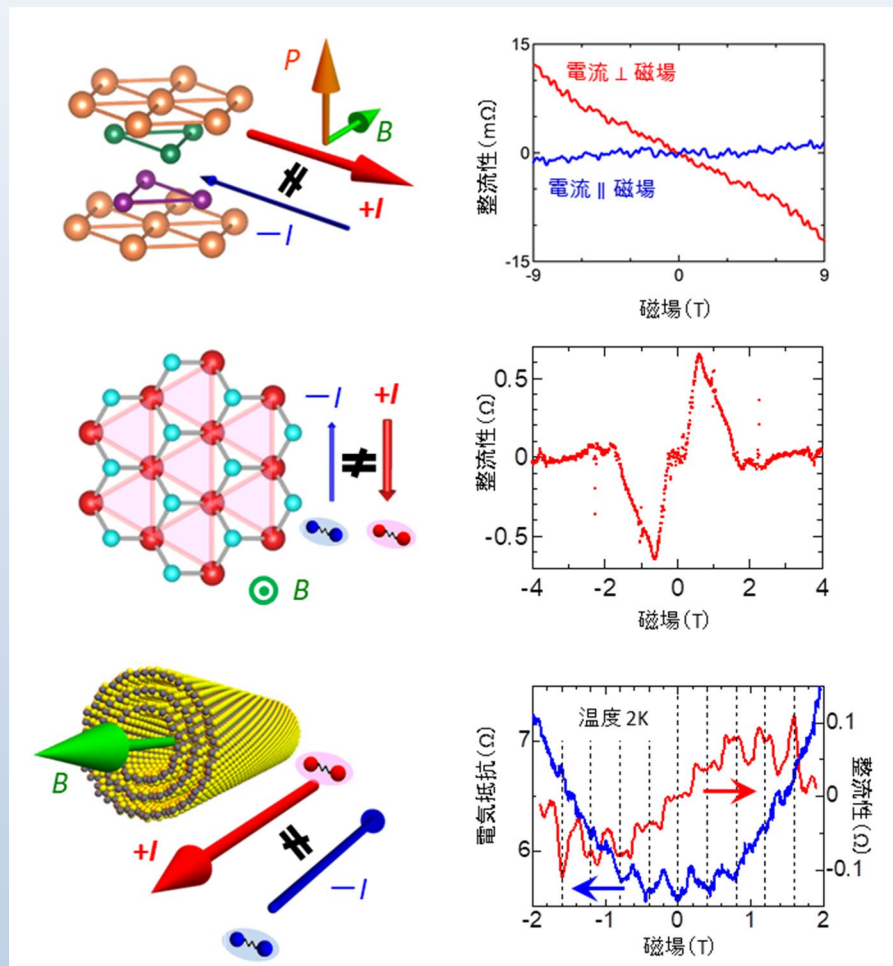


Annual Report 2018

*Cryogenic Research Center
University of Tokyo*



平成30年度 低温センター一年報

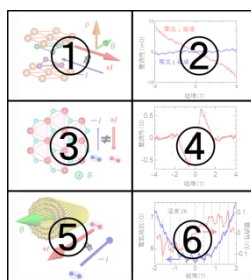
東京大学低温センター



表紙

「空間反転対称性の破れた結晶における整流効果」

様々な空間反転対称性の破れたファンデルワールス結晶において実現する物質固有の特徴的整流特性を紹介する。



- ① 極性結晶における磁場下整流性の模式図
- ② 極性結晶における整流性の磁場依存性
- ③ 3回対称超伝導結晶における磁場下整流性の模式図
- ④ 3回対称超伝導結晶における整流性の磁場依存性
- ⑤ カイラル超伝導ナノチューブにおける磁場下整流性の模式図
- ⑥ カイラル超伝導ナノチューブにおける整流性の磁場依存性

(工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室より提供。詳細は研究ノート P6「空間反転対称性の破れたファンデルワールス結晶における整流効果」に掲載。)

巻頭言

低温センター長 大越 慎一

平成30年度の東京大学低温センター年報をお送り申し上げます。

昭和42年に低温センターが設置され、半世紀もの長きにわたり低温センターが運営されてきましたのも学内ユーザーの皆様のご協力と、当センターの歴代のセンター長、教員、技術職員、事務職員の努力の賜物であると心より感謝しております。現在、低温センターは、液化供給部門、共同利用部門、研究開発部門の三つの部門で構成されており、本郷キャンパスの約400研究室に寒剤を供給しております。低温センターでは、寒剤を利用するユーザー向けに安全講習会ならびに低温技術に関する講演会を実施しており、毎年500名以上の学生および教員が受講しております。また、国内最大規模の寒剤供給施設を学びの場として、サマースクール等を通じた高校生への見学会や、欧州をはじめとする海外研究者の招聘ならびにサイトビジット等を実施いたしました。共同利用部門では、磁化率測定装置などの装置について、学内共同利用を進めてきましたが、平成29年度からは、産学連携の取り組みの一つとして、民間企業の方々にもご利用頂けるよう体制を整え、多数の利用をしていただいております。基礎物理研究者を中心とする研究開発部門では、低温科学および低温技術の先端研究を進めており、センターの礎となっております。



7月には、国際シンポジウム(QFS2018)が、低温センター協賛の下に開催され、当センター福山兼任教授が組織委員長を務め、島野教授が招待講演を行いました。国内外の低温物理分野における研究者による研究成果が数多く発表されました。

国際化および産学連携といった取り組みも積極的に推進し、将来にわたり、ユーザーの皆様に寒剤を安定供給していくことで、東京大学の学術基盤を支えていきたいと思っております。

平成29年度より3年をかけて、ヘリウム液化回収システムの増強工事を進めております。本増強工事により、液体ヘリウムをユーザーの皆様には持続的かつ安定的に供給できるようになります。工事期間中、ユーザーの皆様にはご不便をおかけすることもあるかと存じますが、センター教職員一丸となり、ご研究の妨げにならないよう努力する所存です。ご理解の程、何卒宜しく願い申し上げます。

また、東京大学における全学センターの改組に伴い、令和元年より新しいセンターへと改組を行います。これまでの液化供給部門および共同利用部門の拡充のみならず、未来の基盤研究を見据えた研究開発部門の更なる発展について現在検討を進めているところです。ユーザーの皆様にご賛同いただいた低温科学研究コンソーシアムと連携し、新しい低温科学研究の拠点として強固な組織へと発展させていきたいと思っております。何卒ご協力の程、宜しく願い申し上げます。

目次

巻頭言	1
大越 慎一 (低温センター長)	
研究ノート	
○ 空間反転対称性の破れたファンデルワールス結晶における整流効果	6
井手上敏也、岩佐義宏 (工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室)	
○ 室温強磁性トポロジカル磁性絶縁体 $\text{MnTe}/(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ における 量子異常ホール効果観測にむけて	11
秋山了太、高城拓也、樋渡功太、長谷川修司 (理学系研究科 物理学専攻 長谷川修司研究室)	
○ NMR 法により解明した、 マルチドメイン蛋白質複合体 CheA-CheY の動的ドメイン間相互作用による走温性制御機構...	16
上田卓見、嶋田一夫 (薬学系研究科 薬科学専攻 生命物理化学教室)	
○ 拡散 MRI による脳組織微細構造イメージングとトラクトグラフィ	21
神谷昂平 (医学系研究科 生体物理医学専攻 放射線医学講座)	
○ 植物の栄養状態と葉のかたち	25
反田直之 (農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 植物栄養・肥料学研究室)	
共同利用研究室 研究実績報告	
○ マンガン三核錯体ユニットを含む強磁性シアノ架橋型金属集積体 および発光温度計として機能する希土類金属錯体の構築	30
大越研究室 (理学系研究科 化学専攻)	
○ スピントロニクス材料とデバイスの研究	35
田中研究室 (工学系研究科 電気系工学専攻・スピントロニクス学術連携研究教育センター)	
○ 電子スピン自由度を活かした機能性素子の開拓	40
田中・田畑・高木・竹中・大矢研究室 (工学系研究科 電気系工学専攻)	
○ 高エネルギー分解能超伝導転移端センサの開発と X線 γ 線高効率スペクトロスコープへの取り組み	46
高橋研究室 (工学系研究科 原子力国際専攻)	
低温センター 各部門報告	
研究開発部門 研究実績報告	52
島野 亮、村川 智、福山 寛、藤井 武則 (低温センター 研究開発部門)	
共同利用部門 業務報告	72
戸田 亮 (低温センター 共同利用部門)	
液化供給部門 業務報告	74
阿部 美玲 (低温センター 液化供給部門)	

全般的な活動報告

第 10 回低温センター研究交流会.....	80
安全講習会.....	86
量子液体・固体に関する国際シンポジウム 2018 (QFS2018)	88
2018 年度 低温センター技術研修	89
配管施工セーフティーセミナー.....	90
低温センター見学.....	91
その他	

職員研修	93
------------	----

1. 2018 年度第 1 回冷凍部会(公開)例会 低温工学基礎講座 「小型冷凍機の設計と冷却」
参加報告
2. 第 96 回 2018 年度春季低温工学・超電導学会 参加報告
3. 平成 30 年度 高圧ガス保安教育（従事者対象） 参加報告
4. 自由研削用グラインダー等の研削といし取扱い業務 特別教育 受講報告
5. 配管施工セーフティーセミナー 受講報告
6. 情報システム人材育成研修～IT 基礎～ 受講報告
7. 高圧ガス保安係員講習 受講報告
8. 第 3 回次世代 IT アーキテクト育成セミナー 受講報告
9. 総合技術研究会 2019 九州大学 参加報告

技術系職員 発表リスト	100
-------------------	-----

技術ノート

○ ヘリウム危機 — 研究室ができること —	102
村川 智 (低温センター 研究開発部門)	

各種委員会・センター教職員名簿	106
-----------------------	-----

お知らせ	108
------------	-----

編集後記	109
------------	-----

中村 祥子 (低温センター 特任助教)

研究ノート

空間反転対称性の破れたファンデルワールス結晶における整流効果

工学系研究科 物理工学専攻 岩佐研究室

井手上敏也、岩佐義宏

整流効果とは、固体中の特定の方向へ電流を流す場合に、正負の方向で電流の流れやすさが異なる現象である。p型半導体とn型半導体を接合させたダイオード素子で実現される現象としてよく知られているが、近年、空間反転対称性の破れた結晶において、物質が固有に持つ対称性の破れを反映した整流効果が発現することが明らかになり注目を集めている。このような整流特性は、その微視的起源や電子・磁気・格子状態との関係等不明な点も多く、また、電子相関や波動関数の幾何学等との関連性も議論されおり、興味深い現象である。本稿では、様々な空間反転対称性の破れたファンデルワールス結晶において整流効果を研究し、その微視的機構や特徴的振る舞いを明らかにした結果を紹介する。

1. はじめに

空間反転対称性の破れた物質では、対称性の破れを反映した高次応答（非線形応答）が一般的に期待され、特徴的な輸送現象や外場応答の舞台として基礎・応用の両面から重要である。例えば、空間反転対称性の破れた光学結晶において、第二高調波発生等に代表される非線形光学応答が生じることはよく知られている。しかしながら、固体中の結晶対称性の破れに起因する非線形電荷輸送現象の研究は、これまで極めて限定的で、2次元界面やカイラルな構造を持つカーボンナノチューブ、有機導体等、少数の限られた系に関して報告がなされているに過ぎず、微視的機構も理解が進んでいなかった[1-4]。

空間反転対称性の破れた結晶において生じる2次の非線形伝導は、特定の方向へ電流を流す場合に、正負の方向で電流の流れやすさが異なる現象であり、物質固有の整流特性として理解することができる（図1）。このような空間反転対称性の破れを反映した整流特性（非相反輸送現象）は、特徴的なバンド構造や波動関数の幾何学等との関連性も指摘・議論されおり、その重要性が認識されるようになってきている。

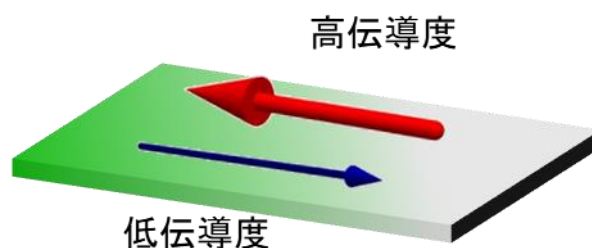


図1. 空間反転対称性の破れた結晶における整流効果。非相反輸送現象。

本稿では、近年我々が様々な空間反転対称性の破れを有するファンデルワールス結晶において取り組んできた、非相反電荷輸送現象の研究に関して紹介する。極性物質において非相反輸送現象の微視的な起源を初めて明らかにしたと同時に、本現象を様々な空間反転対称性の破れた超伝導体に拡張し、固体中の非相反伝導の普遍性を検証した結果に関して報告する。

2. 極性結晶における非相反輸送

近年発見された極性半導体 BiTeBr は、Bi（ビスマス）、Te（テルル）、Br（臭素）の各原子層

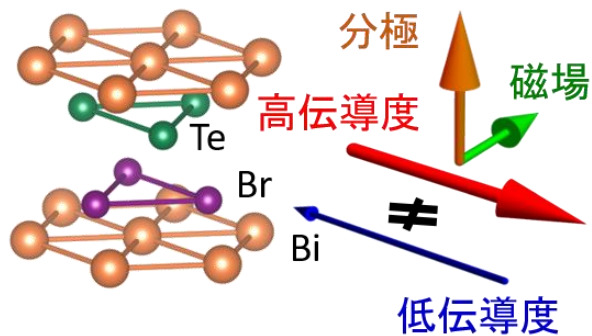


図2. 極性物質における非相反伝導。

が積層した層状化合物で、積層方向への鏡像反転対称性が破れているため、結晶全体で電気分極を持つような極性物質である (図2左)。このような分極を持つ物質では、分極に垂直に磁場を印加した場合に、分極と磁場の両方に垂直な方向に整流性が生じることが期待され (図2右)、実際にいくつかの2次元界面で観測がなされていた[1-2]。しかし、微視的な起源に関しては不明で、また、3次元極性物質において極性構造を反映した電子状態に起因する、物質固有の性質として整流性が生じ得るかどうかは知られていなかった。本研究では、上述した極性半導体 **BiTeBr** において物質固有の整流性の観測と機構解明に取り組んだ。

図3は磁場を印加した場合の整流性を測定した結果である。電流と磁場が平行な時には非相反磁気抵抗効果は観測できなかったが (図3青色データ)、電流と面内磁場が垂直な場合には、磁場に比例するような有限の非相反磁気抵抗効果が観測されていることが分かる (図3赤色データ)。このような非相反伝導応答の有無の磁場・電流依存性は極性物質に特有のものであり、3次元極性物質において結晶の空間反転対称性の破れに起因する電流の非相反輸送現象を初めて観測したと言える。

さらに、本研究では観測された整流特性の温度依

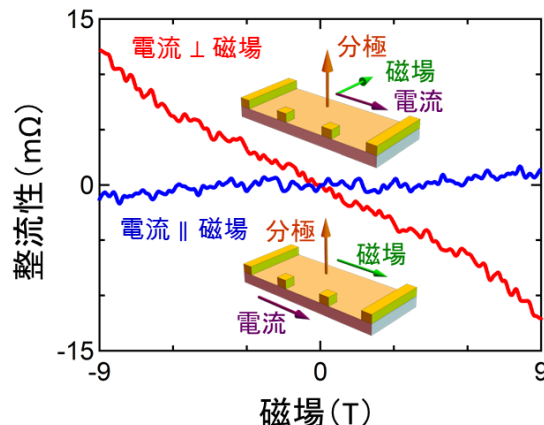


図3. **BiTeBr** における非相反伝導。

磁場 B と電流 I が直交しているときのみ、整流性が観測されている。

存性やキャリア数依存性を詳細に測定することにより、低温領域やキャリア数の少ない試料において、整流特性が著しく増大することを発見した。これら低温・低キャリア数領域での整流特性の増大の振る舞いやその定量的な大きさは、スピン分裂バンド構造に基づく微視的なモデルによって、定量的に説明できることが明らかになった。この理論モデルでは、非相反電荷輸送現象のシグナルの大きさは電子の散乱時間のような現象論的なパラメーターに依らず、スピン起動相互作用の大きさや有効質量といった内因的な物理量のみによって決まるため、本研究で発見した極性構造に起因する整流特性は、空間反転対称性の破れた物質における新機能であるだけでなく、電子状態を決定している微視的な相互作用を決定する重要な手段になり得ることが明らかになった[5]。

3. 3回対称結晶における非相反超伝導輸送

非相反伝導は、前述した極性構造を持った物質だけでなく、様々な空間反転対称性の破れた結晶で普遍的に生じる現象であると考えられる。本研究では、様々な空間反転対称性の破れたファンデルワールス結晶の、特に電界誘起超伝導相に注目して、非相反超伝導輸送現象の開拓に取り組んだ。

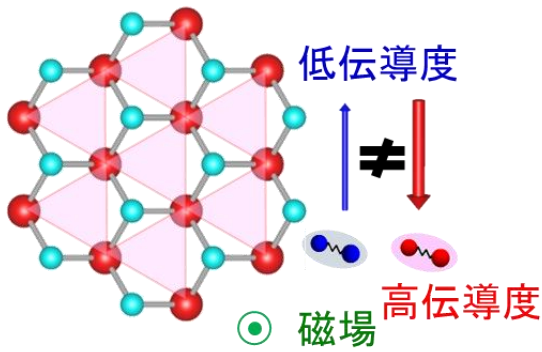


図4. 3回対称結晶における非相反伝導。

本節では、3回対称結晶である2次元超伝導体 MoS_2 における非相反超伝導輸送に関して紹介する。

MoS_2 は、グラフェンに代表されるような原子層物質として近年大きな注目を集めている遷移金属ダイカルコゲナイドと呼ばれる物質群の一つである。図4左に示すような3回対称性を持つ層状化合物であり、単層では空間反転対称性の破れた結晶構造を持つ。このような3回対称性を持つ結晶では、磁場を面直に印加した場合に、結晶のジグザグ鎖方向に流れる電流が整流性を示すと期待される(図4)。このような構造の遷移金属ダイカルコゲナイドは一般に半導体であるが、本研究では、イオン液体(電解質)ゲートと呼ばれる手法によって電気伝導性の制御を試みた。これは、従来の固体絶縁膜に代わり、イオン液体(電解質)をゲート絶縁体材料として使用する手法であり、ゲート電極と試料間に電圧を印加すると、イオンが原子層物質表面に静電的に集積されたり、層間に電気

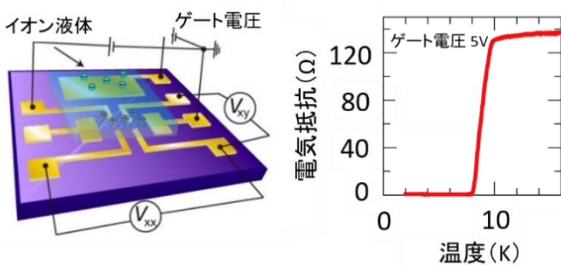


図5. MoS_2 の電界誘起超伝導。

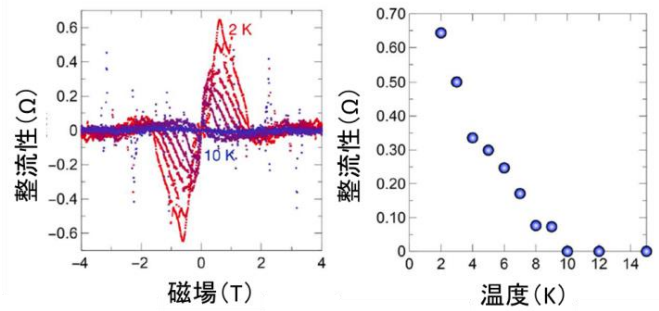


図6. MoS_2 における非相反伝導。

化学的にインターカレートされたりすることで、物質中に電荷が蓄積され、大幅なキャリア数の制御が可能となる手法である(図5左や次節図9左)。本研究では、イオン液体を用いたゲートによって、劈開した MoS_2 試料の表面に多量の電子を静電的にドーピングし、3回対称性を持つ擬似的な単層金属界面を実現した(図5左)。図5右は、イオン液体ゲート下での MoS_2 の電気抵抗であるが、低温で電気抵抗がゼロとなる超伝導転移を示している。この超伝導転移前後での非相反超伝導輸送の磁場依存性を測定した結果が図6左である。超伝導転移温度以上の10 Kでは整流性は小さくて観測されていないが、超伝導転移以下の温度において整流性が明瞭に観測されていることが分かる(図6右)。前節で議論した、磁場に対して単調に比例するような常伝導相における非相反応答と異なり、磁場を大きくして超伝導を壊すと整流性が再び抑えられて非相反応答がピーク構造を持つことから、非相反伝導が超伝導相において増大していることが強く示唆される。この非相反伝導の超伝導相における巨大化は、結晶対称性の破れに起因した巨大整流作用に超伝導相が有望であることを実験的に示した重要な結果と言える。また、微視的機構の理論的考察も進んできており、超伝導転移温度近傍のパラ伝導度への対称性の破れの効果や、超伝導ボルテックスのラチェット効果等が議論されている[6-8]。

4. カイラルナノチューブにおける非相反超伝導輸送

本節では、前節とは異なるカイラルな構造を持つ、 WS_2 ナノチューブの電界誘起超伝導相において非相反伝導を観測した結果を紹介する。

一般に、鏡像対称性のないカイラルな物質では、電流と磁場が平行な場合に非相反電荷輸送現象が期待される (図7)。そのようなカイラルな物質における非相反伝導はカーボンナノチューブや分子性導体において報告されていたが[3,4]、カイラルな構造を持つ物質における超伝導の発現や非相反超伝導輸送現象は未知であった。

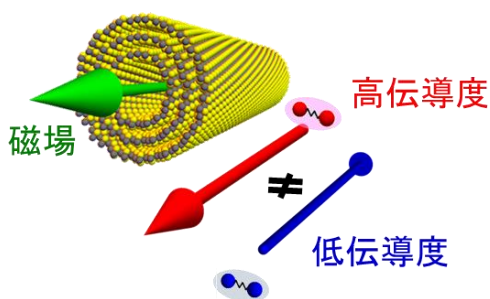


図7. カイラルナノチューブにおける非相反伝導。

本研究で対象とした WS_2 ナノチューブ (図8左) は、遷移金属ダイカルコゲナイドである WS_2 のナノ構造体の一種である。実験では、ナノチューブの層間にイオンを電気化学的にインターカレートして多量の電子をドーピングすることで、低温で電気抵抗がゼロになる超伝導が発現することを発見した (図8右および図9)。この結果は、単一ナノチューブにおいて超伝導特性を観測した初めての報告であり、これにより従来研究されてこなかつ

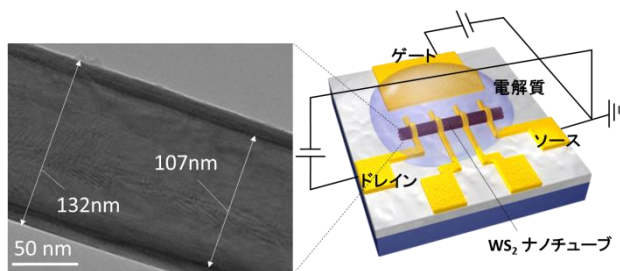


図8. WS_2 ナノチューブと電解質ゲート。

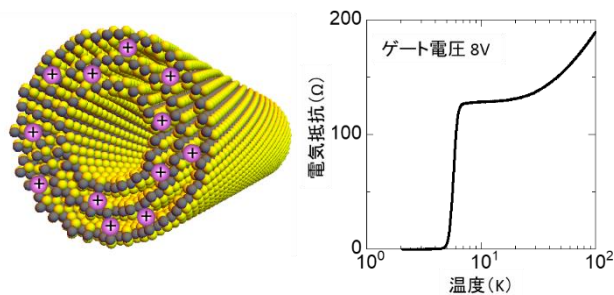


図9. WS_2 ナノチューブの電界誘起超伝導。

たナノチューブの特徴的な形状 (円筒構造やカイラリティ) を反映した超伝導特性の探索が可能となった [9]。

本研究では、特に超伝導相での磁場下電気伝導性の振る舞いを詳細に測定することにより、磁場がチューブ軸に平行な場合に、超伝導電流が円筒構造を貫く磁束の干渉効果の影響を受けて周期的な振動を示す現象である、Little-Parks 効果を観測した (図10青色データ)。これは、超伝導流が円筒形状の領域で実現されていることを明示しており、単一ナノチューブでの超伝導の証拠の一つである[9]。

また、前節と同様に、電界誘起超伝導相において非相反電荷輸送が著しく増大すること、さらに、前述した量子振動効果が観測されるような領域では、非相反電荷応答シグナルも周期的な振動を示すことを発見した (図10赤色データ) [9]。これらの成果は、結晶カイラリティの超伝導への効果を観測した初めての報告であると同時に、非相反超伝導輸送も量子干渉効果の影響を受けることを示唆しており、今後、発見した特徴的な超

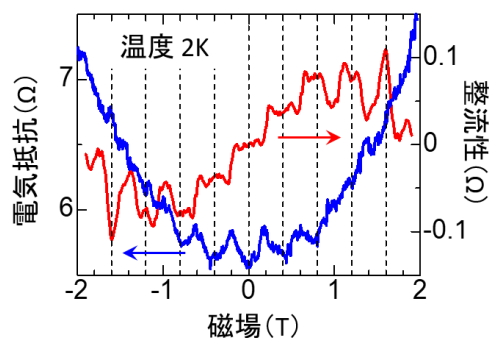


図10. WS_2 ナノチューブにおける非相反伝導。

伝導の非相反現象の微視的起源を明らかにする重要な知見となり得る。

5. おわりに

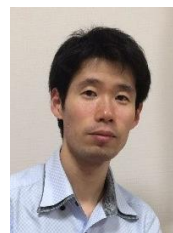
本稿では、3つの異なる空間反転対称性の破れを持つファンデルワールス結晶に対して、それぞれ特徴的な磁場・電流配置で非相反伝導が普遍的に発現することを明らかにし、常伝導相での整流性の微視的機構や超伝導相での非相反応答の巨大化と特異な振る舞いを紹介してきた。このような結晶対称性を反映した整流効果の研究は始まったばかりであり、今後益々の進展が望まれる。様々な空間反転対称性の破れた結晶での実証はもちろん、以下に記すような新しい展望・発展性も期待される。例えば、本稿で紹介した非相反伝導は磁場下で起こる現象であったが、一般に2次の非線形伝導は無磁場下や磁性が存在しない物質でも発現し得る現象である。実際、時間反転対称性のある系での非線形伝導が理論的に予測され[10,11]、実験的にも報告されてきており[12]、電子相関や波動関数の幾何学との関連性が議論されている。また、本稿で紹介したような直流の2次の非線形伝導を、有限の交流応答にまで拡張した現象として理解することができる異常光電流効果も、近年精力的に研究されている[13]。さらに、本稿で着目した超伝導相のみならず、一般の様々な量子相における非相反性は大変興味深い研究対象である。今後、「非相反性」が物性物理学の非線形応答の包括的理解や新概念構築のための重要なキーワード・指図原理となることを期待して、本稿を締めくくりたいと思う。

本研究には、低温・磁場下での電気伝導測定が必須であり、低温センターから供給された寒剤を安定して継続的に使用できたことが研究遂行の大きな原動力となりました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] G. L. J. A. Rikken, and P. Wyder, Phys. Rev. Lett. **94**, 016601 (2005).
- [2] C. O. Avci, *et al.* Nat. Phys. **11**, 570 (2015).
- [3] V. Krstić, S. Roth, M. Burghard, K. Kern, and G. L. J. A. Rikken, J. Chem. Phys. **117**, 11315 (2002).
- [4] F. Pop, P. Auban-Senzier, E. Canadell, G. L. J. A. Rikken, and N. Avarvari, Nat. Commun. **5**, 3757 (2014).
- [5] T. Ideue *et al.*, Nat. Phys. **13**, 578 (2017).
- [6] R. Wakatsuki *et al.*, Sci. Adv. **3**, e1602390 (2017).
- [7] S. Hoshino *et al.*, Phys. Rev. B. **98**, 054510 (2018).
- [8] Y. M. Itahashi *et al.*, arXiv:190400611.
- [9] F. Qin *et al.*, Nat. Commun. **8**, 14465 (2017).
- [10] I. Sodemann & L. Fu, Phys. Rev. Lett. **115**, 216806 (2015)
- [11] T. Morimoto & N. Nagaosa, Sci. Rep. **8**:2973 (2018)
- [12] Q. Ma *et al.*, Nature **565**, 337–342 (2019)
- [13] Y. J. Zhang *et al.*, Nature **570** 349 (2019)

著者紹介



井手上敏也
物性物理
東京大学大学院工学系研究科 助教



岩佐義宏
物性物理
東京大学大学院工学系研究科 教授

室温強磁性トポロジカル磁性絶縁体 $\text{MnTe}/(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ における量子異常ホール効果観測にむけて

理学系研究科物理学専攻 長谷川修司研究室
秋山 了太、高城 拓也、樋渡 功太、長谷川 修司

トポロジカル絶縁体に強磁性を導入しフェルミ準位をギャップ中に調整すると、ゼロ磁場で試料端にエネルギー散逸のないカイラルエッジカレントを伴う量子異常ホール効果が生じる。現状の問題点は結晶性の悪さや磁気分布の不均一性などが原因で観測温度が低いことが挙げられる。本研究では、結晶コヒーレントの良い強磁性 Mn 単原子層を $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 内に自己形成することを狙って MBE により $\text{MnTe}/(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ ヘテロ構造を作製した。結果、室温以上のキュリー温度をもつ強磁性を実現し、さらに Bi/Sb 比の精密制御によってフェルミ準位をギャップ中に調整することができた。電気伝導測定では ρ_{yx} の量子化の兆候と、異常ホール効果が観測された。

1. はじめに

トポロジカル絶縁体はこの 10 年の間に固体物理学分野で隆盛を極めた物質群の一つであり[1,2]、専門外の読者各位もご存知かもしれない。トポロジカル絶縁体とは、バルクは絶縁体でありながら表面は金属的で高い移動度を持ち、 $k \neq 0$ でスピン非縮退であるディラックコーン状のバンドをもつ新しいクラスの物質形態を指す。これらにおいてはバルク部のトポロジカル不変量が非自明であれば表面にトポロジカル表面状態が生じる。この状態は頑強であり、真空などの通常の絶縁体との境界に生じ、トポロジ的に通常の絶縁体からは連続的に変化できない。つまり本質的にこれまでの絶縁体とは異なっている。図 1 (a)によく挙げられ

る例としてトポロジーをコーヒーカップとドーナツによって示した[1]。コーヒーカップを連続変形するとドーナツになりうることを示している。また、同じように図 1(b)の茶碗と和菓子はトポロジ的に同一（連続変形可）であるが、(a)と(b)については両者の間を連続変形することはできず、(a)のクラスにするには(b)に対して一回穴をあけるという操作が必要となる。今仮に(a)を通常の絶縁体、(b)をトポロジカル絶縁体とすると、この穴をあけるといふ操作が両者の中間状態として必要となり、これがトポロジカル表面状態に相当すると比喩的に考えられる。このように特徴的なトポロジカル絶縁体の特性を利用し、将来的にスピントロニクスデバイスなどへの応用や、トポロジカル超伝導を用いてマヨラナ粒子を生成させて量子コンピューターへ応用しようという動きもあり、その未来は広く開けている。



図 1: (a) コーヒーカップを連続変形するとドーナツにできる。(b) 茶碗と和菓子も連続的に変形できる。これらはトポロジ的に同一のクラスと言える。(a)は[3]から抜粋。

2. 量子異常ホール効果

トポロジカル絶縁体では大きなスピン軌道相互作用によって、図 2(c)に示すように伝導帯と価電子帯の一部がバンド反転を引き起こし、パリティ

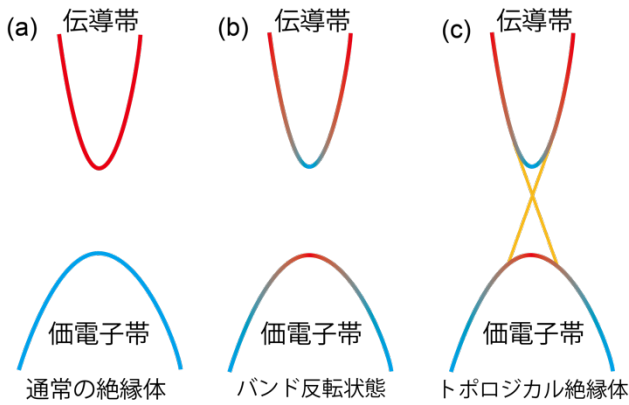


図 2: (a)通常の絶縁体、(b)バンド反転した状態、(c)トポロジカル絶縁体の各状態のバンドの模式図。黄色はトポロジカル表面バンド。

(波動関数の対称性) が入れ替わっている。本系で扱う(Bi,Sb)₂Te₃などの3次元トポロジカル絶縁体では、時間反転対称性が保たれており、これが表面状態を担保している。トポロジカル表面状態は図3のようにディラックコーンのバンド分散を持つ。ここに強磁性が導入されると、時間反転対称性が破れてディラックコーンにギャップが開き(ディラックギャップ)、試料端にカイラルエッジ状態が現れる。このとき、フェルミ準位がディラックギャップ中に位置すると量子異常ホール効果(QAHE)が生じる。量子異常ホール効果は、試料端にカイラルエッジカレントという理論的にエネルギー散逸のない電流がゼロ磁場で誘起されるも

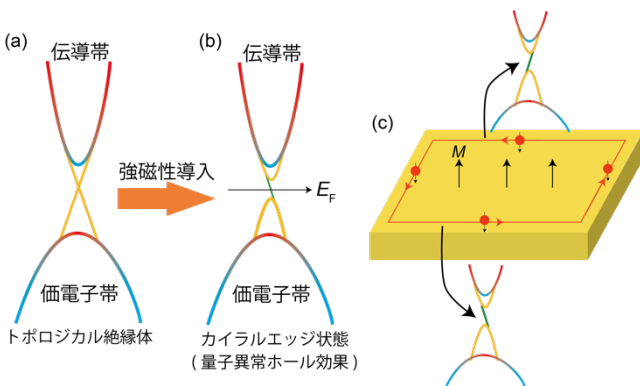


図 3: (a)トポロジカル絶縁体に強磁性を導入すると(b),(c)ディラックギャップが開き、カイラルエッジカレントが試料端を流れ、端以外ではギャップが開き、端ではカイラルエッジ状態が生じる(緑色)。

ので、それは強磁性体によってスピン偏極電流となり(量子ホール、量子スピンホール効果との比較を模式図で示した: 図4[4])、将来の低消費電力素子やスピントロニクスへの応用可能性などから大きな注目を集めている。しかし、多くの報告で観測温度が30 mK~2 K程度[5-7]と低いことが課題である。この原因として挙げられているのが結晶性と磁気構造の不均一性である。実際、磁性層とトポロジカル絶縁体層を分離した変調ドーブ構造において最高温度の2 Kが達成されている[7]。

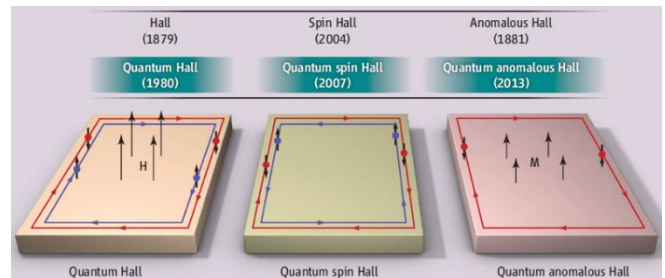


図 4: 量子ホール、量子スピンホール、量子異常ホール効果それぞれの模式図[4]。

3. 試料構造

一方、我々のグループでは自己形成によって高品質な単原子 Mn 強磁性層を含む磁性トポロジカル絶縁体構造を作製することに成功した[8]。この構造は、LEED-IVによって詳細に解析したところ、Bi₂Se₃にMnSeを加熱下で積層することでMnが拡散し、図5(a)のようにMnBi₂Se₄という強磁性層が生じているということが分かった。この系は図5(c)のように磁化が室温で明確なヒステリシスを示すことから、キュリー温度は室温を越えており、図5(b)のようにディラックギャップの大きさは75 - 120 meVほどある(ARPESの入射エネルギーなどに依存)。しかしながら、フェルミ準位がバルク伝導帯を横切っているため、QAHEの観測には不向きである。一方、磁性トポロジカル絶縁体の母体であるトポロジカル絶縁体において、フェルミ準位が精密に制御できる物質として(Bi,Sb)₂Te₃が知られている[9-11]。また、MnTe/Bi₂Te₃についてはQAHE出現の理論予測などもあるため[9]、

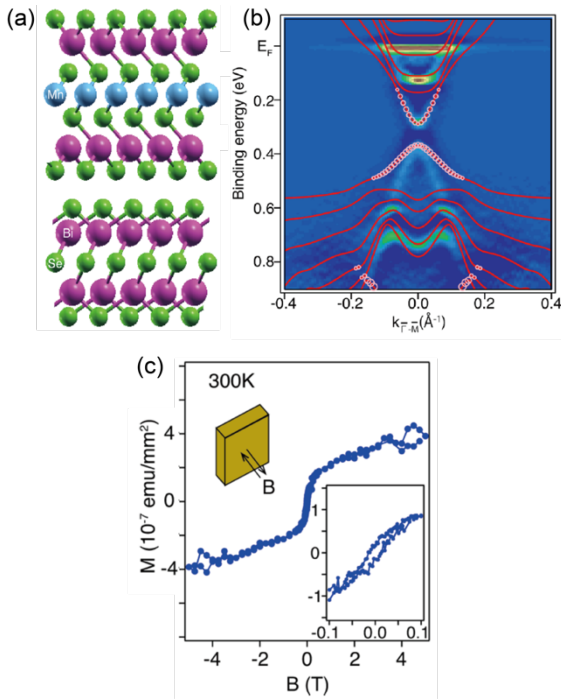


図 5: (a)MnBi₂Se₄(上側)と Bi₂Se₃ (下側) の結晶構造。(b)ARPES による Γ 点近傍のバンド構造と、理論計算。(c)300 K における磁化曲線。挿入はゼロ磁場付近の拡大図。ヒステリシスが確認できる[8]。

MnTe を(Bi,Sb)₂Te₃ へ蒸着して上述のものと類似構造を目指し、フェルミ準位をディラックギャップ中に調整することを目指した。

4. 実験結果

まず図 6 (a)のような試料を MBE 法によって作製した。ここでは文献[8]と同様に Mn の単原子層が生成すると想定している。in situ 観察した

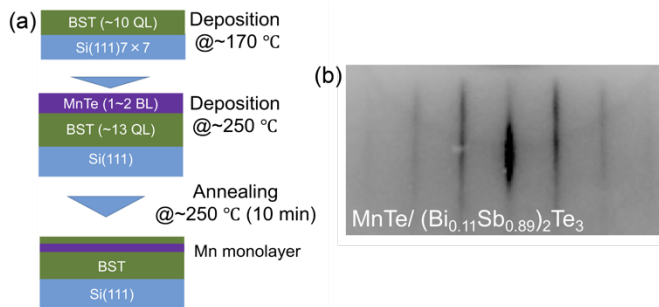


図 6: (a)試料作製方法とその構造。ここでは文献[8]と同様の Mn 原子層ができると想定している。(b)MnTe まで成膜したときの RHEED パターン。

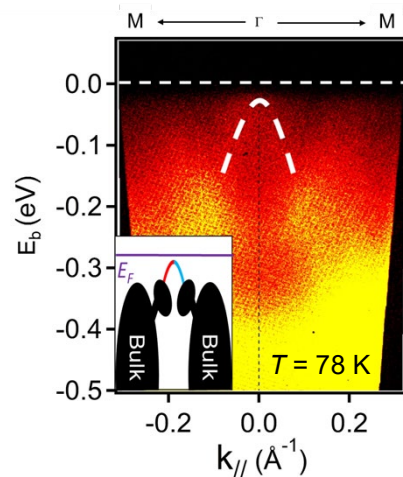


図 7: (Bi_{0.11}Sn_{0.89})₂Te₃ に対して MnTe を蒸着した後の ARPES 像。挿入はバンドの模式図。

RHEED は図 6 (b)に示す。MnTe まで積層しても単結晶薄膜由来のストリークパターンを保持している。またバンド構造に着目すると、(Bi,Sb)₂Te₃ についてフェルミ準位がギャップ中 (ディラック点) に来るように Bi/Sb を調整しても、MnTe を積層するとホールがドーピングされてバンドが上がってしまうことが ARPES 観測から分かった。そのため、予め(Bi,Sb)₂Te₃ のバンドを適切な量だけ予め下げておいて、MnTe を蒸着したあとでフェルミ準位がギャップ中 (ディラック点近傍) に来るように調整した。結果、Bi : Sb = 0.11 : 0.89 のときに丁度フェルミ準位がディラック点に位置することが図 7 の ARPES 像に示すように分かった。

また QAHE 実現のためにはトポロジカル絶縁体の表面が強磁性になっていなければならない。SQUID によって測定した面直の磁化曲線を図 8 に示す。4 K, 300 K とともに強磁性由来のヒステリシスを示し、2 K ではおよそ 120 Oe の保磁力をもつ。このことから室温以上のキュリー温度を持つことが分かる。フェルミ準位制御と強磁性化という 2 つの条件が揃ったので、QAHE の観測が期待される。図 9 に電気伝導測定の結果を示す。(a), (b)はそれぞれ ρ_{xx} と ρ_{yx} の温度依存性である。両者ともに低温になるに従って抵抗率が增大している。QAHE が生じる場合、 ρ_{xx} は 0 に近づき、 ρ_{yx} は量子

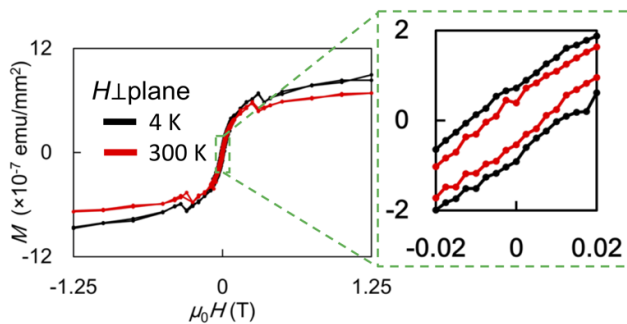


図 8: 4 K, 300 K における面直磁場の磁化曲線。点線で囲ったグラフは拡大図。300 K でも明確な保磁力が確認できる。

化抵抗に近づく。本系では微細加工をせずにコンタクトしているため、 ρ_{xx} と ρ_{yx} が両者混じっていると考えられ、 ρ_{yx} の影響が強く出ていると考えられる。また磁場依存性では弱局在効果[13]が観測されており (図 9(c))、フィッティングの結果、チャネル数を示す係数 $\alpha = 0.06$ で電子コヒーレンス長は $l_\phi = 65 \text{ nm}$ となった。トポロジカル絶縁体であればベリー位相が π なので弱反局在効果が現れるはず[14,15]であるから、弱局在効果の出現はフェルミ準位がディラックギャップ中に位置していることを示唆している。一方 ρ_{yx} については $\sim 30 \text{ K}$ 以下で徐々に量子化抵抗に近づいてきており、図 9(d)の磁場依存性をみると異常ホール効果が現れていることが分かる。これは確かに伝導電子が強磁性交換相互作用を受けていることを示している。

5. まとめ

ゼロ磁場で試料端にエネルギー散逸のないカイラルエッジカレントを伴う QAHE について、より高温で実現するために試料構造を設計した。まず、結晶コヒーレントの良い強磁性 Mn 単原子層を $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ 内に自己形成することを狙って MBE により $\text{MnTe}/(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ ヘテロ構造を作製した。本試料は室温以上のキュリー温度をもつ強磁性を示し、さらに Bi/Sb 比の精密制御によってフェルミ準位をギャップ中に調整することができた。これらにより QAHE 実現の条件は揃った。電気伝導測定の結果では ρ_{yx} の量子化の兆候と、異常

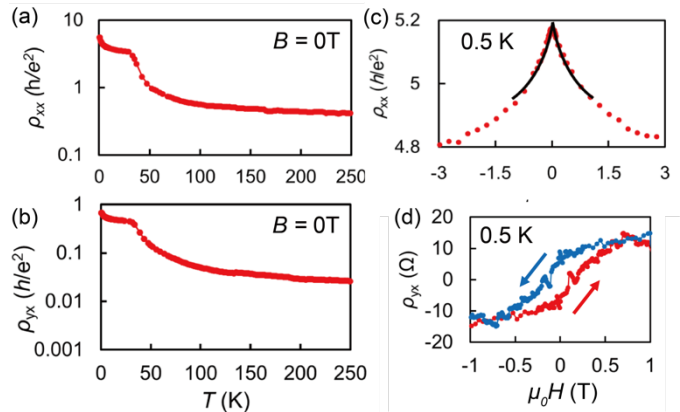


図 9: (a), (b)ゼロ磁場下における ρ_{xx} と ρ_{yx} の温度依存性。(c), (d)0.5 K における ρ_{xx} と ρ_{yx} の磁場依存性。(c)における黒曲線は HLN 方程式によるフィッティング。

ホール効果が観測された。現状の試料は ρ_{xx} と ρ_{yx} が混じって測定され分離が困難であるため、今後は資料ダメージのない状態でホールバーを作製し、更に諸条件を詰めて QAHE を実現したい。

なお、本研究における SQUID による磁化測定、電気伝導測定は、東京大学低温センターの共同利用部門を利用させていただいた。技術職員の戸田博士をはじめスタッフの皆様に対し、ここに深く謝意を表したい。

参考文献

- [1] C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. **95**, 146802 (2005).
- [2] M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 (2010).
- [3] 理化学研究所、RIKEN NEWS 2010 年 7 月号
- [4] S. Oh, Science **340**, 153 (2013).
- [5] C.-Z. Chang, *et al.* Nat. Mater. **14**, 473 (2015).
- [6] C.-Z. Chang *et al.*, Science **340**, 167 (2013).
- [7] M. Mogi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **107**, 182401 (2015).
- [8] T. Hirahara *et al.*, Nano Lett. **17**, 3493 (2017).
- [9] J. Zhang *et al.*, Nat. Commun. **2**, 574 (2011).
- [10] D. Kong *et al.*, Nat. Nanotech. **6**, 705 (2011).
- [11] R. Akiyama *et al.*, J. Phys. Cond. Mat. **30**, 265001 (2018).
- [12] S. V. Ereemeev *et al.*, Nano Lett. **18**, 6521 (2018).
- [13] S. Hikami *et al.*, Prog. Theor. Phys. **63**, 707 (1980).
- [14] H.-T. He *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 166805 (2011).
- [15] R. Akiyama *et al.*, Nano Res. **9**, 490 (2016).

著者紹介



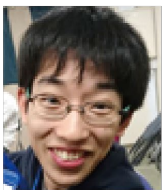
秋山 了太

大学院理学系研究科物理学専攻 助教
博士（工学）
専門 低次元系量子物性



高城 拓也

大学院理学系研究科物理学専攻
大学院 修士課程二年



樋渡 功太

大学院理学系研究科物理学専攻
大学院 修士課程一年



長谷川 修司

大学院理学系研究科物理学専攻 教授
博士（理学）
専門 表面物理学

NMR 法により解明した、マルチドメイン蛋白質複合体 CheA-CheY の動的ドメイン間相互作用による走温性制御機構

薬学系研究科 薬科学専攻 生命物理化学教室

上田 卓見、嶋田 一夫

原核生物の走温性は、CheA-CheY を含むシグナル伝達蛋白質群により制御される。CheA は、P1-P5 の 5 つのドメインにより構成されるマルチドメイン蛋白質であり、CheA の各ドメインを単離した状態、および P1, P2 ドメインと CheY の複合体の立体構造が解かれている。一方、走温性制御機構を解明する上では、切り出したドメインではない CheA-CheY 複合体全体の全体構造が、温度でどのように変化するかを解明することが必要である。そこで本研究では、283 K, 303 K の両条件における全長 CheA-CheY 複合体の NMR 解析を行った。その結果、生理的な濃度において、CheA-CheY 複合体は、P2 ドメインだけが CheY に結合した状態 (P1 unbound state) と、P1 ドメインと P2 ドメインが同時に CheY に結合した状態 (P1 bound state) の平衡状態にあること、および低温下では P1 unbound state の割合が増大することが明らかになった。さらに、温度上昇に伴う P1 unbound state の減少は、リン酸化 CheY の濃度を数十%減少させて、正の走温性を引き起こすことが、走温性シグナル伝達分子の細胞内濃度変化のシミュレーションにより示された。したがって、CheA-CheY 複合体の平衡が、走温性の主要な温度センサーとなることが示された。

1. 序

X 線結晶構造解析や極低温電子顕微鏡解析により、様々な蛋白質の立体構造が解かれている。特に近年、極低温電子顕微鏡解析により、重要な生理機能を担う蛋白質の立体構造が多数解かれている。このような蛋白質の精緻な立体構造は、機能メカニズムの解明や薬剤の開発に大きく貢献している。これらの手法で得られる立体構造は静的なスナップショットであり、必ずしも蛋白質が機能している生理的環境下における主要な構造であるとは限らない。一方、生理的な環境下において、蛋白質が複数の立体構造の動的構造平衡状態にあることが明らかになってきている。

核磁気共鳴法 (NMR) は、溶液中における蛋白質がどのような構造の間をどのような速度および量比で交換しているか、という動的構造の情報を原子レベルで取得できる強力な手法である。我々は、*in situ* における蛋白質の動的構造の解明を可能とする新規の試料調製法や NMR 測定法を開発

した上で、開発した手法を応用して、重要な生理機能を担う蛋白質における、機能に直結した動的構造を明らかにする研究を進めている[1,2]。本稿では、CheA-CheY 複合体の動的なドメイン間相互作用が、原核生物の走温性を制御する温度センサーとして機能することを解明した研究を紹介する[3]。

2. CheA-CheY の動的ドメイン間相互作用による走温性制御機構

細胞は外的環境の変化を検知して、迅速に適応する。例えば、原核生物は細胞外の誘引物質や忌避物質の濃度および温度を検出した上で、鞭毛運

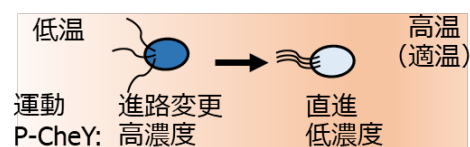


図 1. 低温時における走温性の模式図。

動を制御してより望ましい環境に向かうことが知られており、この現象は走化性および走温性と呼ばれている。温度に関しては、低温時には温度が高い方に、高温時には温度が低い方に移動することで、最適な温度(約310 K)に細胞が向かう(図1)。

原核生物の走化性および走温性は、CheA、CheY等により構成される同一のシグナル伝達系により制御される。CheAはP1、P2、P3、P4、P5の五つの構造ドメインを持つ分子量15万のマルチドメイン蛋白質であり、CheYは分子量1万4千の単一ドメインの蛋白質である(図2)。CheAのP1ドメインにあるヒスチジン残基(大腸菌CheAではHis-48)は、ATPを結合するP4ドメインにより自己リン酸化された上で、リン酸をP2ドメインに結合するCheYのアスパラギン酸残基(大腸菌CheYではAsp-57)に受け渡す。リン酸化されたCheYは、鞭毛のFliM蛋白質に結合することで、鞭毛のFliM蛋白質に結合することで、細胞がその場に留まるように鞭毛運動を制御する。

走化性の際は、誘引物質や忌避物質がChemoreceptorとCheAの複合体に結合すると、CheAの自己リン酸化速度が減少および増大することに伴い、リン酸化CheYの濃度が変化することで、鞭毛運動が制御されることが知られている。しかし、走温性に関しては、温度が310 Kより低い条件において、温度依存的なChemoreceptorの構造変化が観測されておらず、また温度がCheAおよびCheYの構造に与える影響も不明であるため、その制御機構は不明であった。そこで本研究では、NMRを用いて、温度が全長CheA-CheY複合体の構造に与える影響を明らかにして、走温性シグナルの制御機構を解明することを目的とした。

P1およびP2ドメインのCheY結合様式を調べるために、0.1 mMのP1ドメインとP2ドメインを区分選択的に均一²H, ¹⁵N標識した大腸菌由来の全長CheAに対して、非標識のCheYを段階的に添加してNMRスペクトルを測定した(図3A)。その結果、CheYとの親和性が比較的高いP2ドメイン上の残基に由来するNMRシグナルは、CheY

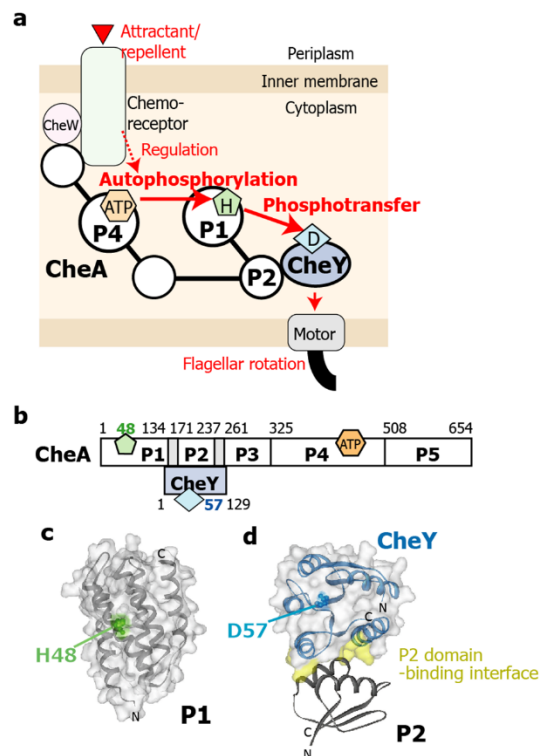


図2. CheA-CheY複合体。A. 原核生物の走化性シグナル伝達の模式図。B. CheA-CheY複合体の構造ドメイン構成。C. 単離したP1ドメインの結晶構造(PDB ID: 1I5N)。D. 単離したP2ドメインとCheYの複合体の結晶構造(PDB ID: 1EAY)。

の添加に伴い、CheAとCheYの量比が約1:1になるまで化学シフトが直線的に変化した。この化学シフト変化から、解離定数は0.5 μMと算出された。一方、Ile-5を含む、CheYとの親和性が比較的低いP1ドメイン上の残基に由来するNMRシグナルは、CheYの添加に伴い化学シフトが非直線的に変化した。例えば、Ile-5のシグナルは、CheAと等量のCheYの添加に伴い¹Hの化学シフトが変化した一方、さらに過剰量のCheYを添加すると主に¹³Cの化学シフトが変化した(図3B)。前者の¹H化学シフト変化は、CheYの親和性が減弱したCheA/I20A変異体では観測されなかったことから、P1ドメインとCheYの結合を反映することが示された。さらに、¹H化学シフト変化量から算出された見かけの解離定数(1.6 μM)が単離したP1ドメインの解離定数(900 μM)より顕著に

低いことから、P2 ドメインに結合した CheY と P1 ドメインの結合を反映することが示された (図 3C)。CheA の P1 ドメインと P2 ドメインが同時に一つの CheY に結合した状態を“P1-CheY bound state”と呼ぶ。

全長 CheA に過剰量の CheY を添加した時の ^{13}C 化学シフトの変化 (図 3D) は、P1-CheY bound state に二分子目の CheY が結合した状態が生じることを示している。この状態を、“doubly-bound state”と呼ぶ。また、CheA が主に P1-CheY bound state となる濃度および doubly-bound state となる濃度において、CheY により化学シフト変化した残基が重複していたことから、両状態で CheY 結合部位が重複していることが示された。このことは、doubly-bound state が生じる際に、P1-CheY bound state の際に、P2 ドメインだけが CheY と結合した状態が一過的に生じた上で、P1 ドメインと P2 ドメインに別の CheY が結合した doubly-bound state が生じたことを示している。P2 ドメインだけが CheY と結合した状態を、以降“P1-CheY unbound state”と呼ぶ。

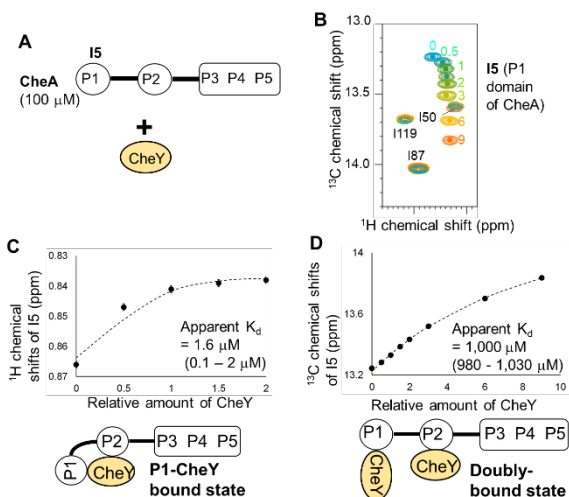


図 3. 滴定実験による、全長 CheA-CheY 結合様式の解析 (測定温度 303 K)。A. 実験の模式図。B. 様々な濃度の CheY を添加した時の、CheA の Ile-5 の NMR シグナルの重ね合わせ。C. D. ^1H および ^{13}C の化学シフト変化のプロットおよび見かけの解離定数。

次に、温度が CheA-CheY 複合体の構造平衡に与える影響を調べるために、温度を 283 K に下げた条件で、0.1 mM の区分選択標識した CheA に対して様々な濃度の CheY を添加して NMR スペクトルを測定した。その結果、303 K と比較して、P1-CheY bound state の形成に対応する、等量の CheY の添加に伴う Ile-5 の ^1H 化学シフトの変化は減少する一方、doubly-bound state の形成に対応する、過剰量の CheY 添加に伴う ^{13}C 化学シフトの変化は増大した (図 4)。以上の結果から、CheA と CheY は非結合状態、P1-CheY unbound state, P1-CheY bound state, doubly bound state の間を、NMR のタイムスケールより早く ($> 1,000 \text{ s}^{-1}$) 交換することが示された。生理的な CheA および CheY の濃度 ($\sim 10 \mu\text{M}$) では、CheA は主に P1-CheY unbound state と P1-CheY bound state の平衡状態にあり、doubly-bound state の割合は低いと考えられる。

両温度における動的なドメイン間相互作用を詳細に解析するために、Ile-5 の NMR シグナルのシミュレーションを行った。マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づいて、CheA-CheY の構造平衡モデルにおける平衡定数および各状態の化学シフト値

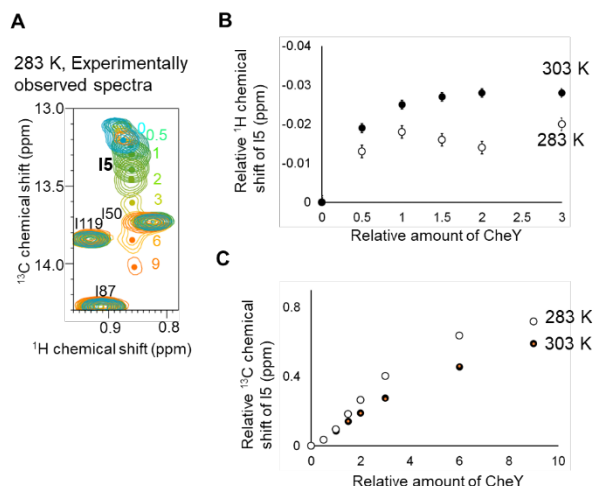


図 4. 低温条件下 (283 K) における滴定実験。A. 様々な濃度の CheY を添加した時の、CheA の Ile-5 の NMR シグナルの重ね合わせ。B. C. ^1H および ^{13}C の化学シフト変化のプロット。

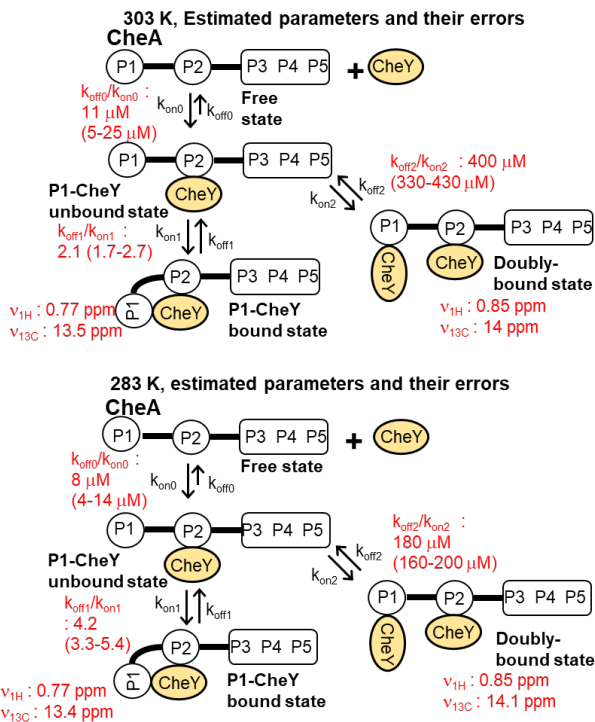


図5. 303 K および 283 K における、CheA-CheY 相互作用の平衡定数の最適値と誤差。

を網羅的に変化させながら Ile-5 の NMR シグナルをシミュレーションした上で、化学シフトの計算値と実測値を比較することで、各パラメータの最適値と誤差を産出した (図 5)。その結果、P1-CheY unbound state と P1-CheY bound state の平衡が、温度低下に伴い前者に偏っていることが示された。

さらに、P1-CheY bound state における P1 ドメインと CheY の結合様式を調べるために、P1-CheY bound state が主要な状態となる濃度条件において交差飽和実験を行い、全長 CheA の P1 ドメインおよび CheY の結合界面を決定した (図 6)。その結果、リン酸転移反応の反応部位である P1 ドメインの His-48 および CheY の Asp-57 が結合界面に含まれることが明らかとなった。

交差飽和実験の結果から、P1-CheY bound state の形成は、リン酸転移反応の進行を可能とすることが示唆された。一方、自己リン酸化反応は、P1-CheY bound state では P4 立体障害のため進行せ

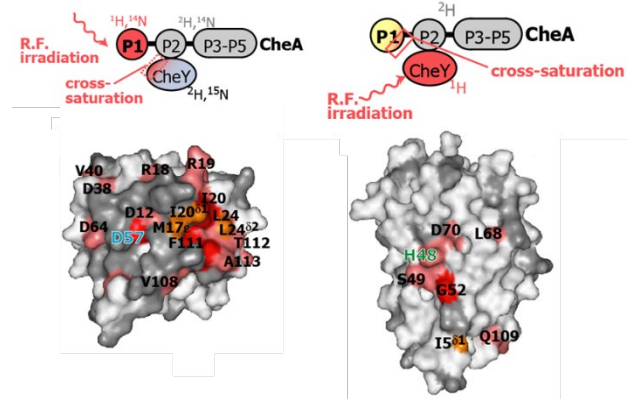


図6. 交差飽和法により決定した、CheA-CheY 複合体における P1 ドメインおよび CheY 上の結合界面。

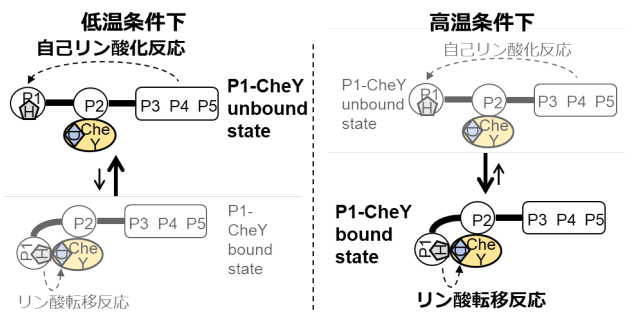


図7. 生理的な濃度における、CheA-CheY 複合体の構造平衡の模式図。

ず、P1-CheY unbound state である必要があると考えられる。したがって、P1-CheY unbound state と P1-CheY bound state の平衡は、自己リン酸化反応とリン酸転移反応の両方の速度を制御しており、交換速度が大きいことは、両方の反応を迅速に進める上で重要であると考えた (図 7)。

次に、動的なドメイン間相互作用が走化性シグナル全体に与える影響を見積もるために、走化性シグナル全体の濃度変化を記述する数理モデルに対して、P1-CheA bound state と P1-CheA unbound state の平衡の要素を追加して、シミュレーションを行った。その結果、温度上昇による P1-CheA bound state の増大に伴い、自己リン酸化反応が起こりにくくなることで、リン酸化 CheY の濃度が減少することが示された (図 8)。温度増大に伴いリン酸化 CheY の濃度が減少することは、

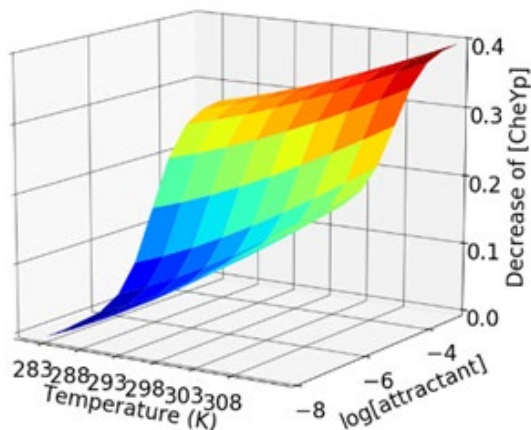


図 8. シグナル伝達の数理モデルに CheA-CheY 複合体の動的ドメイン間相互作用を追加して算出した、温度および誘引物質濃度の上昇に伴うリン酸化 CheY の濃度変化。

低温条件下において細胞が温度の高い場所に向かうことと対応しており、その変化の大きさは誘引物質によるリン酸化 CheY の変化量と同程度であった。したがって、CheA-CheY 複合体の平衡が、走温性の温度センサーとして機能できることが示された。

本研究では、マルチドメイン蛋白質である CheA と CheY の複合体における、CheA の P1 ドメインと CheY の過渡的な相互作用が、複数の反応を進行すること、および温度による反応の制御を可能とすることが示された。このような過渡的な相互作用に関する知見は、適用できる手法が不足しているため、非常に限られている。今後、NMR により様々なマルチドメイン蛋白質の動的平衡を明らかにすることにより、作用機序の理解が進むことが期待される。

3. 低温センターとの関連

本研究の NMR 測定では、当研究室の Avance 800 (Bruker 社、磁場強度 18.7 T) を用いた。GPCR のような、濃度や安定性の低い試料の NMR 解析では、高感度、高分解能の NMR スペクトルの取得を可能とする、本装置のような高磁場の

NMR 装置が必要不可欠である。一方、本装置は、5 週間毎に 250 L の液体ヘリウムを充填することを必要とする。他の NMR 装置で使用する分も合わせて、当研究室では年間 4,000 L 近い液体ヘリウムを使用している。したがって、今回紹介したような研究では、大量の液体ヘリウムを安定かつ安価に供給することを可能とする低温センターが、必要不可欠である。

参考文献

- [1] I. Shimada, T. Ueda, Y. Kofuku, MT. Eddy, K. Wüthrich, *Nat. Rev. Drug Discov.* 18, 59 (2019)
- [2] T. Ueda, Y. Kofuku, J. Okude, S. Imai, Y. Shiraishi, I. Shimada, *Biophys. Rev.* 11, 409 (2019)
- [3] Y. Minato, T. Ueda, A. Machiyama, H. Iwai, and I. Shimada, *Sci. Rep.* 7, 16462 (2017)

著者紹介



上田 卓見

構造生物学

東京大学准教授 (大学院薬学系研究科)。

薬博。



嶋田 一夫

構造生物学

東京大学教授 (大学院薬学系研究科)。

理博。

拡散 MRI による脳組織微細構造イメージングとトラクトグラフィ

医学系研究科 生体物理医学専攻 放射線医学講座
神谷 昂平

私は拡散 MRI の中枢神経疾患での応用についての研究を行っています。拡散 MRI は、画像自体のボクセルサイズよりも小さな構造に関する情報を取得できる点でユニークな手法です。例えば、神経線維や腫瘍細胞の密度の推定や、トラクトグラフィによる神経線維の可視化があります。同領域は、MRI 装置や解析ツールの進歩によって現在も急速な発展を続けています。これらの応用と現在の課題について、実際の画像を用いて説明します。

1. 背景

拡散 MRI は、水分子の拡散運動を捉えることによって画像自体のボクセルサイズよりも小さなスケールの組織微細構造に関する情報を取得できる点で、ユニークな画像検査である。現在の臨床では、準定量的な値としての ADC 値とトラクトグラフィが広く使用されている。トラクトグラフィは、白質内の拡散には主に神経線維によって規定される方向性（異方性）があることを利用して、多方向の MPG で取得したデータから神経線維の方向分布（orientation distribution function, ODF）を推測して、それを追跡することで神経線維を近似的に描出する手法である（図 1、2）（異方性があれば神経以外にも可能である。骨格筋、心筋、靭帯、軟骨、腎などの報告がある。）。非侵襲的であり、視覚的に評価しやすいため、特に脳腫瘍治療の際の機能温存のためのマッピングとして有用である[1]。ADC は最もシンプルな拡散の定量値であり、脳血管障害、変性疾患、腫瘍など多くの疾患において、画像診断に有用な知見をもたらした。更に近年の MRI 装置の進歩によって、空間分解能や信号雑音比の向上、より強い拡散強調（より高い b 値の使用）が可能になり、ADC や Diffusion Tensor Imaging (DTI) から更に一步踏み込んで水分子拡散のより複雑な性質を定量する方法が提案されている。

例えば ADC や DTI は、信号の対数を取って b でテイラー展開したもの（キュムラント展開）の

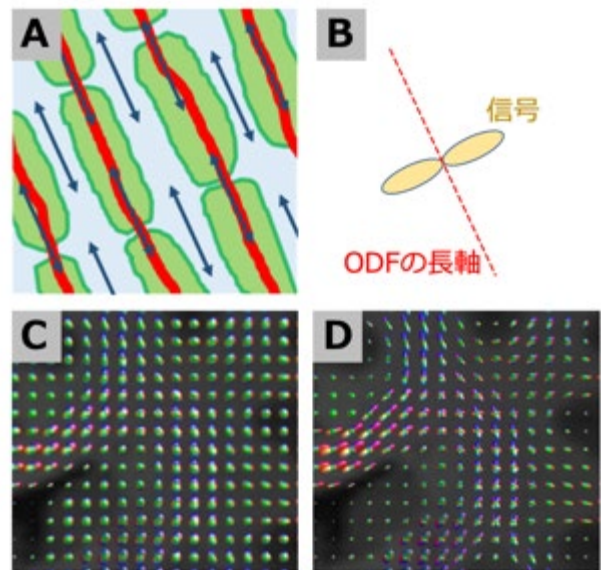


図 1. 組織内の異方性と信号、ODF. A. 神経線維内の拡散異方性（矢印の方向に拡散しやすい）。赤：軸索、緑：髄鞘. B. 各 MPG 方向での信号を 3 次元でプロットすると、ODF の長軸（赤）に垂直で真ん中が凹んだ円盤状になる（黄）（拡散しやすい方向ほど信号は低い）。C, D. b 値を高くすると、MPG に垂直方向以外の線維の信号がより強く抑制され、得られる ODF はシャープになる。C は $b=1000 \text{ s/mm}^2$ 、D は $b=5000 \text{ s/mm}^2$ 。

b の項に相当するが、 b^2 の項を見るのが Diffusion Kurtosis Imaging (DKI) であり [2] (式 1)、組織微細構造の複雑性を捉えることが期待され、例えば脳腫瘍の悪性度の推定において DTI/ADC よりも有用である可能性が示唆されている [3]。

$$\log S = -b g_i g_j D_{ij} + \frac{1}{6} b^2 \bar{D}^2 g_i g_j g_k g_l W_{ijkl} + \dots \quad (1)$$

2. トラクトグラフィ

DTI トラクトグラフィでは、ボクセル内の拡散を楕円体で表現し、楕円体の長軸方向を追跡してトラクトを描く。このやり方はボクセル内に複

数の線維が交叉している場合にはうまくいかない。そして、ヒト脳では 90% のボクセルに交叉線維が含まれるとされる。交叉線維に対処する手法は多く提案されており、代表的なものとして q-ball imaging [4] と Constrained Spherical Deconvolution (CSD) [5,6] がある。これらは DTI の範囲 (最大 b 値 $\sim 1000 \text{ s/mm}^2$) を超えたデータを扱い、DTI では困難な交叉線維の描出を可能とする (図 2)。自施設では、脳腫瘍の術前マッピングには $b=3000 \text{ s/mm}^2$ の撮影データを用いて q-ball imaging を行い、脳神経外科をはじめ各科に提供している (図 3、4)。

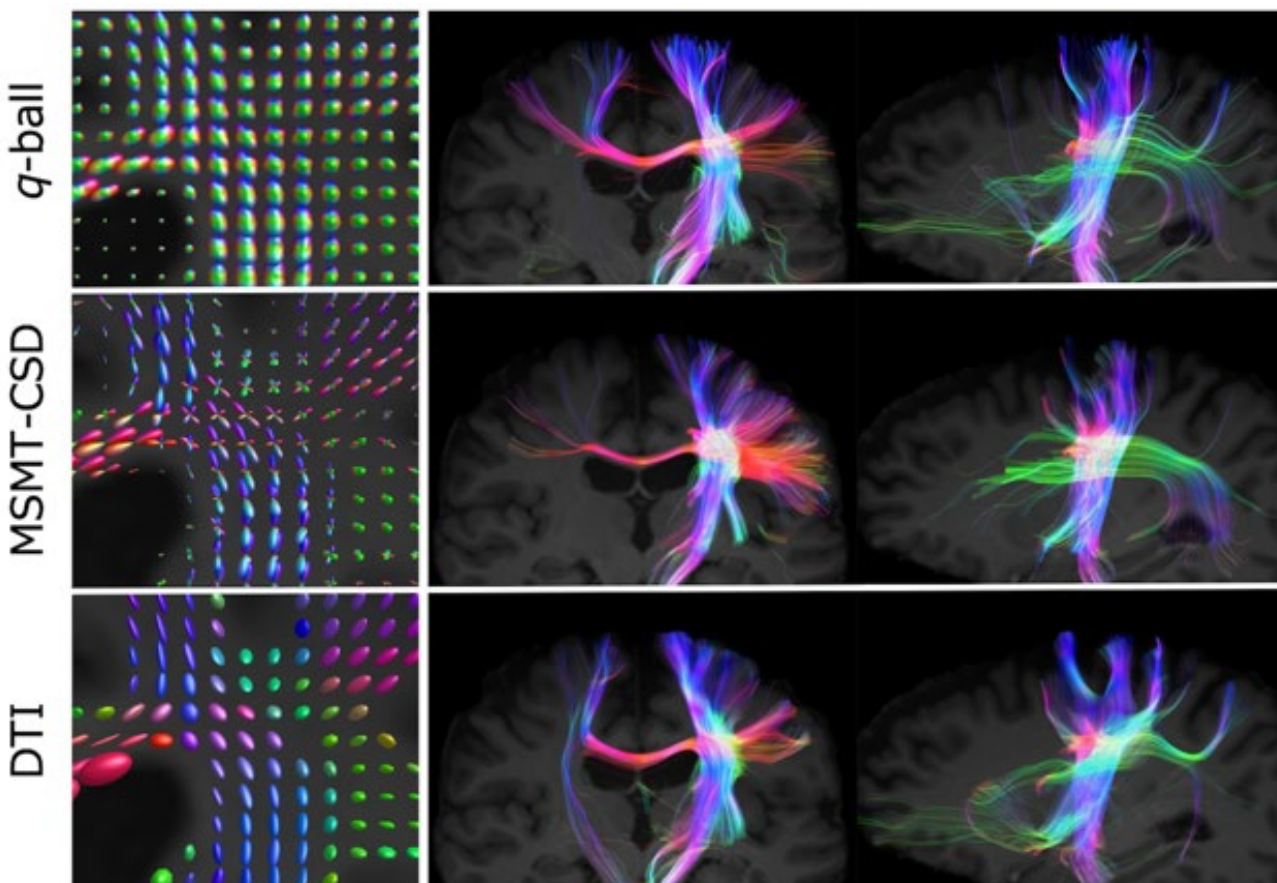


図 2 トラクトグラフィの例。健常者。上段から q-ball imaging、CSD、DTI。DTI は CSD に使用したデータの一部から再構成。撮影時間は順に q-ball imaging は 5 分 36 秒、CSD は 4 分 48 秒。左列に拡大表示した領域を通過するトラクトを右列に示す。交叉線維の描出は、DTI に比べ q-ball imaging や CSD では向上している。

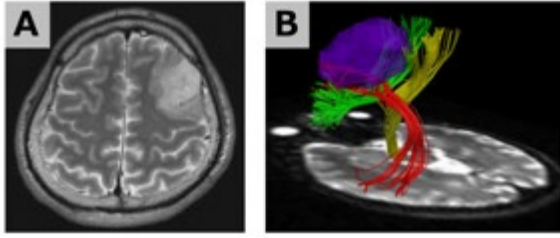


図 3. 脳腫瘍術前のトラクトグラフィ. 左前頭葉の oligodendroglioma の症例. A. T2 強調軸位断像、B. q-ball imaging によるトラクトグラフィ. 紫：腫瘍、黄：皮質脊髄路、赤：弓状束、緑：Frontal Aslant Tract.



図 4 . Horizontal Gaze Palsy with Progressive Scoliosis (HGPPS)の症例. A,B. 脳幹は正中に溝がある特徴的な形態をとり、橋被蓋の低形成がある. C. 本疾患は軸索誘導に関わる ROBO3 遺伝子の異常であり、後脳の正中を交叉する線維の形成が障害される. 皮質脊髄路が錐体交叉を形成せずに同側を下行している.

3. 今後の課題

脳の微細構造（神経線維の密度等）の定量とトラクトグラフィの今後の課題を分かりやすくするために、CSD について考える。CSD では、単一の神経線維束から得られる信号のモデル（response function）を設定し、ボクセル内の信号は線維の方向分布（fiber ODF）上での積分であると考え（図 5）。球面調和関数で表現すると線形になり、response function が既知ならば fiber ODF を効率的に求められる [6]。無論、response function は既知ではないのだが、single fiber population と見做せそうなボクセルを探して、そこから求めた response function で代用する。ここから分かるように、各ボクセルのローカ

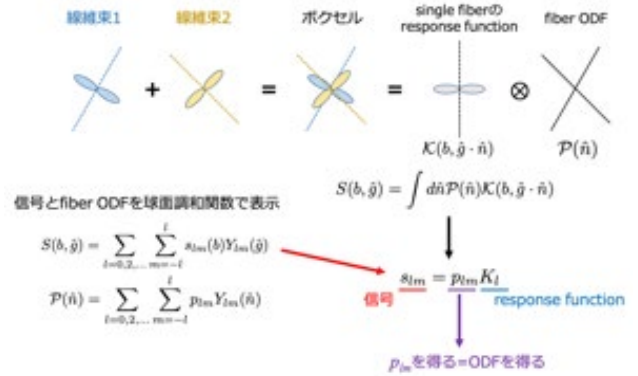


図 5. CSD の概念図

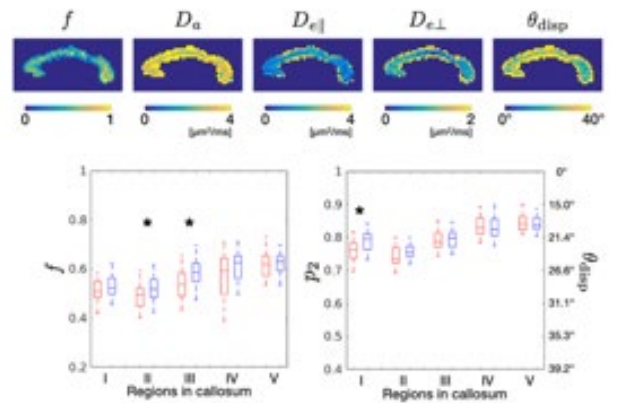


図 6. 脳梁の神経線維密度等の推定.

ルな response function（神経線維密度等がここに含まれる）の推定が、トラクトグラフィの質の向上と組織微細構造イメージングの両方にとって重要な今後の課題である [7]。

神経線維密度を推定する方法として、例えば Neurite Orientation Dispersion and Density Imaging (NODDI) [8] は現在人気のある方法であるが、決して完全ではない。特に、或るパラメータが、全てのボクセルで、全ての被検者で等しい値を取ると仮定して値を固定しており、これには当然批判がある [7,9]。そのパラメータの値が疾患と健常で異なれば、得られた「神経線維密度」が何を見ているのか定かでないからである。この問題に対する解答は残念ながらまだ無い。一つの可能性として、脳梁や脊髄のように、神経線維がほぼ単一の束と考えられる部位に限定すれば、パラメータを固定せずとも解が得られる可能性が

ある[10]。我々は、最近の研究において、大うつ病の DKI データに同手法を応用した[11]。得られたパラメータマップはノイズが多く、解析は脳梁に限定されており、まだまだ実臨床には遠いが、患者群では脳梁の前方部分での神経線維密度の減少と線維方向分布の変化がある可能性が示唆された (図6)。

4. おわりに

MRI ではコイルを冷却し超電導状態を保つため、液体ヘリウムが使用されています。

参考文献

- [1] Voets, NL., et al: Brain white matter fibre tracts: A review of functional neuro-oncological relevance. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry* 2017;88:1017–1025.
- [2] Jensen JH, et al: Diffusional kurtosis imaging: The quantification of non-Gaussian water diffusion by means of magnetic resonance imaging. *Magn Reson Med.* 2005;53(6):1432–1440.
- [3] Van Cauter S, et. Gliomas: Diffusion Kurtosis MR Imaging in Grading. *Radiology.* 2012;263(2):492–501.
- [4] Tuch, DS: Q-ball imaging. *Magn. Reson. Med.* 2004;52:1358–1372.
- [5] Tournier, JD, et al: A. Direct estimation of the fiber orientation density function from diffusion-weighted MRI data using spherical deconvolution. *Neuroimage,* 2004;23:1176–1185.
- [6] Tournier, JD, et al: Robust determination of the fibre orientation distribution in diffusion MRI: Non-negativity constrained super-resolved spherical deconvolution. *Neuroimage.* 2007;35:1459–1472.
- [7] Novikov, DS, et al: Rotationally-invariant mapping of scalar and orientational metrics of neuronal microstructure with diffusion MRI. *Neuroimage* 2018;174:518–538.
- [8] Zhang, H, et. NODDI: Practical in vivo neurite orientation dispersion and density imaging of the human brain. *Neuroimage.* 2012;61:1000–1016.
- [9] Jelescu, IO, et al: Degeneracy in model parameter estimation for multi-compartmental diffusion in neuronal tissue. *NMR Biomed.* 2016;29:33–47.
- [10] Jespersen, SN, et al: Diffusion time dependence of microstructural parameters in fixed spinal cord. *Neuroimage.* 2018;182:329–342.
- [11] Kamiya, K, et al: Diffusional kurtosis imaging and white matter microstructure modeling in a clinical study of major depressive disorder. *NMR Biomed.* 2018;31(7):e3938.

著者紹介



神谷昂平

拡散 MRI

医者になって数式を見るとは思いませんでした。学生の時に勉強すればよかったです。

植物の栄養状態と葉のかたち

農学生命科学研究科 応用生命化学専攻 植物栄養・肥料学

反田 直之

植物の発生はゲノムにプログラムされているが、種子が発芽し一生を過ごす環境は様々である。種の存続には多様な環境下で正常な発生を維持する仕組みが重要である。本稿ではその仕組みの一端を明らかにした研究を紹介する。我々はシロイヌナズナのある変異株において、亜鉛の欠乏が棒状の異常な葉の形成を引き起こすことを発見した。その解析から、葉の形態の異常を引き起こしているのは、不利な栄養環境が引き起こす DNA 損傷であることが示唆された。一連の研究を通して、DNA 損傷の管理が正常な葉の形成に必要であり、それが栄養環境と密接な関係にあることが明らかになった。

1. はじめに

生物の発生過程は遺伝子の緻密な制御によって管理されている。植物が扁平な葉を形成するためには、茎頂分裂組織における葉原基の形成において葉の裏側になる部分と表側になる部分を決定する必要がある(向背軸の決定)。モデル植物であるシロイヌナズナを用いた多くの研究から、向背軸を決定する遺伝子制御のネットワークが明らかになりつつあるが、この自律的な形態形成の過程に外部環境が与える影響についてはいまだ知見が乏しい。

我々は植物栄養学の観点から、植物を取り巻く栄養環境が発生過程に与える影響に着目し、その仕組みの解明を試みた。本稿ではその成果を紹介する。

2. 亜鉛不足と葉の棒状化

植物は 17 種類の元素を必須栄養とする。そのうち亜鉛は多くの酵素の活性に必須であり、その欠乏は葉の黄白化(クロロシス)や矮小化等の発育不全を引き起こす。本研究では亜鉛の欠乏がシロイヌナズナの 26S プロテアソームの変異株において棒状の異常な形態の葉を生じさせる現象に着目した[1]。26S プロテアソームはポリユビキチン標識

された標的タンパク質を選択的に分解するタンパク質複合体で、その変異は特定のタンパク質の分解に異常をきたすことが想定されるが、特定の栄養条件下で葉の形態形成に影響を与える仕組みは不明であった。

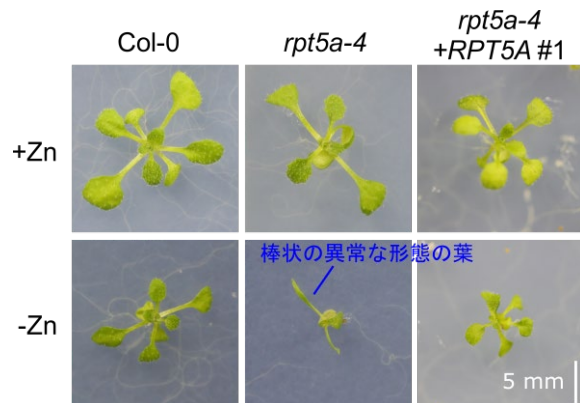


図 1 *rpt5a-4* 変異株における本葉の形成異常

亜鉛濃度の異なる 2 種類の培地で 2 週間栽培した野生型(Col-0)、変異株(*rpt5a-4*)、変異相補系統(*rpt5a-4+RPT5A #1*)の地上部表現型。*rpt5a-4* 変異株は亜鉛欠乏時に棒状の異常な形態の葉を示す個体が見られたが、*rpt5a-4* 変異株に *RPT5A* 遺伝子を導入した変異相補系統では野生型と同様の正常な葉を形成する個体が多く見られた。

(*Scientific Reports* (9): 9369 (2019)より)

図 1 に示すように、26S プロテアソームの変異株 *rpt5a-4* は通常条件(+Zn)では野生型株(Col-0)と類似した形態の葉を形成したが、亜鉛欠乏条件(-Zn)では葉身の無い棒状の異常な形態の葉を形成する個体が高頻度で見られた。葉が棒状になるという現象は、葉の裏表の決定がうまく行かない場合に見られることが知られており、亜鉛欠乏が *rpt5a-4* 変異株において葉の向背軸決定に影響を与えることが示唆された。

3. 亜鉛不足と DNA 損傷

亜鉛は活性酸素種を除去するスーパーオキシドディスムターゼ(SOD)の活性中心に必要であり、亜鉛欠乏条件下での生育不良の主な原因は活性酸素種の蓄積による酸化ストレスであることが示唆されていた[2,3]。さらにこれまでの研究から *rpt5a-4* 変異株は野生型株と比べて亜鉛欠乏条件下での酸化ストレスが高蓄積していることが明らかになっていた[4]。

細胞への活性酸素種の蓄積は様々な分子の酸化を引き起こすが、我々は中でも DNA の切断(DNA 損傷)に着目し、亜鉛欠乏の *rpt5a-4* 変異株における葉の棒状化現象への関与を検証した。

まずコメットアッセイ(comet assay)と呼ばれる DNA 損傷の評価方法を用いて、異常な葉を形成している個体に蓄積している DNA 損傷の程度を評価した。コメットアッセイでは、組織から抽出した核を寒天ゲルを用いて電気泳動、染色し、顕微鏡観察する。無損傷の核は円状の像が観察されるのに対し、DNA の損傷(DNA 鎖の切断)を受けた核はほどけた DNA に由来する尾を引いた像が観察される。この”尾”の程度から、DNA 損傷の程度を評価する。さらに、核の前処理の方法(N/N 法または A/N 法)によって、DNA の 2 本鎖切断(double strand break; DSB)だけでなく、1 本鎖切断(single strand break; SSB)も合わせて検出することができる[5]。

結果として、DSB のみを検出する N/N 法では

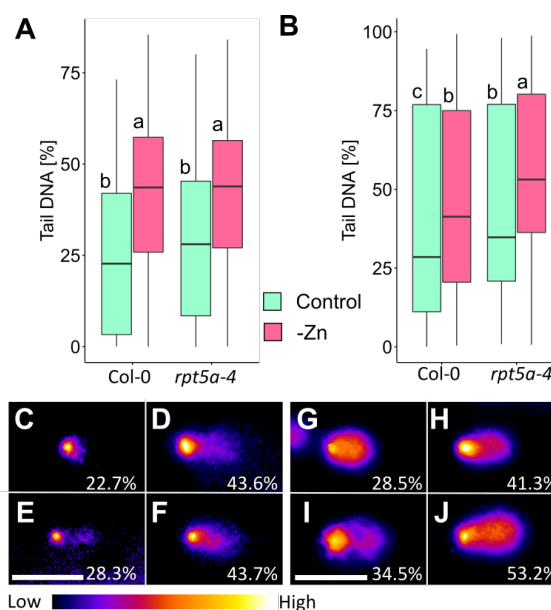


図 2 コメットアッセイによる DNA 損傷蓄積の評価

N/N 法(A)と A/N 法(B)による損傷程度の定量結果。(C-J)それぞれの処理区における代表的な核像を示す。

(Scientific Reports (9): 9369 (2019)より)

亜鉛欠乏処理によって葉に DSB が蓄積することが示されたが、野生型株と変異株の間に有意な差は見られなかった。一方、DSB と SSB の両方を検出する A/N 法では、亜鉛欠乏による DNA 損傷の増加に加え、野生型株よりも *rpt5a-4* 変異株で DNA 損傷の蓄積が高い傾向が見られた(図 2)。すなわち、葉の棒状化が見られる亜鉛欠乏条件下の *rpt5a-4* 変異株では、他の条件よりも SSB が高蓄積していることが示唆された。

4. DNA の損傷が葉の棒状化を引き起こす

亜鉛欠乏条件下の *rpt5a-4* 変異株には SSB が高蓄積していることが明らかになったが、葉の棒状化との因果関係は不明である。この点を明らかにするため、まず DNA 損傷を引き起こすことが知られている他の栄養障害、ホウ素過剰ストレス下[6]において、同様の葉の形成異常がみられるかを

調査した。その結果、*rpt5a-4*変異株において、高濃度(3 mM)のホウ酸を含む培地で育てた際に、亜鉛欠乏時と同様に棒状の葉の形成が観察された。

このことから、*rpt5a-4*変異株に見られる葉の形成異常は、亜鉛の欠乏に特異的な現象ではなく、亜鉛欠乏やホウ酸過剰に引き起こされる共通の二次的な要因が原因であることが示唆された。

さらに、DNA 損傷が葉の形態形成に与える影響より直接的に評価するため、DNA 損傷誘導試薬 Zeocin を培地に投与し、人為的に DNA 損傷を生じさせて葉の形態の観察を行った。その結果、1.3 μ M の Zeocin 処理において、高頻度で *rpt5a-4* 変異株に棒状の葉の形成が観察された。野生型株はこの濃度では葉の形態異常は示さなかったが、さらに高濃度の Zeocin 処理(6.6 μ M)によって、変異株で見られたのと同様の棒状の葉が観察された(図 3)。このことは、DNA 損傷の誘導が棒状の葉の形成に十分条件であることを示している。コメントアッセイによりこれらの処理区の DNA 損傷の蓄積程度を評価すると、変異株が野生型株よりも DNA 損傷、特に SSB の蓄積の程度が高いことが明らかになった(図 D-E)。*rpt5a-4* 変異株が野生型株よりもより低濃度の Zeocin で葉の形成異常が見られたという点と合わせると、この結果は SSB の蓄積が葉の形態異常を引き起こすという仮説を支持する。

5. まとめ

プロテアソームの変異が他の変異との組み合わせによって葉の形態異常を引き起こすことは過去に知られていたが、本研究は栄養ストレスが同様の効果をもたらすことを発見した。さらにその下流で起きる DNA の損傷が、形態異常を引き起こす十分条件であることが明らかになった。これらは単に栄養が欠乏したことによる生育不良の仕組みではなく、発生に重要な軸決定に栄養状態が影響する仕組みを明らかにしたと考えている。

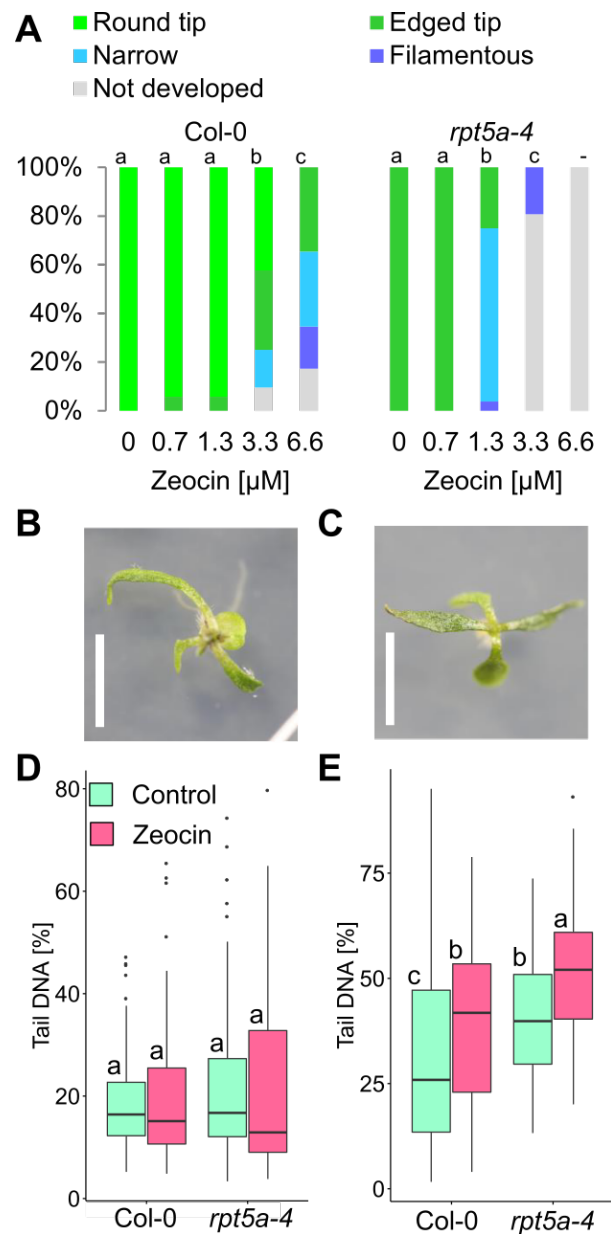


図 3 *rpt5a-4* 変異株における本葉の形成異常

亜鉛濃度の異なる 2 種類の培地で 2 週間栽培した野生型(Col-0)、変異株(*rpt5a-4*)、変異相補系統(*rpt5a-4+RPT5A #1*)の地上部表現型。*rpt5a-4* 変異株は亜鉛欠乏時に棒状の異常な形態の葉を示す個体が見られたが、*rpt5a-4* 変異株に *RPT5A* 遺伝子を導入した変異相補系統では野生型と同様の正常な葉を形成する個体が多く見られた。(Scientific Reports (9): 9369 (2019)より)

6. おわりに

本稿で紹介した研究成果は東京理科大学 理工学部 松永研究室、坂本 卓也 助教との共同研究によって得られたものです。

生物内の情報は絶えず変化しており、ある瞬間の生物情報を捉えるためにはサンプリングと同時に生命活動を停止させる必要があります。サンプリング後の核酸等の抽出操作においても、分解酵素等の働きを止め、あらゆる代謝活動が起こらないようにしておく必要があります。これらの要件に対して、生物サンプルの液体窒素による瞬間凍結・凍結破砕は不可欠な技術です。この点において、本研究の成果は低温センターによる液体窒素の安定供給の下で得られたものです。この場を借りて深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] N. Sotta, T. Sakamoto, S. Matsunaga, T. Fujiwara, Abnormal leaf development of *rpt5a* mutant under zinc deficiency reveals important role of DNA damage alleviation for normal leaf development, *Scientific Reports*. 9 9369 (2019).
- [2] T. Sakamoto, T. Kamiya, K. Sako, J. Yamaguchi, M. Yamagami, T. Fujiwara, *Arabidopsis thaliana* 26S proteasome subunits RPT2a and RPT5a are crucial for zinc deficiency-tolerance, *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 75 561–567 (2011).
- [3] J.A. Tainer, E.D. Getzoff, J.S. Richardson, D.C. Richardson, Structure and mechanism of copper, zinc superoxide dismutase, *Nature*. 306 284 (1983).
- [4] Q. Yu, L. Osborne, Z. Rengel, Micronutrient deficiency changes activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase in tobacco plants, *J. Plant Nutr.* 21 1427-1437 (1998).
- [5] M. Menke, I. Chen, K.J. Angelis, I. Schubert, DNA damage and repair in *Arabidopsis thaliana* as measured by the comet assay after treatment with different classes of genotoxins, *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 493 87–93 (2001).
- [6] T. Sakamoto, Y.T. Inui, S. Uraguchi, T. Yoshizumi, S. Matsunaga, M. Mastui, M. Umeda, K. Fukui, T. Fujiwara, Condensin II alleviates DNA damage and is essential for tolerance of boron overload stress in *Arabidopsis*, *Plant Cell*. 23 3533–3546 (2011).

著者紹介



反田 直之

植物栄養学

植物における栄養の輸送や利用、毒性の仕組みをシステム生物学的に理解したい。

共同利用研究室 研究実績報告

マンガン三核錯体ユニットを含む強磁性シアノ架橋型金属集積体および発光温度計として機能する希土類金属錯体の構築

金属錯体は、金属イオンや配位子の選択により様々な構造や機能性を有する物質の合成が可能である。金属イオンがシアノ基によって架橋されたシアノ架橋型錯体においては、複核のクラスター構造から2次元、3次元のネットワーク構造までの様々な構造体が報告されている。また、シアノ基を介して金属イオン間に比較的大きな超交換相互作用がはたらくため、磁気相転移温度の高い強磁性体を構築することも可能である。当研究室では、これまでに機能性と磁性が相関した物質として、光応答磁性体や湿度応答磁性体、プロトン伝導を示す強磁性体、発光を示す強磁性体などを報告している[1-5]。本研究では、新たに2種類のシアノ架橋型錯体を合成し、その磁気特性および発光特性を明らかにした。マンガン3核錯体がオクタシアノタングステンによって架橋された3次元ネットワーク錯体 $[\text{Mn}_3(4\text{-pyridone})_6]_2[\text{W}(\text{CN})_8]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (錯体 **1**) においては、その特異な結晶構造を明らかにし、フェリ磁性を示すことを明らかにした[6]。Tb 及び Dy がヘキサシアノコバルトによって架橋された2次元層状錯体(錯体 **2**) においては、発光を利用した温度計として機能することを見出した[7]。

1. マンガン三核錯体ユニットを含む強磁性シアノ架橋型金属集積体

錯体 **1** は、 $\text{Cs}_3[\text{W}^{\text{V}}(\text{CN})_8] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ と $\text{Mn}^{\text{II}}\text{Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、4-ヒドロキシピリジン ($\text{C}_5\text{H}_5\text{NO}$, 4-OHpy) を含む水溶液を蒸発させることにより茶色の単結晶として得られた。元素分析によって、本化合物の組成は $\text{Mn}_3[\text{W}(\text{CN})_8]_2(\text{C}_5\text{H}_5\text{NO})_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ であることが明らかになった。赤外吸収及び紫外可視吸収スペクトルからマンガンとタングステンの価数がそれぞれ

2価と5価であり、4-ヒドロキシピリジンが互変異性体である4-ピリドンになっていることが示唆された。

単結晶 X 線構造解析により、錯体 **1** の結晶構造は単斜晶系で空間群 $P2_1/n$ (格子定数 $a = 11.5472(3)$ Å, $b = 16.2904(6)$ Å, $c = 16.1949(5)$ Å, $\beta = 110.419(8)^\circ$) に属していることが明らかになった。 W^{V} 周りの配位構造は8つのシアノ基のC原子が配位した8配位ドデカヘドロン (D_{2d}) である。3つのシアノ基は Mn1 サイトと架橋しており、5つのシアノ基は非架橋である。また、3つのマンガンイオンと6つの4-ピリドンが3核錯体ユニット $[\text{Mn}_3(4\text{-ピリドン})_6]^{6+}$ を形成しておりマンガンイオンは2種類の異なるサイト(Mn1 と Mn2)を有していた。錯体 **1** の結晶構造を図1に示す。シアノ基によって架橋された W と Mn1 によって形成された擬2次元平面構造を、Mn2 サイトが Mn1 同士を架橋することによって3次元ネットワーク構造を形成していた。水分子は4-ピリドンや非架橋のシアノ基と水素結合を形成していた。

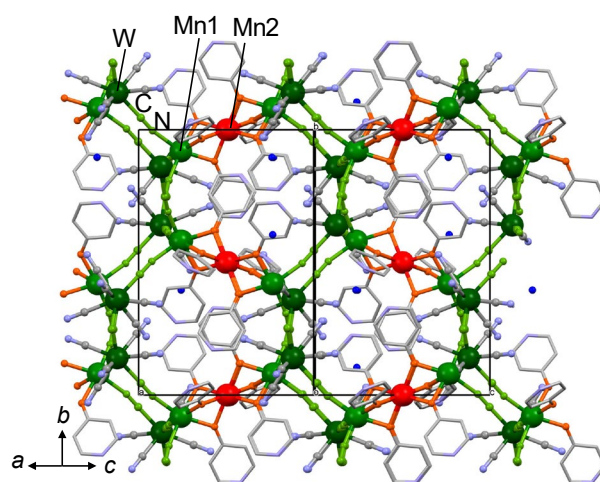


図1. 錯体 **1** の結晶構造.

3つのマンガンイオンが配位子 L によって架橋されて直線状に並んだ $[\text{Mn}_3\text{L}_x]$ 錯体の報告例は少なく、その多くは多座配位子を含む 3 核錯体である。一方、錯体 **1** の $[\text{Mn}_3(4\text{-ピリドン})_6]^{6+}$ ユニットは 4-ピリドンという単座配位子のみでできているだけでなく、そのマンガン 3 核錯体がオクタシアノタングステン錯体によって架橋されたネットワーク構造を形成している新しい構造である。また、本錯体は、上述の複雑な構造を持つにもかかわらず、原料金属塩および配位子を全て水に溶かし蒸散させるだけで得られるため、合成手法の観点からも興味深い磁性化合物である。

錯体 **1** の磁気特性は SQUID 磁束計を用いて測定された。図 2 に錯体 **1** の 5000 Oe における磁化率と温度の積 ($\chi_M T$) の温度依存性を示す。300 K における $\chi_M T$ 値は $11.8 \text{ K cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ であり、3つの Mn^{II} ($S = 5/2$) と 2つの W^{V} ($S = 1/2$) から計算される値である $13.9 \text{ K cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ よりも小さい。このことは室温における反強磁性的な相互作用の存在を示唆している。磁気的な相互作用の大きさを見積もるために、分子磁場理論に基づいた $\chi_M T$ - T プロットの常磁性領域 (23–300 K) のフィッティングを試みた。錯体 **1** には W–Mn1 間 (J_1) と Mn1–Mn2 間 (J_2)、Mn1–Mn1 間 (J_3) の 3 種類の磁気的な相互作用が考えられるが、 J_3 は金属中心間の距離が十分に離れていることから J_1, J_2 と比べて無視できるほど小さいとして 0 とした。分子磁場理論に基づくフィッティングの結果、 $J_1 = -3.9 \text{ cm}^{-1}$ 、 $J_2 = -5.9 \text{ cm}^{-1}$ のときに計算値が実験値と良い一致を示した。Mn1–Mn2 間の磁気的相互作用の大きさは類似の構造を有するマンガン錯体と同程度の値であった。

10 Oe における磁場中冷却磁化曲線では、20 K において自発磁化を示した (図 3a)。2 K における磁化-磁場曲線を図 3b に示す。飽和磁化の値は $3.1 \mu_B$ であり、この値は 2つの Mn^{II} (Mn1 サイト) のスピンの対して 2つの W^{V} と 1つの Mn^{II} (Mn2 サイト) のスピンの反平行に整列したときの計算値 $3.0 \mu_B$ と一致する。したがって、本化合物は磁気相転

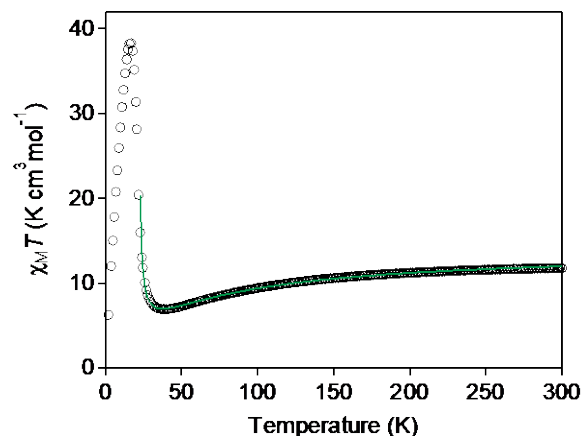


図 2. 錯体 **1** の 5000 Oe における $\chi_M T$ - T プロット. 緑色の曲線は分子磁場理論に基づくフィッティング曲線.

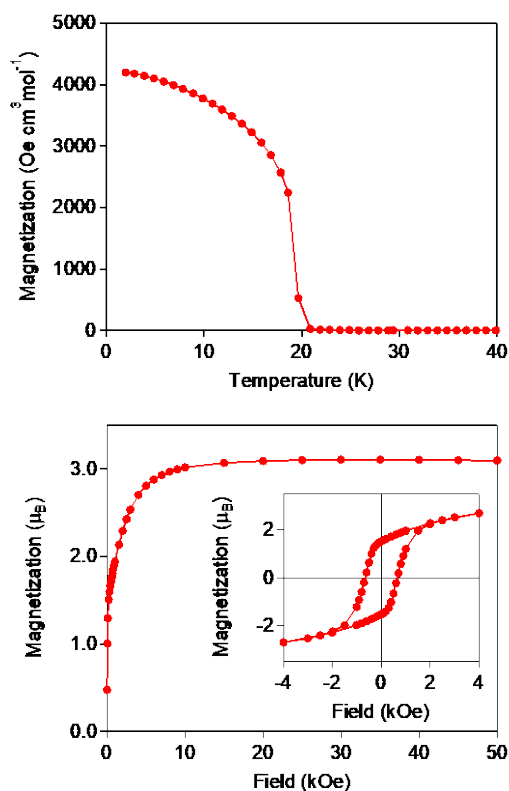


図 3. 錯体 **1** の低温における磁気特性. (a) 外部磁場 10 Oe における磁場中冷却磁化曲線, (b) 2 K における磁化-磁場曲線. 差し込みは 2 K における磁気ヒステリシス曲線.

移温度が 20 K のフェリ磁性体であることが明らかになった。この結果は、 $\chi_M T$ - T プロットのフィッティングの結果を支持している。また、2 K における保磁力は 600 Oe であった。(図 3b)

2. 発光色や発光強度比の変化を利用した温度計として機能する希土類金属錯体

目的のシアノ架橋錯体 $\{[\text{Tb}(\text{4-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_3][\text{Co}(\text{CN})_6]\} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (錯体 **2**) と $\{[\text{Tb}_{0.5}\text{Dy}_{0.5}(\text{4-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_3][\text{Co}(\text{CN})_6]\} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (錯体 **3**) は、塩基性溶液中で $\text{K}_3[\text{Co}(\text{CN})_6]$ 、4-ヒドロキシピリジン、 TbCl_3 及び DyCl_3 を混合することにより無色の単結晶として得られた。単結晶 X 線構造解析により、錯体 **2** の結晶構造は単斜晶系で空間群 $P2_1/m$ に属しており、シアノ基で架橋された金属イオンが 2 次元シートを形成し、それらが積層した層状構造を有していた (図 4)。各層は、 $[\text{Tb}(\text{4-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_3]^{3+}$ と $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$ がシアノ基で架橋され交互に配列した六員環からなる網目状のネットワーク構造を形成していた。Dy の周りは 2 つの 4-OHpy の酸素原子と 3 つの水分子の酸素原子、3 つのシアノ基の窒素原子が配位しており、8 配位のドデカヘドロン型の配位構造であった。層間には、配位水や非架橋のシアノ基の水素結合や 4-OHpy とシアノ基の間の π - π 相互作用がはたらき、結晶構造を安定化している。また、粉末 X 線構造解析により錯体 **3** は錯体 **2** と同形構造を有しており、Dy と Tb はそれぞれ 1:1 の占有率で同一の結晶構造内に存在することが示唆された。

錯体 **2** と錯体 **3** の発光スペクトルを室温と液体窒素温度(77 K)で測定した。室温では、錯体 **2**、錯体 **3** ともに励起波長 362 nm において 4-OHpy (${}^3\text{T}_1 \rightarrow {}^1\text{S}_0$) に由来する青色の発光を示すが、励起波長を

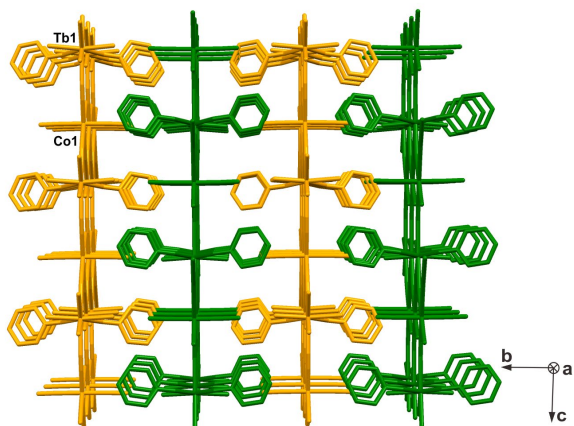


図 4. 錯体 **2** の結晶構造。

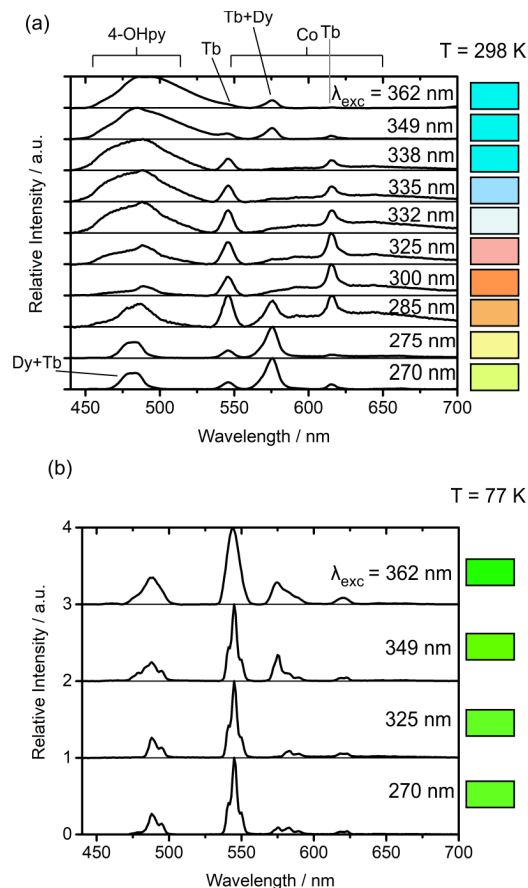


図 5. 錯体 **3** の室温(a)と 77 K(b)における発光スペクトル。

短くするにつれて、 Tb^{III} や Dy^{III} 、 $[\text{Co}(\text{CN})_6]^{3-}$ に由来する発光によって白色、オレンジ色、黄緑色と発光の色が変化した (図 5a)。一方、77 K においては、 Dy^{III} や Tb^{III} に由来する緑色の発光を示した (図 5b)。

また、錯体 **2** と錯体 **3** の励起波長 325 nm における発光スペクトルの温度依存性(300–70 K)を測定したところ、錯体 **2** は発光色の温度依存性を示し、その色は 300 K での赤橙色から 200 K の黄色、160 K 以下での緑色まで変化した。これは、温度が下がるとともに無放射緩和が妨げられることで Tb^{III} 由来の緑色発光が増加するのに対して、Co から Tb へのエネルギー遷移が大きくなり Co^{III} 由来の赤色発光が消失するためである。錯体 **3** においても 300 K から 160 K の間で赤橙色から緑色への発光色の変化が観測された。また、励起波長 362 nm においては 120 から 300 K の間で発光の色の変化が観測された。以上の結果から、錯体 **2** と錯体 **3** は発光

色の変化に基づき温度を決定できることが示唆された。

さらに、錯体 **3** において励起波長 270 nm における発光スペクトルの変化を調べた。励起波長 270 nm のとき、室温においても 545 nm (Tb^{III} の ⁵D₄ → ⁷D₅) と 576 nm (Dy^{III} の ⁴F_{9/2} → ⁶H_{13/2}) において容易に検出可能なピークが観測された。545 nm と 576 nm の発光強度の温度依存性を図 6a に示す。絶対温度を決定するためのパラメーターとして、Tb 由来の 545 nm の発光強度 I_{Tb} と Dy 由来の 576 nm の発光強度 I_{Dy} の比 $\Delta = I_{Tb}/I_{Dy}$ を定義すると、 Δ は 100–300 K の範囲で図 6b のような強い温度依存性を示した。この強度比 Δ の温度依存性は古典的な Mott-Seitz モデルを用いて次の式で表される。

$$\Delta(T) = \frac{\Delta_0}{1 + \alpha_1 \exp\left(\frac{\Delta E_1}{k_B T}\right) + \alpha_2 \exp\left(\frac{\Delta E_2}{k_B T}\right)}$$

ここで、 Δ_0 は 0 K における Δ 、 α は無放射速度 W_0 と放射速度 W_R の比、 ΔE は無放射過程の活性化エネルギーを表す。励起波長 270 nm におけるプロットは $\Delta_0 = 18.2(7)$ 、 $\alpha_1 = 2.2(9)$ 、 $\Delta E_1/k_B = 18.8(9)$ K、 $\alpha_2 = 1.6(7)$ 、 $\Delta E_2/k_B = 970(80)$ K でよくフィットされた。フィッティングにより得られた温度 T の関数 $\Delta(T)$ が温度の校正曲線として利用できる。温度の感度 S_T と温度の不確かさ δT をそれぞれ、 $S_T = (\partial \Delta / \partial T) / \Delta$ 、 $\delta T = (\delta \Delta / \Delta) / S_T$ と定義する。特に、励起波長 270 nm においては、120–200 K の範囲で $S_T > 1\% \text{ K}^{-1}$ 、 $\delta T < 1$ K となり、精度よく温度を求めることが可能である。以上より、錯体 **3** は Tb と Dy の発光強度の比を利用した温度計として有用であると考えられる。

本研究では、4-ヒドロキシピリジンを有機配位子として用いて、金属イオンの組み合わせの異なる 2 種類のシアノ架橋錯体の合成に成功した。 $[\text{Mn}_3(4\text{-pyridone})_6][\text{W}(\text{CN})_8]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は、4-ヒドロキシピリジンの互変異性体である 4-ピリドンが 3 つのマンガニオンを直線的に架橋した 3 核錯体構造を含む 3 次元ネットワーク構造を有しており、磁気転移温度 20 K のフェリ磁性体であることが明らかになった。また、分子磁場理論に基づくフィッティングにより、W–Mn1 間と Mn1–Mn2 間の 2 種

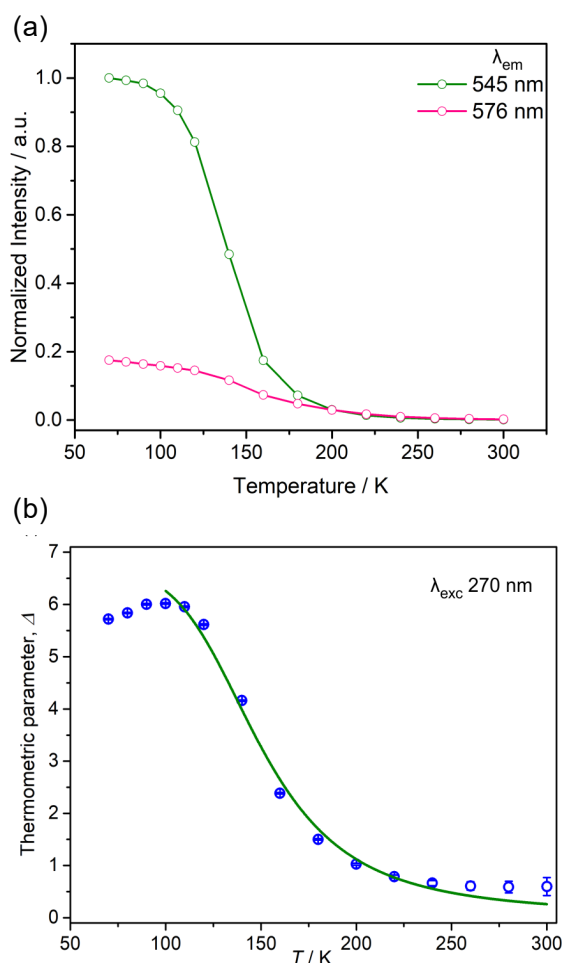


図 6. 励起波長 270 nm における 545 nm と 576 nm のピーク強度の温度依存性. (b) Δ の温度依存性のプロット. 緑色の曲線は Mott-Seitz モデルに基づくフィッティングの結果。

類の磁気相互作用の大きさを見積もることができた。2 次元層状構造を有する $\{[\text{Tb}(4\text{-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_3][\text{Co}(\text{CN})_6]\} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ と $\{[\text{Tb}_{0.5}\text{Dy}_{0.5}(4\text{-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_3][\text{Co}(\text{CN})_6]\} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ においては、複数の発光部位を有することによる発光色の温度変化を温度計として利用できることを明らかにした。さらに、 $\{[\text{Tb}_{0.5}\text{Dy}_{0.5}(4\text{-OHpy})_2(\text{H}_2\text{O})_3][\text{Co}(\text{CN})_6]\} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ は Dy と Tb の発光強度の比を利用することにより、感度の良い温度計として機能することを見出した。

- [1] S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, and H. Tokoro, *Nat. Photonics* **8**, 65 (2014).
- [2] Y. Miyamoto, T. Nasu, N. Ozaki, Y. Umetsu, H. Tokoro, K. Nakabayashi, and S. Ohkoshi, *Dalton*

- Trans. **45**, 19249 (2016).
- [3] S. Ohkoshi, K. Arai, Y. Sato, and K. Hashimoto, *Nat. Mater.* **3**, 857 (2004).
- [4] S. Ohkoshi, K. Nakagawa, K. Tomono, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, and H. Tokoro, *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 6620 (2010).
- [5] S. Chorazy, K. Nakabayashi, S. Ohkoshi, and B. Sieklucka, *Chem. Mater.* **26**, 4072 (2014).
- [6] M. Komine, K. Nakabayashi, O. Stefańczyk, and S. Ohkoshi, *Inorg. Chim. Acta* **488**, 120 (2019).
- [7] K. Kumar, S. Chorazy, K. Nakabayashi, H. Sato, B. Sieklucka, and S. Ohkoshi, *J. Mater. Chem. C* **6**, 8372 (2018).

● 工学系研究科

電気系工学専攻・スピントロニクス学術連携研究教育センター 田中研究室

スピントロニクス材料とデバイスの研究

スピン軌道トルクを用いて単一の強磁性半導体薄膜 に電流を流すことによるきわめて高効率の磁化反転 [1]

強磁性金属 (FM) 層/非磁性金属 (NM) 層から成る 2 層構造において、(相対論的量子力学の効果である) スピン軌道相互作用が強い NM 層に電流を流し、スピンホール効果によりスピン流を発生させそのスピン流を FM 層に注入することによる FM 層を磁化反転させる技術(スピン軌道トルク (spin-orbit torque, SOT) による磁化反転)が、不揮発性メモリ等のスピントロニクスデバイスにおいて書き込み技術として有望視されている。本研究では、エピタキシャル成長により垂直磁気異方性をもつ単一の強磁性半導体 GaMnAs 薄膜を InGaAs/GaAs 基板上に形成し、GaMnAs 薄膜に電流を流すことによりきわめて高効率の磁化反転に成功した(図1)。これは単一の磁性層でありながら GaMnAs

中の Dresselhaus 型スピン軌道相互作用により電流がスピン流に変換され、スピン軌道トルクが GaMnAs の磁化に働くことによる磁化反転が起こったものと理解される。磁化反転のために必要な電流密度 J_c は $3.43 \times 10^5 \text{ A cm}^{-2}$ であり、従来の SOT 磁化反転の報告値よりも約 2 桁も小さく、低消費電力スピントロニクスデバイスの実現に向けて重要な一歩である。

Si ベースの Spin-MOSFET 作製：ソース電極/半導体チャネル接合と半導体チャネル/ドレイン電極接合における高効率なスピン偏極電子伝導のための設計指針の確立 [2][3]

Si ベースの Spin-MOSFET 作製に向けて、ソース電極/半導体チャネル接合と半導体チャネル/ドレイン電極接合における高効率なスピン偏極電子伝導を行うための設計と作製および評価技術を確立することを

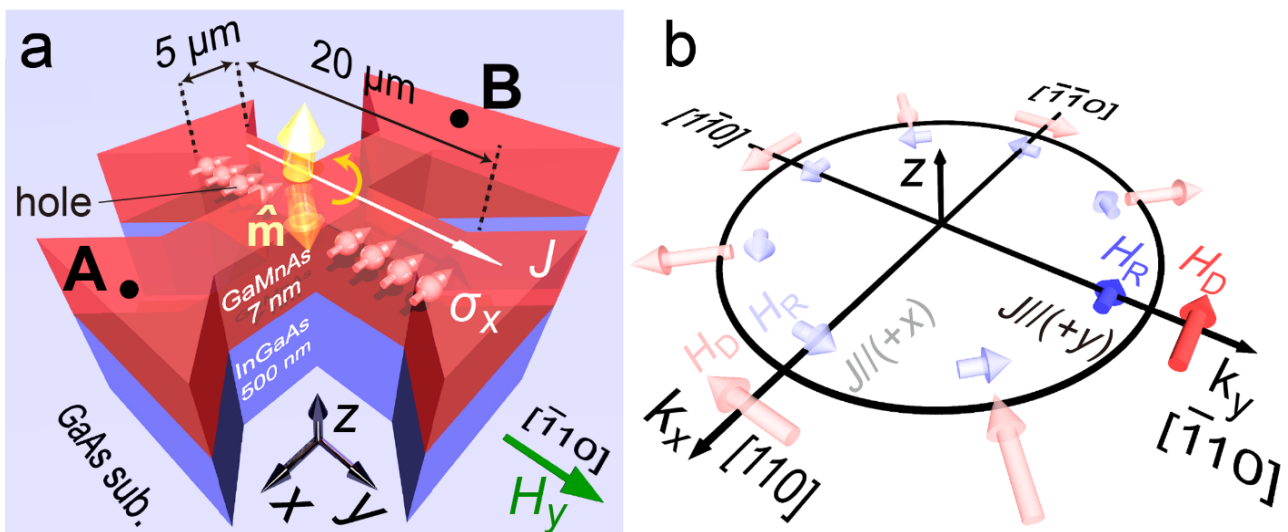


図1 (a) 単一の強磁性半導体 GaMnAs 薄膜(垂直磁化膜)に電流を流すことにより、低電流密度で磁化反転に成功、(b) GaMnAs 中のスピン軌道相互作用によるキャリアの波数ベクトルとスピンの関係。HR は Rashba 型、HD は Dresselhaus 型スピン軌道相互作用による有効磁場を表す。

目的とした研究を行った。具体的な接合構造は強磁性体 (Fe)/マグネシウム (Mg)/トンネル障壁層/半導体 (Si) 基板であり、トンネル障壁層は SiO_xN_y と MgO/SiO_x の 2 種類とした。その結果、(1) Si-CMOS 技術と整合性の良いアモルファス SiO_xN_y 障壁層はスピン注入に有望な材料であること、(2) 薄い (~1 nm) SiO_x を MgO と Si の間に挿入することによりトンネル障壁/Si 界面準位密度を低減することが高効率スピン注入に有効であること、を初めて定量的に明らかにした(図2)。

(1) SiO_xN_y は真空チャンバーにおいて Si 基板を直接酸化することによって作製した。この手法は Si 集積デバイス技術と整合性の良い特徴を持つ。 SiO_xN_y はアモルファスであることが透過型電子顕微鏡観察から確認された。前年度に見出された dead layer を抑制するための Mg 層の挿入によって、Fe の磁性は劣化していないことが確認された。次に、デバイス構造を作製して、Fe/Mg/SiO_xN_y/n⁺-Si 接合を用いたスピニングナルを 3 端子測定法によって取得して(図2(a)(b)) それらを解析することにより、Si 中の電子のスピン偏極率 P_S とスピン緩和時間 τ_S を見積もった。4 K における P_S は、広く用いられている MgO 障壁層とほぼ変わらない数値であり、アモルファス SiO_xN_y 障壁層でも良好なスピン注入が可能であることを示した。一方、 τ_S は、前年度に MgO 障壁層を用いて得られた値の 2 倍程度と非常に大きいことを明らかにした。このことから、

トンネル接合における障壁層/Si 界面状態が、 τ_S に影響を与えていることが示唆される。温度を上昇すると P_S と τ_S 共に単調減少したが、300 K においても明瞭なシグナルが得られ、スピン注入が確認された。以上のことから、アモルファス SiO_xN_y 障壁層は、スピン注入に有望な材料であることを示した。

(2) Fe(3 nm)/Mg(1 nm)/MgO($d_{\text{MgO}}=1-1.5$ nm)/SiO_x/Si(001)トンネル接合を用い、プラズマ酸化時間 $t_{\text{OX}}=0, 1, 3$ min によって SiO_x を制御し、特にスピニングナルの t_{OX} 依存性によって高効率なスピン偏極電子伝導を行う設計指針を得た。具体的には、 t_{OX} によって変化する MgO/SiO_x/Si 界面の界面準位密度 D_{it} をコンダクタンス法によって定量的に見積もり、スピン注入効率の向上が D_{it} の低減と相関を持っていることを示した。さらに、最適な d_{MgO} と t_{OX} の条件ではトンネル接合内の Fe 電極の 93% に相当するスピン偏極率を持つ電子を Si 中に生成することに成功した。この効率は世界最高値である。この実験結果により、トンネル障壁/Si 界面準位密度の低減が効率の良いスピン注入のために不可欠であり、この設計指針に従ってスピン注入源を作製する必要があることを明らかにした。

MgOトンネル障壁層は前年度に研究を行った材料であるが、今年度は高いスピン注入効率を目指し、MgO/Si 界面に SiO_x を挿入することで界面準位密度 D_{it} を低減して、スピン注入効率 η と D_{it} の関係を明らかにした。強磁性トンネル接合中において電子のスピン

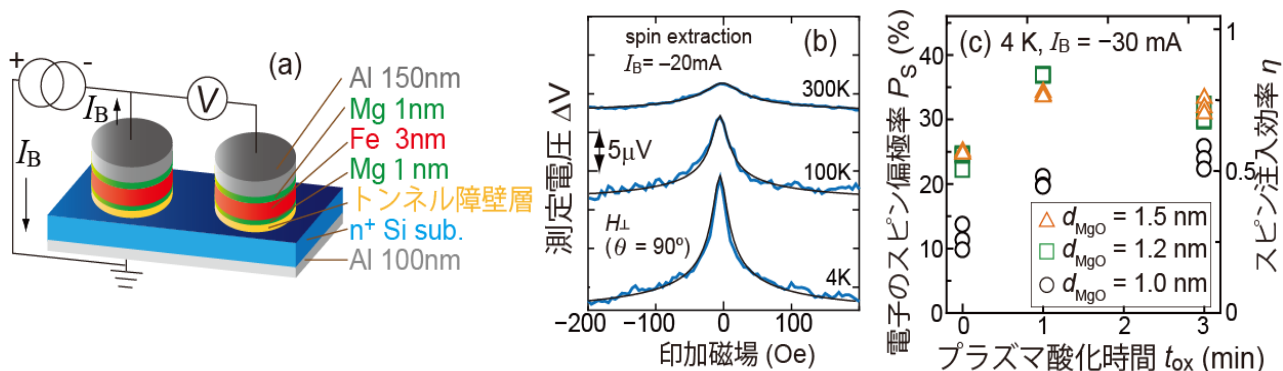


図2 (a) 磁性トンネル接合とスピン注入シグナルの測定方法。トンネル障壁の部分に SiO_xN_y あるいは MgO/SiO_x を用いた。(b) SiO_xN_y を用いた場合のスピン注入シグナルの温度依存性。300 K においても明瞭なシグナルが得られた。(c) MgO/SiO_x を用いた場合の RF プラズマ酸化時間 $t_{\text{OX}} (=0, 1, 3$ min) と電子のスピン偏極率 P_S 、スピン注入効率 η の関係。様々な MgO 層膜厚 d_{MgO} に関して測定を行ない、 $t_{\text{OX}}=1$ min, $d_{\text{MgO}}=1.2$ nm の時にスピン注入効率 η の最大値を得た。

偏極を決定づけるのは Fe であるため、そのスピン偏極率 P_{FM} ($= 43\%$)を用いて $\eta = P_S/P_{FM}$ と定義した。 $\eta = 1$ の場合が理想的なスピン注入であり、トンネル接合内でスピントリップがないことを示す。真空チャンバー内で Si 基板上にアモルファス MgO 層を堆積して、その直後に MgO 層上からの RF プラズマ酸化により SiO_x を MgO/Si 界面中に形成した。プラズマ酸化時間 $t_{OX} = 0, 1, 3$ min とした。 $t_{OX} = 0$ の時には SiO_x がなく、 $t_{OX} = 1, 3$ min の場合には SiO_x が存在することを X 線光電子分光と透過型電子顕微鏡像により確認した。コンダクタンス法により見積もった D_{it} は、 $t_{OX} = 0$ min から 1 min へ増やすと低減し、 $t_{OX} = 1$ min から 3 min へ増やすと若干増加した。4 K において見積もられた P_S の t_{OX} 依存性は D_{it} と相関があり D_{it} が低いほど P_S が高く、 $t_{OX} = 1$ min において最大値 $\eta = 0.93$ が得られた (図2(c))。このスピン注入効率はほぼ理想値であり、トンネル障壁/Si 界面準位密度を低減することが、高効率スピン注入のためにきわめて重要であることを初めて定量的に明らかにした。

高性能スピン電界効果型トランジスタの実現のためには、デバイス動作の基礎的機構の解明と作製技術の確立が必要である。本年度は、強磁性ソース・ドレイン/半導体チャネル接合界面を介したスピン偏極電子伝導の高効率化をはかるため、強磁性ソース・ドレイン/半導体チャネル接合の設計と作製、界面形成技術の研究を行った。本研究によって、強磁性ソース・ドレイン/半導体チャネル接合界面を介したスピン偏極電子伝導の物理の解明、接合の設計と作製技術、特にデバイス動作に不可欠な高効率スピン注入のための接合界面形成技術が飛躍的に進展した。

新しいn型強磁性半導体(In,Fe)Sb の作製とその基本物性の解明、強磁性半導体の新しいデザインルールの創出 [4]

室温以上の高いキュリー温度 T_C をもつ新しい n 型強磁性半導体(In,Fe)Sb の作製に初めて成功し、その基本物性を明らかにした。図3(a)に分子線エピタキシー (MBE) で成長した厚さ 15 nm の(InFe)Sb 薄膜(Fe 濃度 16%)の断面透過型電子顕微鏡(TEM)格子像および

透過電子線回折(TED)像、図3(b)に同薄膜のエネルギー分散型 X 線分光法(EDX)による元素分布を示す。閃亜鉛型結晶構造を保ったまま InSb に高濃度 (16%) の Fe を添加できることがわかった。また、Fe 濃度 16% の試料において、 T_C が 335 K に達し、(GaFe)Sb よりも少ない鉄濃度で室温強磁性が実現できた。また、Mn 系強磁性半導体の研究で標準理論とされてきた Mean-field Zener モデルによると、1) n 型強磁性半導体においては、s-d 交換相互作用が弱いため、 T_C を 1 K 以上にはできない、2) p 型強磁性半導体において高い T_C を得るためには、禁制帯幅が大きいワイドギャップ半導体を使わなければならない、と考えられてきた。これに対して、図4に示すように、鉄系強磁性半導体の T_C は、Mean-field Zener モデルの理論予測とは異なり対照的である。すなわち、鉄系強磁性半導体では、n 型強磁性半導体が可能だけでなく、その T_C は半導体の禁制帯幅が小さくなればなるほど高くなる傾向がある(本研究で実現した室温強磁性半導体 n 型(InFe)Sb と p 型(GaFe)Sb はこの傾向を示す)。このことは強磁性半導体において長く信じられてきた Mean-field Zener 標準モデルとは異なる新しい設計モデルの必要性を意味する。

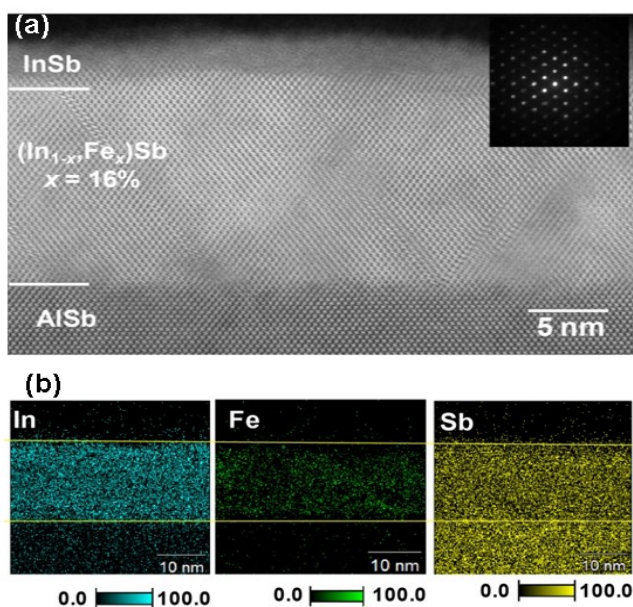


図3 厚さ 15 nm の(In,Fe)Sb 薄膜(Fe 濃度 16%)の (a)断面 TEM 格子像、(b)EDX による In, Fe, Sb の分布。

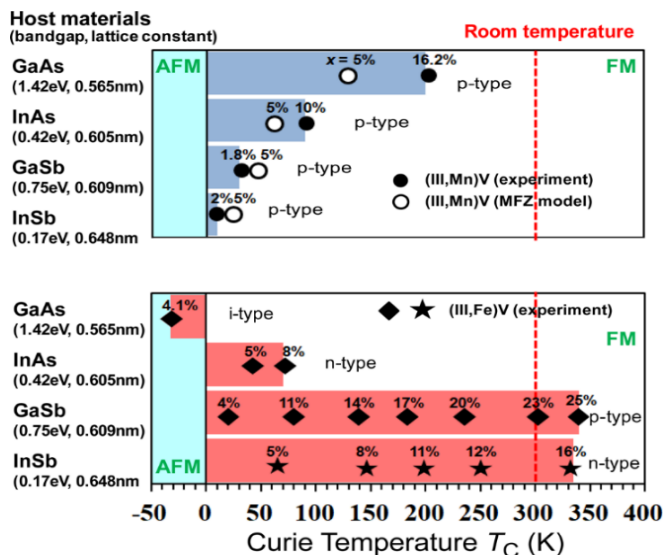


図4 Mn系強磁性半導体(上図)および鉄(Fe)系強磁性半導体(下図)のキュリー温度 T_C : ●、◆、★は実験値、○は平均場 Zener モデルによる理論値。各図とも母体材料の禁制帯幅 E_g が広い半導体から狭い半導体まで並べてある。

以上、2018年度に共同利用研究室で行った代表的研究成果を述べたが、他の研究成果は Ref.[5]以下にて発表した。

(文責：田中雅明)

発表文献

[1] M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, T. Kanaki, H. Yamasaki, S. Ohya and M. Tanaka, "Efficient full spin-orbit torque switching in a single layer of a perpendicularly magnetized single-crystalline ferromagnet", Nature Commun., in press.

[2] Ryosho Nakane, Takato Hada, Shoichi Sato, and Masaaki Tanaka, "Spin transport and spin accumulation signals in Si studied in tunnel junctions with a Fe/Mg ferromagnetic multilayer and an amorphous SiO_xN_y tunnel barrier", Appl. Phys. Lett. **112**, pp.182404/1-4 (2018).

[3] Ryosho Nakane, Mitsuki Ichihara, Shoichi Sato, and Masaaki Tanaka, "Nearly ideal spin tunneling efficiency in Fe/Mg/MgO/ SiO_x/n^+ -Si(001) junctions", Phys. Rev. Materials **3**, pp. 024411/1-9 (2019).

[4] Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, Le Duc Anh,

and Masaaki Tanaka, "High-temperature ferromagnetism in a new n-type Fe-doped ferromagnetic semiconductor (In,Fe)Sb", Applied Physics Express **11**, pp.063005/1-4 (2018).

[5] Taketomo Nakamura, Le Duc Anh, Yoshiaki Hashimoto, Yu Iwasaki, Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka, and Shingo Katsumoto, "Proximity-Induced Superconductivity in a Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series **969**, pp.012036/1-5 (2018).

[6] Ryosho Nakane, Takato Hada, Shoichi Sato, and Masaaki Tanaka, "Spin transport and spin accumulation signals in Si studied in tunnel junctions with a Fe/Mg ferromagnetic multilayer and an amorphous SiO_xN_y tunnel barrier", Appl. Phys. Lett. **112**, pp.182404/1-4 (2018).

[7] Cong Tinh Bui, Christina A. C. Garcia, Nguyen Thanh Tu, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai, "Planar Nernst Effect and Mott Relation in (In,Fe)Sb Ferromagnetic Semiconductor", J. Appl. Phys. **123**, pp.175102/1-7 (2018). *Editors Pick and Featured Article in Journal of Applied Physics.

[8] Yoshisuke Ban, Yuki K. Wakabayashi, Ryosho Nakane, and Masaaki Tanaka, "Impurity band conduction in group-IV ferromagnetic semiconductor GeFe with nanoscale fluctuation in Fe concentration", J. Appl. Phys. **124**, pp.113902/1-11 (2018).

[9] Yuki K. Wakabayashi, Yosuke Nonaka, Yukiharu Takeda, Shoya Sakamoto, Keisuke Ikeda, Zhendong Chi, Goro Shibata, Arata Tanaka, Yuji Saitoh, Hiroshi Yamagami, Masaaki Tanaka, Atsushi Fujimori, and Ryosho Nakane, "Cation distribution and magnetic properties in ultrathin $(\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0-1$) layers on Si(111) studied by soft X-ray magnetic circular dichroism", Phys. Rev. Materials **2**, pp.104416/1-12 (2018).

[10] Shobhit Goel, Le Duc Anh, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka, "Ferromagnetic resonance and control of magnetic anisotropy by epitaxial strain in ferromagnetic semiconductor $(\text{Ga}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{Sb}$ at room temperature", Phys. Rev. B **99**, pp.014431/1-7 (2019).

- [11] Kento Nishijima, Nguyen Thanh Tu, Masaaki Tanaka, and Pham Nam Hai, "Fe delta-doped (In,Fe)Sb ferromagnetic semiconductor thin films for magnetic-field sensors with ultrahigh Hall sensitivity", *J. Crystal Growth* **511**, pp.127–131 (2019).
- [12] Karumuri Sriharsha, Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Shobhit Goel, and Masaaki Tanaka, "Magneto-optical spectra and the presence of an impurity band in p-type ferromagnetic semiconductor (Ga,Fe)Sb with high Curie temperature", *APL Materials* **7**, pp.021105/1–6 (2019).
- [13] Ryosho Nakane, Mitsuki Ichihara, Shoichi Sato, and Masaaki Tanaka, "Nearly ideal spin tunneling efficiency in Fe/Mg/MgO/SiO₂/n⁺-Si(001) junctions", *Phys. Rev. Materials* **3**, pp.024411/1–9 (2019).
- [14] Taketomo Nakamura, Le Duc Anh, Yoshiaki Hashimoto, Shinobu Ohya, Masaaki Tanaka, and Shingo Katsumoto, "Spin triplet superconductive proximity effect in a ferromagnetic semiconductor", *Phys. Rev. Lett.* **122**, pp.107001/1–6 (2019).
- [15] Shoichi Sato, Mitsuki Ichihara, Masaaki Tanaka, and Ryosho Nakane, "Electron spin and momentum lifetimes in two-dimensional Si accumulation channels: Demonstration of Schottky-barrier spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistors at room temperature", *Phys. Rev. B* **99**, pp.165301/1–9 (2019).
- [16] Hiep Duong Dinh, Masaaki Tanaka, and Hai Nam Pham, "Lateral silicon spin-valve devices with large spin-dependent magnetoresistance and output voltage", *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* **10**, pp.025001/1–8 (2019).
- [17] Shingo Kaneta, Le Duc Anh, Karumuri Sriharsha, and Masaaki Tanaka, "Observation of quantum size effect at the conduction band bottom of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As thin films", *Appl. Phys. Exp.*, in press.
- [18] Masaaki Tanaka, "Ferromagnet/semiconductor heterostructures and nanostructures grown by molecular beam epitaxy", Chapter 23, *Molecular Beam Epitaxy*, Wiley, in press.
- [19] 田中雅明, 「強磁性半導体とスピントロニクス」, *パリティ* Vol. **33**, No.6, pp.11–21, 2018年6月号.
- [20] Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, 田中雅明, 「鉄系強磁性半導体の創製とデバイス応用」, *応用物理* 第 **87** 巻第 10 号 pp.754–758 (2018年10月号) : Pham Nam Hai, Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, and Masaaki Tanaka, "Fe-doped ferromagnetic semiconductors and their device applications", *Oyo Buturi*, Vol. **87**, No.10, pp.754–758 (2018).

電子スピン自由度を活かした機能性素子の開拓

1. 背景

今日のエレクトロニクス社会における高度な情報処理技術は、主に半導体テクノロジーによって支えられている。半導体技術においては、電子の電荷の性質が用いられている。しかし、半導体デバイスは高速の不揮発記憶ができず、電源を切ると情報が失われてしまう。そのため、記憶を“維持”するためだけに大量の電力が用いられている。このような待機電力の問題は、今後、人工知能やIoTがますます普及するにつれて深刻化することが予想されている。一方で、電子にはスピンという自由度が存在している。今まで、この性質はエレクトロニクスにおいては積極的に利用されてこなかった。スピン自由度を取り込むことを目指す研究分野であるスピントロニクスは、半導体のエネルギー消費を大幅に低減できる分野として期待されている。例えば、強磁性体から半導体にスピンを注入することにより動作するスピントランジスタ (Fig. 1) が実現できれば、情報を強磁性体の磁化を用いて不揮発的に記録できるようになる。本研究では、スピントランジスタの一つとして提案されている Spin MOSFET¹ と呼ばれる型のスピントランジスタの実現を目指してきた。このデバイスは、ソースとドレインが強磁性体でできており、これらの磁化の相対的な向きにより電流値つまり増幅率が変わるデバイスで、それにより不揮発的な記憶を行うことが可能である。しかし、このデバイスを実現するのは非常に難しい。大きな問題は、スピンの材料内部や界面での結晶の乱れに非常に敏感であることである。特に半導体と強磁性体は一般的に結晶学的な整合性が良くないことが多く、これらの材料を用いて原子レベルで精緻な接合界面を作ることは基本的には難しい。さらに、スピンは有限の緩和長を有するため、ソー

スとドレイン間の距離が極めて短くなければ、大きな信号を得ることはできない。従って、高度な素子の作製技術が要求される。今までの研究で、Spin MOSFET 構造において報告されてきた磁気抵抗比(MR 比)は 0.1%程度以下であった^{2,3}。本デバイスを実用化するためには、100%近い MR 比が要求される。

これらの問題に対処するため、本研究では、原子レベルで平坦でかつ整合性良く強磁性体と半導体を接合できる材料系の開拓を行ってきた。その中でも特に、半導体に数%の磁性不純物を加えることにより作製できる強磁性半導体といわれる物質群は、半導体との親和性が良く、容易に半導体上に単結晶性を保ったまま成長できる。本研究では、強磁性半導体のモデルケースとして長年にわたり研究が行われてきた GaMnAs を用いて、スピントランジスタの基礎動作の実証に取り組んできた^{4,5,6}。GaMnAs はキュリー温度が室温よりも低いという欠点を有するが、GaAs と理想的な接合界面を実現できるため、スピントロニクスデバイスのモデルケース材料としては極めて有用である。さらに本研究では、実用的なスピントランジスタを実現するための最適な素子構造についても検討を行った。従来は Fig. 1 に示すような横型 Spin MOSFET 構造が主な研究対象であったが、本研究

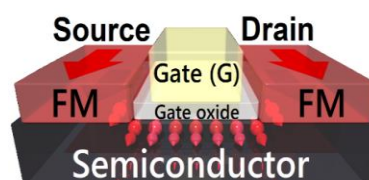


Fig. 1. Schematic illustration of spin MOSFET, in which the source and drain electrodes are ferromagnetic (FM) materials. The amplification capability can be modulated by the magnetization alignment.

室では縦型のスピントランジスタ (Fig. 2) の作製を試みている。縦型構造では、ソース、チャンネル、ドレインが縦方向に積層されており、横の側壁からのゲート印加により電流を変調する。本構造では、チャンネル長を原子レベルまで短くできる。そのため、キャリアがスピン緩和の影響をほとんど受けず、理想的なスピントランジスタ特性が得られることが期待される。

2. 実験結果

本研究で縦型スピントランジスタ構造の作製に用いたのは、 $\text{Ga}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}\text{As}$ (10 nm) / GaAs (9 nm) / $\text{Ga}_{0.94}\text{Mn}_{0.06}\text{As}$ (3.2 nm) / GaAs:Be (50 nm, 正孔濃度 $p = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) からなるヘテロ構造を低温分子線エピタキシー法により p^+ - GaAs (001) 基板上に成長した試料である。成長後の試料の一部をエッチングにより除去し、その部分に 100 nm の膜厚の SiO_2 層を堆積させることにより、ドレイン電極と基板を絶縁した [Fig. 2(a)]。その後 Au (40 nm) / Cr

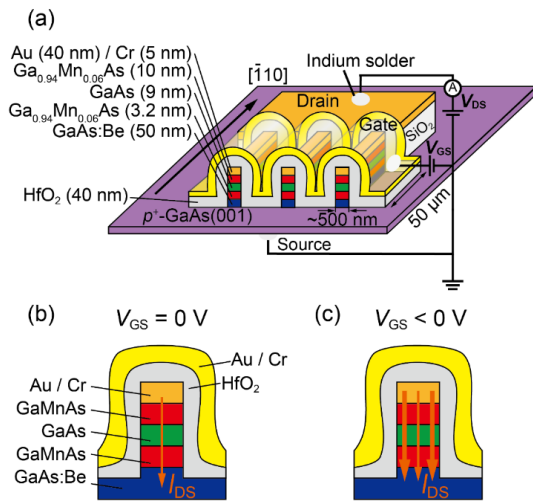


FIG. 2. (a) Schematic illustration of the vertical spin MOSFET investigated in this study. The backside of the substrate is the source electrode, the comb shaped Au/Cr layer is the drain electrode, and the Au/Cr layer above the HfO_2 layer is the gate electrode. (b)(c) Schematic device operation of our vertical spin MOSFET when a gate voltage V_{GS} is not applied (b) and when a negative gate voltage is applied (c). The orange arrows represent a drain-source current I_{DS} . [T. Kanaki *et al.*, Ref. 7.]

(5 nm)層を蒸着し、 $500 \text{ nm} \times 50 \text{ } \mu\text{m}$ のサイズの多数の櫛を持つ形に加工した。500 nm まで素子サイズを微細化することにより電界が効率的に素子に印加できるように工夫した。それ以外のところをエッチングにより除去し、 Au/Cr 層の下にあるヘテロ構造のみが残るようにした。その上に、40 nm の膜厚のゲート絶縁膜 HfO_2 を原子堆積法にて堆積し、その上に Au (50 nm) / Cr (5 nm) からなるゲート電極を作製した。このようにして GaMnAs がソースとドレインである縦型 Spin MOSFET 構造を作製した。本デバイスにおいては、基本的には GaAs が GaMnAs に対して約 100 meV のポテンシャル障壁を有するトンネル障壁になっている。 GaMnAs は p 型であるため、ソースとドレイン間で正孔のトンネルが起こる [Fig. 2(b)]。ゲートとソースと間の電圧 V_{GS} が負 (正) の時は、素子の側壁でのトンネル電流が増大 (減少) する [Fig. 2(c)]。

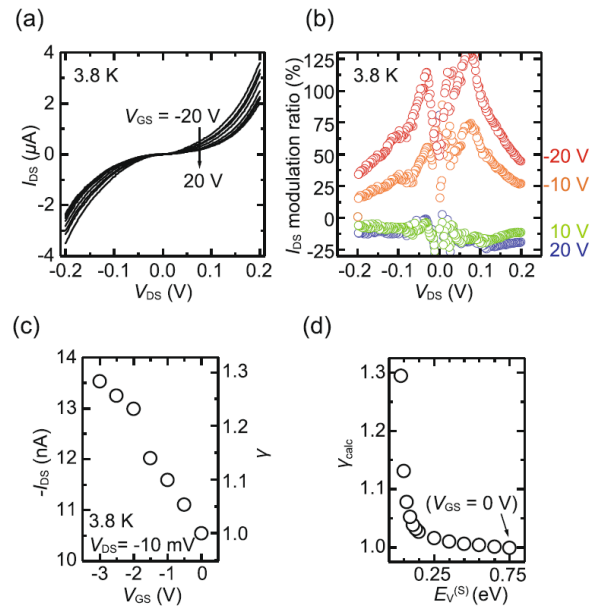


FIG. 3. (a) Drain-source current I_{DS} as a function of the drain-source voltage V_{DS} with the gate-source voltage V_{GS} ranging from -20 V to 20 V with a step of 5 V at 3.8 K . (b) I_{DS} modulation ratio as a function of V_{DS} with various V_{GS} at 3.8 K . (c) Drain-source current ($-I_{\text{DS}}$) (left axis) and the I_{DS} value normalized at $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$ (γ) (right axis) as a function of V_{GS} with $V_{\text{DS}} = -10 \text{ mV}$ at 3.8 K . (d) Calculated I_{DS} normalized by the one at $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$ (γ_{calc}) as a function of $E_{\text{V}}^{(\text{S})}$ [T. Kanaki *et al.*, Ref. 7].

本デバイスにおける Spin MOSFET 動作の解析を行うため、様々な大きさの V_{GS} を印加して、ドレイン-ソース電圧 V_{DS} を変えながら、ドレイン-ソース電流 I_{DS} を測定した [Fig. 3(a)]。基本的にはトンネルライクな非線形な $I_{DS}-V_{DS}$ 特性が得られていることが分かるが、ゼロバイアス近傍では特に V_{GS} を負方向に印加した際に、曲線の曲率が若干変わる様子が見られており、素子の微細化により、トランジスタ特性が見えかけてきていることが分かる。また、 I_{DS} が V_{GS} により大きく変調できていることも分かる。 V_{GS} が 20 V の時は、 I_{DS} の変調比 $[I_{DS}(V_{GS}) - I_{DS}(V_{GS} = 0 \text{ V})] / I_{DS}(V_{GS} = 0 \text{ V})$ は約 -20% であった [Fig. 3(b) の青い点参照]。一方、 $V_{GS} = -20 \text{ V}$ の時は、変調比は約 130% に達した [Fig. 3(b) の赤い点参照]。この変調比は、今まで縦型スピン FET 構造において報告されてきた値の中では最大値である。素子を 500 nm まで微細化したことにより、従来の研究で得られてきた特性と比較して、大きく変調特性が向上していることが分かる。

ゲート電圧印加によるバンド構造の変化を調べるため、 $V_{DS} = -10 \text{ mV}$ における I_{DS} の V_{GS} 依存性を測定した。その結果を Fig. 3(c) に示す。 I_{DS} を $V_{GS} = 0 \text{ V}$ における値で規格化した値を γ と定義すると、 V_{GS} が 0 V から -3 V まで変化した際に、 γ は 1 から 1.28 まで変化した [Fig. 3(c) の右側の軸参照]。以下に示すように、この大きな変調率は、正孔による直接トンネル電流の変調では説明することができない。ポテンシャルの面内分布を求めるために、メサの側壁表面のポテンシャルを変化させて、電界シミュレーションを行った。その結果を Fig. 4(a,d) に示す。ここで、 $E_V^{(S)}$ を、GaAs チャンネルと側壁ゲートの界面におけるフェルミレベル E_F から測った価電子帯の頂上の正孔のエネルギー E_V であると定義する。 $E_V^{(S)} = 0.75 \text{ eV}$ の時の、 E_V のポテンシャルプロファイルを図 4(a) に示す。これは、 $V_{GS} = 0 \text{ V}$ の状態に対応する。このとき、GaAs チャンネルにおける側壁の E_F はバンドギャップのおよそ中央にピンされている。一方、電圧印加により、 $E_V^{(S)}$ が 0.75 eV から下がると、側壁のポテンシャル

が下がり、電流が増大する [Fig. 4(b,e)]。しかし、メサの内部 ($10 \text{ nm} \leq x$) のポテンシャルはほとんど影響を受けない [Fig. 4(c,f)]。Fig. 3(d) を見ると、シミュレーションにより得られた γ の値 γ_{calc} は Fig. 4(a) に示した $E_V^{(S)} = 0.75 \text{ eV}$ の時と Fig. 4(d) に示した $E_V^{(S)} = 0.15 \text{ eV}$ の間でほとんど変化してい

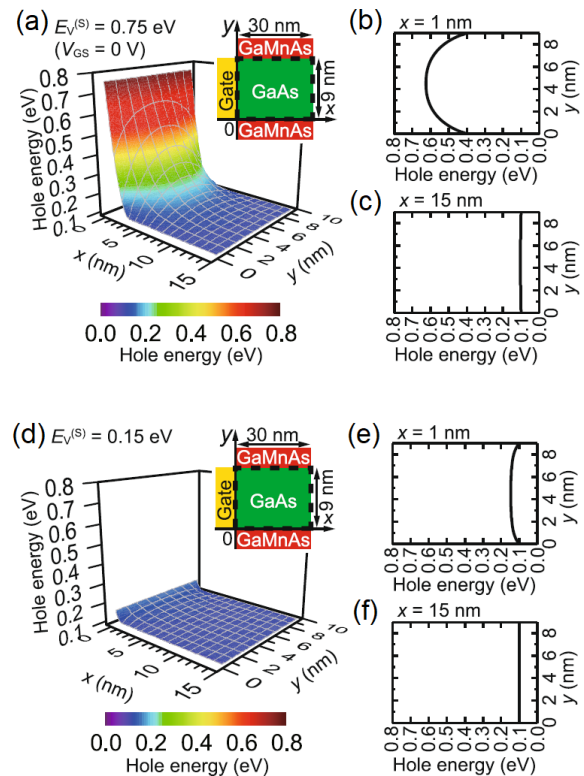


Fig. 4 (a)(d) Calculated valence band top energy E_V with respect to the Fermi level when $E_V^{(S)} = 0.75 \text{ eV}$ (a) and $E_V^{(S)} = 0.15 \text{ eV}$ (d). Here, the Fermi level corresponds to 0 eV. The vertical axis expresses the hole energy. The inset in (a) and (d) shows the structure used in our calculation. Here, the x axis represents the distance from the side surface of the mesa and the y axis denotes the distance from the interface between the bottom GaMnAs layer and the intermediate GaAs layer. The calculation was performed in the region surrounded by the dashed line. In (a,d), only the region of $0 \text{ nm} \leq x \leq 15 \text{ nm}$ is shown because it is sufficient to see how the gate electric field influences the electric potential in the GaAs layer. (b,c) E_V vs. y at $x = 1 \text{ nm}$ (b) and 15 nm (c) when $E_V^{(S)} = 0.75 \text{ eV}$. (e,f) E_V vs. y at $x = 1 \text{ nm}$ (e) and 15 nm (f) when $E_V^{(S)} = 0.15 \text{ eV}$ [T. Kanaki et al., Ref. 7.].

ない。この理由は、いずれの場合でも GaAs が正孔にとってトンネル障壁になっているためである。一方で、 $E_V^{(S)} < 0.15 \text{ eV}$ の時は、Fig. 4(d)から予測されるように、GaAs チャネルの側壁における E_V が、メサ内部の E_V よりも低くなる。従って γ_{calc} は $E_V^{(S)}$ の減少に伴い増加する [Fig. 3(d)]。しかし、この結果は、Fig. 3(c)に示した実験結果とは異なる。実験結果では、 V_{GS} が 0 V から -10 V に変化する際に、 γ は $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$ の段階から上がり始めている。Fig. 3(c) と Fig. 3(d)の曲線の形が大きく異なっていることからこの違いは明らかである。以上の議論は、実験的に得られた $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性の電界による大きな変調は、直接トンネル電流の電界効果では説明できないことを意味している。従って、電流変調の主な起源は、間接トンネル電流の変調にあると言える。間接トンネル電流の起源は、GaMnAs から GaAs に拡散した高濃度の Mn 原子によって形成されたバンドギャップ中の欠陥準位にあると考えられる。GaMnAs から GaAs へは約 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度の Mn が拡散していることが知られている。また、本研究のように 200°C 程度の低温で成長した GaAs には、As のアンチサイト欠陥が存在する

ことが知られている。その濃度は $10^{18}\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度である。実際に、我々の素子はトンネル素子であるにも関わらず $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性が強く温度に依存する。このことも、欠陥準位を介して間接トンネルが起こっていることを支持している。

この素子のスピン依存伝導を調べるために、 $[\bar{1}10]$ 方向に磁場を印加して、その大きさを掃引しながらドレイン-ソース抵抗 $R_{\text{DS}} = V_{\text{DS}} / I_{\text{DS}}$ を測定した(Fig. 5)。ここで示した結果は、 $V_{\text{DS}} = -5 \text{ mV}$, $V_{\text{GS}} = 0 \text{ V}$ で得られた結果である。黒い丸で示したメジャーloopから分かるように、明瞭なトンネル磁気抵抗効果(TMR)が得られた。従って、 I_{DS} が磁化配置により制御できていることが分かる。TMR 比を $[R_{\text{DS}}(\mu_0H) - R_{\text{DS}}(\mu_0H = 0 \text{ mT})] / R_{\text{DS}}(\mu_0H = 0 \text{ mT}) \times 100\%$ と定義すると、TMR 比は 7% に達している。これは、横型 Spin MOSFET で得られている MR 比の最高値と比較して約 70 倍の非常に大きな値である。

上記のように、GaMnAs をベースとした縦型 spin MOSFET 構造を作製し、明瞭なスピン依存伝導と、縦型 Spin MOSFET では最大の 130%におよぶ大きな電流変調を得ることに成功した。計算との比較により、この大きな I_{DS} 変調は直接トンネル電流では説明できず、主に GaAs 中の欠陥準位を介した間接トンネルの寄与によるものであることを明らかにした。本研究で得られた知見は、より高い性能を有するデバイスを実現する上で、非常に重要であると言える^{7,8}。

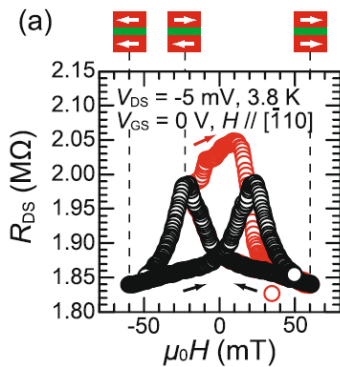


FIG. 5. Drain-source resistance R_{DS} as a function of the in-plane external magnetic field μ_0H applied along the $[\bar{1}10]$ direction at 3.8 K. Here, the drain-source voltage V_{DS} was -5 mV and the gate-source voltage V_{GS} was 0 V . The black circles correspond to the major loop and the red circles correspond to the minor loop. The black (red) arrows are the sweep directions in the major (minor) loop. The magnetization states in the major loop are indicated by the white arrows above the graph [T. Kanaki *et al.*, Ref. 7].

3. その他の成果

低温センター304B室は、電気系工学専攻の5研究室で共同で利用させて頂いており、上記に述べたテーマ以外にも、各研究室から様々な成果が得られている。田中・大矢研究室の他の成果としては、Ge基板上のFe量子井戸における量子振動現象の観測⁹、強磁性半導体系材料における超短テラヘルツパルス照射による巨大コヒーレント磁化応答^{10,11}、室温での縦型スピントランジスタ構造における大きな磁気抵抗比の実現¹²、Feドープ強磁性半導体における3重項超伝導の実現^{13,14}、トポロジ

カル結晶絶縁体における効率的スピン流電流変換の実現¹⁵などが挙げられる。高木・竹中研究室では、p型 Ge トンネル FET のソース電極における急峻なリン(P)のプロファイルの実現や¹⁶、高性能の III-V 族 MOSFET およびトンネル FET の実現^{17,18,19}などの成果が得られている。田畑研究室では、High-k 膜と SiO₂ を組み合わせた三色超構造におけるダイポール特性の制御²⁰、トップゲート TFT への応用に向けたポスト酸化とポストベークを利用した TiN/Al₂O₃/ZnO ゲートスタック技術（高木・竹中研究室との共同研究）²¹、Sn ドープ In₂O₃ 微粒子をベースとした酸化物半導体ナノ微粒子を用いた赤外領域でのプラズモニック熱シールド²²、バイ

オシステムの揺らぎを用いた確率共鳴学習をベースとした低電力消費デバイスの設計と実現²³、歪勾配を持ったガーネットにおける磁氣的誘電的光学的異常の観測²⁴、Ga₂O₃-ZnO 極薄膜のヘテロ構造における表面プラズモンと結合した強い光閉じ込め²⁵、量子ナノデバイスを用いた超高感度皮膚ガスセンサの実現²⁶、機械学習によるバイオ関連材料の赤外および THz 特性²⁷、近赤外領域における酸化物半導体 Ga₂O₃-ZnO:Ga ハイブリッド構造における表面プラズモン励起の観測²⁸などの多数の成果が得られている。

(文責：大矢忍)

-
- ¹ S. Sugahara and M. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **84**, 2307 (2004).
- ² R. Nakane, T. Harada, K. Sugiura, and M. Tanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 113001 (2010).
- ³ T. Sasaki *et al.* *Phys. Rev. Appl.* **2**, 034005 (2014).
- ⁴ T. Kanaki, H. Asahara, S. Ohya, and M. Tanaka, “Spin-dependent transport properties of a GaMnAs-based vertical spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor structure”, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 242401 (2015).
- ⁵ H. Terada, S. Ohya, L. D. Anh, Y. Iwasa, and M. Tanaka, *Sci. Rep.* **7**, 5618 (2017).
- ⁶ H. Asahara, T. Kanaki, S. Ohya, and M. Tanaka, “Large spin-valve effect in a lateral spin-valve device based on ferromagnetic semiconductor GaMnAs”, *Appl. Phys. Express* **11**, 033003 (2018).
- ⁷ T. Kanaki, H. Yamasaki, T. Koyama, D. Chiba, S. Ohya, M. Tanaka, “Large current modulation and tunneling magnetoresistance change by a side-gate electric field in a GaMnAs-based vertical spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor”, *Sci. Rep.* **8**, 7195 (2018).
- ⁸ T. Kanaki, H. Yamasaki, H. Terada, Y. Iwasa, S. Ohya, and M. Tanaka, “Improved performance of a GaMnAs-based vertical spin electric double-layer transistor”, *Jpn. J. Appl. Phys. (Rapid Commun.)* **57**, 090301 (2018).
- ⁹ R. Suzuki, Y. K. Wakabayashi, K. Okamoto, M. Tanaka, and S. Ohya, “Quantum size effect in a Fe quantum well detected by resonant tunneling carriers injected from an p-type Ge semiconductor electrode”, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 152402 (2018).
- ¹⁰ T. Ishii, H. Yamakawa, T. Kanaki, T. Miyamoto, N. Kida, H. Okamoto, M. Tanaka, and S. Ohya, “Ultrafast magnetization modulation induced by the electric field component of a terahertz pulse in a ferromagnetic-semiconductor thin film”, *Sci. Rep.* **8**, 6901 (2018).
- ¹¹ T. Ishii, H. Yamakawa, T. Kanaki, T. Miyamoto, N. Kida, H. Okamoto, M. Tanaka, and S. Ohya, “Large terahertz magnetization response observed in ferromagnetic nanoparticles”, *Appl. Phys. Lett.* **114**, 062402 (2019).
- ¹² T. Kanaki, S. Matsumoto, S. K. Narayananellore, H. Saito, Y. Iwasa, M. Tanaka, and S. Ohya, “Room-temperature side-gate-induced current modulation in a magnetic tunnel junction with an oxide-semiconductor barrier for vertical spin-MOSFET operation”, *Appl. Phys. Express* **12**, 23009 (2019).
- ¹³ T. Nakamura, L. D. Anh, Y. Hashimoto, Y. Iwasaki, S. Ohya, M. Tanaka, and S. Katsumoto, “Proximity-Induced Superconductivity in a Ferromagnetic Semiconductor (In,Fe)As”, *Journal of Physics: Conference Series* **969**, 012036 (2018).
- ¹⁴ T. Nakamura, L. D. Anh, Y. Hashimoto, S. Ohya, M. Tanaka, and S. Katsumoto, “Evidence for Spin-Triplet Electron Pairing in the Proximity-Induced Superconducting State of an Fe-Doped InAs

- Semiconductor”, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 107001 (2019).
- ¹⁵ S. Ohya, A. Yamamoto, T. Yamaguchi, R. Ishikawa, R. Akiyama, L. D. Anh, S. Goel, Y. K. Wakabayashi, S. Kuroda, and M. Tanaka (invited), “Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator SnTe using spin pumping”, *SPIE Nanoscience + Engineering*, 10732-117, San Diego Convention Center, San Diego, CA, USA, 2018 年 8 月 23 日.
- ¹⁶ R. Takaguchi, R. Matsumura, T. Katoh, M. Takenaka and S. Takagi, “Ge p-channel tunneling FETs with steep phosphorus profile source junctions”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57**, 04FD10 (2018).
- ¹⁷ S. Takagi, D.-h. Ahn, T. Gotow, C. Yokoyama, C.-Y. Chang, K. Endo, K. Katoh and M. Takenaka, “Ultra-Low Power III-V-Based MOSFETs and Tunneling FETs”, *ECS Transactions*, **85** (8), 27 (2018).
- ¹⁸ 高木信一, 安大煥, 後藤高寛, 松村亮, 高口遼太郎, 加藤公彦, 竹中充, “材料エンジニアリングによるトンネル電界効果トランジスタの高性能化(招待論文)”, *電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ和文論文誌C*, vol. J102-C, No.3, 61 (2019).
- ¹⁹ C. Yokoyama, C.-Y. Change, M. Takenaka, and S. Takagi, “Pre-treatment Effects on high-k/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ MOS Interface Properties and their Physical Model”, *IEEE Journal of the Electron Devices Society* **6**, 487 (2018).
- ²⁰ Y. Hotta, I. Kawayama, S. Miyake, I. Saiki, S. Nishi, K. Yamahara, K. Arafune, H. Yoshida, S. Satoh, N. Sawamoto, A. Ogura, A. Ito, H. Nakanishi, M. Tonouchi, and H. Tabata, “Control of dipole properties in high-k and SiO_2 stacks on Si substrates with tricolor superstructure”, *Appl. Phys. Lett.* **113**, 012103 (2018).
- ²¹ K. Kato, H. Matsui, H. Tabata, M. Takenaka, and S. Takagi, “TiN/ Al_2O_3 / ZnO gate stack engineering for top-gate thin film transistors by combination of post oxidation and annealing”, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 162105 (2018).
- ²² H. Matsui, T. Hasebe, N. Hasuike and H. Tabata, “Plasmonic Heat Shielding in the Infrared Range Using Oxide Semiconductor Nanoparticles Based on Sn-Doped In_2O_3 : Effect of Size and Interparticle Gap”, *ACS Appl. Nano Materials* **1**, 185 (2018).
- ²³ Hitoshi Tabata (Invited), “Design and Demonstration of Low Power Consumption Devices Based on Stochastic Resonance Learning from Fluctuation of Bio-system”, *The 2nd Symposium for World Leading Research Centers*, 2019/2/17(16–18), The Westin Sendai, Japan.
- ²⁴ H. Tabata, H. Yamahara, S. Shamim, A. Katogi and M. Seki, (Invited) “Magnetic, dielectric and optic anomaly in strain gradient garnet films” *The 8th Indo-Japan Seminar Designing Emergent Materials*, 2019/2/1(1/31–2/2), University of Tokyo, Japan.
- ²⁵ H. Tabata, Y. Kuranaga, H. Matsui, (Invited) “Strong light confinements coupled with surface plasmons in the hetero layers of Ga_2O_3 - ZnO thin films”, *The 4th E-MRS and MRS-J Bilateral Symposium on advanced functional oxides and wide-band-gap semiconductors*, 2018/10/16(14–19), Platania - Chania, Crete, Greece.
- ²⁶ H. Tabata, (Invited) “Ultra-high sensitive skin gas sensing by quantum nano-devices -Application for wearable fat metabolism monitoring-”, *the Third Chile-Japan Academic Forum*, 2018/9/27(25–28), Nikko, Japan.
- ²⁷ H. Tabata, (Keynote) “IR and THz characterization of bio related materials and analysis by machine learning”, *the 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2018/9/11(9–14), the Nagoya Congress Center, Nagoya.
- ²⁸ Y. Kuranaga, H. Matsui, A. Ikehata, Y.-L. Ho, J.-J. Delaunay, and H. Tabata, (Invited) “Surface Plasmon Excitation on Hybrid Structures of Oxide Semiconductors of $(\text{Ga}_2\text{O}_3)/\text{ZnO}:\text{Ga}$ in Near-infrared Range”, *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2018*, 2018/08/01(1–4), Toyama, Japan.

高エネルギー分解能超伝導転移端センサの開発とX線 γ 線高効率スペクトロスコープへの取り組み

1. 研究背景と目的

核物質の核種分析・同定では、核物質から発生する硬X線、 γ 線や中性子線検出を主な手法とする非破壊測定と、化学分析を主とする破壊測定に大別される。このうち溶媒抽出、沈殿回収等の化学的手法を適用したアクチニド分析では、精密な定量分析が可能となるが、このような化学分析手法は長時間にわたる煩雑かつ危険な作業を要して極めて非効率であり、しかも用いる溶媒等は大量の放射性廃棄物として事後処理を余儀なくされることとなるなど、大きな問題を抱えている。一方、 γ 線測定による非破壊測定法では、NaI シンチレーション検出器や Ge 半導体検出器を用いて得られた γ 線スペクトルから核物質の組成、定量を行うため、破壊測定法に比べて迅速で、測定効率、作業の安全性に優れている。ただし、既存の放射線スペクトロメータでは最も分光特性に優れる Ge 半導体検出器を用いても Pu や Am 等の核種に起因した γ 線エネルギーピークの分離が不完全であり、正確な核種同定、定量は極めて困難である。したがって、有効かつ健全な核物質保証措置を堅持するためには、高効率、高精度、高信頼性、リモートモニタリング可能といった、高度な非破壊分析技術の確立が必要であり、それを確実に成し遂げる計測基盤技術として、Ge 半導体検出器の検出性能を大きく超える超高エネルギー分解能硬X線 γ 線スペクトロメータを適用した革新的な核種同定分析手法の構築が強く望まれている。

本研究では、核物質から発生する硬X線や γ 線を極めて高いエネルギー分解能を有する超伝導転移端センサ(TES : Transition Edge Sensor)により分析し、プルトニウム(Pu)やマイナーアクチニド全元素

を精密に弁別、分析しうる革新的な核種同定分析技術の開発研究を進めている。TES は放射線入射による温度上昇を超伝導体の超伝導転移領域を用いた高感度な温度計により検出する革新的なスペクトロメータであり、原理的には高純度ゲルマニウム半導体検出器に比べて 2 桁以上優れたエネルギー分解能を実現しうる可能性を秘めている。我々は、これまでにスズや鉛等の重金属バルク放射線吸収体を超伝導薄膜温度センサ上に搭載した TES の研究を行い、およそ 100 mK の極低温にて動作させ、半導体検出器の分光性能を大きく超える優れたエネルギー分解能を達成し、Pu 試料の分析や世界で初めてとなる TES を用いた核分裂生成物(FP)の元素、核種同定に成功した。本稿ではこれらの研究成果について説明する。

2. TES 検出素子の開発

超伝導転移端センサ(TES)を適用した極低温マイクロカロリメータはX線や γ 線等の光子入射に伴う温度上昇を超伝導状態と常伝導状態の間の相転移領域における極めて急峻な温度抵抗変化を用いて高感度に読みだすことで、入射光子のエネルギーを高精度に特定しうる検出器である。これまで TES は主にX線天文学での応用を目指した X 線エネルギースペクトロメータとして開発が進められ、特に 6 keV のX線に対しては既存半導体検出器の理論的な到達限界より 50~100 倍程度優れた性能が達成され始めている^[1]。

我々の研究チームにおいても、超伝導温度センサとして超伝導イリジウム(Ir)薄膜を適用した TES 開発研究を行い、6 keV の X 線に対して 6.9 eV(FWHM)のエネルギー分解能を達成している^[2]。このような知

見をベースとして、本研究では、硬 X 線 γ 線に対して高い吸収効率を得るべく、超伝導薄膜温度センサとスズやタンタル等の重金属バルクから成る硬 X 線 γ 線吸収体を組み合わせたスペクトロメータの開発を進めている。硬 X 線 γ 線検出用 TES は、極薄い窒化シリコンメンブレン(厚さ 500 nm 程度)上に積膜された超伝導薄膜温度センサ上に重金属バルク放射線吸収体を搭載・接続した構造を持つ³⁾。ここで窒化シリコンメンブレンは超伝導薄膜温度センサと外部の系を適度に低い熱コンダクタンスで結合する役割を果たしており、これにより、放射線入射により生じた熱がすぐに外部に流れ出ずに TES 内で十分に大きな温度上昇を引き起こし、信号パルスを生成させることが可能となる。これまで国内外の他研究グループでは超伝導薄膜温度センサ上に厚膜レジストやエポキシを用いて放射線吸収体接続用極小ポストを作成し、その上に窒化シリコンメンブレンを壊さずに重金属製放射線吸収体を搭載する技術を考案して TES 検出素子を開発してきたが、このような方式では有機化合物系の物質で作製される放射線吸収体接続用極小ポストの熱伝導率の低さが原因となって、放射線入射信号立ち上がりの遅延、波高値の低減、信号立下りにおいて極度に遅い立下り時定数を持つテールが観測され、分光特性や計数率特性の劣化を引き起こす現象が明らかになっている。そこで本開発では、あらかじめ熱伝導特性に優れた金バンプ製ポストを超伝導イリジウム/金(Ir/Au)温度センサ薄膜上に構築し、裏面からシリコン等を除去して窒化シリコンメンブレン構造を形成した後、金バンプポスト上に重金属バルク放射線吸収体を搭載し、極少量のエポキシにて固定する独自の放射線吸収体/超伝導薄膜温度センサ接続方式を提案した。そして図 1(上)に示すとおりイリジウム/金超伝導薄膜温度センサ上に金バンプポストを構築し、その上にスズ放射線吸収体素子を搭載・固定した検出素子の試作に成功した。TES 検出素子作製プロセスは以下のとおりである。まず、窒化シリコン(厚さ約 400 nm)が積層されたシリコンウエハ上にイリジウム(100 nm 厚)/金(20 nm 厚)近接 2 重層をスパッタ

リングで積膜し、 BCl_3 ガスを用いた反応性イオンエッチング法により 250 μm 角の大きさにパターンニングする。次にイリジウム/金薄膜上の中央部にバンプボンディングを用いて金バンプ製ポストを作製する。そしてウエハ裏面からウエット又はドライのシリコンエッチングプロセスを実行し、窒化シリコンメンブレン構造を完成させる。最後の金バンプ上にスズ放射線吸収体を搭載する工程では、ダイボンダにより正確に超伝導薄膜上での放射線吸収体の位置を制御し、金バンプ上に塗布するエポキシの量を抑制しつつ確実に放射線吸収体を固定する手法を考案した。この試作検出素子において、 ^{241}Am 線源から発生される 60 keV の γ 線を入射したところ図 1(下)赤線に示すような検出信号が得られた。なおこの図において青線は比較のため従来のエポキシポストでスズ吸収体を固定した素

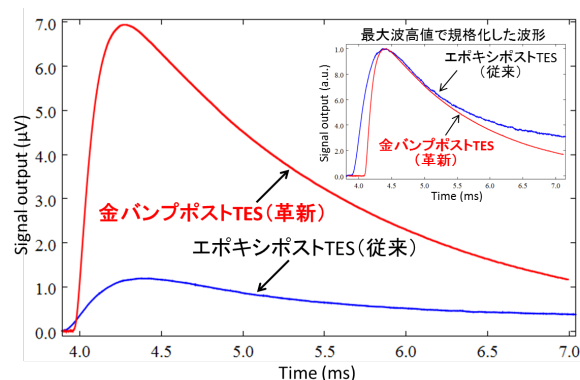
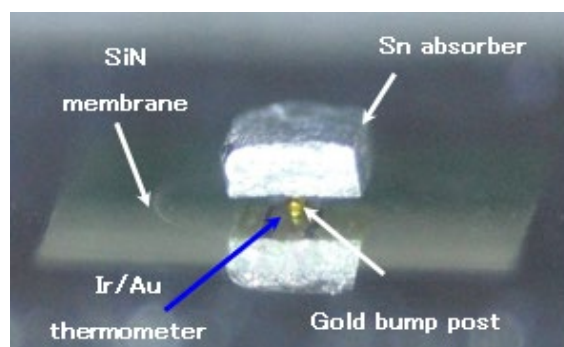


図 1 金バンプポストでスズ吸収体と Ir/Au 超伝導薄膜を結合した TES 検出素子(上)。金バンプポストでスズ吸収体を接続した TES による γ 線 (59.5 keV) 入射信号応答波形とエポキシポストでスズ吸収体を接続した素子の γ 線入射応答波形の比較 (下)

子の検出信号を示している。この結果より、金バンプポストを用いてスズ吸収体を搭載固定した素子は、従来のエポキシ製ポスト接続素子に比べて信号波高値が2.5倍以上、信号立下り時定数の遅い成分が3分の1以下に短縮されることを確認し、金バンプポストの高い熱伝導特性が放射線応答信号のS/N比を大きく改善し、応答高速化にも寄与することを実証した⁴⁾。なお、金バンプポストの作製はバンプボンディング技術を適用しているため、アレイ作製時に複数のピクセル上に画一的に均質な金バンプポストを構築・配置することが可能であり、ピクセル毎の熱特性すなわち放射線検出特性が一樣に揃った(歩留まり率の高い)高品質なピクセルアレイ検出面の実現に寄与すると考えられる。

本研究では、検出素子を冷却するために簡便かつ安全な寒剤フリー希釈冷凍機を適用している。これまでの我々の研究において、この冷凍機のパルス管プレクーリング機構で発生する機械振動が極低温ステージ上のTESへ伝搬してエネルギー分解能を劣化させる大きな要因になることが明らかになり、このプ

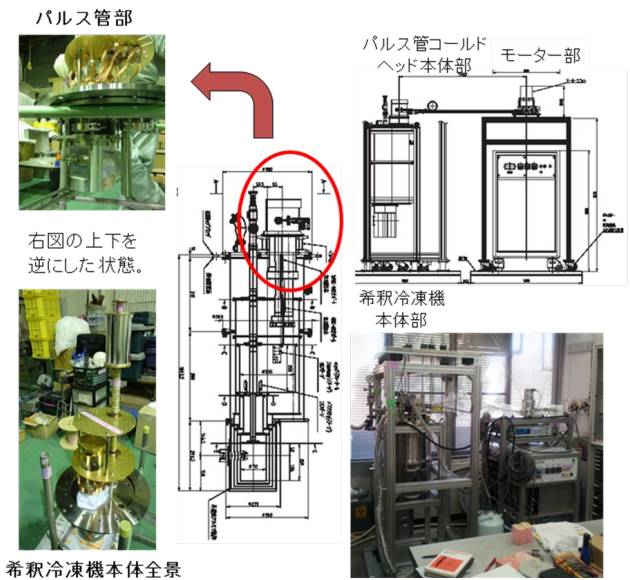


図2 モーター分離型パルス管に換装した寒剤フリー希釈冷凍機の概要(右上:システム概略、右下:冷凍機システム全景、左上:パルス管冷却ヘッドと希釈冷凍機熱交換機接続部、左下:希釈冷凍機本体全景)

レクーリング機構部の機械振動を抑制するべく、パルス管モーター部の分離、空気ばねによるプレクーリング機構部の吊り下げ等の改良を重ねて低ノイズ化を図った(図2参照)。その結果、エネルギー分解能は¹⁵⁴Eu線源からγ線検出において84 eV@123 keVを達成した。そしてγ線検出データに対して試行的にベースラインの弁別を行い、熱浴の温度揺らぎによる要因を抑えた信号処理を施したところ、さらに4割程度エネルギー分解能が向上する可能性が示唆される結果も得られている。これは既存Ge半導体検出器の到達最高分解能より10倍以上優れる性能であり、本研究で開発したTES検出システムは極めて優れたγ線エネルギー弁別特性を有していることが明らかとなった。

3. X線γ線高エネルギー分解能スペクトロスコピーの実現と核物質検出への適用

スズ吸収体を金バンプ極小ポストを介してIr/Au超伝導薄膜温度センサに接続した検出素子と2ch同時信号読み出し可能な回路を寒剤フリーパルス管搭載希釈冷凍機に組み込んだ検出システムを日本原子力研究開発機構(JAEA)大洗研究開発センターの燃料材料試験棟に持ち込み、核分裂生成物(FP)試料から発生する放射線をTESに照射して検出応答を評価し、世界で初めてTESによるFPの精密核種分析に成功した。図3にエネルギー領域25~60 keVのスペクトルを示す。図中の青で示したものがTESにより得られたスペクトル、赤線で示したものが同一試料を

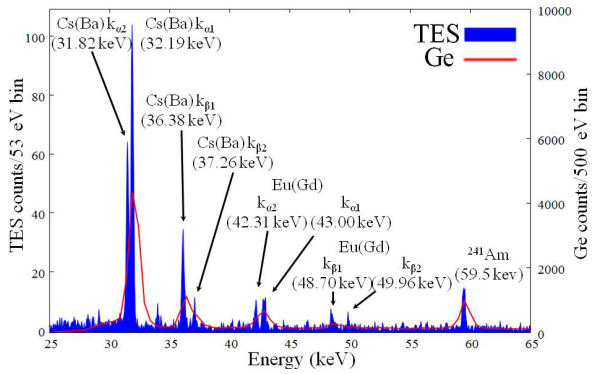


図3 金バンプポストでスズ吸収体とIr/Au超伝導薄膜を結合したTES素子によるFP試料からのX線γ線エネルギースペクトル

別途 Ge 半導体検出器により計測したスペクトルである。核分裂により生成される Ba、Gd、Eu の元素に由来する蛍光 X 線のピークが確認でき、とりわけ、Ge 半導体検出器では分離できていない Ba の $K_{\alpha 1}$ と $K_{\alpha 2}$ 、同 $K_{\beta 1}$ と $K_{\beta 2}$ 、そして Gd の $K_{\alpha 1}$ と $K_{\alpha 2}$ 、同 $K_{\beta 1}$ と $K_{\beta 2}$ の各ピークが TES では全て明瞭に弁別し検出されており、TES の高い検出感度と優れたエネルギー弁別性能が裏付けられた。これより、TES により核分裂生成物の精密な元素・同位体同定が行えることが実証された。

4. 今後の展望

本稿で示した TES による γ 線エネルギースペクトルはわずか 0.5 mm 角の Sn バルクから成る γ 線吸収体付 TES ピクセル 1 個で計測したものである。本結果より γ 線エネルギー弁別特性において既存 HPGe 半導体検出器に比べてすでに一けた程度優れた性能が得られつつあるが、その有感面積の小ささゆえ、長時間のデータ取得時間を要し、また得られるデータにおいて必ずしも充分な統計精度が得られているとは言えないのが現状である。したがって、今後、本検出手法を実用化するためには、ピクセルアレイ大規模化による有感面積の増大を図ることが必須となる。現在、我々は産業技術総合研究所と共同で超伝導エレクトロニクスを駆使した大規模アレイ信号読み出し用の多重信号読み出し回路開発⁵⁾を進めており、数 cm 角程度の有感領域の拡大が達成されれば、使用済み燃料や廃棄物等の非破壊検査、次世代 Pu 保障措置技術の確立等、核物質測定ニーズに対して実用可能となる高性能検出システムの構築が可能になるものと考えている。そして、さらに本検出システムは精密かつ高効率な高速炉燃焼反応の革新的分析手法としての適用や、過酷事故により損傷した原子炉の燃料デブリの精密検査にも大きな威力を発揮するものと期待される。

(文責：大野 雅史)

[1] S. R. Bandler et al., “Performance of TES X-ray Microcalorimeters with a Novel Absorber

Design”, Journal of Low Temperature Physics, Volume 151, Issue 1–2, pp 400–405

- [2] Y. Kunieda et al., “Microscopic observation of operating Ir/Au-TES microcalorimeter by low-temperature scanning synchrotron microscopy”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment 520(1):267–269.
- [3] M. Ohno et al., “Superconducting Transition Edge Sensor for Gamma-ray Spectroscopy”, IEICE TRANSACTIONS ELECTRONICS, Vol E100-C, No3, 283–290 (Invited paper), (2017)
- [4] Hatakeyama, S. et al. “Development of Hard X-Ray and Gamma-Ray Spectrometer Using Superconducting Transition Edge Sensor” IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 3 (2013).
- [5] S. Kohjiro et al., “White noise of Nb-based microwave superconductive quantum interference device multiplexers with NbN coplanar resonators for readout of transition edge sensors”, J Appl. Phys., 115, 223902 (2014).

低温センター 各部門報告

研究開発部門 研究実績報告

島野研究室

島野研究室では、レーザー光を用いて固体中の電子の集団に創発する量子現象の探求、新たな素励起(粒子)の探索、未知の量子相の探求に取り組んでいる。光を用いた固体中のマクロな量子状態の操作、光によるマクロ量子状態の創発を目標として、可視光の超短光パルスからテラヘルツ波と呼ばれる波長0.3 mm程度の電磁波パルス領域にわたる広いエネルギー範囲の先端光源開発、非線形レーザー分光法、超高速分光法などの観測技術の開発を並行して進めている。本年度は、以下に挙げる研究を進めた。

超伝導体

銅酸化物高温超伝導体におけるテラヘルツ第3高調波発生

ヒッグスモードは超伝導体の秩序変数の振幅の振動に対応する集団励起であり、その観測は超伝導の秩序変数を高い時間分解能で光学的に検出する新しい手法として注目を集めている。特に銅酸化物高温超伝導体においては、電荷密度波などの超伝導と競合する秩序の解明や、それら多重秩序の光による制御が模索されており、ヒッグスモードの観測はその強力なプローブとなることが期待される。

昨年我々は、銅酸化物超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi2212) において、高強度のモノサイクルテラヘルツ波パルス照射による秩序変数の強制振動信号としてヒッグスモードを捉えることに世界で初めて成功した。今年度は、入射テラヘルツ周波数 ω と超伝導ギャップエネルギー 2Δ との関係性を詳しく調べることでその固有エネルギーを明らかにすることを目指した。このために高強度かつ狭帯域なテラヘルツ波パルス光源が必要となり、ドイツ・ドレスデンの Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf 研究所の加速器施設にある超放射テラヘルツ波光源 TELBE において、3種類の銅酸化物超伝導体 Bi2212、 $\text{La}_{1.84}\text{Sr}_{0.16}\text{CuO}_4$ 、 $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ に対してテラヘルツ第3高調波の観測実験を行った。いずれの試料においても超伝導状態で第3高調波の観測に成功した。第3高

調波の強度は超伝導転移温度 T_c 以下で急増し、また入射テラヘルツ波の偏光に依存しないことから、この第3高調波はヒッグスモードに起因すると結論づけた。また、第3高調波の強度は低温に向かって単調に増加し、 s 波超伝導体のようなヒッグスモード共鳴は観測されなかった。この結果は、銅酸化物 d 波超伝導におけるヒッグスモードがオーバーダンプモードであることを示唆している。さらに、第3高調波の時間波形から、 T_c 以下で位相が急峻に反転する温度があることを見出した。これは、ヒッグスモードに加えて新たな集団励起モードが存在する可能性を示唆しており、その解明を進めている。

ヒッグスモードを用いた銅酸化物高温超伝導体における超伝導ゆらぎの観測

先に述べたヒッグスモード観測の応用として、銅酸化物高温超伝導体における超伝導ゆらぎを調べた。超伝導ゆらぎは転移温度以上でのクーパー対形成と関連しており、銅酸化物超伝導体においてそれがどの温度から発達しているかは超伝導発現機構にも関連して重要な問題である。このため、超伝導ゆらぎはテラヘルツ帯の光学伝導度やネルンスト効果など様々な実験手法を用いて調べられてきたが、超伝導ゆらぎのオンセット温度は手法ごとに異なり、統一的な理解は得られていない。一方、ヒッグスモードは超伝導の位相コヒーレンスの発達に起因するため、位相コヒーレンスのオンセット温度を直接決定する手法になると考えら

れる。

我々はテーブルトップのレーザーシステムで発生させた高強度テラヘルツ波パルスを Bi2212 薄膜試料に照射し、誘起されたヒッグスモードを近赤外光パルスの反射率変化を通して測定した。さらに、テラヘルツ周波数帯の光学伝導度を測定し、2 流体モデルにより超流動密度を求め、ヒッグスモードの信号の温度依存性と比較した。2 種の正孔ドーパ濃度の試料においてヒッグスモードの信号強度はテラヘルツ周波数帯の光学伝導度から求めた超流動密度と類似した温度依存性を示し、さらに両者のオンセット温度は一致することが分かった。さらに、5 種の正孔ドーパ濃度の Bi2212 単結晶試料におけるヒッグスモードの温度依存性から、Bi2212 における超伝導ゆらぎのオンセット温度が全ての正孔ドーパ濃度の試料において T_c よりも 10–30 K 程度高いことを明らかにした。

今後はヒッグスモードをプローブとして、光による銅酸化物超伝導体の超伝導コヒーレンスの増強を調べていく予定である。

光励起した際の銅酸化物超伝導体のジョセフソンプラズマ共鳴のダイナミクス

銅酸化物超伝導体は、超伝導を担う銅酸化物面と絶縁ブロック層とが c 軸方向に積層した構造を有する。超伝導転移を示すと銅酸化物面内のクーパー対がジョセフソン効果により層間をトンネリングできるようになる。この c 軸方向のクーパー対の集団運動はジョセフソンプラズマ共鳴と呼ばれ、テラヘルツ帯の c 軸反射率スペクトルに急峻なプラズマエッジとして現れる。ジョセフソンプラズマは c 軸超伝導コヒーレンスの発達を表すことから、近年では光誘起超伝導状態を見るプローブとして用いられている。しかし、光誘起超伝導状態に関しては依然として研究例に乏しく、またそのメカニズムや超伝導と競合する秩序との関連についても未解明な部分が多い。

そこで我々は、近赤外ポンプ-テラヘルツプロ

ブ分光の系を構築し、典型的な銅酸化物超伝導体の一つである $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ を用いて、銅酸化物超伝導体における光励起非平衡状態をジョセフソンプラズマ共鳴の観測をプローブとして調べた。

$\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の不足ドーパ ($x = 0.125$) から最適ドーパ ($x = 0.15$) のサンプルを用いて、超伝導状態において近赤外光を用いて励起した際の c 軸方向のテラヘルツ応答を調べた。その結果、いずれのドーパ濃度においても、励起強度を強めることによってジョセフソンプラズマ周波数が低周波側へとシフトしていく様子が見られ、その状態が光励起後数 100 ps 経過した後も残存することがわかった。光励起後に定常的に現れるスペクトルの様子は、光励起により生じるサンプルの熱化の影響を考慮したシミュレーションにより再現した。さらに、従来用いられてきた近赤外ポンプとテラヘルツプローブのサンプルへの侵入長の違いを考慮する解析手法が、必ずしも正しいスペクトルを再現せず解析結果にアーティファクトを与える可能性を指摘した。今後は、 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の実験により得られた光励起状態に関する知見を踏まえて、新たな銅酸化物超伝導体における光誘起超伝導状態や新奇な光誘起相の探索を目指す。

マルチバンド超伝導体における集団励起の非線形テラヘルツ光応答

近年の非線形テラヘルツ分光法の発展により、従来は困難であった超伝導体におけるヒッグスモードの観測が可能となり、大きな注目を集めている。それに伴い、超伝導体の非線形光応答に関する理論的研究も急速に進展し、BCS 理論で無視された対形成相互作用の遅延や不純物散乱の効果が重要な役割を果たすことが明らかになってきた。しかし、こうした理論的考察は単一のフェルミ面を持つ超伝導体に限られており、複数のフェルミ面を持つマルチバンド超伝導体における効果は調べられてこなかった。MgB₂ や鉄系超伝導体といったマルチバンド超伝導体では各フェルミ面に一つの秩

序変数が割り当てられるため、ヒッグスモードが複数現れるだけでなく、レゲットモードと呼ばれる位相差の固有振動も現れることが予想されている。そこで、BCS 理論を越えた効果がマルチバンド超伝導体の集団励起及び個別励起（ボゴリューボフ準粒子）の非線形光応答に与える影響について、統一的に理解することが求められている。

そこで、我々は特に非磁性不純物散乱による効果に着目してマルチバンド超伝導体の光応答を調べた。具体的には、不純物散乱の効果を光学遷移の行列要素に繰り込む Mattis-Bardeen の方法を採用し、密度行列の運動方程式を解いて系の時間発展を求めた。まず線形応答では、低温において超伝導ギャップのところに吸収端が現れる。これは実際の試料においても妥当な応答であり、従来のマルチバンド超伝導体の理論では記述できないことから、我々のモデルの妥当性を示している。次に二次の応答を調べることにより、超伝導秩序変数のうち虚部の運動は実部の運動よりも小さいことがわかった。これは光によって誘起されたレゲットモードの振幅がヒッグスモードの振幅よりも小さいことを意味する。その起源は、不純物散乱が実部の運動を増強するのに対して、虚部の運動には関与しないことにある。さらに三次の応答を調べることにより、超伝導体による第三高調波発生はヒッグスモードに支配されることが分かった。個別励起の寄与はそれに比べて一桁ほど小さく、レゲットモードの寄与は散乱レートとフェルミエネルギーの比によって決まるが、通常は数桁小さい。以上により、超伝導体の非線形テラヘルツ光応答について、振幅と位相の寄与を考える統一的な基盤が得られたものと考えられる。

マルチバンド超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜のヒッグスモード

鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_x\text{Te}_{1-x}$ は Γ 点にホールバンド、M 点に電子バンドを持ち、それぞれのフェルミ面に異なる大きさの超伝導ギャップが開くマルチ

バンド超伝導体である。そのクーパー対形成にはバンド間相互作用が重要な役割を果たしていると考えられており、ギャップの対称性などが盛んに議論されている。複数の秩序変数に対応して少なくとも 2 つの振幅モード（ヒッグスモード）が存在し、ヒッグスモードにもバンド間相互作用の影響が現れることが期待される。そこで我々は未だ観測例のない、鉄系マルチバンド超伝導体のヒッグスモードの研究を行なった。パルスレーザー堆積法により作成された CaF_2 基板上の $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜に対して THz 波を用いたポンプ-プローブ分光を行い、非平衡状態の光学伝導度を測定することでヒッグスモードの観測を試みた。ポンプ光として電場尖頭値 4 kV/cm、中心周波数 0.6 THz のマルチサイクル THz 波を照射すると、THz 周波数領域の光学伝導度にポンプ THz 波の自乗波形に追従した振動が観測された。この振動は超伝導転移温度以下でのみ現れ、ヒッグスモードと考えられる。特に Γ 点の超伝導ギャップエネルギー ($2\Delta_{\Gamma} \simeq 1$ meV) に相当する低周波数領域ではギャップエネルギーと超流動密度の振動が明瞭に観測された。一方で M 点のギャップに相当する高周波領域 (> 6 meV) でも振動が観測され、低周波と高周波で振動の位相が逆相となっていることが明らかになった。2 バンド系のギンツブルグーランダウ (GL) モデルを用いて考察を行った結果、観測された振動は強いバンド間相互作用によって結合したヒッグスモードに由来すると解釈できることがわかった。

鉄系超伝導体 FeSe 薄膜の中赤外光励起キャリアダイナミクス

FeSe は超伝導秩序の他に電子の軌道秩序を示し、他の鉄系超伝導体と異なり反強磁性秩序が現れないことが特徴で、超伝導と軌道秩序の相関を調べる上で重要な物質である。有効フェルミエネルギーが極端に小さいことが知られており、イオンゲートによる電子注入によって T_c が大幅に増強するなど、フェルミ面のトポロジーと超伝導の相

関が示唆されている。我々は光キャリア注入によって FeSe の相制御を実現することを目指し、FeSe 薄膜の中赤外光ポンプ-THz 光プローブ分光を行った。本研究の初期段階として、 Γ 点のホールバンドと M 点の電子バンドに由来するキャリアの基本的な性質を広い温度領域で決定するために THz 磁気光学測定を行った。最大で 7 T の磁場を印加しながら FeSe 薄膜試料を透過した THz 波の偏光回転角・楕円率を測定し、求めた光学ホール (Hall) 伝導度から電子・ホールそれぞれのキャリアの密度・有効質量・散乱時間を決定した。このようにキャリアの性質と THz 周波数領域での応答を理解した上で、 Γ 点のバンド間遷移に対応すると考えられる光子エネルギー 0.5 eV の中赤外励起によるダイナミクスを調べた。その結果 T_c 以下で、2 meV 以下に過渡光学伝導度虚部の増加が見られ、逆に 2 meV 以上では減少が観測された。これはマルチバンド超伝導体である FeSe の小さい方の超伝導ギャップを与える M 点の超流動密度が増加した一方で、大きい方の超伝導ギャップを与える Γ 点の超流動密度が減少したことに対応すると考えられる。中赤外励起光の光子エネルギー依存性を調べると、バンド間遷移のエネルギーより小さい非共鳴励起でも同様の振る舞いが観測された。この結果は、観測された超伝導増強の兆候は光励起キャリア由来ではなく、フォノンなどの他の低エネルギーの励起によるものであることを示唆している。観測された信号が超伝導増強かどうか、その微視的機構の解明と合わせて今後系統的な測定を行っていく予定である。

遷移金属ダイカルコゲナイド TaSe₂ の非平衡ダイナミクス

電荷密度波 (CDW) 相及び超伝導相を示す遷移金属ダイカルコゲナイド 3R-TaSe₂ 薄膜の電子相制御を目的として、ポンプ-プローブ分光を行った。ポンプ光として電場尖頭値 34 kV/cm、中心光子エネルギー 2.9 meV のモノサイクル THz 波を照射

すると、光学伝導度実部において 1.7 THz = 7 meV 以下のスペクトルウェイトが減少することを観測した。これは状態密度に 7 meV のギャップが開いたことを示唆している。差分光学伝導度虚部の分散型の形状から、この光誘起相が平衡状態にはない新たな CDW 相であることを示唆する結果を得た。このギャップ的構造は、CDW 転移温度以下において発達していくことから、平衡状態の CDW 相を始状態として光励起により生じる隠れた CDW 相である可能性が高い。同様の光誘起相変化は光子エネルギー 1.5 eV の近赤外光励起に対しても観測されたが、励起後初期の 1 ps 程度の時間では THz 波励起の方がより明確なギャップ構造が誘起されることもわかった。さらに、THz 波励起の場合は、新たなギャップ形成が、振動数 2.5 THz の振動を伴って発達する様子が観測された。この 2.5 THz の振動は、ラマン分光の先行研究において見られる平衡状態の CDW の振幅モードの振動数に一致していることから、光誘起相と平衡状態の CDW 秩序との間には相間の結合があることを示していると考えられる。

電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化

超伝導秩序変数の振幅の振動モードであるヒッグスモードは、電気・磁気分極を伴わないので、電磁波と線形には結合せず、線形応答としては観測できない。しかし、最近、超伝導体に直流電流を印加すると、電流に平行な電場成分を持つ偏光の電磁波とヒッグスモードが線形に結合し、光学伝導度スペクトルの実部において、超伝導ギャップのエネルギー ($\omega = 2\Delta$) に共鳴ピークが現れることが理論的に提案された。そこで我々は、図 1(a) のようなセットアップで、s 波超伝導体である NbN の薄膜 (26 nm 厚、 $T_c = 14.5$ K) に、臨界電流密度 (≈ 3 MA/cm²) に匹敵する直流電流を流しながら弱い THz 波を入射させ、透過した THz 波を時間分解測定することで、直流電流の注入による光学伝導度の変化を求めた。その結果、測定

する偏光の方向が電流と平行な配置において、超伝導ギャップ付近に、図1(b)に示すような電流密度の2乗に比例するピークが観測された。電流と偏光が直交する配置では、同じく図1(b)に示したように、このピークは消失する。これらの特徴に加えて、ピーク強度も、先述の理論に則った計算結果(図1(c))にオーダーで一致した。やや厚い試料との比較では、超伝導ギャップの拡大に連動して、このピークのエネルギーも高くなることを確認した。測定温度を上げていくと、超伝導ギャップの縮小とともにピークのエネルギーが低下し、ピークの幅は拡大していくが、光学伝導度の偏光依存性を注意深く調べると、超伝導転移温度の極近傍まで、このピークは観測された。

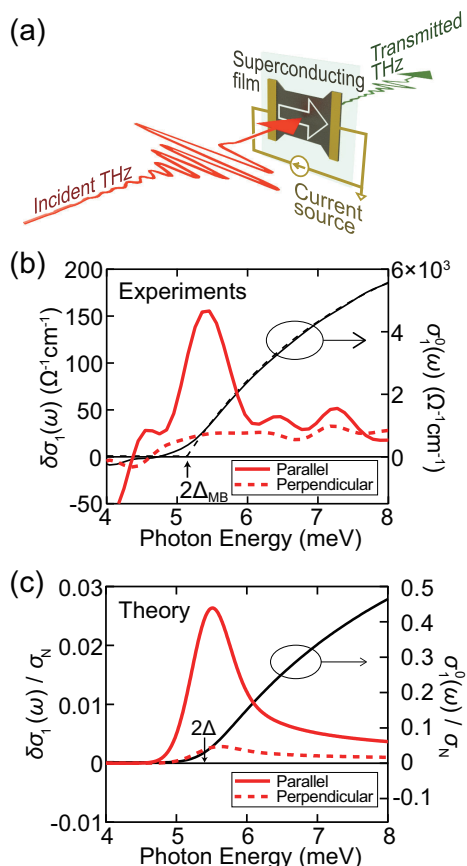


図1. (a) 電流注入下における透過配置テラヘルツ時間領域分光のセットアップ (b) $T = 5 \text{ K}$, $I = 2.6 \text{ A}$ における直流電流と平行・垂直な偏光の光学伝導度変化 (c) ギャップ $2\Delta = 5.4 \text{ meV}$, 幅 $\Gamma = 0.6 \text{ meV}$ を用いて理論計算から期待される光学伝導度変化

以上のように、電流注入によってヒッグスモードを赤外活性化し、観測する手法を確立した。この手法を用いれば、ヒッグス分光の対象を、d波超伝導体、CDW等競合する秩序との相関の研究にも広げることができると期待される。今後は、この手法をより広範な対象に適用する予定である。

半導体電子正孔系

直接遷移型半導体 GaAs における光誘起電子正孔 BCS 状態

半導体中の励起子は電子と正孔が束縛された準粒子であり、極低温・低密度においてボース・アインシュタイン凝縮する。一方、高密度になるとクーロン相互作用が遮蔽されて励起子は不安定化するが、十分低温では弱いながらも電子正孔対の束縛が回復し、凝縮して電子正孔BCS状態になると考えられている。これらの凝縮相は理論的には古くから予想されているものの、実験的には電子正孔系を十分に冷やすのが難しく、特に高密度側の凝縮相は長い間観測されていない。しかし、直接遷移型半導体における秩序変数が巨視的な電気分極であり、光と結合した量であることから、コヒーレントなレーザー光励起によって凝縮相を直接誘起することができると期待される。

そこで、我々は円偏光基底の近赤外ポンプ-近赤外プローブ分光法により、励起子を共鳴励起している間の過渡吸収スペクトルを測定した。この結果、励起子吸収線の分裂が観測された。比較的弱い励起強度において、これは励起子が光子の衣をまとったドレスト状態として理解される。しかし、励起強度が強くなると分裂したピークのうち低エネルギー側が消失し、また高エネルギー側のピークは連続吸収帯に重なって幅の広い構造となる。これは既に励起子が不安定化する密度領域に達しており、光誘起されたコヒーレンスをBCS的な多体効果の観点から理解することが求められる。

そのために、微視的なモデルの一つである半導体ブロッホ方程式を用いたシミュレーションを行

い、強い光電場の下にある電子正孔系の状態について考察した。まず、シミュレーションによって励起子吸収線の分裂の振る舞いを再現することに成功し、モデルの妥当性を確かめた。次に、シミュレーションからコヒーレントな電子正孔対の波動関数を抽出し、弱励起では励起子そのものだが、強励起では有限の波数でピークを持つクーパー対様の構造に変化することを示した。以上により、励起子吸収線を強く共鳴励起することによって、電子正孔 BCS 状態に類似したコヒーレントな状態を生成できることが確かめられた。以上の測定では光励起後に自発的な凝縮相が残存している徵候は見られなかったものの、将来的な凝縮相の実現やその理解に対しても示唆を与えるものであると考えられる。

励起子スピン緩和時間の評価とスピン分解された励起子間相互作用の定量評価

電子と正孔から構成される擬ボース粒子である励起子は、絶縁体、半導体のバンド間遷移近傍の光学応答を特徴づける素励起として古くから研究されてきた。なかでも励起子間相互作用は、励起子のボース・アインシュタイン凝縮の研究において、あるいは半導体の非線形光学応答の観点から理論・実験の両面から多くの研究がなされてきた。しかしながら、励起子間の相互作用エネルギーについては、励起子密度の評価が励起光の光子数から見積もられてきたこともあり、定量的な評価には曖昧性があった。特に、バルク結晶においてはその定量的評価はあまりなされてこなかった。そこで我々は、高品質の直接遷移型半導体 GaAs バルク結晶を対象に、偏光選択的励起子共鳴励起によるポンプ-プローブ分光を行い、励起子間相互作用の定量評価を試みた。励起子共鳴励起により低温かつスピン偏極した高密度の軽い正孔 1s 励起子を生成し、プローブ光の吸収スペクトルにおける励起子吸収線の変化を観測することで励起子間相互作用を調べた。相互作用エネルギーの励起子

密度依存性の測定にあたっては、テラヘルツ分光によって励起子内部遷移を捉えることにより、励起子密度を直接定量的に評価した。まず、励起後 10 ps において軽い正孔励起子同士から成る励起子分子、および重い正孔-軽い正孔混合励起子分子の誘導吸収が観測された。後者はバルクの閃亜鉛鉱型半導体では初の観測である。ポンプ-プローブ遅延時間を変化させ、これら 2 種類の誘導吸収強度の変化をもとに、電子のみ、正孔のみ、励起子内での電子正孔同時スピントリップの緩和時間を定量的に評価することができた。続いて、励起子吸収線のピークシフトの励起子密度依存性を測定し、励起子間相互作用エネルギーを定量的に評価した。スピン緩和を考慮に入れることで、励起子間相互作用エネルギーをスピン分解して評価し、2 電子・2 正孔すべてのスピンの組み合わせにおける励起子間相互作用エネルギーおよび s 波散乱長の定量評価に成功した。特に、電子同士・正孔同士がともに逆向きのスピンである励起子間の散乱長が正となることが本研究によって初めて実験により示された。

研究成果リスト

発表論文

1. Sachiko Nakamura, Yudai Iida, Yuta Murotani, Ryusuke Matsunaga, Hiroataka Terai, and Ryo Shimano: Infrared Activation of the Higgs Mode by Supercurrent Injection in Superconducting NbN, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 257001 (2019).
2. Hao Chu, Min-Jae Kim, Kota Katsumi, Sergey Kovalev, Robert David Dawson, Lukas Schwarz, Naotaka Yoshikawa, Gideok Kim, Daniel Putzky, Zhi Zhong Li, Helene Raffy, Semyon Germanskiy, Jan-Christoph Deinert, Nilesch Awari, Igor Ilyakov, Bertram Green, Min Chen, Mohammed Bawatna, Georg Christiani, Gennady Logvenov, Yann Gallais, Alexander V. Boris, Bernhard Keimer, Andreas Schnyder, Dirk Manske, Michael Gensch, Zhe Wang, Ryo Shimano, Stefan Kaiser: New collective mode in superconducting cuprates uncovered by Higgs spectroscopy, arXiv:1901.06675

3. Yuta Murotani and Ryo Shimano: Nonlinear optical response of collective modes in multiband superconductors assisted by nonmagnetic impurities, *Phys. Rev. B* **99**, 224510 (2019).
4. Naotaka Yoshikawa, Masayuki Takayama, Naoki Shikama, Tomoya Ishikawa, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, and Ryo Shimano: Charge carrier dynamics of FeSe thin film investigated by terahertz magneto-optical spectroscopy, *Phys. Rev. B* **100**, 035110 (2019).
12. N. Yoshikawa, K. Isoyama, K. Tomita, N. Shikama, T. Ishikawa, F. Nabeshima, A. Maeda, R. Shimano: Ultrafast carrier dynamics of FeSe thin film investigated by time-resolved terahertz spectroscopy, 2018 Workshop Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, Tokyo, Japan, December 11–12, 2018.
13. Hiroaki Niwa, Naotaka Yoshikawa, Dongjoon Song, Hiroshi Eisaki, Ryo Shimano: Terahertz spectroscopy of the cuprate superconductor $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ in the photoexcited nonequilibrium state, APS March meeting 2019, Boston, USA, March 4–8, 2019.

学位論文

5. 高山正行: “半導体 GaAs 中に共鳴励起された励起子系の励起子間相互作用と緩和ダイナミクスの研究” (博士論文)
6. 富田圭祐: “Nonlinear terahertz spectroscopy of multiband superconductors” (博士論文)
7. 丹羽 宏 彰: “銅 酸 化 物 高 温 超 伝 導 体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起非平衡ダイナミクス” (修士論文)

学会発表

国際会議 (一般講演)

8. Kota Katsumi, Naoto Tsuji, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Hideo Aoki, Yann Gallais, and Ryo Shimano: Observation of Higgs mode in the d-wave superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ by THz pump-optical probe spectroscopy, Low Energy Electrodynamics of Solids (LEES2018), Portonovo, Italy, June 24–29, 2018.
9. S. Nakamura, Y. Iida, R. Matsunaga, H. Terai, and R. Shimano: Infrared-active Higgs mode in an s-wave superconductor NbN under DC current injection, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), July 28, 2018.
10. K. Katsumi, Z. Z. Li, H. Raffy, Y. Gallais and R. Shimano: Observation of superconducting fluctuation in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ thin films by the intense terahertz pulse-driven Higgs mode, 2018 Workshop Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, Tokyo, Japan, December 11–12, 2018.
11. H. Niwa, N. Yoshikawa, D. Song, H. Eisaki, R. Shimano: Photoexcited nonequilibrium state of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ investigated by terahertz spectroscopy 2018 Workshop Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials, Tokyo, Japan, December 11–12, 2018.

国際会議 (招待講演)

15. Ryo Shimano: Exciton Mott transition: towards the understanding of phase diagram of e-h system, The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), Nara Kasugano International Forum, Nara City, July 9, 2018.
16. Ryo Shimano: Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, The International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) Ito International Research Center (IIRC), The University of Tokyo, July 28, 2018.
17. Ryo Shimano: Photo-induced nonequilibrium dynamics in superconductors, ENS-UT Workshop on Physics, Ecole Normale Supérieure, Paris, France, Sept. 27, 2018.
18. Ryo Shimano: Light-induced Nonequilibrium Dynamics in Superconductors, Max Planck-UBC-UTokyo Centre for Quantum Materials Workshop 2018, Koshiba Hall, The University of Tokyo, Dec. 10, 2018.

国内会議 (一般講演)

- 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月 9–12 日、同志社大学)
- 19. 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮: バルク GaAs における励起子の近赤外光ドレスト状態の観測
- 20. 高山正行, 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮: バルク GaAs における重い正孔-軽い正孔混合励起子分子の誘導吸収の観測

21. 丹羽宏彰, 吉川尚孝, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮: $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起非平衡状態における c 軸テラヘルツ応答のドーブ濃度依存性
22. 吉川尚孝, 丹羽宏彰, Dongjoon Song, 永崎洋, 玉作賢治, 田中義人, 大沢仁志, 久保田雄也, 山本航平, 山神光平, 平田靖透, 和達大樹, 島野亮: 時間分解 X 線回折による銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起結晶構造ダイナミクス
23. 中村祥子, 飯田雄大, 室谷悠太, 松永隆佑, 寺井弘高, 島野亮: 直流電流注入下での s 波超伝導体 NbN の赤外活性ヒッグスモード
- 第 10 回東京大学低温センター研究交流会 (2019 年 2 月 22 日、東京大学)
24. 富田圭祐, 磯山和基, 吉川尚孝, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: 鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ におけるヒッグスモード
25. 吉川尚孝, 高山正行, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: 鉄セレン薄膜のテラヘルツ磁気光学分光
26. 磯山和基, 吉川尚孝, 富田圭祐, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: FeSe 薄膜の中赤外光ポンプ-テラヘルツ光プローブ分光
27. 勝見恒太, Z. Z. Li, H. Raffy, Y. Gallais, 島野亮: 高強度テラヘルツ波パルス誘起ヒッグスモードを用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$
28. 丹羽宏彰, 吉川尚孝, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮: 銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光誘起非平衡状態
29. 中村祥子, 富田圭祐, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮: 電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるテラヘルツ第 2 高調波発生
30. 室谷悠太, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮: バルク GaAs における励起子の高密度光子ドレスト状態
31. 高山正行, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮: バルク GaAs における励起子間相互作用エネルギーと励起子 s 波散乱長
32. 菅沼大貴, 吉川尚孝, 松岡秀樹, 田中勇貴, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮: 電荷密度波物質 TaSe₂ の超高速光励起ダイナミクス
- 日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年 3 月 14-17 日 九州大学)
33. 富田圭祐, 磯山和基, 吉川尚孝, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: マルチバンド超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜におけるヒッグスモード
34. 中村祥子, 富田圭祐, 勝見恒太, 寺井弘高, 島野亮: 電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるテラヘルツ第 2 高調波発生
35. 勝見恒太, Z. Z. Li, H. Raffy, Y. Gallais, 島野亮: テラヘルツ波誘起ヒッグスモードを用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 薄膜における超伝導ゆらぎの観測
36. 室谷悠太, 島野亮: 2 バンド超伝導体における集団励起と非線形光学応答: 非磁性不純物散乱の効果
37. 菅沼大貴, 吉川尚孝, 松岡秀樹, 田中勇貴, 中野匡規, 岩佐義宏, 島野亮: テラヘルツポンプ-プローブ分光法による電荷密度波物質 TaSe₂ の非平衡ダイナミクス
38. 磯山和基, 吉川尚孝, 富田圭祐, 色摩直樹, 石川智也, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮: 中赤外光ポンプ-THz 波プローブ分光法で見る FeSe 薄膜の非平衡キャリアダイナミクス
- 国内会議 (招待講演)
39. 島野亮: 銅酸化物高温超伝導体の動的光応答、京都大学基礎物理学研究所研究会 「電子相関が生み出す新規な秩序と超伝導現象: トポロジ、液晶状態、動的現象」、京都大学 湯川記念館パナソニック国際交流ホール、2018 年 5 月 7 日
40. 島野亮: 超伝導体のヒッグスモード-光による秩序変数操作に向けて-、日本物理学会 2018 年秋季大会領域 4、領域 5 合同シンポジウム「光と固体中の電子・スピンの織り成す新奇量子現象」、同志社大学、2018 年 9 月 9 日
41. 島野亮: 非従来型超伝導体のヒッグスモード、KEK 連携コロキウム・研究会エディション、KEK 物質構造科学研究所、2019 年 1 月 16 日
- セミナー等
42. Ryo Shimano: Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, Colloquium at The Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Dresden, Germany, June 11, 2018.
43. Ryo Shimano: Higgs mode in conventional and unconventional superconductors, The Hamburg Photon Science Colloquium at Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter, Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), DESY, Hamburg, Germany, Feb. 9, 2019.
44. 島野亮: Ultrafast photo-control of quantum phases in condensed matter systems, 大阪大学理学研究科物性物理学セミナー、大阪大学 2018 年 11 月 28 日
45. 島野亮: Terahertz spectroscopy of elementary excitations in solids, 大阪大学物理学専攻国際物理学コース集中講義 2018 年 11 月 28-30 日

村川研究室

村川研究室は、村川と修士課程 3 名、博士課程 1 名の大学院生の計 5 名で、4 K 以下の温度でヘリウムを用いた量子液体の研究を行うための予備実験及び準備を進めている。また、1 K 以下の極低温、超低温の温度が手軽に実現できるコンパクトな冷凍機の開発研究も行っている。

本研究室で研究対象としているヘリウムは、単原子で一番軽い希ガスであることと、相互作用が非常に弱いことから特異な性質を持っている。例えば、沸点はどの物質より低く、常圧下では固体にならずに液体のまま存在する。さらにはその質量の小ささから量子性が顕著に現れる物質であり、液体状態のヘリウムを低温にすると、通常の液体とは異なる超流動と呼ばれる状態になることがよく知られている。この超流動は粒子の波動性と量子統計性が重要な役割を果たしており、電子系の超伝導とのアナロジーから相補的に研究が進んでいる。また、液体ヘリウムは非常に不純物の少ない系であり、格子という概念も存在しないため、純粋な流体の実験の舞台として理想的である。

本研究室では超流動ヘリウムとりわけ表面やナノスケール構造物中の超流動ヘリウムに注目して研究を行っている。本年度は実験室の立ち上げを行いつつ、その測定方法の検討を行っているほか、超流動流の新たな測定方法やコンパクトな新しいデザインの冷凍機を開発を他グループとの共同研究として行っている。

超流動ヘリウム 3-B 相の表面マヨラナ状態探索のための装置開発

近年の物性物理学の分野で大きな注目を集めている話題の一つはトポロジカル物質についてである。トポロジカル物質には大きく分けてトポロジカル絶縁体とトポロジカル超伝導・超流動体があるが、どちらもバルクではエネルギーギャップが開いている。これらの両トポロジカル物質の大きな特徴は表面にはバルク-エッジ対応のためにギャップレスの線型分散の状態が現れることである。そのため、トポロジカル物質では表面状態の研究が盛んに行われている。本研究室で対象としている超流動 ^3He はトポロジカル超流動体の一つとしてあげられていて大きな注目を集めている。

超流動 ^3He はクーパー対の対称性が p 波 3 重項であることが実験的に確立している唯一の系である。またバルクの物性も詳細に知られているため、測定結果がバルク部分によるものか表面状態によるものかの比較が非常に容易であるため、トポロジカル物質の表面物性の研究の試料としては理想的である。

超流動 ^3He のクーパー対の対称性は前述のとおり、

p 波スピン 3 重項であるため、内部自由度が存在し、複数の相が実現することが知られている。その中で低温低圧で現れ等方的なギャップが開く B 相と呼ばれる相は 3 次元ヘリカルトポロジカル物質で、高温高圧で現れるギャップに二つのポイントノードの存在する A 相は 2 次元カイラルトポロジカル物質であることが理論的に示されている。本研究室では特に 3 次元ヘリカルトポロジカル超流動の超流動 ^3He -B 相に着目している。

その超流動 ^3He -B 相の表面にはギャップレスの表面状態が存在することが実験的に明らかになっている [1]。これは、従来表面アンドレーエフ束縛状態として理解されていたものであり、近年のトポロジカル物質のバルク-エッジ対応の議論から予測されるものでもある。その低エネルギー励起である準粒子は粒子と反粒子が同等であるマヨラナフェルミオンとみなすことができると考えられている。理論の予測するところでは表面で準粒子が弾性散乱する鏡面度の高い自由表面において、そのエネルギー分散関係がマヨラナコーンと呼ばれる線型分散になるとされているが、それを直接指示する実験結果は得られていない。本研究室で

は表面状態の分散関係を明らかにするための装置開発を行っている。

手法としては準粒子ビームを超流動 ^3He -B 相の表面に打ち込み、表面量子アンドレーエフ反射の確率の角度依存性を測定する。準粒子ビームは黒体輻射の方法で作成する。液体 ^3He で満たされた実験セル中を小さな容器をもう一つ用意し、それに直径 1 mm 以下小さな穴で開け、そこから準粒子をビームとして取り出す。この容器は低温モーターでビームの射出方向を変え、表面にさまざまな入射角で準粒子ビームを打ち込みその反射率を小容器内部の温度計で観測する。

今年度は予備測定用のセルを作成した。このセルには、本測定でも用いることが可能な液体ヘリウムを冷却するための熱交換器が銀粉を銀板に焼結することで作成され設置されている。このセルを用いて 4 K までは確認が取れている低温モーターや温度計に用いる音叉型水晶振動子の動作確認を極低温において行う予定である。【国際会議 1】

マイクロスリット中の超流動ヘリウム 3

表面状態は自由表面だけでなく、容器の壁近傍にも存在する。超流動 ^3He のコヒーレンス長は数百 nm のため、サブマイクロオーダーの領域に閉じ込めると表面状態の寄与は自由表面等と比べ大きくなる。そこで、微細加工によりサブマイクロオーダーの構造を作り、超流動 ^3He 表面状態の集団励起状態の測定を試みている。

具体的には 1 μm 程度の大きさのスリットの中の超流動 ^3He -A 相および B 相の超音波測定や流れを検出する装置開発を東京大学超微細リソグラフィ・ナノ計測拠点の武田先端知ビルスーパークリーンルームの微細加工装置を利用して行っている。【国際会議 2】

この研究は慶應義塾大学白濱研究室との共同研究である。

ナノワイヤーによる量子渦の研究

超流動の性質、特に素励起の準粒子の密度や量子渦を調べる方法として、振動体を用意しその共

鳴特性を測定するというものが広く行われている。従来は直径数十 μm から数百 μm の超伝導ワイヤーや大きさ数 mm ～数十 mm の水晶振動子がよく使われてきた。しかしながら、この大きさは超流動のコヒーレンス長と比較すると非常に大きいため、期待していない表面の乱雑さの効果や付着残留渦の影響を受ける可能性も高い。

そこで本研究では振動部分が nm サイズであるナノ電気機械システム(NEMS)共振器の超流動研究への応用に向けて、カーボンナノチューブを用いた架橋ナノワイヤー共振器を準備し、予備実験を行った。ナノワイヤー共振器を用いて量子渦の運動状態を調べるため、ミクロンサイズの典型的な超伝導ワイヤー振動子や音叉型水晶振動子を量子渦発生器として準備した。超流動ヘリウム中で各振動子の動作テストを行い、ある臨界振動速度以上で量子渦生成を観測した。これらの振動子とナノワイヤー共振器を配列させたアセンブリを作製した。現在実験準備を進めている。【国際会議 3】

この研究は慶應大学白濱研究室などとの共同研究である。

超低温で動作するヘリウム 3 融解圧温度計の作成

低温実験において低温環境を作成する冷凍機と並び重要な装置は温度計である。低温環境で使用する温度計には①低温においても大きく変化する測定可能な物理量がある、②測定するに当たり発熱が小さい、といった条件が必要である。よく使われる抵抗温度計は 30 mK 以下では測定の際に発生する熱によって温度計の温度が冷凍機の温度と剥離してしまい使用できない。そこで、より低温域でよく使用されている温度計のひとつが ^3He 融解圧温度計 (Melting Curve Thermometer: MCT) である。

MCT は超低温において、固体 ^3He のエントロピーがほぼスピンの自由度 2 による $k\log 2$ とほぼ一定になることに対して、縮退したフェルミ流体である液体 ^3He のエントロピーが温度に比例した

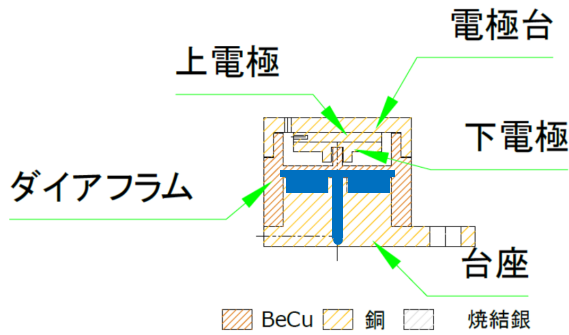


図 1: MCT の断面図。図中の青い部分に ^3He が導入される。

形で充分大きな値として残ることに由来して、融解圧が温度に大きく依存することを利用する。

圧力測定は ^3He が入る領域の一面を稼動できるダイアフラムにし、そこに電極をつけ電極間の静電容量を測定することで行う。図 1 に断面図を載せる。静電容量測定は発熱が小さいため、温度の浮きは小さい。また、MCT は融解圧の極小値である M 点、液体及び固体の相転移点である A 点、B 点、S 点と呼ばれる温度圧力定点が 4 つもあることから自己校正が可能であることも大きな利点として挙げられる。

作成した MCT は希釈冷凍機に搭載し、動作確認を行った。図 2 に ^3He 融解圧測定的时间経過を示す。温度域は 300 mK 程度であり、ちょうど融解圧の極小値である M 点が観測される領域である。0.5 hour より前では加熱、それ以降は冷却過程である。どちらの過程でも圧力の極小である M 点が見えており、MCT がこの温度域では正しく動いていることが確認できた。

また、冷凍機に備え付けの温度計が低温を示さなかったため、抵抗温度計の不調が疑われたが、作成した MCT を用いても冷えていないこと確かめられたため、温度計ではなく冷凍機の不調であることが判明した。

コンパクトな冷凍機の開発

低温環境は物性物理学の研究に必須の舞台であるだけでなく、量子計算や雑音の低減による高感

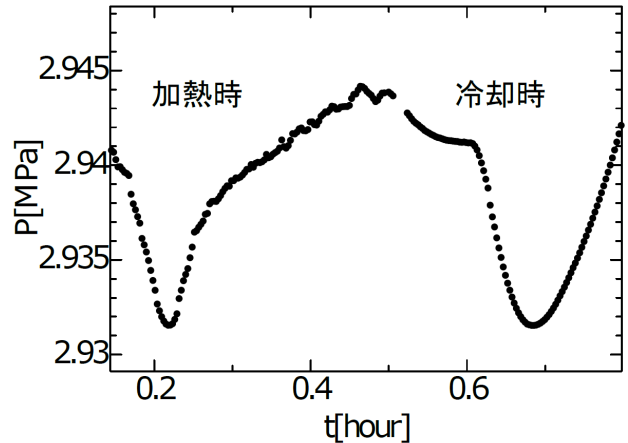


図 2: 融解圧の時間推移。

度測定等幅広い分野で必要とされているが、10 mK 程度までの極低温温度域に到達できる希釈冷凍機やさらに低い 1 mK 以下の超低温温度域に到達できる核断熱消磁冷凍機は、部品数も非常に多く、装置が長大であり、抜き差しするための設置場所を選ぶことや価格が高価になることなどから、多くの研究者が気軽に使用できる状況ではない。そこで本研究室ではコンパクトで利便性の高い希釈冷凍機と核断熱消磁冷凍機の開発を行っている。

・マイクロ流路を用いた希釈冷凍機の開発

希釈冷凍機を小型化かつ部品点数の低減をするために、近年急速に発展している微細加工技術を用いてシリコン基板上にマイクロ流路を形成して実現を目指す。マイクロ流路にする理由は、流路に対する表面積が大きくできるため、熱交換器としてコンパクトにできるためである。冷凍機として使うためにはシリコン基板と金属配管を接続しなければならない。今年度はシリコン基板と金属配管への接続方法について各種接着剤でテストを行った。通常低温で使われるエポキシ系接着剤は低温においてシリコン基板との熱収縮率の違い等により剥がれてしまった。一方、シリコン系の接着剤はヘリウム温度においてもリークが検出されることがなく使用に耐えられることがわかった。

この研究は日本女子大学の石黒研究室などとの共同研究である。

• 小型連続核断熱消磁冷凍機の開発

核断熱消磁冷凍機はワンショット型の冷凍法のため、強力な希釈冷凍機、超伝導磁石および核スピン母材となる大きな核ステージが必要であるが、本研究では、核ステージを二つ用意し、それぞれを交互に消磁することで小さい核ステージで連続的に 1 mK 以下の超低温環境を維持できる冷凍機の開発を行っている。【学会発表 3-4、国際会議 4】

本年度は前年度に設計した超伝導マグネットを実際に作成し、性能チェックを行った。測定はホールプローブを用いて、中心軸上の磁場プロファイルを取得した。強磁性体シールドの効果を見るために測定はシールドが有る場合と無い場合の両方でおこった。図 3 に測定結果を示す[2]。青点と赤点は強磁性シールドが無い場合と有る場合の測定結果で、破線と実線がそれぞれの数値計算結果である。実験結果はほぼ数値計算の結果を再現した。コイルコンスタンスも 6%程度の範囲内で一致した。測定結果から当初予測した 6 A で 1.3 T、またマグネット外においては強磁性体シールドにより充分漏れ磁場が抑制されていることが確認できた。

また、ヒートスイッチに関しては無冷媒冷凍機においてテストすべくスイッチコントロール超伝導マグネット用電流導入ラインの設計及び導入を

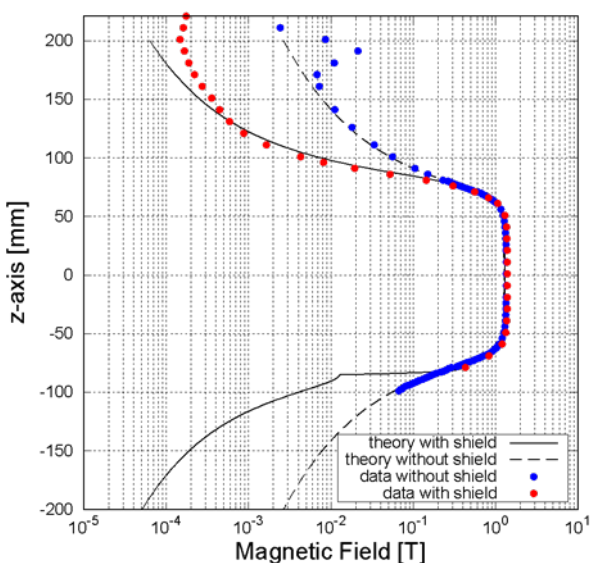


図 3：作成した強磁性シールド付き超伝導マグネット中心軸上の磁場プロファイル。

行っている。

この研究は、共同利用部門の戸田亮氏および理学系研究科物理学専攻・低温センター研究開発部門の福山研究室との共同研究である。

また、これらの他に、理学系研究科物理学専攻・低温センター研究開発部門の福山研究室との共同研究でグラファイト上に吸着した 2 次元 ³He の研究も行っている。

[1] レビューとして : Y. Okuda and R. Nomura, JP:CM **24**, 343201 (2012); R. Nomura et al., Physica **55**, 42 (2014).
 [2] S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, Hiroshi Fukuyama, arXiv:1909.00567.

研究成果リスト

学位論文

1. 山崎翔太
“超流動ヘリウム 3 における表面分散関係測定のためのヘリウム 3 融解圧力温度計の開発”(修士論文)
2. 鈴木尚将
“核磁気共鳴法による HD2 層膜上単原子層ヘリウム 3 の量子相の研究”(修士論文)

学会発表

3. 2 次元ヘリウム 3 の新奇量子スピン液体状態の解明に向けた低発熱 NMR セルの開発
鈴木尚将, 松井朋裕, 村川智, 福山寛
第 10 回低温センター研究交流会 (東京大学) 2019 年 2 月
4. 超低温で用いるヘリウム 3 融解圧力温度計の開発
山崎翔太
第 10 回低温センター研究交流会 (東京大学) 2019 年 2 月
5. 小型超伝導マグネットの開発
瀧本翔平, 戸田亮, 村川智, 福山寛
第 10 回低温センター研究交流会 (東京大学) 2019 年 2 月
6. 小型連続核断熱消磁冷凍機用超伝導マグネットの開発
瀧本翔平, 戸田亮, 村川智, 福山寛
日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大学) 2019 年 3 月

国際会議

7. Development of Equipment to Observe Majorana Cone at the Surface of Superfluid Helium Three B phase
K. Yoshida, S. Yamazaki, and S. Murakawa
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (Tokyo, Japan)
2018年7月
8. Fabrication of Micro-slit Structures for Studies of Topological Properties of Quasi-two Dimensional Superfluid ^3He
T. Tani, S. Murakawa, R. Wada, K. Kaiya, K. Yamada, K. Itoh, Y. Mita, and K. Shirahama
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (Tokyo, Japan)
2018年7月

9. Nanomechanical Wire Resonator for Probing Quantum Vortex in Superfluid He
Y. Nago, Y. Morikawa, Y. Tanaka, K. Kato, T. Takagi, H. Maki, S. Murakawa, and K. Shirahama
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (Tokyo, Japan)
2018年7月
10. Development of a Compact and Low Heat-dissipation Shielded Superconducting Magnet Usable at Sub-mK Temperature
S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, and Hiroshi Fukuyama
International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018) (Tokyo, Japan)
2018年7月

福山研究室

1. 単原子層ヘリウム4における超液晶相の検証実験

グラファイト表面に物理吸着した2原子層ヘリウム (He) の第2層目は、密度の上昇と共に液相 (L2) \rightarrow 低密度局在相 (C2) \rightarrow 不整合固相 (IC2) と相変化することが知られている。C2相は、原子分子系では初めての量子液晶相と考えられ、具体的な構造は量子ヘキサティック相が有力である。実際、 ^3He のC2相では、それを支持する核スピン系 ($I = 1/2$) のギャップレス量子スピン液体状態が観測されている。一方、ボース粒子系である ^4He -C2相の当該密度付近では、過去の複数のねじれ振り子実験で、密度に対する reentrant な超流動応

答が $T \leq 300$ mK で報告されている。もしこれが事実なら、C2相が極低温でも流動性をもつことになり、量子液晶相のさらなる状況証拠であるだけでなく、空間対称性の破れとゲージ対称性の破れが共存する“超液晶”状態が実現している可能性が高まる。しかし、過去のねじれ振り子実験では、用いた吸着基板毎に不均一部分の割合が異なるため、試料の密度スケールの不定性が大きく、L2、C2、IC2のうちどの相が超流動応答を示すのか明らかになっていない。

この問題を解決するため、我々は、低温で作成した同じ ^4He 試料に対し、相決定ができる比熱測定と超流動性を観測できるねじれ振り子測定を同

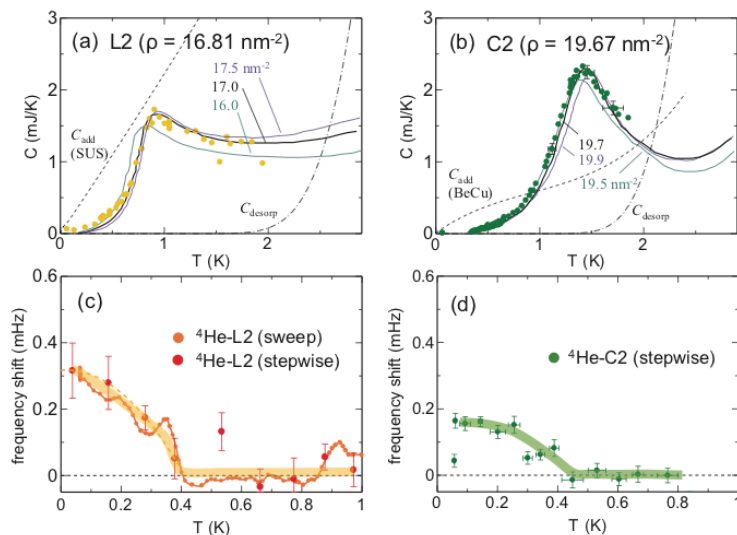


図1. 2層系 ^4He の2層目の液相 (L2) と量子液晶相 (C2) で測定した(a)(b)熱容量。図中の細実線は近傍面密度に対する先行実験の結果。(c)(d)ねじれ振り子共鳴周波数シフトの温度依存性。原子スケールで平坦な基板上の単原子層液体の超流動KT転移と量子液晶の超流動転移を初めて観測した例である。

時に実施できる装置を開発した。技術的に最も困難だった点は、ねじれ振子の高い剛性を損なわないよう比熱測定のための断熱支持機構を設計することで、我々は、アルミナ製の断熱支持棒でこの問題を解決した。

図 1(a)(b)に L2 相 (2 層目面密度 4.9 nm^{-2}) と C2 相 (8.8 nm^{-2}) の熱容量測定の結果を示す。いずれも比熱専用装置で測定した過去の結果 (図中細実線) とよく一致しており、量子相を確実に同定できている。一方、図 1(c)(d)は、それらの試料で観測されたねじれ振子の共鳴周波数のシフトである。いずれも $0.4 \sim 0.5 \text{ K}$ 以下で有限の周波数シフト、すなわち超流動応答が観測された。別途観測した 4 層目液体の超流動転移に伴う周波数シフトを Kosterlitz-Thouless (KT) 理論で解析して感度較正を行い、図 1(c)(d)のデータを絶対零度に外挿すると、L2 相と C2 相の超流動密度はそれぞれ 0.4 層分と 0.1 層分に相当する。このことから、観測された超流動応答はバルクな性質であり、量子液晶相では液相に比べ超流動密度が約 $1/4$ まで減少することが分かった。今後、ねじれ振子の感度と安定度を改善し、2 層目の全密度域で詳細なデータを取得する予定である。

本研究は、共同利用部門の戸田亮氏および研究開発部門の中村祥子氏、理学系研究科物理学専攻の宇佐美潤氏および松井朋裕氏との共同研究である。

2. グラフェン・ナノリボンにおけるスピン偏極状態の観測とその基板効果

グラフェンの 2 種類の端構造のうち、副格子の対称性が破れたジグザグ端には“端状態”と呼ばれる特異な局在電子状態がフェルミエネルギー (E_F) 近傍に形成されることを、我々は 2005 年に初めて実験的に見出した。端状態のバンド幅は狭く、電子相関などわずかな摂動の下で、様々な不安定性が生じ得る。実際、ジグザグ端で挟まれたナノリボン (z -GNR: zigzag graphene nanoribbon) を作成できれば、同じ端内で強磁性

的に、対向する端間で反強磁性的にスピン偏極することが理論予測されており、スピントロニクス観点からも注目されている。

我々は、グラファイトを高温下で水素プラズマに曝して、その表面にジグザグ端で囲まれた単原子層深さの六角形ナノピットを多数作成する技術を確認した。そして、2つのナノピットに挟まれた幅 20 nm 以下のリボン状の領域で、エッジ状態密度のスピン分裂に対応した状態密度のダブルピーク構造を初めて走査トンネル分光 (STS) 測定することに成功した (2017 年度低温センター年報 p.11-16 参照)。この系は、バルクグラファイト表

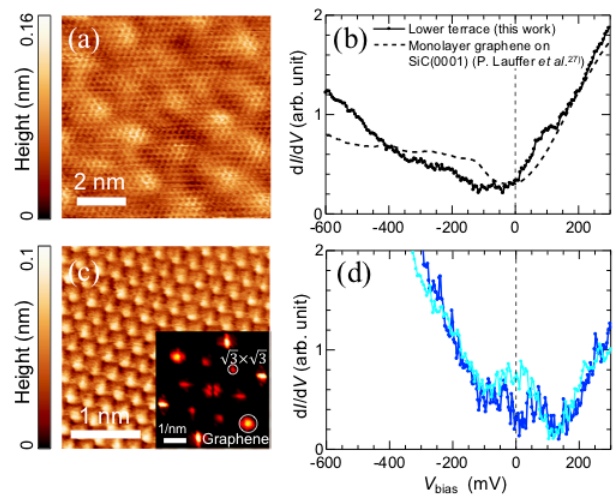


図2. 水素プラズマ処理したSiC(0001)上グラフェンの低いテラス上で観測した(a) STM像と (b) トンネルスペクトル、及び隆起したテラスで観測したSTM観測(c) (挿入図はそのFFT)と (d) トンネルスペクトル。

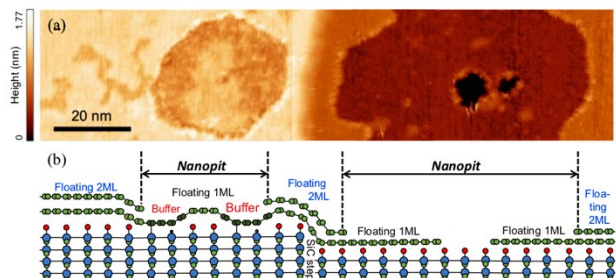


図3. 水素プラズマ処理したSiC(0001)上グラフェンの広い範囲の(a)STM像と、(b)その断面の模式図。緑・青・赤丸はそれぞれ炭素・シリコン・水素原子を示す。

面を基板とした z -GNR と見なせる。実際、観測したエネルギー分裂幅 40~60 meV は、真空中に孤立した z -GNR に対する理論計算よりずっと小さく、単層グラフェン基板上的 z -GNR に対する理論計算とよく一致する。今年度は、こうした基板効果を確かめるため、SiC(0001)上にエピタキシャル成長させた単層/2層グラフェンに z -GNR を形成する水素プラズマエッチングを試みた。

SiC(0001)上グラフェンは、下層に基板の Si 原子と結合した炭素層 (バッファ層) をもち、その凹凸を反映して、図 2(a)のように 6×6 の長周期構造が STM 観測される。また、基板からの強い電子ドープのため、 E_F を中心に状態密度のエネルギー依存性が非対称になる (図 2(b))。形成されたナノピット付近の STM 像とその断面の模式図を図 3(a) (b)に示す。バルクグラファイトの表面同様、単原子層深さのナノピットが生成されているが、ピットサイズはやや大きく密度はより高い。また、形状は六角形から不定形まで分布が大きい。今後、より直線性の高い端をもつナノピットを作成するパラメータ探しが必要である。

水素プラズマエッチングは、ナノピットだけでなく、図 3(a)の左側領域に見られるような約 0.12 nm 隆起した複雑な形状をもつテラス構造も形成することが分かった。ここでは 6×6 の長周期構造は観測されず (図 2(c))、状態密度の非対称性も無いことから (図 2(d))、最表面のグラフェンがバッファ層から浮いている (QFSG: quasi-free standing graphene)、あるいはバッファ層と SiC 基板との結合が切れた構造だと考えられる。ただし、水素未終端の Si 原子由来の欠陥が存在するようで、STM 像にはわずかに $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 超周期構造が見られ (図 2(c)挿入図)、トンネルスペクトルには低エネルギーに局在ピークが見られる (図 2(d))。こうした欠陥量を制御した上で QFSG に z -GNR を形成し、スピン偏極に及ぼす基板効果を調べてゆきたい。

本研究は、関西学院大学理工学部の日比野研究

室、本学理学系研究科物理学専攻の松井朋裕氏および André E. B. Amend 氏との共同研究である。

3. 新しいグラファイト系ヘリウム吸着素材の物性評価

前述した単原子層ヘリウムにおける新奇超流動相の探索実験では、従来、天然のグラファイト微結晶あるいは化学気相成長法 (CVD) で作成した人工グラファイト結晶 (HOPG) の内部にグラファイトインタカレーションの手法で多数の劈開面を作った exfoliated graphite が吸着基板として用いられてきた。しかし、それらの表面は 10~200 nm サイズの微結晶に分割されたモザイク構造をしており、ねじれ振子などで超流動流を観測する際の障害となっている。結晶の連結性がより高く、かつ比表面積も比較的大きな新たな吸着基板が求められている。

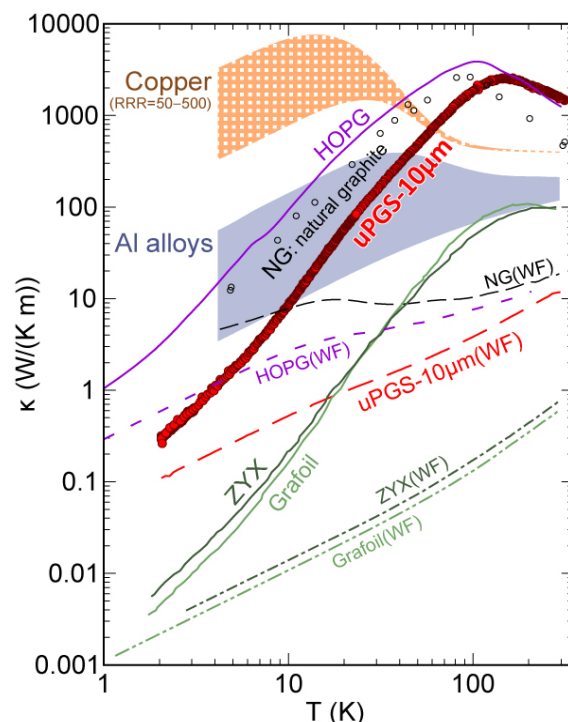


図4. 10 μm 厚 PGS の面内熱伝導率の測定結果 (図中赤丸)。PGS は、従来基板の2種類の exfoliated graphite (ZYX、Grafoil) と比べて全温度域で熱伝導率が高く、室温から数10 K の範囲では銅やアルミニウムよりも高い熱伝導率をもつ。WFは、電気伝導度の測定値から Wiedemann-Franz 則を用いて評価した、伝導電子による寄与。

我々は、最近開発された、高分子フィルムの超高温焼成で得られる厚さ 10~100 μm のグラファイト薄膜シート、Pyrolytic Graphite Sheet (PGS) に着目し、その熱的、電氣的、磁氣的な物性評価を室温から 2 K までの広い温度範囲で行った。図 4 に示すように、PGS の面内熱伝導率は exfoliated graphite に比べて 1 桁以上高く、X 線散乱、ラマン分光、走査トンネル顕微測定などの測定結果も併せると、高伝導率はこの素材の結晶性の高さに由来することが分かった。さらに、77 K での等温吸着圧力測定から、窒素分子がグラファイトハニカム格子に特徴的な整合相を形成することも示し、表面の原子レベルでの結晶性も高いことが確認できた。なお、この物質は、室温から 60 K に至る広い温度域で銅やアルミニウムよりも高い熱伝導率を示し (図 4)、かつ比重も小さいことから、高熱伝導素材として幅広い応用が期待できる新素材である。

本研究は、低温センター研究開発部門の中村祥子氏を中心に、同部門の藤井武則氏や共同利用部門の戸田亮氏と協力して実施した。

4. 小型サブミリケルビン連続冷凍システムの開発

我々は、市販の希釈冷凍機や衛星に搭載できるほど小型で、0.8 mK までの超低温度を連続発生できるサブミリケルビン連続冷凍装置の開発を進めている。磁気作業物質は増強核磁性体 PrNi_5 (0.2 mol) の核スピン系で、これを最大磁場 1.2 T の磁気シールド付小型超伝導マグネットに収めて核ステージとする。この 2 つの核ステージを 2 つの超伝導 Zn 熱スイッチを介して、試料と希釈冷凍機の間で直列接続するのが基本構成である。

今年度は、製作した磁気シールド付小型超伝導マグネットの性能テストを行った。マグネットは、外径 0.14 mm の NbTi 多芯超伝導線 (フィラメント径 10 μm 、54 本) で巻き、その寸法はボア径 22 mm、長さ 139 mm で、FeCoV 製の磁気シールドで囲まれている。 $T=4.2$ K での実測で、設計通

りのコイル定数 (0.23 T/A) をもち、最大磁場も 1.4 T を発生できることを確認した。軸方向の漏れ磁場もシミュレーションの結果とよく一致した。さらに、磁場掃引する際の線材の磁気ヒステリシス起源の発熱量を 4.2 K の断熱真空中で実測した。1.4 T までの励磁・消磁 1 サイクルの間に、磁場掃引速度に依らず計 60~70 mJ 発熱することを確認した。この値は、別途行った線材の磁気ヒステリシス測定の結果から予想される 100 mJ と矛盾しない。以上、設計通りマグネットボビン希釈冷凍機の分留器に熱アンカーすれば、クエンチや PrNi_5 ステージへの輻射熱が懸念されるようなマグネットの昇温は防げることが確認できた。

本開発は、研究開発部門の村川研究室、共同利用部門の戸田亮氏との共同研究である。

研究成果リスト

原著論文

1. André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Hideki Sato, and Hiroshi Fukuyama, "STS Studies of Zigzag Graphene Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching", *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, **16**, 72-75 (2018); also listed in the CRC Annual Report 2017.
2. Sachiko Nakamura, Daisuke Miyafuji, Ryo Toda, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama, "Characterization of Pyrolytic Graphite Sheet: A New Type of Adsorption Substrate for Studies of Superfluid Thin Films", *Journal of Low Temperature Physics*, **192**, 330-345 (2018).
3. Sachiko Nakamura, Takenori Fujii, Shoji Matsukawa, Masayuki Katagiri, and Hiroshi Fukuyama, "Specific heat, thermal conductivity, and magnetic susceptibility of cyanate ester resins - An alternative to commonly used epoxy resins", *Cryogenics*, **95**, 76-81 (2018).
4. Jun Usami, Nobuyuki Kato, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama, "The Role of Substrate Roughness in Superfluid Film Flow Velocity", *Journal of Low Temperature Physics*, **196**, 520-59 (2019).

学位論文

5. 宇佐美 潤:
超流動 He フィルムフロー律速機構の研究と
2次元新奇超流体の探索 (修士論文)

学会発表

国際会議 (招待講演)

6. “STM/S Studies of the Spin Polarized Zigzag Graphene Edge States”, Tomohiro Matsui, André E. B. Amend, Hideki Sato and Hiroshi Fukuyama, Tsinghua University - the University of Tokyo Joint Symposium on Physics & Materials, (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 20–21, 2018).
7. “New Quantum Spin Liquids in ^3He Monolayer on Hydrogen Plated Graphite”, Masahiro Kamada, Ryuji Nakamura, Katsuyoshi Ogawa, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 25–31, 2018).
8. “Novel quantum phases of helium confined in two dimensions from quantum liquid-crystal to spin-liquid”, Hiroshi Fukuyama, 12th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals, (Wroclaw, Wojanów, Poland, Aug. 26–31, 2018).

国際会議 (一般講演)

9. “Quantum Phase Diagram of ^3He Monolayer on Hydrogen Plated Graphite”, Masahiro Kamada, Ryuji Nakamura, Katsuyoshi Ogawa, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 25–31, 2018).
10. “The Role of Substrate Roughness on the Superfluid Film Flow Rate of ^4He ”, Jun Usami, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 25–31, 2018).
11. “Development of a Compact and Low Heat-dissipation Shielded Superconducting Magnet Usable at Sub-mK Temperature”,

Shohei Takimoto, Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama, International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, July 25–31, 2018).

12. “STM/S Studies of the Spin Polarized Zigzag Graphene Edge States”, Tomohiro Matsui, André E. B. Amend, Hideki Sato and Hiroshi Fukuyama, 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) *in conjunction with* 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26), (Sendai International Center, Sendai, Japan, October 21–25, 2018).
13. “H-plasma Etching of Graphene on SiC(0001)”, André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Kenshiro Hara, Yi Lin Liu, Hiroki Hibino, and Hiroshi Fukuyama, 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) *in conjunction with* 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26), (Sendai International Center, Sendai, Japan, October 21–25, 2018).

国内会議 (招待講演)

14. 単原子層ヘリウム3で見つかった2種類の量子スピン液体状態
福山 寛
日本物理学会第74回年次大会 (九州大学、2019年3月14–17日)

国内会議 (一般講演)

15. 小型超低温連続冷凍システムの開発 II
戸田 亮、瀧本翔平、植松祐真、村川 智、福山 寛
第96回2018年度春季低温工学・超電導学会 (東京、タワーホール船堀、2018年5月28–30日)
16. 走査型プローブ顕微鏡用ヘリウム循環冷却システムの熱解析(III)
寺岡総一郎、青井優樹、横田統徳、佐々木徹、宮武 優、福山 寛
第96回2018年度春季低温工学・超電導学会 (東京、タワーホール船堀、2018年5月28–30日)
17. 2次元ヘリウム4における比熱と非古典的回転慣性の同時測定
宇佐美潤、戸田 亮、中村祥子、松井朋裕、福

- 山 寛
日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9–12 日)
18. H-plasma etching of graphene on SiC(0001)
André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Kenshiro Hara, Yi Lin Liu, Hiroki Hibino, and Hiroshi Fukuyama
日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学、2018 年 9 月 9–12 日)
19. 単原子層ヘリウム 3 の量子液晶相と量子スピン液体状態
福山 寛
物性研究所短期研究会「量子多体効果が生み出す液晶的電子状態」(東京大学、物性研究所、2018 年 12 月 27–28 日)
20. 単原子ヘリウム 4 の比熱と超流動性の同時測定装置の開発
宇佐美潤、戸田 亮、中村祥子、松井朋裕、福山 寛
第 10 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2019 年 2 月 22 日)
21. STM/S Studies of H-plasma Etched Graphene on SiC(0001)
André E. B. Amend、松井朋裕、日比野浩樹、福山 寛
第 10 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2019 年 2 月 22 日)
22. 2 次元ヘリウム 3 の新奇量子スピン液体状態の解明に向けた低発熱 NMR セルの開発
鈴木尚将、松井朋裕、村川 智、福山 寛
第 10 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2019 年 2 月 22 日)
23. 小型超伝導マグネットの開発
瀧本翔平、戸田 亮、村川 智、福山 寛
第 10 回 低温センター研究交流会 (東京大学、2019 年 2 月 22 日)
24. 小型連続核断熱消磁冷凍機実現に向けた小型熱スイッチの開発
戸田 亮、瀧本翔平、村川 智、福山 寛
総合技術研究会 2019 九州大学 (九州大学、2019 年 3 月 6–8 日)
25. 2 次元ヘリウム 4 における比熱と非古典回転慣性の同時測定 II
宇佐美潤、戸田 亮、中村祥子、松井朋裕、福山 寛
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学、2019 年 3 月 14–17 日)
26. 小型連続核断熱消磁冷凍機用超伝導マグネットの開発
瀧本翔平、戸田 亮、村川 智、福山 寛
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学、2019 年 3 月 14–17 日)
27. 表面弾性波照射による層状超伝導薄膜の伝導特性の変調
横井雅彦、河村智哉、藤原聖士、荒川智紀、福山 寛、新見康洋、小林研介
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学、2019 年 3 月 14–17 日)
- セミナー等
33. 2次元ヘリウム3系で見つかった2種類の量子スピン液体磁性について
福山 寛
大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻理論物質学グループにてセミナー講演 (2018 年5月15日)
34. 極低温への招待
福山 寛
静岡県立静岡東高校による東京大学低温センター見学会にて講義 (2018年8月7日)
35. STS Observations of the Spin-Polarized Edge State in Zigzag Graphene Nanoribbons
福山 寛
台湾国立交通大学電子物理系セミナー (新竹、台湾) (2018年11月19日)

藤井 武則

電気二重層キャパシタ構造によるカーボンナノチューブの熱電変換制御

熱電変換素子においては、p 型と n 型の熱電材料を直列に繋ぐことによって有効な起電力を得ているが、p 型と n 型それぞれの材料の熱電性能を最適化することは難しい。我々は電気二重層キャパシタ構造を用いて、p 型と n 型を同時にキャリ

ア制御し、熱電素子の最適化を行っている。

ここでは、正極と負極に単層カーボンナノチューブ (SWCNT) を用いて、その間にゲート電圧をかけ、SWCNT 表面に p 型と n 型のキャリア誘起することによって熱電特性の制御を行った。さらに、電圧を掛けたまま温度を下げ、電解液を凍らせることにより蓄積電荷を固定させ、p-n 間

を短絡することによって熱電素子の作製を行った。

作製した素子の熱起電力と抵抗率を測定した結果、それぞれ、 $150 \mu\text{V/K}$, $0.0008 \Omega\text{m}$ であり、パワーファクターは $0.03 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ であった。負荷を接続し一対の p-n 接続から取り出せる最大電力を見積もったところ、 $\Delta T = 6.7 \text{ K}$ で約 20 pW であった。

次に、熱電性能指数 ZT を求めるために、定常法によって熱伝導率を測定することを試みた。室温での熱伝導率は約 $180 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ であり、これまで報告されている $174\sim 220 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ とほぼ一致している。熱電性能指数は 4.2×10^{-5} と非常に小さな値であったが、今回、動作が確認された新しい構造の熱電素子は、様々な物質に適応可能で、今後、遷移金属ダイカルコゲナイト、有機、無機ハイブリッド材料などで熱電性能を最適化した素子の試作を行いたい。

研究成果リスト

発表論文、著書等

1. Single crystal growth of bulk InGaZnO_4 and analysis of its intrinsic transport properties
Yusuke Tanaka, Kazuhiro Wada, Yuki Kobayashi, Takenori Fujii, Saleem J. Denholme, Ryotaro Sekine, Naoki Kase, Noboru Kimizuk and Nobuaki Miyakawa
Cryst. Eng. Comm. **21**, 2985 (2019)
2. Antiferromagnetic order is possible in ternary quasicrystal approximants
A. Ishikawa, T. Fujii, T. Takeuchi, T. Yamada, Y. Matsushita, and R. Tamura
Phys. Rev. B **98**, 220403(R) (2018)
3. Specific heat, thermal conductivity, and magnetic susceptibility of cyanate ester resins — An alternative to commonly used epoxy resins
Sachiko Nakamura, Takenori Fujii, Shoji Matsukawa, Masayuki Katagiri, Hiroshi Fukuyama
Cryogenics **95**, 76 (2018)

学会発表

4. Au 系 Tsai 型 1/1 近似結晶の単結晶作製と磁性
稲垣和樹, 石川明日香, 常盤和靖, 廣戸孝信, 藤井武則, 田村隆治

- 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学) 2018 年 9 月
5. Au-Al-Tb 系近似結晶の作製と磁性 II
櫻井晶, 石川明日香, 常盤和靖, 藤井武則, 田村隆治
日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学) 2018 年 9 月
6. Au-SM-RE 系 1/1 近似結晶の物性
服部将之, 石川明日香, 常盤和靖, 室裕司, 藤井武則, 田村隆治
日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学) 2018 年 9 月
7. 有機伝導体 $\kappa\text{-(ET)}_4\text{Hg}_{2.89}\text{Br}_8$ の圧力下熱電効果測定
若松浩大, 藤井武則, 鈴木悠司, 宮川和也, 谷口弘三, 鹿野田一司
日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学) 2018 年 9 月
8. Bi-rich な Bi-2212 単結晶の輸送特性(II)
川村圭輔, 山口隼平, 佐々木菜絵, 藤井武則, 木村尚次郎, 谷口晴香, 中西良樹, 吉澤正人, 三宅厚志, 金道浩一, 渡辺孝夫
日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学) 2018 年 9 月
9. アンダードープ Bi-2223 の磁場中輸送特性
山口隼平, 佐々木菜絵, 川村圭輔, 足立伸太郎, 藤井武則, 木村尚次郎, 伊藤利充, 谷口晴香, 中西良樹, 吉澤正人, 三宅厚志, 金道浩一, 渡辺孝夫
日本物理学会 2018 年秋季大会 (同志社大学) 2018 年 9 月
10. Au-Al-Tb 系近似結晶の磁性
櫻井晶, 鈴木慎太郎, 藤井武則, 常盤和靖, 田村隆治
日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大学) 2019 年 3 月
11. 単層カーボンナノチューブ膜の定常法による熱伝導率測定
藤井武則
日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大学) 2019 年 3 月
12. Bi-rich な Bi-2212 単結晶の輸送特性 III
渡辺孝夫, 川村圭輔, 山口隼平, 佐々木菜絵, 藤井武則, 木村尚次郎, 谷口晴香, 中西良樹, 吉澤正人, 三宅厚志, 金道浩一, 巴山顕, 掛谷一弘
日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大学) 2019 年 3 月
13. 鉄系超伝導体と金属の異常な接合効果 II
田島稜雅, 宮本幸宏, 藤井武則, 松田梓
日本物理学会 第 74 回年次大会 (九州大学)

2019年3月

14. 電気二重層キャパシタ構造によるカーボンナノチューブの熱電変換制御
藤井武則
応用物理学会 秋季学術講演会（名古屋国際会議場） 2018年9月

15. 酸素アニールされた InGaZnO_4 バルク単結晶の輸送特性
小林 裕樹、田中 佑典、君塚 昇、藤井 武則、宮川 宣明
応用物理学会 秋季学術講演会（名古屋国際会議場） 2018年9月

共同利用部門 業務報告

低温センター・共同利用部門 戸田 亮

共同利用部門では、低温寒剤を用いた研究を積極的に行う研究者、ヘリウムガス回収設備をもたない研究者に低温センター建物内の共同利用研究室を貸し出し、低温実験のためのスペースを提供している。また、SQUID 磁化測定装置（カンタム・デザイン社 MPMS）、物性評価システム（カンタム・デザイン社 PPMS）、14T 超伝導電磁石、極低温物性測定装置という 4 種類の極低温実験装置の貸し出しを行い、極低温を要する学術研究のサポートを行っている。

共同利用研究室

本年度は、工、理の 2 部局に対し、全 4 研究室、138 m² の貸出を行った。使用料金は昨年度と同じ 2,000 円/m²/月で、電気・水道・電話などの研究活動に伴うランニングコストは別途実費を請求している。電気料金、水道料金の請求は、各研究室に設置した電力量計、水量計を元に行っている。本年度は、多数の電力量計が 1 年以内に検定の有効期限を迎える状態となったため、特別高圧受変電設備定期点検に伴う全館停電日にあわせて一斉に更新を行った。今後も毎年、計画停電日にあわせて必要な更新を行っていく予定である。

共同利用装置

本年度の装置使用料金は、昨年度に引き続き同額で PPMS と MPMS については 1 日 5,000 円（液体ヘリウム使用料金を含む）、他の装置については 1 日 560 円（寒剤は別途ユーザーが注文）、依頼測定料金については PPMS が 1 日 15,000 円、MPMS が 1 日 10,000 円、産学連携利用については 1 日 25,000 円とした。

PPMS および MPMS(1)は通年稼働、MPMS(2)は繁忙期のみ（本年度は 6,7 月および 9-12 月）の稼働とした。14T 超伝導電磁石と極低温物性測定装置については利用がなかった。過去からの使用日数の推移を図 1,2 に示す。なお MPMS については両装置の合算で表示している。本年度の学内共同利用日数は PPMS が 78 日、MPMS が 179 日であった。共同利用に占める依頼測定の割合は PPMS が 4%、MPMS が 3%であった。共同利用による PPMS の利用者は 4 部局 12 研究室、MPMS の利用者は 4 部局 14 研究室、全体では 5 部局 21 研究室であった。産学連携利用の利用日数は 51 日であった。昨年度に比べ全体的に利用日数が減少した。装置を利用可能な日数には余裕があるので、興味のある方は積極的にお問い合わせいただきたい。

MPMS(1)は導入後 23 年、PPMS は同 20 年が経過し、老朽化が著しい。本年度は PPMS ターボポンプセットに故障が発生し、修理を行ったほか、排気ポンプの交換などを行った。標準機能だけでは対応できない依頼測定にも対応できるよう、外部機器としてソースメータおよびナノボルトメータを整備した。

* 「平成 28 年度低温センター年報」中の『共同利用部門 業務報告』において誤りがありましたので、お詫びして訂正いたします。「液体ヘリウム蒸発量は約 0.8L/h」とありますが、正しくは「液体ヘリウム蒸発量は約 0.08L/h」です。

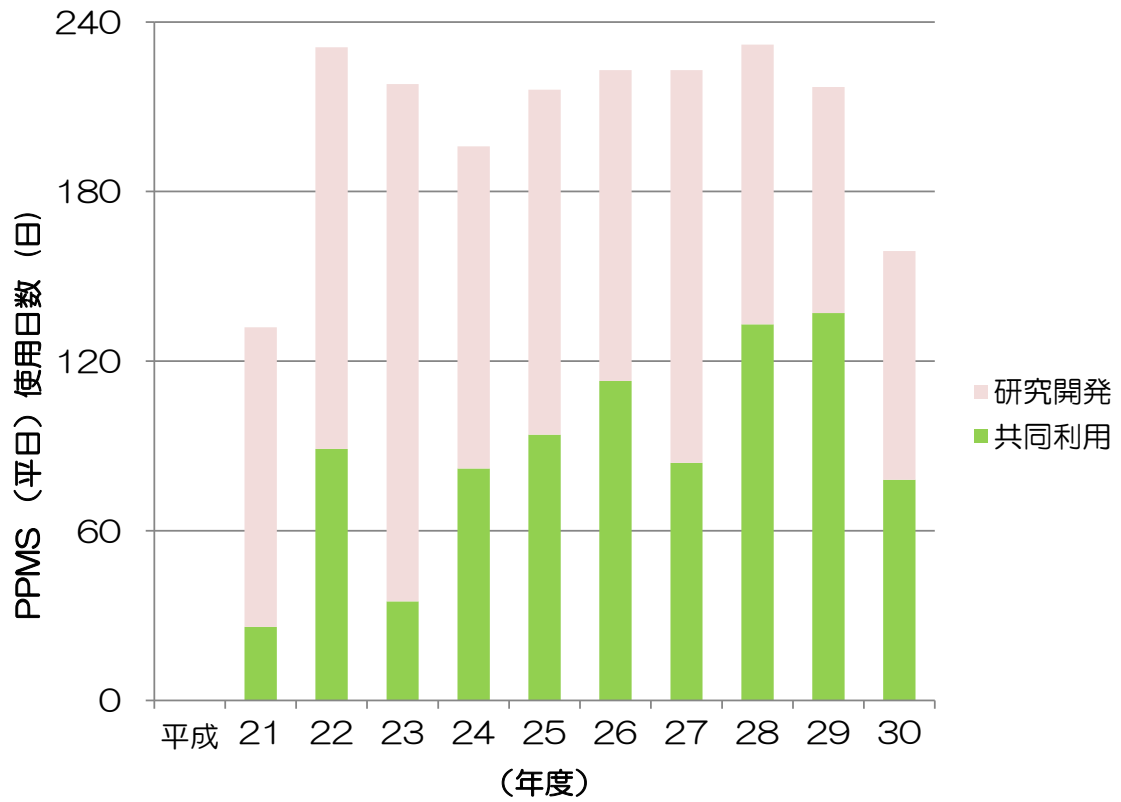


図1 物性評価システム(カンタム・デザイン社 PPMS)の使用日数

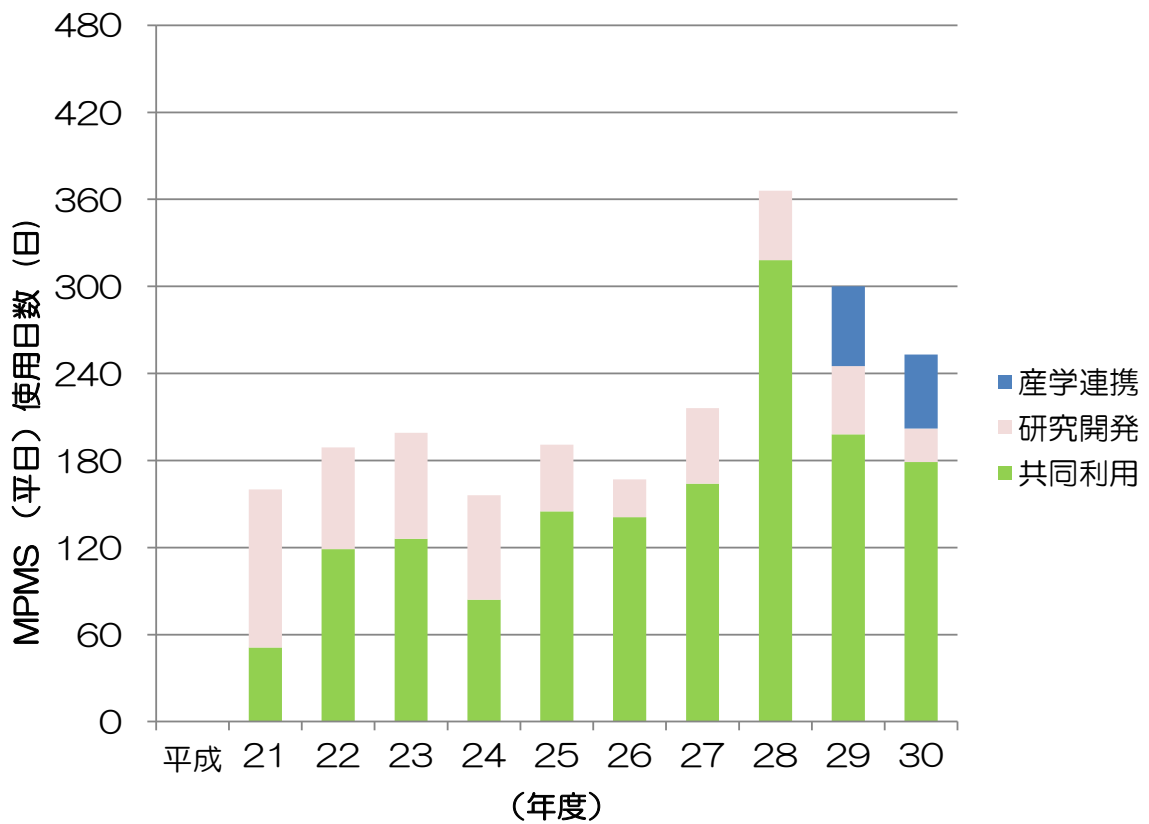


図2 SQUID 磁化測定装置(カンタム・デザイン社 MPMS)の使用日数

液化供給部門 業務報告

低温センター・液化供給部門
阿部 美玲

1. 寒剤供給実績(本郷地区キャンパス)

平成 30(2018)年度の液体窒素供給量は 428,197 L となり前年度とほぼ同じだった(図 1)。また、液体ヘリウム配達供給量は 213,450 L だった(図 2)。

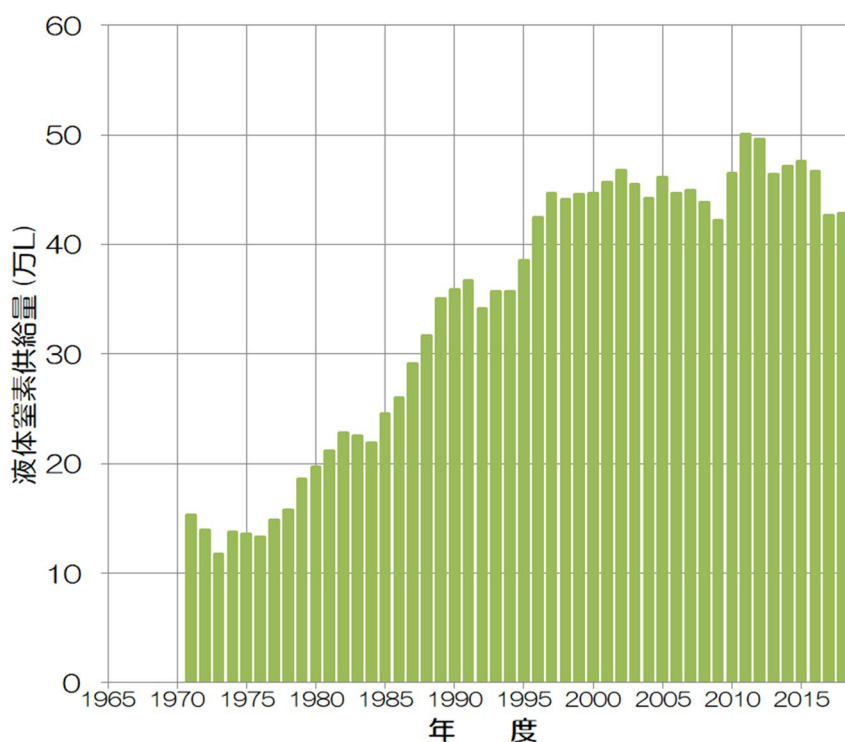


図 1 年度別 液体窒素供給量

表 1 平成 30 年度 液体窒素使用研究室 登録数

医学系研究科	36 研究室	先端科学技術研究センター	1 研究室
工学系研究科	96 研究室	総合研究博物館	2 研究室
理学系研究科	60 研究室	大気海洋研究所	1 研究室
農学生命科学研究科	78 研究室	地震研究所	3 研究室
薬学系研究科	27 研究室	附属病院	54 研究室
アイソトープ総合センター	3 研究室	定量生命科学研究所	19 研究室
アジア生物資源環境研究センター	1 研究室	VDEC	1 研究室
環境安全研究センター	3 研究室	素粒子物理国際研究センター	2 研究室
情報理工学系研究科	2 研究室	国際高等研究所	1 研究室
生物生産工学研究センター	6 研究室	低温センター	2 研究室

合計 20 部局、398 研究室

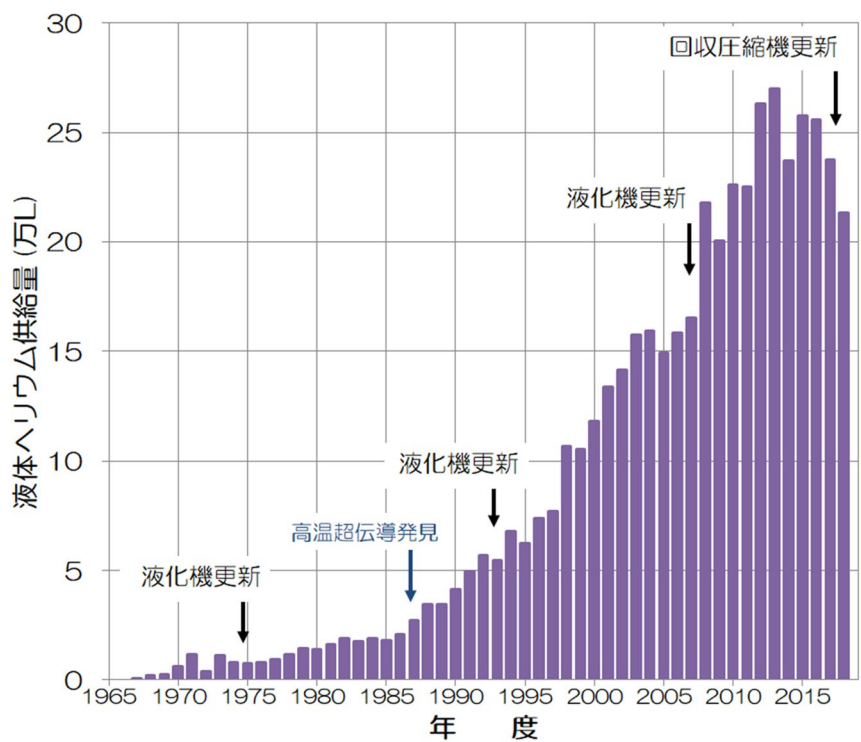


図2 年度別 液体ヘリウム配達供給量

表2 平成30年度 液体ヘリウム使用研究室 登録数

工学系研究科	28 研究室	薬学系研究科	9 研究室
理学系研究科	20 研究室	附属病院	1 研究室
農学生命科学研究科	3 研究室	低温センター	4 研究室

合計 6 部局、65 研究室

2. 寒剤供給料金

平成30年度の液体窒素使用料金を表3に、また、液体ヘリウム使用料金を式(1)に示す。

表3 平成30年度 液体窒素使用料金

容器内容積	供給単価 (円/L)
10L以上 15L以下	52
15L超 25L以下	46
25L超 35L以下	40
35L超 120L以下	36

平成30年度液体ヘリウム使用料金

【平成30年4月～平成31年3月】

$$\text{供給価格} = 181 \times \text{課金対象供給量 (L)} + 1,101 \times \text{損失ガス量 (m}^3\text{)} \dots (1)$$

3. 保安管理体制

低温センターは、高圧ガス保安法に定められた高圧ガス第一種製造者として東京都の許可を受け、研究室へ供給する液体窒素の大量貯蔵やヘリウムリサイクルシステム(回収・液化)の運転や設備維持管理の他、利用者や従業者を対象とした保安教育などの保安活動を行っている。平成30年度の保安管理体制を表4に示した。今後も日常点検を始めとする通常業務に加え、法定義務講習や各種講習会への参加などを通じて保安技術の習得・向上に努め、設備保安の維持に尽力していきたい。

表4 平成30年度 低温センター保安管理体制

保安統括者	センター長	大越 慎一
保安統括者代理者	准教授	村川 智
保安係員	技術専門職員	阿部 美玲
保安係員代理者	助教	藤井 武則
	技術職員	加茂 由貴
	技術職員	志村 芽衣
	技術専門職員	寺岡 総一郎
	技術専門職員	戸田 亮

4. 容器等再検査サービス

本学内で使用する液体窒素用超低温容器(通称、自加圧式容器)を対象とした容器等再検査サービスの検査台数は28本だった。低温センターから液体窒素供給を受ける研究室のみならず、部局の設備などから液体窒素汲み出しを行う研究室の容器も受け付けている。

5. 設備修繕修理など

平成30年度は定期的な点検等作業の他、次の修理等を実施した。

- ・2018年4月 理学系サブセンターガスバッグ交換
- ・2018年11月 ヘリウム液化システム膨張タービンプレーキ弁電動作動部交換
- ・2018年11月 ヘリウム液化システム膨張タービン予備品の購入

2018年5月下旬から既設ヘリウム液化システム膨張タービン(2台1組)のうち1台の回転数が安定しない現象がみられた。仮に突発的にこのタービンが停止した場合交換品の入手には事務手続きを含めると約半年間の液体ヘリウム供給休止に陥る事態が想定された。そこで膨張タービンの予備品を購入し、並行して液化運転と供給業務を継続しながら原因調査を行なった。2018年11月に現象の一因とみられたプレーキ弁電動操作部の交換を行ない改善した。また、予備品の購入により今後タービンが故障した場合最短2週間程度で運転再開できる体制となった。

6. ヘリウム液化回収システムの増強事業

東京大学ビジョン2020事業として平成27年度に採択されたヘリウム液化回収システムの増強事業のうち、ヘリウム液化システムの増設事業の入札が行われた。2018年7月6日の開札の結果、納入業者が大陽日酸株式会社に決定した。現在、工場での機器等製作が進行中である。2019年6月に現地工事が開始、納入期限は同年10月末の予定である。

7. ヘリウム回収率の向上への取り組み

液化供給部門では長年にわたり、液体ヘリウム使用研究室から毎月報告されたヘリウムデータの集計後に、ヘリウム回収率低下がみられた研究室へ個別に連絡したり、低温センター研究交流会でのポスター発表を行ったり[1]などの活動を通じてキャンパス内でのヘリウムのリサイクルについて説明してきた。しかし、平成 30 年度の本郷キャンパスのヘリウム回収率は 88.7%(前年度 91.4%)と大幅に下落する結果となった(図 3)。さらに 2018 年の中盤から世界的なヘリウム需給バランスの崩れ、日本国内ではヘリウムの流通タイト化と価格高騰が続いている。次年度の補充用ヘリウムガス調達価格高騰が予想されたため、2019 年 3 月にヘリウム回収率改善を呼びかけるメールとフライヤーを発行した。次年度はスニッファー型のヘリウムリークディテクター保有台数の拡充[2]や各種書類手続き再整備などの活動を通じて寒剤使用研究室宛での情報発信強化を図るとともに、本郷キャンパスでのヘリウム損失ゼロを目指して、部門での日常業務全体の見直しを図っていく。

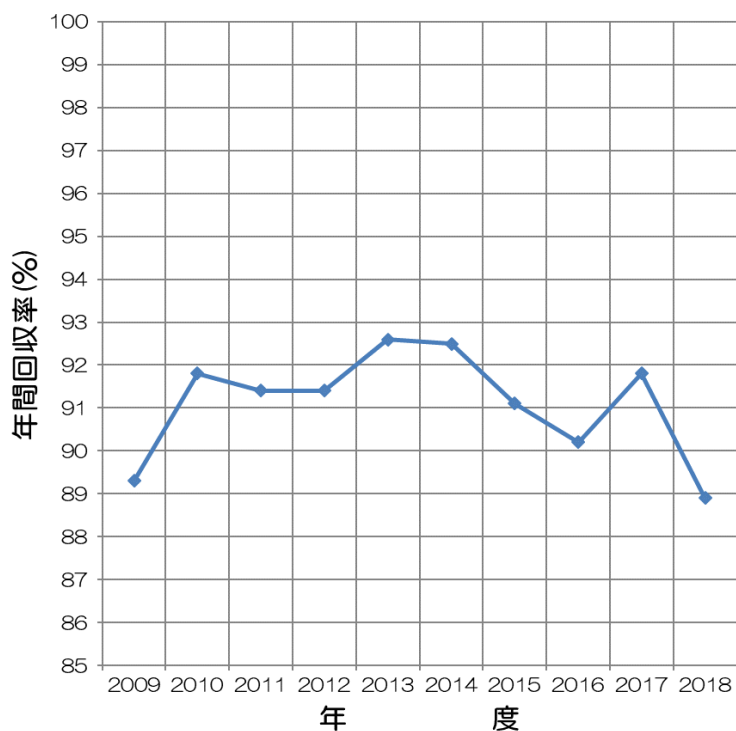


図 3 本郷キャンパス蒸発ヘリウムガス回収率の推移

(参考)

[1] “本郷キャンパスの月初ヘリウムデータ報告と液体ヘリウム使用料金”、阿部他、平成 30 年度低温センター研究交流会(2019 年 2 月)

[2] 液化供給部門貸出物品 <http://www.crc.u-tokyo.ac.jp/gyomu/cryo/lend/index.html>

全般的な活動報告

第 10 回低温センター研究交流会

平成 31 年 2 月 22 日(金)、理学部 1 号館、小柴ホールにて「第 10 回 低温センター研究交流会」が開催された。本年度は、理学系、工学系、農学生命科学、薬学系、低温センターから、125 名の参加者、10 件の口頭発表と 61 件のポスター発表があり、研究交流会が始まって以来、過去最大の参加者数となった。発表では、低温における研究のみならず、寒剤を必要とする計測や、サンプル作製など、様々な研究成果を聞くことができ、研究の裾野を広げるには良い研究会であった。講演会の最後には、工学系研究科・物理工学専攻の樽茶清悟教授（H27,28 年度 低温センター長）より、「ナノ構造の量子状態制御と量子情報への応用」というタイトルで特別講演があり、量子コンピューティングにつながる技術となる量子ドットの制御に関して基礎学問としての面白さ、応用面における問題点などが説明された。低温における基礎研究の重要性を理解し、それを支える低温センターの果たすべき責任を再認識することが出来た。

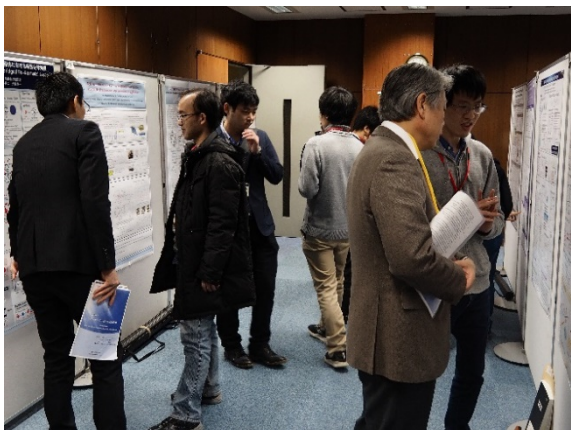
利用者懇談会においては、アワード授賞式が行われ、立原義宏さん（工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻・修士課程 2 年）にベストプレゼンテーション・アワード、瀧口沙希さん（農学部・応用生命科学課程生命化学・工学専修 4 年）、北折暁さん（工学系研究科・物理工学専攻・修士課程 1 年）と井口照悟さん（工学系研究科・物理工学専攻・博士課程 1 年）にベストポスター・アワードが贈呈された。



講演会の様子



特別講演の様子



ポスター発表の様子



受賞者の方々
(左から北折暁さん、立原義宏さん、大越センター長、瀧口沙希さん、井口照悟さん)

(藤井 記)

第10回 低温センター研究交流会 プログラム

口頭発表

- O-01 山田 林介 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (十倉研究室)
強相関ディラック半金属 CaIrO_3 における高移動度電子と巨大磁気抵抗
- O-02 根岸 真通 理学系研究科・物理学専攻・D1 (高木・北川研究室)
ペロブスカイト型イリジウム酸化物薄膜におけるディラックノード電子の相制御
- O-03 中澤 佑介 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (川崎研究室)
希薄キャリアディラック半金属薄膜の作製と量子輸送特性
- O-04 竹原 陵介 工学系研究科・物理工学専攻・博士研究員 (鹿野田研究室)
電荷-スピン-格子結合系有機物質におけるトポロジカル励起による新しい電気伝導機構
- O-05 Olaf Stefanczyk 理学系研究科・化学専攻・特任助教 (大越研究室)
Functionalization of poly(4-vinylpyridine) polymer with cobalt(II) single-molecule magnets
- O-06 立原 義宏 工学系研究科・バイオエンジニアリング専攻・M2 (カブラル研究室)
液体窒素を用いた高分子の凍結乾燥を有効活用した pH 応答性高分子ミセルの開発
- O-07 黒山 和幸 工学系研究科・物理工学専攻・D3 (樽茶研究室)
GaAs 横型二重量子ドットにおける非平衡フォノンによる電子スピン散乱の研究
- O-08 佐藤 彰一 工学系研究科・電気系工学専攻・研究生 (田中・大矢・中根研究室)
Fe/Mg/MgO/SiO₂/Si 構造を用いたほぼ理想的なスピン注入：デッドレイヤーの抑制とトラップ密度の低減
- O-09 富田 圭祐 理学系研究科・物理学専攻・D3 (島野研究室)
鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ におけるヒッグスモード
- O-10 板橋 勇輝 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (岩佐研究室)
Nonreciprocal transport in electric field induced 2D superconductors

特別講演

- 樽茶 清悟 工学系研究科・物理工学専攻・教授
前東京大学低温センター長
ナノ構造の量子状態制御と量子情報への応用

ポスターセッション

- P-01 吉川 尚孝 理学系研究科・物理学専攻・助教 (島野研究室)
鉄セレン薄膜のテラヘルツ磁気光学分光
- P-02 田中 勇貴 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (岩佐研究室)
分子線エピタキシー法により作製した TaSe_2 薄膜の輸送特性
- P-03 礒山 和基 理学系研究科・物理学専攻・M1 (島野研究室)
FeSe 薄膜の中赤外光ポンプ-テラヘルツ光プローブ分光
- P-04 若松 浩大 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (鹿野田研究室)
Thermoelectric effects in a doped spin liquid candidate $\kappa\text{-(ET)}_4\text{Hg}_{2.89}\text{Br}_8$

- P-05 輿石 佳佑 理学系研究科・物理学専攻・D3 (藤森研究室)
Te アニール $\text{FeTe}_{1-x}\text{Se}_x$ の高分解能角度分解光電子分光
- P-06 高橋 泰賀 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (鹿野田研究室)
一種類の分子から成る有機導体で発現する多彩な電子状態の NMR 研究
- P-07 勝見 恒太 理学系研究科・物理学専攻・D1 (島野研究室)
高強度テラヘルツ波パルス誘起ヒッグスモードを用いた $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 薄膜における超伝導ゆらぎの研究
- P-08 Ke Gu 理学系研究科・化学専攻・M2 (長谷川研究室)
単結晶 SrRuO_3 シートの作製
- P-09 丹羽 宏彰 理学系研究科・物理学専攻・M2 (島野研究室)
銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光誘起非平衡状態
- P-10 吉田 郁哉 理学系研究科・化学専攻・M2 (大越研究室)
二次元層状 Co-W シアノ架橋型金属錯体におけるテラヘルツ波応答性
- P-11 宇佐美 潤 理学系研究科・物理学専攻・M2 (福山研究室)
単原子層ヘリウム 4 の比熱と超流動性の同時測定装置の開発
- P-12 浦井 瑞紀 工学系研究科・物理工学専攻・D3 (鹿野田研究室)
有機モット転移系における乱れ誘起量子現象
- P-13 中村 祥子 低温センター・特任助教 (島野研究室)
電流注入下の s 波超伝導体 NbN におけるテラヘルツ第 2 高調波発生
- P-14 林 悠大 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (高橋研究室)
Magneto-optical spectroscopy on Weyl points for anomalous and topological Hall responses in MnGe
- P-15 Huang Hongrui 理学系研究科・物理学専攻・D1 (長谷川研究室)
Two-dimensional superconductivity on SIC phase of Pb/Ge(111) studied by in situ transport measurement
- P-16 西早 辰一 工学系研究科・物理工学専攻・D2 (川崎研究室)
ディラック半金属薄膜における表面量子化伝導の制御
- P-17 濱崎 拓 工学系研究科・マテリアル工学専攻・D3 (枝川・徳元研究室)
マイクロメートルサイズに加工した Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の電気抵抗測定
- P-18 武重 有祐 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (樽茶研究室)
トポロジカル絶縁体 $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ 薄膜上に作製したゲート変調可能な Josephson 接合における交流 Josephson 効果
- P-19 高城 拓也 理学系研究科・物理学専攻・M1 (長谷川研究室)
磁性トポロジカル絶縁体ヘテロ構造 $\text{MnTe}/(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ の作製とその評価
- P-20 佐藤 慎 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (川崎研究室)
新規磁性半導体 EuAs 薄膜の磁気輸送特性
- P-21 末次 祥大 理学系研究科・物理学専攻・D2 (高木・北川研究室)
アンチペロブスカイト Sr_3PbO における三次元ディラック電子の巨大軌道反磁性

- P-22 村瀬 秀明 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (鹿野田研究室)
電子ガラスの結晶化の実空間観察
- P-23 山田 太郎 工学系研究科・化学システム工学専攻・特任上席研究員 (堂免研究室)
水の光触媒分解素材窒化タンタルの電子物性観測
- P-24 中林 耕二 理学系研究科・化学専攻・助教 (大越研究室)
多様な構造を有するシアノ架橋型金属集積体の磁気特性
- P-25 鈴木 尚将 理学系研究科・物理学専攻・M2 (村川研究室)
2次元ヘリウム3の新奇量子スピン液体状態の解明に向けた低発熱 NMR セルの開発
- P-26 野崎 翔平 農学生命科学研究科・応用生命科学専攻・D3 (養生訓科学寄付講座)
植物ホルモン・ブラシノステロイド情報伝達におけるマスター転写因子の X 線結晶構造解析
- P-27 白石 勇太郎 薬学系研究科・生命物理化学教室・博士研究員
区分同位体標識を用いた $\beta 2$ アドレナリン受容体のリン酸化によるシグナル制御機構の解明
- P-28 Prashant Kandwal 農学生命科学研究科・応用生命科学専攻・D3 (植物栄養・肥料学研究室 藤原研)
Isolation and characterization of the EMS rice mutant with high molybdenum in grain
- P-29 隣 真一 工学系研究科・電気系工学専攻・学術支援専門職員 (関野研究室)
乳房非触知病変を摘出するための磁性マーカーシステム
- P-30 瀧口 沙希 農学部・応用生命科学課程生命化学・工学専修・B4 (食品生物構造学研究室)
新規 NMR 測定法を用いた国産蜂蜜の包括的成分分析と品質評価
- P-31 山崎 翔太 理学系研究科・物理学専攻・M2 (村川研究室)
超低温で用いるヘリウム3融解圧力温度計の開発
- P-32 KUNAL KUMAR 理学系研究科・化学専攻・M2 (大越研究室)
The cyano-bridged metal assemblies revealing white light emission and acting as a temperature sensor based on its ratiometric and colorimetric nature
- P-33 スミス ライアン 工学系研究科・システム創成学科 (原子力国際専攻)・B4 (大野研究室)
超伝導転移端センサによる重粒子線カロリメトリ
- P-34 中川 幸祐 理学系研究科・化学専攻・特任助教 (大越研究室)
高い磁気相転移温度を示すペンタシアニドニトロシルモリブデン錯体
- P-35 瀧本 翔平 理学系研究科・物理学専攻・M1 (村川研究室)
小型超伝導マグネットの開発
- P-36 Yue Xin 理学系研究科・化学専攻・M1 (大越研究室)
NMR Dehydration driven reversible photoluminescent SMM property in a three-dimensional cyanido-bridged Dy-Co network
- P-37 鈴木 雅弘 理学系研究科・物理学専攻・M2 (藤森研究室)
ファンデルワールス強磁性体の光電子分光と X 線磁気円二色性による研究
- P-38 北折 暁 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (十倉研究室)
MnGe 単結晶におけるヘッジホッグ格子の変形と創発磁気現象

- P-39 高瀬 健吾 工学系研究科・電気系工学専攻・B4 (田中・大矢・中根研究室)
室温強磁性半導体(Ga,Fe)Sb ヘテロ構造における巨大磁気抵抗効果
- P-40 川畑 慎太郎 理学系研究科・化学専攻・D1 (大越研究室)
鉄(II)およびオクタシアノニオブ(IV)酸イオンを構築素子とした二元金属錯体におけるサイト選択的2段階スピנקロスオーバー現象
- P-41 Shobhit Goel 工学系研究科・電気系工学専攻・D3 (田中・大矢・中根研究室)
Magnetic anisotropy switching in heavily-Fe-doped high-Curie-temperature ferromagnetic semiconductor (Ga_{0.7},Fe_{0.3})Sb with a critical thickness
- P-42 井元 健太 理学系研究科・化学専攻・特任助教 (大越研究室)
シアノ架橋 Co(II)/Fe(II)-Nb(IV)錯体の磁気特性およびスピנקロスオーバー現象
- P-43 Sarker Md Shamim 工学系研究科・電気系工学専攻・M1 (田畑研究室)
Spin wave detection by CPW with additional electrodes for external field modulation to the neuromorphic application
- P-44 田畑 智弘 理学系研究科・化学専攻・M1 (大越研究室)
シアノ架橋型鉄-ニオブ集積型金属錯体における磁気光学効果
- P-45 Jiang Miao 工学系研究科・電気系工学専攻・D2 (田中・大矢・中根研究室)
Spin-orbit torque strength and efficiency in a perpendicularly-magnetized ferromagnetic semiconductor GaMnAs single thin film
- P-46 室谷 悠太 理学系研究科・物理学専攻・D2 (島野研究室)
バルク GaAs における励起子の高密度光子ドレスト状態
- P-47 荻野 慎子 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (高橋研究室)
極性サイクロイド型磁性体における自然旋光性
- P-48 高山 正行 理学系研究科・物理学専攻・D3 (島野研究室)
バルク GaAs における励起子間相互作用エネルギーと励起子 s 波散乱長
- P-49 井口 照悟 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (高橋研究室)
マルチフェロイクスのエレクトロマグノン共鳴におけるコヒーレント分極変調
- P-50 荒木 大晴 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田中・大矢・中根研究室)
ペロブスカイト酸化物単結晶エピタキシャルヘテロ構造 La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃/LaAlO₃/SrTiO₃ における高効率スピン流電流変換
- P-51 長谷川 顕登 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (千葉研究室)
界面酸化層の挿入による強磁性金属/重金属接合膜におけるスピン軌道トルクの増大
- P-52 Le Duc Anh 工学系研究科・電気系工学専攻・助教 (田中・大矢・中根研究室)
Ultra-low power bias-driven magnetization switching by quasi-Fermi level control at an interface of a La_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃-based magnetic tunnel junction
- P-53 吉田 訓 工学系研究科・物理工学専攻・D3 (石坂研究室)
単層 CrSe₂ のポリタイプ制御とその電子構造に関する研究

- P-54 山崎 浩樹 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田中・大矢・中根研究室)
ナノスケール構造における GaMnAs の電界制御異方性磁気抵抗
- P-55 藤井 武則 低温センター・研究開発部門・助教
カーボンナノチューブの熱および電気輸送特性
- P-56 André Amend 理学系研究科・物理学専攻・D2 (福山研究室)
STM/S Studies of H-plasma Etched Graphene on SiC(0001)
- P-57 畑田 大輝 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (川崎研究室)
強誘電半導体 SbSI のシフト電流における電極の影響
- P-58 菅沼 大貴 理学系研究科・物理学専攻・M1 (島野研究室)
電荷密度波物質 TaSe₂ の超高速光励起ダイナミクス
- P-59 池田 侑典 理学系研究科・化学専攻・M1 (大越研究室)
銅-オクタシアノモリブデン集積体の電気化学薄膜における強誘電性
- P-60 阿部 美玲 低温センター・液化供給部門・技術専門職員
本郷キャンパスの月初ヘリウムデータ報告と液体ヘリウム使用料金
- P-61 戸田 亮 低温センター・共同利用部門・技術専門職員
低温センター共同利用装置の紹介

安全講習会

低温センターでは、高圧ガス製造所として、高圧ガス保安法に定められる安全教育（安全講習会）を行っている。この講習会は、環境安全本部から、本郷地区キャンパス内で寒剤を取り扱うすべての人に受講が義務付けられている全学の講習会である。今年度は、全6回の開催で625名が受講した（表1参照）。受講者の所属部局の内訳は、図1のツリーマップに示した。近年は、医学部医学科の学部学生に受講が必修化されたこともあり、医学系からの受講者の伸びが著しく、附属病院と合わせると、医療関係者が受講者全体の1/3を占めている。医療系の部局において寒剤を利用する主目的は、生体組織の凍結や、超伝導磁石による強磁場発生だと考えられるので、寒剤の安全な利用に関する注意点は、生物系の研究室や、核磁気共鳴装置のユーザーにおける場合と殆ど変わりはない。しかし、具体的な装置の名称や、あらかじめ想定しておくべき非常時・緊急時の状況は異なる場合もあるので、実際に寒剤を使用する現場において、講習会で学んだ知識を戸惑うことなく応用できるように、事故事例の紹介等においては受講者の構成を考慮して、バランス良い例示を心掛けたい。

講習会の構成は、「高圧ガス保安法と本学での高圧ガス等管理」、「寒剤・ガスボンベの安全な取り扱い」、「低温センターの利用方法」、および「寒剤の性質とその応用」となっており、説明は、島野教授、村川准教授、藤井助教、中村特任助教が分担して行った。講習は全て日本語で行ったが、第4回以外では、会場が2面の映写に対応していたので、1面に英語のスライドを投影した（図2）。配布資料は、受付時に、受講者の希望に合わせて英語か日本語いずれかの資料を渡している。ミニテストおよびアンケートは、表面に日本語、裏面に英語を印刷している。アンケートにおける英文回答では、話が日本語でもスライドがわかりやすいので理解できたという感想が多数だが、英語開催回が無いということで、受講を見合わせている対象者が存在する可能性もあるので、来年度は、秋入学者に照準を合わせて、講習を英語で行う回を秋頃に設ける予定である。

これまで、安全講習会の申し込みは、低温センターのウェブページ上で受け付けてきたが、本年度の最終回である第6回から、環境安全研究センターの運営する、オンラインの「環境安全教育受講管理システム」から受け付けるように変更した。安全講習会では、受講者の到着が、講習開始直前の10分程度に集中するため、個人を識別する共通IDを学生証・職員証からPCを用いて読み込む自動受付を採用している。その際、既存のシステムでは、共通IDの入力ミスによって、当日に手書きの受付が必要となる受講

表1 平成30年度の安全講習会の開催要領、および、受講者数の一覧。

回	日時	会場	受講者	定員
第1回	4/25 (水) 13:00-14:45	武田ホール (浅野キャンパス)	194	200
第2回	5/10 (木) 10:25-12:10	小柴ホール (本郷キャンパス)	152	170
第3回	6/19 (火) 16:50-18:35	小柴ホール (本郷キャンパス)	108	170
第4回	10/ 1 (月) 14:55-16:40	弥生講堂一条ホール (弥生キャンパス)	33	250
第5回	10/30 (火) 16:50-18:35	鉄門記念講堂 (本郷キャンパス)	120	230
第6回	1/17 (木) 16:50-18:35	情報基盤センター 遠隔講義室 (浅野)	18	70

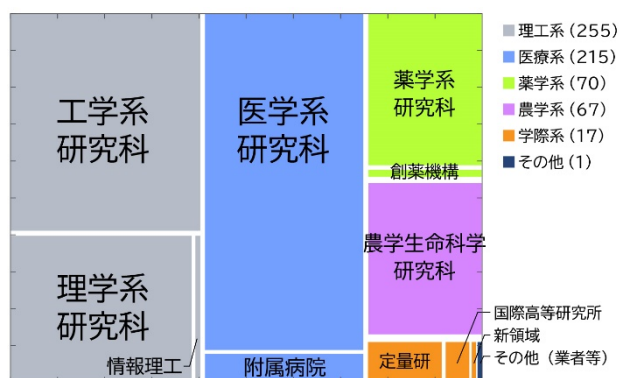


図1 平成30年度の安全講習会受講者の所属部局。各項目の面積と、凡例末尾のカッコ入りの数字は、人数を示す。

者が一定数存在したが、この受講管理システムは全学のデータベースと連携しているため、正しい共通IDを申し込み時に確実に収集できるようになった。また、受講者本人がオンラインでミニテストの合格・不合格や過去の受講履歴を確認できるようになるため、修了証の郵送や、問い合わせによる履歴確認が必要なくなり、事務作業の大幅軽減が期待される。同システム上では、安全講習会が、他の安全教育と同列に並ぶため、長期的には、より多くの人に認知が広がり、将来の潜在的な寒剤利用者まで受講者層が拡大することも期待される。

一方で、顕在化した問題もある。現在の受講管理システムにおいて保証されるのは、その共通IDが有効であることと、その人がどの部局(ex. 研究科)に所属しているかのみで、専攻や研究室、学年、氏名、連絡先は本人が入力する必要があるため、進級・進学、教職員への就職による自動更新は行われない。実際に、2年生と表示されている4年生や、連絡先が学部の教務になっている受講者が相当数確認された。そのため、システムからの情報のみでは、ミニテストの不合格者に連絡する、受講者リストから寒剤容器や保管場所の担当者を抽出する、受講者の構成を分析する、といった作業が困難である。また、現状、共通IDを取得していない学外者への対応は実装されていないため、当日、もしくはメールでの受付が必要となっている。ただ、これらの問題は過渡的なもので、いずれ解消すると考えられるため、低温センターでは、ミニテストやアンケートにおける本人の記載を活用して対応する予定である。

学内での寒剤に関する事故災害報告は、件数がもともと年間数件以内と少なく、安全講習会の効果を実感することは難しい。しかし、保護具の不着用や不適切な容器の使用といった、研究室全体の、寒剤に関わる知識不足に由来する単純な事故は、ほぼ無くなったように見える。一方で、転倒、老朽化による故障、紛失、誤操作といった一般的な事故や、薬品・真空に関わる操作と複合した事故は散見される。これらの事故の発生や、それに起因する深刻な被害を防ぐには、寒剤に関わることで単純なミスが大きな事故につながる可能性があるということを作業者個人に訴えかけ、安全意識を向上させることが不可欠である。安全講習会は、寒剤を用いた作業を実際に行う人に直接情報を届けることができる貴重な機会なので、その充実化をとらして、寒剤および高圧ガス関係の事故防止に一層努めていきたい。



図 2 講習会風景 (第1回)。向かって左のスクリーンには日本語、右のスクリーンには英語のスライドを映写している。

(中村 記)

量子液体・固体に関する国際シンポジウム 2018 (QFS2018)

2018年7月25から31日までの7日間、本学伊藤国際学術研究センターにて「量子液体固体に関する国際シンポジウム 2018 (QFS2018)」が開催された。QFSは、1975年の第1回以来これが23回目の開催となり、低温物理学とりわけ液体及び固体ヘリウムの研究分野で最も重要な国際会議である。3年に1度開催される低温物理学国際会議の年を除く毎年、世界各地で開催され、今回は、本センターの福山教授（兼任）が組織委員長として3度目の日本招致を実現した。



QFS2018 会議のロゴ

近年のQFSは、レーザー冷却された原子気体からトポロジカル物質まで対象が広がっており、今回も量子情報、スピン液体、原子核物理、低温技術など幅広いテーマを含む学際色の強いプログラムで実施された。Anthony J. Leggett 教授（2003年ノーベル物理学賞）と Michael J. Kosterlitz 教授（2016年ノーベル物理学賞）を含む12名による基調講演、当センターの島野教授と元センター長の鹿野田教授を含む41名による招待講演、そして147件のポスター発表があった。世界20カ国から集結した223名の専門家が、最新の研究成果を持ち寄り、一週間にわたって活発な研究討論と情報交換が繰り返された。開会式では相原博昭大学執行役・副学長から、ホテルニューオータニで催されたバンケットでは大越センター長からそれぞれ祝辞が述べられた。また、閉会式では6名の若手優秀発表者にポスターアワードが授与された。研究発表のうち40編の論文が、通常の査読プロセスを経て、学術雑誌 Journal of Low Temperature Physics の特集号に掲載されている (<https://link.springer.com/journal/10909/196/1>)。

共催団体の低温センターは、大越センター長が組織委員、村川准教授と中村特任助教が実行委員として運営に直接参画し、佐々木特任専門職員が庶務・会計業務をサポートした。また、協賛団体の国際純粋応用物理学連合 (IUPAP)、理化学研究所数理創造プログラム (iTHEMS)、関西・大阪21世紀協会、東京観光財団から運営資金の援助があった。会議終了後は、希望する参加者に低温センターのヘリウム液化施設および研究設備を案内した。この他、会期中、低温機器メーカー5社と科学出版社1社がそれぞれ企業ブースを出展した。

詳細は会議 URL (<http://www.qfs2018.jpn.org/>) を参照されたい。



(上段左) 祝辞を述べる相原副学長、(上段右) 祝辞を述べる大越センター長、
(下段左) 参加者集合写真、(下段右) ポスターアワード表彰式

(福山 記)

2018 年度 低温センター技術研修

低温センターは寒剤を安定的に供給することが業務の大きな柱である。近年、ヘリウムの需要のバランスが崩れつつあり、安定供給にはよりいっそうのヘリウムガスの回収率を上げること及びヘリウムの有効的な使い方を周知することが非常に重要である。そのため、本センターでは 2015 年度から低温センター技術講習として、学生・教職員等の東大構成員向けの低温技術の紹介の場を設けている。

2019 年度も五月祭の準備日である 5 月 18 日(金)に実施した。参加者は学部生 1 名、助教 1 名の合計 2 名であった。両名とも工学系研究科の同じ研究室の所属であった。

研修内容は例年と同様にヘリウム移送技術をテーマとしている。研修は、10:00 から 17:00 まで実施し、午前中には座学の講義を、午後にヘリウム移送実習を行った。時間的に都合のつく部分的に聞きたいところのみの受講にも対応した。実際に行った内容は 2014 年度から実施している東京大学技術職員研修「低温技術研修(初学コース)」の 2 日目の内容を多少アレンジして実施している[1、2]。

午前中の講義は、村川が担当し、寒剤としてのヘリウムの性質、低温環境の効率的な維持の仕方、液体ヘリウムの移送効率などについて行った。

午後はまず、開放型の液体窒素容器からの汲み出し実習を行った。従来、開放型容器から装置等に液体窒素を汲み出すときは、容器を傾ける、サイフォンを使う等多少の困難があったが、近年、簡単な操作で一部の液体窒素を蒸発させることによって非常に手軽に液体窒素を汲み出せる液化窒素専用の手動ポンプ[3]が製品化されている。センターで所有する該当製品を用いて実習を行いつつ、自加圧型容器との比較でメリットデメリットについて受講者と議論した。

その後、実際に液体ヘリウムを移送する実習を村川、中村の指導のもと行った。具体的な作業を簡単に述べる。詳細は過去の年報を参照されたい[4]。移送前にガス回収計の値と各容器の液体ヘリウム量を熱音響式液面計およびロードセルによるヘリウム容器の重量測定から推定をしたものを記録し、その後、トランスファーチューブを用いて移送した後、移送前と同様にガス回収計の値、各容器の液体ヘリウム量を記録しそれらの値から、移送効率について考察をする。実際に得られた移送効率はなかなか理論的に得られるものとは一致はしないが、このことはヘリウムの残量を見積もるときには慎重に行う必要を感じてもらえることができるのではないかと考えている。また、受講者は実際に液体ヘリウムの移送を行ったのは初めてとのことで、非常に興味を持ってやっていただけた。

講義にも熱音響式液面計を導入したときの液面の様子を撮影した動画を取り入れるなどしているため、実習ともに受講者にはおおむね好評であった。また、低温センターに親近感も持ってもらえたようである。今後もヘリウムガスの供給がタイトになっていく中で、寒剤の正しい使い方を広めるため、さまざまな講習をしていきたいと思う。

[1] 戸田他、平成 26 年度低温センター年報 119 ページ；平成 27 年度低温センター年報 109 ページ

[2] 寺岡他、平成 26 年度低温センター年報 技術ノート 126 ページ

[3] クライオジェット、ジェック東理社

[4] 村川、平成 27 年度低温センター年報 111 ページ

(村川 記)

配管施工セーフティーセミナー

低温センターが供給している液体窒素および液体ヘリウムといった寒剤は沸点が低く潜熱が小さいため簡単に蒸発し、室温においては体積が 700 倍になるため、気密性の高い狭い実験室等では安易に寒剤を使用すると酸欠の危険性が高まるので、排気システムをしっかりと構築する必要がある。また、ヘリウムは日本では産出されない天然資源であり、使用後の蒸発ガスを純度良く回収することは学内におけるヘリウムの安価な安定供給に必須である。このように寒剤または高圧ガスを使用する際に配管施工の技術は必要不可欠な技術であるが、実際の現場においては研究室内の先輩から後輩への技術の伝承が行われており、必ずしも正しい方法が行われているわけではない。そこで、本センターでは日本スウェージロック FST 株式会社(スウェージロック社)より講師をお呼びして、配管施工セーフティーセミナーを、学生・教職員等の東大構成員向けに開催した。

セミナーは 12 月 4 日(火)に低温センターセミナー室にて実施した。参加者は大学院生 2 名、研究員 1 名、助教 8 名、准教授 2 名、教授 1 名、職員 4 名の合計 18 名、若い学生からシニアな教員までと幅広い参加者層であった。また、所属も工学系、理学系、医学系、環境安全研究センター、低温センターと多くの部局であり、今回の講習のテーマが理系研究において普遍的に必要な技術であることが参加者の構成からも見て取れる。

セミナーは 2 部構成とし、第一部「配管システムの安全施工」を 13:00 から、第二部は「バルブ・レギュレーターセミナー」を 14:55 から各々 1 時間 45 分実施した。時間的に都合のつく片方だけの受講にも対応した。講習内容はスウェージロック社が独自で開催していたり、日本各地の大学で行っていたりするものと同じものである。



第一部は、配管施工の基礎として各種継ぎ手の説明やパイプとチューブの違いなどの講習であった。実際にスウェージロック社のスウェージロックを用いてチューブ継ぎ手の施工実習も行った。また、講師による、チューブ及びチューブ継ぎ手の耐圧テストの実演もあった。第二部はバルブおよびレギュレータの動作の仕組み、機器を選定する際の注意事項などについて講習があった。

第一部、第二部ともに質問が多くでるなど、参加者にとって今まで研究室において続いていた我流の方法を見直し、安全に気を配る契機になったとすれば、開催した本センターとしても非常に喜ばしい。

センターとして今後もこのような外部講師を招いた各種講習会も積極的に行っていきたい。

(村川 記)

2018年度 低温センター見学

低温センターは、日本、ひいてはアジアでも有数の液体ヘリウムリサイクルシステムを持つ施設である。そのため、さまざまな見学者が来訪している。2018年度も日本の高校から一校、海外の大学から四校の見学があった。今後も、東京大学およびに日本のみならず、近年発展の著しい近隣の諸外国に対しても積極的に見学に応じ、これまでに培ったヘリウムリサイクルの設置・運用・維持のノウハウを発信して、重要な資産であるヘリウムガスの有効利用を広く伝えていきたい。

レバノン ベイルートアラブ大学

2018年6月15日(金)、レバノンのベイルートアラブ大学から教授・准教授の2名が東大視察の一環として低温センターの見学に訪れた。実際の設備を見学しながら、寺岡技術専門職員が英語にてヘリウムガスリサイクルシステムの説明を行った。准教授の Walid Malaeb 氏は本学理学系研究科で学位を取得しており、かつて本郷キャンパスにおいて研究で使用していた液体ヘリウムを実際に作られているシステムを見て、非常に感慨深かったようであった。

静岡県立静岡東高校

昨年、一昨年に引き続き、2018年8月7日(火)に静岡県立静岡東高校の2年生の生徒29名と引率教諭3名が低温センターの見学に訪れた。最初に全員で福山兼任教授による低温科学の講義を受講し、その後は、二つのグループに分かれて、順番に志村技術職員によるヘリウムガスリサイクルシステムの紹介・実際の設備の見学、および本センターが提供する寒剤を用いた研究を行っている研究開発部門の福山研究室、村川研究室、そしてセンター長の研究室である大越研究室(理学系研究科化学専攻)の実験室の見学を行った。参加した生徒たちは、大変興味深そうに装置等を見て、熱心に説明に聞き入り、各研究室で行われている研究の説明も難しいと感じつつも、最先端の研究の一端に触れることで刺激を受けていたのが、後に頂いた感想からも見て取れた。

まだ、明確な進路が決定しているわけではない高校生2年生という時代に、最先端の研究に触れ、そこに低温実験環境が必要であることや、その環境を安定的に維持するために大きな労力をかけ、希少なヘリウムガスをリサイクルすることで本センターが科学研究を支えていることを知ったことが、彼ら彼女らの進路に多少なりとも影響していれば、うれしく思う。今後も若い世代に対するアピールを引き続き行っていきたい。



中国 吉林大学

2018年12月14日(金)、中国の吉林大学から大学生の25名が東大視察の一環として低温センターの見学に訪れた。実際の設備を見学しながら、寺岡技術専門職員が英語にてヘリウムガスリサイクルシステムの説明を行った。30分ほどの短い時間ではあったが、若い学生から積極的な質問もあり、写真を撮るなど熱心に興味深く聴いてくれていた。近年進境著しい中国においてはヘリウムの使用量が増加しているが、貴重な資源であるヘリウムガスリサイクルについて理解が深まってくると喜ばしい。



シンガポール シンガポール国立大学、オーストラリア ラ・トローブ大学

2019年1月28日(月)に、シンガポールのシンガポール国立大学とオーストラリアのラ・トローブ大学から学部生計7名と引率教員1名が東京大学理学部の見学の一環として、低温センターの見学に訪れた。藤井助教が説明をしながら、ヘリウムリサイクルシステムの実際の液化設備の見学を行った。今回も学生たちは積極的に質問をし、貪欲に知識を得ようとする態度にセンターとして非常に嬉しく思った。

(村川 記)

職員研修

1. 2018 年度第 1 回冷凍部会(公開)例会 低温工学基礎講座 「小型冷凍機の設計と冷却」

参加報告

日 時 2018 年 4 月 13 日(木)
場 所 東宝土地会議室(東京都千代田区)
主 催 公益社団法人 低温工学・超電導学会
講 師 許 名堯(住友重機械工業), 上岡 泰晴(コールドテック)
参加者 寺岡 総一郎、計 32 名

2018 年度の公開例会の前半は長年小型冷凍機の開発に従事してこられた住友重機械工業の許 名堯氏による「小型冷凍機の原理と設計」と題した講演であった。代表的な小型冷凍機の冷却方式には Gifford-MacMahon(GM)冷凍機、パルスチューブ冷凍機、スターリング冷凍機があり、それぞれ効率、振動、到達温度などに得失がある。最初に GM 冷凍機の基本動作の 1 サイクルが解りやすく説明され、2 段式 GM 冷凍機の基本構成、設計、シミュレーション手法が解説された。続いて低振動低電磁気ノイズなことから研究用マグネット、NMR、希釈冷凍機予冷に広く用いられる GM 式パルスチューブ冷凍機の基本原理、基本構成が解説され、具体例として冷凍能力 10 W@80 K の単段パルスチューブ冷凍機の設計手法が説明された。終わりに近年の小型冷凍機の効率向上、小型化の進歩に言及され、より精度の高い設計手法の確立とさらなる効率向上、超電導デバイスへの応用拡大を期待して講演を締めくくった。

後半は小型冷凍機を使用した種々の冷却システムを製作してこられたコールドテックの上岡泰晴氏による「クライオスタットと冷凍機」と題した講演であった。冷凍機を使用した伝導冷却、液化、サブクール液体窒素の発生など具体的な応用例が紹介された。1.冷凍機冷却型クライオスタットでは冷却対象物への侵入熱を極力防止するためサポートや導線の熱アンカーを取る場所、固定方法、冷凍機の冷却をできるだけ対象物に届くようにするための材料・熱接触面について要点が示された。2.液化・サブクールでは小型冷凍機の効率的な使用のための熱設計と熱交換器の最適化が示され、高温超電導機器の冷却に使用されるサブクール液体窒素生成用の熱交換器の特徴が紹介された。3.伝導冷却超電導マグネットに使用されるコイルと電流リード製作の要点と熱収支の例も示された。4.無冷媒希釈冷凍機については概要が示され詳細は次の機会となった。ここで紹介された技法の多くは浸漬冷却式クライオスタットにおいてもあてはまり、液体ヘリウムユーザーにとっても有用なものであった。

小型冷凍機により低温工学が大きく変貌し、より社会に役立つようになってきていることを本講演で実感した。低振動・低電磁気ノイズは液体ヘリウム浸漬冷却方式の特長であり、さらに本学のように低温機器が大規模に集積した事業所では低温センターのような集約型ヘリウムリサイクルはエネルギー的に優位性がある。しかし小型冷凍機も常に進化・発展しており最新の知見に接することで現状に安堵することなく不断の日常業務改善に努めてゆきたい。

(寺岡 記)

2. 第 96 回 2018 年度春季 低温工学・超電導学会 参加報告

日 時 2018 年 5 月 29 日

場 所 船堀タワーホール（東京都江戸川区）

主 催 公益社団法人 低温工学・超電導学会

参加者 寺岡 総一郎、戸田 亮、会期中計 352 名 (5/28-5/30)

発表件数 164 件

併設展示会参加数 27 社

冷却系基礎 2D-a01-05 座長 仲井氏 のセッションにて聴講と口頭発表を行った。液体水素を輸送する際の振動下での温度分布を解明するため液体ヘリウムおよび液体窒素を加振しての温度分布測定(武田氏 神戸大 他)、管状流路中心の円柱発熱体における液体水素の膜沸騰熱伝達の測定(塩津氏 京大 他)、円筒発熱体の液体水素強制対流下での膜沸騰領域の熱伝達測定(松本氏 京大 他)の各講演を聴講した。水素社会の実現に向けた取り組みが進められていることを実感した。続いて「走査型プローブ顕微鏡用ヘリウム循環システムの熱解析(III)」[1] (寺岡 東大 他)と題して口頭発表を行い、第 64 回に報告した低振動・低熱損失液体ヘリウム移送管の間欠的な送液の解明と小流量連続送液に向けた自動計測・制御の構築と測定結果について報告を行った。質疑応答にて連続送液の実現のために精密な圧力調整器の必要性について助言(池田氏 筑波大)を頂いた。その後作業物質として PrNi_5 を用いた開発中の小型超低温連続冷凍システム(戸田 東大 他)の講演を聴講した。併設展示会にて見学、資料収集を行った後、同日午後にはテーマ：フェロー塾「ピンチを乗り越えエンジニア！(プロジェクト X 風)」講演者：浅野克彦フェロー、上岡泰晴フェロー が催されて大変な盛況であった。実体験に基づく苦労話や失敗・成功談が語られ大変勇気づけられた。なかでも、製作中に設計板厚不足が判明した或る大型部品について強度解析の高精度化を行い、その結果に先方も納得して作り直しをすることなく無事納入にこぎつけた話が特に印象に残っている。本学会は旧知と再会の機会も多く、低温装置に関して有意義な情報交換のできる場でもありそれらを業務に役立てていければと考えている。

[1]寺岡 総一郎, 青井 優樹, 横田 統徳, 佐々木 徹, 宮武 優, 福山 寛 第 96 回 2018 年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集 p115

(寺岡 記)

2018 年度春季低温工学・超電導学会に参加した。冷却系基礎のセッションにおいて、「小型超低温連続冷凍システムの開発 II」と題し、現在開発中の連続冷凍システムの開発状況について発表した。連続冷凍システムに必須の構成要素である冷凍用小型マグネットの設計や、試作した熱スイッチの熱伝導性能について発表し、議論した。特別セッションでは、低温工学や超電導を専門としてきたシニア研究者の方から、自身が経験したトラブルや失敗事例とその対応について講演があった。トラブルや失敗は忌避されるが、発生した場合には表面的な解決で終わるのではなく、熟考して新たな知見を得るなど、今後にかاشていくことが大切であると再認識した。

(戸田 記)

3. 平成 30 年度高圧ガス保安教育（従事者対象）参加報告

日 時 平成 30 年 7 月 20 日

場 所 理研計器株式会社（東京都板橋区）

主 催 日酸 TANAKA 株式会社

参加者 阿部 美玲、寺岡 総一郎、戸田 亮 他（全 14 名）

高圧ガス取扱業務従事者を対象とする保安教育に参加した。今回は酸素濃度計などのガス検知器に関する知識を深めることを目的として、日酸 TANAKA 協力のもと理研計器本社工場にて開催された。

前半は、ガス検知器の必要性と使用事例について講義を受けた。同社は理化学研究所で発明開発されたメタンガス検知器を製造販売する企業体として 1939 年に設立された。この事業の目的は炭鉱での労働環境の安全確保だった。現在も各種の可燃性や毒性ガス、酸素濃度計や硫化水素などを労働安全衛生法やそれ以上に厳しい基準で警報できる検知機器を開発、販売している。続いてガス検知器を化学物質取り扱いリスクアセスメントへ活用例として、一酸化炭素のガス検知器を使ってドラフトチャンバーの排風機能を評価、可視化した事例が紹介された。

後半は複数の実演が行われた。有機溶剤を検知するガスモニターの実演では、エタノールが含まれるウェットティッシュをゴム手袋の中に入れて口を縛り外側から検知器を当て揮発したエタノールが手袋を透過したことを確認した。また、酸素濃度計が天井部と床面部に取り付けられた透明なケースの中にドライアイスにお湯を注いだ容器を置いて、ケースの天井付近と床付近との酸素濃度変化が異なる様子を観察した。

日頃から作業安全のために活用しているガス検知器だが、動作原理への理解が深まると適切な機器選択に大いに役立つこと、単純な作業環境モニタリング以外にもガス検知器を応用できる場面があることを理解できた。また、講師陣の個性的な伝え方も大いに印象に残った。今後の機会に生かしたい。

（阿部 記）

平成 30 年度の高圧ガス保安教育に参加した。本保安教育の目的は、酸素濃度計などのガス検知器に関する理解を深めるとともに、他機関の技術者との交流、情報交換を行い、今後の高圧ガス製造、保安業務に活かすことである。最初に検知器についての講義があり、その後、実際にガス検知器を用いたガス検知の実演があった。理研計器社は理化学研究所で発明されたメタンガス検知装置の製造販売を行う企業として設立され、その後も、様々な種類のガス検知器を開発、販売してきている。現代では、産業上の必要性により多種多様なガスが取り扱われているが、漏洩等で正常な管理を離れると、作業者の健康や周囲の安全にとって脅威となりうるものもある。その影響や対処方法はガスの種類によって異なるため、何が、どのくらい漏洩したのかをいち早く検知することが大切であり、ガスの特性に合わせて様々な検出器が開発されている。近年では一つの筐体で複数のガスを切り分けて検知できるもの、狭い作業場などに携帯できるものなど、より使いやすい製品が開発されていることを知った。狭い作業場などでは、手がふさがったり、かさばったりすることを嫌って、作業に直接必要でない検知器の携行などはおろそかになりやすい。コンパクトで多機能な検知器の開発は作業者の安全確保に資するもので大変興味深かった。

（戸田 記）

4. 自由研削用グラインダー等の研削といし取扱い業務 特別教育 受講報告

日 時 平成 30 年 10 月 7 日 (日)
場 所 北とぴあ (東京都 北区)
主 催 一般社団法人 東京技能者協会
講 師 一般社団法人 東京技能者協会
参加者 低温センター 戸田 亮、他多数

自由研削といしの取替えおよび取替え時の試運転の業務に従事するためには、労働安全衛生法にもとづき特別教育の修了が必要とされる。低温センターには、日々の業務上必要となる部品の作成、修理等に使用する工作室がある。工作室内に設置されている切断といし、双頭グラインダー等に使われているといしの交換作業を行うため、これを受講した。といしの構造や性質、正しい取り扱い方、交換時の注意点や試運転におけるポイントなどを中心に講義があり、実習では実際にといしを交換、試運転する作業を行った。機械加工では動力を用いた回転体を使用する場面が多いが、固定不足や固定部の破損等があると作業員あるいは周囲の重大な損害にも繋がる。といしに限らず、工作機械の使用時には常に気をつけておきたい。

(戸田 記)

5. 配管施工セーフティセミナー 受講報告

日 時 平成 30 年 12 月 4 日 (火)
場 所 東京大学 低温センター (東京都 文京区)
主 催 低温センター
講 師 日本スウェージロック FST (株)
参加者 低温センター 戸田 亮、阿部 美玲、寺岡 総一郎 他 20 名程度

気体を取り扱うシステムにおいて、配管同士の接続や、バルブ等の機能をもつ配管部品と配管との接続は必要不可欠である。接続部分に施工ミスがあると漏洩事故につながり、システムが予定通りに機能しないだけでなく、他の物的損害、人的損害に繋がる場合もある。接続部の数はシステムの複雑さにもよるが非常に多くなるため、確実な施工と確認および作業時間の短縮が非常に重要である。講習では様々な接続方法について構造、原理やメリット・デメリット、施工時のコツ、施工不良となる例などの説明があった。講師の会社の製品であるスウェージロック・チューブ継手の話に重点が置かれたが、フレア式やガスネジ式などの説明もあり大変参考になった。低温センターにはヘリウム回収配管など多数の配管があるため、自身で接続の施工を行ったり点検したりする機会も多い。講習で学んだことを実践に活かしていきたい。

(戸田 記)

6. 情報システム人材育成研修～IT 基礎～ 受講報告

日 時 平成 31 年 1 月 15 日 (火)
場 所 東京大学 本郷キャンパス (東京都 文京区)
主 催 東京大学
講 師 関谷 勇司 准教授、品川 高廣 准教授、中村 遼 助教
参加者 低温センター 戸田 亮 他多数

情報システム人材育成研修 ～IT 基礎～ を受講した。研修では、ネットワークの基礎知識、Web サービスの基礎知識、クラウドサービスの基礎知識について講義があった。ネットワークや Web サービスについては知っていることの再確認となる事項が多かったが、近年急速に発展してきたクラウドサービスについては新たに学ぶことが多かった。クラウドサービスを利用すると、必要な機能を必要なときに簡単に利用することができ、非常に利便性が高い。しかし、使用ミスや設定ミスなどによって、データを失ったり漏洩したりする危険もあるため、仕組みをよく理解して使うことが必要である。情報処理、データ通信分野の発展は非常に早い、新たな技術を理解して業務に活かしていくようにしたい。

(戸田 記)

7. 高圧ガス保安係員講習 受講報告

日 時 平成 31 年 2 月 4 日 (月) ～5 日 (火)
場 所 国際ファッションセンタービル (東京都 墨田区)
主 催 高圧ガス保安協会
講 師 高圧ガス保安協会
参加者 低温センター 戸田 亮、藤井 武則、他多数

高圧ガス保安協会が保安係員向けに実施する義務講習「保安係員講習」を受講した。講習では、近年の法令改正、事故事例の紹介、高圧ガス保安業務に関する講義、他の受講者とのグループディスカッション (ヒヤリハット事例の共有) などがあった。異常検知のために設置したセンサーが正常値を表示し続けているが、実際には故障していた事例は興味深かった。いつも同じ状態、値を示していることが普通であると考えられる計器では、日常点検等でも故障との判別がつきづらい。正しく反応するかを定期的に確認する必要があると感じた。

(戸田 記)

8. 第 3 回次世代 IT アーキテクト育成セミナー 受講報告

日 時 平成 31 年 2 月 25 日 (月) ～3 月 1 日 (金)
場 所 東京大学 本郷キャンパス (東京都 文京区)
主 催 東京大学 情報基盤センター
講 師 東京大学 情報基盤センター
参加者 低温センター 戸田 亮、他約 20 名

情報基盤センターが主催する次世代 IT アーキテクト育成セミナーを受講した。情報化社会の基盤となるネットワークやサーバの構築、管理、運用についての基本的な技術、クラウドサービスの利用、セキュリティ対策などについて講義と実習があった。サーバ構築の自動化やクラウドサービスの活用はこれまでなじみが薄かったので、使いこなせるほど身につくまでにはまだまだ学習が必要であると感じた。近年は、様々な情報技術を組み合わせたサービスが次々と作られている。わずか数クリック程度の作業で新しいサーバを構築し利用することができるというのは、丸一日かけて手元の PC を目的に合わせてセットアップする、といったことと比べると隔世の感があり、技術の進展、時代の変化に驚かされる。しかし、その仕組みについてよく知ることなくブラックボックスのまま使用していると、セキュリティ上の事故に繋がる危険もある。利用にあたって一定の知識の獲得は必要であり、導入への敷居は、作業の手軽さほどには低くないと感じた。新技術の導入には、新たな知識の獲得など一定の努力が必要となるため、強い必要性がなければ旧来のやり方を踏襲しがちであるが、日頃から新しい情報を入手し、学習する時間を割いて、業務改善に繋がるものを積極的に取り入れていけるよう心がけたい。

(戸田 記)

9. 総合技術研究会 2019 九州大学 参加報告

日 時 平成 31 年 3 月 6 日(水)～8 日(金)

場 所 九州大学 伊都キャンパス(福岡県福岡市西区元岡 744)

主 催 九州大学

参加者 東京大学 低温センター 金子芽衣、戸田亮

他 04 極低温技術分野 約 40 名

総合技術研究会 2019 九州大学に参加した。この総合技術研究会は、大学、高等専門学校及び大学共同利用機関等の技術者が、日常業務で携わっている実験装置の開発、維持管理の話題から改善、改良の話題に及ぶ広範な技術的研究支援活動について発表する研究会であった。04 極低温技術分野では、8 題の口頭発表と 7 題のポスターセッションが行われた。

3 月 7 日(木)に、筑波大学 研究基盤総合センター 低温部門の池田博氏による講演会が行われた。講演のテーマは「ヘリウム液化機と 42 年間」で、1977 年から現在に至るまで運転してきた 5 台のヘリウム液化機の歴史を説明していただいた。昔の液化機と比較して現在のものはタービンの効率が上がっていることや、制御系が進化したおかげで、遠隔でスマートフォン等で監視ができることによって、作業効率を上げることができるようになったという話を聞くことができた。

3 月 8 日(金)には、04 極低温技術分野の口頭発表とポスターセッションの聴講をした。発表内容は、主にヘリウム液化機やそれにまつわるトラブル関係、日常業務での作業効率化などの業務改善に関する報告が多かった。液化機関係のトラブルについての報告は、水漏れ、詰まり、センサー故障、タービン故障、パッキン摩耗による破損、プログラム制御系トラブルなど本郷キャンパスの低温センターでも起こりうる事例であった。その中でも、高圧ガスドライヤーのバルブの不具合についての報告は非常に興味深かった。その内容は、液化機の日常点検の際に、ガスが漏れる音がしたためリークディテクターで調査したところ、バルブから漏れが見つかったため増し締めを行った。しかし、再度ガスが漏れたため、パッキンを確認したところ、摩耗していることが分かった。このパッキンは、温度に関して耐熱使

用可能範囲内のものを用いてはいたが、吸着筒エリアは使用可能範囲内の上限に近い温度であったため、耐久性が低く劣化し、摩耗がひどくなる原因となったのではないかとのことだった。このような細部の部品に関しても、仕様書作成の際には使用可能範囲をきちんと検討することで、後々のメンテナンスにもつながるということが分かった。

研究会後に九州大学低温センターの見学会に参加した。キャンパス自体が新しく敷地が広大であるため、各設備が十分なスペースを持って設置されており、かつ天井も高かったため、高圧ガス製造所としては明るくきれいな印象で、施設内が環境衛生的にも整っていると感じた。

今回の研究会を通じて、同様の液化施設を持つ職場で働く技術職員の創意工夫、失敗談等も聞くことができ、技術者の交流及び技術向上を図ることができた。講演会で池田氏も述べていた通り、トラブル対応や情報共有のためにも低温技術者のネットワークが重要であると改めて感じた。今回の研究会を通じて得られた、知識や情報を今後の業務に生かしていきたい。

(金子 記)

九州大学で開催された総合技術研究会に参加した。ポスターセッションにおいて、「小型連続核断熱消磁冷凍機実現に向けた小型熱スイッチの開発」として、現在開発中の小型熱スイッチについて発表し、議論した。全体講演では、阪神淡路大震災(1995年)、熊本地震(2016年)、東日本大震災(2011年)のそれぞれにおいて、大きな被害を受けた大学の技術職員から被害の詳細、その後の経過、復旧対応等について講演があった。地震はいつどこで起こるかわからないため、日頃から安全確保、損害の最小化、速やかな復旧活動などについて事例に学び、手順を考えておく必要があると感じた。極低温技術分野のセッションでは、様々な大学の職員から液化回収設備の現状や近年の事例を紹介があり、液体ヘリウムの製造、供給に関わる情報交換を行った。

(戸田 記)

技術系職員 発表リスト

セミナー・講習等（依頼講演）

1. 平成 30 年度化学物質等（化学物質・高圧ガス・レーザー）取扱者安全講習会
阿部 美玲
高圧ガス講習会（薬学部総合研究棟 2 階講堂）2018 年 6 月

国内会議（一般講演）

2. 「小型超低温連続冷凍システムの開発 II」
戸田 亮, 瀧本 翔平, 植松 祐真, 村川 智, 福山 寛
第 96 回 2018 年度春季 低温工学・超電導学会（タワーホール船堀）2018 年 5 月
3. 「2 次元ヘリウム 4 における比熱と非古典的回転慣性の同時測定」
宇佐美 潤, 戸田 亮, 中村 祥子, 松井 朋裕, 福山 寛
日本物理学会 2018 年秋季大会（同志社大学）2018 年 9 月
4. 「本郷キャンパスの月初ヘリウムデータ報告と液体ヘリウム使用料金」
阿部 美玲, 加茂 由貴, 戸田 亮
第 10 回低温センター研究交流会（東京大学）2019 年 2 月
5. 「低温センター共同利用装置の紹介」
戸田 亮
第 10 回低温センター研究交流会（東京大学）2019 年 2 月
6. 「小型超伝導マグネットの開発」
瀧本 翔平, 戸田 亮, 村川 智, 福山 寛
第 10 回低温センター研究交流会（東京大学）2019 年 2 月
7. 「単原子層ヘリウム 4 の比熱と超流動性の同時測定装置の開発」
宇佐美 潤, 戸田 亮, 中村 祥子, 松井 朋裕, 福山 寛
第 10 回低温センター研究交流会（東京大学）2019 年 2 月
8. 「小型連続核断熱消磁冷凍機実現に向けた小型熱スイッチの開発」
戸田 亮, 瀧本 翔平, 村川 智, 福山 寛
総合技術研究会 2019 九州大学（九州大学）2019 年 3 月
9. 「2 次元ヘリウム 4 における比熱と非古典的回転慣性の同時測定 II」
宇佐美 潤, 戸田 亮, 中村 祥子, 松井 朋裕, 福山 寛
日本物理学会第 74 回年次大会（九州大学）2019 年 3 月
10. 「小型連続核断熱消磁冷凍機用超伝導マグネットの開発」
瀧本 翔平, 戸田 亮, 村川 智, 福山 寛
日本物理学会第 74 回年次大会（九州大学）2019 年 3 月

国際会議（一般講演）

11. “Development of a Compact and Low Heat-dissipation Shielded Superconducting Magnet Usable at Sub-mK Temperature”
S. Takimoto, R. Toda, S. Murakawa, and Hiroshi Fukuyama
International Symposium on Quantum Fluids and Solids, QFS2018 (Tokyo, Japan) 2018 年 7 月

技術ノート

技術ノート

ヘリウム危機 — 研究室ができること —

低温センター・研究開発部門

村川 智

1. はじめに

低温センターが寒剤として供給しているものには液体窒素と液体ヘリウムがある。このうち窒素のほうは大気中に約 78% 存在し、寒剤の素材としては容易に手に入る。しかし、ヘリウムのほうはそうはいかない。大気中には 5 ppm 程度しか存在しないため、空気から精製することはコスト的に割に合わない。それではどこから採集しているかという点、天然ガスから分離生成している。これもすべてのガス田から採集できるわけではなく、限られたガス田からのみであるため、世界的に供給源は限られている。日本は、100% 輸入に頼っており、ほぼアメリカとカタールからである。ひとたび、これらの地域でトラブル（ガスプラント不調、アメリカ港湾ストライキ、中東の政情不安など）が発生すると、とたんに日本のヘリウム需給は崩れ、ヘリウム不足問題が生じる。例えば 2015 年末に大規模な不足が生じ、ディズニーランドなどの風船の販売がなくなることなどがニュースになったことも記憶に新しい。

しかも、近年中国やインドといった新興国を中心に世界的な需要が増大しており、米国政府機関による民間払い下げの供給制限や新規ガスプラントの立ち上げ遅れ、大規模定修予定などから供給の増加が見込まれないため、世界的なヘリウムガスの需給バランスが崩れつつある[1]。実際に、2018 年末あたりから日本国内においてヘリウム不足が顕在化し、新規顧客への販売抑制や、従来顧客への販売量制限・価格の上昇等がガス販売会社から通知されている。日本国内においてヘリウムの需要の三大用途である半導体、光ファイバー、MRI に優先的に配分され、全体の 5% 程度に過ぎない我々のような研究用は、ガスサプライヤーにおける優先順位が非常に低い。このため、ガス不足が生じると最初のほうにしわ寄せが来るのが我々研究者である。実際に 2019 年 3 月に行われた物理学会においては、供給が止められて何とかやりくりしていることや 2019 年度のヘリウム調達に当センターも含めいろいろな大学で苦労している話を聞いた。

このようにすでに研究分野においてヘリウム不足の問題が生じているが、今回の問題は以前のように何らかのトラブルが原因で起こっている一過性のものではなく、世界の需給バランスの崩れという構造的な問題になっていることが大きなポイントである。これはロシアに代表される新しいプラントが立ち上がる 2,3 年後には改善される見込みなので、それまでの辛抱ではある。センターとしてはなるべくユーザーには迷惑がかからないよう努力をしていくが、ユーザーの皆さんにもこの問題に対して協力して頂けたらと思う。

2. ユーザーが研究室でできること

現在、東京大学本郷地区においてはヘリウムガスリサイクルシステムが導入されている。低温センターにはヘリウム液化機があり、各ユーザーが使用した後に生じる蒸発したヘリウムガスを本郷地区に張り巡らされている回収配管網によって回収し、圧縮して貯蔵し、再液化してまたユーザーに供給している。現在、本郷地区のヘリウム回収率は概ね 90% 程度である。この水準だと低温センターの最大貯蔵量から

始まっても、外部からの供給がまったく途絶えてしまうと、10ヶ月程度でセンターからヘリウムがなくなってしまう[2]。もしこのリサイクル率が100%であるならば、外部からヘリウムガスを導入する必要がないため、電気および予冷用の液体窒素の供給が滞らない限り半永久的に液体ヘリウムを使い続けることができる。つまり、ユーザーが各研究室でなるべくヘリウムガスを外に逃がすことを少なくし、回収率をあげることが肝要である。筆者の身の回りにあった事例を元に回収率向上に役立つ情報を伝えられたらと思う。

①トランスファー

各研究室ではセンターから100リットルないし60リットルの小分け容器にて供給を受け、それを実験装置に移送(トランスファー)して使うことが多いと思う。このトランスファーの時にはどうしても損失が出てしまうが、なるべくそれを押さえたい。そこで、低温センターの共同利用部門で行っている方法について紹介する。

通常実験装置に継ぎ足しをする際はトランスファーチューブをしっかりと予冷してから、実験装置のポートに挿すことが勧められている。それは予冷されていない暖かいガスが装置の温度の低い部分や液体ヘリウムに触れてしまい余計な温度上昇が起きるのを防ぐためである。しかし、通常この予冷のためのヘリウムガスはそのまま大気放出していることが多い。筆者も回収を試みたことがあるが、予冷の進行度がよく分からなかったり、冷やしすぎてしまい回収用のチューブを抜くのが難しくなったりとあまり上手くいかなかった。かなりの練習が必要と感じた。一方、最初に汲むときいわゆるイニシャルトランスファーのときは予冷もそこそこに装置に挿してしまっても構わない。実験装置はそれほど冷えていないからである。これを継ぎ足しのときにも応用する。つまり、継ぎ足しのときも予冷をあまりせずにガスが流れていることを確認したら、装置に浅く挿す。浅いところは温度が高いため、暖かいガスが入っても悪影響が無い。そしてそのままガスを流し続けて、ガスが冷えてくるのを待つ。これでは冷えていく様子が分からないではないかと思うかもしれないが、チューブが冷えて液が流れるようになると、液は装置の温かい部分で噴出するためにすぐに蒸発して大きな体積になり、それが回収ラインに流れ、流量計が激しく動き出す。このときはカシャカシャと流量計から音が聞こえるのでこれを合図にトランスファーチューブを奥まで挿し、あとは普通のやり方と同じ様にすすめる。この方法だと予冷の際のヘリウムガスの損失を極めて少なくすることができる。もっともこの方法はすべての装置でできるわけではないと思うが、できる装置では一考の余地はあると思う。

またトランスファーが終わった後、充分待って小分け容器、実験装置ともに圧力が下がってからトランスファーチューブを抜くことも大切である。圧が残っている場合、ヘリウムガスが噴出してガスの損失につながるだけでなく、凍傷の危険性も高まるために気をつけたい。

②流量計

各研究室には図1左のような流量計が設置してあるが、これも気をつけたいといけない。

最初にコメントしておくがこの流量計はヘリウム用ではなく、普通の都市ガス用である。そのため、冷たいガスを流さないということである。例えばイニシャルトランスファーなど大量にヘリウムのトランスファーをすると、室温に戻りきらず冷たいまま回収配管にガスが流れる。冷たいガスのまま流量計を通過すると見かけの流量つまり回収率が下がり、研究室でのみかけの損失が増え、研究室へのヘリウム代の請求額が上がってしまうので、気をつけたいところではあるが、東大全体のリサイクルシステム上では損失は無い。リサイクルシステム上の問題は流量計が凍りついてしまうことである。流量計は内部

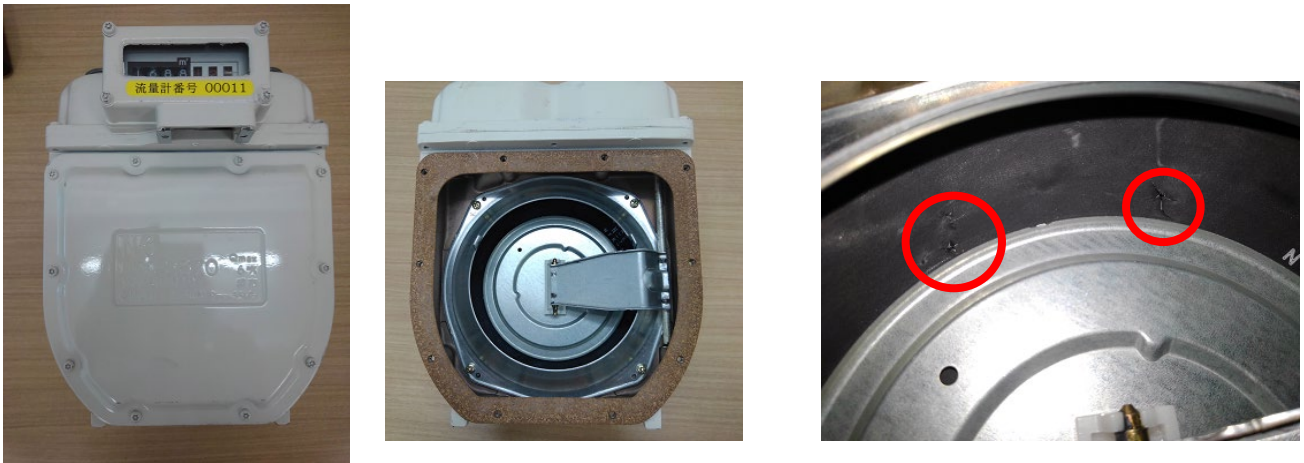


図1. 流量計。左：外観 中央：外容器を開けたところ。コルク状のものが外周にある。
右：ゴム稼動膜に空いた穴。表と裏に計 10 箇所程度見つかった。

にゴムの可動膜を有するが、冷たいガスを大量に長時間流すとゴム膜が動きながら凍ってしまうことがある。そうすると、ゴム膜に破損(図1右)が生じてしまうことがある。ヘリウムガスは当然この亀裂から外に逃げ出してしまう。一応、外側容器もコルク状のもので気密が図ってある(図1中央)が、ヘリウムに対しては充分とは思えない。写真は筆者の研究室で壊れてしまったものである[3]。このとき、追加トランスファでガスが大量に流れていたときは流量計が動作していたが、通常蒸発レベルでは流量計は動作せず、外に逃がしてしまっていたと思われる。そのため通常 100%近い回収率であるにもかかわらず、該当月の回収率は 46.6%となってしまうと痛い出費を強いられてしまった。しかも、この回収率の低下は、月初の低温センターへの在庫登録の際に発覚し、1ヶ月程度に亘って流出が続いてしまった。こまめに流量計の値を記録しておけば半月程度で判明した可能性があり、記録の大切さを痛感した。

③配管継ぎ手

配管継ぎ手は一度施工したら気を配らないところではあるが、定常的な漏れの原因となる。

よく漏れの原因になるのはゴム配管を使っているところで、ゴムが劣化してしまい漏れてしまうことである。長年使っているゴムチューブは手で触ってみてもゴムの弾性がなくなり亀裂が入っていることが目視できる。数年に一度くらいは確認したい。

また、ねじ式配管継ぎ手もしばしば問題になる。太さを変更するだけのような円筒対称な部品であれば問題はそれほど生じないが、エルボーやバルブ等、向きに自由度が無いものは締め込み量が離散的になるため、締め込み不足になるときがある。そのまま気づかずに配管施工を進めてしまうと、後から増し締めなどできなくなってしまうこともあるため、エポキシ系の接着剤等で応急手当を行うしかなくなってしまうので注意したい。

低温センターでは図2のような手軽に使えるハンディタイプのヘリウムリークディテクターの貸し出しを行っている。機を見てチェックしてもらえたら幸いである。



図2. 低温センターで貸し出しているハンディタイプのリークディテクタ

3. ヘリウムについて

筆者は学術研究の対象もヘリウムであり、最後にヘリウムという物質について言及したい。

ヘリウムは液体ヘリウムとして低温センターでも供給しているように、手軽に 4 K 程度の、さらには簡単な排気セットを用いることで、1.5 K 程度の低温環境を作成できる寒剤として理系研究の分野で広く使われている。また、いわゆるドライ冷凍機である GM 冷凍機・パルスチューブ冷凍機や 10 mK 程度の極低温を実現する ^3He - ^4He 希釈冷凍機の冷媒物質もヘリウムである。また、10 mK 以下の超低温でよく使われる ^3He 融解圧温度計もヘリウムを使う。

これはヘリウムが単原子の希ガスで、その中でも一番軽く相互作用が非常に弱いことから量子論的な効果が顕著に現れる物質だからである。ヘリウムは沸点が低だけでなく、零点振動により常圧下では固体にならずに液体のまま存在し三重点が存在しない。蒸発冷却によって効率よく低温を作ることができるのはこのためである。また、液体ヘリウムは低温で、粘性が無い超流動と呼ばれる状態になる。超流動には粒子の波動性と量子統計性が重要であり、超伝導と相補的に研究が行われている。

また、ヘリウムには中性子が二つのヘリウム 4 (^4He) と中性子が一つのヘリウム 3 (^3He) の二種類の安定同位体があることも実用上でも研究上でも重要である。これらの粒子は、各々ボース粒子とフェルミ粒子であり、低温においてフェルミ流体またはボースアインシュタイン凝縮体(BEC)として通常液体とも性質が大きく異なる振る舞いを示す。この 2 種類の同位体の混合液体は質量が 1.3 倍も違うことから零点振動に必要な体積が異なるため、低温ではほぼ ^3He の濃厚相(c 相)と ^4He が主成分の希釈相(d 相)に相分離する。希釈冷凍機の原理はエントロピーの小さい希釈相にエントロピーの大きな濃厚相の ^3He を「蒸発」させることである。ここでポイントは希釈相には 6.4%の ^3He が溶けることにより、循環量を維持できることである。研究対象としてはこの二種類の同位体により、ある現象の量子統計性の違いを検証できることが大きな利点である。実際、超流動はボース粒子である ^4He では 2 K 程度で実現するが、フェルミ粒子である ^3He はその温度域では超流動にならない。このことから超流動は BEC によるものと解釈されたという歴史がある。一方 ^3He は数 K という「高温」ではなく、数 mK という超低温で超流動になる。これは、フェルミ粒子である ^3He が超伝導と同じく、BCS 機構により超流動になることによる。液体ヘリウムは非常に不純物の少ない系であるため、超流動、超伝導の基礎である BEC および BCS 機構の基礎研究を行うのにとってつけである。

ヘリウムは固体も粒子交換が頻繁で興味深い。特にフェルミオンである ^3He は電子と同じく核スピン 1/2 をもち、1 mK 以下の超低温では 3 体交換以上の多体粒子交換相互作用により、U2D2 相とよばれる単純な反強磁性とは異なる反強磁性相が出現する。この相の出現は融解圧に折れ曲がりとして観測され、 ^3He 融解圧温度計において温度圧力定点として利用されている。

このように、ヘリウムは実用上、研究上も非常に重要な物質であるが、これはともに質量が軽く相互作用が小さいことに起因する。この他より優れた特徴を持つ貴重なヘリウムを寒剤としてはもちろん、研究対象としても興味を持ち続けていきたいと思う。

参考文献など

[1]ガスジオラマ 2019 株式会社ガスレビュー。

[2]もっとも再スタートを考えるとそこまで使っていないものでもない

[3]故障の原因は恥ずかしいことに予冷用の窒素の追い出しに失敗してしまい、イニシャルトランスファー時に長時間大量にヘリウムを流してしまったことによると考えている。

各種委員会・センター教職員名簿

低温センター運営委員会

第 132 回運営委員会 (平成 30 年 6 月 4 日開催)

第 133 回運営委員会 (平成 31 年 2 月 12 日開催)

第 134 回運営委員会 (平成 31 年 3 月 5 日開催)

運営委員会 名簿 (任期 H29.4.1~H31.3.31)

(委員長) 大越 慎一	センター長・教授	大学院理学系研究科化学専攻・低温センター (兼務)
川崎 雅司	教授	大学院工学系研究科物理工学専攻
三田 吉郎	准教授	大学院工学系研究科電気系工学専攻
脇原 徹	准教授	大学院工学系研究科化学システム工学専攻
福山 寛	教授	大学院理学系研究科物理学専攻・低温センター (兼務)
藤森 淳	教授	大学院理学系研究科物理学専攻
磯部 寛之	教授	大学院理学系研究科化学専攻
神谷 岳洋	准教授 (H30.4.1~)	大学院農学生命科学研究科応用生命化学専攻
上野 和紀	准教授 (H30.4.1~)	大学院総合文化研究科広域科学専攻
山本 希美子	准教授	大学院医学系研究科生体物理医学専攻
岩本 敏	准教授	生産技術研究所光電子融合研究センター
山下 穰	准教授	物性研究所凝縮系物性研究部門
島野 亮	教授	低温センター研究開発部門
村川 智	准教授	低温センター研究開発部門

低温センター専門委員会

第 78 回専門委員会 (平成 30 年 5 月 21 日開催)

専門委員会 名簿 (任期 H30.4.1~R2.3.31)

(委員長) 大越 慎一	センター長・教授	大学院理学系研究科化学専攻・低温センター (兼務)
為ヶ井 強	准教授	大学院工学系研究科物理工学専攻
岡本 徹	准教授	大学院理学系研究科物理学専攻
西田 紀貴	講師 (~H31.3.31)	大学院薬学系研究科薬学専攻
島野 亮	教授	低温センター研究開発部門
村川 智	准教授	低温センター研究開発部門
阿部 美玲	技術専門職員	低温センター液化供給部門

低温センター編集委員会

編集委員会 名簿 (任期 H29.4.1~H31.3.31)

	岩佐 義宏	教授	大学院工学系研究科物理工学専攻
	田中 雅明	教授	大学院工学系研究科電気系工学専攻
	岡本 徹	准教授	大学院理学系研究科物理学専攻
	森 壘	准教授 (H30.4.1~)	大学院医学系研究科生体物理医学専攻
	上田 卓見	助教	大学院薬学系研究科薬科学専攻
	神谷 岳洋	准教授 (H30.4.1~)	大学院農学生命科学研究科応用生命化学専攻
(委員長)	島野 亮	教授	低温センター研究開発部門
	村川 智	准教授	低温センター研究開発部門
	中村 祥子	特任助教	低温センター研究開発部門

低温センター教職員

教職員 名簿

センター長

大越 慎一 大学院理学系研究科化学専攻・教授 (兼務)

研究開発部門

島野 亮 教授

福山 寛 大学院理学系研究科物理学専攻・教授 (兼務)

村川 智 准教授

藤井 武則 助教

中村 祥子 特任助教

共同利用部門

戸田 亮 技術専門職員

液化供給部門

阿部 美玲 技術専門職員

加茂 由貴 技術職員

志村 芽衣 技術職員

寺岡 総一郎 技術専門職員

板垣 信則 技術補佐員

事務室

柳澤 茂孝 専門員兼事務室長

佐々木 陽子 特任専門職員

片岡 一夫 係長 (~H30.4.30)

細野 久美 係長 (H30.4.25~)

新川 恭弘 一般職員

お知らせ

人事異動

職員

細野 久美	係長	平成 30 年 4 月 25 日	育児休業より復帰
片岡 一夫	係長	平成 30 年 5 月 1 日	異動（理学系研究科へ）

投稿のご案内

低温センター編集委員会では、広く皆様からの投稿をお待ちしております。テーマは自由ですが、多様な読者を念頭に、少なくとも本文のイントロダクションはできるだけ平易に書いて下さい。肩の凝らない読み物風原稿も歓迎いたします。詳細は、低温センター・編集委員会 委員長 島野 亮 (shimano@crc.u-tokyo.ac.jp) までお問い合わせください。

編集後記

低温センター・研究開発部門 中村祥子

7月に、オランダはライデンに行ってきました。言わずと知れた、ヘリウムが初めて液化され超伝導が発見された地です。日本との関わりも深いそうで、すれ違う自転車から、ニイハオではなく「こんばんは」と挨拶されたのは、ヨーロッパでは初めての体験でした。

遥々この地に来たからにはカマリン・オンネスの液化機に御挨拶しようと、ライデン大学の物理学科で2号機（が改造されたもの？）を眺め回して、風車見物もそこそこに、ブルハーフェ博物館に向かい、長い展示の最後の最後で、念願の初号機にお目にかかりました。写真に設計図に、予習は完璧だったはずなのですが、デュワーを見上げた先にグルグルと巻きつけられた動物の皮のような質感の白い帯、ガラスに溜まって揺れる水銀、魔女が廻す糸車のような圧縮機、見慣れないモノたちに、111年の隔たりを感じて圧倒されました。

令和元年度、低温センターでは、新しい液化機を迎え入れる工事が進んでいます。階段を降りると、踊り場の窓の外に白い塔が建ちました。工事の喧騒に混じって、昨年導入された回収圧縮機の連続音が聞こえてきます。これから10年、20年、パワーアップした液化システムに支えられて、この年報に集う多様な研究が、どのように発展していくのか思いを巡らしながら、今日も居室で、図の位置を調整したり誤植を退治したりとWordとにらめっこしています。

今後とも、低温センターをよろしくお願い申し上げます。

低温センター 編集委員会

岩佐 義宏	教授	工学系研究科物理工学専攻 附属量子相エレクトロニクス研究センター
田中 雅之	教授	工学系研究科電気系工学専攻
岡本 徹	准教授	理学系研究科物理学専攻
森 壘	准教授	医学系研究科生体物理医学専攻 医学部附属病院放射線科
上田 卓見	准教授	薬学系研究科薬科学専攻
神谷 岳洋	准教授	農学生命科学研究科応用生命化学専攻
(委員長) 島野 亮	教授	低温センター研究開発部門
村川 智	准教授	低温センター研究開発部門
中村 祥子	特任助教	低温センター研究開発部門

Annual Report 2018

(Cryogenic Research Center, the University of Tokyo)

平成 30 年度低温センター年報

東京大学低温センター

第 10 号 2019 年 10 月

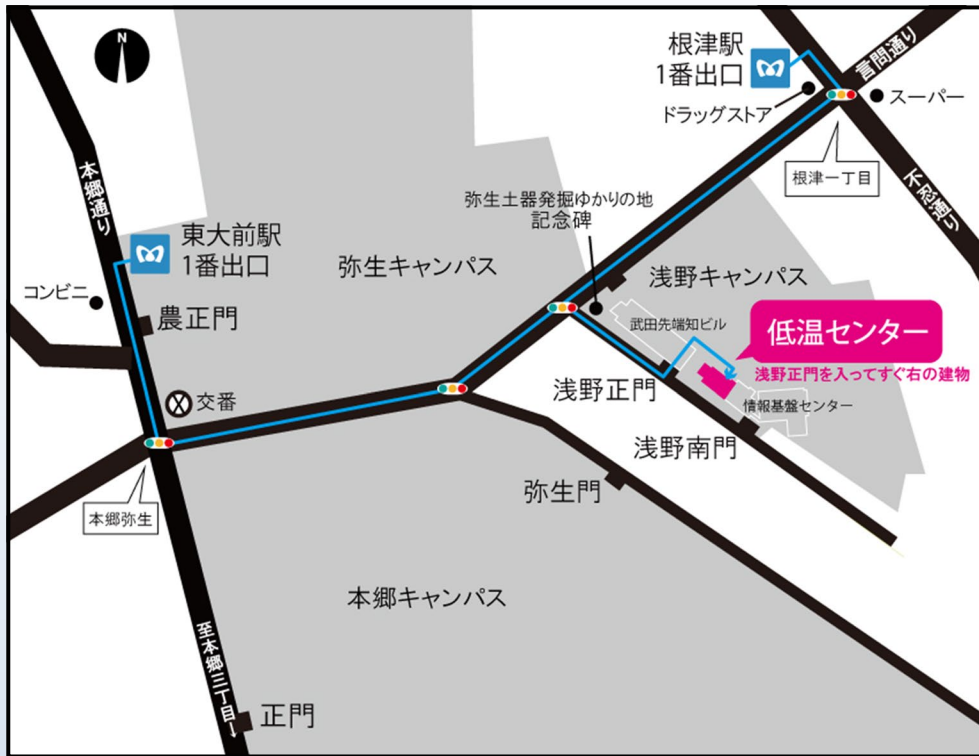
Volume 10, October 2019

発行者：東京大学低温センター

編集：低温センター 編集委員会

印刷：河北印刷株式会社

所在地



東京大学低温センター

住所： 〒113-0032
東京都文京区弥生 2 丁目 11 番 16 号

電話： 03-5841-2851 (事務室)

FAX： 03-5841-2859 (事務室)

E-mail： email@crc.u-tokyo.ac.jp (事務室)
openlab@crc.u-tokyo.ac.jp (共同利用部門)
teion-info@crc.u-tokyo.ac.jp (液化供給部門)

URL： <http://www.crc.u-tokyo.ac.jp>

最寄り交通機関

千代田線	「根津駅」	1 番出口	徒歩 7 分
南北線	「東大前駅」	1 番出口	徒歩 10 分