東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

Press Release

国立大学法人東北大学
国立大学法人大阪大学
国立大学法人東京大学
一般財団法人総合科学研究機構
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
J-PARC センター

トポロジカル磁性体の新たな設計指針を確立
― ディラック電子を持つ正方格子物質でホモロガス系列を発見 ―

【発表のポイント】

- 高温超伝導体などの層状酸化物では層数を変化させるホモロガス系列（注１）により物性を系統的に制御できる設計指針が確立されています。一方トポロジカル量子物質（注２）ではこうした体系的指針がありませんでした。
- トポロジカルなディラック電子（注３）状態を示す正方格子磁性体で初めて、層数制御が可能なホモロガス系列を実現する物質系を発見しました。
- 磁気状態だけでなくディラック電子状態も、層数に依存して大きく変化することを実証し、トポロジカル量子物質を層数により設計する新しい指針となるため、物質開発が加速することが期待されます。

【概要】

高温超伝導体や強誘電体などの層状酸化物では、結晶構造の層数を変化させるホモロガス系列に従って、キーとなる物性の自在な設計を目指した物質開発が行われてきました。一方、近年注目を集めるトポロジカル量子物質では、そのような体系的な設計指針は確立されていませんでした。

東北大学金属材料研究所の酒井英明教授（研究開始時：大阪大学大学院理学研究科）、大阪大学大学院理学研究科の山下淳志大学院生（当時）らの研究グループは、ディラック電子を持つ正方格子磁性体において、層数制御が可能なホモロガス系列を実現する物質系を発見しました。今回初めて合成に成功した二層系物質 $Ce_3Au_4Ge_2Bi_4$ において、層数を増やすことで磁気秩序が反強磁性からフェリ磁性（注４）（強磁性的）へと変化するとともに、真空中では許されないほど大きく傾いた特異なディラック電子状態が現れることを実証しました。本成果は、トポロジカル量子物質において「層数」で磁性と電子状態を同時に設計する新しい物質開発法を提示するものであり、次世代量子物質の体系的な創製や新奇量子現象の開拓につながると期待されます。

本成果は、2026 年 7 月 1 日正午（米国東部夏時間）に国際学術誌 Journal of the American Chemical Society にオンライン掲載されます。

なお本成果は、大阪大学大学院理学研究科の水野竜太特任助教（常勤）、越智正之准教授、木田孝則助教、萩原政幸教授、西真輝学部生（当時）、村川寛助教、花咲徳亮教授、神戸市立工業高等専門学校の小島達弘准教授、東京大学物性研究所の齋藤開助教、中島多朗准教授、近藤雅起助教、徳永将史教授、総合科学研究機構の中尾朗子副主任研究員、日本原子力研究開発機構の木俣基研究副主幹との共同研究によるものです。

【詳細な説明】

研究の背景

近年、磁性や超伝導などの量子機能に加え、特異なトポロジーによって特徴づけられる電子状態（波動関数）を示すトポロジカル量子物質が、次世代エレクトロニクスや量子計算の新しい基盤材料として注目を集めています。特に、あたかも光速で動く粒子のように運動が記述されるディラック電子を持つ物質は、エネルギー損失の少ない電気・熱伝導が実現できるため、活発に研究が行われています。

こうしたトポロジカル量子物質の有力な候補として注目されているのが、正方格子を持つ層状物質です。正方格子層ではディラック電子などのトポロジカル電子状態が実現する上、その間に挟まれた層では磁性や超伝導などの多様な量子現象が発現します。このため、両者の相互作用から超低消費電力スピントロニクスなどにつながる新しい量子機能の創出が期待されています。

これまで、層状構造の機能物質では結晶構造を系統的に設計する指針として、層数を変化させて一連の物質群を生み出すホモロガス系列が知られてきました。高温超伝導体や磁気抵抗物質、強誘電体などで知られる層状酸化物のルドルスデン・ポッパー相はこの好例で、機能を担うペロブスカイト層の数を変えることで、超伝導や磁性などの強相関物性を系統的に制御する物質開発が進められてきました（図 1）。しかし、トポロジカル量子物質においては、このように層数を設計パラメータとして物性を操るための明確な指針は、これまで確立されていませんでした。

今回の取り組み

研究グループは、正方格子トポロジカル量子物質において、正方格子層の間に挟まれた四面体層の数に着目しました。従来知られていた正方格子磁性体 $CeAuBi_2$ は四面体層が一層（n=1）で構成されています。これに対し、研究グループは、四面体層を二層持つ新物質 $Ce_3Au_4Ge_2Bi_4$（n=2）の合成に世界で初めて成功しました。その極限構造である $CeAu_2Ge_2$ は四面体層の無限層構造（n=∞）として実在しており、二層の新構造は、両者をつなぐ中間構造とみなせます（図 1）。このように、正方格子物質において層数を設計パラメータとする新しいホモロガス系列が実現できることを発見しました。

さらに、研究用原子炉 JRR-3 と大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質・生命科学実験施設（MLF）を相補的に利用した中性子散乱測定により、磁気構造を詳細に調べた結果、従来の一層系物質で見られる反強磁性秩序とは異なり、$Ce_3Au_4Ge_2Bi_4$では自発磁化を持つフェリ磁性秩序が現れることを明らかにしました（図 2）。また、理論計算と強磁場測定から、層数の増加によってディラック電子状態が大きく変形し、本来の相対性理論（真空中の物理）では許されないほど傾いた「タイプ II ディラック電子状態」が形成されることを見出しました（図 2）。

これらの結果は、正方格子トポロジカル量子物質において、層数を変えることで磁性とトポロジカル電子状態を同時に制御できることを初めて実証するものです。

今後の展開

本研究で見いだしたホモロガス系列は、これまで個別物質の探索が中心であったトポロジカル量子物質の開発において、基本ブロックを保ったまま「層数」を変えることで磁性と電子状態を同時に設計できるという、体系的な物質開発の枠組みを提示する成果といえます。この設計原理を応用し、元素置換などを組み合わせることで、より幅広い物質群の開拓が可能になります。これにより、次世代量子技術の基盤となる新材料の開発を加速・拡大することで、これまで予想されていなかった新奇量子現象や革新的な量子機能の発見につながると期待されます。

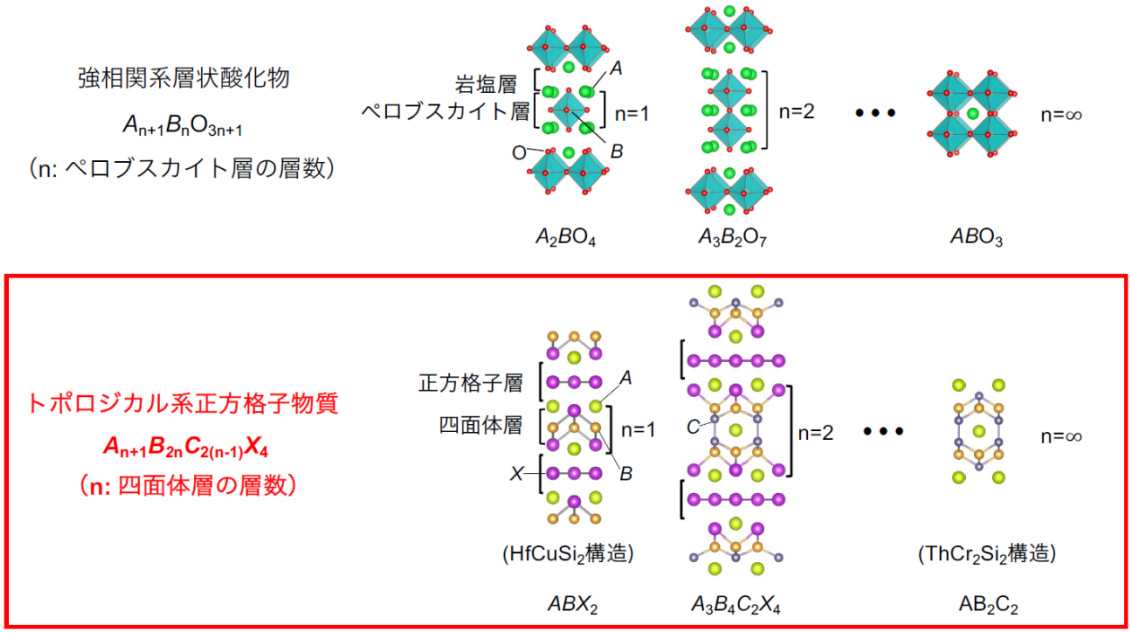

図 1. 高温超伝導体などの開発を支えてきたホモロガス系列の設計法を、トポロジカル量子物質へ拡張。 上段は強相関物性を示す層状酸化物のルドルスデン・

ポッパー相、下段は本研究で発見した正方格子物質のホモロガス系列を示す。今回発見した二層系物質 $Ce_3Au_4Ge_2Bi_4$ （下段中央の構造）は、一層系の $HfCuSi_2$ 型構造と無限層系の $ThCr_2Si_2$ 型構造をつなぐ中間構造に相当する。

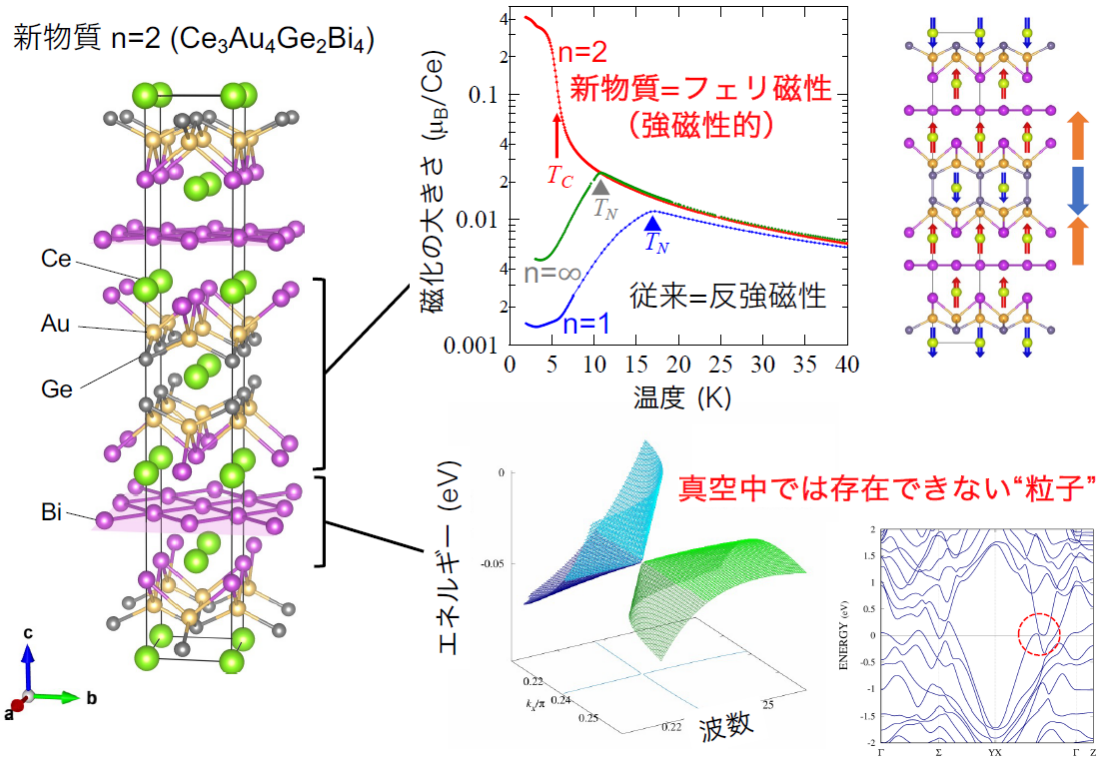

図 2. 層数による磁性とトポロジカル電子状態の同時設計。 今回発見した二層系物質 $Ce_3Au_4Ge_2Bi_4$ では、四面体層の数を増やすことで磁気秩序が反強磁性からフェリ磁性（強磁性的）へと変化するとともに、ディラック電子状態が大きく変形する。その結果、本来の相対性理論（真空中の物理）では許されない、円錐の形が限界を超えて真横に倒れ込むほど傾いた「タイプ II」という極めて異例な状態となる。

【謝辞】

本研究は、JSPS 科研費 （JP22H00109, JP22K18689, JP23H00268, JP23H04862, JP25K08457, JP26H02017）、旭硝子財団、Spin-RNJ、JST FOREST (JPMJFR212P) の支援を受けて実施されました。中性子散乱実験は、研究用原子炉 JRR-3 に設置された 5G-PONTA（課題番号 24519, 25510）、大強度陽子加速器施設 J-PARC の物質・生命科学実験施設（MLF）に設置されたビームライン BL18「千手」（課題番号 2025A0219）において実施されました。また、掲載論文は『東北大学 2026 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業』の支援を受け Open Access となっています。

【用語説明】

注1.　ホモロガス系列

結晶構造の基本ブロックを繰り返し積み重ねることで構成される物質群のこと。繰り返しブロックの数（層数）を変えることで、一連の関連した結晶構造が形成される。高温超伝導体や強誘電体などの層状酸化物では、ホモロガス系列を利用して物性を系統的に制御する物質設計が行われてきた。本研究では、この考え方をトポロジカル量子物質へ初めて拡張した。

注2.　トポロジカル量子物質

物質内の電子の波動関数がねじれてしまい、真空とは異なるトポロジーにより電子状態が保護される物質群をトポロジカル物質と呼ぶ。さらに、その中で磁性や超伝導などの量子機能を併せ持つものがトポロジカル量子物質であり、外乱に対して非常に安定した物性を示すことから、次世代のスピントロニクスや量子計算への応用が期待されている。本研究の正方格子物質では、層数という結晶構造パラメータを制御することで、磁性とトポロジカルな性質を同時に操る「合理的な物質設計」が可能になる。

注3.　ディラック電子

固体中で質量がゼロであるかのように振る舞い、散逸が少ない高い易動度で運動する特殊な電子のこと。エネルギーと運動量が直線的に比例する「円錐形（ディラックコーン）」の構造を持つのが特徴。本研究では、この円錐が極限まで傾いた特異な状態を実証した。

注4.　フェリ磁性

物質中の磁石の元となる電子スピンが反平行に並びながらも、その大きさが異なるために完全には打ち消し合わず、全体として磁石のような性質（自発磁化）を示す磁気秩序。本研究で発見した $Ce_3Au_4Ge_2Bi_4$ では、セリウム（Ce）の磁気モーメントが「上−下−上」に配列することでフェリ磁性が実現している。

【論文情報】

タイトル：A Dirac-like ferrimagnet $Ce_3Au_4Ge_2Bi_4$ as a member of a homologous series of square-net topological materials
著者： A. Yamashita, R. Mizuno, M. Ochi, T. Kojima, H. Saito, T. Nakajima, A. Nakao, M. Kimata, M. Kondo, M. Tokunaga, T. Kida, M. Hagiwara, M. Nishi, H. Murakawa, N. Hanasaki, H. Sakai*
*責任著者：東北大学金属材料研究所　教授　酒井英明
掲載誌：Journal of the American Chemical Society
DOI：10.1021/jacs.6c03149
URL：https://doi.org/10.1021/jacs.6c03149

【問い合わせ先】
（研究に関すること）
東北大学 金属材料研究所
教授　酒井英明
TEL：022-215-2022
Email：hideaki.sakai@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）
東北大学 金属材料研究所
情報企画室広報班
TEL：022-215-2144
Email：press.imr@grp.tohoku.ac.jp

大阪大学 理学研究科 庶務係
TEL：06-6850-5280
Email：ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp

東京大学物性研究所 広報室
TEL：04-7136-3207
Email: press@issp.u-tokyo.ac.jp

総合科学研究機構 中性子科学センター
利用推進部 広報担当
TEL：029-219-5300
Email：press@cross.or.jp

日本原子力研究開発機構 総務部報道課
TEL：070-1460-5723
Email：tokyo-houdouka@jaea.go.jp

J-PARC センター 広報セクション
TEL：029-287-9600
Email：pr-section@ml.j-parc.jp