

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01851

研究課題名(和文)ディラック電子系強磁性体の自発磁化と結合した異常量子輸送現象の開拓

研究課題名(英文) Study of quantum transport phenomena in Dirac magnets with spontaneous magnetisation

研究代表者

酒井 英明 (Sakai, Hideaki)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20534598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁性層とディラック電子層が積層した層状磁性体を対象に、ディラック電子特有の量子輸送現象を自発磁化で制御できる(弱)強磁性体の新規開拓を行った。スピンキャントによる弱強磁性を示すBaMnX<sub>2</sub>では、X正方格子がわずかに歪み、面内方向に極性が生じることを見出した。この歪みは自発磁化に加え、スピン軌道相互作用によりディラック電子にスピンとバレーのロック状態を引き起こすため、弱磁場で特異な磁気輸送現象が発現する。また、磁性と強く結合する反強磁性体EuMnBi<sub>2</sub>では、Euサイトを他の希土類元素で部分置換することで、自発磁化やフェルミエネルギーを系統的に制御できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本系の弱強磁性(スピンキャント)の要因が、極性をもつ格子歪みであることを突き止めた結果、スピンと運動量がロックしたディラック電子が実現していることを解明できた点は、当初の予想外であり、学術的に重要な発見となった。さらに、この特異な電子状態と自発磁化の結合に起因すると思われる新しいホール効果やネルンスト効果の兆候を観測できた点は、将来のデバイス応用に向けて重要な成果である。また、系統的なキャリア濃度制御に成功し、熱電・熱磁気発電の最適化を実証した点は、磁性との強い結合と高移動度が両立する本物質系は、幅広い応用用途が期待できることを示す結果となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have explored novel (weak) ferromagnetic layered Dirac materials, where quantum transport phenomena can be controlled by spontaneous magnetization. In BaMnX<sub>2</sub>, which exhibits weak ferromagnetism due to the canted Mn spins, we found that the X square lattice is slightly distorted and in-plane polarity is generated. This distortion induces not only spontaneous magnetization but also spin-valley locking of the Dirac electrons via the spin-orbit interactions. This peculiar electronic state results in unconventional magnetotransport phenomena at weak magnetic fields. In the antiferromagnet EuMnBi<sub>2</sub> exhibiting strong coupling to magnetism, we have demonstrated that the spontaneous magnetization and Fermi energy can be systematically controlled by partially substituting Eu ions with other rare earth ions.

研究分野：物性物理学

キーワード：磁性ディラック半金属 自発磁化 異常ホール効果 スピン・バレー結合 ワイル磁性体 異常ネルンスト効果

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。

### 1. 研究開始当初の背景

トポロジカルなディラック・ワイル電子状態を有する磁性体は新奇磁気輸送特性を示すため、スピントロニクスなど応用の観点からも注目を集めている。申請者が近年開拓した多層ディラック電子系磁性体はこの好例であり、ディラック電子の高移動度を保持しつつ、局在スピンの強い交換相互作用のため、磁気抵抗効果や(量子)ホール効果を磁化により制御できる。しかし、既存物質は反強磁性体のため、磁化を外部磁場により誘起する必要があった。将来のデバイス応用に向けては、外部磁場がゼロでも発現する自発磁化により、ディラック電子の電気・熱輸送を制御できる物質の開拓が望まれる。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、多層ディラック電子系磁性体を対象に、自発磁化を有する物質(強磁性体または弱強磁性体)を開拓し、新奇磁気輸送現象を解明することを目的とする。具体的には、Mn スピンがわずかにキャントした弱強磁性体  $\text{BaMnSb}_2$  (図1右)と、局在Eu スピンと強く結合した伝導を示す反強磁性体  $\text{EuMnBi}_2$  (図1左)を出発物質とし、元素置換により自発磁化の巨大化や強磁性体化を目指す。また、得られた物質において、自発磁化と結合した新奇電気・熱輸送特性の解明を行う。さらに、自発磁性が発現すると期待できるディラック・ワイル半金属の新物質開拓も進める。

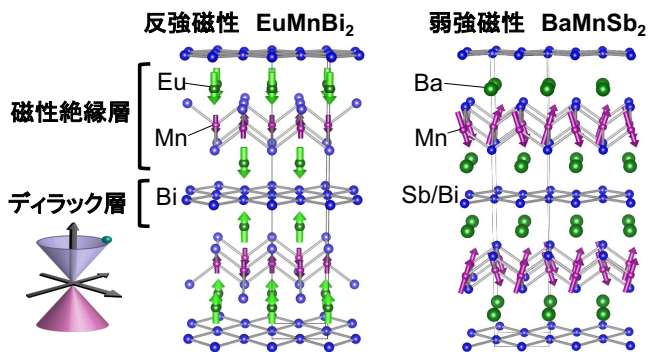


図1: 多彩な磁性を示す多層ディラック電子系磁性体

### 3. 研究の方法

研究対象となる  $\text{AMX}_2$  系物質 ( $A$ =希土類、アルカリ土類、 $M$ =遷移金属、 $X$ =アンチモン、ビスマス)の単結晶は、自己フラックス法やブリッジマン法により合成した。また、従来にない高い元素置換量を達成するために、高圧合成装置による単結晶育成も試みた。純良単結晶の合成には、合成準備におけるすべての行程をグローブボックス内で行う必要がある。このため、専用のパージ型グローブボックス(酸素濃度計付)を購入し、初年度に立ち上げた。

得られた単結晶に対し、研究室現有の超電導マグネットを利用し、磁気輸送特性(磁気抵抗、ホール抵抗、ゼーバック効果、ネルンスト効果)の精密測定を行った。さらに、強磁場施設(東大物性研、東北大、阪大)を利用することで、50 テスラ以上の磁場下での測定も行った。共同研究者の協力のもと、放射光エックス線や中性子散乱による精密(磁気)構造解析、角度分解光電子分光 (ARPES)、第一原理に基づくバンド計算を実施することにより、本系の磁気・格子・電子構造を多角的に研究した。

### 4. 研究成果

#### (1) $\text{BaMnSb}_2$ における自発磁化の起源と特異なディラック電子状態の解明

$\text{BaMnX}_2$  ( $X$ =Sb, Bi) では、反強磁性を示す Mn スピンが面内にわずかに傾く(キャントする)起源が明らかではなかった。そこで、基本物質である  $\text{BaMnSb}_2$ の結晶構造を詳細に調べた結果、正方晶から直方晶へわずかに歪んでいることを見出した。特に、Sb 正方格子がわずかにジグザグ型に変形することにより、面内方向に極性が発現していることが明らかとなった。ARPES や第一原理計算の結果、この極性歪みがディラック電子に運動量に依存したスピン分裂を引き起こし、スピンとバレーが結合したフェルミ面を有することを示した。また、バルク量子ホール効果における量子化ホールプラトーの値が、この特殊なスピンとバレーがロックした状態(スピン・バレー結合状態)と整合することを明らかにした。[論文: Phys. Rev. B (R) (2020)]

さらに、極性歪みと自発磁化の関係を解明するために、極性ドメインを単一化する手法を確立した。この結果、極性に垂直方向と平行方向の磁化を測定することができ、Mn スピンは極性と平行方向にキャントすることで、自発磁化が発現していることを明らかにした。この磁化の振る舞いは、ジャロシンスキー・守谷相互作用による Mn スピンのキャントとして説明できることがわかった。以上の成果により、弱強磁性を示すディラック電子系磁性体  $\text{BaMnX}_2$ の基本となる磁性、格子、電子状態の詳細を実験的に解明することに成功した。

## (2) BaMnX<sub>2</sub>におけるディラック電子のスピンのバレー結合制御

上記(1)の成果から、BaMnX<sub>2</sub>での極性歪みは自発磁化やディラック電子のスピンのバレー結合を誘起することが明らかとなった。さらに本研究では X サイトの元素置換により、これらの磁気・電子状態を制御できることを実証した。放射光エックス線回折の結果、極性歪みの大きさが X 元素の種類に依存して一桁程度変化することがわかった(図 2 上パネル)。これに加え、結晶歪みの大きさの違いを反映して、ディラック電子のスピンのバレー結合状態も大幅に変化することを、理論計算と高磁場実験により明らかにした(図 2 下パネル)。既存のスピンのバレー結合物質では、バレー配置が限定されるため、スピンのバレー状態の制御は困難であったが、本系では物性に合わせてスピンのバレー状態を設計することで、応答の巨大化も可能になると期待される。[論文: Commun. Mater. (2021)]

さらに、自発磁化と垂直な層間方向に電流・熱流を流した場合に発現する異常ホール・ネルンスト効果の観測を行った。この結果、複数の非等価なバレーを有する X=Bi において、微小な自発磁化(約 0.0001 μ<sub>B</sub>/Mn)にも関わらず、数 μV/K に達するネルンスト起電力が発生することを見出した。本結果は、自発磁化とスピンのバレー結合の協奏による BaMnX<sub>2</sub> 特有の新奇輸送現象であることを示唆している。

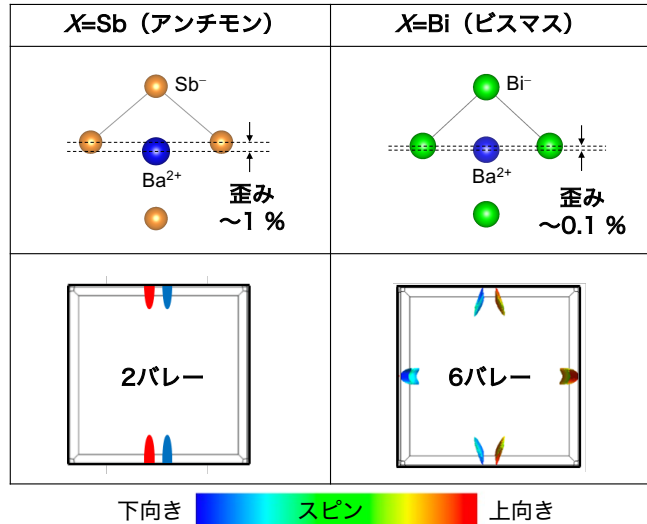


図 2: BaMnX<sub>2</sub>における X 元素に依存した (上) 極性結晶歪みの大きさと (下) スピンのバレー結合状態の変化。

## (3) EuMnBi<sub>2</sub>の反強磁性秩序の解明と元素置換による自発磁化の誘起

まず EuMnBi<sub>2</sub>の反強磁性秩序の詳細なパターンを中性子散乱と共鳴 X 線散乱により調べた。その結果、ゼロ磁場での反強磁性構造では、Eu スピンは c 軸方向を向き、面内方向は強磁性的、面間方向に反強磁性的に秩序していることがわかった(図 1 左)。また、c 軸方向の磁場により Eu スピンがフロップした(有限の磁化が存在する)場合でも、Mn スピンは傾くことなくゼロ磁場での G 型反強磁性構造が保持されていることを明らかにした。[論文: Phys. Rev. B (2020)]

このような反強磁性秩序を元素置換により弱めることができれば、強磁性状態を誘起できると着想し、Eu サイトの一部を他の希土類元素で部分置換した単結晶を合成した。この結果、Eu 層の反強磁性が弱体化し、10<sup>-3</sup>~10<sup>-2</sup> μ<sub>B</sub>/f.u. 程度の小さな自発磁化が発生することを見出した。さらに本物質における異常ホール・ネルンスト効果の測定結果から、微小な磁化にも関わらず通常の強磁性体と同程度の起電力が発生していることが明らかとなった。これは、ディラックバンドに由来するベリー位相が起電力に寄与している可能性を示唆している。

## (4) EuMnBi<sub>2</sub>における元素置換によるキャリア濃度制御と熱電・熱磁気効果の最適化

上記(3)で得られた弱強磁性を示す物質では、弱強磁性のための部分置換によりフェルミエネルギーが大きくシフトする。このシフトを解消するために、フェルミエネルギーの制御方法を確立することを目指した。この結果、磁性絶縁層における元素置換により、フェルミエネルギーを精密に制御できることを実証した。特に EuMnBi<sub>2</sub>では、わずかに正孔がドーピングされているため、Gd 置換により電子をドーピングするとフェルミエネルギーがディラック点へ近づく(図 3 の右矢印の方向)。興味深いことに、ゼーベック起電力とネルンスト起電力のキャリア濃度依存性が大きく異なることが見出した。特に、ネルンスト起電力は Gd 置換に対し大幅に増加するため、最適物質(Gd1%ドーピング)では母物質の約 5 倍の起電力が発現する。このような異常な増大は、易動度がバンド端まで低下しないディラック電子系特有の効果であることが、理論モデルとの比較により明らかとなった。以上の結果から、本系では起電力の大きさを最適化できることが実証され、熱電・熱磁気材料としての高いポテンシャルが示された。[論文: Adv. Funct. Mater. (2021)]

Gd 置換では反強磁性秩序が大きく変化することはないが、自発磁化を誘起する元素置換と組み合わせることで、弱強磁性化により生じるフェルミエネルギーシフトを補償できる可能性がある。自発磁化を誘起することに加え、フェルミエネルギーをディラック点近傍に調整すること

に成功すれば、従来の強磁性体を凌ぐ異常ホール・ネルンスト効果の発現も期待できる。

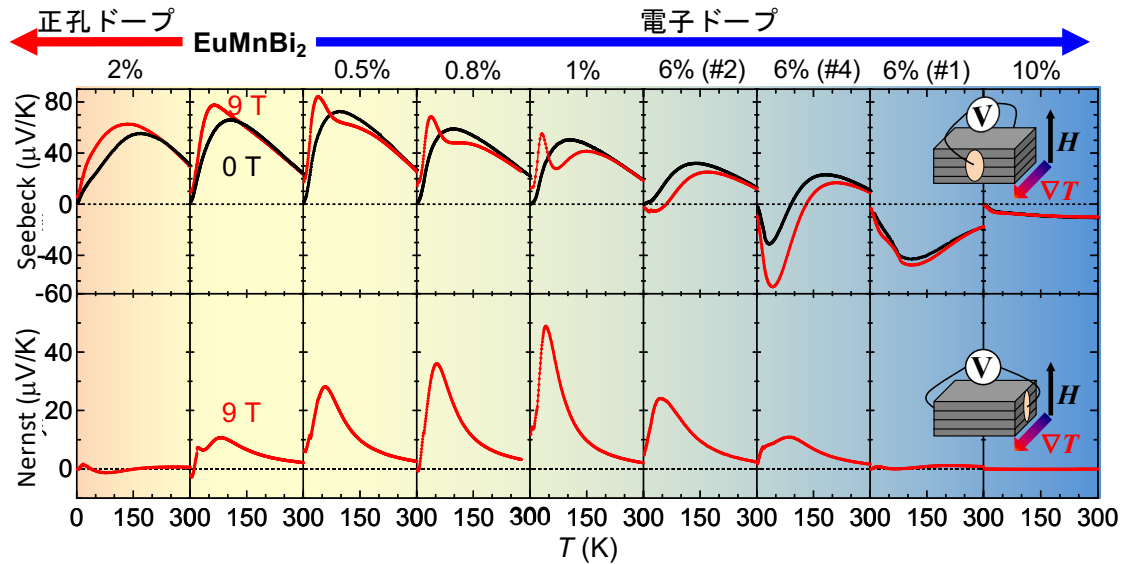


図 3:  $\text{EuMnBi}_2$  単結晶の(上)ゼーベック起電力(黒: 0 T, 赤: 9 T)、(下)ネルンスト起電力(9 T)の温度依存性のキャリア濃度に対する変化。母物質から右(左)側が Gd(Au) 置換による電子(正孔)ドーピングに対応。パネル上部の数値は置換量(仕込み値)である。

#### (4) 新奇磁性トポロジカル物質の開拓

磁性を有するディラック・ワイル半金属の新規開拓を行った。一例として、ディラック半金属候補物質である  $\text{BaMg}_2\text{Bi}_2$  の磁性版となる  $\text{EuMg}_2\text{Bi}_2$  の純良単結晶の合成に成功した。Eu 層はゼロ磁場で  $\text{EuMnBi}_2$  と同様の (A 型) 反強磁性を示すが、4 T 以下の弱磁場で強磁性へ転移する。この強制強磁性相では、ワイル点がフェルミエネルギー近傍に生成されることが理論的に明らかとなり、実際に巨大な異常ホール効果が実験的にも観測された。今後、元素置換により弱強磁性状態への転移が実現すれば、ゼロ磁場でのワイル点生成も期待される。[論文投稿中]

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 H. Yoshizawa, H. Sakai, M. Kondo, M. Ochi, K. Kuroki, N. Hanasaki and J. Fujioka	4. 巻 -
2. 論文標題 In-plane anisotropic charge dynamics in the layered polar Dirac semimetal BaMnSb <sub>2</sub>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys.Rev. B (Letter) (Accepted)	6. 最初と最後の頁 -
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 H. Murakawa, Y. Nakaoka, T. Kida, M. Hagiwara, H. Sakai, and N. Hanasaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Giant anisotropic magnetoresistance at low magnetic fields in a layered semiconductor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Materials (Accepted)	6. 最初と最後の頁 -
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 U. Widayiswari, H. Sakai, N. Hanasaki, B. Kurniawan, I. Watanabe	4. 巻 1028
2. 論文標題 Optimizations of the Sintering Temperature to Reduce the Nd <sub>3</sub> Ru <sub>07</sub> Phase and Investigations of their Effect on the Magnetic Properties in Nd <sub>2</sub> Ru <sub>207</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science Forum	6. 最初と最後の頁 3-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/MSF.1028.3	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 K. Tsuruda, K. Nakagawa, M. Ochi, K. Kuroki, M. Tokunaga, H. Murakawa, N. Hanasaki, and H. Sakai*	4. 巻 31
2. 論文標題 Enhancing thermopower and Nernst signal of high-mobility Dirac carriers by Fermi level tuning in the layered magnet EuMnBi <sub>2</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Adv. Funct. Mater.	6. 最初と最後の頁 2102275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202102275	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 M. Kondo, M. Ochi, T. Kojima, R. Kurihara, D. Sekine, M. Matsubara, A. Miyake, M. Tokunaga, K. Kuroki, H. Murakawa, N. Hanasaki, and H. Sakai*	4. 巻 2
2. 論文標題 Tunable spin-valley coupling in layered polar Dirac metals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Commun. Mater.	6. 最初と最後の頁 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-021-00152-z	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 H. Nishiyama, H. Sakai, K. Nakagawa, N. Hanasaki, S. Ishiwata, H. Masuda, M. Ochi, K. Kuroki, S. Iguchi, T. Sasaki, Y. Ikemoto, T. Moriwaki, K. Ueda, Y. Tokura, and J. Fujioka	4. 巻 104
2. 論文標題 Variation of charge dynamics upon antiferromagnetic transitions in the Dirac semimetal EuMnBi2	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 115111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.115111	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 H. Sakai	4. 巻 18
2. 論文標題 Dirac Loops in a Strongly Correlated Metal: Origin of Large Magnetoresistance?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPSJ News Comments	6. 最初と最後の頁 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJNC.18.14	査読の有無 無
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 N. Hanasaki, M. Oda, K. Niitsu, K. Ehara, H. Murakawa, H. Sakai, H. Nitani, H. Abe, H. Sagayama, H. Uetsuka, T. Karube, and H. Inui	4. 巻 11
2. 論文標題 Element dependence of local disorder in medium-entropy alloy CrCoNi	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0072766	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 A. H. Mayo, H. Takahashi, M. S. Bahrany, A. Nomoto, H. Sakai, and S. Ishiwata	4. 巻 12
2. 論文標題 Magnetic generation and switching of topological quantum phases in a trivial semimetal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. X	6. 最初と最後の頁 11033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevX.12.011033	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 該当する

1. 著者名 酒井英明	4. 巻 76, No. 11
2. 論文標題 ブロック層を利用した多彩なディラック電子系物質の開拓:磁性・極性とのカップリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 729-734
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.76.11_729	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 H. Masuda, H. Sakai*, H. Takahashi, Y. Yamasaki, A. Nakao, T. Moyoshi, H. Nakao, Y. Mu-rakami, T. Arima, and S. Ishiwata	4. 巻 101
2. 論文標題 Field-induced spin reorientation in the antiferromagnetic Dirac material EuMnBi2 revealed by neutron and resonant x-ray diffraction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 174411 [6]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.174411	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 N. Mitsuishi, Y. Sugita, M. S. Bahrany, M. Kamitani, T. Sonobe, M. Sakano, T. Shimojima, H. Takahashi, H. Sakai, K. Horiba, H. Kumigashira, K. Taguchi, K. Miyamoto, T. Okuda, S. Ishiwata, Y. Motome, and K. Ishizaka	4. 巻 11
2. 論文標題 Switching of band inversion and topological surface states by charge density wave	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nat. Commun.	6. 最初と最後の頁 2466[9]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-16290-w	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 該当する

1. 著者名 A. Nakamura, T. Shimojima, Y. Chiashi, M. Kamitani, H. Sakai, S. Ishiwata, H. Li, and K. Ishizaka	4. 巻 20
2. 論文標題 Nanoscale imaging of unusual photo-acoustic waves in thin flake VTe <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano. Lett.	6. 最初と最後の頁 4932-4938
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.0c01006	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 D. Okuyama, K. Yamauchi, H. Sakai, Y. Taguchi, Y. Tokura, K. Sugimoto, T. J. Sato, and T. Oguchi	4. 巻 2
2. 論文標題 Ferroelectric atomic displacement in multiferroic tetragonal perovskite Sr <sub>1/2</sub> Ba <sub>1/2</sub> MnO <sub>3</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 033038[9]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.033038	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 U. Widayiswari, H. Sakai, K. Inoue, N. Hanasaki, D. P. Sari, B. Kurniawan, I. Watanabe	4. 巻 860
2. 論文標題 Magnetic Properties of Pyrochlore Ruthenate Nd <sub>2</sub> Ru <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Studied by $\mu$ SR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 288-293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4028/www.scientific.net/KEM.860.288	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 該当する

1. 著者名 K. Yokoi, M. Yashima, H. Murakawa, H. Mukuda, K. Yamauchi, T. Oguchi, H. Sakai, and N. Hanasaki	4. 巻 102
2. 論文標題 181Ta nuclear quadrupole resonance study of the noncentrosymmetric superconductor PbTaSe <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 214504[5]
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.214504	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 H. Sakai, H. Fujimura, S. Sakuragi, M. Ochi, R. Kurihara, A. Miyake, M. Tokunaga, T. Kojima, D. Hashizume, T. Muro, K. Kuroda, Takeshi Kondo, T. Kida, M. Hagiwara, K. Kuroki, M. Kondo, K. Tsuruda, H. Murakawa, and N. Hanasaki	4. 巻 101
2. 論文標題 Bulk quantum Hall effect of spin-valley coupled Dirac fermions in the polar antiferromagnet BaMnSb <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B (Rapid Commun.)	6. 最初と最後の頁 081104(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.081104	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 M. Komada, H. Murakawa, M. S. Bahramy, T. Kida, K. Yokoi, Y. Narumi, M. Hagiwara, H. Saka, and N. Hanasaki	4. 巻 101
2. 論文標題 Angular dependent nontrivial phase in Weyl semimetal NbAs with anisotropic Fermi surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 45135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.045135	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 M. Kondo, H. Sakai, M. Komada, H. Murakawa, and N. Hanasaki,	4. 巻 30
2. 論文標題 Angular dependence of interlayer magnetoresistance for antiferromagnetic Dirac semimetal $\text{SrMnBi}_2$ ( $\text{Sr}=\text{Sr}, \text{Eu}$ )	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.30.011016	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 T. Nishimura, H. Sakai, H. Mori, K. Akiba, H. Usui, M. Ochi, K. Kuroki, A. Miyake, M. Tokunaga, Y. Uwatoko, K. Katayama, H. Murakawa, and N. Hanasaki	4. 巻 122
2. 論文標題 Large Enhancement of Thermoelectric Efficiency Due to a Pressure-Induced Lifshitz Transition in SnSe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 226601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.226601	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 酒井英明	4. 巻 28
2. 論文標題 圧力による電子バレー制御を利用した熱電性能の向上	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 クリーンエネルギー（日本工業出版）11月号	6. 最初と最後の頁 20-24
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 無
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 酒井英明	4. 巻 72
2. 論文標題 新奇伝導現象を示すディラック・ワイル電子系強相関物質の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 生産と技術（生産技術振興協会）1月号	6. 最初と最後の頁 91-93
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 無
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34件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 H. Sakai
2. 発表標題 Spin/valley-polarized quantum transport in magnetic and polar Dirac materials
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Condensed Matter Physics 2021 (AC2MP2021), Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sakai
2. 発表標題 Tuning Thermoelectric Performance for a Layered Dirac Material with High-mobility Carriers
3. 学会等名 MRM2021 (Materials Research Meeting), Yokohana, Japan/Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Sakai, H. Fujimura, R. Kurihara, A. Miyake, M. Tokunaga, T. Kida, M. Hagiwara, K. Tsuruda, H. Murakawa, and N. Hanasaki
2. 発表標題 Block-layer design for high-mobility magnetic and polar Dirac materials
3. 学会等名 SMS2022 (Summit of Materials Science 2022), Sendai, Japan/Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤雅起、酒井英明、越智正之、小島達弘、栗原綾佑、関根大輝、松原正和、三宅厚志、徳永将史、黒木和彦、村川寛、花咲徳亮
2. 発表標題 極性を持つディラック電子系物質 BaMnBi <sub>2</sub> における格子歪に敏感なスピン・バレー結合 状態
3. 学会等名 第 5 回固体化学フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤雅起、酒井英明、越智正之、栗原綾佑、三宅厚志、山崎裕一、徳永将史、中尾裕則、黒木和彦、村川寛、花咲徳亮
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体候補物質 EuMg <sub>2</sub> Bi <sub>2</sub> における非従来型異常ホール効果と量子振動 の観測
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 湯浅直樹、酒井英明、木田孝則、萩原政幸、村川寛、花咲徳亮
2. 発表標題 ThCr <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> 型構造を有する EuAu <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> の低温磁気相図
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 H. Sakai
2. 発表標題 Dirac fermions couples with magnetic order and lattice polarization
3. 学会等名 APCTP-KPS-JPS joint meeting on “ New trends in quantum and topological matters under extreme condition ”, Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Sakai
2. 発表標題 Quantum transport coupled with magnetic order and lattice polarization in layered Dirac materials
3. 学会等名 ARHMF2020 (Asian regional high-field conference), Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井英明
2. 発表標題 磁性・極性と結合した量子伝導を示すトポロジカル層状物質の開拓
3. 学会等名 ISSP ワークショップ 量子物質研究の最近の進展と今後の展望(オンライン) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 酒井英明
2. 発表標題 量子物質研究と強磁場: 最近の潮流と展望
3. 学会等名 強磁場コラボラトリ 2030 シンポジウム(オンライン) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Kondo, M. Ochi, T. Kojima, R. Kurihara, D. Sekine, M. Matsubara, A. Miyake, M. Tokunaga, K. Kuroki, H. Murakawa, N. Hanasaki and H. Sakai
2 . 発表標題 High field transport properties for spin-valley coupled Dirac materials $\text{BaMnX}_2$ ( $\text{X} = \text{Bi}, \text{Sb}$ )
3 . 学会等名 ARHMF2020 (Asian regional high-field conference), Online (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Kondo, M. Ochi, T. Kojima, R. Kurihara, D. Sekine, M. Matsubara, A. Miyake, M. Tokunaga, K. Kuroki, H. Murakawa, N. Hanasaki and H. Sakai
2 . 発表標題 Spin-valley coupling sensitive to lattice distortion in layered Dirac metal $\text{BaMnX}_2$ ( $\text{X} = \text{Bi}, \text{Sb}$ )
3 . 学会等名 APS March meeting 2021 (Online)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 H. Sakai
2 . 発表標題 Bulk quantum Hall effect of massless Dirac fermions in $\text{BaMnSb}_2$
3 . 学会等名 Workshop on Spin-Orbit Interaction and G-factor (SOIG2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Sakai
2 . 発表標題 Correlated quantum transport in layered Dirac antiferromagnets
3 . 学会等名 Cond Mat Seminars (School of Physics and Astronomy, University of St Andrews), (招待講演)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sakai, H. Fujimura, R. Kurihara, A. Miyake, M. Tokunaga, T. Kida, M. Hagiwara, K. Tsuruda, H. Murakawa, and N. Hanasaki
2. 発表標題 Bulk Half-integer Quantum Hall Effect in Dirac Antiferromagnet BaMnSb <sub>2</sub>
3. 学会等名 The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kondo, H. Sakai, M. Komada, H. Murakawa, and N. Hanasaki
2. 発表標題 Angular dependence of interlayer magnetoresistance for antiferromagnetic Dirac semimetal $\text{A}_2\text{MnBi}_2$ (A=Sr, Eu)
3. 学会等名 The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井英明
2. 発表標題 強磁場を用いたディラック電子系磁性体の強相関量子輸送現象の解明
3. 学会等名 物性研短期研究会/強磁場科学研究会--強磁場コラボラトリーによる強磁場科学の新展開(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井英明
2. 発表標題 アンチモン、ピスマス化合物の多様な価数・結合・構造とスピン軌道結合のマリアージュ
3. 学会等名 スピン軌道結合に係る研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊崎将司, 清水康弘, 伊藤正行, 増田英俊, 酒井英明, 石渡晋太郎
2. 発表標題 ディラック半金属EuMnBi <sub>2</sub> の量子ホール状態における <sup>209</sup> Bi NMR
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川賢人, 酒井英明, 鶴田圭 吾, 塩貝純一, 木村尚次郎, 淡路智, 塚崎敦, 村川寛, 花咲徳亮
2. 発表標題 キャリア濃度制御した多層ディラック電子系 Eu <sub>1-x</sub> GdxMnBi <sub>2</sub> におけるランダウ準位分裂の観測
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横井滉平, 村川寛, 藤村飛雄吾, 酒井英明, 花咲 徳亮
2. 発表標題 トポロジカル線ノード半金属 PbTaSe <sub>2</sub> のゼーベック、ネルンスト効果の研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中岡優大, 村川寛, 横井晃平, 駒田盛是, 木田孝則, 中川賢人, 藤村飛雄吾, 鳴海康雄, 萩原政幸, 酒井英明, 花咲徳亮
2. 発表標題 強磁性ワイル半金属候補物質 PrAlGe の電気伝導特性の研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 駒田盛是, 村川寛, M. S. Bahramy, 木田孝則, 横井滉平, 鳴海康雄, 萩原政幸, 酒井英明, 花咲徳亮
2. 発表標題 ワイルド点ペアを囲むサイクロトロン軌道におけるランダウ準位の研究
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤雅起, 酒井英明, 藤村飛雄吾, 中川賢人, 栗原綾佑, 三宅厚志, 徳永将史, 木田孝則, 萩原政幸, 村川寛, 花咲徳亮
2. 発表標題 多層ディラック電子系物質 BaMnBi <sub>2</sub> の量子 極限近傍における特異なランダウ準位構造
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井英明, 藤村飛雄吾, 櫻木俊輔, 越智正之, 小島達弘, 徳永将史, 室隆桂之, 黒田健太, 近藤猛, 黒木和彦, 橋爪大輔, 木田孝則, 萩原政幸, 近藤雅起, 村川寛, 花咲徳亮
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた反強磁性体BaMnSb <sub>2</sub> の特異なディラック電子状態
3. 学会等名 日本物理学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤雅起, 酒井英明, 藤村飛雄吾, 中川賢人, 栗原綾佑, 三宅厚志, 徳永将史, 木田孝則, 萩原政幸, 村川寛, 花咲徳亮
2. 発表標題 多層ディラック電子系物質 BaMnBi <sub>2</sub> の量子極限近傍における特異なランダウ準位 構造
3. 学会等名 物性研短期研究会/強磁場科学研究会—強磁場コラボラトリーによる強磁場科学の新展開
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 中川賢人, 酒井英明, 鶴田圭吾, 塩貝純一, 木村尚次郎, 淡路智, 塚崎 敦, 村川寛, 花咲徳亮
2. 発表標題 キャリア濃度を制御した多層ディラック電子系 $\text{Eu}_{1-x}\text{Gd}_x\text{MnBi}_2$ におけるランダウ 準位分裂の観測
3. 学会等名 物性研短期研究会/強磁場科学研究会－強磁場コラボラトリーによる強磁場科学の新展開
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中岡優大, 村 川寛, 横井滉平, 駒田盛是, 木田孝則, 中川賢人, 藤村飛雄吾, 鳴海康雄, 萩原政幸, 酒井英明, 花 咲徳亮
2. 発表標題 強磁性ワイル半金属候補物質 $\text{PrAlGe}$ の電気伝導特性の研究
3. 学会等名 物性研短期研究会/強磁場科学研究会－強磁場コラボラトリーによる強磁場科学の新展開
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 駒田盛是, 村川 寛, M. S. Bahramy, 木田孝則, 横井滉平, 鳴海康雄, 萩原政幸, 酒井英明, 花咲徳亮
2. 発表標題 ワイル点を 1 つまたは 2 つ囲む系のランダウ準位の研究
3. 学会等名 物性研短期研究会/強磁場科学研究会－強磁場コラボラトリーによる強磁場科学の新展開
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近藤雅起, 酒井英明, 越智正之, 栗 原綾佑, 小島達弘, 櫻木俊輔, 三宅厚志, 徳永将史, 國定聡, 黒田健太, 近藤猛, 黒木和彦, 藤村飛雄吾, 中川賢人, 村川寛, 花咲徳亮
2. 発表標題 多層ディラック電子系 $\text{BaMnBi}_2$ における Bi 正 方格子の極性歪に敏感なスピン・パレー状態
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊崎将司, 清水康弘, 伊藤正行, 増田英俊, 酒井英明, 石渡晋太郎
2. 発表標題 反強磁性ディラック半金属 EuMnBi <sub>2</sub> の内部磁 場測定
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 駒田盛是, 村川寛, M. S. Bahramy, 木田孝則, 横井滉平, 鳴海 康雄, 萩原政幸, 酒井英明, 花咲徳亮
2. 発表標題 磁場方位制御下でのワイル半金属 TaAs のラン ダウ準位の研究
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横井滉平, 八島光晴, 村川寛, 棕田秀和, 山内邦彦, 小口 多美夫, 酒井英明, 花咲徳亮
2. 発表標題 空間反転対称性の破れた超伝導体 PbTaSe <sub>2</sub> にお ける 181Ta-NQR 測定
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 真栄城竜生, 酒井英明, 西村拓也, 村川寛, 花咲徳亮
2. 発表標題 層状強磁性体 CrGeTe <sub>3</sub> 単結晶におけるキャリア ドーピングを利用した熱電性能向上
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者のホームページ  
<http://hide-sakai.net>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------