

二国間交流事業 共同研究報告書

令和6年4月12日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]
京都大学・大学院工学研究科
[職・氏名]
教授・米澤 進吾
[課題番号]
JPJSBP 120223205

1. 事業名 相手国: フランス (振興会対応機関: MEAE-MESRI) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 超純良な有機物質における新規な粒的超伝導

(英文) Novel granular superconductivity in ultra-clean organic systems

3. 共同研究実施期間 2022年4月1日 ~ 2024年3月31日 (2年0ヶ月)

【延長前】 年 月 日 ~ 年 月 日 (年 月 日)

相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Paris-Saclay University, CNRS, IJCLab, Associate Professor,
Marrache-Kikuchi Claire Akiko

4. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		1,950,000 円
内訳	1年度目執行経費	950,000 円
	2年度目執行経費	1,000,000 円
	3年度目執行経費	- 円

5. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	7 名
相手国側参加者等	5 名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

6. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	1		2 (0)
2年度目	1		2 (0)
3年度目			()

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

7. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

超伝導体に不純物や格子欠陥を導入していったときに超伝導性がどのように変化するかを調べることは、超伝導の基礎的性質を調べるうえで非常に重要な研究手段の一つである。 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ は、非従来型 d 波超伝導が実現していると考えられている興味深い物質であるが、結晶中の ClO_4 アニオンの秩序転移温度 (24 K) 付近での冷却速度を変えることによって格子欠陥を可逆的に導入できるという特異な側面も持っている。2018 年、米澤らは、フランス側代表者の Marrache-Kikuchi 准教授らと共同で $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ の欠陥量を増やしていくにつれ、非従来型の超伝導が抑制され、やがて超伝導部分とそうでない部分が共存した granular (粒的) 超伝導へとクロスオーバーすることを明らかにした。次のステップとしてこの現象を熱力学的な手法を用いて定量的に評価していくことが不可欠である。また、granular な非従来型超伝導は自発磁束の形成や常磁性マイスナー効果などの新奇現象を引き起こすと指摘されており、granular 性由来の新現象の観測も次なる重要なステップである。

本研究計画の中心目的は、両グループで協力して汎用冷凍機 PPMS の断熱消磁冷凍 (Adiabatic demagnetization refrigerator; ADR) オプションで使うことのできる比熱測定装置を開発し、それを用いて $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ の比熱の冷却速度依存性を明らかにすることである。また、並行して、物質の微小な磁性を光学的に測ることのできる磁気光学効果測定装置の開発や、超伝導薄膜などの研究にも取り組み、広範な物質系における granular 超伝導研究やその新奇性質の解明に向けた取り組みも行った。また、比熱測定については CsV_3Sb_5 といったほかの超伝導物質でも測定を行い、この物質では「創発回転対称性の破れ」という新しい現象を発見することに成功した。

コロナウイルス感染症や円安の影響もある中での計画実施ではあったが、以下に述べるように、フランスから日本への渡航を計4回、日本からフランスへの渡航を計2回行うことができ、 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ の比熱測定について非常に重要な結果を得ることができた。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

まず、本研究交流により、PPMS の ADR オプションで使える交流比熱測定装置を完成させることができた。この装置は微小な温度計 (Cernox) のチップの感温素子部分を Focused Ion Beam (FIB) で分割し、一方をヒーター、もう一方を温度計として使う。そのため、微小なチップに導線を8本配線する必要があり、その工程がかなり難しかった。フランス側メンバーの Auban-Senzier 博士が7月に京都に滞在した際に協力してその工程の問題に取り組み、計画通り配線することに成功した。特に、Auban-Senzier 博士の持つ装置開発技術が重要な役割を果たした。

その後、フランス側メンバー To 氏の来日時に当初の目的であった有機超伝導体 $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ の比熱測定および磁化測定を行った。特に、比熱測定については、To 氏の帰国後も京大側で実験を続け、幅広い冷却速度範囲に対して比熱測定に成功した。その結果、超伝導臨界温度 T_c が冷却速度を上げるにつれて低下するという従来の報告を、熱力学測定手段である比熱測定でも再現することができた。さらに、比熱を温度 T で割ったものを $T=0$ へと外挿することで、不純物によって生じた残留状態密度を見積もることができる。そのような解析を日本側メンバーの矢野氏と米澤が中心となって行った結果、驚くべきことに残留状態密度は冷却速度に非常に鈍感であることが分かった。この結果は、これまでの不純物効果で仮定されていた「ユニタリティー極限」の近似では説明できず、全く逆の極限である「ボルン極限」の近似が必要であることを示している。ボルン極限の振る舞

いが明確に観測されたのは、あらゆる超伝導体の中で初めてだと考えている。この成果については、2023 年度に解析と議論を続け、現在論文執筆にフランス側と共同で取り組んでいる。

他にも、粒的超伝導において発現可能性が提案されている自発磁束状態の観測も視野に入れた超高感度の磁気光学カー効果測定装置の開発を進めた。また、フランスのグループで研究を進めている超伝導薄膜などにおける研究に、日本側メンバーの山根氏が参画するなど、若手による国際研究交流も進めることができた。比熱測定については別の興味深い超伝導物質である CsV_3Sb_5 でも測定を行い、この物質では「創発回転対称性の破れ」という新しい現象を発見することに成功した。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

(2)でも説明したように、本研究交流の核となる比熱測定装置は、日本側のアイディアとフランス側の技術の掛け合わせによって実現した。また、実験及びその後のデータ解析・論文執筆についても、日本側・フランス側それぞれの知見を最大限に活用して議論を進めている。これらは、本交流事業無しで話しえなかった成果である。

また、それぞれの研究滞在中において若手も含めたセミナーを積極的に行い、それぞれの研究チームでの研究活動の理解を深めた。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

本研究自体は超伝導の基礎研究であり、直接的な社会的貢献は難しいが、超伝導に対する不純物効果という基本的な問題に対する新たな知見を研究コミュニティにフィードバックすることで、将来的には超伝導応用における基盤ともなりうる成果であると考えられる。

また、研究以外にも、研究滞在中で昼食や夕食を共にしたり、フランス側のメンバーを神社等に連れて行くなど、文化交流・相互理解を行うことにも心がけた。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

フランス側メンバーが来日した際は、実験に大学院生が参加し、相互交流しながら実験を進めた。また、フランス側メンバーに行っていたいただいたセミナーにも大学院生が多数参加し、研究面でも国際交流することができた。さらに、D1 の山根氏が 2024 年の 1~2 月にフランス側を訪問し、現地グループの実験に参加した。我々の研究室で行っている実験とは異なる手法を体験し、さらに海外の研究室の雰囲気を知ることで、本人の研究に対する視野を大きく広げることができた。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

昨年秋には 2 度目の二国間事業に申請したが、先方のルールで Sakura プロジェクトには応募できず、オープン枠での応募となり残念ながら落選となった。今後もいくつかの交流事業への応募を考えている。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)
特になし。