

MERIT 長期海外派遣 報告書

新領域創成科学研究科 物質系専攻 博士1年
石田浩祐

概要

今回、平成30年9月26日から11月23日にかけてドイツの Karlsruhe Institute of Technology (KIT) に滞在し、Institut für Festkörperphysik (IFP)の Dr. Christoph Meingast の下で研究を行った。また、その間の10月15日から10月26日にかけてフランスの École polytechnique を訪問し Laboratory of Irradiated Solids の Dr. Marcin Konczykowski の下で電子線照射実験を行った他、パリ市内の様々な研究グループを訪問したのでそれらも含めて報告する。

カールスルーエ工科大学滞在時

今回の訪問では、鉄系超伝導体 RbFe_2As_2 の young modulus を three-point-bending technique を用いて測定することを行った。最近我々の研究グループは、試料に歪みを加えて電気抵抗の面内異方性がどのくらい発達したかを評価する elastoresistance の測定により RbFe_2As_2 においてネマティック揺らぎを見積もると、この系では従来の方向と向きが45度異なる電子ネマティック秩序が存在することが明らかになった。電子ネマティック秩序においては、電子系が自発的に回転対称性を破るが、それに伴って格子系にも面内異方性が生じ、ネマティック転移温度において格子の softening が起きることが期待される。KIT のグループでは独自に開発した dilatometer を用いた高精度の熱膨張測定系を用い、材料の曲げ強さを測定する際によく用いられる three-point-bending technique を応用して young modulus を測定することを行っている。今回、この手法を用いて RbFe_2As_2 において格子の softening が観測されるか検証を行った。

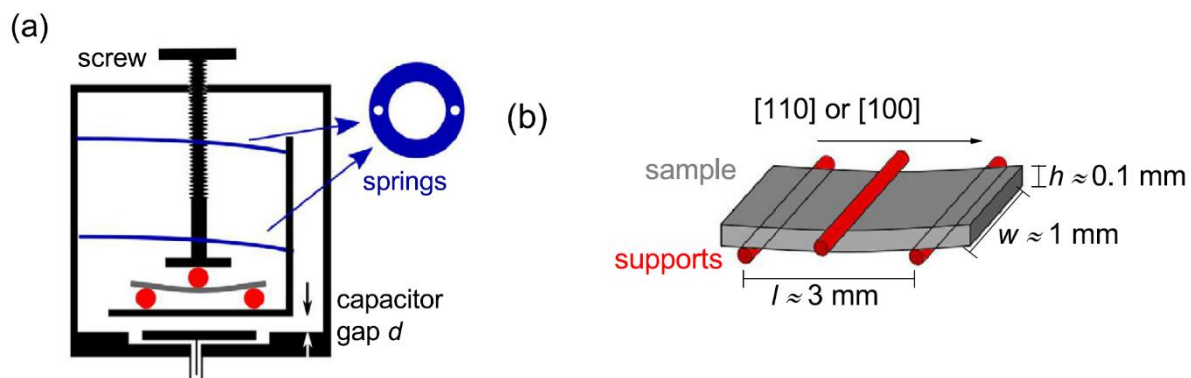


Figure 1. three-point-bending technique による young modulus 測定のセットアップ (Anna E.Böhmer and Christoph Meingast, Comptes Rendus Physique **17** 90 (2016) より引用)。

測定の結果、[100]方向と[110]方向共に young modulus に格子の softening が見られなかった。これは電子ネマティック秩序により生じる格子の異方性が小さいことを示唆している。 RbFe_2As_2 は試料が柔らかく bending により plastic 変形してしまいやすく、本質的なデータをとることが難しかったため、今回の訪問では preliminary な結果を得るところまでにとどまった。今後も共同研究という形で引き続き測定を進めていただくこととなった。

KIT IFP には、滞在した New Materials, Transport, Thermodynamics and Mesoscopics のグループの他に、Electron Spectroscopy、Inelastic Photon Scattering や Theoretical Solid-State Physics など様々なグループが存在するが、昼食はグループ関係なく一緒に大学の Mensa（食堂）でっており、和気藹々とした雰囲気が印象的であった。それぞれ専門とする測定は異なっているが、グループ間で collaboration を頻繁に行っており、研究環境としても非常に好ましいものになっていた。

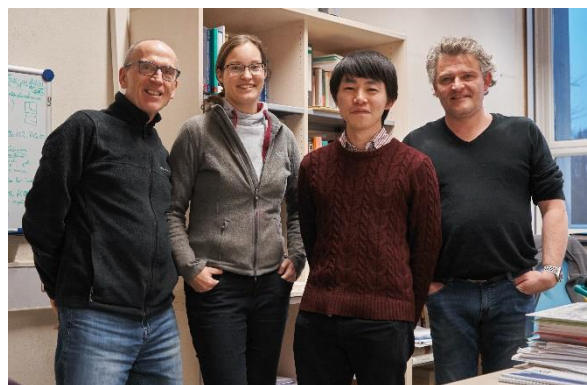


Figure 2. KIT IFP の方々と。左から、Christoph Meingast, Kristin Willa, 筆者, Frederic Hardy。

また、IFP Seminar としてこれまでの研究成果に関するセミナー発表を行う機会をいただいた。聞きにこられた方の多くは研究の興味が近かったので、質疑応答は大変自身の勉強になった。特に、Theoretical Solid-State Physics グループの Head である Joerg Schmalian 教授からは最近の我々の実験で示唆された XY ネマティック揺らぎに関して詳しく議論していただき参考になった。さらに、後日 Joerg Schmalian と議論する機会を設けていただき、我々の結果に関して理論的な立場からコメントをしていただいた。彼の論文はよく目を通していたが、理解できなかった部分も多かったので、それらを丁寧に解説していただいたのは大変ありがたいことだった。

加えて、カールスルーエ中央駅から鉄道で約 1 時間半の距離にある Max Planck Institute for Solid State Research の Solid State Spectroscopy グループを訪問した。このグループには昨年の MERIT 海外研修で一回訪問していたが、今回の訪問では最近の我々の結果について議論していただいたほか、group seminar で発表する機会をいただいた。特に、グループリーダーである Bernhard Keimer 教授は銅酸化物高温超伝導体の研究における大家であり、熱心に自分の結果について聞いていただきコメントを頂けたのは光栄だった。

フランス滞在時

フランスの École polytechnique においては所属研究室の電子線照射実験のマシントimeがあり、Dr. Marcin Konczykowski と共にトポロジカル超伝導候補物質である $\text{Sr}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ やハーフホイスラー化合物に対して照射実験を行った。電子線照射実験は世界でこの École polytechnique でのみ行えるオリジナリティの高い手法であり、多くの場合キャリア密度を変えずに均一な点欠陥を導入できることが特徴である。電子線照射を行うたびに電気抵抗及びホール係数測定を行い、試料に照射効果が現れていることを確認した。

École polytechnique ではちょうど同時期にアメリカの Ames Laboratory 所属の Dr. Makariy Tanatar が長期滞在されていた。彼は電気抵抗測定を長年行っているプロフェッショナルであり、最近の我々の結果について議論していただいた。また、Laboratory of Irradiated Solids においてセミナーをさせていただき、大変有益なコメントをいただいた。

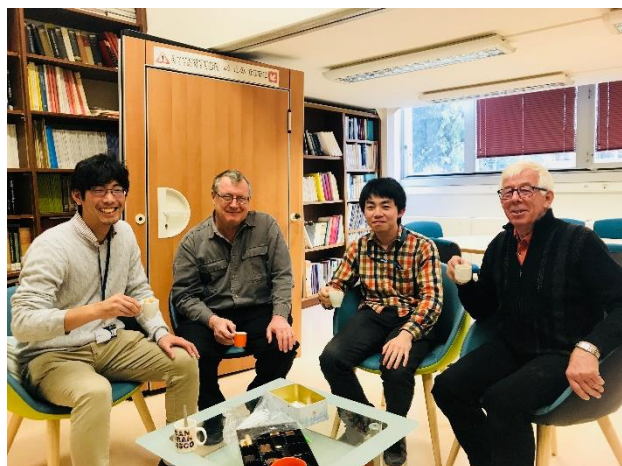


Figure 3. École polytechnique にて。左から松浦氏、Makariy Tanatar、筆者、Marcin Konczykowski。



Figure 4. 電子線発生のための加速器。

フランス滞在時にはパリ市内の研究グループも訪問させていただいた。まず、Université Paris Diderot Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques (MPQ) Spectroscopy of quasi-particles (SQUAP)グループの Yann Gallais 教授のもとを訪問した。彼らは Raman scattering の実験に取り組んでおり、Nematic 揺らぎを Raman スペクトルから評価することを行っている。この手法は Elastoresistance や three-point bending の実験と異なり試料に外力を加えることなくネマティック揺らぎを測定できることが利点である。彼らのグループとは以前から共同研究を行っており、今回の訪問でも彼らのグループで我々の最近の結果に関するセミナーを行い、試料提供をした他共同研究に関する打ち合わせを行った。また、Theory group の Indranil Paul とも議論していただいた。

次に、Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles (ESPCI) Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux (LPEM) の Quantum Matter group を訪問させていただいた。Director である Kamran Behnia と我々の電子ネマティック状態に関する結果の議論をさせていただき、その後グループの Post Doc や PhD student の方々に彼らが取り組んでいる研究について説明していただいた。SrTiO₃ の異常な電気抵抗の振る舞いや、グラファイトの高磁場相で現れる密度波、WP₂における Wiedemann–Franz 則の破れなど自身の研究とは直接的には関係しない内容だったが、どれも興味深く感じられた。ここでもセミナーを行い、聞いていらしゃった理論家の Luca de' Medici とはセミナー後にも議論していただいた。彼の提唱する鉄系超伝導体の orbital selective mottness について論文は読んでいたが、解説していただいたことで理解が深まった。

生活・研究環境に関して

海外に長期滞在することは今回が人生で初めてだったので、今回の訪問で生活や研究環境などにおいて海外と日本で違う点をたくさん学んだ。カールスルーエは比較的新しい街で、カールスルーエ城を中心に出来上がった計画都市であった。ゲストハウスのすぐそばが中心街であったため生活に不自由はなかったが、滞在初めは日曜日にスーパーなどが閉店であることを知らなかったため困惑した。交通面においては、高速鉄道、トラム、バスのチケットをすべてスマートフォンの App で購入できるため、日本よりも便利であるように感じた。

KIT IFP には自分のような博士学生はおらず、ほとんどが Post Doc であった。ヨーロッパ各国やアメリカなど出身が様々だったので、KIT に来る前の各々の研究生活の様子を聞くことは興味深かった。海外では基本的に博士学生に対して給料が払われ、授業料も比較的安価であるため、日本における様子を伝えると驚いていた。また、ほとんどの人が Post Doc から測定技術や分野を変えていたのも今後の進路を考える上で参考になった。

謝辞

今回の訪問では、カールスルーエ工科大に加え、パリでは École polytechnique、Université Paris Diderot、ESPCI、さらに Max Planck Institute for Solid State Research といった様々な研究グループを訪問することができました。それぞれでセミナー発表をする機会を頂けたことは海外の研究者に対しプレゼンをする良いトレーニングとなりました。

今回の訪問に際し、各研究機関への訪問を後押ししてくださった指導教官の芝内孝禎教授、及び水上雄太助教に感謝申し上げます。Max Planck Institute for Solid State Research のグループリーダーである副指導教員である高木英典教授もこの訪問を推薦していただきました、ありがとうございました。また、訪問を快諾してくださった KIT IFP の Dr. Christoph Meingast、Dr. Anna Böhmer、Dr. Frederic Hardy、Prof. Dr. Matthieu Le Tacon、及び滞在中親身にしてくださった Dr. Amir-Abbas Haghighirad、Paul W. Wiecki、Dr. Kristin Willa を含む皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。加えて、各研究グループ訪問を受け入れてくださった Dr. Marcin Konczykowski、Prof. Dr. Yann Gallais、Dr. Kamran Behnia、Prof. Dr. Bernhard Keimer に深く感謝いたします。今回の訪問で見たもの、感じたことを今後の研究に活かして生きたいと思います。