【基盤研究（S）】

ウランも含む強相関トポロジカルスピン三重項超伝導の物理

研究代表者	東北大学・金属材料研究所・教授 青木　大（あおき　だい）　研究者番号:30359541
研究課題情報	課題番号：22H04933　研究期間：2022年度～2026年度 キーワード：強相関トポロジカル超伝導、微細加工、スピン三重項超伝導、ウラン化合物

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

本研究は強相関f電子系超伝導体、とりわけ新奇ウラン化合物超伝導体UTe_2と強磁性超伝導体に焦点を絞り「スピン三重項超伝導状態の理解」とバルクスピン三重項超伝導として期待される「トポロジカル超伝導の実験的・理論的解明」を目的とする。これらの超伝導の発現機構の解明、スピン三重項超伝導・トポロジカル超伝導に起因した新奇現象の発見を目指す。

研究目的、独自性と創造性　X

微細加工技術を応用した トポロジカル超伝導の解明

内部自由度（スピン、軌道、電荷など）による新現象発見

極限環境下の実験と微視的理論から
トポロジカルスピン三重項超伝導の学理を構築

結晶構造に着目した 新物質開発

理論によるトポロジカル超伝導の新現象提案

多重超伝導相の秩序変数同定

ORIGINAL

バルクとしてのトポロジカル超伝導を研究 ⟷ 表面・界面のこれまでのトポロジカル超伝導との差別化

純良単結晶による高度な実験→高い信頼性

ウラン化合物が主な対象→限られた施設、多くのスピン三重項超伝導体

20年にわたる強磁性超伝導の研究→国際競争力、研究の積み重ね、先導性

波及効果
- マヨラナ粒子検出
- 量子コンピュータの量子ビット（Qubit）への応用
- 基礎と応用が融合した新たな研究分野の創出

マテリアル革命 SDGs, …

非従来型超伝導 ➡ トポロジカル超伝導 ➡ 新奇現象(マヨラナ…) ➡ 新デバイス創出(Qubit…)

図1　研究の全体像

●研究の背景

もともと相容れない物理現象だと考えられてきた強磁性と超伝導が、実は密接な関わりがあり、両者は共存しスピン三重項状態という特殊な超伝導状態をとることがわかってきた。強い磁場を加えても超伝導が壊れず、磁場誘起超伝導など驚くべき性質が我々のこれまでの研究によってわかってきた。最近、この超伝導がバルクで発現するトポロジカル超伝導であるという、新たな視点が理論的に提唱され、「幻の粒子」マヨラナフェルミオンや量子コンピュータへの応用など、従来の研究の枠にとらわれない新たな研究の展開が待ち望まれていた。

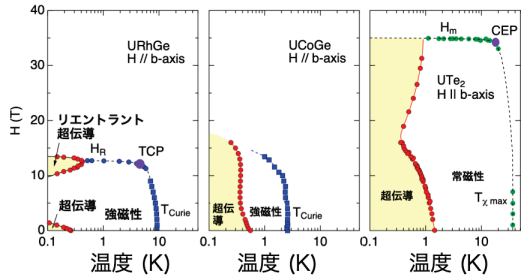


図2　強磁性超伝導体およびUTe_2で観測される磁場誘起超伝導

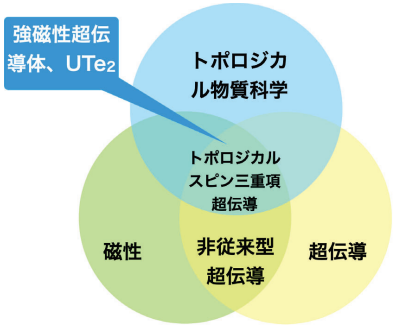


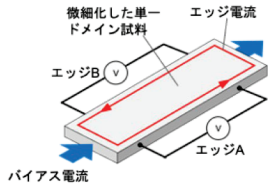
図3　磁性、超伝導、トポロジカル物質科学の関係。3つが重なるところが本研究の対象である。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

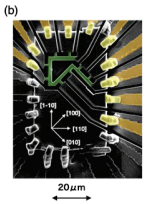
●本研究の具体的方針

本研究で行うより具体的な内容は以下の通りである。（１）極限環境（極低温・強磁場・高圧）における超伝導相、磁気秩序相の微視的解明。（２）多重超伝導相の秩序変数の決定。（３）トポロジカル超伝導としてのエッジ伝導の検出および表面に現れる新奇物性の開拓。（４）世界最高純度の単結晶育成と新物質開発。（５）「金属の顔」フェルミオロジー。このうち（３）については、微細加工技術をウラン化合物に適用し、非線形輸送現象、トポロジカル超伝導ダイオード効果、半整数量子磁束などの新現象探索を狙った挑戦的な内容となっている。（４）の新物質開発については、研究代表者の得意とするさまざまな結晶育成技術を駆使して、ジグザグ、梯子構造などの特徴的な結晶構造に着目したウラン化合物を中心とした物質開発を進める。ウラン化合物を含むアクチノイド物質は、核燃料として工学的な観点から多くの研究がなされてきた経緯があるが、実は基礎研究の観点からも大変興味深い性質を示すことが知られている。ウランの持つ5f電子のために、超伝導、「隠れた秩序」、非フェルミ液体的現象など多彩で魅力的な物性物理の宝庫である。本研究は、物質開発・微細加工から始まって極限環境下の物性測定を通じて、強相関トポロジカルスピン三重項超伝導の解明。さらにこれらを用いた新デバイス創出なども視野に入れた分野横断的な研究内容となっている。

非相反抵抗およびエッジ電流の検出



予備実験として微細加工したパイロクロア物質



スピントロニクスの技術をトポロジカル超伝導研究に応用

図4　FIBにより微細加工した試料とエッジ電流検出の概念図

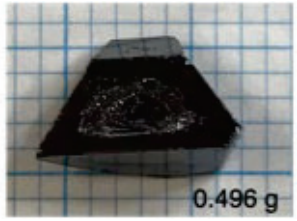


図5　スピン三重項超伝導体UTe_2の純良大型単結晶

ホームページ等	http://www.imr.tohoku.ac.jp/ja/about/divisions-and-centers/research-division/25.html