

# 大学院教育支援機構 (DoGS) 海外渡航助成金 報告書

## Outcome report

計画名 Plan	構造に乱れのない量子スピン液体の低温物性探索のための共同研究
氏名 Name	田中優輝
研究科・専攻・学年 Graduate school/Division/Year level	理学研究科・化学専攻・博士課程3年次
渡航国 Country	オーストリア
渡航日程 Travel schedule	2025年 3月31日 ~ 2025年 6月1日

- ページ数に制限はありません。No limits on the number of pages
- 写真や図なども組み込んでいただいて結構です。You can include pictures or illustrations.
- 各項目について具体的に記述してください。Please fill in each item specifically.
- 日本語または英語で記載ください。Please use Japanese or English.

### 渡航計画の概要 Outline of the travel plan

オーストリア・ウィーン工科大学 (TU Wien) の Pustogow 研究室にて、2 か月間の共同研究を行う。Pustogow 博士はスピン液体の研究で多くの成果を報告しており、量子スピン液体の研究を行う上で非常に重要な研究者である。特に最も多く研究されているスピン液体物質である  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>(CN)<sub>3</sub> ( $\kappa$ -Cu)に関するレビュー<sup>[1]</sup>を執筆されている他、ESR(電子スピン共鳴)測定により  $\kappa$ -Cu が 6 K 以下でスピギャップが開くことを報告した Science の論文<sup>[2]</sup>の共著者でもある。この先生の下で、測定およびディスカッションを行うことで、研究成果を上げるだけでなく研究者としての思考力・行動力の向上を図る。

研究内容としては、構造に乱れのない量子スピン液体  $\kappa$ -(ET)<sub>2</sub>Cu[Au(CN)<sub>2</sub>]Cl ( $\kappa$ -CuAuCl)の極低温における詳細な物性測定を行い、量子スピン液体の本質解明を目指す。本物質は我々の研究室で新規合成された物質であり、ESR 等の磁気物性測定によって少なくとも 4 K までギャップであることが申請者らによって報告されている(図 1)<sup>[3,4]</sup>。この物質の低温物性を調査することは、量子スピン液体の基底状態の解明のために重要である。単結晶資料は日本で合成を行い、それを持参してウィーン工科大学にて誘電率と熱膨張の温度依存性の詳細な測定を行う。これらの測定によって極低温での励起状態や構造転移の有無を調査し、構造の乱れを排除した純粋な量子スピン液体の基底状態を明らかにする。

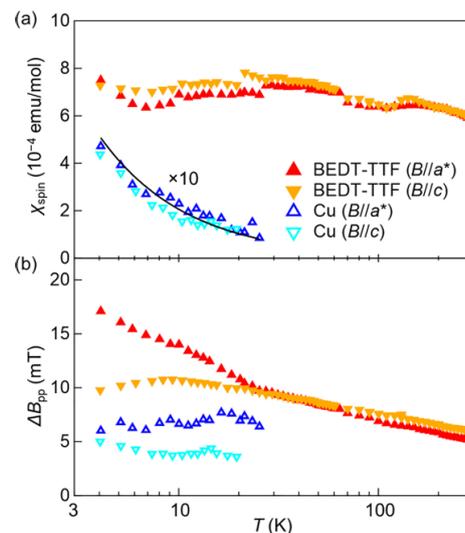


図 1, ESR 測定より得られた(a)磁化率, (b)線幅

### 成果 Outcome

Pustogow 研究室にて、NMR 測定、熱膨張測定、誘電率測定についての指導を受けた。NMR は自作コイル中にサンプルを挿入し PPMS を用いて測定する手法を学んだ。熱膨張測定は、サンプルを銀製のスペーサー中に挟み、そのキャパシタンスを測定する手法にて実際に測定を行った。しかし、サンプルのサイズが小さかったこと、測定中にサンプルが砕けてしまったこと等の理由により、この測定については継続を断念した。誘電率測定は、Alpha a high performance frequency analyzer および PPMS を用いて測定を行った。以下では、誘電率測定の結果について詳細に記述する。

低温でも磁気秩序を示さない量子スピン液体状態では、極低温でもスピンの自由度が残っていると考えられる。実際に ESR や NMR 等の磁気測定では、低温までギャップが開かない現象が確認されている[4]。一方、電荷の自由度を観測するためには、誘電率の測定が有効であると考えられる。量子スピン液体  $\kappa$ -Cu では、図 2 の様に、40 K 以下で誘電率( $\epsilon/\epsilon_0$ )および交流伝導度( $\sigma_{AC}$ )の周波数依存性が確認されている[5]。また 30 K 付近にピークを持ち、高周波数ほど高温側にピークトップがシフトする。本研究では、 $\kappa$ -CuAuCl 単結晶の面間方向に誘電測定を実施した。300~2 K までの温度依存性を測定したところ、15 K 以下で交流伝導度の周波数依存性が確認された。これは  $\kappa$ -Cu よりも低い温度である。また、2K における交流伝導度が  $10^{-4}$  (S/cm)程度と  $\kappa$ -Cu より 5 桁も大きい結果が得られた。誘電率では  $\kappa$ -Cu と同様、温度依存性がピークを持ち、高周波数ほどピークアップが高温側にシフトする挙動が観測された。一方、誘電率の絶対値およびピークの温度は大きなサンプル依存性が観測された。これは、 $\kappa$ -CuAuCl の交流伝導度が大きいことが原因と考えられる。高周波数 (500kHz, 1MHz) のデータでは比較的サンプル依存性が小さいため、これらのデータを使用して考察を行えないか、現在解析に取り組んでいる。また、これらのデータは圧力下における  $\kappa$ -Cu の誘電率[6]と似ており、それらの振る舞いの比較ができるか考察を行っている。

その他にも、PPMS を用いたいくつかの測定手法を学べた他、ウィーン工科大学の연구원の方や学生の皆様と交流し、海外での研究生活に慣れることができたこと、それによって研究に対する自信が持てたことも、本渡航の大きな成果である。

## 今後の展望 Prospects for the future

測定結果については、今後も Zoom でディスカッションを行い、共同研究を続けていく。また今回得られた研究成果をもとに、スピン液体の基底状態についてさらなる考察を行い、今後の研究計画の基盤としていく。得られた様々な物性測定結果をもとに、スピン液体の基底状態についての解明を目指す。

本渡航にて、海外での共同研究に実際に取り組むことができた。研究成果を得られただけでなく、海外での研究活動に対する自信を得られたことも大きな成果である。また Pustogow 先生とは、これまでは学会で何度か話したことがある程度であったが、具体的な共同研究に深い繋がりを持てたことも、今後の研究活動の礎となった。

最後に、海外への渡航および研究活動に、ご支援をいただいた京都大学大学院教育支援機構 (DoGS) に心より御礼申し上げます。

## 参考文献 Reference

- [1]. A. Pustogow, *Solids*, **3**, 93 (2022).
- [2]. B. Miksch *et al.*, *Science*, **372**, 276 (2021).
- [3]. S. Tomeno *et al.*, *Inorg. Chem.*, **59**, 8647 (2020).
- [4]. Y. Tanaka *et al.*, *Phys. Rev. B* **110**, 144423 (2024).
- [5]. M. Abdel-Jawad *et al.*, *Phys. Rev. B* **82**, 125119 (2010).
- [6]. A. Pustogow *et al.*, *npj Quantum Materials*, **6**, 9 (2021).

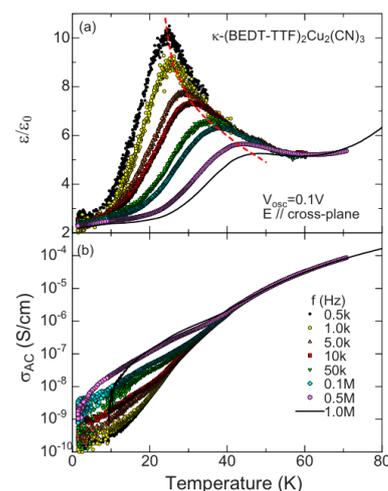


図 2,  $\kappa$ -Cu の誘電率および交流伝導度