

京都大学教育研究振興財団助成事業
成 果 報 告 書

年 月 日

公益財団法人京都大学教育研究振興財団

会 長 藤 洋 作 様

所 属 部 局 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

職 名 教授

氏 名 石田 憲二

助 成 の 種 類	令和6年度 ・ 研究活動推進助成			
申請時の科研費 研究 課 題 名	超伝導多重相の超伝導状態の同定			
上記以外で助成金 を 充 当 した 研 究 内 容	1. 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 2. Sr2RO4での「非従来型」を超える超伝導状態の探求			
助成金充当に関 わる共同研究者	(所属・職名・氏名) 1. 東北大金属材料研究所・教授・青木 大 2. 豊田理化学研究所・フェロー・前野悦輝			
発表学会文献等	(この研究成果を発表した学会・文献等) ・The 22nd International Conference on Magnetism (ICM 2024) Invited Talk, 2nd July @Bologna Italy ・SUPERMAX Invited Talk, 14th Oct. @Toulouse France			
成 果 の 概 要	研究内容・研究成果・今後の見通しなどについて、簡略に、A4版・和文で作成し、添付して下さい。(タイトルは「成果の概要／報告者名」)			
会 計 報 告	交付を受けた助成金額	1,500,000	円	
	使用した助成金額	1,500,000	円	
	返納すべき助成金額	0	円	
	助成金の使途内訳	費 目	金 額	
		工具及び備品	687,500	
		消耗費	381,178	
		旅費	431,322	
当財団の助成に つ い て	(今回の助成に対する感想、今後の助成に望むこと等お書き下さい。助成事業の参考にさせていただきます。) 昨今、研究費獲得競争は熾烈になり基礎科学を積み上げていく研究には研究資金が回ってこない状況にある。基礎科学の発展のために今後も末永く続けていって頂きたい助成と思います。本助成事業は、特に院生を指導する立場にある教員には大変ありがたい支援であった。昨年度の助成に対し厚く御礼申し上げます。			

成果の概要 / 石田 憲二

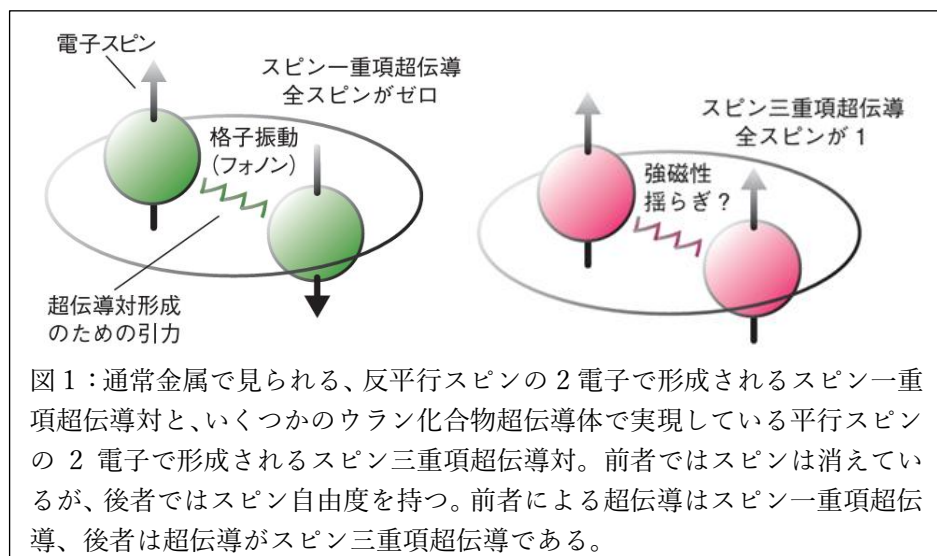
2024年度京都大学教育研究振興財団研究活動推進助成を受け、「超伝導多重相の超伝導状態の同定」の研究を行なった。具体的には、スピン三重項超伝導体 UTe_2 における超伝導状態でのスピンの状態を知るために、 ^{125}Te 核の核磁気共鳴(NMR)によるナイトシフト測定を行い、スピン磁化率を調べました。その結果、 c 軸に磁場を印加した際、磁場の増加に伴い超伝導対のスピン成分が磁場方向に向くことを見出した。この振舞いは超伝導対がスピンを持たないスピン一重項超伝導では期待できず、スピン三重項超伝導に固有な振舞いと考えられる。

2018年に発見されたウラン化合物超伝導体 UTe_2 は[1]、スピン三重項超伝導体と考えられている強磁性超伝導体と類似点が見られることや、高磁場下や圧力下で超伝導多重相を示すことから、発見当初よりスピン三重項超伝導体の可能性が指摘されてきた[2]。スピン三重項超伝導を確認するには超伝導状態のスピン磁化率の測定をする必要があるが(図1参照)、 UTe_2 は①超伝導が常磁性状態で起こること、②超伝導転移温度が 2.1 K と他のウラン化合物超伝導体に比べ高いこと、③良質な大型単結晶が得られること[3]などの理由から、NMRによる超伝導状態のナイトシフト測定には最適の物質である。ちなみに超伝導状態では超伝導反磁性効果のため通常の磁化率測定は使えず、NMRによるナイトシフト測定は超伝導状態の磁化率を精度よく知ることのできる数少ない実験手法である。

我々は、 UTe_2 の超伝導発見直後から ^{125}Te -NMRによるナイトシフト測定を行なってきた。その結果、スピン磁化率の振舞いはスピン一重項超伝導では定量的にも説明つかないことを見出し、スピン三重項が実現していることを明らかにした[4-8]。また各結晶軸のナイトシフトを低磁場で測定し、超伝導状態で全結晶軸のスピン磁化率が減少することから[8]、スピン三重項超伝導を特徴づける d ベクトルは全結晶軸成分持つことも明らかにした。

このような背景のもと明らかにしたいこととしては、スピン三重項超伝導体もつスピンの自由度は

磁場に対しどのように振る舞うのか、またスピン状態の変化に伴って超伝導に変化は見られるのかという点である。このような、スピン三重項超伝



導体を理解するにあたって基礎的な問題があるが、スピン三重項超伝導候補物質が見つかっていなかったことや、強磁性超伝導体ではスピン磁化率測定は強磁性の内部磁場のため行えなかったという問題点があり、現在まで調べられていなかった。

本研究では UTe_2 の超伝導状態におけるスピン磁化率の減少の様子を $H \parallel c$ において調べた。また超伝導の性質は、同じ条件のもと交流磁化率測定によるマイスナー効果の大きさから調べた。図 2(a) は $H \parallel c$ のいくつかの磁場におけるナイトシフトの温度依存性、図 2(b) は最低温 (70 mK) と常伝導状態 (2 K) のナイトシフトの磁場依存性を示す。低磁場で見られていた超伝導状態でのスピン磁化率の減少は磁場印加に伴い抑制され、 $H \parallel c$ 方向の上部臨界磁場 H_{c2} よりもはるかに小さい 5 T 程度でほぼ見られなくなっている。この結果は、スピン三重項対のスピンは磁場印加に伴い弱い磁場でも磁場方向に向き、5 T で既に磁場方向に向いていることを示唆している。さらに興味深い点として、この 5 T あたりで H_{c2} の磁場依存性に変化が見られていて、5 T 以上で超伝導が増強されていることである。これは超伝導対のスピン状態と、超伝導の性質に何らかの相関があることを示唆している。スピン一重項超伝導対はスピン自由度を持たないため、弱い磁場で超伝導状態のスピン磁化率が大きく変化することは考えにくく。本研究で得られた結果もスピン三重項超伝導体に特徴的な振舞いと考えられる。

以上のように、本研究では超伝導状態におけるスピン磁化率の詳細な研究によって、今まで未解明であったスピン三重項超伝導体のスピン状態について知見を得ることが出来た。この内容は、昨年夏に開催された磁性の

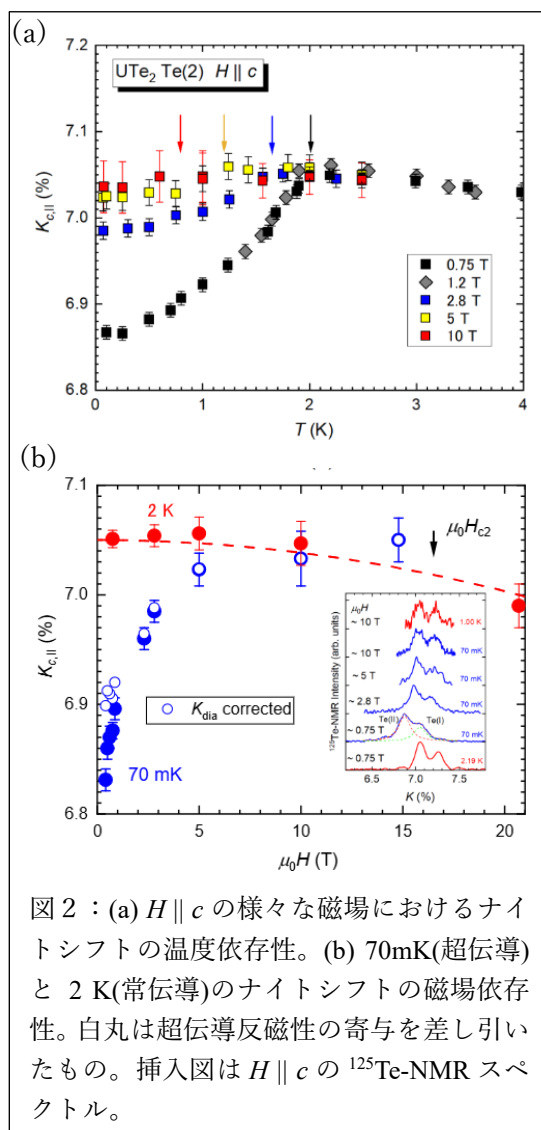


図 2 : (a) $H \parallel c$ の様々な磁場におけるナイトシフトの温度依存性。(b) 70 mK (超伝導) と 2 K (常伝導) のナイトシフトの磁場依存性。白丸は超伝導反磁性の寄与を差し引いたもの。挿入図は $H \parallel c$ の ^{125}Te -NMR スペクトル。

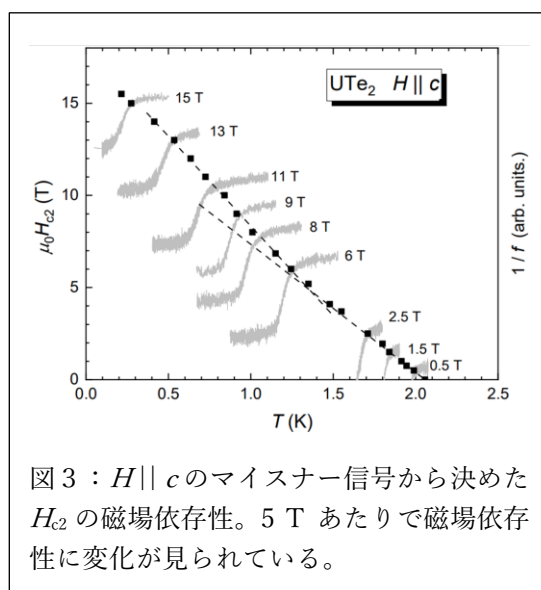


図 3 : $H \parallel c$ のマイスナー信号から決めた H_{c2} の磁場依存性。5 T あたりで磁場依存性に变化が見られている。

国際会議 ICM2024 にて招待講演で発表した。現在この成果は論文としてまとめている段階です。

- [1] S. Ran *et al.*, *Science* **365**, 647 (2019).
- [2] D. Aoki, K. Ishida *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **34**, 243002 (2022).
- [3] H. Sakai *et al.*, *Phys. Rev. Materials* **6**, 073401 (2022).
- [4] G. Nakamine, S. Kitagawa, K. Ishida, D. Aoki *et al.* *J. Phys. Soc. Jpn.* **88**, 113703 (2019).
- [5] G. Nakamine, K. Kinjo, S. Kitagawa, K. Ishida, *et al.*, *Phys. Rev. B* **103**, L100503 (2021).
- [6] K Kinjo, H Fujibayashi, S Kitagawa, K Ishida, *et al.*, *Phys. Rev. B* **107**, L060502 (2023).
- [7] K Kinjo, H Fujibayashi, S Kitagawa, K Ishida, *et al.*, *Science adv.* **9** (30), eadg2736 (2023).
- [8] H. Matsumura, S. Kitagawa, K. Ishida *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 063701 (2023).