

東京工業大学

極低温研究支援センターだより

No. 36

最近の研究概要

令和4年度

(2022)

目次

1	ご挨拶	大熊 哲	.....	1
2	2022年度の活動報告	大熊 哲	.....	2
	センター発表会プログラム		.....	7
3	技術情報	藤澤真士	.....	8
4	センターからのお知らせ1	藤澤真士	.....	18
	センターからのお知らせ2	大熊 哲	.....	20
5	研究報告	賀川研究室	.....	24
		平原研究室	.....	28
		腰原・沖本研究室	.....	33
		森研究室	.....	35
		大友研究室	.....	38
		鈴木研究室	.....	41
		藤澤研究室	.....	45
		大熊研究室	.....	50
6	業績リスト		.....	56
7	大岡山利用研究室一覧		.....	72
8	運営委員・専門委員・職員名簿		.....	74

1. ご挨拶

極低温研究支援センター長

大熊 哲

センター長を拝命して 2 年目を迎えました。今年度は東京医科歯科大学との統合が発表されるなど、大学はこれから大きな変革を迎えようとしています。その中で、極低温センターの組織が将来どのようなものになっていくかは予断を許しません。引き続き、藤澤先生、川路先生と協力しながら舵取りをしてまいりたいと思います。

一方、2021 年頃から始まった国内ヘリウムガスの逼迫状況は依然として解消される気配はなく、ガス価格はここ 1 年で 2 倍以上になりました。幸い本学では大岡山とすずかけ台の両キャンパスにヘリウムの液化装置と備蓄設備を有しているため、これまでに多少の利用料の値上げを行ったものの、一部の大学で見られる供給制限をせずにすんでいます。ただし出口が見えない状況であり、来年度はさらに利用料が上昇することは避けられません。利用者の皆様にはこれまでも増して、回収率の向上に努めていただきますようお願い申し上げます。このような背景の下、すずかけ台では他の研究機関からの依頼を受け、ヘリウムガスの液化供給業務を試行的に実施しました。このように近隣機関からの寒剤供給の期待が高まっていることから、今後は比較的供給能力に余裕のあるすずかけ台を中心に、有償にて他機関へのヘリウム液化サービスを行うことも検討し、本センターが学内外の低温研究のハブとなる体制を築いていきたいと考えております。

センターを取り巻く内外の環境は変わろうとも、これからも教員と技術職員が一体となった運営を続け、本学の理工学研究を支える寒剤の安定供給に努めてまいります。

2. 2022（令和4）年度の活動報告

○液体ヘリウムの供給状況－すずかけ台で試行的学外液化サービス実施－

2019年頃から始まった、米国からのヘリウムの輸出量削減および不安定な中東情勢、さらに世界的な産業用、医療用MRIの利用拡大等により、ヘリウムの国内への輸入量が大幅に減少しヘリウムの逼迫状況が続いています。この問題はガス価格の高騰にも直結し、現在本学でのガス購入価格は平常時の3倍となっています。新型コロナが一段落し、研究活動もいよいよコロナ禍前の軌道に戻ることが期待されましたが、このようなヘリウム価格の上昇が続いていることから、液体ヘリウムの学内需要はやや伸び悩んでいます（図1）。

一部の研究機関ではヘリウムの購入すらできず、このため液体ヘリウムの供給制限を行っているところもあるようです。NMRのように液体ヘリウムを充填し続けなければならない装置もあるため、ヘリウム液化機を保有していない研究機関では事態は一層深刻です。実際に今年度、すずかけ台地区部門では、近隣の大学からヘリウム液化の依頼がありました。社会貢献という意味もあり、川路先生の先導の下、10月から12月にかけて当該大学に対してヘリウムガスの液化供給サービス（トータル数百リットル分）を試行的に実施しました。今後も他機関からのヘリウム液化の一定のニーズが見込まれることから、ヘリウムの液化サービスを有償にて実施する仕組みの検討を始めました。液化能力に比較的余裕のあるすずかけ台地区でスタートさせます。

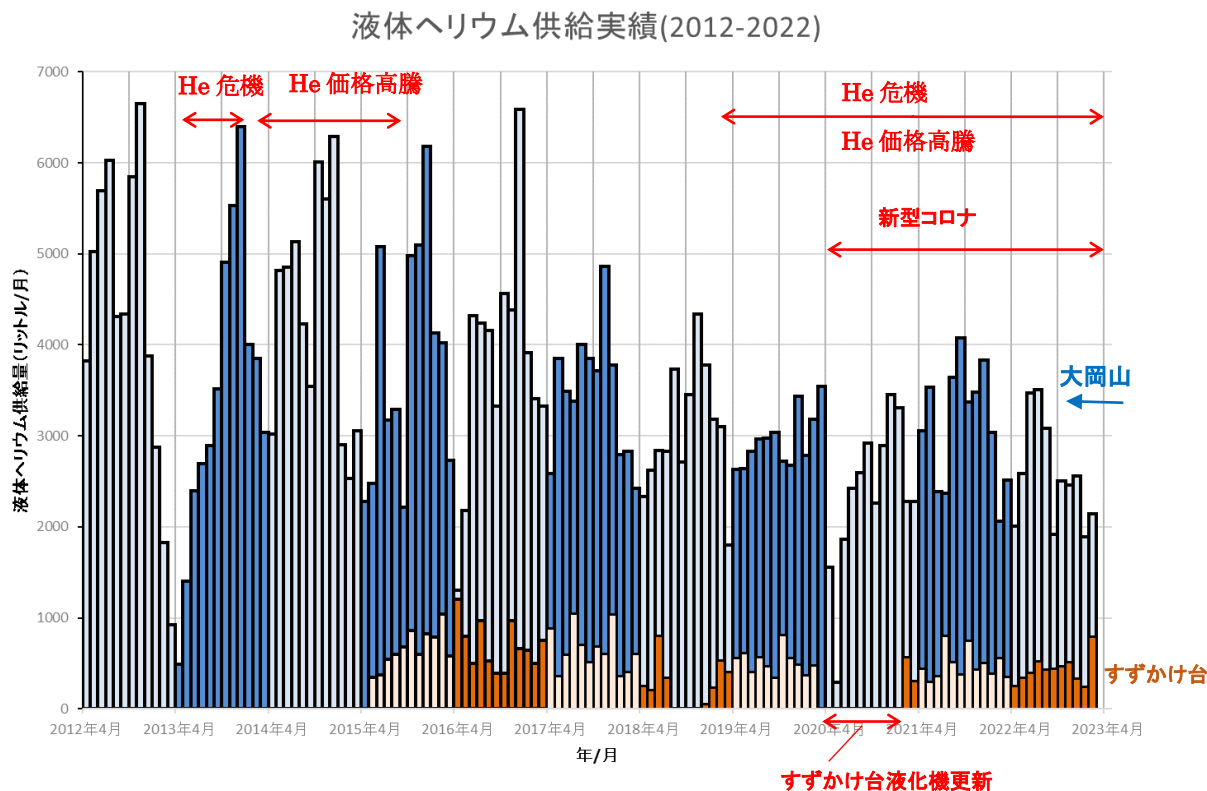


図1 大岡山とすずかけ台における液体Heの月別供給量(学外供給分は含まず)。

○大岡山のヘリウム液化装置の運転状況

大岡山地区のヘリウム液化装置は更新されてから10年余りが経ち、その間大きな故障もなく順調に稼働してきました。ところが、2022年度には液化機の心臓部である膨張タービンの1つに、初期起動時にまったく回転しなくなるという不具合が発生しました。タービンを取り出して点検をしたところ、目に見えるような異常は見つからず、手で回してみても回転はスムーズです。前の液化機も含めて、30年間で初めて起こった非常に珍しい事象で、原因はまだ特定できていません。現象としては何らかの原因により、起動時の回転の最大静止摩擦力が増大したことになります。タービン周辺の空間のパージ作業を数回実行したところ一応復旧しました。代替のタービンもありませんので、そのまま運転を続けています。

装置の極めて重要な部分であることから、液化機運転従事者間での情報共有という意味も込めて、別項「技術情報」でも詳しくご報告いたします。

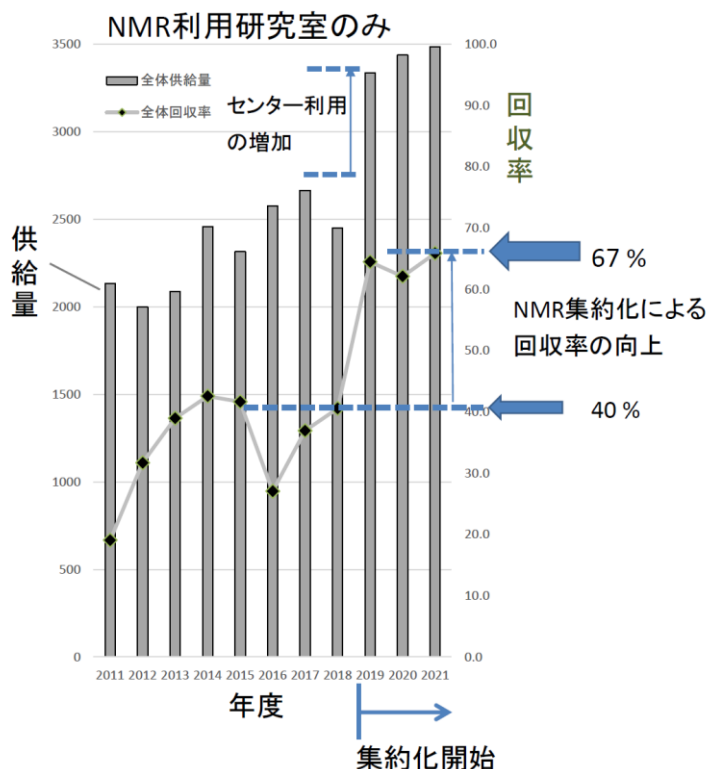


図2 コールドボックス上部に位置する第1および第2タービン部分の外観

○大岡山のNMR集約化による回収率の向上

ヘリウムガスの回収率については、大岡山地区ではこれまでずっと80%から80%台前半の間を推移していましたが、今年度は85%程度にまで向上しました。NMR装置の集約化の促進がその一因かと思われます。図3は大岡山地区のNMR利用研究室の液体ヘリウム供給量と回収率の推移を表わします。当初40%程度だった回収率が、集約化によって70%近くまで向上したことがわかります。今後も回収率の向上に努めていただきますよう、ご協力をお願い申し上げます。

図3 大岡山地区のNMR利用研究室の液体ヘリウム供給量（棒グラフ）と回収率（折れ線グラフ）の年度変化。



○ 技術スタッフの見学・交流等の記録

下の保安教育記録に示すように、今年度もセンターの技術職員は、他大学のヘリウム液化施設等の見学や講習会への参加を積極的に行い、最新の技術情報の収集と発信、および人的交流を行いました。

保安教育実施記録

<p>日本物理学会 2022 秋季大会 主催：日本物理学会 実施年月日：2022 年 9 月 12 日(月)-15 日(木) 場所：Zoom によるオンライン開催。東京工業大学大岡山キャンパス 対象者：センター職員(参加者：藤澤真士) 内容：低温技術に関する講演を聞いた。ヘリウム液化施設の関係者と情報交換をした。</p>
<p>高圧ガス保安教育(従事者向け) 主催：東京大学物性研究所 低温液化室 日本スウェージロック FST 実施年月日：2022 年 11 月 18 日(金) 場所：東京大学物性研究所 対象者：センター職員(参加者：金本真知) 内容：配管曲げ加工のセミナーを受講し、銅管を用いて実習を行った。高圧配管に用いるホースの選定やレイアウトの注意点について学んだ。</p>
<p>高圧ガス製造者・貯蔵所所有者保安講習 主催：公益社団法人 東京都高圧ガス保安協会 実施年月日：2023 年 2 月 3 日(金) 場所：Zoom ウェビナーのオンライン講習 対象者：センター職員(受講者：藤澤真士) 内容：オンラインで講習会に参加し、高圧ガスの保安に関して学んだ。東京都環境局の講師からは「最近の高圧ガス保安行政動向等について」、大陽日産株式会社の講師からは「高圧ガス製造所・貯蔵所、事故事例等について」の講演があった。</p>
<p>2022 年度分子科学研究所技術研究会 主催：自然科学研究機構 分子科学研究所 技術推進部 実施年月日：2023 年 3 月 10 日(木)- 11 日(金) 場所：オンライン開催 対象者：センター職員(参加者：藤澤真士、金本真知) 内容：極低温分野に参加し、「超伝導・低温技術、低温機器設備の保守・管理、高圧ガス関連」について学んだ。また、オンライン見学会や極低温情報交換会に参加した。</p>
<p>日本物理学会 2023 春季大会 主催：日本物理学会 実施年月日：2023 年 3 月 22 日(水)-25 日(土)</p>

場所：Zoom によるオンライン開催 対象者：センター職員(参加者：藤澤真士) 内容： 低温技術に関する情報を集めた。

○ その他の活動

2022年度に本センターで実施したイベントやセンターの活動状況を以下に記します。その一部は、センターのホームページ (<http://www.rcltp.titech.ac.jp/>) 上でも公開しています。

2022 年

4 月「新入生オリエンテーション」における施設見学

毎年開催してきました、理学院の新入生オリエンテーションの一環としてのセンター研究室の公開、低温のデモ実験は、残念ながら本年度も新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から現地開催は中止となりました。それに代わって、オンラインでの低温研究の紹介を行いました。

「極低温センターだより No. 35」の発行

学内の低温関連研究者の情報交換と本学の低温研究のアクティビティを広く学内外の方々に知っていただくことを目的として、本センターおよびセンター利用研究室の研究成果の概要をまとめた年次報告書「極低温研究支援センターだより No.35」を発行しました。極低温センターの web ページからダウンロードすることができます。

<http://www.rcltp.titech.ac.jp/report/index.html>

「第 33 回低温技術講習会」の開催 —高圧ガス・寒剤取扱上の安全教育—

新規にセンターを利用する教職員・学生を対象とする講習会です。本年度は昨年同様、新型コロナウイルス感染予防のため、Zoom によるオンラインで実施しました。本講習会は寒剤や高圧ガスを取り扱う上での安全教育と低温技術全般にわたる実践的な教育を目的としています。内容はガスボンベ等の高圧ガス取り扱い上の注意、低温技術の基礎、液体ヘリウム・液体窒素寒剤取り扱い上の留意点、事故の事例紹介に基づく安全教育を中心としています。低温物性の基礎、さらに、講義科目では扱わないクライオスタットの構造、設計に関する実践的な内容も含まれます。

通常、液化室で実施していたヘリウム液化システムの紹介、液体ヘリウムの汲み出しの実演、デモ実験、および液体窒素自動汲み出し装置の取り扱いの説明は、本年度は見合わせました。

7月「女子高校生と先生の施設見学」の受け入れ

本学アドミッション部門から、「大学見学会」への協力要請を受け、都内私立女子高校3年生の生徒さんと引率の先生を対象とした見学会を開催し、研究施設と低温研究の紹介を行いました。あわせて、超伝導のデモンストレーション実験も行いました。皆さんとても熱心に聴講され、説明後は研究内容だけでなく、将来の理系分野への進路選択なども含む活発な質疑応答がありました。



見学高校生に対する超伝導のデモ実験の様子

11-12月「高圧ガス保安検査」の実施

高圧ガス保安法に基づく定期自主検査を11月に実施し、12月に東京都の高圧ガス保安検査を受検しました。本年度も例年同様指摘事項はなく、良好な管理運営がなされているとの講評をいただきました。



東京都による保安検査の様子

2023年

2月「極低温センター研究発表会」の開催

極低温センターおよびセンターを利用する研究グループの1年間の研究成果を紹介し、研究室間の交流を深めることを目的として、毎年冬に開催している研究発表会です。今年度も昨年同様Zoomによるオンライン開催としました。センター技術職員の藤澤真士さんによる「He回収率向上に向けた取り組み」の講演から始まり、物理、化学、材料、応用化学、電気電子など多岐にわたる分野の先生方から、わかりやすいイントロダクションを含む、最先端の興味深い講演をしていただきました。講演者と講演題目は、後につけましたプログラムを参照ください。今後も大岡山とすずかけ台キャンパスの合同で続けてまいります。

極低温研究支援センター研究発表会のお知らせ

極低温研究支援センター長 大熊 哲

下記のように極低温研究支援センターの研究発表会を開催いたします。多数の皆様のご参加をお待ちしております。

日時・場所 2023年2月2日(木) 13:30 開始・Zoom によるオンライン開催
登録リンク: <https://zoom.us/meeting/register/tJEod06qqzsuH9L6bckq0tNFIFIrBljy9Er0>
ミーティング ID: 955 3725 0456 **パスコード:** 1mzzqZ

- 13:30-13:35** 開会の辞 座長：大熊 哲
大熊 哲（理学院物理学系・極低温センター長）
- 13:35-13:45** ヘリウム回収率向上に向けた取り組み
藤澤 真士（極低温センター・OFC）
- 13:45-14:05** 量子ホールプラズモン共振器と二重量子ドットの結合系
藤澤 利正（理学院物理学系 藤澤研）
- 14:05-14:25** 二次元フラストレート格子 NbO₂層における磁気量子臨界挙動と超伝導ドーム
相馬拓人（物質理工学院応用化学系 大友研）
- 休憩 (10分)
- 座長：藤澤 利正
- 14:35-14:55** 非平衡相転移における Kibble-Zurek 機構の検証
大熊 哲（理学院物理学系 大熊研）
- 14:55-15:15** kappa-(BEDT-TTF)₂TaF₆の構造相転移
川本 正（物質理工学院材料系 森研）
- 15:15-15:35** シリコン量子ビットの位相雑音に関する研究
米田 淳（超スマート社会卓越教育院 小寺研）
- 休憩 (10分)
- 座長：川路 均
- 15:45-16:05** 単層 FeSe/STO のその場電子輸送による超伝導転移と電子状態の超伝導“ギャップ”の比較
平原 徹（理学院物理学系 平原研）
- 16:05-16:25** 電子強誘電体の非線形光学応答
沖本 洋一（理学院化学系 腰原・沖本研）
- 16:25-16:45** 表面増強ラマン散乱計測によるナフタレンチオール二量体の電子輸送特性の解明
金子 哲（理学院化学系 西野研）
- 16:45-16:50** 閉会の辞
藤澤 利正（理学院物理学系・極低温センター）

技術情報

大岡山地区部門における液化室の維持管理

○藤澤 真士^{A,B}、金本 真知^B、大熊 哲^{B,C}

オープンファシリティセンター^A、極低温研究支援センター^B、理学院物理学系^C

1 はじめに

極低温研究支援センター大岡山地区部門の寒剤供給の状況や、装置のトラブル・メンテナンス等について、これまで技術研究会やセンターだよりで報告をしてきた[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]。今回は、ここ数年に生じた装置のトラブルやメンテナンス等について報告する。

2 計装空気

2.1 ベビコン

計装空気はヘリウム液化システムのバルブの開閉等、いろいろな場所で使われている。計装空気はベビコンで作られる。ベビコンのメンテナンスとトラブル対処について、以前に報告した[4, 6]。

ベビコンのオートドレントラップのストレーナ部分は錆等が溜まりやすい。詰まった状態を放置すると、オートドレントラップの故障にもつながる。ここ数年は、2~3か月に一度、確認している。もし錆等が溜まっていたら清掃を行っている(図 2.1)。



図 2.1 ベビコンのオートドレントラップのストレーナ。錆が見える。

2.2 計装空気の漏れ

ベビコンで圧縮された計装空気は、隣に設置したタンクに貯められる。その後、圧縮空気除湿装置を通り水分が除かれ、必要な場所に送られる。計装空気の配管の材質は金属や樹脂である。ゴムチューブを含む樹脂製の配管は、経年劣化で傷むことがある。過去にもゴムチューブが破裂し、計装空気が漏れた。今回はタンク・除湿装置間のゴムチューブが裂け、そこから計装空気が漏れた(図 2.2.1、図 2.2.2)。新しいゴムチューブに交換した。



図 2.2.1 矢印部分でゴムチューブがさけ、ガスが漏れた。



図 2.2.2 裂けたゴムチューブ。

電磁バルブにつながるエルボ継手部分で計装空気が漏れたこともある[4, 6]。今回は以前とは別の場所で漏れた。新しい継手と交換した(図 2.2.3)。エルボ継手が劣化したときのために、予備のエルボ継手を在庫しておいた方が良い。

中圧ガスドライヤーにも計装空気が供給されている。図 2.2.4 には中圧ガスドライヤーに入る前の減圧弁が写っている。手前に見えるスウェジロック継手から計装空気が漏れた。増し締めを行い、漏れを止めた。また、減圧弁からも計装空気が外に勢いよく漏れた。その後、理由はわからないが減圧弁からの漏れは止まった。今はそのままにしている。



図 2. 2. 3 計装空気のエルボ継手。上側が新しく交換した継手。



図 2. 2. 4 中圧ガスドライバーにつながる計装空気配管。泡が出ているところから漏れた(①)。減圧弁(②)からも漏れがあった。

3 液化機本体

3.1 タービン 2 の不具合

ヘリウム液化システムは複数の装置によって構成されている。どの装置に不具合があっても困る。国内製で、交換部品がすぐに手に入り、修理が早くすむ場合は、困る度合いとしては低い。逆に海外製で、部品調達に時間がかかり、修理に長時間要する場合は、困る度合いが高まる。液化システムの構成要素のうち、特に壊れて欲しくないものの一つが、膨張タービンである。今回はそのタービンの不具合を報告する。先に結論を述べると、不具合の原因は不明だが、無事に動くようになった。今回の報告では、液化機内部の昇温や真空引き等の作業の説明は省いた。

3.1.1 トラブル発生

2022年10月27日、いつも通りヘリウム液化を進めようとした。2つあるタービンのうち、2番目のタービン(以下タービン 2)の回転数の表示がまったく上昇せず、“Coldbox Turbine 2 pressure ratio in-/Out too high-”というメッセージが出て液化機が停止した。再度試しに動かそうとしても、同様に停止する。1番目のタービン(以下タービン 1)の回転が1600以上になっても、タービン 2の回転数が増えない(図 3.1.1)。業者に対応をお願いした。

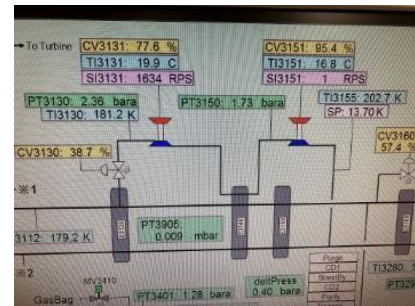


図 3.1.1 モニターPCの画面。SI3131とSI3151は、それぞれタービン1とタービン2の回転数を示す。タービン1の回転数が上がっても、タービン2の回転数が増えていない。

3.1.2 トラブル対応

タービン 2の回転数の表示が動かない原因はいくつか考えられる。

ケース 1: タービンは回っているが、回転センサーや回転計、配線等に不具合が生じ、回転が検出できていない。

ケース 2: タービンが回っていない。

ケース 1のような不具合は、他のヘリウム液化施設でも過去に起こったことがある。まずセンサー等に問題がないかを確認した。回転センサーの抵抗値を測ったところ、問題はなさそうである(センサー端子位置に関しては図 3.1.2 参考)。念のため、回転センサーを正常な部品と交換して運転を試みても、やはりタービン 2の回転数は動かない。また、回転センサーをつなぐ端子からダミー信号を送ると、モニター上で回転数が変化した。つまり回転センサー等には支障はなく、ケース 2に該当する。

なぜタービン 2が動かないのだろうか。タービンに微細な傷やゆがみが生じたことにより、回転しなくなる可能性はある。原因が明らかになるかはわからないが、タービンを目視することにした。11月2日にタービンを液化機から取り外した。タービンはデリケートなので、慎重に作業をする必要がある。実際にタービンを見たものの、傷等は見えない(図 3.1.3)。また、押せば回転する。不具合の原因は観察できない。

複雑な装置等が故障し、分解しても故障の原因がわからないことはよくある。そして、組み立てなおしたら、動く理由がわからないが動くということもある。動くことを期待し、タービン 2を取り付け、装置の運転を開始した。タービン 2は動き、ヘリウム液化も問題なくできた。一度

は動いても、また動かなくなってしまうのではないかと疑って、11月4日に液化を行ったが、このときも問題なく動いた。

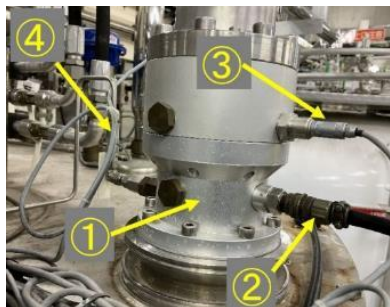


図 3.1.2 タービン周辺の様子。①の部分にタービンが入っている。②は回転センサーの端子。③は温度センサーの端子。④はケーブルの後ろでわかりにくい逆止弁。



図 3.1.3 下から見たタービン。異常は見られない。

3.1.3 トラブル再発と対応

2回連続して動いたので少し安心したが、3回目の11月7日の運転で、タービン2が動かず、同様なエラーメッセージが表示された。業者に再度対応をお願いした。11月10日頃、改めて対処を行うことになった。

なぜタービン2が回らないのだろうか。タービンが回る前に、タービンを浮かせるためのガスを流す。そのガスが適切に流れていない可能性がある。そのガスを送る配管は、タービン1とタービン2の両方につながっており、それぞれのタービンの前には逆止弁が付いている(図3.1.2)。

タービン2の逆止弁が固着し、ガスが流れないために、タービン2が動かない可能性がある。逆止弁が動作するかを確認した。固着等はなく、ガス圧がかかれば問題なくガスは流れた。これも今回タービン2が動かない原因ではない。

タービン2を再度目視した(図3.1.4)。目視の範囲で傷等は見えない。タービンを回転方向に軽く押して回転させると、とてもわずかな抵抗を感じる瞬間がある。その僅かな抵抗は、タービンが動かないほどのものとは考えにくい。タービン2が動かない原因は不明である。

前回と同様、分解と組み立ての間に、なんらかの改善があることを期待し、再度運転を開始した。理由は不明だが、タービン2は回るようになった。2回目、3回目と問題なく動き、年が明けて、この報告を書いている3月中旬も問題なく動いている。



図 3.1.4 上から見たタービン。

3.1.4 トラブルが解決しなかったときの検討等

タービン2が動かない場合、タービン2の精密な検査及び修理が必要になる。そして、修理中は液化ができない。どうすべきなのかを今回のトラブル中に検討していた。

業者に問い合わせたところ、同タイプのタービンは国内にはない。タービンに不良がある場合は、タービンを製造したLinde本社に送って、調査や修理を依頼する必要がある。修理期間は長期で、費用も高額だったはずである。海外から代替のタービンを早急に借りることができると良いが、借りることができたとしても、届いて設置し実際に稼働するまで時間がかかる。

液化できない期間が長くなると、液体ヘリウムの供給ができなくなる。また、回収ガスを貯める長尺容器の容量にも限りがあり、回収ガスの大気放出の可能性もあった。ヘリウムガスを長尺容器から、移動可能なカードルに移し、すずかけ台キャンパスに運んで液化することも検討した。すずかけ台キャンパスでは、長尺容器から移動可能なカードルにヘリウムガスを移すことができるが、大岡山キャンパスではその体制が十分ではない。また、大岡山キャンパスでの液体ヘリウムの需要を賄うためには、カードルの移動が週に1回程度では足りない(カードル1基で175 m³と仮定した場合)。極低温研究支援センターは、自前のカードルを所持しておらず、業者からのレンタルが必要である。カードルと液体ヘリウムの容器の輸送にも、業者に依頼が必要で費用がかかる。液化機が動かなかつた場合、かなり厳しい運用を迫られることになったはずである。

スタッフ一同、装置が動くようになって安堵した。

3.2 三重管のメンテナンス

以前にも報告したが、液化機と貯槽を結ぶ三重管内に固形物が付着してしまうことがある[1, 4, 6]。付着したかどうかは、液化機運転中の貯槽の圧力から予測できる。2022年の年末が近づくに従い、貯槽の圧力が高くなってきた。2023年1月初めに、以前報告したように、三重管を取り外さずに固形物除去を試みた。液化機運転中の貯槽の圧力が正常になったことから、固形物の除去にある程度成功したようである。

4 液体窒素供給関連

4.1 液体窒素安全弁接続部袋ナット

昨年度のセンターだより[8]の6ページで、液体窒素貯槽の配管の変更工事について報告した。追加の説明をする。

工事前の配管は図4.1.1である。安全弁の位置が設計段階で不適切だったため、取り付け・取り外しのさいに袋ナットに負荷がかかっていた。そのため、袋ナットのネジ山に不具合が生じていた(図4.1.2)。この安全弁は定期自主検査の検査対象でもある。今後の検査を考えれば、新しく配管を作り、安全弁を付ける位置をずらした方が良さだろう。

東京都に変更工事の許可申請をし、工事を行った。工事のさいには現地で新しい配管を作製し、つなぐことになった(図4.1.3)。工事日は雨だったため、雨を防ぎつつ作業を行う必要があった(図4.1.4)。工事後の配管が図4.1.5である。この位置であれば、安全弁の取り付け・取り外しが容易である。工事の翌日、東京都による完成検査を受け、無事合格した。



図4.1.1 工事前の配管。矢印は安全弁を取り付ける袋ナット。



図4.1.2 安全弁を取り付けていた袋ナット。ネジ山が潰れている。



図4.1.3 新しい配管の取り付け前。現地で配管の加工を行った。



図4.1.4 工事の様子。ブルーシートで雨を防いでいる。溶接作業や気密検査等を行った。



図4.1.5 矢印で示した安全弁を接続しているところが新しい配管。取り外しが容易になった。

4.2 液体窒素供給管理パソコンの更新

液体窒素の供給はセルフサービスとなっており、供給量は専用のパソコンで自動的に集計され

る。今まで OS として Windows XP を使っていたが、パソコンそのものが老朽化していた。夏も冬も冷却ファンが稼働し続け、突然フリーズする不具合も生じていた(図 4. 2. 1)。

この古いパソコンを騙し騙し使っていたが、2021 年 9 月に Windows 10 が入った新しいパソコンに切り替えた(図 4. 2. 2)。更新後の様子は、図 4. 2. 3 である。過去のデータもすべて利用可能で、今までと同様に利用できる。



図 4. 2. 1 古いパソコンのフリーズしたところ。



図 4. 2. 2 更新作業の様子。左の黒いのが旧パソコン。右の白いのが新パソコン。

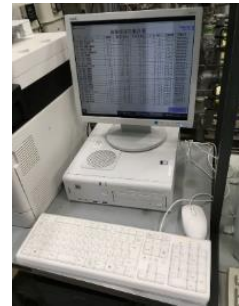


図 4. 2. 3 新しい液体窒素供給管理パソコン。

4. 3 電磁バルブ凍結

液体窒素を容器へ充填するときに、電磁バルブが使われる(図 4. 3)。開始ボタンを押すと、電磁バルブが開いて、充填が始まる。電磁バルブ内に金属くずが挟まっていた件や、電磁バルブを交換した件は、以前報告した[1, 4, 6]。

今回は電磁バルブの凍結について報告する。液体窒素充填の開始ボタンを押しても、充填が始まらないという問い合わせがあった。点検を行ったが、電気系統の問題ではなさそうである。電磁バルブの弁体と弁座が氷により固着したと予想し、弁箱をドライヤーで温めたら、電磁バルブは動作した。

液体窒素を充填中、配管はとても冷たくなる。作業終了後、配管内部の大气に触れる場所に、結露・霜が生じる。今回は、弁体と弁座付近まで水分が侵入し、弁体と弁座が凍結したのではないだろうか。このようなトラブルは、この充填場所ではまれである。温暖な時期は、そもそも凍結しにくい。また寒い時期でも、連続して充填する場合は、弁体と弁座付近までは水分が侵入しにくい。そして、ある程度時間が経てば一度固着したとしても融ける。寒い時期で、前の充填作業との間隔が絶妙な場合に、弁体と弁座が氷により固着状態になっているのだと思う。



図 4. 3 電磁バルブ。液体窒素充填作業後で冷たい。

4. 4 フレキシブルチューブの破損

液体窒素を充填する場所のフレキシブルチューブが数年に一度壊れてしまう[1, 4, 6]。今回もチューブが破損し、液体窒素が漏れた(図 4. 4)。冷えた状態で、フレキシブルチューブを何度も動かすことになり、金属疲労で穴が開いてしまうと考えられる。新しいフレキシブルチューブと交換した。

このフレキシブルチューブの破損を防ぐ抜本的な解決策もあるだろうが、大きな容器や小さな容器に対応する必要があり、多くの状況に適した設備となると高額になり、すぐには手を出せない。予備のチューブを常に準備して対応している。もし充填システムの更新を行うことになったら、他の施設の充填場所の仕組みを参考にして、トラブルの少ない設計にしたい。



図 4. 4 液体窒素用フレキシブルチューブ。矢印の霜がついていないところから液体窒素が漏れる。

4. 5 液体窒素貯槽下部配管の霜

以前と比べて、液体窒素貯槽下部の配管に霜が付きやすくなった(図 4. 5. 1)。霜が大きくなった

ら、水を大量にかけて霜を落としている(図 4. 5. 2)。いずれ、きちんとした対策が必要である。



図 4. 5. 1 液体窒素貯槽下部の配管の霜。



図 4. 5. 2 配管の霜を水で落とした。

5 学内回収配管

5.1 新規回収配管の確認

学内の建物間や、建物内の実験室までのヘリウムガス回収配管の工事に関しては設備整備課の担当である。工事前には極低温研究支援センターに相談がある。新しい回収配管が作られるときは、配管の確認を行う。図 5. 1 は 2020 年に南 5 号館の前にできたヘリウム回収配管である。



図 5. 1 南 5 号館前のヘリウム回収配管。

5.2 ヘリウム流出トラブル

ヘリウム流出トラブルについて報告する。まず一般的な実験室の回収配管について説明する。実験装置から蒸発したヘリウムは、まずボールバルブを通り、積算流量計、逆止弁を通る(図 5. 2. 1)。実験室を出る前か出た後にボールバルブ等がある(図 5. 2. 2)。積算流量計や実験装置側のボールバルブに不具合があり、実験装置から蒸発したヘリウムガスが、実験室内に漏れることはありうる。しかし、逆止弁により、別の実験室から来たヘリウムガスが、その実験室から流出するトラブルを防ぐことができる。



図 5. 2. 1 液化室の回収配管。装置から出たガスは、ボールバルブ、積算流量計、逆止弁の順に流れていく。

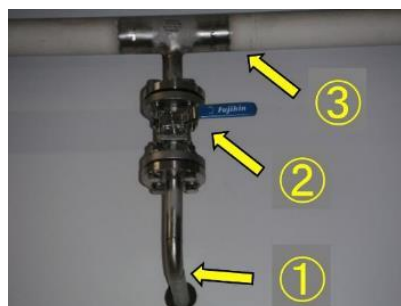


図 5. 2. 2 実験室の外の回収配管。①実験室の中から廊下に配管が来ている。②バルブ。実験室からヘリウムが流れてこない場合は閉じてある。③建物内のメイン配管。

2021 年末～2022 年初めにかけて、ある研究室が少なくないヘリウムガスを流出させた。実験室にある積算流量計の修理を行うため、積算流量計を取り外した。さらに取り外す必要がなかったのに、逆止弁も取り外してしまった。さらに実験室の出口近くのボールバルブも開放状態のままであった。このことにより、他の実験室で蒸発したヘリウムガスが、センターで回収されず、この実験室から流出した。

液化室には、各地区からのヘリウムガスが戻ってくる。それぞれの地区(本館地区、東地区、南

地区)に対応した積算流量計が設置してある。流出した実験室がある地区の積算流量計の増え方が、通常より少なく、今回のガス漏れに気が付いた。関連する地区のすべてのヘリウム利用研究室に問い合わせ、この実験室がある研究室を特定し、実験室の出口近くのボールバルブを閉めてもらった。念のため、修理後の積算流量計を利用する前に、センタースタッフが立ち会い、問題がないことを確認した。

流出を起こした研究室を含め、関連地区の研究室には迅速にご対応していただいた。ご協力に感謝したい。

5.3 ヘリウムガスが回収配管に流れないトラブル

ヘリウムガスが回収配管に流れない、という問い合わせも来る。実験室の出口付近の回収配管のバルブ(図 5.2)が閉まっている場合がある。積算流量計が壊れている場合もある。積算流量計は、冷たいガスが一度に大量に流れると不具合を起こすことがある。逆止弁に問題がある場合もある。逆止弁は、初めて使う場合や、長期間使用しなかった後に利用する場合で、ガスが流れにくいことがある。

なぜガスが流れないのかわからないこともあった。2021年5月頃にある実験室から、「回収配管にヘリウムガスが流れていかない」という問い合わせがあった。実験装置や実験室内の配管は問題がなさそうである。液化室側もガスを回収できているようである。問い合わせのあった研究室の実験室から、液化室までの配管に問題がある可能性があった。問い合わせがあった時期は、本館の一部の外壁工事が行われており、外壁の一部にはヘリウムガス回収配管が通っていた。配管には各所にバルブがついており(図 5.3)、何者かによってバルブが閉じられている可能性があった。このため配管に問題がないか、急遽確認する必要が生じた。工事中の区画の配管に問題はなく、その他の配管も確認したが問題はなかった。その後、原因はわからないが、その実験室からヘリウムガスが回収配管に流れるようになった。不具合の原因はわからないままである。本件に関しては施設整備課の方にもお世話になった。



図 5.3. 工事中の壁面にある回収配管とバルブ。

6 テーブルリフターの落ち込み

小分け容器に液体ヘリウムを充填するさいに、テーブルリフターの上で上下させる必要がある(図 6)。テーブルリフターが時間経過により落ち込む症状が出ている。金曜日の 17 時ごろに床と面を合わせて、月曜日の朝 9 時ごろ確認すると、4~5 cm 程度下がっている。このような落ち込みは以前もあり、そのときは業者に修理依頼した。下がる長さが増えてきたら、対策を取りたい。



図 6 液体ヘリウム充填場所。充填直後の様子。容器の下にテーブルリフターがある。

7 錆対策(ボルト交換と塗装)

7.1 ガスホルダ上部点検扉のボルト交換・塗装

ガスホルダのメータの不具合が生じたときに、ガスホルダ上部にある点検用の扉を開ける必要があった[4, 6, 7]。点検扉を開けるにはボルトを外す必要がある。長年の使用で錆びているボルトがいくつもあった。気になったので新しいボルトを購入し付け替えた。錆の予防のためにペンキで塗装を行った(図 7.1)。

7.2 配管接続部の錆と塗装

配管の接続部などで錆びている場所が目立つようになってきた。アクセスしやすい場所などはペンキを塗ることにした。図 7.1.2 と図 7.1.3 は塗装前後の写真である。この場所以外にも気になる場所の錆を落とし、塗装した。

7.3 屋外長尺容器の錆

不純ガスを貯める長尺容器の塗装が落ちて、錆が目立つようになってきた(図 7.3)。屋外にある

と、錆が生じやすいようだ。そのうち錆を落としてペンキを塗る必要がある。



図 7.1 ガスホルダ上部の点検扉。



図 7.2.1 錆のある配管。



図 7.2.2 塗装した配管。



図 7.3 屋外長尺容器。錆が目立つ。

8 冷却塔

8.1 水漏れトラブル

冷却塔の給水配管からの水漏れトラブルについては、以前も報告した[1, 4, 6]。前回報告した時点で、弁のゴム部分が摩耗しており、次に状況が酷くなった時は交換が必要であると、業者から指摘されていた。2020年9月末ごろ水漏れが酷くなった(図 8.1)。2020年12月にユニットごと交換する工事を行った。2023年3月の時点でほぼ漏れはない。



図 8.1 冷却塔給水配管の水漏れ。矢印で示す部分の中身を交換した。

8.2 掃除

冷却塔は定期的に清掃が必要である[1, 4, 6]。泥や水垢がたまりやすい(図 8.2)。当初は業者に清掃をお願いしたが、経費節約のため、センタースタッフが高圧洗浄機を用いて毎年清掃を行っている。

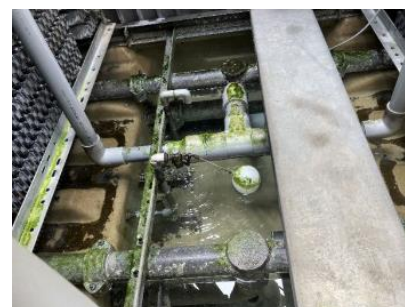


図 8.2 冷却塔内部の様子。泥が溜まっている。

9 中圧ガスドライヤー

露点計の故障に関してはすでに報告したが[1]、再発した(図 9.1)。露点計の表示が -100°C を示している。露点計側から適切な信号が来ていないようである。しかし、いつの間にか表示がまともになった(図 9.2)。接触不良のせいかもしれないが、原因は不明である。

以前も報告したが、ヘリウム純度計のバックライトがつかなくなった[4, 6]。そのまま修理していない(図 9.2)。



図 9.1 露点計のセンサー部と表示部。 -100°C を表示しており、異常値である。



図 9.2 露点計の表示が正常化。ヘリウムガスの純度計モニターのバックライトは故障中。

ヘリウム液化中は、露点計と純度計が示す数値を1時間ごとに記録している。平常時、これらの数値の変動は少ない。回収圧縮機のトラブルがおき、純度の低いヘリウムガスを液化する必要があった[7]。そのときは、これらの数値の変動に考慮しつつ、ヘリウム液化を行った。トラブル時に、これらの装置の重要性がよくわかる。

中圧ガスドライヤーの圧力調整弁の不具合については以前に報告した[6]。現時点では問題ない。配管からガス漏れが以前にあったが[1]、Oリングを定期的に新しいものに交換することにより、漏れは生じていない。

10 液化用圧縮機

液化用圧縮機のオイル漏れについては以前に報告した[1, 4, 6]。最近はオイル漏れも起きておらず、大きな問題は生じていない。2021年11月頃にオイルを追加し、2022年6月頃にグリスを追加した。オイル量に関しては今年の3月に運転中に確認したが適性値であった(図10)。

2022年度に液化用圧縮機の運転時間は8000時間を越えたため、メンテナンスが必要である。近い将来にメンテナンスを行いたい。



図10 液化用圧縮機のオイル液面計。圧縮機の稼働中の表示。黒い線が緑色の領域にあれば良い。

11 回収用圧縮機

回収圧縮機の電気系トラブルについては報告済みである[7]。その後、問題は生じていない。

12 ヘリウム注文システムとヘリウム回収記録管理システムのメンテナンス

大岡山地区の液体ヘリウム利用者は、注文システムのウェブサイトアクセスすることで、液体ヘリウムの注文をすることができる。2018年度までは、外部の業者が作ったシステムを利用していた。経費削減及び注文システムの高機能化のため、2019年度からセンタースタッフ(MF)が作成した注文システムを使って注文できるようにした。本システムはPHPとMySQLを利用したものである。利用者側は過去の注文や供給量の履歴を確認することもできる。管理者側の機能として、新規研究室の登録、各種数値や登録情報の変更、研究室ごとの供給量の月別表示や、回収率の表示などもできる。

液化室にあるヘリウム回収ステーションの回収記録管理システムは2020年度から運用を開始している[8]。

両システムとも問題なく稼働している。使い勝手を良くするために、こまごまとした修正も加えている。現在システムを運用しているサーバは近い将来使えなくなる。そのため、新しいサーバにシステムを移動する必要がある。現在利用しているPHPのバージョンは5.6であるが、新しいサーバでは8.0である。ローカル環境で古いコードが利用できるかを確認してから、新しいサーバでの運用を始める予定である。

13 おわりに

ここ数年のトラブルやメンテナンス等で気になったことを今回は記載した。それぞれの装置の大まかな役割は知っていたとしても、未知のトラブルに遭遇すると、ブラックボックスの集合体を取り扱っていることを思い知らされる。他の施設のトラブルやメンテナンスの報告書を読み、技術研究会に参加して発表を聴き、他大学の液化施設を訪問して、今後も技術力を磨きたい。

タービントラブルのため、液化装置が動かない間、一部の研究室に対して液体ヘリウム供給を停止し、ご迷惑をかけた。ご協力に感謝している。低温実験の中には、継続した液体ヘリウムの供給が必要で、途中で中断すると改めて最初からデータを取り直さなければいけない場合がある。また、低温下で一度しか計測できない厄介な試料もある。ヘリウムガス回収と液体ヘリウム供給が滞りなく行われることは、効率よく研究成果を出すために必須である。

近年ヘリウム価格が高騰し、多くのヘリウム利用研究室が厳しい運営を迫られている。ヘリウム利用研究室の窮状は、極低温研究支援センターの運営にも悪影響がある。ヘリウム価格高騰下で、もしタービントラブルが継続していたら、研究室にとってもセンターにとっても多大なダメージとなっていた。一定期間不具合はあったが、ヘリウムガス放出を避けることができ、また供

給制限を最低限にできたと考えている。トラブルを未然に防ぐことや、トラブルが起きたさいに被害を最小限に抑えられるように、これからもスタッフ一同努力していきたい。

参考文献

- [1] 藤澤真士、金本真知、大熊哲「東京工業大学極低温物性研究センターの紹介」 高エネルギー加速器研究機構 技術研究会報告集 (2016) No. P4-2.
- [2] 金本真知、藤澤真士 「液体ヘリウム運搬容器内の液量と重量の関係について」 核融合科学研究所 技術研究会報告集 (2018) No. 4-2.
- [3] 金本真知、藤澤真士、大熊哲 「ヘリウム回収圧縮機の更新」 九州大学総合技術研究会報告集 (2019) No. 4-5.
- [4] 藤澤真士、金本真知、大熊哲「東京工業大学大岡山キャンパスにおけるヘリウム液化システムの維持管理」 技術研究会 2020 千葉大学 報告集 No. P5-2.
- [5] 極低温研究支援センターだより No. 32 平成 30 年度 (2018)
- [6] 極低温研究支援センターだより No. 33 令和元年度 (2019)
- [7] 極低温研究支援センターだより No. 34 令和 2 年度 (2020)
- [8] 極低温研究支援センターだより No. 35 令和 3 年度 (2021)

4. センターからのお知らせ 1

液体 He の Web による注文の方法

極低温研究支援センター・大岡山 藤澤真士

注文の手順は以下の通りです。

1. <http://www.rcltp.titech.ac.jp/user/> (学内のみ)に入ってください。
2. 研究室 ID: (例 001)とパスワード:(例 AbCDEf)を入力してログインしてください。
3. 「新規注文」をクリックします。
「新規注文_入力」画面に入ります。必要事項を記入して「確認する」ボタンを押してください。

記入項目

- 供給希望日(任意) … 記入しない場合、一番近い供給日とみなされます。
- 注文者(必須)
- 電話番号(必須)
- 支払経費名(任意) … 通常は法人運営費; 予算責任者と相談して下さい。
- 注流量(必須)
- 容器指定(任意) … 研究室にある容器に継ぎ足す場合は「継ぎ足す」を、それ以外は「新規」を選択して下さい。
- 容器番号(任意) … 「継ぎ足す」場合は記入して下さい。「新規」の場合でもご希望があれば記入して下さい。
- 容器タイプ(任意) … ご希望の容器タイプがありましたら選んでください。
- 内径(任意) … トランスファーチューブを挿入する場所の径です。分からない場合は、センタースタッフまで必ず相談して下さい。
- 流量計(任意) … ガスメーターの値を入力して下さい。入力しなくても注文はできますが、回収率の計算のために必要です。回収配管を利用している研究室は最新の数値を入力して下さい。
- 備考(任意) … 必要に応じて入力して下さい。できるだけ簡潔にご記入ください。

新規注文_入力 (センター大熊研究室)

注文情報を入力してください。

供給希望日	<input type="text" value="yyyy/mm/dd"/>
注文者	<input type="text"/> (必須)
電話番号	<input type="text"/> (必須)
支払経費名	<input type="text" value="法人運営費"/>
注流量	<input type="text" value="100"/> リットル (必須)
容器指定	<input checked="" type="radio"/> 継ぎ足す <input type="radio"/> 新規
容器番号	<input type="text"/>
容器タイプ	<input type="radio"/> 研究室所有 <input type="radio"/> HELIOS100 <input type="radio"/> STRATOS <input checked="" type="radio"/> MVE110 <input type="radio"/> RH <input type="radio"/> MVE60 <input type="radio"/> HELIOS50 <input type="radio"/> HELIOS30 <input type="radio"/> IC <input type="radio"/> 不明 <input type="radio"/> 12 or 12.7 <input type="radio"/> 12 <input checked="" type="radio"/> 12.7 <input type="radio"/> 9.5 <input type="radio"/> 無指定
内径(mm)	<input type="text"/>
流量計1	<input type="text" value="10.0"/> m ³ (南実験棟3_2F)
流量計2	<input type="text" value="20.0"/> m ³ (南実験棟5_STM)
流量計3	<input type="text" value="30.1"/> m ³ (南実験棟5_Dilution)
流量計4	<input type="text" value="30.4"/> m ³ (南実験棟5_Vessel)
備考	<input type="text"/>
<input type="button" value="確認する"/>	

[センター大熊研究室メニューへ](#)

4. 「確認する」ボタンを押すと「新規注文_確認」画面に移動します。修正する場合は「再入力」ボタンを、注文を確定する場合は「確認した」ボタンを押してください。

5. 「確認した」ボタンを押すと「新規注文_完了」に移動します。同時に注文受理のメールが配信されます。容器指定が「継ぎ足す」の場合は、これで注文が完了します。供給日の 11 時までには、容器を液化室に運んでください。容器指定が「新規」の場合は、容器が準備できるかを液化室まで必ず問い合わせてください。電話(内線 3253)か直接液化室に出向いて、口頭で確認をお願いします。

補足

- 1 回の注文で複数の容器の指定はできません。必要な容器の本数だけ注文を繰り返してください。
- 通常、供給日の 15 時には全ての容器への充填は終わっています。15 時より早い時間に受け取りを希望する場合、備考欄に時間帯を記入してください。時間帯を指定した場合は、必ず液化室に事前にご確認ください。通常の供給日(月、木)以外の受け取り希望の場合も、備考欄にご記入ください。

センターからのお知らせ2

低温実験で用いる物品の貸し出し・提供を行っています。そのうち実験材料の一部はセンター1階に設けたストック用スペースに配置し、多くのユーザーの方々に利用していただいております。センターでは今後も、低温技術のサポート（物品や材料の使い方の指導）や最新の情報提供をとおして学内利用者の研究を支援してまいります。センターでストックを希望される物品がありましたらお知らせ下さい。なお、これらの物品に関する説明は、毎年4月に開催する「低温技術講習会」で行います。

備品

- 1 液体ヘリウム容器 30リットル 1台, 50リットル 1台, 60リットル 1台, 100リットル 17台, 110リットル 10台, 120リットル 1台, 250リットル 1台（胴直径820φ, 高さ1620mm）
- 2 液体窒素容器 100リットル 1台, 10リットル 1台, 2リットル 1台
- 3 ヘリウムガス回収用バルーン 6つ
- 4 ヘリウムリークディテクター ターボポンプ内蔵・ポータブル型
○ターボポンプが破損すると修理には多くの費用がかかります。利用者の皆様におかれましては、取り扱いには一層注意を払われますようお願い致します。
- 5 酸素モニター（ポータブル型）
○短期間に限り貸し出しできます。
- 6 リフター
○クライオスタットのインサートや超伝導マグネットのリフト用

消耗品・その他の貸し出し物品

- 1 各種線材
 - (1) 超伝導線
NbTi(+Cu)線 (SUPER SWU7A) 0.10 φ (SUPER SWU25A) 0.35 φ
○コイル, 極低温での導線, ヘリウム液面計の製作等に使用。
 - (2) マンガン線 (0.2 φ) 15 Ω/m 1巻 (0.1 φ) 60 Ω/m 1巻
○電気抵抗大きく熱伝導小さい。室温部から冷却器内への導線, 極低温でのヒーターとして使用。
 - (3) インジウム線 (1 φ)
○極低温でのシール用。
 - (4) 金線 (0.1 φ)
○試料からの配線用導線等に使用。
- 2 ケーブル類
 - (1) 極低温用超極細キュプロニッケル同軸ケーブル

(外径 0.65 φ ; 50±5 Ω)

- (2) ジュンフロン高周波用同軸ケーブル (導体軟銅線)

DTR403P (トリアックス外径 2.93 φ ; 50±2 Ω)

DAS401 (外径 0.61 φ ; 46 Ω)

- (3) 極低温用キュプロニッケル 2 芯より線 (より線外径 0.52 φ)

- (4) りん青銅ツイストペアシールド線 CW5584 (芯線径 0.08 φ)

3 低温用接着剤

- (1) スタイクキャスト (エポキシ系) 1266

○無色透明。極低温における非金属構造材として、加工可。接着剤として、金属パイプとの気密シールもデザインに注意すれば可。急冷注意。

- (2) スタイクキャスト 2850GT

○黒色、加工不可。極低温部での導線の気密シール、熱膨張率小さく金属との接着にも適す。

- (3) GE7031 ワニス (フェノール系)

○導線の熱アンカーや温度計等の固定に用いる。アセトン等で取り外し可 (十分な量在庫してあります)。

- (4) 2 液混合型導電性ペースト

4 温度計センサー

- (1) ゲルマニウムセンサー (1.4-100 K 較正済)

- (2) プラチナセンサー (100 Ω 未較正)

以上各 1 個 (貸し出し)

- (3) RuO₂ 抵抗

・希釈冷凍機温度域用 (0.05-7 K 較正済)

・角型チップ抵抗 (未較正)

(ALPS 社製造中止 ; 同等の KOA 社製 RCL シリーズ)

470 Ω, 1k, 2k, 4.7 kΩ 多数保有

・RuO₂ 筒状温度センサー (Scientific Instruments 社製 600 Ω) 1 個 (貸し出し)

○温度・磁場特性は極低温センサーだより No.7 本文「大熊研」参照。

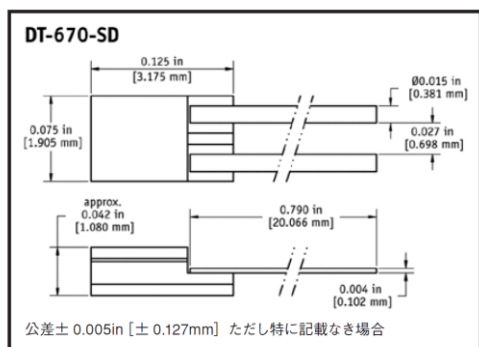
- (4) カーボン抵抗 (松下 47, 100, 220 Ω)

- (5) 金+0.007%鉄-クロメル線 (0.2 φ)

○室温から液体ヘリウム温度まで測定可能な熱電対。

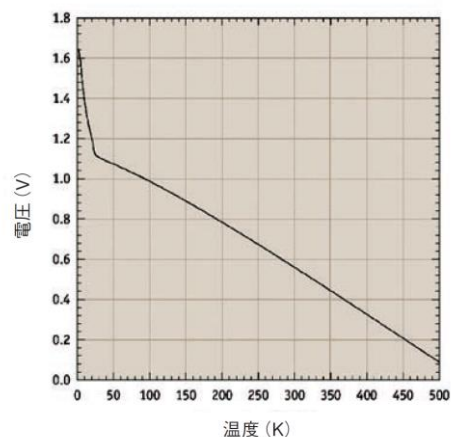
- (6) シリコンダイオードセンサー (1.4-325 K 較正済)

○従来のは、電極用の足がとれて使用不能となりました。取り扱いには十分注意をお願い致します。新しいもの (DT-670) を購入しました。



(東陽テクニカ社カタログより)

DT-670 ダイオード電圧曲線 (ティピカル)



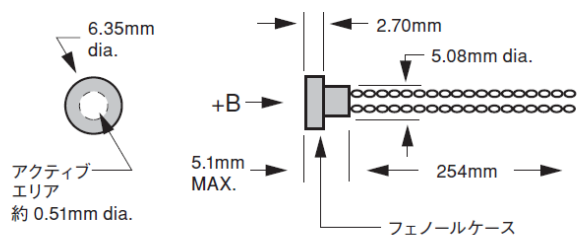
5 磁場センサー (貸し出し)

InAs ホール素子 (F. W. BELL 社製 BHA921 型) 1 個

使用範囲 0~15 Tesla (較正は 3 T まで) ; 4.2~373 K

動作電流 100 mA 感度 0.988 mV/kG

形状 Axial 型 直径 6.3 φ × 厚さ 5 mm



(東陽テクニカ社カタログより)

6 マイクロピンコネ

クター (金メッキ)

○小型で自由な長さ切り出し可。1 K 以下でも使用可能。

7 ヘリウム汲み出し用 (加圧用) バレーボール風船 (2 号)

8 ヘリウム容器排気用オペレーター (東理社, MVE 社, ウェシントン社, エアリキッド社, クライオサーモ社製容器用)

○オスねじがついていて引っ張り出すタイプ。

9 ヘリウム容器汲み口用ゴムチューブ (径はお問い合わせ下さい)

10 ガラスデュワー用ラテックスゴム (寸法はお問い合わせ下さい)

11 カプトン (マイラー) テープ

12 ポリイミドチューブ (外径 0.2 から 5.0 φ [肉厚は 40-60 μm] まで各種 ; 寸法はお問い合わせ下さい)

○極低温, 高温で使用可。肉薄で配線の導入・絶縁に便利。

13 被膜剥離剤 (フクゾール)

- 1 4 肉薄引抜ステンレスパイプ, キュプロニッケルパイプ (寸法はお問い合わせ下さい)
- 1 5 NW クランプ, フランジ, ティー, レデューサー, フレキホース類 (貸し出し)
- 1 6 銅管継ぎ手類
- 1 7 スウェージロック
- 1 8 高圧ガス配管漏れ検出液
- 1 9 簡易型携帯用ヘリウムガス漏れ検出器 (→)



(約 95g; LD239 型 : ジーエルサイエンス社カタログより)

その他, センター研究室内にも低温実験でよく用いる材料, 回路部品, 真空部品や工具類がありますので, 緊急に必要な方はご相談下さい。

5. 研究報告

理学院 物理学系 賀川研究室 2022 年度研究報告
二相競合系におけるヒステリシス拡大と
ドメイン壁クリープダイナミクスの相関の研究

賀川 史敬

<http://info.phys.sci.titech.ac.jp/laboratory/index2.html>

【概要】

一次相転移には必ずヒステリシス挙動が伴い、多くの応用の基礎となっている。しかし、その定量的な理解は困難であり、磁場誘起一次相転移材料でしばしば観察される低温での顕著なヒステリシス幅の増大においては、その定性的な理解さえも不明であった。本研究では、一次相転移中の相界面の成長速度が温度と磁場の両方の関数として活性化挙動を示す場合、低温において顕著なヒステリシス幅の拡大が生じうることを見出した。実験は、実空間磁気イメージング法を用いて、 $(\text{Fe}_{0.95}\text{Zn}_{0.05})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ における反強磁性相とフェリ磁性相の間の磁場誘起一次相転移を精査し、実空間観測から得られたドメインの成長速度に対し Kolmogorov-Avrami-Ishibashi モデルを適用することで、反強磁性ドメインの成長速度の温度・磁場依存性から、顕著なヒステリシス幅が半定量的に再現されることを見出した。さらに、実験で観測された転移磁場の磁場掃引速度依存性も、同様のアプローチで再現されることがわかった。今回の成果は、顕著なヒステリシス幅の広がり、ドメイン成長の微視的観点から定量的かつ包括的な理解を与えるものと言える。

1. 研究背景

フェロ的秩序を有する材料が持つ機能性は、秩序変数の反転に伴う一次相転移に伴うヒステリシス挙動と密接な関係がある。保磁力や電場の高い強磁性体や強誘電体は、秩序変数の保存に向いており、永久磁石、圧電素子、記録媒体などに応用されてきた。また、保磁力が低く、感度やスイッチング能力に優れる材料は、モーター、コンデンサー、トランス、電源などに応用されている。さらに、磁場による不揮発性抵抗制御[1,2]や磁気・電気化学冷凍[3]などのエキゾチックな機能においても、対称性の異なる相間の磁場誘起一次相転移に伴うヒステリシス挙動が重要な役割を担っている。微視的に見ると、一次相転移に伴うヒステリシス挙動は、核生成や成長など、出現した相の非平衡な成長ダイナミクスに由来する。したがって、ヒステリシス挙動は一般に相転移の駆動パラメータの掃引速度によって変化し、高速動作時の振る舞いにも大きな影響を与えている。

単結晶試料における磁場誘起一次相転移の場合、通常、転移のプロファイルは鋭く、それゆえ、等温磁場掃引過程において H_{high}^* と H_{low}^* という 2 つの特徴的な転移磁場を定義することができる。このような転移磁場のうち、一方は平衡一次相転移の値 H_c より高く、他方は低い。したがって、様々な温度で H_{high}^* と H_{low}^* をプロットすることにより、平衡一次相転移線 $H_c(T)$ を挟む 2 本のヒステリシス線 $H_{\text{high}}^*(T)$ と $H_{\text{low}}^*(T)$ を相図に描くことができる。しかし、磁場誘起一次相転移を示す材料の中には、ある温度以下で $H_{\text{high}}^*(T)$ と $H_{\text{low}}^*(T)$ の差、すなわちヒステリシス幅が大きくなり始め、ついには低温で数テスラ以上という大きなヒステリシス幅を示すものがある。例えば、マルチフェロイック LuFe_2O_4 におけるフェリ磁性のアップ状態とダウン状態の間のヒステリシス幅は、4.2 K で ~ 18 T にも達する[4]。強磁性体がこのような高い保磁力を示すことは稀であるが、異なる対称性の競合相間の磁場誘起一次相転移が低温に向かって顕著なヒステリシス幅を示す例は数多くあり、巨大な磁気抵抗性マンガン酸化物、 Gd_5Ge_4 、 $\text{LaFe}_{12}\text{B}_6$ 、 CeFe_2 合金、 Mn_2Sb などが知られている。また、マルテンサイト系材料における構造相転移や水溶液における液液相転移といった一次相転移でも同様

のヒステリシス幅の拡大が観測されており、磁性材料に限らない共通の物理がこれらの減少の根底にあることが示唆される。しかし、ヒステリシス線の解析には系によって異なる式が経験的に用いられており、したがって、低温での出現相の非平衡な成長ダイナミクス、すなわちドメイン壁の発展ダイナミクスとヒステリシス線の広がりとの普遍的な関係は不明であった。

2. 対象物質

低温で顕著なヒステリシス幅が観測される物質のうち、適度な大きさの磁場範囲でヒステリシスを伴う磁場誘起一次相転移にカバーできるという観点から、 $(\text{Fe}_{0.95}\text{Zn}_{0.05})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ を本研究の対象物質として選択した。 $(\text{Fe}_{1-y}\text{Zn}_y)_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ では、磁性は結晶学的に非等価な 2 つの $\text{Fe}^{2+}(\text{I})$ と $\text{Fe}^{2+}(\text{II})$ のサイトに由来し、 Mo^{4+} 層は磁性に寄与しない。 $\text{Fe}(\text{II})$ サイトの磁気モーメントは、 $\text{Fe}(\text{I})$ サイトの磁気モーメントよりわずかに大きく、 $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ では、 c 軸に沿った磁場下でメタ磁性転移が起こる。低磁場領域では、2 つの $\text{Fe}(\text{I})$ サイトは反強磁性的に配列し、2 つの $\text{Fe}(\text{II})$ サイトも同様であるため、正味の巨視的磁化を持たない反強磁性相となる。一方、十分に高い磁場 ($\sim 7\text{T}$) を印加すると、強磁性的に配列した $\text{Fe}(\text{I})$ サイトと強磁性的に配列した $\text{Fe}(\text{II})$ サイトが互いに反強磁性的に配列し、巨視的な磁化を示すフェリ磁性相となる。ドーパされた Zn イオンは $\text{Fe}(\text{I})$ サイトを選択的に占有し、その結果、メタ磁性転移の臨界磁場が低下し、低温でのヒステリシス領域の拡大が起こることが先行研究により明らかになっていた[4]。

3. 実験結果

$(\text{Fe}_{0.95}\text{Zn}_{0.05})_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ のヒステリシス幅拡大の微視的起源を非平衡な相成長ダイナミクスの観点から明らかにするために、磁気力顕微鏡(MFM)と光磁気カー効果(MOKE)のイメージングを行った。特に、ヒステリシス領域の低磁場側の境界 H_{low}^* (T) 近くの磁場において、フェリ相 (高磁場相) の中に反強磁性相 (低磁場相) のドメインが出現・成長する過程を精査した。まず高温 ($\sim 50\text{K}$) で 7T の磁場を印加して単相のフェリ相を作り、その後 7T 下で目標温度まで磁場中冷却を行った後、最後に一定温度下で目標磁場まで磁場を下げ、目標の温度・磁場下において出現した反強磁性ドメインの時間発展を測定した。たとえば 15K と 1.8T における MFM 像の時間発展においては、初期状態では、フェリ相の中に小さな円盤状の反強磁性ドメインが観察され、それは $\sim 10^4$ 秒の時間をかけて徐々に連続的に拡大した。また、別の位置でも同様の成長速度の反強磁性ドメイン成長が観察されたことから、この結果は再現性のある結果と言える。MFM は 50nm 以下の高い空間分解能を持つものの、1枚の画像取得に $10\sim 20$ 分かかるため、急速なドメイン成長を追跡することはできない。そこで、空間分解能は $\sim 1\mu\text{m}$ と低いが、画像取得時間は 1 秒と時間分解に優れる MOKE イメージングを併用した。MOKE イメージングでは、より広い視野において、反強磁性ドメインは、暗い境界を持つ複数の円形スポットとして観察された。 15K と 0.9T での反強磁性ドメイン成長を精査すると、高磁場でのデータと比較して、反強磁性ドメインの成長速度が顕著に速くなっていることが分かった。すなわち、平衡一次相転移線 $H_c(T)$ から離れるについて、相転移の駆動力が増し、その結果、反強磁性ドメイン成長が劇的に増大することが一連の実空間観測の結果から分かった。

また、円形の反強磁性ドメインの半径は経過時間に対してほぼ直線的に変化することがわかり、この挙動から反強磁性ドメインの等速成長速度 v が導き出される。温度 T 、磁場 H を変えて同様の解析を行った結果、 $T \leq 20\text{K}$ において $v(H, T)$ の導出に成功した。この温度以上では、理由は不明であるが、画像のコントラストが著しく低下したため、解析は 20K 以下に限定して行った。これらの結果を成長速度の等高線としてまとめ、さらに、 $v(H, T)$ とヒステリシス線 $H_{\text{low}}^*(T)$ の関係を知るために、磁気相図に等高線を重ね合わせた図を作

成した。この図から、まず、等高線の曲率は $H^*_{\text{low}}(T)$ 線の曲率と似ており、ヒステリシス線のプロファイルが反強磁性ドメインの微視的な成長過程と密接に関係していることが示唆された。その一方で、 $H^*_{\text{low}}(T)$ 線付近の成長速度は連続磁場掃引実験下でのマクロな相変化に特に重要な影響を与えると予想されるものの、成長速度が検出限界の $\sim 1 \mu\text{m/s}$ をはるかに超えているため、上記の実測に基づく解析ではその情報を得ることはできないという課題も浮き彫りになった。

したがって $H^*_{\text{low}}(T)$ 線近傍の $v(H, T)$ を求めるには、実験で得られた情報から微視的なメカニズムを同定し、それを記述する数式を見出し、その外挿によって、実験では直接迫ることのできなかった $H^*_{\text{low}}(T)$ 線近傍の $v(H, T)$ を得ることが必要となる。そこで、本研究では、乱れた媒質中におけるドメイン壁のような弾性界面のクリープ運動を記述する、Metz 則の名で知られる法則の適用を検討した[5-7]。Metz 則の特徴は、移動するドメイン壁の速度が温度 T のみならず、ドメイン壁に作用する駆動力 F に対しても活性化挙動となっていることであり、 $v(T, F) = A \exp[-\Delta/(TF^\mu)]$ で与えられ、 μ は動的指数と呼ばれる値、 A と Δ はそれぞれ高速極限の値と活性化障壁を示す。この式を $(\text{Fe}_{1-y}\text{Zn}_y)_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ に適用する際、駆動力は $H_c(T)$ を基準に規定する必要があるが、大きなヒステリシス領域を伴っている場合、一般には平衡一次相転移線 $H_c(T)$ の決定は決して自明ではない。ここではその詳細を割愛するが、本物質における $H_c(T)$ は熱力学関係を駆使することで我々の先行研究によって決定済みであり[8]、相転移の駆動力算出の際にはその結果を参照した。したがって、今回の場合、Mertz の法則は次のように与えられる。

$$v(T, \delta H) = A \exp\left[-\frac{\Delta}{T \times (\delta H)^\mu}\right], \quad (1)$$

ここで、 $\delta H(T) = |H(T) - H_c(T)|$ である。

様々な温度における成長速度を $1/(\delta H)^\mu$ に対してプロットすると、観測された速度は式(1)によってよく再現されることがわかり、観測されたドメインの成長速度の磁場依存性はクリープ運動によってよく記述されるものであることが示された。得られたフィッティングパラメータは、 $A=3806.5 \text{ [m/s]}$ で、これは $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_8$ の音響フォノンの予想速度 ($2.7\text{--}6.6 \times 10^3 \text{ m/s}$) にかかなり近く、また動的臨界指数は $\mu=0.4$ であった。また、 Δ の値は測定温度範囲内でほぼ一定 (~ 500) であり、わずかに見られる温度依存性は秩序変数のそれに起因すると思われる。強磁性体では、 μ の値はドメイン壁の次元と乱れの種類に依存することが知られており、一般に random bond 型と random field 型に分類される。しかし、今回の反強磁性相とフェリ磁性相間の一次相転移の場合のように、対称性の異なる相を分け隔てるドメイン壁の場合、このような乱れの分類は実自明ではない。したがって、 $\mu=0.4$ は、ランダムボンド型の乱れの影響を受けた2次元ドメイン壁で報告されている $\mu=0.5\text{--}0.6$ に近い値と思われるものの、その意味の理解にはさらに詳細な理論的裏付けを要する。

詳細は割愛するが、Kolmogorov-Avrami-Ishibashi モデルの数値シミュレーションにおいて、これらの実空間観測から得られた反強磁性ドメインの成長速度の温度・磁場依存性を適用したところ、実験で観測された顕著なヒステリシス幅が定量的に再現されることを見出した。さらに、実験で観測された転移磁場の磁場掃引速度依存性も、同様のアプローチで再現されることがわかった。これらのことより、ドメインの成長速度という微視的な量と、磁場誘起の相転移とそれに伴うヒステリシスという巨視的な特徴の間に、定量的な相関があることを実験的に見出すことに成功したと言える。

(なお、本研究は論文投稿中であるため、図の掲載を割愛させて頂きました。ご容赦のほど、よろしくお願い致します。)

【参考文献】

- [1] Tokura, Y. *Rep. Prog. Phys.* **69**, 797-851 (2006).
- [2] Matsuura, K., et al. *Phys. Rev. B* **103**, L041106 (2021).
- [3] Hou, H., Qian, S. & Takeuchi, I. *Nat. Rev. Mat.* **7**, 633 (2022).
- [4] T. Kurumaji *et al.*, *Phys. Rev. X* **5**, 031034 (2015).
- [5] Merz, W. *Phys. Rev.* **95**, 690 (1954).
- [6] Chauve. P *et al.*, *Phys. Rev. B* **62**, 6241 (2000).
- [7] Kleemann, W. *Annu. Rev. Mater. Res.* **37**, 415 (2007).
- [8] K. Matsuura et al., submitted.

理学院 物理学系 平原研究室 2022 年度研究報告

単層 FeSe/STO のその場電子輸送による

超伝導転移と電子状態の超伝導“ギャップ”の比較

理学院 物理学系 出高志朗、田中友晃、一ノ倉聖、平原 徹

<https://www.hiraharalab-phys-titech.com/>

バルク FeSe の超伝導転移温度 T_c が 8 K であるのに対し、SrTiO₃(STO) 基板上的の単層 FeSe 薄膜は 40 K 以上の高い転移温度を有する。このメカニズムは完全には明らかになっていないが、STO 基板が大きな役割を果たしており、基板からの電子ドーピングや電子格子相互作用の増強などが盛んに議論されている。これまで我々の研究室では、STO 表面超構造を 2×1 , $\sqrt{2} \times \sqrt{2}$, $c(6 \times 2)$ と変えると単層 FeSe の超伝導特性が変調されることを示した[1-3]。これは、表面の周期性の違いが表面での酸素(O)欠陥や Ti 原子の配置の違いによって生じるが、同時に FeSe へのドーピング量も変わっているからである。

この表面超構造の違いによって報告されている T_c が 40-109 K[4-6] とばらつく可能性がある一方で、実験手法によって本当の超伝導転移を捉えていない可能性がある。例えば、分光学的な手法を用いた電子状態測定によって超伝導ギャップを観測して超伝導転移を観測するやり方は、本当に超伝導に由来するギャップを観測できているのかに関して議論の余地があり、実際にこの単層 FeSe/STO の系に関して、銅酸化物と同様な擬ギャップ状態が存在するのではないかという指摘が最近発表された[7]。さら

に超高真空中でのその場(in situ)輸送測定でゼロ抵抗検出によって超伝導転移を観測するという方法に関しても STO 基板自体のドーピング量によって大きく異なる T_c が報告されており(Nb ドープされた基板上的の単層 FeSe では 109 K[4]、我々の絶縁 STO 基板上的の研究では 40 K[5])、これが何に由来するかは明らかになっていない。

そこで本研究ではこれらの未解明な点に関してより深い知見を得るため、Nb ドープ STO 基板上に単層 FeSe 薄膜を作製し、in situ で輸送測定と角度分解光電子分光 (ARPES) による電子状態測定を同じ試料に対して行った。

市販の Nb ドープの STO 基板を超高真空チャンバーに入れた後、500°C で 3 時間程度脱ガスを行った。その後 950-1000°C で 30 分基板を加熱することで、反射高速電子回折(RHEED)による、明瞭な $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ 周期を示す基板が得られた。この基板を 400°C に保ち、Fe と Se を 1:10 の比で蒸着した。RHEED で成長過程をモニターし、スポット強度を測定することで膜厚が 1 層より少し多くなる時間で蒸着を終了した。その後、作製した試料を 480-550°C で 30 分間加熱して薄膜の平坦性を改善すると同時に STO 基板と FeSe 薄膜の間の余剰な Se を

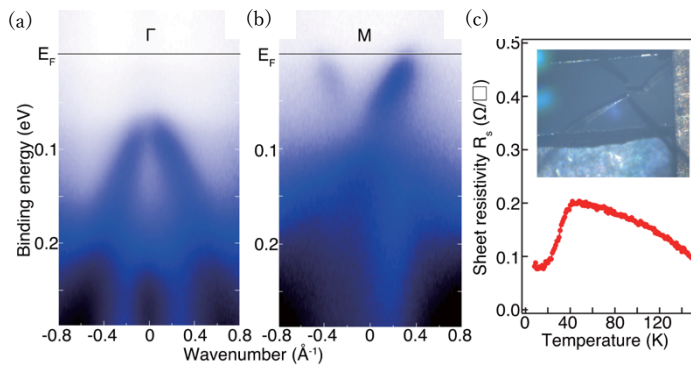


図 1 作製した単層 FeSe/STO $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ のバンド構造 (a),(b)、および電気抵抗の温度依存性(c)。測定は同じ試料に対して、すべて in situ で行われた。(c)の挿入図は輸送測定時のプローブ配置の写真である。

脱離した。

図 1 は作製した試料の Γ 点(a)および M 点(b)での ARPES スペクトルである。 Γ 点ではフェルミ準位(E_F)より下にホールポケットが、M 点では E_F を横切る電子ポケットが観測され、これらの特徴は先行研究と一致する[6]。後述するが、60 K で測定したデータなので超伝導ギャップは図 1(b)では明確には見えない。また、図 1(c)は同じ試料に対して行った電気抵抗の温度依存性の結果である。挿入図は輸送測定時のプローブ配置の写真である。40 K 程度で電気抵抗が急激に小さくなる様子が観測され、この系の超伝導転移を表していると推定される。これらの事実から本実験で作製した試料は高品質であり、超伝導転移の観測に成功したと言える。

より深い考察を行うため、まず図 1(c)の電気抵抗の温度依存性を我々が文献[5]で報告したものと比較する。図 2 の左の縦軸の赤いデータは今回の Nb ドープされた STO 基板上で測定されたデータで、右の縦軸の青いデータは文献[5]において絶縁 STO 基板の $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ 表面超構造上の単層 FeSe に対して測定されたものである。左右の縦軸の値を比較すると、今回の測定値

が 5 桁ほど小さいものであることが分かる。これは STO 基板が Nb ドープによって電気を通すようになったため、その寄与が測定されているのである。しかしこのように絶対値は大幅に違うものの、赤青両方のデータともに 40 K で電気抵抗が急激に下がっている様子が分かる。これが超伝導転移に相当していると考えられ、単層 FeSe/STO の超伝導転移は STO 基板の Nb ドープには

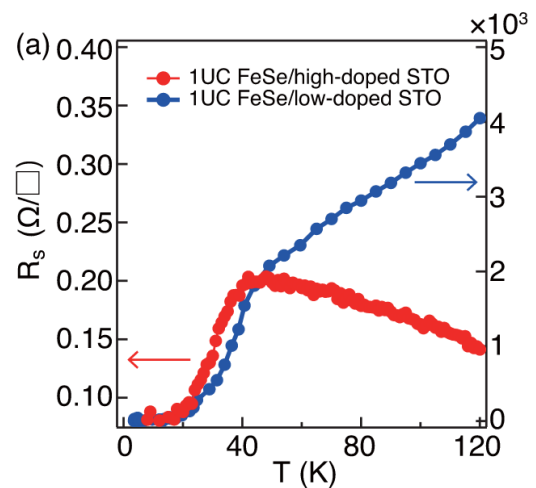


図 2 単層 FeSe/STO の電気抵抗の温度依存性。赤いデータ(左の縦軸)が Nb ドープされた STO 基板上のもので、青いデータ(右の縦軸)が絶縁 STO 基板上のものである。両者ともに 40 K で電気抵抗が急激に下がり始め、これが超伝導転移に相当している。

依存せず、 T_c が 40 K 程度であることが実証された。一方、文献[4]とほぼ同じ条件で実験しているにも関わらず T_c としては全く違う値が得られた。この理由はよく分かっていないが、文献[4]では二次元超伝導の特徴とは違いかなり急激な超伝導転移が見られているので、単層 FeSe の超伝導とは違ったものが検出されている可能性がある。

次に電子状態の温度依存性に着目し、超伝導ギャップが測定される温度と電気抵抗で観測された T_c との関係性を考察する。図 3(a)は 25 K での単層 FeSe/STO の M 点でのバンド分散である。特徴を際立たせるために、(a)のデータの二階微分をとったものが図 3(b)である。電子ポケットはフェルミ準位(E_F)で折り返し、超伝導に由来すると

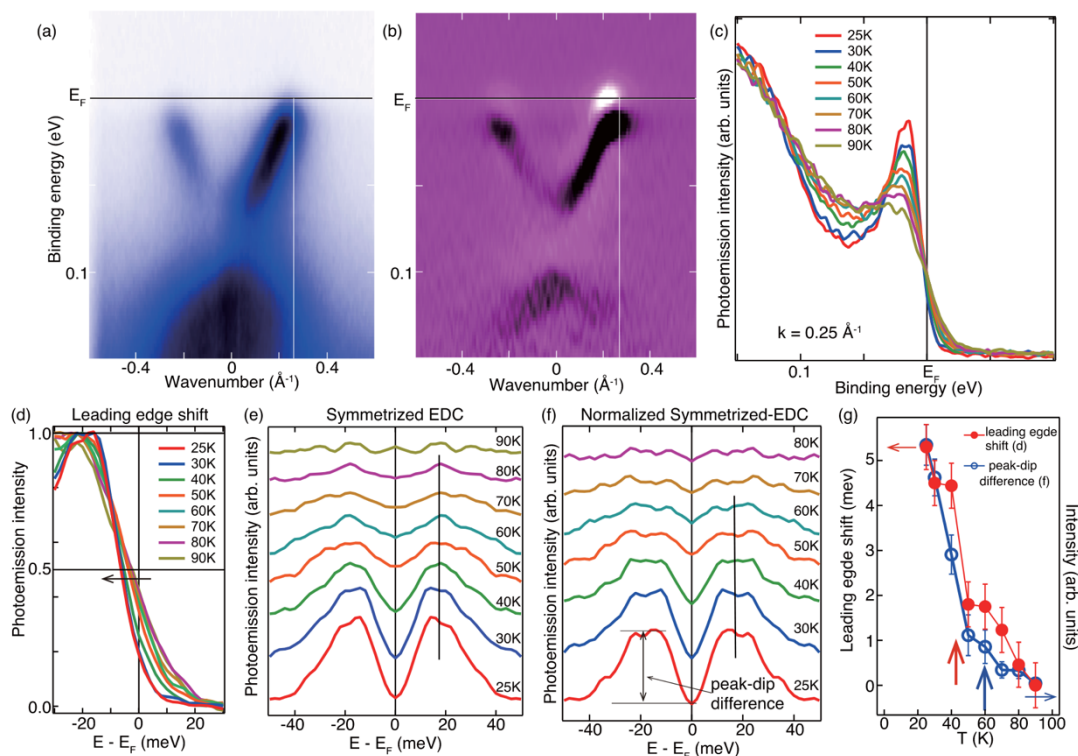


図 3 (a) 25 K での単層 FeSe/STO の M 点でのバンド分散。(b) (a)のデータに対して二階微分をとってより特徴を顕著に示したもの。フェルミ準位(E_F)でバンドは折り返し、ギャップが生じていることが分かる。(c) (a),(b)の白い線で示した波数でのエネルギー分布曲線(EDC)の温度依存性。(d) (c)のデータを準粒子ピークの位置のスペクトル強度と E_F 以上の強度で規格化し、両者の半分の強度のエネルギー位置の変化をプロットしたもの(leading edge shift)。(e) フェルミディラック分布の影響を取り除くため、(c)のデータと、それを E_F で折り返したものととの和をとったもの(symmetrized EDC)。準粒子ピークが明確になる。(f) (d)のデータをさらに 90K のもので割って規格化したもの(normalized symmetrized-EDC)。(g) 90 K でのスペクトルに対して、(d)のエネルギーシフト位置、(f)の準粒子ピークとフェルミ準位での強度(ディップ)の差の温度依存性をプロットしたもの。それぞれ 40 K、60 K で顕著な変化が生じていると考えられる。

思われるクーパー対が形成され、ギャップが生じていることが分かる。図 3(c)は(a),(b)の白い線で示した波数でのエネルギー分布曲線(EDC)を温度別にプロットしたものである。90 K では明確でなかった E_F 近傍のクーパー対形成に伴い発達する準粒子ピークが低温になるにつれて顕著になっていく様子が定性的に分かる。このデータから定量的な解析を次の二通りで行った。一つはすべてのデータを、準粒子ピークの位置のスペクトル強度と E_F 以上の強度で規格化し、両者の半分の強度のエネルギー位置の温度変化を考えるとというものである (leading edge shift)。その結果が図 3(d)に示されており、パッとみただけでは分かりにくい、90 K のデータからの変化を考えると、図 3(g)の赤い点のように、50 K までは徐々に変化するが、40 K で一気に 2.5 meV ほど劇的に変化しているのが分かる。しかしこの方法ではフェルミディラック (FD) 分布の影響があり、さらによく超伝導ギャップ解析に用いられるものの、物理的な解釈が曖昧である。そこでフェルミ準位の影響を排除し、より物理的に意味のある解析をするため、(c)のデータとそれを E_F で折り返したものととの和をとったもの (symmetrized EDC) を図 3(e)に導出した。この折り返しを足し合わせるという操作で FD 分布はエネルギーによらず一定になり、準粒子ピークが明確になる。さらに各スペクトルを準粒子ピークが観測されていない、明らかに常伝導状態であると思われる 90 K でのスペクトルで割ることでより準粒子ピークを際立たせたものが図 3(f)である (normalized symmetrized-EDC)。準粒子ピークとフェルミ準位での強度(ディップ)の

差が準粒子の生成を反映しており、これを各スペクトルから導出し、図 3(g)に青い点でプロットした。70 K、80 K ではクーパー対による準粒子ピークが明確には観測されていないが、60 K では明らかに観測されている。準粒子ピークの生成温度を T_c とすると ARPES では T_c が 60 K ということになるが、これは輸送特性で観測された 40 K よりも明らかに高い温度である。つまりこれは超伝導転移が起きるよりも高温においてクーパー対が形成されていることを示しており、ARPES で超伝導転移を議論する際には T_c を安易に決めるのは危険である、ということを示唆している。これまで分光学的な手法で求めたこの系における 40 K 以上の T_c はこのような事情により生じていたことが示唆される。

最後に、なぜクーパー対が超伝導転移温度よりも高温で生じたのかを考える。このような現象は銅酸化物高温超伝導体では擬ギャップとして報告されており、超伝導とは違った量子状態(ネマティック相など)が出現していることが予想されている。しかしこの系ではこのような他の量子状態出現の報告はこれまでに無い。一方、単純な s 波超伝導体でも乱れが多い場合はこのような現象が起きる。具体的には、乱れが生み出すポテンシャルによって電子がペアを形成してクーパー対が高温から形成されるが、同時にこのポテンシャルによってクーパー対の凝縮が阻害されるので超伝導転移が起きず、常伝導状態なのにクーパー対が生じている温度領域があることが報告されている [8]。しかし、本研究で用いた単層 FeSe/STO はエピタキシャル薄膜であり、膜の形態としては、文献[8]のような乱れた

超伝導体ではない。そこで構造的な乱れが無いにも関わらず、何かが実効的に乱れとして機能しないとイケないのだが、この単層 FeSe/STO においては STO 基板の表面超構造がこれに相当すると考えられる。この系の超伝導のコヒーレンス長(1~2 nm)は、 $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ ユニットセルのサイズ (1.4 nm) とほぼ同じであり、さらに単位胞の位置によって局所的なギャップサイズが異なることまで示されている[9]。したがって、1UC FeSe の電子は STO 表面のポテンシャルを感じ、結合するエネルギースケールが大きい高温で preformed なクーパー対になるが、同時に同じポテンシャルによって局在化される。よって、ARPES で測定されたギャップには、文献[8]で議論されているように同じ局在状態にある 2 つの電子の間のクーパー引力エネルギー $\Delta_p(T)$ の寄与が含まれている可能性が高く、クーパー対の出現をもって超伝導転移が生じているという結論を出すのは問題があるのである。

結論として、1UC FeSe/STO 系の超伝導特性は STO 基板のドーピングレベルに依存せず、 $T_c \sim 40$ K であることが分かった。また ARPES 測定から、クーパー対の準粒子ピークは T_c より高い 60 K で出現し、恐らく STO 表面超構造のポテンシャルが preformed なクーパー対の形成に寄与していることが示唆された[10]。これまで STO の表面超構造の違いによって単層 FeSe にドーパされる電子の量が変わると予想してきたが[1-3]、この効果以外に、クーパー対形成および局在への寄与の違いも考慮しないといけなことを示している。

参考文献

- [1] T. Tanaka, K. Akiyama, R. Yoshino, and T. Hirahara, Phys. Rev. B **98**, 121410(R) (2018).
- [2] T. Tanaka, K. Akiyama, S. Ichinokura, R. Shimizu, T. Hitosugi, and T. Hirahara, Phys. Rev. B **101**, 205421 (2020).
- [3] T. Tanaka, S. Ichinokura, A. Pedersen, and T. Hirahara, Jpn. Jour. Appl. Phys. **60**, SE0801 (2021).
- [4] J.-F. Ge, Z.-L. Liu, C. Liu, C.-L. Gao, D. Qian, Q.-K. Xue, Y. Liu, and J.-F. Jia, Nat. Mat. **14**, 285 (2015).
- [5] A. Pedersen, S. Ichinokura, T. Tanaka, R. Shimizu, T. Hitosugi, and T. Hirahara, Phys. Rev. Lett. **124**, 227002 (2020).
- [6] Y. Xu, H. Rong, Q. Wang, D. Wu, Y. Hu, Y. Cai, Q. Gao, H. Yan, C. Li, C. Yin, H. Chen, J. Huang, Z. Zhu, Y. Huang, G. Liu, Z. Xu, L. Zhao, and X. J. Zhou, Nat. Comm. **12**, 2840 (2021).
- [7] B. D. Faeth, S.-L. Yang, J. K. Kawasaki, J. N. Nelson, P. Mishra, C. T. Parzyck, C. Li, D. G. Schlom, and K. M. Shen, Phys. Rev. X **11**, 021054 (2021).
- [8] B. Sacépé, T. Dubouchet, C. Chapelier, M. Sanquer, M. Ovia, D. Shahar, M. Feigel'man, and L. Ioffe, Nat. Phys. **7**, 239 (2011).
- [9] W. Si, T. Tanaka, S. Ichinokura, and T. Hirahara, Phys. Rev. B **105**, 104502 (2022).
- [10] K. Ide, T. Tanaka, A. Pedersen, S. Ichinokura, and T. Hirahara, Phys. Rev. Mat. **6**, 124801 (2022).

時間分解分子内振動スペクトルから見たスピנקロスオーバー複合体試料における光誘起構造変化ダイナミクス

理学院化学系（エネルギーコース）

石川 忠彦

<http://www.pipt.sci.titech.ac.jp/>

1. はじめに

我々は、新規光機能性開拓及びそのメカニズム解明をテーマにフェムト秒レーザーパルスを光源として用いた時間分解分光を一つの柱として研究を進めている。光励起によるエネルギー注入は、非接触かつ高速に行えることが魅力である。時間分解測定でその途中経過を明らかにしていくことが重要であり、特に新規物質の光応答を観測していくことで既報の物質との比較を通してメカニズムの理解を深めていくことを進めている。

新規光機能性を発現するための戦略として、既に存在する材料を組み合わせ複合化し新たな材料開発をする試みが進められている。照射により超高速構造変化を起こす分子を光応答スイッチとして結晶構造中に埋め込めれば、他の機能性分子との組み合わせで、照射によって磁性や導電性などを制御できる新物質の実現が期待できる。本研究で対象とした複合結晶 $[\text{Fe}(\text{Iqsal})_2][\text{Ni}(\text{dmit})_2] \cdot \text{CH}_3\text{CN} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (HIqsal = 5-iodo-N-(8'-quinoly)-salicylaldimine) はそのような方針で物質設計・開発された。実際に $\text{Fe}(\text{Iqsal})_2$ の示す低スピン (LS) 高スピン (HS) 間のスピנקロスオーバー (SCO) 現象と、 $\text{Ni}(\text{dmit})_2$ の二量体化によるスピン一重項形成が、 $T_c =$ 約 150 K で相転移的に同時に起こる [1]。この事実は、Fig. 1 に模式的に示したように、 $\text{Fe}(\text{Iqsal})_2$ と $\text{Ni}(\text{dmit})_2$ の間に強い

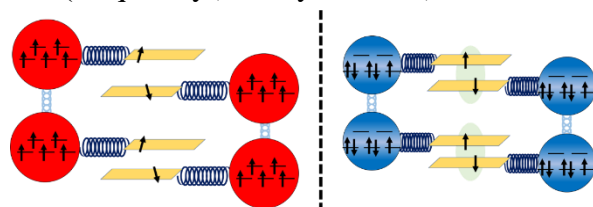


Fig. 1 $[\text{Fe}(\text{Iqsal})_2][\text{Ni}(\text{dmit})_2] \cdot \text{CH}_3\text{CN} \cdot \text{H}_2\text{O}$ におけるスイッチングの模式図

弾性的な相互作用が働いている事を強く示唆している。 $\text{Fe}(\text{Iqsal})_2$ カチオンの光誘起 SCO は、顕著な分子の体積変化を伴う為、 $\text{Ni}(\text{dmit})_2$ の二量体化の程度の制御が期待出来る系である。複合化による新規光機能性材料開発の雛形ともいえるこの物質の光誘起ダイナミクスを議論することは、今後の光機能材料開発の一つの方向性の開拓につながる可能性が高い。そこで本研究では、分子内振動領域 (中赤外領域) における時間分解分光測定により、分子内振動モードの光誘起変化を観測することを試みた。試料は、神戸大学の高橋研究室から良質の単結晶試料を提供して頂いた。

2. スピנקロスオーバー錯体複合結晶の超高速光誘起構造変化ダイナミクス

Fig. 2 の上パネルは、低温相及び高温相での分子内振動領域の反射率スペクトルである。類似

試料および量子化学計算の結果などから、1370 と 1450 cm^{-1} 付近の構造は $\text{Fe}(\text{Iqsal})_2$ の、1350 cm^{-1} 付近の構造は $\text{Ni}(\text{dmit})_2$ の振動モードと同定できる。これらのスペクトル構造は、相転移に伴い顕著に形状が変化するため、光誘起ダイナミクスの観測に適している。 $\text{Fe}(\text{Iqsal})_2$ の分子内遷移に対応する 400 nm で光励起した際の光誘起ダイナミクスを観測した。

Fig. 2 の下パネルは、光励起直後 (0 ps) 及び 100 ps 後に観測された $\Delta R/R$ スペクトルを示す。(a) の波数域で観測された $\Delta R/R$ を見ると、中段に示した相転移の際のスペクトル変化とは、0 ps では大きく異なっているが、100 ps では近づいていく。一方で(b)の波数域の $\Delta R/R$ は、0、100 ps ともになぜか異なっているが相転移の際のスペクトル変化と類似している。それぞれの波数域に存在する振動モードは、それぞれ主に $\text{Ni}(\text{dmit})_2$ と $\text{Fe}(\text{Iqsal})_2$ と異なっており、各分子に関係した構造変化が起こる時間スケールが異なると思われるべきである。 $\text{Fe}(\text{Iqsal})_2$ の分子内遷移を励起することで、最初に $\text{Fe}(\text{Iqsal})_2$ の SCO に対応した分子変形が起き、その後、緩やかに $\text{Ni}(\text{dmit})_2$ に関係した構造変形が起こると考えられる。このような逐次的な光誘起構造変化ダイナミクスは、現在共同研究で行っている時間分解電子線回折測定でも観測されており、これと併せた議論を現在まとめている。

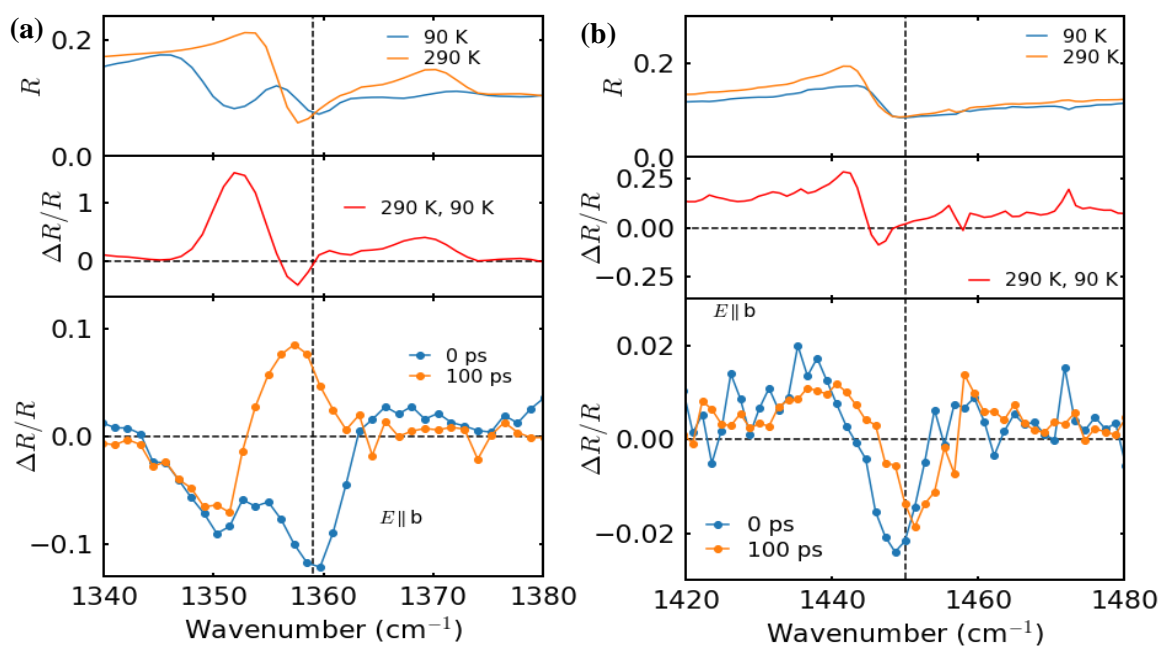


Fig. 2 (a), (b) (上) : $E \parallel b$ 偏光での反射率の温度依存性。(中) : 低温相(90 K)から高温相(290 K)に変化した際の $\Delta R/R$ 。(下) : 400 nm $E \parallel b$ 励起での光励起 0 および 100 ps 後の $\Delta R/R$ 。

[参考文献]

[1] K. Fukuroi, *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **53**, 1983-1986 (2014).

物質理工学院材料系森研究室 2022 年度研究報告

川本正, 森健彦
物質理工学院材料系

<http://www.op.titech.ac.jp/lab/mori>

ダイマーモット絶縁体 κ -(BEDT-TTF)₂TaF₆ の構造相転移

分子性導体 κ -(BEDT-TTF)₂X (BEDT-TTF: bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalene, X:アニオン) は BEDT-TTF 分子が井桁状に配列した構造をもつ。強いダイマー構造によりダイマーを 1 サイトとみなせ、エネルギーバンドは実効的に 1/2 充填率バンドとなる。ダイマーモデルにおいて、同一サイトのクーロン反発エネルギー U とバンド幅 W の比 U/W の値によって基底状態が反強磁性絶縁体—超伝導—金属と変化すると考えられている [1]。また、ダイマーは三角格子を形成しており、ダイマー間のトランスファー積分は t' と t の 2 種類になることが多い。トランスファー積分の比 t'/t が 1 に近いと強くフラストレートした三角格子を実現していると考えられ、なかでも 32 mK まで電子スピンの長距離秩序が観測されないダイマーモット絶縁体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu₂(CN)₃ が注目されている [2]。

BEDT-TTF 分子と 8 面体アニオン MF₆ ($M = \text{P, As, Sb}$) を用いた伝導体では、ドナー分子が振じられてスタックするモードと分子短軸方向にスライドしてスタックするモードが交互に繰り返されて積層する δ 型構造が知られている [3]。我々は (BEDT-TTF)₂TaF₆ には 2 種類の δ 型 (単斜晶系の δ_m 相と直方晶系の δ_o 相) が存在し、それぞれ 276 K と 300 K で電荷秩序転移を示してスピン—重項状態になることを明らかにしてきた [4]。また、[TaF₆]⁻ を用いて得られる結晶の中に、図 1 に示すようなダイマーモット絶縁体 κ -(BEDT-TTF)₂TaF₆ (以下 κ -TaF₆ と略記) を発見した。これを三角格子モデルに変換すると、 $t'/t = 1.76$ と他の κ 塩に比べて 1 次元鎖側に歪んだ三角格子でありながら、1.6 K まで磁気秩序を示さないことを見出してきた [5]。さらに、ダイマー構造をもたない四角格子型の真性モット絶縁体 β -(BEDT-TTF)TaF₆ を発見し、その基底状態が $T_N = 10$ K の反強磁性絶縁体であることを明らかにした [6]。

ダイマーモット絶縁体 κ -TaF₆ の抵抗の温度依存性は室温から半導体的挙動を示すが、220 K 近傍で kink が見られる [5]。この kink の原因を明らかにするために、低温での X 線回折実験を行った。その結果、この kink は構造相転移に起因していることが明らかになった。

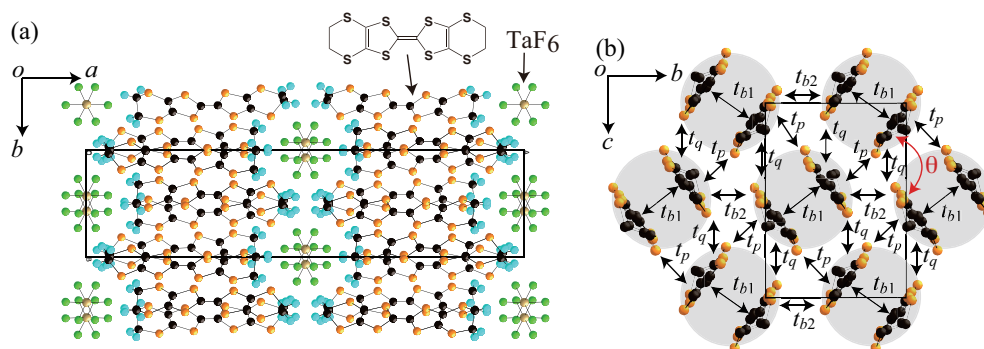


図 1: κ -(BEDT-TTF)₂TaF₆ の結晶構造. (a) ab 面投影と (b) 分子長軸方向からの投影. (b) で影をつけた円はダイマーを表し、 θ は分子の 2 面角。

図 2 に X 線振動写真を示す。200 K でブラッグスポットが a^* 軸方向に沿って 2 つに分裂するが、昇温させると再び 1 つのスポットに戻る。従って $200 < T < 260$ K で構造相転移があることが分かる。この相転移の詳細を明らかにするために、四軸回折計を用いてピークプロファイルの温度変化を測定した。図 3 に示すように $0k0$ 反射の h スキャンでのみ、ブラッグスポットの分裂が観測された。従って、構造相転移は b^* 軸が a^*b^* 面内で傾くもの (実空間では a 軸が ab 面内で傾く) である。 b^* 軸の傾きかたは $+a^*$ 方向と $-a^*$ 方向の 2 種類あるために、低温ではドメイン構造を形成していると結論できる。分裂したピークプロファイルの面積比から、ドメインの比率は 50 : 50 である。図 4(a) に 020 反射のピークプロファイルの温度変化を示す。ピーク高さが 220 K 以下で減少していき、それに伴い線幅が増大してピークが分裂していく。ピークの分裂幅は温度が下がるにつれて大きくなっていく。図 4(b) にピーク高さと分裂幅の温度依存性を示す。分裂幅はピークが明瞭に分裂していないと決められない。そこでピーク高さの温度依存性を見ると、転移温度は 220 K と見積もられる。これは電気抵抗に kink が観測されている温度とよく一致する。また、分裂幅 2Δ から見積もった b^* 軸の逆空間での傾き角 δ は 110 K で 2.2° である。

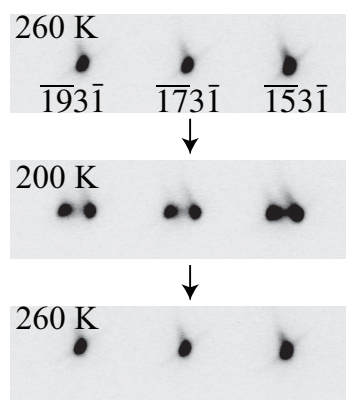


図 2: X 線振動写真.

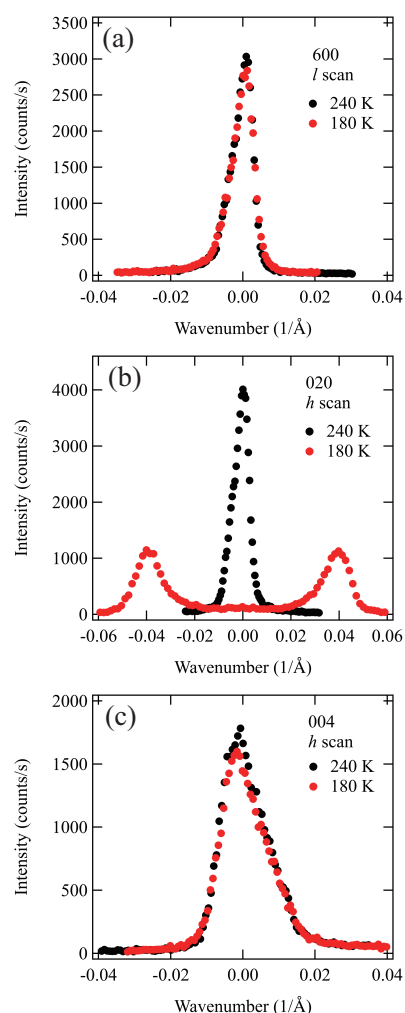


図 3: X 線回折のピークプロファイル (a) 600 反射, (b) 020 反射, (c) 004 反射.

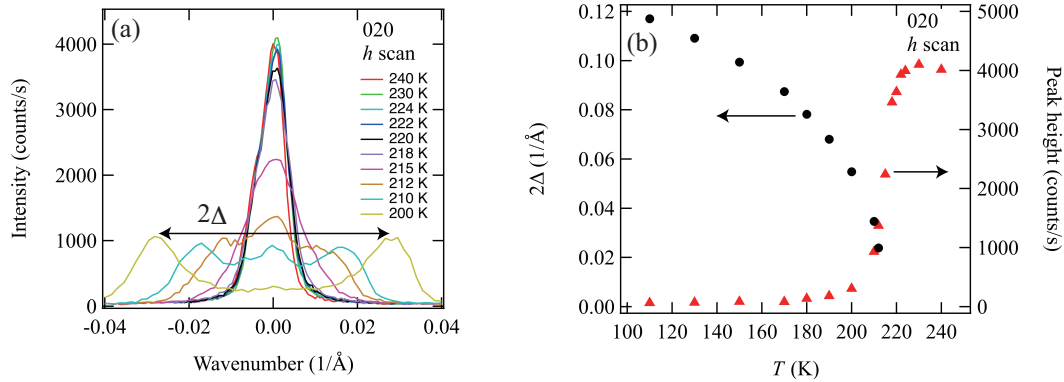


図 4: X 線ピークプロファイルの (a) 温度変化, (b) 分裂幅とピーク高さの温度依存性.

この構造相転移により幾つかの対称要素が消失する。まず、室温での空間群は $C2/c$ であるが、 C 底心が消失するためユニットセルの体積は半分になる。つまり図 1(a) の a 軸方向が半分になることに相当する。群論から低温構造の空間群を予測することができる [7, 8]。室温の空間群の点群 C_{2h} から位数は $p = 4$ である。低温での空間群を三斜晶の $P\bar{1}$ と仮定すると点群 C_i から位数は $q = 2$ であり、室温との比は $p/q = 2$ となり観測されたドメインの数と一致する。したがって、低温相では反転 ($\bar{1}$) の対称要素だけが残ることになる。これに伴い、結晶学的に独立な BEDT-TTF 分子は高温相では 1 つであったが、低温相では 2 つになる。結晶学的に異なるドナー分子を A と B としたとき、対称中心の位置からダイマーは A-A ダイマーと B-B ダイマーという結晶学的に異なる 2 種類のダイマーが存在することになる。最後に、 κ -TaF₆ で観測された構造相転移は、常圧で超伝導を示す κ_L -(DMEDO-TSeF)₂[Au(CN)₄](THF) において観測された構造相転移と酷似していることを指摘しておく [9]。

本稿ではダイマーモット絶縁体 κ -(BEDT-TTF)₂TaF₆ の構造相転移について報告した。

参考文献

- [1] K. Kanoda, *Hyperfine Interact.* **104**, 235 (1997).
- [2] Y. Shimizu, K. Miyagawa, K. Kanoda, M. Maesato, and G. Saito, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 107001 (2003).
- [3] R. Laversanne, J. Amiell, P. Delhaes, D. Chasseau, and C. Hauw, *Solid State Commun.* **52**, 177 (1984).
- [4] T. Kawamoto, K. Kurata, T. Mori, and R. Kumai, *Magnetochem.* **3**, 14 (2017).
- [5] T. Kawamoto, K. Kurata, and T. Mori, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 083703 (2018).
- [6] T. Kawamoto, K. Kurata, T. Mori, and R. Kumai, *J. Phys. Soc. Jpn.* **90**, 103703 (2021).
- [7] G. Van Tendeloo and S. Amelinckx, *Acta Crystallogr., Sect. A: Cryst. Phys., Diffr., Theor. Gen. Crystallogr.* **30**, 431 (1974).
- [8] V. Janovec, V. Dvorak, and J. Petzelt, *Czech. J. Phys., Sect. B* **25**, 1362 (1975).
- [9] T. Kawamoto, T. Mori, T. Kakiuchi, H. Sawa, T. Shirahata, M. Kibune, H. Yoshino, and T. Imakubo, *Phys. Rev. B* **76**, 134517 (2007).

物質理工学院応用化学系 大友研究室 2022 年度研究報告

異常高原子価を有するペロブスカイト型酸化物へテロ界面の作製と物性

物質理工学院応用化学系 大友研究室

本田 裕貴, 相馬 拓人, 大友 明

<http://www.ohtomo.apc.titech.ac.jp/>

1. 背景と目的

遷移金属酸化物は、しばしば強相関電子系と呼ばれ、電荷・スピン・軌道の自由度に由来する多彩な電子相を示す。その中でも、 ABO_3 (A : La, Sr など, B : 遷移金属) で表されるペロブスカイト型酸化物は、その構造を維持したまま構成元素を選択できる許容範囲の広さから多くの物質が合成され、絶縁体・金属・超伝導体・磁性体を含む多彩な電子相が明らかにされてきた[1]。さらに、近年では薄膜合成技術が成熟し、複数のペロブスカイト型酸化物を原子レベルで接合した界面も作製できるようになっている。ヘテロ界面ではバルクで発現しない特異な電子状態や物性の発見が相次いでいる[2,3]。一方で、単純酸化物では安定化できない Ni^{3+} , Fe^{4+} や Co^{4+} などの”異常高原子価”を有する物質がバルクとして合成できることも知られている[4]。LaNiO₃ (LNO), SrFeO₃ (SFO) や SrCoO₃ に代表される異常高原子価ペロブスカイト型酸化物は、高い電気伝導性や室温強磁性など顕著な電氣的・磁氣的性質を示す。しかしながら、その作製には高圧酸素などの強い酸化条件が必要である。そのため、高真空下で行われる薄膜成長との相性が悪く、異常高原子価酸化物のヘテロ界面を作製することは困難であった。そこで本研究では、酸素ラジカル支援を組み合わせた高真空薄膜作製技術を開拓することにより、LNO と SFO からなる異常高原子価ペロブスカイト型酸化物のヘテロ界面を作製し、その電子状態を明らかにすることを目的とした。

2. 実験

酸素ラジカル支援パルスレーザー堆積法を用いることで、高真空下における反射高速電子線回折 (RHEED) によるその場観測と強酸化条件を両立させて、薄膜成長を行った。温度 700 °C, 圧力 1.0×10^{-4} Torr, 酸素ラジカル流量 0.70 sccm, ラジカルパワー 180 W で SrTiO₃ (100) 基板上に SFO と LNO を交互に積層させた人工超格子薄膜を作製した。積層周期の異なる SFO/LNO 超格子薄膜 [(SFO)_{*n*}(LNO)_{*n*}] ($n = 1, 3, 5, 10$) を作製し、X 線回折測定 (XRD) と電気抵抗測定からその構造特性と電気輸送特性を評価した。また、酸素ラジカル照射下でのポストアニールを行い、酸素欠損の効果について検討した。

3. 結果と考察

作製した [(SFO)_{*n*}(LNO)_{*n*}] 超格子薄膜の XRD プロファイルを図 1 に示す。ペロブスカイト型構造に由来する基本反射に加えて、 $n = 1$ 以外の薄膜では超格子構造に由来する反射が系統的に観測された。これは、設計通りのペロブスカイト型構造を持つ超格子構造が作製できたことを示している。

基本反射ピークから計算される面直方向のペロブスカイト基本格子の格子定数を図 2 に示す。それらの値は、SFO と LNO のバルク単体で知られているいずれの値よりも大きく、 n が小さいほど増加することがわかった。単純に 2 相が交互積層された場合、格子定数はそれらの平均値になると予想されるため、界面において化学状態や電子状態が変化している可能性が示唆される。しかし

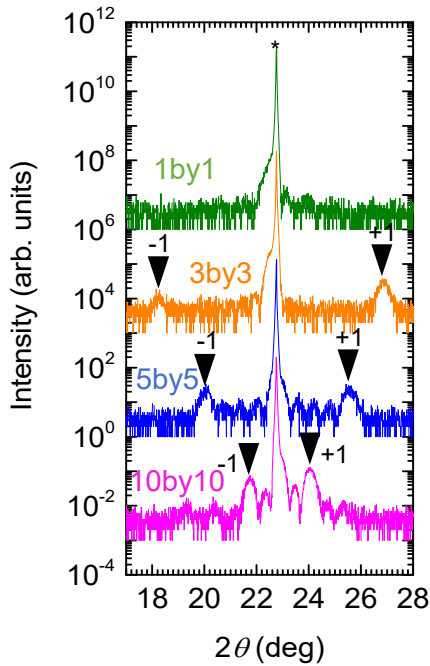


Fig. 1 [(SFO)_n(LNO)_n]超格子薄膜の X 線対称反射プロファイル. *は基板の回折ピークを示す.

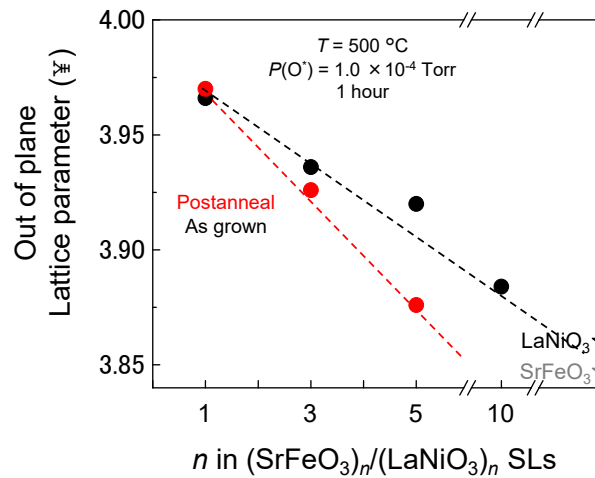


Fig. 2 アニール前後の[(SFO)_n(LNO)_n]超格子薄膜の積層周期 n と面直方向の格子定数の関係. ★は SrFeO₃ と LaNiO₃ それぞれのバルクでの値を示す.

ながら、高真空下で作製しているため SrFeO_{3-δ} や LaNiO_{3-δ} のように酸素欠損が導入された外的な可能性を排除できない。そこで薄膜作製後に酸素ラジカル環境下で 500 °C でポストアニールを行うことにより、酸素欠損を完全に補填する実験を行った[5]。アニール後の格子定数も同様に Fig. 2 に示す。実際にほとんどの超格子構造で格子定数の減少がみられたことから、酸素欠損が効果的に補填されたことがわかる。しかしながら、バルクの値までは収縮せず、 n の減少に伴い系統的に増加する傾向は不変であった。このことから、超格子構造における格子定数の増大は、ヘテロ界面の増加に由来する本質的な構造変化であることが示唆される。

超格子薄膜の電気抵抗率の温度依存性を Fig 3 に示す。参照試料として作製した SFO と LNO の単層薄膜のデータも点線で示す。SFO と LNO の単層薄膜は、バルク単結晶で知られているように低い電気抵抗率と低温まで金属的挙動を示した。このことは、それぞれの薄膜において Fe⁴⁺ や Ni³⁺ という異常高原子価が確かに実現されているとともに、結晶性が高いことを示唆している。酸素ラジカルを用いたことで、高真空下にもかかわらず異常高原子価状態まで酸化できたと結論できる。 $n=10$ の超格子薄膜では、単相薄膜と同様に金属的な挙動が見られた。一方で、 $n=5$ の薄膜では温度低下に伴って抵抗が上昇する絶縁体的な挙動に変化した。 $n=1$ の薄膜では、低温で測定限界に達するほどに抵抗が増加しており、 n が小さくなるほど抵抗率が增大するという系統的な変化が得られた。つまり、SFO と LNO を接合させた数原子層のヘテロ界面では金属から絶縁体への転移が起きたことがわかる。 n を減少させることで金属である単体から相対的にヘテロ界面の効果が顕著になっていく挙動が観測されたと考えられる。 $n=1$ の薄膜では交互積層によってヘテロ界面が繰り返される構造となり、完全な絶縁体へと変化したと考えられる。実際に、ヘテロ界面では化学的安定性の差から電荷の再構成が起こり、遷移金属の価数変化が物性変化に現れることが報告されてい

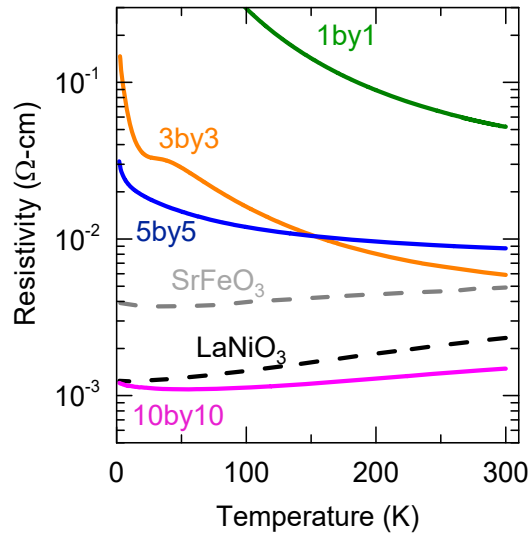


Fig. 3 [(SFO) $_m$ (LNO) $_n$]超格子薄膜の抵抗率の温度依存性. 点線は, SFO と LNO の単層薄膜のデータ.

る[2,6]. Fig. 2 で示した格子定数の系統的な変化は, 価数変化に伴って種々のイオンのサイズも大きく変化することから説明することができる. 不安定な異常高原子価状態を母体に用いたことにより, ヘテロ界面において電子状態が大きく変調され新しい電子相が創出されたことが結論付けられる.

4. まとめと今後の展望

酸素ラジカル支援パルスレーザー堆積法を用いることで, 異常高原子価状態を持つ SFO/LNO 人工超格子薄膜を原子層レベルの制御の下で作製することに成功した. 積層周期が短いほど格子定数が増加し, 絶縁体へと系統的に転移するふるまいが観測された. このことは, SFO/LNO ヘテロ界面において電子状態の変化が起きることを示唆している.

我々の第一原理電子状態シミュレーションの結果では, SFO/LNO ヘテロ界面における電荷再構成とそれに起因する磁氣的相互作用の発生が示唆されており, 今後詳細な測定を行うことで価数や磁性相などの具体的な電子状態を特定する予定である. また, 今回確立した *in-situ* RHEED 観測を可能とする酸素ラジカル支援パルスレーザー堆積法は, 様々な物質系に適応可能であり, SrCoO₃ や SrCrO₃ をはじめとする種々の異常高原子価酸化物において実現される電荷再構成と, それによって引き起こされる隠れた物性の発見が期待できる.

参考文献

1. M. Imada *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **70**, 1039 (1998).
2. A. Ohtomo *et al.*, *Nature* **427**, 423 (2004).
3. H. Y. Hwang *et al.*, *Nat. Mater.* **11**, 103 (2012).
4. F. D. Romero *et al.*, *Chem. Commun.* **55**, 3690 (2019).
5. L. Wang *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **3**, 025401 (2019).
6. M. N. Grisolia *et al.*, *Nat. Phys.* **12**, 484 (2016).

鈴木研究室 2022 年度研究報告

工学院電気電子系 鈴木研究室
http://www.pe.titech.ac.jp/SuzukiLab/

導体損失を削減した空洞共振器型共鳴トンネルダイオード発振器からの 高出力テラヘルツ放射

1. 背景・目的

電波と光の境界領域であるテラヘルツ(THz)周波数帯は分光分析・イメージング・超高速無線通信などさまざまな応用が提案されており、今後の発展が大きく期待される分野である。コンパクトなコヒーレント光源は、これらの THz 応用のキーコンポーネントで、電子デバイスと光デバイスの両方から光源の研究が行われている。光デバイスでは量子カスケードレーザが、また、電子デバイスでは HBT、HEMT、Si-CMOS などのトランジスタが盛んに研究され、動作周波数が伸びている。共鳴トンネルダイオード (RTD) は微分負性抵抗特性 (NDR) を有する素子で室温 THz 光源の候補のひとつであり[1-4]、他の電子デバイスと比べて更に高い周波数動作が可能である。我々は、低損失共振器を用いることで、2 THz に迫る基本波発振を達成し、また、1 THz 帯で 0.7 mW の高出力動作を 89 個の発振器を並べ同時動作させることで達成している[2, 3]。

しかし、従来の単体 RTD 発振器の発振出力は 1 THz において 10 μ W 程度であり、高出力化が課題である。高出力発振を目指すには複数の RTD 発振器のアレイ化が有効であり、既に高出力発振が報告されているが [1, 3, 4]、それと同時に単体の高出力化も必要である。我々はこれまで空洞共振器と大面積 RTD を用いた単体の高出力 THz 発振器を提案したが[5, 6]、大面積の RTD では発熱が大きくデバイス破壊が問題となっていた。そのため、下部導電層に用いていた低熱伝導率の n^+ -InGaAs から放熱のために高熱伝導率の n^+ -InP を採用した新たな RTD 層構造を提案し、大面積動作が可能であることを示した[7, 8]。しかしながら、 n^+ -InP は以前の n^+ -InGaAs よりも導電率が低く、これにより導体損失が増加して出力が低下することが判明したため、この n^+ -InP 導電層を厚くすると共に共振器電極構造を最適化し導体損失を削減することで高出力発振を得たので、これら高出力 THz デバイスへの取り組みについて報告する。

2. RTD デバイスの放熱性の向上

図 1 に、RTD の層構造を示す。1 nm の AlAs 障壁層と 3 nm の InGaAs 井戸層の 2 重障壁構造を有している。従来は RTD 層の下に導電層として n^+ -InGaAs を使用していた。しかし、 n^+ -InGaAs は熱伝導率が 4.57 W/m \cdot K [9] と小さく、放熱の妨げとなっていた。そこで、熱伝導率が 68 W/m \cdot K [10] と大きい n^+ -InP に変更することで RTD 基板の放熱性の向上を試みた。導電層の材質変更の効果を確認するために、図 1 (a)-(c) に示すような、導電層の組成が異なる 3 種類の RTD 基板を用意した。(a) は、導電層として n^+ -InGaAs を使用した従来構造の RTD 基板であり、(b) は導電層の上半分を n^+ -InGaAs、下半分を n^+ -InP としたものである。また、(c) は導電層を全て n^+ -InP にしたものである。ピーク電流密度は、(a)-(c) でそれぞれ 17, 16.4, 12.5 mA/ μ m² であり、ピーク電圧は 0.391, 0.408, 0.451 V であった。これらの基板上に面積の異なる簡易的な RTD メサ構造を作製し、各面積で 24 個ずつ IV 測定をして、NDR 特性が発現した個数をカウントした。面積に対する歩留まりを図 2 に示す。歩留まりが 50 % になる面積は(a)-(c)で約 2, 3, 6 μ m² であり、(a)と(c)でピーク電圧にバイアスした際の消費電力密度が

15%程度しか変わらないにもかかわらず、 n^+ -InP 導電層の導入で2倍以上の大面積まで動作範囲が拡大することがわかった。

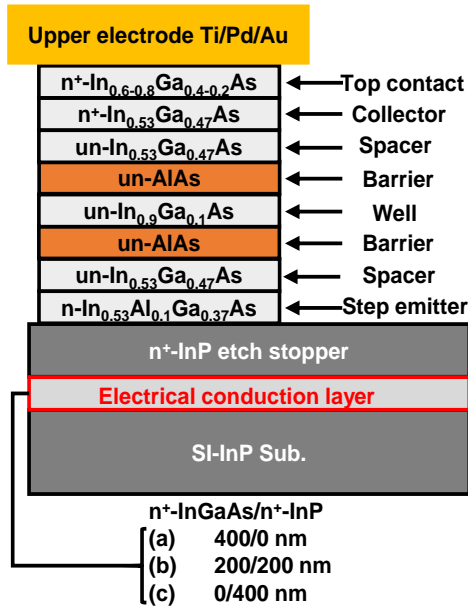


図 1 : RTD 層構造

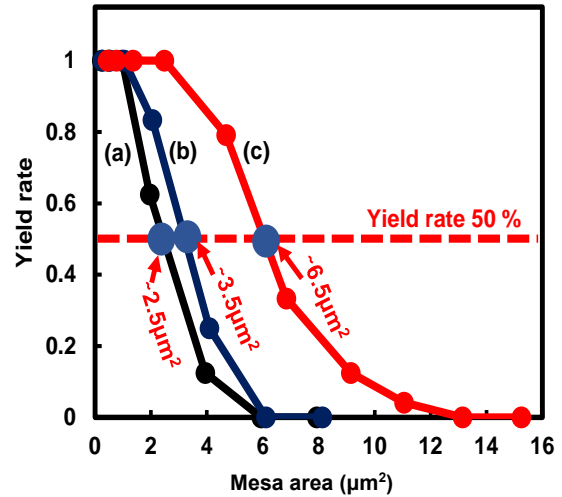


図 2 : 同一面積に対して 24 個ずつ測定し、壊れずに NDR 特性が得られた割合

3. 矩形空洞共振器を用いた高出力RTD発振器

矩形空洞共振器は低インダクタンス特性を持ち、発振周波数を維持したまま RTD の面積大きくできるため、高出力化に有効であり、2 章の放熱性の高い RTD 層構造と組み合わせることで熱破壊のない安定動作が期待される。矩形空洞共振器を用いた RTD 発振器のデバイス構造を図 3 に示す。中央に大面積 RTD とそれに接続された矩形空洞共振器を配置しており、共振器の両端から伸びる金属板は THz 波を放射するダイポールアンテナとして機能する。RTD の NDR が回路損失を打ち消すことで発振が起こり、発振周波数は共振器のインダクタンスと RTD キャパシタンスの LC 並列共振で決定される。共振器の外に形成した安定化抵抗により、低周波の寄生発振を抑制している。安定化抵抗を大面積化することにより抵抗値を変えることなく発熱が抑えられ、また、RTD メサから離して配置することにより RTD メサの温度上昇も防いでいる。

まず、2 章で用いた(b)の層構造を用い RTD 発振器を作製した。完成したデバイスの出力・周波数測定を行った結果、0.53 THz で 0.2 mW の発振を達成した。しかしながら、放熱用に採用した n^+ -InP は n^+ -InGaAs よりも 5 倍程度抵抗率が高く、これにより直列抵抗が増加するため、出力低下が起こっていることがわかった。そのため、まず基板の n^+ -InP 導電層を 0.2 μm から 1 μm に厚膜化することでシート抵抗の低減をはかった。同時に、RTD メサを形成する際のウェットエッチングについて、エッチング時間を短縮し電極形成を 2 度に分けることで、RTD メサと電極間の距離を短縮した。これらにより、直列抵抗の大幅な低減を達成した。また、共振器の高さを 0.5 μm から 1.2 μm に高くすることで共振器の導体損失の低減を行った。改良部分のまとめについて図 4 に示す。さらに、図 5 に発振出力の周波数依存性を示す。0.61 THz において 0.86 mW の高出力発振が得られ、実験と理論はほぼ一致した。今後は、共振器長を長くすることでさらに低損失化を行い、1 THz において 1 mW 以上の高出力テラヘルツ発振を目指す。

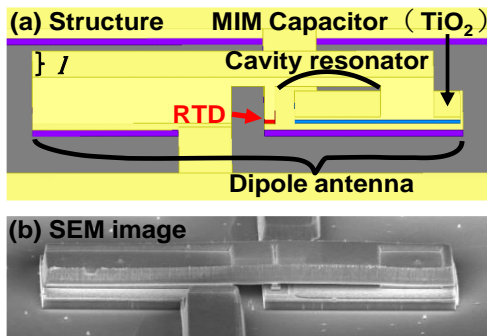


図 3 : 矩形空洞共振器を用いた RTD 発振器
(a)模式図、(b)完成デバイスの SEM 像

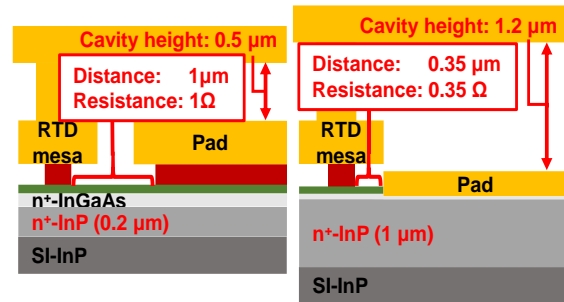


図 4 : 下部導電層の厚膜化とエッチングコントロールによる低抵抗化

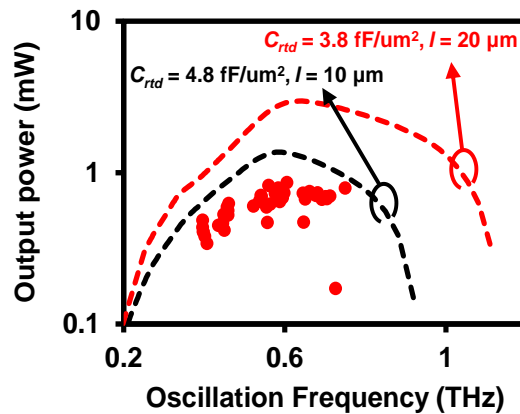


図 5 : 発振周波数と出力の依存性

参考文献

- [1] M. Asada and S. Suzuki, Terahertz emitter using resonant-tunneling diode and applications, Sensors, vol. 21, no.4, pp.1384-1402, February 2021.
- [2] R. Izumi, S. Suzuki, and M. Asada, 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode, International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), MA3.1, Cancun, Mexico, August 2017.
- [3] K. Kasagi, S. Suzuki, and M. Asada, Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1 THz, Journal of Applied Physics, vol. 125, pp. 151601-1-15161-7, march 2019.
- [4] Y. Koyama, Y. Kitazawa, K. Yukimasa, T. Uchida, T. Yoshioka, K. Fujimoto, T. Sato, J. Iba, K. Sakurai, and T. Ichikawa, A high-power terahertz source over 10 mW at 0.45 THz using an active antenna array with integrated patch antennas and resonant-tunneling diodes, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 12, no. 5, pp. 510-519, September 2022.
- [5] K. Kobayashi, S. Suzuki, F. Han, H. Tanaka, H. Fujikata, and M. Asada, Analysis of a high-power resonant-tunneling-diode terahertz oscillator integrated with a rectangular cavity resonator, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. 5, pp. 050907-1-050907-1-5, May 2020.
- [6] F. Han, K. Kobayashi, S. Suzuki, H. Tanaka, H. Fujikata, and M. Asada, Impedance matching in high-Power resonant-tunneling-diode terahertz oscillators integrated with rectangular-cavity resonator, IEICE Transactions on Electronics, vol. E104-C, no. 8, pp. 398-402, January 2021.
- [7] H. Tanaka, H. Fujikata, F. Han, A. Ishikawa, S. Suzuki, and M. Asada, Successful operation of large-area resonant tunneling diodes without heat destruction by introducing a heat-dissipation InP conduction layer, International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), J-3-04, Chiba, Japan, September 2022.
- [8] H. Fujikata, H. Tanaka, F. Han, A. Ishikawa, S. Suzuki, and M. Asada, Terahertz oscillator using rectangular-cavity resonator and large-area RTD with heat dissipation structure, 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves

(IRMMW-THz), Th-PM2-2-4, Delft, The Netherlands, August 2022.

- [9] G. R. Jaffe, S. Mei, C. Boyle, J. D. Kirch, D. E. Savage, D. Botez, L. J. Mawst, I. Knezevic, M. G. Lagally, and M. A. Eriksson, Measurements of the thermal resistivity of InAlAs, InGaAs, and InAlAs/InGaAs superlattices, *Applied Materials and Interfaces*, vol. 11, pp. 11970-11975, February 2019.
- [10] P. D. Maycock, Thermal conductivity of silicon, germanium, III-V compounds and III-V alloys, *Solid-State Electronics*, vol. 10, no. 3, pp. 161-168, March 1967.

理学院物理学系 藤澤研究室 令和4年度研究報告

理学院物理学系, 極低温研究支援センター 藤澤 利正

<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/>

藤澤研究室では、半導体ナノ構造を用いた低次元電子系の物性研究をおこなっている。特に、人工的に設計されたポテンシャル中の電子のダイナミクスを主な研究テーマとしており、新しい量子電子輸送現象を明らかにするとともに、ナノエレクトロニクス・量子情報技術・プラズモニクス・スピントロニクス・熱輸送技術への発展を目指し、下記のサブテーマのもとに研究を進めている。

量子ホール効果エッジチャネルの非平衡輸送現象に関する研究

二次元電子に強磁場を印加すると、試料の端を沿って電子が流れる伝導モード(エッジチャネル)が形成される。その電荷密度波であるエッジマグネトプラズモンは量子ホール状態の低エネルギー励起であり、散乱がなく、一方向性を有することから興味深い現象が現れる。このカイラル一次元系は、朝永ラッティンジャー流体モデルを実現しうる系としても注目されており、相互作用に起因した特異な非平衡状態や時間応答に注目して研究を進めている。さらに、分数量子ホール領域における分数電荷励起に関する研究を行っている。これらの実験は、時間応答測定、周波数応答測定、自己相関・相互相関の電流雑音測定など、研究室独自の手法によって行っている。

量子ドットの電子状態とフォノンとの相互作用に関する研究

半導体表面の楕形電極に高周波を印加することにより、コヒーレントで単色な表面弾性波フォノン(音響格子振動モード)を発生することができる。このコヒーレントフォノンをナノ構造の電子系(二重量子ドットなど)に照射することにより、共鳴フォノン支援トンネル現象などの電子格子相互作用に起因した輸送現象を研究している。金属周期構造の設計によりフォノン共振器構造を作製し、共振器中での電子格子相互作用や、フォノンと電子系のエネルギー変換、電子系のデコヒーレンスの低減など、新たな電子状態制御方法の開拓を目指している。

これらの研究は、NTT物性基礎研究所・量子固体物性研究グループ、特に村木康二氏、橋坂昌幸氏、秋保貴史氏などとの共同研究により行っている。また、科研費基盤研究(S) (19H05603)、萌芽研究(17K18751)、東工大極低温研究支援センター、東工大ナノテクノロジープラットフォーム、の支援を受けておこなっている。

今年度の研究活動状況は下記のとおりである。

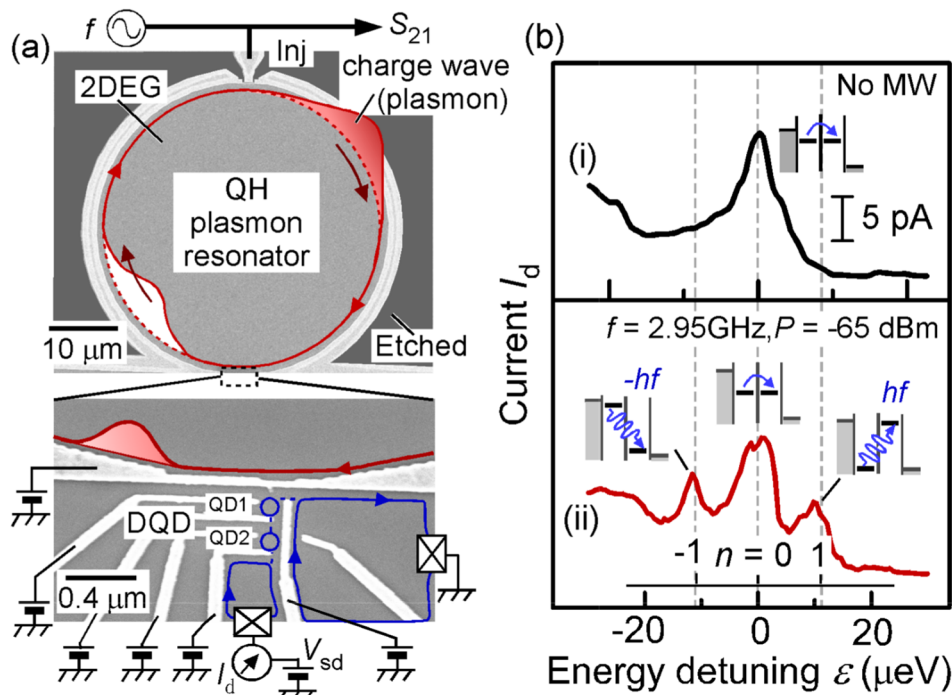
量子ホールプラズモン共振器と二重量子ドットの結合系におけるプラズモン支援トンネル

東工大理^A, JST さきがけ^B, NTT 物性基礎研^C

Chaojing Lin^{A,B}, 二俣晃^A, 橋坂昌幸^C, 秋保貴史^C, 村木康二^C, 藤澤利正^A

フェルミオンとボゾンのコヒーレントな結合を担う共振器量子電磁力学において、強い結合を得るためには、インピーダンスの高い共振器を構成することが重要である。量子ホール系のエッジプラズモンは、量子化された高いインピーダンス(占有率2の場合に12.9kΩ)を示すことから、二重量子ドット(DQD)電荷量子ビットとの強い結合が期待される。本研究では、量子ホール系によるプラズモン共振器と二重量子ドット(DQD)と結合した系を形成し、マイクロ波によってプラズモン共振器を励起し、二重量子ドットのプラズモン支援トンネルを観測することに成功した。

図(a)はAlGaAs/GaAsヘテロ構造上に形成された素子のSEM写真と測定系を示している。約3.6Tの磁場によりランダウ占有率2の量子ホール系を形成すると、リング状のゲート電極で囲まれた部分が孤立した円形の量子ホール領域(プラズモン共振器)となる。上部の電極(Inj)に周波数 f (=2.95GHz)の高周波を印加すると、電荷密度波が量子ホールエッジを周回するプラズモン共振器モード(模式的に、赤と白の波束で示されている)を励起できる。共振器の近傍に、二重量子ドット(DQD)を形成し、二準位系のエネルギー差 ε に対する輸送特性を観測した結果が図(b)である。マイクロ波を印加しない場合には単一の共鳴トンネルピーク(i)が観測されるが、共振周波数のマイクロ波照射によって2つのサイドピークが現れる。これらは、共振器プラズモンの吸収($n=1$)・放出($n=-1$)を伴うプラズモン支援トンネルであることを、周波数-磁場依存性やパワー依存性などにより確認した。また、二重量子ドットの電荷状態を反映して、プラズモン共振特性が変化する様子



図(a) SEM写真と測定系。矢印付き直線はエッジチャネルを示す。

(b) DQDの共鳴トンネル特性(i)と、プラズモン支援トンネル(ii)。

子を、高周波伝達特性 S_{21} を観測することで明らかにした。このように、プラズモンと二重量子ドットの結合系は、新たな共振器量子電磁力学の研究舞台として有望である。

本研究では、科研費(JP19H05603)、JST さきがけ(JPMJPR225C)、東工大ナノプラットフォームの支援を受けた。

量子ホールエッジチャンネルにおけるホットエレクトロンから非熱的朝永ラッティンジャー液体への変遷過程

東工大理^A, NTT 物性基礎研^B

鈴木 光太郎^A, 秦 徳郎^A, 佐藤 裕也^A, 秋保 貴史^B, 村木 康二^B, 藤澤 利正^A

量子ホールエッジチャンネルにおける低エネルギーの励起は、朝永-ラッティンジャー液体(TLL)モデルを再現し、フェルミ分布とは異なる非熱的状態を長く保つことが知られている[1]。通常、TLLの特徴は低エネルギー領域(< 1 meV)で観測されるが、本研究では、顕著に高いエネルギー($1 - 100$ meV)のホットエレクトロン注入によっても非熱的な TLL が形成されることを示す。チャンネル内(同一スピン間)電子電子散乱($e_{\uparrow}-e_{\uparrow}$)とチャンネル間(異なるスピン間)電子電子散乱($e_{\uparrow}-e_{\downarrow}$)により生成された電子・正孔プラズマが非熱的状態に留まる様子は、可積分系 TLL の強靱性を捉えている。

GaAs/AlGaAs ヘテロ接合二次元電子系に占有率 2 の量子ホールエッジチャンネル(スピン \uparrow と \downarrow)を形成した。図 1 のように、チャンネル \uparrow にホットエレクトロンを注入する(エネルギー $eV_{inj} = 1 - 100$ meV、入射電流 $I_{inj} = 1 - 10$ pA)と、

フェルミ面付近の電子とのチャンネル内散乱($e_{\uparrow}-e_{\uparrow}$)により、ホットエレクトロンのエネルギー(E_h)は緩和し、フェルミ面付近に電子正孔(e-h)励起(紫の縦縞)が生じる。この散乱は、1回で交換し得る最大のエネルギー $\Delta E_{\uparrow\uparrow}$ と長さあたりのエネルギー緩和量 $\gamma_{\uparrow\uparrow}$ で特徴づけられ、 E_h が低くなるにつれて両者とも増大し、ホットスポット($x_{H\uparrow}$)で e-h 励起は最大となる[2]。 E_h が十分低くなる($E_h < \Delta E_{\uparrow\uparrow}$)と、チャンネル間散乱($e_{\uparrow}-e_{\downarrow}$)が支配的になり、チャンネル \downarrow にもホットスポット($x_{H\downarrow}$)が現れる。さらにエネルギーが低くなる($E_h < \Delta E_{\uparrow\downarrow}$)と、系は TLL として振る舞い、緩和は抑制され、長寿命の非熱的準安定状態に至る。

このような変遷を明らかにするため、様々な位置($L = 1 - 30 \mu\text{m}$)にある量子ポイント接合(QPC)又は量子ドット(QD)を用いて調べた。QPCを用いると、ホットエレクトロンの軌跡 $E_h(x)$ を捉えることができる[3]。QD によるエ

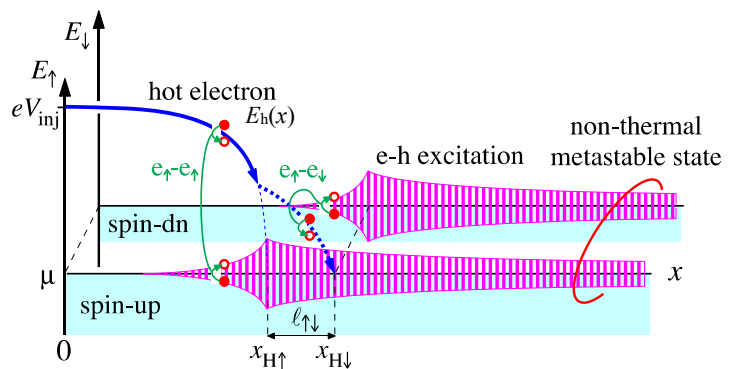


図 1 測定系の概念図。ホットエレクトロンによって電子正孔励起が生じる。

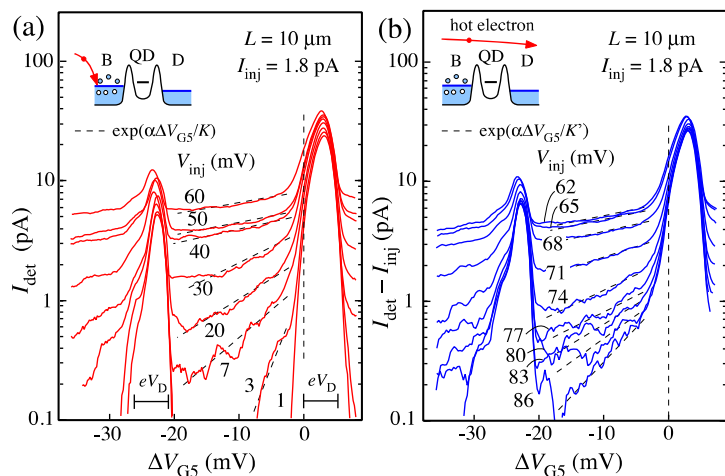


図 2 量子ドットによる分光測定。(a) $x_{H\uparrow} < L$ のとき、(b) $x_{H\uparrow} > L$ のとき。

エネルギー分光によりチャンネル↑のエネルギー分布を調べた例が図 2 である。急峻なクーロン振動ピークと緩やかな裾（破線）は、低温と高温の電子が共存した非熱的状態を示している。ホットスポットより後($x_{\text{Hf}} < L$)で測定した図 2(a)においても共存が見られることは、非熱的 TLL の強靱性を示している。一方で、ホットスポット前($x_{\text{Hf}} > L$)で測定した図 2(b)から、 $\Delta E_{\uparrow\uparrow}$ を見積もることができ、上記の散乱過程の変遷を支持している。

本研究は科研費(JP19H05603)、東工大ナノプラットフォームの支援を受けた。

[1] K. Itoh *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 197701 (2018).

[2] T. Ota *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 085310 (2019).

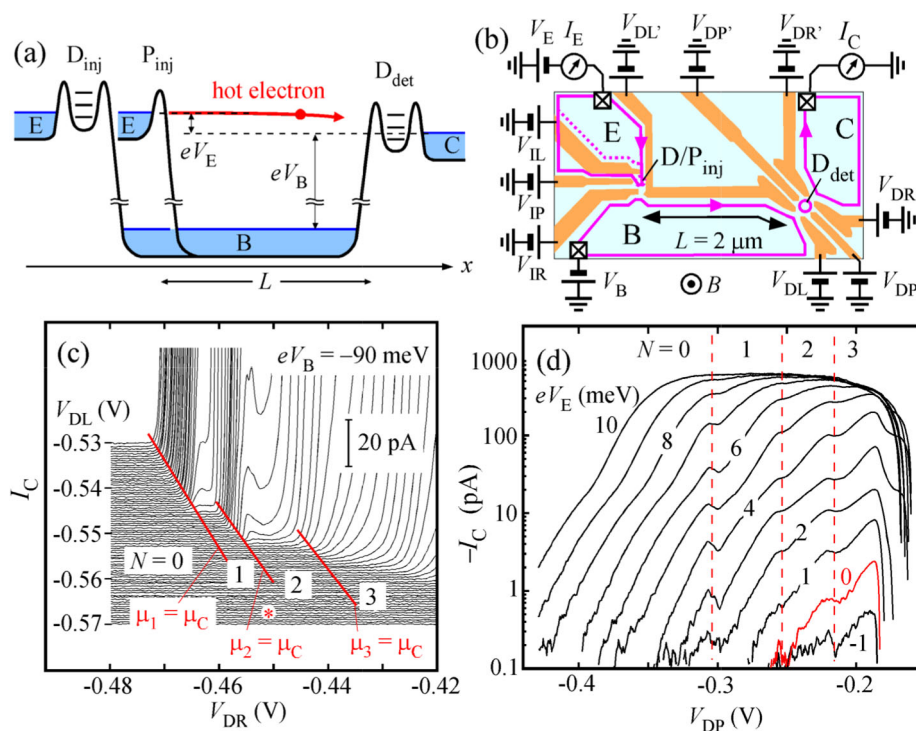
[3] 鈴木 他, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 23pD1-3.

量子ホールエッジチャンネルにおけるホットエレクトロンの量子ドット分光測定

東工大理^A, JST さきがけ^B, NTT 物性基礎研^C

大石遼^A, 鈴木光太郎^A, 秦徳郎^A, Chaojing Lin^{AB}, 秋保貴史^C, 村木康二^C, 藤澤利正^A

量子ホールエッジチャンネルを弾道的に伝播する高エネルギーのホットエレクトロンは、量子電子光学への期待から盛んに研究がなされている。動的に形成される量子ドットや量子ポイント接合を用いた手法が頻繁に用いられている[1,2]が、本研究では静的に形成された量子ドットによってホットエレクトロンの生成と検出を行う量子ドット分光測定について報告する。



図(a)のように、コレクタ(C)領域の電気化学ポテンシャルを基準として、ベース(B)領域のポテンシャル ($eV_B = -40 \sim -100$ meV) を設定した。ポテンシャル $eV_E (= -10 \sim 10$ meV) のエミッタ(E)から量子ドット(D_{inj})またはポイント接合(P_{inj})によってホットエレクトロンを注入し、距離 $L (= 2 \mu\text{m})$ 離れたコレクタ(C)側の量子ド

図 (a)測定概念図 (b)素子構造と測定系 (c) 量子ドット D_{det}の形成 (d) P_{inj}から熱い電子を注入した際の D_{det} 検出電流。

ット(D_{det})を用いてホットエレクトロンの検出を行った。ベース領域で電子電子散乱などによるホットエレクトロンの緩和など調べることができる。図(b)のように AlGaAs/GaAs 二次元電子系をゲート電極(黄色)で狭窄した試料を用い、磁場 $B(=3.8\text{ T})$ 中でランダウ準位占有率 2 において実験を行った。図(c)は、 $eV_B = -90\text{ meV}$ において、 D_{det} を形成した際の結果である。電子数 $N=0-3$ の変化により、コレクタからベースに流れる電流 I_C のオンセット ($\mu_N = \mu_C$) が変化しており、ホットエレクトロン注入/検出用の単一電子素子が形成されていることを示す。 $\mu_1 = \mu_C$ の延長上で十分に電流が抑制されている条件(図の*印付近)において、 $eV_E = -1 \sim 10\text{ meV}$ で P_{inj} からホットエレクトロンを注入した場合に観測されるコレクタ電流($-I_C$: コレクタに流れる電流)を示したものが図(d)である。 D_{det} の電子数変化による信号とともに、ホットエレクトロン誘起の電流が観測された。ホットエレクトロンのエネルギー分光手法により緩和機構などを調べることができると期待される。

謝辞：科研費(JP19H05603)、東工大ナノプラットフォームの支援を受けた。

[1] J. D. Fletcher et al., Phys Rev Lett 111, 216807 (2013).

[2] T. Ota et al., Phys. Rev. B 99, 085310 (2019).

2022 年度 大熊研究室研究報告

物理学系（極低温研究支援センター） 大熊 哲

<http://www.rcltp.titech.ac.jp/~okumalab/>

ランダムなピン止めポテンシャルの下で相互作用する多粒子系に、交流せん断力や直流駆動力を印加すると、運動による秩序化—動的秩序化—に起因する可逆-不可逆転移 (RIT) や非平衡ディピニング転移といった新規な非平衡相転移や多彩なフロー構造の変化が起こることが報告されている。しかし、理論と比べ実験は進展が遅く、非平衡相転移の基本的性質、あるいは相転移の存在自体さえも明確に検証した実験は少なく、その解明が待たれている。大熊研究室では相互作用する 2 次元多粒子系とみなせる超伝導渦系系を用いて、動的秩序化に伴うフロー構造の変化や非平衡相転移の臨界現象を、独自に開発した動的な輸送測定を用いて明らかにすることを目的として研究を進めている。本稿では 2022 年度に得られた成果の中から、直流駆動による動的秩序化転移とその相転移を利用した非平衡相転移における Kibble-Zurek 機構の初の実証実験の結果について報告する。

1. 超伝導渦系系における動的相転移：Plastic flow-Smectic flow 転移の検証

前垣内 舜, 家永紘一郎, 大熊 哲

ランダムなピン止めポテンシャルをもつ基板上に多粒子系を準備し、駆動力を増やしていくと、ある駆動力で粒子がピン止めから外れて駆動を始めるディピニング転移 [1] が起こる。ディピニング転移は、磁壁や電荷密度波、コロイド粒子系、超伝導渦系系 [2, 3] といったミクロな物理系から、地球プレートや氷河の塑性運動、あるいは雪崩などのマクロな自然現象にまで幅広く関連しており [4]、古くから盛んに研究がされている [1]。駆動力（駆動速度）を増やしていくと、はじめは乱れた plastic flow が起こる。さらに駆動力を増やすと、まず横方向のみが秩序化した smectic flow へ、そして最後は等方的に秩序化した moving Bragg glass（格子フロー）へと動的状態が変化することが予想されている [5]。Smectic flow の存在、および smectic flow から moving Bragg glass への動的状態変化は理論的には 20 年以上議論されてきたが、実験の困難さから明確な実験証拠はなかった。本研究ではフロー構造の異方性を検出できる十字型試料を考案することにより、初めてその実験証拠をつかんだ [6]。

渦系のフロー方向に対して垂直方向の構造の情報を得るため、十字型のアモルファス $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ 超伝導膜を作製し、互いに 90° 方向に駆動力を印加できる交差駆動法を開発した。図 1 に試料と電極配置の模式図を示す。これを用いて、初期配置からまず y 方向

に十分な時間駆動させた後、一度駆動力を切って渦糸配置を凍結させる。つぎに、同じ大きさの駆動力で x 方向に駆動させたときの電圧（渦糸速度）の過渡応答測定を行う。その結果、駆動力増加に伴い、緩和波形が単調減少（図 2(a) と 3(a) の赤いデータ）から単調増加（図 3(a) の青いデータ）へ変わることを観測した。単調減少の緩和は plastic flow における目詰まりした渦糸の存在（図 2(b)-(d)）を、単調増加の緩和は横方向に秩序化したフローチャンネル、すなわち smectic flow の形成（図 3(b)-(d)）を反映している。したがって、単調減少から単調増加に変わる電流値が、plastic flow から smectic flow へ変化する特徴的な電流（ $\equiv I_1$ ）であることがわかった。より高電流域では緩和現象は観測されなかった（図 3(a) の挿入図）。これは等方的な格子フローの形成を表わしている。Smectic flow から moving Bragg glass（格子フロー）へ変わる電流値 I_2 は、フロー電圧に対する電流の 1 階微分と 2 階微分が共にゼロとなる電流値から求めた。駆動電流に対する渦糸フローの動的相図を図 1（右）図 (a) の上に示す [6]。

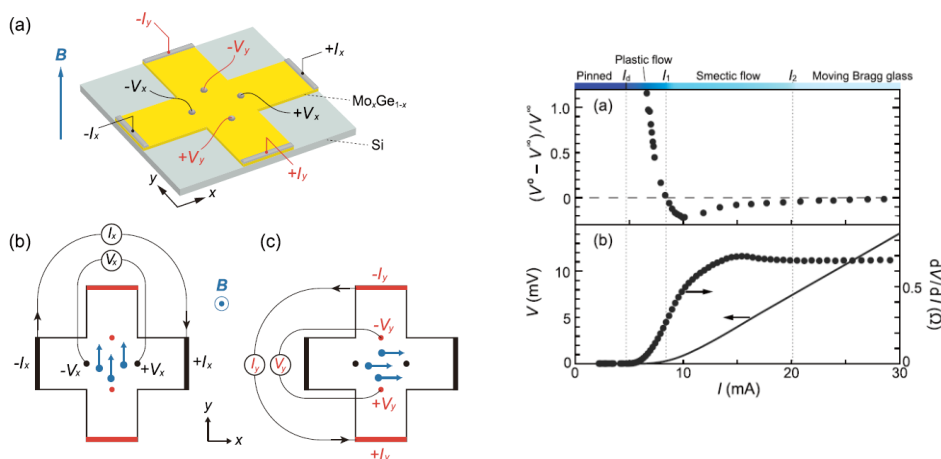


図 1 (左) 十字型試料の模式図. (右) (a) 図 2(a), 3(a) の立ち上がりの電圧 V^0 と定常状態の電圧 V^∞ の差を I に対してプロット. (b) I - V と I - dV/dI 特性 [6].

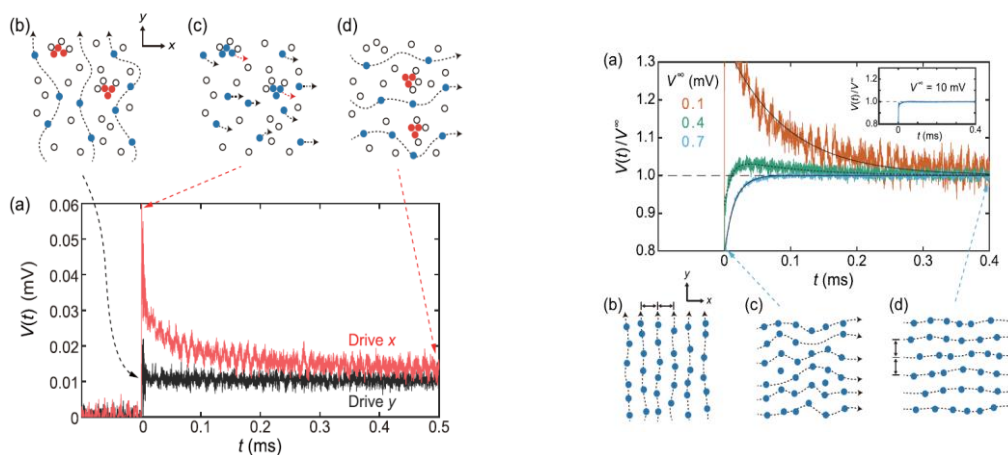


図 2 (a) 凍結させた渦糸配置に垂直駆動力を印加したときの過渡電圧応答 (赤). (b, c, d) 渦糸配置の模式図 [6].

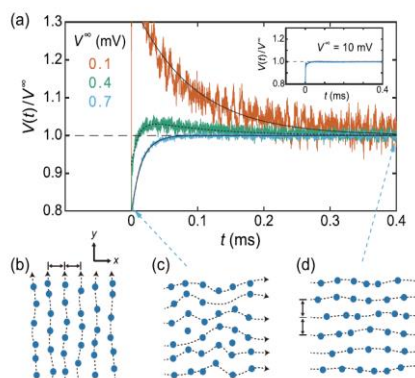


図 3 (a) 凍結させた渦糸配置に垂直駆動力を印加したときの過渡電圧応答: 赤は $I < I_1$, 青は $I > I_1$. 挿入図は $I > I_2$. (b, c, d) 渦糸配置の模式図 [6].

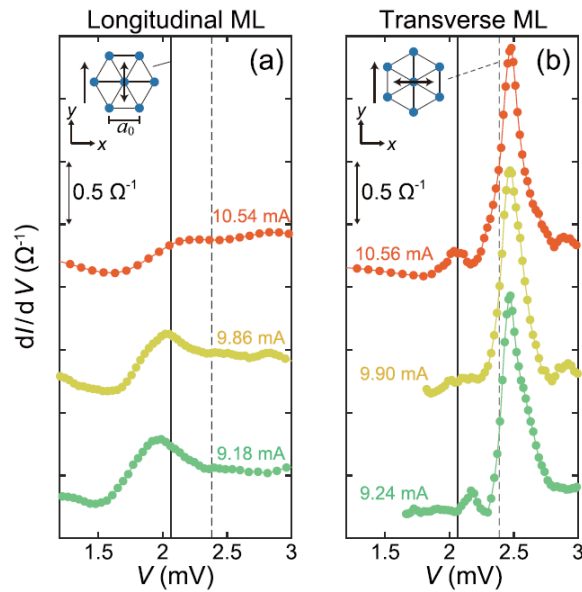


図 4 (a) 通常の縦モードロック共鳴信号. (b) 横モードロック共鳴信号. 挿入図は駆動された渦糸格子の模式図. 片矢印は印加した直流駆動力の向きを, 両矢印は交流(RF)駆動力の方向を表す[6].

なお, 前号で紹介したように, この測定とは独立に行われた, 一定の直流駆動力によるフロー状態において, 横方向の電流-電圧特性を調べる横ディピニング転移の実験でも, この動的相図の妥当性が証明されている。

一方, スメクチックフローの存在の強い証拠は, 直流に対して横方向の交流を重畳する横モードロック共鳴実験から明らかにした[6]。図 4 に示すように, 通常の縦モードロック共鳴 (図 4(a)) より, 横モードロック共鳴 (図 (b)) の方が大きな共鳴信号が発生している。これは系全体にわたって横方向の秩序ができ上がった smectic flow が存在する強い証拠である。挿入図は駆動された渦糸格子の模式図で, 片矢印と両矢印は, それぞれ印加した直流と交流(RF)信号の向きを表わす。

このように横モードロック共鳴測定から smectic flow の存在を初めて明確に観測すると共に, 直流駆動された多粒子系において, 異なるフロー状態間の変化が相転移であることを示した[6]。さらに, 2 次の平衡相転移である渦糸ガラス-液体転移の検証で用いられてきた電流-電圧測定の手法を, 駆動状態の渦糸系の横方向に適用することにより, plastic flow から smectic flow への状態変化が 2 次の非平衡相転移である強い証拠を得た[7]。

- [1] C. Reichardt and C. J. O. Reichardt, Rep. Prog. Phys. **80** 026501 (2017).
- [2] S. Okuma, Y. Tsugawa, and A. Motohashi, Phys. Rev. B **83**, 012503 (2011).
- [3] T. Kaji, S. Maegochi, K. Ienaga, S. Kaneko, and S. Okuma, Sci. Rep. **12**, 1542 (2022).
- [4] D. S. Fisher, Phys. Rep. **301**, 113 (1998).
- [5] L. Balents, M. C. Marchetti, and L. Radzihovsky, Phys. Rev. B **57**, 7705 (1998), P. Le Doussal and T. Giamarchi, Phys. Rev. B **57**, 11356 (1998).
- [6] S. Maegochi, K. Ienaga, and S. Okuma, Phys. Rev. Res. **4**, 033085 (2022).
- [7] S. Maegochi, K. Ienaga, and S. Okuma, under review.

2. 非平衡相転移における Kibble-Zurek 機構の実証 <https://www.titech.ac.jp/news/2022/065453>

前垣内 舜, 家永紘一郎, 大熊 哲

超伝導体や強磁性体における秩序には向きがあり, たとえば強磁性体を冷やしていくと, 秩序の向き (スピンの向き) が揃う領域が生まれることにより磁化が現れる。また, 異なる方向に秩序が揃った領域が複数生まれると, それらの領域が接する境界には, トポロジカル欠陥と呼ばれる秩序が不完全な状態が形成される。2 次転移を示す相転移の温度より低温での秩序の向きの揃い具合は冷却速度, すなわち相転移を横切る速度 (クエンチレート) に依存し, 急冷するほど場所ごとの秩序の向きがばらばらになり, トポロジカル欠陥の量も増加する。図 5 はそのイメージ図である。このような冷却速度と生成されるトポロジカル欠陥の密度の関係を説明する理論が, Kibble-Zurek 機構である [8-10]。

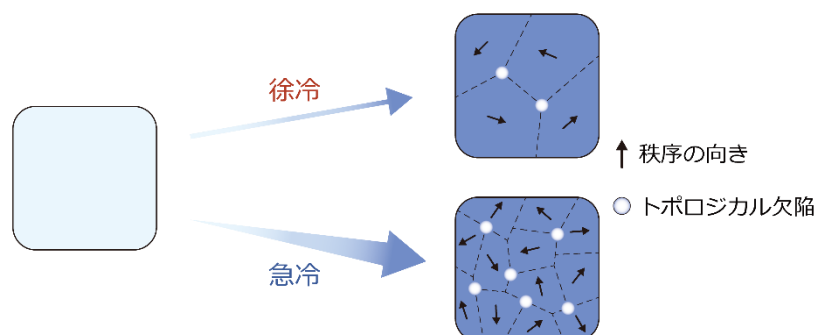


図 5 冷却速度を変えたとき, 生成される秩序領域と欠陥密度の違いを示したイメージ図. 超伝導体などでは冷却速度を上げると秩序の向きが揃う間もなく固まってしまいトポロジカル欠陥の量が増える。

具体的には, 冷却速度と欠陥密度にべき乗の関係があることが予想されている。この機構はコスモロジー (宇宙論) の分野で最初に提案された。たとえば初期宇宙の相転移で生成された後, 現在まで消えずに残っているトポロジカル欠陥の存在は, 宇宙初期の様子を探る手掛かりになると考えられている。これまでに, 温度低下によって起こる平衡相転移に関しては, 液体ヘリウムや冷却原子を用いて Kibble-Zurek 機構の実験検証が行われ, 実験室でコスモロジーが模擬できることが示されてきた [10]。一方, 近年盛んに研究されている非平衡相転移については, 相転移そのものに対する理解は進みつつあるが Kibble-Zurek 機構の実証には至っていなかった。

我々は前項「1」の研究で見出した駆動力 (電流) の増加によって渦糸の並びがきれいに格子的に揃っていく非平衡相転移に着目し, その過程で渦糸格子に含まれる格子欠陥の量を調べた [11]。

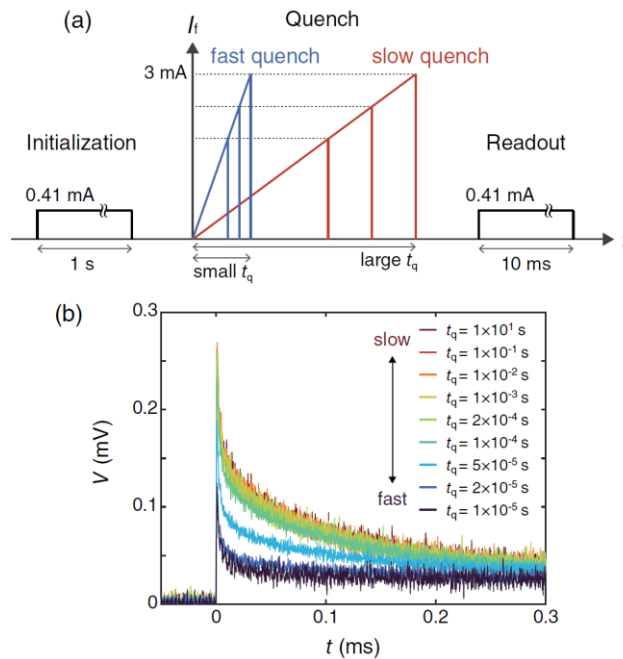


図 6 (a) 実験手法の模式図. 電流の増加速度（クエンチレート）を変えながら渦糸系を駆動させ、終電流 I_f に到達後に運動を凍結させる. その後、読み出し実験を行い、凍結した渦糸配置の秩序度を調べる. (b) 読み出し実験の電圧の過渡波形. 立ち上がりが高いほど渦糸配置が乱れていることを表わす. 電流の増加速度が速いほど、渦糸配置が乱れていることがわかる[11].

超伝導渦糸系を用いる利点としては、(1) 渦糸の運動の平均速度に比例して発生する電圧を精密に測定することで、渦糸の運動状態が高精度にわかること、(2) 駆動電流の増加速度（冷却速度に対応）を変えることによって、相転移点を横切る速度を数桁にもわたって変えられることなどがあげられる。また、(3) 渦糸格子の秩序度、あるいはトポロジカル欠陥の密度を見積もるための、入力と読み出しからなる 2 段階の輸送測定の手法が、我々の先行研究によってすでに示されている[12]。

本実験では図 6(a)に示すように、駆動電流の大きさと駆動電流を増やす速度（クエンチレート）を変えながら渦糸格子の秩序度を調べた。その結果、駆動電流を素早く増加させた方が格子は乱れており、多くの格子欠陥が生成されていることがわかった（図 6(b)と 7(左)）。十分大きな値まで電流を増やして秩序化させた終状態での格子欠陥密度は、Kibble-Zurek 機構で予想される“駆動電流を増加させる速度のべき乗”で表され、またそのべきから決まる相転移の臨界指数も Kibble-Zurek 機構の予想と近いことがわかった（図 7 右）。この結果、および、図 8 に示す臨界緩和を反映した実験結果は、格子欠陥が確かに Kibble-Zurek 機構に従って生成されたことを意味している。これらの事実により、非平衡相転移において Kibble-Zurek 機構が適用可能であることが初めて実験で証明された[11]。この結果は最近のシミュレーションの結果[13]とも一致している。

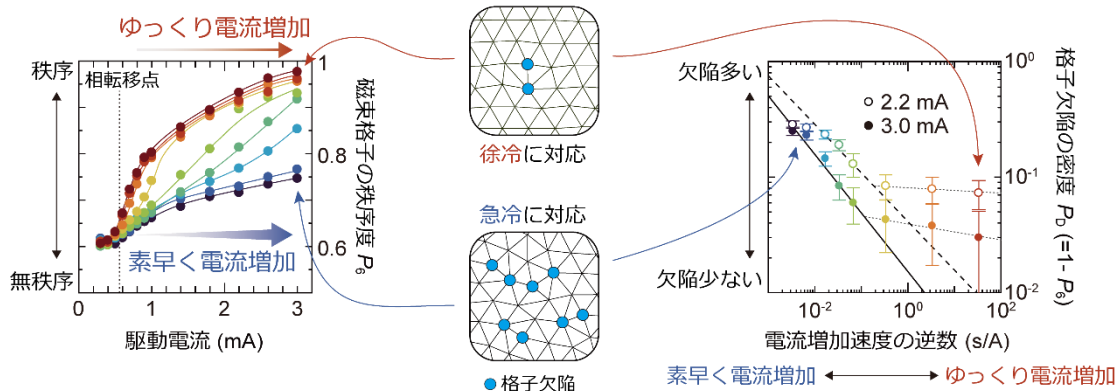


図 7 (左) 生成された渦糸格子の秩序度を駆動電流 I_f に対してプロット. 赤いシンボルは遅い電流増加を, 青いシンボルは速い電流増加を表わす. (右) 格子欠陥の密度と電流増加速度の逆数の関係を表わす両対数プロット. $I_f=2.2$ と 3.0 mA [11].

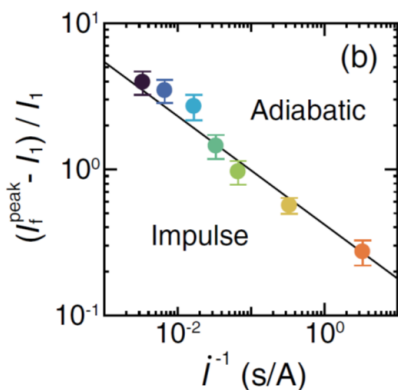


図 8 図 7 のデータから導いた 臨界緩和を示す実験結果. 臨界点近傍の impulse 領域では系のダイナミクスが遅くなり, 状態変化が駆動力の変化に追いついて行けない [11].

本研究により Kibble-Zurek 機構の適用範囲が平衡相転移から非平衡相転移に広がった。近年急速に発展している非平衡相転移の研究分野への新たな展開が期待される。

- [8] T.W. B. Kibble, J. Phys. A **9**, 1387 (1976).
- [9] W. H. Zurek, Nature (London) **317**, 505 (1985).
- [10] A. del Campo, T.W. B. Kibble, and W. H. Zurek, J. Phys. Condens. Matter **25**, 404210 (2013); V.M.H. Ruutu *et al.*, Nature **382**, 334 (1996); N. Navon *et al.*, Science **347**, 167 (2015).
- [11] S. Maegochi, K. Ienaga, and S. Okuma, Phys. Rev. Lett. **129**, 22701 (2022) **Editors' Suggestion**.
- [12] M. Dobroka, Y. Kawamura, K. Ienaga, S. Kaneko, and S. Okuma, New J. Phys. **19**, 053023 (2017).
- [13] C. J. O. Reichhardt, A. del Campo, and C. Reichhardt, Commun. Phys. **5**, 173 (2022).

謝辞

本研究は, 科学研究費助成事業・基盤研究 (B) (22H01165 : 研究代表者 大熊哲), 新学術領域研究 (20H05266 : 研究代表者 大熊哲), 挑戦的研究 (21K18598 : 研究代表者 大熊哲), 特別研究員奨励費 (20J21425 : 研究代表者 前垣内舜) の支援を受けて実施された。

6. 業績リスト

理学院物理学系 賀川研究室 2022 年度
論文リスト

- [1] K. Matsuura, Y. Nishizawa, Y. Kinoshita, T. Kurumaji, A. Miyake, H. Oike, M. Tokunaga, Y. Tokura, and F. Kagawa. "Low-temperature hysteresis broadening emerging from domain-wall creep dynamics in a two-phase competing system". *submitted*.
- [2] S. Furuta, S. H. Moody, K. Kado, W. Koshibae, and F. Kagawa. "Energetic perspective on emergent inductance exhibited by magnetic textures in the pinned regime". *submitted*.
- [3] D. Nakamura, K. Karube, K. Matsuura, F. Kagawa, X. Z. Yu, Y. Tokura, and Y. Taguchi. "Transport signatures of magnetic texture evolution in a microfabricated thin plate of antiskyrmion-hosting $(\text{Fe,Ni,Pd})_3\text{P}$ ". *submitted*.
- [4] K. Matsuura, Y. Nishizawa, M. Kriener, T. Kurumaji, H. Oike, Y. Tokura, and F. Kagawa. "Thermodynamic determination of the equilibrium first-order phase-transition line hidden by hysteresis in a phase diagram". *submitted*.
- [5] M. Wang, K. Tanaka, S. Sakai, Z. Wang, K. Deng, Y. Lyu, N. Ogawa, P. Yu, R. Arita, F. Kagawa. "Spontaneous anomalous Hall effect in a rutile antiferromagnetic metal with enhanced electron correlation". *submitted*.
- [6] H. Oike, T. Ebino, T. Koretsune, A. Kikkawa, M. Hirschberger, Y. Taguchi, Y. Tokura, and F. Kagawa. "Topological Nernst effect emerging from real-space gauge field and thermal fluctuations in a magnetic skyrmion lattice". *Phys. Rev. B* **106**, 214425 (2022).
- [7] T. Sato, W. Koshibae, A. Kikkawa, Y. Taguchi, N. Nagaosa, Y. Tokura, and F. Kagawa. "Nonthermal current-induced transition from skyrmion lattice to nontopological magnetic phase in spatially confined MnSi". *Phys. Rev. B* **106**, 144425 (2022). "Editors' Suggestion"に選出.
- [8] M. Wang, K. Matsuura, M. Nakamura, M. Sawada, M. Kawasaki, and F. Kagawa. "Magnetic-field control of insulator-metal crossover in cobaltite films via thermal-activated percolation". *Phys. Rev. B* **106**, 155135 (2022).
- [9] R. Yamada, J. Fujioka, M. Kawamura, S. Sakai, M. Hirayama, R. Arita, T. Okawa, D. Hashizume, T. Sato, F. Kagawa, R. Kurihara, Y. Tokunaga, and Y. Tokura. "Field-induced multiple metal-insulator crossovers of correlated Dirac electrons of perovskite CaIrO_3 ". *NPJ Quantum. Mat.* **7**, 13 (2022).
- [10] M. Onose, H. Takahashi, T. Saito, T. Kamiyama, R. Takahashi, H. Wadati, S. Kitao, M. Seto, H. Sagayama, Y. Yamasaki, T. Sato, F. Kagawa, and S. Ishiwata. "Spin-charge coupling and decoupling in perovskite-type iron oxides $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)_{2/3}\text{La}_{1/3}\text{FeO}_3$ ". *Phys. Rev. Mat.* **6**, 094401 (2022).
- [11] K. Karube, V. Ukleev, F. Kagawa, Y. Tokura, Y. Taguchi and J. S. White. "Unveiling the anisotropic fractal magnetic domain structure in bulk crystals of antiskyrmion host $(\text{Fe,Ni,Pd})_3\text{P}$ by small-angle neutron scattering". *J. Appl. Cryst.* **55**, 1392 (2022).

平原研究室

原著論文：

S. Ichinokura, A. Hemmi, H. Cun, K. Tanaka, R. Shimizu, T. Hitosugi, T. Greber, and T. Hirahara

"Efficiency of electron doping to monolayer hexagonal boron nitride by alkali metals"
Applied Physics Letters (2023), to be published.

K. Ide, T. Tanaka, A. Pedersen, S. Ichinokura, and T. Hirahara

"Temperature dependence of the superconducting gap of single-layer FeSe/SrTiO₃:
Direct comparison between transport and spectroscopic measurements"
[Physical Review Materials 6, 124801 \(2022\)](#).

K. Sumida, S. Kusaka, Y. Takeda, K. Kobayashi, and T. Hirahara

"Formation of monolayer V₅Se₈ from multilayer VSe₂ films via V- and Se-desorption"
[Physical Review B 106, 195421 \(2022\)](#).

J. Deng, K. Nishio, S. Ichinokura, Y. Watanabe, K. Edamura, R. Nakayama, R. Shimizu, T. Hirahara, and T. Hitosugi

"Modifying the Interface between the Solvated Ionic Liquid Electrolyte and Positive Electrode to Boost Lithium-Ion Battery Performance"
[ACS Appl. Energy Mater. 5, 10891 \(2022\)](#).

S. Ichinokura, M. Toyoda, M. Hashizume, K. Horii, S. Kusaka, S. Ideta, K. Tanaka, R. Shimizu, T. Hitosugi, S. Saito, and T. Hirahara

"Van Hove singularity and Lifshitz transition in thickness-controlled Li-intercalated graphene"
[Physical Review B 105, 235307 \(2022\)](#).

S. Kusaka, T. T. Sasaki, K. Sumida, S. Ichinokura, S. Ideta, K. Tanaka, K. Hono, and T. Hirahara

"Fabrication of (Bi₂)_m(Bi₂Te₃)_n superlattice films by Te desorption from a pristine Bi₂Te₃ film"
[Applied Physics Letters 120, 173102 \(2022\)](#).

D. Nabok, M. Tas, S. Kusaka, E. Durgun, C. Friedrich, G. Bihlmayer, S. Blügel, T. Hirahara,

and I. Aguilera

"Bulk and surface electronic structure of Bi_4Te_3 from GW calculations and photoemission experiments"

[Physical Review Materials 6, 034204 \(2022\).](#)

解説・総説：

一ノ倉 聖 , 豊田 雅之, 斎藤 晋, 平原 徹

"Li が侵入したグラフェンにおける層数依存 Lifshitz 転移"

[表面と真空 65, 502 \(2022\).](#)

高城 拓也, 秋山 了太, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, 中西 亮介, 佐藤 瞬亮, 深澤 拓朗, 佐々木 泰祐, 遠山 晴子, 樋渡 功太, A. V. Zotov, A. A. Saranin, 平原 徹, 長谷川 修司

"自己形成型強磁性原子層を持つトポロジカル絶縁体によるサンドイッチ構造での軟磁性的スキルミオンの電氣的観測"

[表面と真空 65, 409 \(2022\).](#)

招待講演：

平原 徹

"in situ ARPES による原子層単位で制御された極薄物質の新奇電子状態の解明"

ナノテラス ARPES シンポジウム

2023 年 2 月 22 日 (東北大片平キャンパス)

平原 徹

"新奇的な原子層物質の開拓とその表面界面ナノ量子物性"

第 7 回光機能研究会

2022 年 12/12 (東工大田町キャンパス)

平原 徹

"二次元磁性体のトポロジカル量子物性に関する分光学的研究"

[UVSOR シンポジウム](#)

2022 年 11/27 (分子科学研究所)

平原 徹

"二次元物質の量子物性：トポロジカル磁性と超伝導"

[第 17 回酸化グラフェン学会](#)

2022 年 6/17 (オンライン)

一般講演：

○国際会議

Si Wen, Tomoaki Tanaka, Satoru Ichinokura, Toru Hirahara

"Substrate-induced Broken C_4 Symmetry and Gap Variation in Superconducting Monolayer FeSe/SrTiO₃ - $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ "

[2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science \(TSQS2022\)](#)

2022 年 11 月(東大)

T. Takashiro, R. Akiyama, I. A. Kibirev, A. V. Matetskiy, R. Nakanishi, S. Sato, T. Fukasawa, T. Sasaki, H. Toyama, K. L. Hiwatari, A. V. Zotov, A. A. Saranin, T. Hirahara and S. Hasegawa

"Soft-magnetic skyrmions induced by surface-state coupling in a sandwich structure with an intrinsic ferromagnetic topological insulator"

[The 92th IUVSTA workshop and APSSS-4](#)

2022 年 9 月(Okinawa)

S. Ichinokura, M. Toyoda, M. Hashizume, K. Horii, S. Kusaka, S. Ideta, K. Tanaka, R. Shimizu, T. Hitosugi, S. Saito, T. Hirahara

"Van Hove Singularity in Thickness Controlled Li-Intercalated Graphene"

[The 22nd International Vacuum Congress \(IVC-22\)](#)

2022 年 9 月(Sapporo)

K. Kobayashi, K. Sumida, T. Hirahara

"Theoretical Calculation of Magnetic Structures of V₅Se₈ Thin Films"

[The 22nd International Vacuum Congress \(IVC-22\)](#)

2022 年 9 月(Sapporo)

○国内学会

一ノ倉聖、豊田雅之、徳田啓、田中清尚、斎藤晋、平原徹

“Ca がインターカレートした 2 層グラフェンにおける Ca-3d 軌道の価電子帯への寄与”

日本物理学会 2023 年春季大会

2023 年 3 月(オンライン)

石原和宜, 出高志朗, 一ノ倉聖, 田中清尚, 平原徹

“磁性トポロジカル絶縁体 MnBi₂Te₄ サンドイッチ構造の電子構造とその温度依存性”

日本物理学会 2023 年春季大会

2023年3月(オンライン)

徳田啓, 一ノ倉聖, 豊田雅之, 田中清尚, 斎藤晋, 平原徹

“超伝導体 C_6CaC_6 と SiC 基板の界面 Ca が誘起する金属的バンドと転移温度の上昇”

日本物理学会 2023 年春季大会

2023年3月(オンライン)

出高志朗, 田中友晃, 一ノ倉聖, 平原徹

"SrTiO₃ 基板上の単層 FeSe の電子輸送による超伝導転移と電子状態測定による超伝導ギャップ"の比較"

[表面・界面スペクトロスコープ2022](#)

2022年12/9(岡崎カンファレンスセンター)

一ノ倉聖, 豊田雅之, 徳田啓, 田中清尚, 斎藤晋, 平原徹

"カルシウム侵入 2 層グラフェンにおける p 軌道と d 軌道の混成"

[UVSOR シンポジウム](#)

2022年11/26(分子科学研究所、オンライン)

徳田啓, 一ノ倉聖, 豊田雅之, 田中清尚, 斎藤晋, 平原徹

"Ca インターカレート 2 層グラフェンに 過剰な Ca が誘起する自由電子バンド"

[UVSOR シンポジウム](#)

2022年11/26(分子科学研究所、オンライン)

石原和宜, 福嶋隆司朗, 一ノ倉聖, 田中清尚, 平原徹

"V を用いた Bi₂Se₃ の磁気拡張の試みと電子状態測定"

[第 5 回日本表面真空学会若手部会研究会](#)

2022年11月(オンライン)

石原和宜, 福嶋隆司朗, 一ノ倉聖, 田中清尚, 平原徹

"V を用いた Bi₂Se₃ の磁気拡張の試みと電子状態測定"

[2022 年日本物理学会秋季大会](#)

2022年9月(東工大)

徳田啓, 一ノ倉聖, 豊田雅之, 田中清尚, 斎藤晋, 平原徹

"Ca インターカレート 2 層グラフェンに過剰な Ca が誘起する自由電子バンド"

[2022 年日本物理学会秋季大会](#)

2022 年 9 月(東工大)

出高志朗, 田中友晃, 一ノ倉聖, 平原徹

"SrTiO₃ 基板上の単層 FeSe の臨界電流による超伝導ギャップの推定"

[2022 年日本物理学会秋季大会](#)

2022 年 9 月(東工大)

徳田啓, 一ノ倉聖, 田中清尚, 平原徹

"Ca インターカレート 2 層グラフェンに過剰な Ca が誘起する自由電子バンド"

[日本表面真空学会 2022 年関東支部講演会](#)

2022 年 4 月(オンライン)

石原和宜, 福嶋隆司朗, 田中清尚, 平原徹

"V を用いた Bi₂Se₃ の磁気拡張の試みと電子状態測定"

[日本表面真空学会 2022 年関東支部講演会](#)

2022 年 4 月(オンライン)

腰原・沖本研究室

<論文リスト>

1. “Nonlinear Optical Properties in an Epitaxial YbFe_2O_4 Film Probed by Second Harmonic and Terahertz Generation”, H. Yu, Y. Okimoto, A. Morita, S. Shuhei, K. Takubo, T. Ishikawa, S. Koshihara, R. Minakami, H. Itoh, S. Iwai, N. Ikeda, T. Sakagami, M. Nozaki, T. Fujii., *Materials*, **16**, 1989 (2023), DOI 10.3390/ma16051989.
2. “Orbital Degree of Freedom in Conducting Platinum–Dithiolene Complex Salts”, T. Yamamoto, D. Hiraga, I. Arashi, K. Takasugi, T. Naito, T. Ishikawa, Y. Okimoto, S.-Y. Koshihara, M. Nomura, and R. Kato, *J. Phys. Soc. Jpn.* **92**, 024701 (2023), DOI 10.7566/JPSJ.92.024701.
3. “Streaking of a Picosecond Electron Pulse with a Weak Terahertz Pulse”, Wataru Yajima, Yusuke Arashida, Ryota Nishimori, Yuga Emoto, Yuki Yamamoto, Kohei Kawasaki, Yuri Saida, Samuel Jeong, Keishi Akada, Kou Takubo, Hidemi Shigekawa, Jun-ichi Fujita, Shin-ya Koshihara, Shoji Yoshida, and Masaki Hada, *ACS Photonics*, **10**, 116–124 (2022), DOI 10.1021/acsp Photonics.2c01304.
4. “Generation of sub-100 fs electron pulses for time-resolved electron diffraction using a direct synchronization method”, Kou Takubo, Samiran Banu, Sichen Jin, Misaki Kaneko, Wataru Yajima, Makoto Kuwahara, Yasuhiko Hayashi, Tadahiko Ishikawa, Yoichi Okimoto, Masaki Hada, Shinya Koshihara, *Rev. of Sci. Inst.*, **93**, 053005 (2022), DOI 10.1063/5.0086008
5. “Ultrafast opto-protonics in a hydrogen-bonded π -molecular ferroelectric crystal”, Yoichi Okimoto, Peiyu Xia, Jiro Itatani, Haruka Matsushima, Tadahiko Ishikawa, Shin-ya Koshihara, Sachio Horiuchi, *APL materials*, **10**, 090702 (2022), DOI 10.1063/5.0097571
6. “ $\text{Bi}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}\text{FeO}_3$ with Unusual Pb Charge Disproportionation: Indication of a Systematic Charge Distribution Change in $\text{Bi}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}\text{MO}_3$ (M: 3d Transition Metal)”, S. Kihara, Y. Sakai, S. Wakazaki, T. Nishikubo, T. Koike, K. Mibu, H.W. Yu, Y. Okimoto, S. Koshihara, and M. Azuma, *Inorg. Chem.* **61**, 12822–12827 (2022), DOI 10.1021/acs.inorgchem.2c01911.

<国際会議 >

1. “Unexpected photoinduced dynamics in charge-transfer metal-organic frameworks, $(\text{NPr}_4)_2[\text{Fe}_2(\text{Cl}_2\text{An})_3]$ ”, T. Ishikawa, S. Banu, K. Takubo, Y. Okimoto, S. Koshihara, W. Kosaka, H. Miyasaka, T. Amano, Y. Kawakami, S. Iwai, K. Iwano, IRL DYNACOM "Dynamical Control of Materials", Kick-off meeting 10-11 February 2023 at the University of Tokyo, Oral.
2. “Electronic Ferroelectrics and Optical Nonlinear Properties”, Y. Okimoto, IRL DYNACOM "Dynamical Control of Materials", Kick-off meeting 10-11 February 2023 at the University of Tokyo, Oral.
3. “The unexpected photoinduced structural change dynamics in charge-transfer metal-organic frameworks, $(\text{NPr}_4)_2[\text{Fe}_2(\text{Cl}_2\text{An})_3]$ ”, Tadahiko Ishikawa, Samiran Banu, Kou Takubo, Yoichi Okimoto, Shinya Koshihara, Kaoru Iwano, Wataru Kosaka, and Hitoshi Miyasaka, The 73rd Yamada Conference & Institute for Materials Research International Symposium 2022, Sendai,

Japan, 8-11, October, 2022, Poster.

4. “Development of a terahertz pump and electron diffraction probe setup for the dynamics measurements of liquid crystals”, Wataru Yajima , Yusuke Arashida , Ryota Nishimori , Yuga Emoto , Yuki Yamamoto , Kohei Kawasaki , Yuri Saida , Samuel Jeong , Keishi Akada , Kou Takubo , Hidemi Shigekawa, Jun-ichi Fujita , Shin-ya Koshihara , Shoji Yoshida and Masaki Hada, OLC2021-SWS2022, 沖縄万国津梁館, 2022 Sept. 25-30, Oral.
5. “The photo-induced dynamics of $(\text{NPr}_4)_2[\text{Fe}_2(\text{Cl}_2\text{An})_3]$ suggest the appearance of a hidden state”, S. Banu, M. Kato, K. Takubo, T. Ishikawa, Y. Okimoto, S. Koshihara, N. Eguchi, W. Kosaka, H. Miyasaka, From optical to THz control of materials, Faraday Discussion, London, UK and Online, 23-25 May 2022, Poster.
6. “The structure of the photoinduced and X-ray induced state in spin-crossover hybrid system”, T. Ishikawa, S. Nakano, R. Takahashi, K. Takubo, Y. Okimoto, S. Koshihara, A. Miyawaki, K. Matsumoto, K. Takahashi, T. Yokoyama, K. Ichiyanagi, R. Fukaya, S. Nozawa, A. Sato-Tomita, From optical to THz control of materials, Faraday Discussion, London, UK and Online, 23-25 May 2022, Poster.
7. “Ultrafast time-resolved electron diffraction measurements for material science”, Masaki Hada, Kou Takubo, Yoichi Okimoto, Shin-ya Koshihara, LSC2022, Online, 2022 April 18-22, Invited.

<国内会議>

1. 「ペロブスカイト型コバルト酸化物の光励起状態」（招待講演）研究会「相関電子の軌道自由度から生まれる多様性と普遍性」、沖本洋一、2022年10月東北大学片平さくらホール、口頭
2. 「相関電子系の軌道と光が生み出す新秩序」、腰原伸也、（招待講演）研究会「相関電子の軌道自由度から生まれる多様性と普遍性」2022年10月東北大学片平さくらホール、口頭
3. 「電子強誘電体 LuFe_2O_4 結晶の時間分解 SHG 測定」、于洪武、石川忠彦、田久保耕、腰原伸也、深田幸正、井上直希、西田銀一、池田直、藤原孝将、沖本洋一、第33回光物性研究会、大阪大学豊中キャンパス、2022年12月9日-10日、ポスター
4. 「テラヘルツ波による極短パルス電子線のパルス幅計測」、矢嶋 渉, 嵐田 雄介, 西森 亮太, 江本 悠河, 山本 祐揮, 川崎 康平, 齋田 友梨, 鄭 サムエル, 赤田 圭史, 田久保 耕, 重川 秀実, 藤田 淳一, 腰原 伸也, 吉田 昭二, 羽田 真毅、2022 応用物理学会秋季学術講演会、東北大学川内北キャンパス、2022年9月20日-23日、口頭
5. 「スピנקロスオーバー錯体複合結晶における 超高速光誘起構造変化ダイナミクス」、高橋良弥, 中野真之介, Samiran Banu, 石川忠彦, 田久保耕, 沖本洋一, 腰原伸也, 宮脇敦大, 高橋一志, 羽田真毅, Yifeng Jiang, Stuart Hayes, Lai Chung Liu, R. J. Dwayne Miller、日本物理学会 2022年秋季大会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2022年9月13日、口頭
6. 「光誘起相転移の過去、現在そして未来 - 物質科学と量子ビーム科学の連携で挑戦する新物質相制御-」、腰原伸也、日本物理学会 2022年秋季大会、東京工業大学 大岡山キ

キャンパス、2022年9月12日、チュートリアル講演、口頭

7. 「電荷移動型金属有機構造体(NPr₄)₂[Fe₂(Cl₂An)₃]における特異な光誘起状態」、石川忠彦, Samiran Banu, 田久保耕, 沖本洋一, 腰原伸也, 岩野薫, 高坂亘, 宮坂等、日本物理学会 2022年秋季大会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2022年9月13日、口頭
8. 「第二次高調波から見た YbFe₂O₄ 薄膜の電子強誘電性」、于洪武, 田久保耕, 石川忠彦, 腰原伸也, 阪上拓巳, 大田怜佳, 藤井達生, 池田直, 沖本洋一、日本物理学会 2022年秋季大会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2022年9月12日、口頭
9. 「BiFeO₃/SrTiO₃(111) 薄膜のポンププローブ電子線回折測定」、田久保耕, 金子水咲, 于洪武, 石川忠彦, 沖本洋一, 腰原伸也, 矢嶋渉, 羽田真毅, 桑原真人, 小澤慶太, 伊藤拓真, 重松圭, 東正樹、日本物理学会 2022年秋季大会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2022年9月12日、口頭
10. 「スピン偏極したフェムト秒パルス電子線回折装置の開発」、金子水咲, Samiran Banu, 田久保耕, 矢嶋渉, 羽田真毅, 林靖彦, 桑原真人, 石川忠彦, 沖本洋一, 腰原伸也、日本物理学会 2022年秋季大会、東京工業大学 大岡山キャンパス、2022年9月12日、口頭

森研究室

List of Publications

1. “Organic-inorganic hybrid metallic conductors based on bis(ethylenedithio)tetrathiafulvalene cations and antiferromagnetic oxalate-bridged copper(II) dinuclear anions” B. Zhang, Y. Zhang, Z. Wang, D. Wang, D. Yang, Z. Gao, G. Chang, Y. Guo, T. Mori, Z. Zhao, F. Liu, Q. Lie, and D. Zhu, *J. Mater. Chem. C*, **10**, 2845 – 2852 (2022).
2. “Small-molecule ambipolar transistors” T. Higashino and T. Mori, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **24**, 9770 – 9806 (2022).
3. “Organic molecular conductors based on tetramethyl-TTP: structural and electrical properties modulated by the anion size and shape” T. Shirahata, S. Kohno, K. Furuta, S. Katayama, K. Suzuki, T. Kawamoto, T. Mori, and Y. Misaki, *Inorg. Chem.* **61**, 7754 – 7764 (2022).
4. “Output and negative-region characteristics in organic anti-ambipolar transistors” J. Zhu and T. Mori, *Adv. Electron. Mater.* **9**, 2200783 (2022).
5. “Supramolecular recognition within a nanosized “Buckytrap” that exhibits substantial photoconductivity” S. Sen, F. Ishiwari, R. Kaur, M. Ishida, D. Ray, K. Kikuchi, T. Mori, S. Bähring, V. M. Lynch, A. Saeki, D. M. Guldi, J. L. Sessler, and Atanu Jana, *J. Am. Chem. Soc.* **145**, 1031 – 1039 (2023).
6. “Transistor properties of charge-transfer complexes — combined requirements from energy levels and orbital symmetry” B. Liu, S. Fan, R. Huang, T. Kawamoto, and T. Mori, *J. Phys. Chem. C*, **127**, (2023). in press.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c08317>

大友研究室

[2022 年度対外研究報告]

● 論文

1. Akira Ohtomo, Takuto Soma, and Kohei Yoshimatsu, Electrochemical modulation of electronic states in strongly correlated transition-metal oxides. *JSAP Review* **2022**, 220202 (2022).
2. Zhang Shuxin, Tatsuya Yajima, Takuto Soma, and Akira Ohtomo, Epitaxial growth of MoO₃ polymorphs and impacts of Li-ion electrochemical reactions on their structural and electronic properties. *Appl. Phys. Express.* **15**, 055505 (2022).
3. Suguri Uchida, Takuto Soma, Miho Kitamura, Hiroshi Kumigashira, and Akira Ohtomo, Enhancement of transparency in epitaxially-grown *p*-type SnO films by surface-passivation treatment in a Na₂S aqueous solution. *Jpn. J. Appl. Phys.* **61**, 050903 (2022).

● 国際会議

1. Kazuki Koreishi, Takuto Soma, Motohisa Kado, and Akira Ohtomo, Strain engineering of β -Ga₂O₃: Pulsed-laser deposition on (100) θ -Al₂O₃ templates and impacts of compressive strain on physical properties (Poster). *The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-4)*, Nagano, Japan, 2022.10.23–10.27.
2. Akira Ohtomo, Tatsuya Yajima, Zhang Shuxin, and Takuto Soma, *Electrochemical modulation of electronic states in strongly correlated transition-metal oxides (invited)*. *28th International Workshop on Oxide Electronics (iWOE28)*, Portland, USA, 2022.10.2–10.5.
3. Zhang Shuxin, Takuto Soma, and Akira Ohtomo, Heteroepitaxial growth of molybdenum bronzes for exploring dimensionality- and composition-controlled electronic properties. *The 5th International Union of Materials Research Societies International Conference of Young Researchers on Advanced Materials (IUMRS-ICYRAM2022)*, Fukuoka, Japan, 2022.8.3–8.6.

● 国内会議

1. 大友 明, 遷移金属水素化物の薄膜成長と電子機能開発 (招待). 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 2023.3.15–3.18.
2. 南野 龍樹, 相馬 拓人, 大友 明, ミスカット基板上に作製したダブルペロブスカイト型酸化物薄膜の物性. 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 2023.3.15–3.18.
3. 相馬 拓人, 吉松 公平, 堀場 弘司, 組頭 広志, 大友 明, β -パイロクロア型酸化物における金属-絶縁体転移とラットリング運動. 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 東京, 2023.3.15–3.18.
4. 大友 明, 強相関遷移金属酸化物の電気化学的な電子状態の変調～Go Green な酸化還元反応場を設計し強相関電子のふるまいを探る～ (招待). 応用物理学会 JSAP Review 創刊記念 VR シンポジウム「グリーントランスフォーメーションを加速する JSAP Review」, オンライン, 2022.11.11.
5. 佐藤 礼, 相馬 拓人, 大友 明, 層状 Li_{1-x}NbO₂ 薄膜のトポケミカル反応と深さ方向 Li 組成分析 (ポスター). 第 12 回 CSJ 化学フェスタ 2022, 東京, 2022.10.18–10.20.

6. 小川 菜白, 相馬 拓人, 大友 明, 格子歪み印加による SrVO_3 の電気伝導性の変調 (ポスター). 第 12 回 CSJ 化学フェスタ 2022, 東京, 2022.10.18–10.20.
7. 是石 和樹, 相馬 拓人, 加渡 幹尚, 大友 明, 面内圧縮歪みを有する $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜のエピタキシャル成長. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
8. 曹 子陽, 相馬 拓人, 大友 明, パルスレーザー堆積法による(111)配向 LaH_x 薄膜の作製と水素量制御. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
9. 佐藤 礼, 相馬 拓人, 組頭 広志, 大友 明, 溶液処理による超伝導 $\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_2$ 薄膜の Li 組成制御. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
10. 相馬 拓人, 吉松 公平, 大友 明, 二次元 NbO_2 層における超伝導ドームと磁気量子臨界挙動. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
11. 吉田 悠真, 相馬 拓人, 大友 明, 強磁性 Fe_4N /超伝導 NbN 接合のエピタキシーと伝導特性. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
12. Zhang Shuxin, Takuto Soma, Akira Ohtomo, $A\text{MoO}_2$ ($A = \text{Li}, \text{Na}, \text{K}$): Two-dimensional Mott insulators with tunable MoO_2 interlayer distance. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
13. Zhou Weiqi, Takuto Soma, Akira Ohtomo, Impact of Au surfactant on composition and optical properties of gallium oxysulfide films. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
14. 山岸 祐太, サフー ラムチャンドラ, 相馬 拓人, 大友 明, パルスレーザー体積法による $\text{GdMnO}_3/\text{LaNiO}_3$ 超格子構造の作製. 第 83 回応用物理学会秋春季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
15. 本田 裕貴, 相馬 拓人, 大友 明, 分極界面を有する $\text{SrFeO}_3/\text{LaNiO}_3$ ヘテロ構造の作製と伝導特性. 第 83 回応用物理学会秋春季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
16. Ramchandra Sahoo, Ryuki Nanno, Yuta Yamagishi, Takuto Soma, Akira Ohtomo, Tunable exchange bias effect in manganese- and nickel-based artificial perovskite superlattice structures. 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 仙台, 2022.9.20–9.23.
17. 相馬 拓人, 吉松 公平, 堀場 弘司, 組頭 広志, 大友 明, 二次元三角格子 2H-NbO_2 層における強相関電子と超伝導. 日本物理学会 2022 年秋季大会, 東京, 2022.9.12–9.15.

2022 年度鈴木研究室

査読付き論文

1. 鈴木左文, "共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器とその無線通信応用" 表面と真空, vol. 65, no. 6, pp. 270-275, Jun. 2022.
2. Adrian Dobroiu, Kotaro Asama, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, Hiroshi Ito, "Terahertz-wave three-dimensional imaging using a resonant-tunneling-diode oscillator" J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, vol. 43, pp. 464-478, Jun. 2022.
3. Yusei Suzuki, Ta Van Mai, Xiongbin Yu, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, "Phase Control of Terahertz Waves Using Injection-Locked Resonant Tunneling Diode Oscillator" IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 12, no. 5, pp. 481-488, Apr. 2022.
4. 鈴木左文, "共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器の新世代技術" 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J106-C, no. 3, pp. 105-111, Nov. 2022.
5. Fanqi Meng, Feifan Han, Ulrich Kentsch, Alexej Pashkin, Ciaran Fowley, Lars Rebohle, Mark D Thomson, Safumi Suzuki, Masahiro Asada, Hartmut G Roskos, "Coherent coupling of metamaterial resonators with dipole transitions of boron acceptors in Si" Optics Letters, vol. 47, no. 19, pp. 4969-4972, Oct. 2022.
6. Mingxiang Stephen Li, Ta Van Mai, Christophe Fumeaux, Safumi Suzuki, Withawat Withayachumnankul, "Terahertz Resonant-Tunneling Diode With Series-Fed Patch Array Antenna" IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., vol. 13, no. 2, pp. 178-187, Mar. 2023.

令和4年度 藤澤研究室 研究成果リスト

理学院物理学系, 極低温研究支援センター 藤澤 利正

<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/>

【論文】

[1] Ryota Konuma, Chaojing Lin, Tokuro Hata, Taichi Hirasawa, Takafumi Akiho, Koji Muraki, and Toshimasa Fujisawa, "Nonuniform heat redistribution among multiple channels in the integer quantum Hall regime", Phys. Rev. B 105, 235302 (2022).

【解説記事】

[1] 藤澤利正, Chaojing Lin, 「整数・分数量子ホール Y 接合における電荷波束の分数化」, 日本物理学会誌 Vol.76, 773 (2021).

【国際会議発表】

[1] Tokuro Hata, Kazuhiro Sada, Tomoki Uchino, Takafumi Akiho, Koji Muraki, Toshimasa Fujisawa, "Tunable tunnel-coupling in a double quantum antidot with cotunneling via a localized state", Digital Poster, International Conference on the Physics of Semiconductors 2022 (ICPS2022), Sydney, Australia (June.27-June.30, 2022).

【国内学会】

[1] 秦徳郎, 佐田和陽, 内野智貴, 秋保貴史, 村木康二, 藤澤利正, 「局在準位を介したコトンネルによる二重量子アンチドットのトンネル結合制御」, 15aT11-1, 日本物理学会 第77回年次大会(2022年) online (2022/3/15-19)

大熊研究室

論文

1. S. Maegochi, K. Ienaga, and S. Okuma
Kibble-Zurek Mechanism for Dynamical Ordering in a Driven Vortex System
Phys. Rev. Lett. **129** (2022) 227001(1-6) (**Editors' Suggestion**).
2. S. Maegochi, K. Ienaga, and S. Okuma
Moving smectic phase and transverse mode locking in driven vortex matter
Phys. Rev. Research **4** (2022) 033085(1-7).
3. R Ueno, K Ienaga, S Maegochi, H Shishido, and S. Okuma
Dc vortex-flow resistivity in an epitaxially grown MgB₂ film probed by pulsed current measurements
J. Phys.: Conf. Ser. **2323** (2022) 012013(1-6).
4. T. Kaji, S. Maegochi, K. Ienaga, S. Kaneko, and S. Okuma
Critical behavior of nonequilibrium depinning transitions for vortices driven by current and vortex density
Sci. Rep. **12** (2022) 1542(1-11).
5. C. Reichhardt, Ido Regev, K. Dahmen, S. Okuma, and C. J. O. Reichhardt
Perspective on Reversible to Irreversible Transitions in Periodic Driven Many Body Systems and Future Directions For Classical and Quantum Systems
Phys. Rev. Research, to be published.

口頭発表

1. 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲:
超伝導渦の動的秩序化における Kibble-Zurek 機構:
日本物理学会 2023 年春季大会 2023 年 3 月 22 日-25 日, オンライン
2. 吉村優輝, 石上貴大, 家永紘一郎, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲:
アモルファス超伝導薄膜の異常金属状態が示すエントロピー異常:
日本物理学会 2023 年春季大会 2023 年 3 月 22 日-25 日, オンライン
3. 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲:
横ディピニング転移に対するスケーリング解析:
日本物理学会 2022 年秋季大会 2022 年 9 月 12 日-15 日, 東京工業大学 (物理学会
学生優秀発表賞)
4. 前垣内舜, 中井康太, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲:
交流重畳による渦糸系の流動化制御:
日本物理学会 2022 年秋季大会 2022 年 9 月 12 日-15 日, 東京工業大学
5. 吉村優輝, 石上貴大, 家永紘一郎, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲:
乱れの強いアモルファス超伝導薄膜におけるゴースト温度線:
日本物理学会 2022 年秋季大会 2022 年 9 月 12 日-15 日, 東京工業大学
6. 石上貴大, 吉村優輝, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲:
電流駆動された渦糸の輸送エントロピーの計測:
日本物理学会 2022 年秋季大会 2022 年 9 月 12 日-15 日, 東京工業大学

7. 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲:
超伝導渦糸系における横ディピニング転移:
日本物理学会 2022 年年次大会 2022 年 3 月 15 日-19 日, 岡山大学 オンライン開催
(物理学会学生優秀発表賞)
8. 家永紘一郎, 田本豊嘉, 依田正弘, 吉村優輝, 金子真一, 大熊哲:
磁場により破壊された 2 次元超伝導が示す量子ゆらぎの臨界性:
日本物理学会 2022 年年次大会 2022 年 3 月 15 日-19 日, 岡山大学 オンライン開催
9. 大熊哲:
非平衡相転移における Kibble-Zurek 機構の検証:
極低温研究支援センター研究発表会 2023 年 2 月 2 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (Zoom)
10. 大熊哲, 家永紘一郎, 前垣内舜:
渦糸ダイナミクスで拓く非平衡物理学: レオロジーから非平衡 KZ 機構まで:
第 28 回渦糸物理ワークショップ 2022 年 12 月 15-17 日, 青山学院大学 (招待講演)
11. 家永紘一郎, 吉村優輝, 田本豊嘉, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲:
熱電効果を用いた異常金属状態の量子臨界点の検出:
第 28 回渦糸物理ワークショップ 2022 年 12 月 15-17 日, 青山学院大学
12. 吉村優輝, 石上貴大, 家永紘一郎, 依田正弘, 金子真一, 大熊哲:
乱れの強いアモルファス超伝導薄膜における熱ゆらぎ-量子ゆらぎ境界, poster:
第 28 回渦糸物理ワークショップ 2022 年 12 月 15-17 日, 青山学院大学
13. 名取透吾, 前垣内舜, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲:
交差駆動渦糸系を用いた直流フローの動的相図, poster:
第 28 回渦糸物理ワークショップ 2022 年 12 月 15-17 日, 青山学院大学
14. 竹腰直樹, 前垣内舜, 三宅健太郎, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲:
可逆不可逆転移と渦糸配置
第 28 回渦糸物理ワークショップ 2022 年 12 月 15-17 日, 青山学院大学
15. 石上貴大, 吉村優輝, 家永紘一郎, 金子真一, 大熊哲:
熱電効果を用いた電流駆動下の渦糸フロー状態の検出
第 28 回渦糸物理ワークショップ 2022 年 12 月 15-17 日, 青山学院大学
16. 海老原鯛壺, 前垣内舜, 家永紘一郎, 大熊哲:
渦糸の動的秩序化における Kibble-Zurek 機構: 普遍性の検証
第 28 回渦糸物理ワークショップ 2022 年 12 月 15-17 日, 青山学院大学
17. 大熊哲:
動的過程による 2 次元秩序の創成 -超伝導渦糸系が拓く非平衡物理学とレオロジー-
科研費新学術領域研究 ハイパーマテリアル Web 領域会議 2022 年 3 月 8 日 (Zoom)

国際会議

1. K. Ienaga, T. Hayashi, Y. Tamoto, S. Okuma
Quantum Fluctuations and Criticality in the Field-Induced Metallic State of a Two-Dimensional Superconductor
29th Int. Conf. on Low Temperature Physics (LT-29), 23 Aug. 2022.
2. S. Maegochi, K. Ienaga, S. Okuma
Moving smectic phase detected by transverse mode locking in driven vortices
29th Int. Conf. on Low Temperature Physics (LT-29), 23 Aug. 2022.

7. 極低温研究支援センター・大岡山 利用研究室一覧 (2022年度)

所属	研究室	利用項目
物理学	賀川研	He, N
物理学	佐藤研	N
物理学	平原研	He, N
物理学	松下研	He, N
物理学	中村研	N
物理学	打田研	He, N
物理学	学生実験	He, N
化学	西野研	He, N, 実
化学	腰原研	He, N
化学	沖本研	He, N
化学	石谷・前田研	He
化学	江口研	He, N
化学	工藤研	He, N
化学	大森研	He, N
化学	鷹谷研	He
化学	福原研	N
化学	川口研	N
化学	豊田研	N
化学	河野研	N
地球惑星	上野研	N
材料	早川研	He, N
材料	森研	He, N, 実
材料	早水研	N
材料	鶴見・保科研	He, N
材料	難波江研	N
応用化学	古屋(秀)研	N
応用化学	伊原研	N
応用化学	安藤(慎)	N
応用化学	高分子-(旧本館)400	He
応用化学	高分子-(旧東2)500	He

所属	研究室	利用項目
応用化学	田中(健)研	He, N
応用化学	田中(浩)研	He, N
応用化学	田中(克)研	He, N
応用化学	高尾研	He, N
応用化学	旧桑田(榎木)研	He, N
応用化学	山中研	N
応用化学	伊藤研	N
応用化学	大友研	He, N
応用化学	村橋研	He, N
応用化学	一杉研	N
応用化学	中嶋研	N
応用化学	芹澤研	N
応用化学	石曾根研	N
応用化学	佐藤研	He
機械	八木研	N
機械	平田研	N
機械	井上研	N
機械	店橋研	N
機械	伏信研	N
機械	野崎研	N
電気電子	宮本研	N
電気電子	山田研	N
電気電子	間中研	N
電気電子	Pham Nam Hai 研	He, N
電気電子	中川研	He, N
電気電子	小寺研	He, N, 実
電気電子	波多野・岩崎研	N
電気電子	鈴木研	He
環境・社会	佐々木栄一研	N
生命理工	二階堂研	N

所属	研究室	利用項目
生命理工	蒲池研	He
生命理工	本郷研	N
化学生命科学研	藤井研	N
地球生命研	地球生命研共通	He
ゼロカーボンエネ研	松本研	N
ゼロカーボンエネ研	鷹尾研	He
総合安全管理セ	施設安全企画課	N
物理・極低セ	藤澤研	He, N
物理・極低セ	大熊研	He, N, 実

He : 液体ヘリウム, N : 液体窒素, 実 : 共通実験室

8. 2022年度 運営委員・専門委員・職員名簿

運営委員会委員			専門委員会委員			大岡山		
所 属	職名	氏 名	所 属	職名	氏 名	所 属	職名	氏 名
極低温センター長 物理学系	教 授	大熊 哲	理学院 物理学系	教 授	平原 徹			
物理学系 極低温センター(兼)	教 授	藤澤利正	理学院 化学系	教 授	腰原伸也			
科学技術創成研究院 極低温センター(兼)	教 授	川路 均	物質理工学院 材料系	教 授	森 健彦			
理学院長	教 授	久世正弘	物質理工学院 応用化学系	教 授	大友 明			
理学院 物理学系	准教授	打田正輝	工学院 電気電子系	准教授	小寺哲夫			
理学院 化学系	准教授	沖本洋一	理学院物理学系 極低温センター(兼)	教 授	藤澤利正			
工学院 電気電子系	准教授	小寺哲夫	理学院物理学系 極低温センター(兼)	教 授	大熊 哲			
物質理工学院 応用化学系	准教授	伊藤繁和	極低温センター (OFC)	技 術 専門員	藤澤真士			
物質理工学院 材料系	准教授	寺田芳弘						
生命理工学院 生命理工学系	教 授	占部弘和						
			専門委員会委員			すずかけ台		
			科学技術創成研究院 極低温センター(兼)	教 授	川路 均			
			物質理工学院 応用化学系	教 授	富田育義			
			生命理工学院 生命理工学系	教 授	占部弘和			
			生命理工学院 生命理工学系	助 教	池田 博			
			物質理工学院 材料系	准教授	谷山智康			
			化学生命科学研究所	教 授	穂田宗隆			
			理学院物理学系 極低温センター(兼)	教 授	大熊 哲			
			すずかけ台分析 支援センター	主任技術 専門員	清 悦久			

センター長・教授(兼) 大熊 哲
 大岡山地区部門長・教授(兼) 大熊 哲
 教授(兼) 藤澤 利正
 技術専門員 藤澤 真士
 技術限定職員 金本 真知
 すずかけ台地区部門長・教授(兼) 川路 均
 技術職員 出川 悦啓

(大岡山 極低温センター2F 内線 3252)
 (大岡山 極低温センター2F 内線 3252)
 (大岡山 本館 2F 240 内線 2750)
 (大岡山 極低温センター1F 内線 3253)
 (大岡山 極低温センター1F 内線 3253)
 (すずかけ台 J1 棟 701 内線 5313)
 (すずかけ台 S7 棟液化室 内線 5908)

