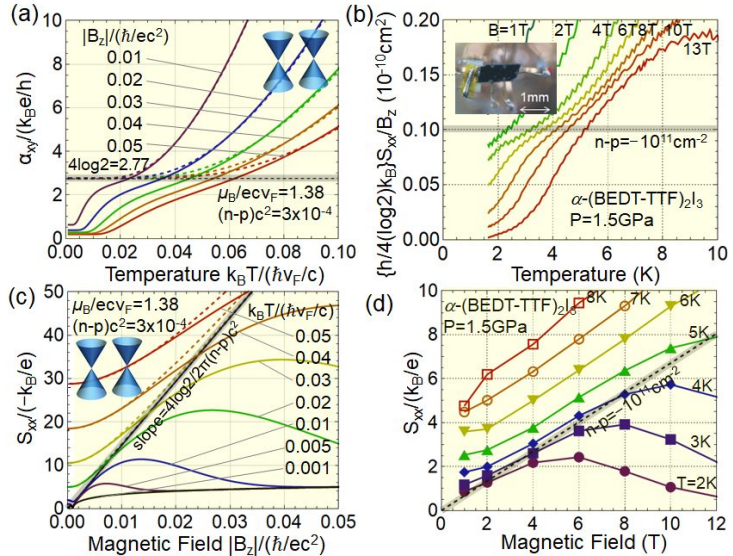


図 1 スピン分裂のある 2 次元 massless Dirac 電子系と α -(BEDT-TTF)₂I₃ の熱電 Hall 伝導度と Seebeck 係数。

(2) 直線ノードを持つ 3 次元 nodal-line 半金属における量子熱電 Hall 効果の実証

3 次元 Dirac/Weyl 半金属では、 $n = 0$ カイラル Landau サブバンドのみが Fermi 準位と交差する強磁場量子極限において、熱電 Hall 伝導度 α_{xy} が磁場に対し一定となる量子熱電 Hall 効果 (QTHE) を示す。系が十分クリーンならば Seebeck 係数 S_{xx} は磁場に比例する非飽和熱電能を示す。本研究では、点ノードを持つ Dirac/Weyl 半金属に加えて、直線的な線ノードを持つ 3 次元 nodal-line 半金属でも QTHE が発現することを理論的・実験的に示した。

モデル系として 2 次元 Dirac 電子系が積層した 3 次元半金属を考察した[2]。この系では各層の Dirac 点が積層方向に連結して直線ノードが形成される。積層方向に強磁場を印加すると、各層の $n = 0$ Landau 準位が結合して、積層方向に分散を持ち磁場依存性のない $n = 0$ Landau サブバンドが形成される。Dirac/Weyl 半金属と同様の議論を行い、 $n = 0$ Landau サブバンドのみが Fermi 準位と交差する強磁場量子極限において α_{xy} が磁場に対しほぼ一定となることを示した。これ

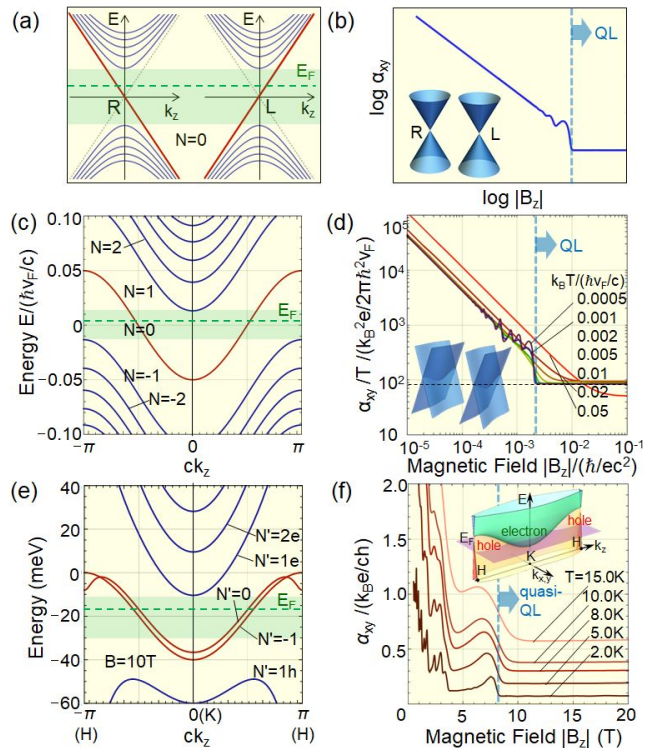


図 2 (a)(b) 3 次元 Dirac/Weyl 半金属、(c)(d) 直線 nodal-line 半金属、(e)(f) グラファイトの Landau サブバンド分散と熱電 Hall 伝導度の磁場依存性。

は QTHE に他ならない。nodal-line 系の $n = 0$ Landau サブバンドの Fermi 準位近傍の線形部分が、Dirac/Weyl 半金属の線形なカイラル Landau サブバンドの対と同様に機能した結果である。

このような nodal-line 半金属物質の具体例としてグラファイトを選び、熱電 Hall 効果の定量的計算を行った[2]。グラファイトは (Dirac 電子系であるグラフェンではなく) 二層グラフェンが積層したものであり、積層方向の直線ノードに沿って伝導帯と価電子帯が接触する電子構造を持つ。擬量子極限となる強磁場領域では、二層グラフェンの縮退した $n = 0$ および $n = 1$

Landau 準位に対応して、磁場に依存しない $N' = -1$ Landau サブバンドと弱く依存する $N' = 0$ サブバンドの 2 つが Fermi 準位と交差する。Slonczewski-Weiss-McClure バンドモデルを用いて計算したグラファイトの Landau サブバンドを用いて α_{xy} を数値的に評価した結果、擬量子極限領域では二層グラフェンシートあたり $0.036 \text{ [K}^{-1}\text{] } T (k_{\text{B}}e/h)$ 程度のプラトー値をとることが結論された (QTHE)。一方、Hall 伝導度が磁場に反比例しないため Seebeck 係数 S_{xx} は非飽和熱電能を示さない。

バルクの Kish グラファイト単結晶についての熱電効果と電気伝導の同時測定を行い、熱電 Hall 伝導度 α_{xy} を算出した。その結果、系が擬量子極限に入る 8 T 以上の磁場領域で、十分低温では α_{xy} は磁場に対しほぼ平坦になり、その値は二層あたり概ね $0.036 \text{ [K}^{-1}\text{] } T (k_{\text{B}}e/h)$ に従うことがわかった[3]。ただし $N' = 0$ サブバンドの弱い磁場依存性を反映して、平坦部でも α_{xy} は磁場に対し僅かに増大する。一方、Seebeck 係数 S_{xx} は非飽和熱電能を示さなかった。これらの結果は理論計算を確認するものであり、nodal-line 系の QTHE の実例となっている。

[2]"Thermoelectric Hall Effect at High-Magnetic-Field Quantum Limit in Graphite as a Nodal-Line Semimetal", T. Osada, T. Ochi, and T. Taen, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 063701 (2022).

[3]"Quantized thermoelectric Hall plateau in the quantum limit of graphite as a nodal line semimetal", A. Kiswandhi, T. Ochi, T. Taen, M. Sato, K. Uchida, and T. Osada, Phys. Rev. B **107**, 195106 (2023).

(3) 2次元 massive Dirac 電子系における電流誘起非線形トポジカル輸送現象

層状有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ は常圧で電荷秩序の発生による金属絶縁体転移を 135K で示すが、これは加圧により抑制され、臨界圧 1.2GPa 以上では 2次元 massless Dirac 電子系が低温まで実現する。研究内容(1)の予備実験として、 α -(BEDT-TTF)₂I₃ の磁気抵抗の温度依存性を圧力を変えて調べたところ、臨界圧直下の「弱い電荷秩序」状態における磁気抵抗の温度依存性にピーク構造が現れ、その磁場依存性が Dirac 点に小さなギャップが開いた 2次元 massive Dirac 電子系の振舞いとして説明できることがわかった[4]。

2次元 massive Dirac 電子系では有限の Berry 曲率に由来するトポジカルな異常輸送現象が期待される。しかし時間反転対称性の下では、Kramers 対をなす 2つの Dirac コーン (バレー) の Berry 曲率が逆符号となるため、熱平衡状態では異常輸送現象は相殺されてしまう。しかし電流を流した非平衡状態 (current-carrying state) では、Dirac コーンの傾斜のためにバレー間の相殺が破れ、異常輸送現象が非線形現象として電流誘起される可能性がある。そこでゼロ磁場下の α -(BEDT-TTF)₂I₃ の弱い電荷秩序状態において Berry 曲率双極子を評価し、軌道磁化が電流誘起された「軌道 Edelstein 効果」と、異常 Hall 効果 (AHE) が電流誘起された「非線形異常 Hall 効果」が観測可能であることを定量的に示した[5]。

さらに新しい非線形熱電現象とし

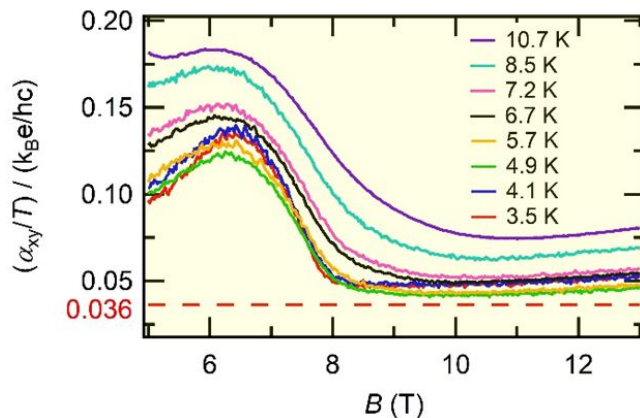


図3 グラファイトの熱電 Hall 伝導度の磁場依存性の測定結果。

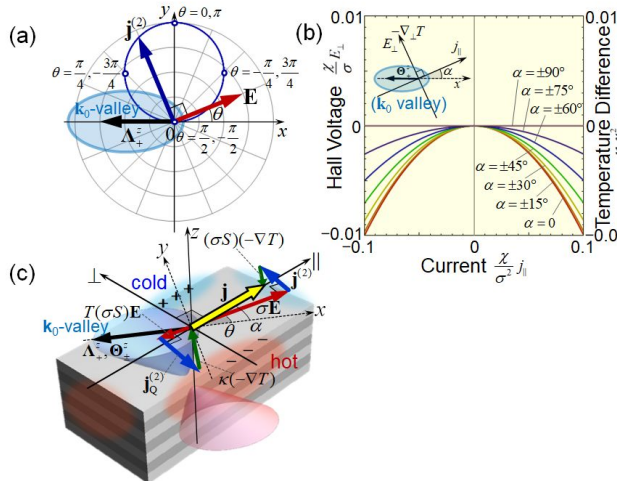


図4 (a)Dirac コーン傾斜軸 (x 軸) に対する非線形ホール電流の電場方向依存性 (向きは電場に垂直)。 (b) 熱的に孤立した試料にゼロ磁場で電流 j_{\parallel} を流した時に電流の垂直方向に発生する異常ホール電圧と温度差。 (c) 電流誘起の非線形 Hall 効果と非線形 Ettingshausen 効果の関係。

て「非線形異常 Ettingshausen 効果」を提案した[6]。これは非線形異常 Hall 効果の熱電効果版である。異常 Ettingshausen 効果 (AEE) は異常 Nernst 効果の相反現象で、ゼロ磁場で時間反転対称性が破れているときに電流に直交する方向に温度勾配が生ずる現象である。時間反転対称性のある系では AHE と同様に AEE は起こらない。しかし系を非平衡な current-carrying state にすると非線形 AEE が電流誘起される可能性がある。 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の弱い電荷秩序状態において「熱電 Berry 曲率双極子」を定義し、非線形 AEE が観測可能であることを定量的に示した。また現実の系では非線形 AEE は非線形 AHE と同時に現れるので、両者が共存する場合の特性についても議論した。

有機導体 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の弱い電荷秩序状態において、電流誘起の非線形 AHE の実験的観測を試みた[7]。約 1.25 GPa の静水圧を印加し、4.2 K に冷却して測定を行ったところ、試料は 30K 程度まで金属的な電気抵抗を示し低温では電荷秩序が十分抑制された弱い電荷秩序絶縁相にあることが確認された。非線形 AHE の測定では、Dirac コーン傾斜軸に対して電流方向を変えるために試料上面に 8 個の端子を円対称に配置し、向かいあう電流端子と対応する Hall 端子を切り替えて測定した。測定された Hall 電圧には端子配置の不完全性による抵抗成分が混入するので、電流方向を逆転して電流反転に対し対称な非線形成分のみを取り出した。これは角周波数 ω で電流反転を繰り返す交流電流を用いて、角周波数 2ω の電圧信号を検波する方法と同等である。得られた非線形 AHE 信号は電流が小さいときは電流の 2 乗に比例し、非線形 AHE 電場は電流方向にかかわらず常に右上方向を向いている。これは電流の向きによらず常に試料の右上方向に正の電荷蓄積が起こることを意味する。この異方性と整流性は Dirac コーンの傾斜方向を反映していると考えられ、非線形 AHE の発現を強く示唆する。

[4] "Experimental Confirmation of Massive Dirac Fermions in Weak Charge-Ordering State in α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ ", K. Yoshimura, M. Sato, and T. Osada, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 033701 (2021).

[5] "Possible Current-Induced Phenomena and Domain Control in an Organic Dirac Fermion System with Weak Charge Ordering", T. Osada and A. Kiswandhi, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 103701 (2020); J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 128002 (2020).

[6] "Possible Nonlinear Anomalous Thermoelectric Effect in Organic Massive Dirac Fermion System", T. Osada and A. Kiswandhi, J. Phys. Soc. Jpn. **90**, 053704 (2021).

[7] "Observation of possible nonlinear anomalous Hall effect in organic two-dimensional Dirac fermion system", A. Kiswandhi and T. Osada, J. Phys.: Condens. Matter **34**, 105602 (2022).

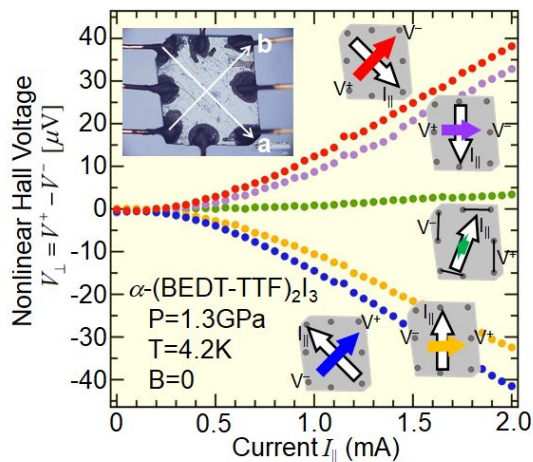


図5 α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の弱い電荷秩序状態における非線形異常 Hall 効果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Osada Toshihito, Kiswandhi Andhika	4. 巻 89
2. 論文標題 Possible Current-Induced Phenomena and Domain Control in an Organic Dirac Fermion System with Weak Charge Ordering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 103701/1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.103701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Osada Toshihito, Kiswandhi Andhika	4. 巻 89
2. 論文標題 Erratum: Possible Current-Induced Phenomena and Domain Control in an Organic Dirac Fermion System with Weak Charge Ordering [J. Phys. Soc. Jpn. 89, 103701 (2020)]	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 128002/1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.128002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 鴻池貴子、内田和人、長田俊人	4. 巻 30
2. 論文標題 有機ディラック電子系における高圧力下熱測定	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 高圧力の科学と技術	6. 最初と最後の頁 274~280
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4131/jshpreview.30.274	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yoshimura Kenta, Sato Mitsuyuki, Osada Toshihito	4. 巻 90
2. 論文標題 Experimental Confirmation of Massive Dirac Fermions in Weak Charge-Ordering State in $\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_3$	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033701/1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.033701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Osada Toshihito, Kiswandhi Andhika	4. 巻 90
2. 論文標題 Possible Nonlinear Anomalous Thermoelectric Effect in Organic Massive Dirac Fermion System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 053704/1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.053704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Osada Toshihito	4. 巻 90
2. 論文標題 Thermoelectric Effect at Quantum Limit in Two-Dimensional Organic Dirac Fermion System with Zeeman Splitting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 113703/1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.113703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kiswandhi Andhika, Osada Toshihito	4. 巻 34
2. 論文標題 Observation of possible nonlinear anomalous Hall effect in organic two-dimensional Dirac fermion system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 105602/1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ac3fd5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 長田俊人	4. 巻 57
2. 論文標題 有機ディラック電子系におけるトポロジカル輸送現象	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 227~240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長田 俊人、アンディカ・キスワンディ	4. 巻 77
2. 論文標題 有機ディラック電子系における非線形トポジカル輸送現象	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 233 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.77.4_233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Osada Toshihito, Ochi Tomotaka, Taen Toshihiro	4. 巻 91
2. 論文標題 Thermoelectric Hall Effect at High-Magnetic-Field Quantum Limit in Graphite as a Nodal-Line Semimetal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 063701/1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.91.063701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kiswandhi Andhika, Ochi Tomotaka, Taen Toshihiro, Sato Mitsuyuki, Uchida Kazuhito, Osada Toshihito	4. 巻 107
2. 論文標題 Quantized thermoelectric Hall plateau in the quantum limit of graphite as a nodal-line semimetal	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195106/1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.195106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 長田俊人, アンディカ・キスワンディ
2. 発表標題 有機ディラック電子系におけるトポジカル輸送現象
3. 学会等名 日本物理学会 (2020年秋季大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長田俊人, アンディカ・キスワンディ
2. 発表標題 質量のある有機ディラック電子系における非線形異常輸送現象
3. 学会等名 日本物理学会 (第76回年次大会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Andhika Kiswandhi, Toshihito Osada
2. 発表標題 Observation of Nonlinear Hall Effect in the Weak Charge Ordered State of β -(BEDT-TTF) ₂ I ₃
3. 学会等名 日本物理学会 (第76回年次大会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長田俊人
2. 発表標題 量子極限下の有機Dirac電子系 β -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ における量子熱電効果
3. 学会等名 日本物理学会 (2021年秋季大会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Andhika Kiswandhi, Toshihito Osada
2. 発表標題 Nonlinear Anomalous Hall Effect in β -(BEDT-TTF) ₂ I ₃ under High Pressure
3. 学会等名 日本物理学会 (2021年秋季大会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長田俊人
2. 発表標題 有機ディラック電子系におけるトポロジカル輸送
3. 学会等名 日本物理学会（第77回年次大会）（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長田俊人
2. 発表標題 強磁場量子極限下のノーダルライン半金属における量子熱電効果
3. 学会等名 日本物理学会（第77回年次大会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 越智友崇, 長田俊人
2. 発表標題 強磁場量子極限下のグラファイト薄膜における量子熱電効果の探索
3. 学会等名 日本物理学会（第77回年次大会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Andhika Kiswandhi, Toshihito Osada
2. 発表標題 Nonlinear Anomalous Transport in the Weak Charge Order Phase of $\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{I}_3$
3. 学会等名 日本物理学会（第77回年次大会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤光幸, 長田俊人
2. 発表標題 多層ディラック電子系での低温強磁場下熱電測定
3. 学会等名 日本物理学会 (2022年秋季大会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長田俊人, 柏木 聖生, アンディカ・キスワンディ
2. 発表標題 質量のある有機ディラック電子系における非線形伝導
3. 学会等名 日本物理学会 (2022年秋季大会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Andhika Kiswandhi, Toshihito Osada
2. 発表標題 Quantum thermoelectric Hall effect study on bulk graphite under magnetic field up to 10 T
3. 学会等名 日本物理学会 (2022年秋季大会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Andhika Kiswandhi, Tomotaka Ochi, Toshihiro Taen, Mitsuyuki Sato, Kazuhito Uchida, Toshihito Osada
2. 発表標題 Quantized thermoelectric Hall conductivity in straight nodal line semimetal: the case of graphite
3. 学会等名 日本物理学会 (2023年春季大会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

長田研究室
<https://osada.issp.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	キスワンディ アンディカ (Kiswandhi Andhika)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------