

2017

Annual Report 2017

*Cryogenic Research Center
University of Tokyo*



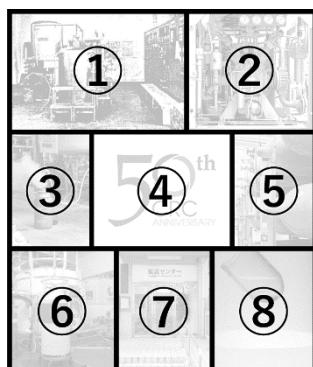
平成29年度 低温センター一年報

東京大学低温センター



表紙

東京大学低温センター設立 50 周年を記念し、低温センターだより第 3 号（1972 年発行）に掲載された初代のヘリウム液化機と、現在の低温センターの諸風景を紹介する。



- ① 初代ヘリウム液化機（1967 年設置）
- ② 最新のヘリウム回収圧縮機（2018 年更新）
- ③ 液体窒素の汲みだし風景
- ④ 低温センター設立 50 周年記念ロゴ
- ⑤ ヘリウム長尺カードル（1982 年から順次設置）
- ⑥ 液体ヘリウムの汲みだし風景
- ⑦ 低温センター正面玄関
- ⑧ 超流動ヘリウムのフィルムフロー（2012 年撮影）

（低温センター設立 50 周年記念事業の詳細は、P84 に掲載。）

巻頭言

低温センター長 大越 慎一

平成 29 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昨年度で発足 50 周年を迎え、本年 2 月には 50 周年記念式典および記念講演会を盛大に催すことができました。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 研究室に液体窒素を、約 60 研究室に液体ヘリウムを供給しております。数年前に起きた世界的な液体ヘリウム不足の折にも、ユーザーの皆様には寒剤を供給することができ、東京大学の基礎研究を支えることができました。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しております。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。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、ユーザーの皆様には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 31 年度にかけて、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、何卒宜しくお願い申し上げます。

また、東京大学における全学センターの改組に伴い、平成 30 年度より三年間をかけて新しい低温センターへと組織の改編を行います。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。50 周年式典の折にも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、宜しくお願い申し上げます。

目次

巻頭言	1
大越 慎一 (低温センター長)	
研究ノート	
○ トポロジカルな表面状態を持つ超伝導体 β -PdBi ₂	6
石坂 香子 (工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 石坂研究室)	
○ グラフェンのスピン偏極ジグザグ端状態	11
松井 朋裕、福山 寛 (理学系研究科 物理学専攻 福山研究室)	
○ NMR 法による膜蛋白質の機能に直結した動的構造平衡の解明	17
上田 卓見、幸福 裕、嶋田 一夫 (薬学系研究科 薬科学専攻 生命物理化学教室)	
○ SPIO 造影 MRI を利用した放射線性肝障害領域の描出	23
古田 寿宏 (医学系研究科 生体物理医学専攻 放射線医学講座)	
○ 植物の栄養吸収	27
神谷 岳洋 (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	
○ 非線形磁気光学効果、白色発光を示す機能性磁性体	32
大越研究室 (理学系研究科 化学専攻)	
○ 半導体シリコンへの高効率スピン注入の実現とスピン蓄積現象の解明	36
田中研究室 (工学系研究科 電気系工学専攻)	
○ 半導体/強磁性金属ハイブリッド量子ヘテロ構造におけるスピン依存伝導	40
田中・田畑・高木・大矢研究室 (工学系研究科 電気系工学専攻)	
○ イリジウム超伝導転移端センサマイクロカロリメータを用いた光の単一光子検出に関する研究	44
高橋研究室 (工学系研究科 原子力国際専攻)	
共同利用研究発表論文リスト	48
低温センター 各部門報告	
研究開発部門 研究実績報告	56
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	77
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	79
阿部 美玲 (低温センター 液化供給部門)	

全般的な活動報告

東京大学低温センター設立 50 周年記念式典.....	84
第 9 回低温センター研究交流会.....	86
安全講習会.....	91
平成 29 年度東京大学技術職員研修「低温技術研修（初学コース）」.....	93
2017 年度 低温センター技術研修.....	95
低温センター見学.....	96
その他	
職員研修.....	98
1. 2017 年度第 1 回冷凍部会(公開)例会 低温工学基礎講座 Space Cryogenics	
2. 第 94 回 2017 年度春季 低温工学・超電導学会	
3. 平成 29 年度 高圧ガス保安教育 参加報告	
4. 第 2 回東京大学技術発表会参加報告	
5. 平成 29 年度 高圧ガス製造保安係員講習（2 月） 参加報告	
6. 平成 29 年度 高圧ガス製造保安係員講習（3 月） 参加報告	
7. 日本物理学会「第 73 回年次大会(2018 年)」 参加報告	
技術系職員 発表リスト.....	102
技術ノート	
○ 電気伝導測定 ～四端子測定でも接触抵抗には注意を～.....	104
戸田 亮（低温センター 共同利用部門）	
各種委員会・センター教職員名簿.....	110
お知らせ.....	112
編集後記.....	113
村川 智（低温センター 准教授）	

研究ノート

トポロジカルな表面状態を持つ超伝導体 β -PdBi₂

工学系研究科 附属量子相エレクトロニクス研究センター 石坂研究室
石坂 香子

表面や端に特殊な電子構造（エッジ状態）を持つトポロジカル物質が注目を集めている。なかでもトポロジカル超伝導体は仮想的な粒子であるマヨラナフェルミオンの創出やそれを用いたトポロジカル量子計算の舞台として期待されている。これを実現するための戦略のひとつとして、トポロジカルに守られたスピン偏極表面状態を持つ超伝導体の探索が進められている。本稿では、強いスピン軌道相互作用を持つパラジウム-ビスマス合金系超伝導体を対象とした研究を紹介する。スピン分解角度分解光電子分光および第一原理計算により得られたバルクと表面のスピン・電子構造をもとに、そのトポロジカルに非自明な性質を探る。

1. はじめに

トポロジカル物質研究の急速な発展は、2005年のトポロジカル絶縁体の予言とそれに続く発見に端を発すると言えるだろう[1]。トポロジカル絶縁体は、内部は電気を通さない絶縁体である一方、表面では電気が流れる金属となっており、通常の絶縁体とは異なるクラスに分類される。この特殊な表面状態はバルク電子構造の非自明なトポロジーによって守られており、外部の擾乱に対して強い性質を持つ。また、そこでは質量ゼロのディラック電子が出現するとともにその電子スピンの向きが電子の運動量に対して固定されており、このスピン偏極を活かしたスピン流生成などこれまでにない新機能の創出が期待されている。その後、理論と実験による研究が進むにつれ、絶縁体に限らず半金属や超伝導体においても物質のもつトポロジカルな性質や表面状態が重要視されるようになってきている。特に、トポロジカル超伝導と呼ばれる状態においては、その表面状態にマヨラナフェルミオンと呼ばれる、いまだその存在が未検証な理論上の粒子が出現することが予言されている[2,3]。この粒子は自身の反粒子と同一であり、粒子を交換する際に非可換統計に従うという特殊な性質を持つことから、これを用いたトポロジカル

量子計算の実現への機運も高まっている。

トポロジカル超伝導を実現するための必要条件のひとつが、スピン偏極した（スピンレスな）電子対による超伝導形成である。このため、スピン軌道相互作用（ラシュバ効果）の強い半導体と超伝導を組み合わせる近接効果を利用するなどの手法が試みられている。一方、物質開発の面では、これまで主にトポロジカル絶縁体にキャリアをドーピングしたり強い圧力をかけたりすることによってトポロジカル表面状態を超伝導にするという戦略が取られてきた。例えば、Cuをインターカレートしたトポロジカル絶縁体Bi₂Se₃やInをドーピングしたトポロジカル結晶絶縁体SnTeなどでは、ポイントコンタクト分光によるゼロバイアスピークの存在が報告され、マヨラナ束縛状態との関連が議論されている[4,5]。また最近では、Cu_xBi₂Se₃系において2回対称な超伝導状態が観測され、トポロジカルなネマチック超伝導が実現している可能性から注目されている[6]。しかし、このようにして得られる超伝導体の種類や堅牢さには制約があり、より広範な超伝導物質群を対象とした探索や電子構造の解明、および設計指針が必要とされている。このような背景のもと、近年我々は強いスピン軌

道相互作用を持つ Pd-Bi 合金系 (α -PdBi, α -PdBi₂, β -PdBi₂ など) [7,8]の超伝導体に着目した研究を行っている。これらの物質では共通してスピン軌道相互作用の大きな Bi が主な伝導電子を供給すること、Pd の *d* 軌道 (偶) と Bi の *p* 軌道 (奇) のパリティに基づくバンド反転 (運動量空間におけるバンドのねじれ) が期待されることから、トポロジカルに非自明な電子構造が実現する可能性がある。本稿では、比較的シンプルで空間反転対称な結晶構造を持つ β -PdBi₂ で得られた結果[9]について紹介する。

2. 実験方法

我々の用いるスピン分解角度分解光電子分光は、エネルギー、運動量、および角運動量保存則に基づき、外部光電効果により物質中の電子の持つエネルギー、運動量とスピンの情報を直接的に得ることのできる手法である。トポロジカル物質の電子構造を理解するうえで重要となる、結晶の対称性とスピン軌道相互作用を反映したスピン・バンド構造の解明に強い威力を発揮する。十分なエネルギー分解能があれば、超伝導状態における微小な超伝導ギャップの大きさや角度依存性を直接的に確認することもできる。また電子を用いることに由来する原理的な表面敏感性 (検出深さ 0.1~10 nm) のため、トポロジカル表面状態の観測にも極めて有効である。

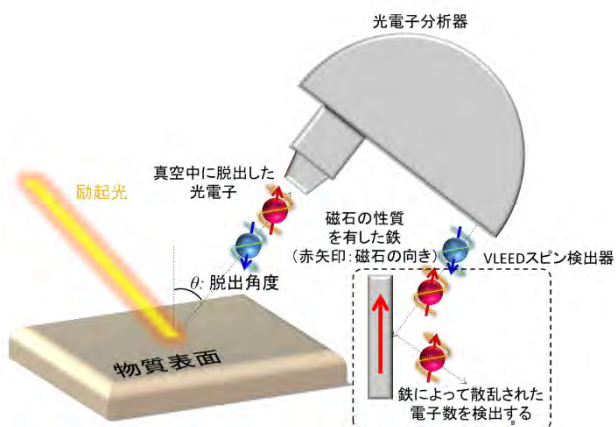


図 1 : スピン分解角度分解光電子分光

我々は、東京大学において、ヘリウム放電管光源 (21.2 eV, 40.8 eV) と紫外レーザー光源を同時に併用可能な独自の角度分解光電子分光 (ARPES) 装置を開発している。これまでにチタンサファイアレーザーの 4 倍波発生により 6.4 eV の紫外光が得られるようになり、0.7 meV を切る高エネルギー分解能および 100 μ m 以下のスポット径での測定が可能でとなっている[10]。また、より広いエネルギーと運動量領域を測定することが可能な汎用ヘリウム放電管光源についても、ガラス製キャピラリーを用いた集光機構により狭スポット化 (600 μ m 程度) を施した。このような多様な光源を相補的に用いることにより、全体的なバンド構造から超伝導ギャップなどの微細構造までを詳細に追うことが可能である。なお、スピン分解測定については、広島大学放射光科学センターの共同利用にて、放射光 (HiSOR) を用いて実験を行った[11]。

3. β -PdBi₂ のバルクと表面の電子構造

図 2a に示すとおり、 β -PdBi₂ は空間群 I4/mmm の空間反転対称な正方晶の層状物質であり、他の Pd-Bi 系超伝導体と比較して最もシンプルな結晶構造を持つ。また、PdBi₂ 層がファンデルワールス力により積層しているため、スコッチテープ等による劈開が容易であり、ARPES や走査型トンネル顕微鏡などの実験に適している。本研究では、比

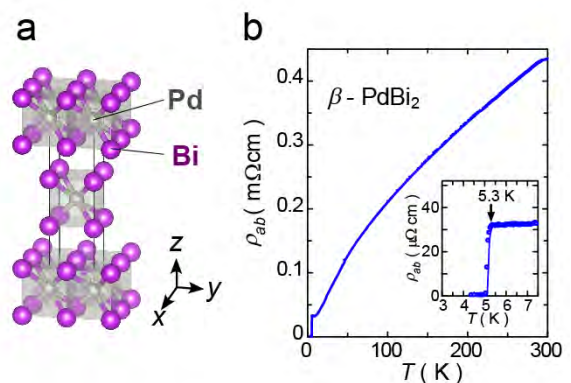


図 2 : β -PdBi₂ の結晶構造(a)と電気抵抗率の温度依存性(b)

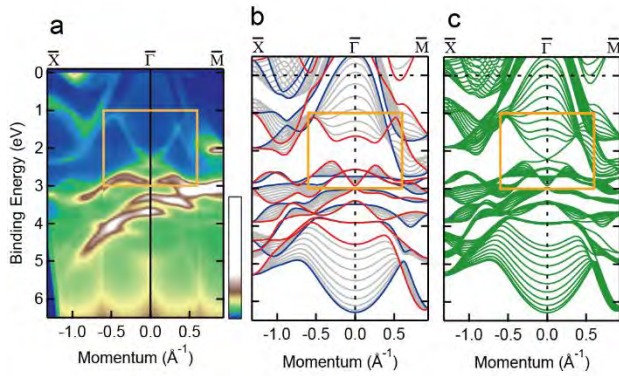


図 3 : (a) β -PdBi₂ の ARPES 像。(b)バルクのバンド計算。青 (赤) 色の曲線は $k_z=0$ (π/c) に、灰色の曲線はその間の k_z に対応。(c)表面のバンド計算。11 層 PdBi₂ のスラブ計算により得られたものである。

較的高い残留抵抗比 (RRR \sim 14) と 5.3 K における明瞭な超伝導転移 (図 2b) を示す良質な単結晶を用いることにより、ARPES によるバルクと表面の電子構造の解明を行った。

図 3 に ARPES (ヘリウム放電管光源、光子エネルギー 21.2 eV、測定温度 20 K) および計算により得られたバンド構造を示す。図 3a の実験結果を見ると、フェルミ準位近傍は大きなバンド幅を持つ Bi の p 軌道によるバンドが支配的である一方、結合エネルギー 3~4 eV において Pd の d 軌道に由来する平坦なバンドが存在する様子が分かる。この振る舞いは、図 3b のバルクの計算結果ともよく一致しており、この物質がおよそ第一原理計算によりよく再現できることを示している。しかし、実験で観測された結合エネルギー 2.5 eV 付近で交差するディラックコーン型のバンド構造 (図中オレンジ色の枠線内) はバルクの計算結果では現れず、表面状態を反映するスラブ計算結果 (図 3c) でのみ現れている。このディラックコーン型のバンドは、直上と直下のバルクバンドを繋ぐように分散していることから、トポロジカル絶縁体と類似した表面状態であることが示唆される。

これを確認するため、スピン分解 ARPES 実験を行い、ディラックバンドのスピン偏極を観測した。図 4a はディラックバンドの ARPES 像、b は

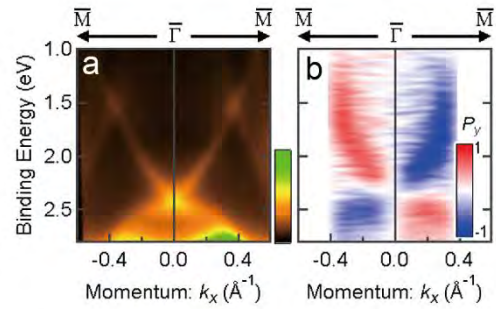


図 4 : 結合エネルギー 2.5 eV 付近において交差点をもつディラック表面バンド。(a)は ARPES イメージ、(b)はスピン分解 ARPES 測定により得られたスピン偏極のイメージ。

そのスピン分解像であり、運動量 k_x に対して垂直な y 方向を量子化軸と取ったスピン成分 (赤色がアップ、青色がダウン) を示す。これを見て明らかのように、正 (負) の分散を持つ方はダウン (アップ) のスピン偏極を持っている。このことから、このディラックバンドはトポロジカル絶縁体の表面状態と同様のヘリカルスピン分極を持つことが示唆される。

以上の実験結果で得られたスピン偏極表面状態が真にトポロジカルに非自明なものであることを確認するため、空間反転対称な 3 次元トポロジカル絶縁体で行われる Z_2 トポロジカル不変量 ν_0 の解析[12]を行った。具体的には、時間反転対称な運動量 Γ と Z における波動関数のパリティ固有値 (± 1) を第一原理計算から求め、注目するバンドの占有側状態について積を取った際に $(-1)^{\nu_0}$ として得られる (詳しくは[9]を参照)。その結果、上述の 2.5 eV 付近のディラックバンドが現れる領域 (図 5b 中ピンク色で示す) は、バンド #6 の直上であり、図 5c の表を見ると $\nu_0 = 1$ である。従って、このディラックバンドがトポロジカルに守られたものであることが明らかになった。また、図 5b,c を見ると、フェルミ準位を横切るバンド #8 の上方にも $\nu_0 = 1$ となる領域がある (青色で表示)。計算が正しく状況を再現していれば、この領域においてもトポロジカルに守られたスピン偏極表面状態が存在し、フェルミ面の一部を形成することが期

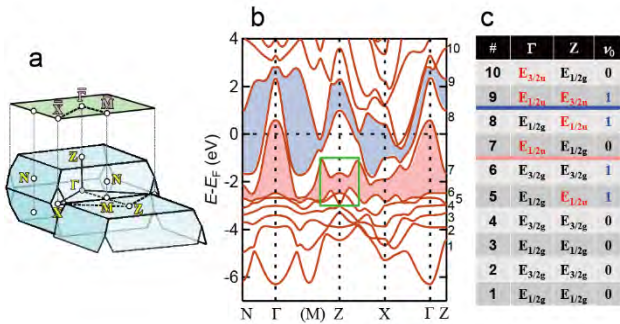


図 5 : (a) β -PdBi₂ の第一ブリュアンゾーン。緑色の平面は、(0 0 1)面に射影した 2 次元ブリュアンゾーン。(b) バルクのバンド計算。右側にはエネルギーの深い順にアサインしたバンドの番号を記載している。(c) バンド計算に基づきバンドごとに導出したトポロジカル不変量 ν_0 。

待される。このトポロジカル表面状態はフェルミ準位近傍で超伝導対形成に寄与するはずであり、マヨラナフェルミオン出現の舞台となりうる可能性がある。

これを探るため、より詳細にフェルミ準位近傍 (図 6) を見てみよう。図 6b にフェルミ準位近くの ARPES 像を示す。この像ではコントラストが弱く明瞭に分離して観測することが難しいが、図 6a に示すフェルミ準位上の運動量プロファイルにおいては鋭いピーク構造を持つ S1, S2 が確認できる。これらはスピン分解 ARPES によりスピン偏極を持つことが確認され (図 6d)、図 6b に緑色でプロットしたような分散を持つ表面状態であると考えられる。一方図 6c はスラブ計算で得られた表面バンド (緑線) をバルクバンドの射影成分 (灰色) に重ねて描いたものである。S1 に対応する表面状態はバルクバンド #7 と #8 の間に存在しており、図 5c でバンド #7 は $\nu_0 = 0$ であることから、トポロジカルに自明な状態であることが示唆される。実際に図 6b でも S1 の両端はいずれもバルクバンド #8 に接続しており、トポロジカルに守られていない様子が分かる。一方 S2 に対応する表面状態はバルクバンド #9 の下方に張り付くような形でフェルミ準位を横切っている。計算結果を見ると、これは実際に非占有側でバルクバンド #8

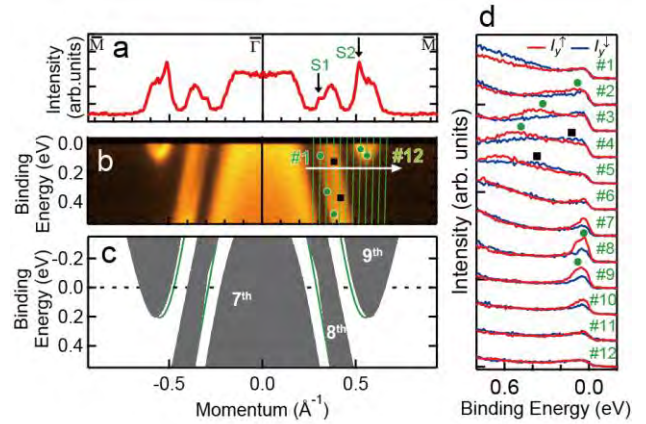


図 6 : (a) フェルミ準位における ARPES 強度の運動量プロファイル。(b) ARPES 像。(c) スラブ計算により得られた表面状態 (緑色) とバルク状態の射影成分 (灰色)。(d) スピン分解 ARPES により得られた結果。(b) の #1~#12 の運動量におけるエネルギースペクトルをスピニアップ (赤) とスピンドアウン (青) ごとに示している。

へと繋がっており [9]、トポロジカルに守られた表面状態となっている。以上の結果から、実際に β -PdBi₂ においてフェルミ面を作るトポロジカル表面状態 (S2) が存在することが明らかになった。上述のディラックバンドや S2 が作られるバンド反転のメカニズムについては、文献 [9] を参照されたい。

4. まとめ

本研究では、スピン分解・角度分解光電子分光と第一原理計算を組み合わせることにより、 β -PdBi₂ がトポロジカルに守られたスピン偏極表面状態をもつ超伝導物質であることを明らかにした。超伝導転移温度 (5.3 K) 以下で網羅的な測定を行うことはまだできていないが、現在実験室の ARPES 装置の冷却性能改善に着手しており、超伝導状態の詳細な観測も可能となることが期待される。なお、走査型トンネル分光による超伝導状態の測定は行われており、現段階ではいわゆる従来型の *s* 波超伝導を示唆する結果 [13] と何らかのゼロエネルギー束縛状態の存在を示唆する結果 [14] が混在している。このような系におけるトポロジ

カル超伝導状態は試料の純良さやトポロジカル表面状態とバルクの混成などにより強い影響を受けるという指摘もあり、現在は α -PdBi、 α -PdBi₂ など他の物質を含め包括的な研究を行っているところである。一方、最近では鉄系超伝導体 Fe(Te,Se) でも同様のトポロジカル表面状態[15]が観測され、トポロジカル超伝導物質の候補として急に注目を集め始めている。いまだ進展著しい実験計測、理論計算、および物質合成手法をもとに、多様なトポロジカル超伝導物質の開拓とマヨラナフェルミオン探索が今後一層進むことが期待される。

なお、本研究成果は日々低温センターから供給される寒剤を使用して得られたものであり、この場をお借りして深く御礼申し上げます。

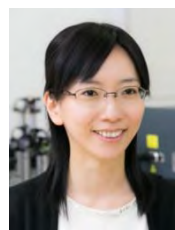
045302 (2007).

[13] K. Iwaya *et al.*, Nat. Commun. 8, 976 (2017).

[14] Y. F. Lv *et al.*, Sci. Bull. 62, 852 (2017).

[15] P. Zhang *et al.*, Science 360, 182 (2018).

著者紹介



石坂 香子

物性物理実験

参考文献

[1] M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. 82, 3045 (2010).

[2] Y. Tanaka, M. Sato, and N. Nagaosa, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 011013 (2012).

[3] J. Alicea, Rep. Prog. Phys. 75, 075602 (2012).

[4] M. Kriener *et al.*, Phys. Rev. Lett. 106, 127004 (2011).

[5] S. Sasaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. 109, 217004 (2012).

[6] S. Yonezawa *et al.*, Nat. Phys. 13, 123 (2017).

[7] R. Xu, R. A. de Groot, and W. van der Lugt, J. Phys. Condensed Matter 4, 2389 (1992).

[8] Y. Imai *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 81, 113708 (2012).

[9] M. Sakano *et al.*, Nat. Commun. 6, 8595 (2015).

[10] M. Sakano *et al.*, Phys. Rev. B 95, 121101(R) (2017).

[11] T. Okuda *et al.*, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 201, 20 (2015).

[12] L. Fu and C. L. Kane, Phys. Rev. B 76,

グラフェンのスピン偏極ジグザグ端状態

理学系研究科 物理学専攻 福山研究室

松井 朋裕、福山 寛

グラフェンは基礎物理の観点からも、工業的なデバイス応用の観点からも注目を集める物質である。そのグラフェンにおいて特筆すべき特質のひとつに、スピン偏極ジグザグ端状態がある。これはジグザグ型の端に挟まれたリボン状のグラフェンでは、電子が端に局在し、さらに端内では強磁性的に、端間では反強磁性的にスピン偏極するという理論予測である。この可能性は古くから議論されてきたものの、原子スケールで理想的なジグザグ端の作成が困難なため、実験的に明瞭に示した例はまだない。近年、我々はグラファイトを高温下で水素プラズマ処理することで、理想的なジグザグ端を数多く作成できることを見出した。本稿ではこの手法を用いて作成したジグザグ・グラフェン・ナノリボンの走査トンネル分光測定について紹介する。ごく局所的な状態密度の測定から、ジグザグ端におけるスピン偏極状態を示すことに成功した。

1. はじめに

2010年のノーベル物理学賞は「二次元物質グラフェンに関する革新的実験」に贈られた。グラフェンとは炭素原子がハニカム構造と呼ばれる蜂の巣状に共有結合した2次元シート、すなわち原子一個分の厚みのシートである[1]。これは理論的には1940年代から研究されてきたが、2004年になってはじめて安定して作成できるようになった“古くて新しい”物質である。ちなみに、このグラフェンが積層したものがグラファイト(黒鉛)、筒状に丸められたものがカーボンナノチューブである。炭素原子がサッカーボール状に結合したフラーレン、3次元的に共有結合したダイヤモンドと並んで、これらは炭素原子のみからなる同素体である。グラフェンは機械的に丈夫かつ柔軟であることに加えて、伝導を担う電子やホールの運動が質量ゼロの相対論的粒子であるワイル・ニュートリノと同じワイル方程式で記述でき、半整数の量子ホール効果など、これまで一般的に議論されてきたものとは異なる電子物性を示すため注目を集めているが、こうした特殊な電子物性は、グラフェンが向きの異なるふたつの三角格子、すなわちA

副格子(図1青丸)とB副格子(図1赤丸)から構成され、それらを同等に扱うことができるというカイラル対称性に由来する。

これまでにグラフェンのバルク状態については重点的に研究されてきたが、試料をナノメートルサイズに小さくするに従って重要になる端や欠陥についての研究は必ずしも十分とは言えない。そこで本研究ではグラフェンの端状態に注目する。グラフェンにはそのハニカム構造を反映してジグザグ型(図1(a))とアームチェア型(図1(b))という2種類の端構造が存在するが、このとき興味深いことにアームチェア端ではA、B副格子の数がそろっているのに対して、ジグザグ端ではどちらか一方の副格子のみが露出し、そのカイラル対称性が破れている。そのためジグザグ端では電荷中性点であるフェルミ・エネルギー(E_F)に特徴的な平坦バンドが現れる(図2(a)点線)。実空間ではこれは端の炭素原子に局在した電子状態に対応し、ジグザグ端状態という。走査トンネル顕微鏡(STM)を用いた局所的な状態密度(Local Density Of States; LDOS)測定では、端に局在したLDOSのピーク構造が期待される(図2(b))。これまでに

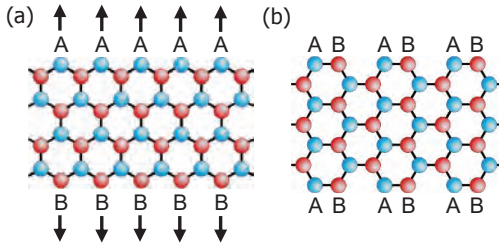


図1. グラフェンの (a) ジグザグ端と (b) アームチェア端。青 (赤) 丸で示す炭素原子が A(B) 副格子を成している。z-GNR では矢印のようにスピン偏極すると考えられている。

我々は、グラファイト上に自然に存在するジグザグ端やアームチェア端近傍での測定の結果、ジグザグ方向を向いた端では、端からの距離と共に減衰する LDOS のピークが E_F 近傍に現れるのに対して、アームチェア端ではそうしたピークが現れないことを観測した [2, 3]。

一方、A、B 副格子の数に差がある場合には磁性が発現することが期待される (Lieb の定理)。特にふたつのジグザグ端で挟まれたごく細いリボン状のグラフェン (ジグザグ・グラフェン・ナノリボン; z-GNR) では電子間相互作用の結果、図 1(a) に矢印で示すようにジグザグ端内では強磁性的に、ジグザグ端間では反強磁性的にスピン偏極すると考えられている。これはジグザグ端状態の平坦バンドが E_F に存在するため、ごく微小な電子間相互作用によっても強磁性が発現するという、いわゆる平坦バンド強磁性としても理解できる (ストーナーの定理)。こうした z-GNR におけるスピン偏極状態はスピントロニクスへの応用が期待されるだけでなく、非磁性原子である炭素のみからなる物質に磁性が現れるという観点からも非常に興味深い。

図 2(a) は z-GNR について計算されたエネルギーバンドと、そこから計算される LDOS を模式的に示したものである [4]。電子間相互作用を考慮せずスピン偏極していない場合 (点線)、これは孤立したジグザグ端の場合と等しく、 E_F 付近にはほ

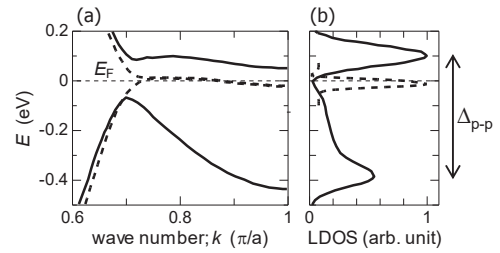


図2. 幅 4.3 nm の z-GNR について計算された (a) エネルギーバンドと (b) 端原子上の LDOS [4]。実線は電子間相互作用を考慮してスピン偏極している場合、点線はスピン偏極していない場合。

ぼ平坦なバンドが現れる。しかし電子間相互作用を考慮しこれがスピン偏極すると、平坦バンドは実線のようにふたつに分裂する。ただし、伝導帯側のバンドはほぼ平坦であるのに対して、価電子帯側のバンドは大きな曲率をもつため、ジグザグ端上の LDOS は図 2(b) に示すような鋭いピークと低エネルギー側に裾をひいた鈍ったピークをもつ。ここではピークの間隔を Δ_{p-p} と呼ぶこととする。一方、ナノリボンを横切る方向の LDOS の空間分布を考えてみる。バンドの曲率を考慮すると、鈍ったピークはリボン内ですぐに減衰するのに対して、鋭いピークのエネルギーはあまり変化せず減衰も鈍ったピークより長いと考えられる。

これまでにも、いくつかの研究グループがこのスピン偏極状態の観測を試みてきた [5, 6, 7, 8, 9, 10]。しかし結果は研究グループによって異なり、理論予測との整合性も乏しく、統一的な理解には至っていない。これは、理論的考察と対応させられるような理想的なジグザグ端の作成が容易でないためである。理想的には端は原子スケールで整っていることに加えて、ハニカム格子の sp^2 結合を維持するために、ひとつの水素原子で終端されている必要がある。また、実験の再現性を確認するために、そうした端を多数用意することが望まれる。

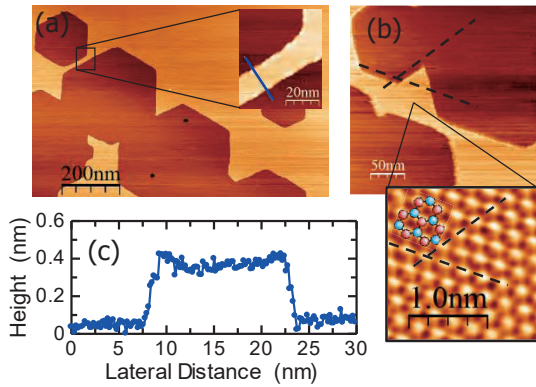


図 3. (a)(b) 水素プラズマ処理したグラファイト表面の STM 像とテラス上の原子画像。ナノピット端は原子列と平行であることからジグザグ方向を向いていることが分かる。(c) (a) 挿入図中の青線に沿った高さプロファイル。六角形ナノピットは単原子層深さ (0.335 nm) と同程度であることが分かる。測定は (a) 室温、(b) $T = 77$ K。

2. 水素プラズマエッチングによるジグザグ端の作成

こうした問題を克服する手段として、我々はグラファイトやグラフェンの水素プラズマによるエッチングを行っている。この方法によって、図 3(a) のようにグラファイトやグラフェン上に多数の六角形のナノピットを作成することができる。ナノピットの向きがグラファイトの原子列の向きと平行であることから (図 3(b))、ナノピットの端はジグザグ方向を向いていることが分かる。また図 3(a) 挿入図中の青線に沿った高さプロファイルを図 3(c) に示すように、ナノピットの深さはグラファイトの層間距離 (0.335 nm) と同程度であり、これらのナノピットが単原子層深さであることも分かる。従って、ふたつのナノピットに挟まれた領域に、z-GNR をグラファイト表面上に得ることができる。例えば、図 3(a) 挿入図の領域には、幅 15 nm、長さ 90 nm の z-GNR が得られている。

ここでグラファイト表面の STM 像では、六角形のハニカム格子ではなくて三角格子が観測される。これはグラファイトが一層ずつずれたベルナ

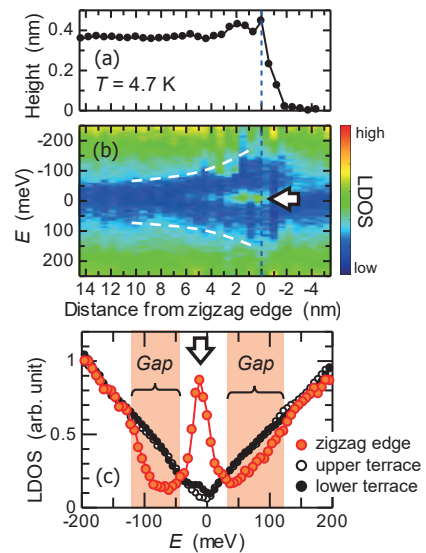


図 4. 六角形ナノピットの端を横切って測定した (a) 高さプロファイルと (b) LDOS のカラーマップ。(c) 端直上 (赤丸) と端から十分離れた場所 (黒丸) で測定した LDOS。矢印で示すように、端近傍のおよそ 2 nm に局在して LDOS のピークが E_F ($E = 0$) 近傍にあることが分かる。ピークの周りは LDOS が落ち込み、カラーマップには点線で示すようなファン状のパターンができる。測定は $T = 4.7$ K。

ル型の積層をしているからである。このとき A 副格子は下層グラフェンの炭素原子直上に位置するのに対して、B 副格子は六角形の真ん中に位置する (図 5(b))。そのため B 副格子は A 副格子よりも電子密度が大きく、STM では B 副格子の三角格子が観測される。一般にグラファイト端の原子構造を STM で直接観測することは難しいが、このことを利用すると、ナノピットの端が STM 像の原子列と平行あるいは 30° の角をなしているとき、それはジグザグ方向を向いているといえる。

図 4(b) は六角形ナノピットの端を横切って測定した LDOS の空間分布である。同時に測定した高さプロファイル (図 4(a)) と比較すると明らかなように、端近傍のおよそ 2 nm に局在して E_F ($E = 0$) 近傍に LDOS のピークが現れていることが分かる。これがジグザグ端状態を示している。さらに端における LDOS と端から十分に離れた場所で

の LDOS とを比較してみると (図 4(c))、ピークと共に、その両横のエネルギーでは LDOS が落ち込み、ギャップ的な構造があることも分かる。このギャップ構造のエネルギー幅は端に近づくほどに大きくなるため、カラーマップではその落ち込みに対応して図 4(b) に点線で示すようなファン状のパターンが見られる [11]。

点欠陥に対する理論計算によると、こうしたギャップ構造は点欠陥が一方の副格子にのみ存在し、副格子の数に大きなアンバランスがある場合に現れる [12, 13]。ジグザグ端は一方の副格子のみからなるので、副格子の数には大きなアンバランスがある。今回の測定で得られているギャップ構造はそのアンバランスによるものと考えられる。言い換えるとこれは、本研究で用いるジグザグ端が原子スケールで整っていることを示唆している。最後に、この試料作成は水素プラズマとの反応で作成されたものであるため、端は水素原子で終端されている可能性が高い。この場合、ひとつの水素原子で終端された構造がエネルギー的に安定であるという理論計算もある [14]。このように、水素プラズマを用いたジグザグ端作成によって、理論計算と比較できる理想に近いジグザグ端が得られていると期待される。そうした端を沢山作成できることも、この手法の大きなメリットである。

3. z-GNR の LDOS 測定

図 5 のようにふたつの六角形ナノピットが少し位置をずらして存在している場所に注目する。図 5(a) の矢印に沿うジグザグ端では、 X が小さい領域ではジグザグ端は孤立しているが、 X が大きくなるに従って $X > 4 \text{ nm}$ では z-GNR が実現している。この矢印に沿って測定した LDOS の空間変化を図 6 に示す。このとき孤立ジグザグ端 ($X < 4 \text{ nm}$) では、LDOS は図 4 と同様のシングルピークを示している。しかし z-GNR に近づくに従ってこのピークは減衰し、z-GNR ではダブルピークが現れる様子が観測された。これは図 2 に

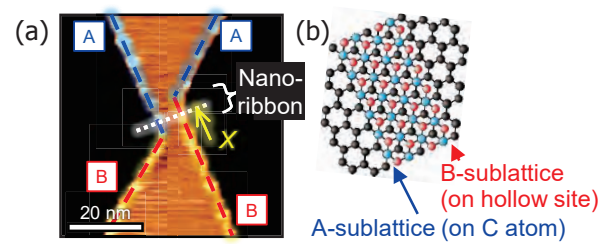


図 5. (a) ふたつの六角形ナノピットが近接してある領域の STM 像 ($T = 4.7 \text{ K}$)。黒い領域がナノピットの内側。原子像より端の副格子は青 (赤) 点線では A(B) 副格子と同定できる。(b) ナノリボン上の原子配列を模式的に示したもの。(a) 中の矢印、点線に沿った測定を、それぞれ図 6、図 7 に示す。

示したようなスピン偏極によってバンドが分裂する様子とよく似ている。

次に図 5(a) 点線のようにナノリボンを横切る LDOS の空間変化を図 7 に示す。図 6 で観測されたダブルピーク構造は z-GNR の両端で観測され、それぞれの端近傍の $\sim 2 \text{ nm}$ に強く局在していることが分かる。このことから、このダブルピークはジグザグ端に起源をもつ状態と考えられる。これから A、B 副格子端における LDOS を抜き出したものが図 7(c) である。理論的に期待される通り、ダブルピーク構造は鋭いピークと鈍ったピークから成る非対称な形をしている。鈍ったピークは z-GNR 内ですぐに減衰してなくなるのに対して、鋭いピークはナノリボン中央でも残っており (図 7(d))、鋭いピークは鈍ったピークよりも減衰長が長いことが分かる。これもまた、鋭いピークの起源となるバンドの分散が小さいという理論的考察と一致する。ただし、理論計算では鋭いピークの方が鈍ったピークよりも高エネルギー側に現れるのに対して、ここでは両者の関係が逆転している。

一方、ピークのエネルギーに注目すると、鋭いピークはふたつの端で同じであるのに対して、鈍ったピークは両者で異なり、A 副格子側の方がエネ

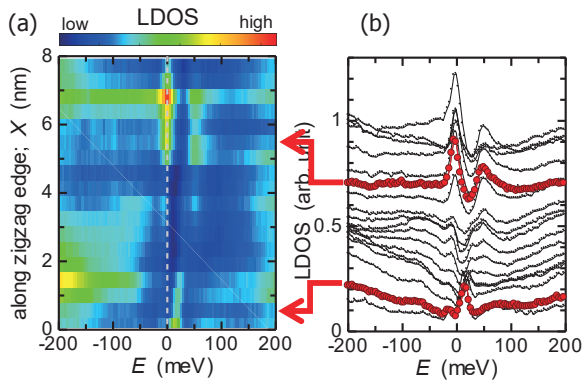


図 6. 図 5(a) 中の矢印に沿って測定した LDOS のカラーマップ (a) と、各 LDOS を縦に並べたもの (b) ($T = 4.7$ K)。ジグザグ端は X が小さいところでは孤立しているが、 X が大きいところでは z -GNR の端として振る舞う。(b) 中の赤丸の測定場所を赤矢印で示す。

ルギーが小さくなっている。そのためピーク間隔 Δ_{p-p} は A 副格子端の方が小さい。これは z -GNR が別のグラフェンの上にベルナル積層し、ふたつの副格子で層間相互作用が異なるためと考えられる。直下に下層グラフェンの炭素原子が存在する A 副格子と比べて、B 副格子は擬似的に宙に浮いているため下層からの相関が弱く、 Δ_{p-p} は A 副格子端より大きくなると考えられる。 Δ_{p-p} の大きさは、理論予測の数 100 meV オーダーに対して、ここでは 50 meV 程度と小さくなっている。これは理論計算が基板を考慮していないためで、これもまた下層にあるグラフェンの効果と考えられる。

図 8(a) に Δ_{p-p} のナノリボン幅 (W) 依存性を示す。 W が大きいほど Δ_{p-p} が小さくなっており、ジグザグ端間の相関が弱まるほどスピン偏極状態が不安定になるという理論的な考察と矛盾しない。このように本測定によって、 z -GNR におけるスピン偏極とその実験的観測を強く示唆する結果を得ることができた。

最後に、このダブルピーク構造とは別に、ナノリボン内では LDOS が落ち込んでいる様子も観測されている。図 7(d) に z -GNR の中央とナノリボ

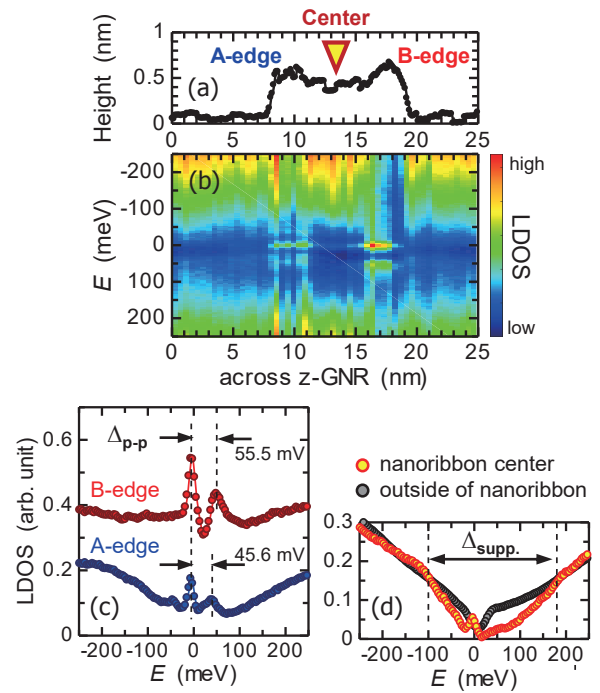


図 7. 幅 9.9 nm の z -GNR を横切るように図 5(a) 中の点線に沿って測定した (a) 高さプロファイルと (b) LDOS のカラーマップ。左 (右) のジグザグ端では A (B) 副格子が露出している。(c) それぞれの端における LDOS。(d) z -GNR の中央 ((a) 赤三角の位置) (赤丸) とナノリボンの外側 (黒丸) の LDOS。 z -GNR 中央の LDOS の $E \sim 0$ にみられるピークはジグザグ端状態の鋭いピークの名残りである。測定は $T = 4.7$ K。

ンの外側の LDOS を比較するように、 z -GNR の中央では、端状態のピークの名残とは別に、 $-100 < E < 180$ meV で LDOS がナノリボンの外側のそれよりも落ち込んでいることが分かる。このエネルギー領域を $\Delta_{\text{supp.}}$ と定義すると、この $\Delta_{\text{supp.}}$ は Δ_{p-p} よりも数倍大きく、ほぼ $1/W$ の依存性をもつことが分かった (図 8(b))。この LDOS の落ち込みについて詳細な議論はここでは省くが、ナノリボン内への量子閉じ込め効果によるエネルギーギャップ、ジグザグ端における副格子の数のアンバランスに起因したギャップ、あるいはその両方が原因として考えられる。

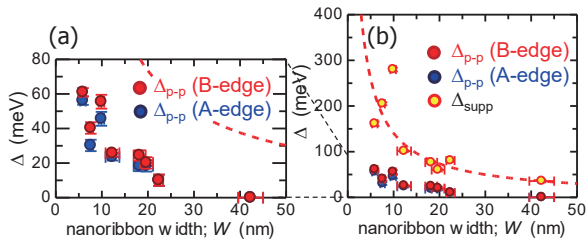


図 8. A(B) 副格子端における Δ_{p-p} (青 (赤) 丸) と Δ_{supp} のナノリボン幅 (W) 依存性。(a) は (b) の拡大図である。赤点線は Δ_{supp} の W 依存性をフィットしたもの ($\Delta_{\text{supp}} = 1540/(W + 0.8)$)。

4. まとめ

水素プラズマを用いた表面エッチングにより我々は理論研究と対応できる理想的なジグザグ端を作成できるようになった。この技術を用いてグラファイト上に z-GNR を作成し、その LDOS を STM により調べた結果、その端ではジグザグ端状態に対応する LDOS のシングルピークが鋭いピークと鈍ったピークに分裂する様子が観測された。これは z-GNR のジグザグ端でスピン偏極状態が実現していることを示唆しており、ピークの間隔 Δ_{p-p} はスピンギャップに対応していると考えられる。

今後は、外部磁場によって端間の反強磁性状態を強磁性的にそろえることで、これがスピン偏極状態であることを実証していく必要がある。また別の基板を用いた試料でのスピン偏極 LDOS の再現性の確認も必要であろう。

本研究は佐藤秀樹君、喜田和馬君、Andre E. B. Amend 君との共同研究の成果です。この場を借りて感謝申し上げます。また最後になりましたが、液体ヘリウムの安定供給にご尽力いただいている低温センターの皆さまにも、心より感謝申し上げます。

参考文献

[1] K. S. Novoselov, *et al.*, *Science* **306**, 666 (2004).

[2] Y. Niimi, *et al.*, *Phys. Rev. B* **73**, 085421 (2006).
 [3] Y. Niimi, *et al.*, *Appl. Surf. Sci.* **241**, 43 (2005).
 [4] J. Jiand, W. Lu, J. Bernholc, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 246803 (2008).
 [5] C. Tao, *et al.*, *Nat. Phys.* **7**, 616 (2011).
 [6] M. Pan, *et al.*, *Nano Lett.* **12**, 1928 (2012).
 [7] M. Ziatdinov, *et al.*, *Phys. Rev. B* **87**, 115427 (2013).
 [8] Y. Y. Li, M. X. Chen, M. Weinert, L. Li, *Nat. Commun.* **5**, 4311 (2014).
 [9] G. Z. Magda, *et al.*, *Nature* **514**, 608 (2014).
 [10] S. Wang, *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 11507 (2016).
 [11] A. E. B. Amend, T. Matsui, H. Sato, H. Fukuyama, *e-JSSNT* **16**, 72 (2018).
 [12] A. Cresti, F. Ortmann, T. Louvet, D. V. Tuan, S. Roche, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 196601 (2013).
 [13] V. M. Pereira, J. M. B. Lopes dos Santos, A. H. Castro Neto, *Phys. Rev. B* **77**, 115109 (2008).
 [14] X. Zhang, *et al.*, *ACS Nano* **7**, 198 (2013).

著者紹介



松井 朋裕
 表面量子物性
 助教 (東京大学大学院理学系研究科)



福山 寛
 低温物理
 教授 (東京大学大学院理学系研究科、低温センター兼務)

NMR 法による膜蛋白質の機能に直結した動的構造平衡の解明

薬学系研究科 薬科学専攻 生命物理化学教室

上田 卓見、幸福 裕、嶋田 一夫

膜蛋白質は、多くの重要な生命現象を司っており、現在市販されている医薬品の 60%以上は膜蛋白質を標的とする。我々は、膜蛋白質の NMR 解析を目指して、真核生物の膜蛋白質の発現に広く用いられる昆虫細胞発現系において、重水素化とアミノ酸選択標識を両方施した蛋白質を調製する手法を開発した。この手法により、微量かつ高分子量の創薬標的膜蛋白質の NMR 解析が可能となった。さらに、開発した手法を応用して、代表的な G 蛋白質共役型受容体である β_2 アドレナリン受容体や μ オピオイド受容体が、複数の活性型構造と不活性型構造の動的構造平衡状態にあり、各活性型の割合がシグナル伝達活性を決定していることを明らかにした。また、このような機能と直結した構造平衡が、再構成高密度リポ蛋白質の脂質二重膜中と界面活性剤ミセル中では異なることが明らかとなった。

1. 膜蛋白質の動的構造平衡

膜蛋白質は、多くの重要な生命現象を司っており、現在市販されている医薬品の 60%以上は膜蛋白質を標的とする。膜蛋白質の立体構造は、機能メカニズムの解明に大きく貢献している。近年、X 線結晶構造解析や極低温電子顕微鏡により様々な膜蛋白質の精緻な立体構造が解かれており、膜蛋白質の立体構造のデータベース (membrane proteins of known 3D structure, <http://blanco.biomol.uci.edu/mpstruc>)には、2018 年8月の時点で817種類の膜蛋白質の立体構造が2,619個登録されている。しかし、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、膜蛋白質が機能している生理的な脂質二重膜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、膜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 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) は、溶液中における蛋白質の動的構造平衡を解析できる唯一の手法である。多様な NMR 試料調製法および NMR 解析法を駆使することにより、様々な測定試料に対して、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、といった動的構造平衡の情報を取得することが可能である。

我々は、生理的な *in situ* の条件における膜蛋白質の動的構造平衡を、高い空間分解能および時間分解能で解明すること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]。本稿では、脂質二重膜環境下における膜蛋白質の動的構造解析を可能とする NMR 試料調製法を開発して、G 蛋白質共役型受容体 (GPCR) における、シグナル伝達活性に直結した動的構造を明らかにした研究を紹介する。

2. μ オピオイド受容体のシグナル選択性を決定する機構の解明

GPCR は、7 回膜貫通型の構造を持つ、真核生物における最大の膜蛋白質ファミリーである。GPCR は、シナプスの神経伝達物質や血中のホルモン、および体外の光や感覚刺激物質の受容体であり、多くの重要な生理機能を制御する。GPCR は、G 蛋白質を介した細胞内シグナルと、GPCR が GPCR キナーゼ (GRK) によりリン酸化された上

でアレスチンを介した細胞内シグナルを、両方活性化する (図 1A)。G 蛋白質シグナルとアレスチンシグナルの一方をより強く活性化するリガンドが存在することが知られており、バイアスリガンドと呼ばれている。バイアスリガンドは、望ましい薬効を持つ薬物を開発する上で重要であると考えられている。例えば、GPCR である μ オピオイド受容体 (μ OR) に作用する、モルヒネ等の鎮痛薬の中でも、TRV130 は G 蛋白質シグナルをより強く活性化すること、およびモルヒネと比べて副作用を誘起しにくいことが知られている。

最近、GPCR であるロドプシンとアレスチンの複合体の結晶構造が解かれた。しかし、複合体中のロドプシンの構造は、G 蛋白質模倣ペプチド複合体が結合した状態の構造とほぼ同一であった。したがって、結晶構造のスナップショットでは、シグナル選択性を説明することができなかった。そこで我々は、標準的な作動薬が結合した状態および G 蛋白質シグナルとアレスチンシグナルの一方を選択的に活性化する状態における、 μ OR の膜貫通領域の動的構造を解析した [2]。

μ OR の NMR 解析を行う上では、昆虫細胞における μ OR の発現量が少ないため、NMR サンプルの濃度が低い (5–10 μ M) ことがボトルネックであった。そこで本研究では、昆虫細胞発現系において、重水素化とメチオニン選択標識を両方施す手法を新規に開発して [2, 3]、 μ OR の NMR シグナルの感度を 3 倍以上向上することに成功した (図 1B)。さらに、活性化に伴う細胞内側の構造変化の引き金となる P/I/F モチーフを構成する P246 に隣接する残基であり、活性化と対応して構造変化する M245、および構造上 3, 5, 6, 7 番目の膜貫通ヘリックスの構造変化を反映すると考えられる M163, M257, M283 の NMR シグナルを、標準的なリガンドおよび G 蛋白質バイアスリガンドが結合した状態、およびアレスチン選択性が向上する N152A 変異を導入した状態で取得した (図 1C–D, 2A)。その結果、 μ OR が、不活性化状態に加えて、

G 蛋白質の活性化に有利な構造とアレスチンの活性化に有利な構造を含む複数の開状態の間を交換する平衡状態にあり、G 蛋白質バイアスリガンド結合状態およびアレスチンバイアス変異体では、前者および後者に平衡がシフトしていることが明らかとなった (図 2B–C)。

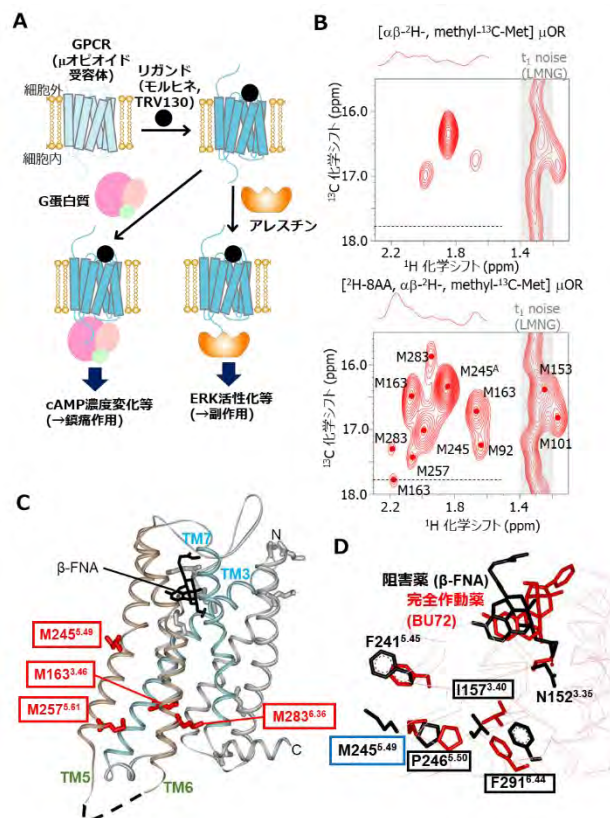


図 1 μ OR の NMR 解析。A. GPCR (μ OR) による G 蛋白質シグナルおよびアレスチンシグナルの活性化の模式図。B. メチオニン選択標識のみを行った μ OR (上) および重水素化とメチオニン選択標識を両方行った μ OR (下) の NMR スペクトル。C. μ OR のメチオニン残基の分布 (PDB entry: 4DKL)。D. M245 と P-I-F trigger motif の構造。阻害薬が結合した状態の結晶構造と、完全作動薬の BU72 と G 蛋白質模倣ナノボディが結合した状態の結晶構造を、それぞれ黒と赤で表示して重ねあわせた。

また、上記の構造平衡は、3, 5, 6, 7 番目の膜貫通ヘリックスにわたる、広範囲の構造変化に対応することが示された。この結果は、 μ OR リガンドにおいて、改変を加えるとシグナル選択性が変化

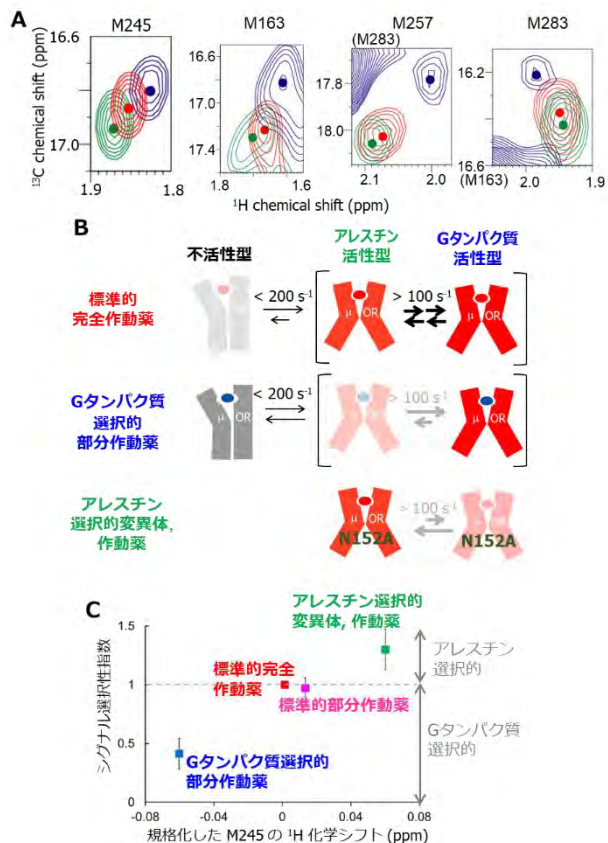


図2 μ ORの動的構造平衡。A. 標準的完全作動薬結合状態(赤)、G蛋白質選択的部分作動薬(TRV130)結合状態(青)、およびアレスチン選択的変異体の完全作動薬結合状態(緑)における、M245, M163, M259, M283のNMRシグナル。B. μ ORのシグナル選択性を決定するメカニズム。標準的な完全作動薬が結合した状態では、 μ ORはG蛋白質シグナルを活性化しやすい状態とアレスチンシグナルを活性化しやすい状態の複数の活性型の平衡状態にある。G蛋白質選択的作動薬が結合した状態およびアレスチン選択的変異が導入された状態では、それぞれ前者と後者に平衡が偏る。C. 各状態における、M245の ^1H 化学シフトと、G蛋白質シグナル活性化能とアレスチンシグナル活性化能の比(シグナル選択性指数)のプロット。

しうる部位が多数存在するという、リガンド設計の指針を提示していると言える。この指針は、TRV130の誘導体において、分子両端に存在する芳香環のどちらを改変してもシグナル選択性が変化するという報告と対応している。したがって、今後、 μ ORおよびその他のGPCRの動的構造平衡に基づいて、バイアスリガンドを合理的に設計することが可能となることが期待される。

他のGPCRのリガンドにおいても、化学構造上離れた部位のどちらを改変してもシグナル選択性が同様に変化することが報告されていることから、他のGPCRのシグナル選択性も、広範囲の構造変化を伴う平衡により達成されていると考えた。

3. 生理的な脂質二重膜環境における、 β_2 アドレナリン受容体の動的構造平衡

上記のGPCRのNMR解析は、いずれも界面活性剤ミセル中で行ってきた。一方、生体内では、GPCRをはじめとする膜蛋白質は、脂質二重膜環境に置かれている。再構成高密度リポ蛋白質(reconstituted high density lipoprotein, rHDL, 別名ナノディスク)は、両親媒性ヘリックス構造を取る membrane scaffold proteinが脂質二重膜構造を取り囲んだ、直径約10 nmのディスク状の粒子であり、中に膜蛋白質を再構成することが可能である(図3A)。rHDLは単分散かつ可溶性であるため、NMR解析に適している。我々は、GPCRであるケモカイン受容体の野生型を、rHDLの脂質二重膜に再構成して、活性を保持した試料調製法の開発に成功した[4, 5]。また、カリウムチャンネルKcsAの開構造と閉構造の割合が、ミセル中とrHDLの脂質二重膜中では異なることを明らかにした[6]。このことは、膜蛋白質の構造平衡および機能が、脂質二重膜環境の影響を受けることを示唆している。そこで我々は、rHDLの脂質二重膜中における、代表的なGPCRである β_2 アドレナリン受容体($\beta_2\text{AR}$)の動的構造平衡の解析を行った[3]。

rHDL 中の GPCR は、分子量約 20 万相当の巨大分子であるが、上述の手法により重水素化とメチオニン選択標識を両方施した β_2AR -rHDL の NMR スペクトルでは、観測可能な全てのメチオニン残基に由来するシグナルが観測された。以前、ミセル中の β_2AR において、活性の異なる様々なリガンドが結合した状態における NMR スペクトルを測定した結果、P/I/F モチーフと連動して構造変化する M82 のシグナルにおいて、各リガンドの薬効度に対応した、連続的な化学シフト変化が観測されていた [7]。この結果から、 β_2AR が活性型と不活性型の構造平衡にあることが示されていた [7]。今回、 β_2AR -rHDL の NMR スペクトルを各リガンド結合状態において測定した結果、M82 のシグナルは、ミセルの時と同様、各リガンドの薬効度に対応した、連続的な化学シフト変化を示した (図 3B)。したがって、rHDL 中においても、 β_2AR が活性型と不活性型の構造平衡にあることが示された。一方、ミセル中の β_2AR のスペクトルと比べると、部分作動薬結合状態の化学シフトが、より完全作動薬結合状態に近い値となっていた (図 3B)。このことは、rHDL 中では、活性型の割合がやや多いことを示している。また、ミセル状態と比べると、部分作動薬結合状態のシグナルが顕著に広幅化しており、特に弱い部分作動薬結合状態では、シグナルが二つ観測された (図 3B)。この現象は、活性型と不活性型を交換する速度がミセルの時よりも小さいことを示している (図 3C)。

次に、NMR シグナルから算出されたミセル中および rHDL 中における活性型 β_2AR の割合を使って G 蛋白質活性化能を計算して、 β_2AR 発現細胞における G 蛋白質活性化能の実験値と比較した。その結果、rHDL 中の方が、DDM 中より良く細胞における実験値と対応した (図 3D)。したがって、脂質二重膜環境が、 β_2AR の活性に重要な影響を与えることが示された。

さらに、NMR シグナルを用いて推定した rHDL

の脂質二重膜中の構造平衡の交換速度(図 3C) と、G 蛋白質シグナルにおける各過程の速度定数の文献値を用いて、下流のシグナルが活性化する速度を計算した。その結果、 β_2AR の活性化は 1 ミリ秒程度で、G 蛋白質の活性化は 100 ミリ秒程度で、細胞内 cAMP 濃度の変化は 1 秒程度で起こるという結果となった(図 3E)。この結果は、先行研究に

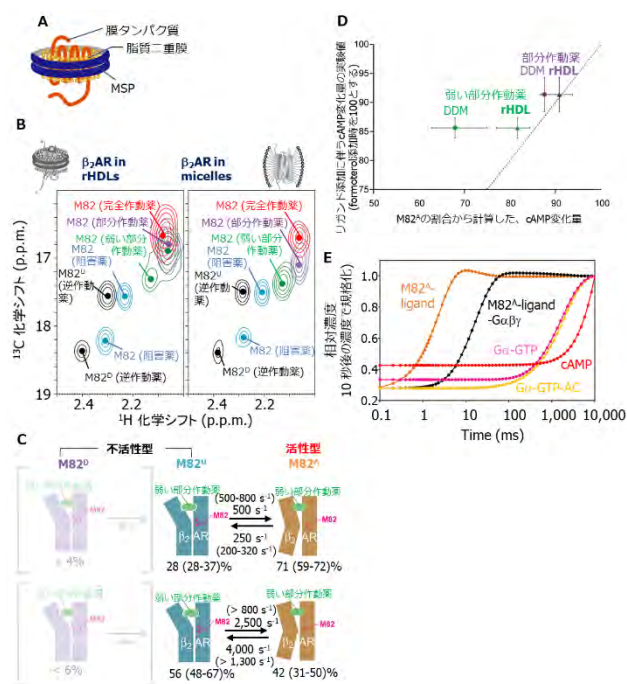


図 3 脂質二重膜環境における β_2AR の動的構造平衡。A. rHDL の模式図。B. rHDL 中 (左) および ミセル中 (右) の β_2AR における、各種リガンドが結合した状態の M82 の NMR シグナルの重ね合わせ。C. NMR シグナルから導出された、rHDL 中 (上) およびミセル中 (中) の弱い部分作動薬が結合した β_2AR における、不活性型と活性型の交換速度と量比。D. 弱い部分作動薬もしくは部分作動薬が結合した状態における、rHDL 中およびミセル中の β_2AR の NMR シグナルから導出した cAMP 変化量と、細胞における cAMP 変化量の実験値のプロット。E. NMR シグナルから推定した β_2AR の活性型と不活性型の交換速度を利用して計算した、作動薬添加に伴う各種 G 蛋白質シグナル伝達蛋白質における活性型分子種の濃度の経時変化。

おける G 蛋白質活性化および細胞内 cAMP 濃度変化の速度の実測値と対応している。この GPCR の活性化にかかる時間は、活性化に伴い二量体化する EGFR の場合、活性化に数分かかるとと比較すると、顕著に短い。このように GPCR が迅速に活性化するのは、神経伝達や感覚受容を迅速に行う上で有利であると考えた。

4. まとめ

以上のように、NMR 法により、活性と直結する、生理的な *in situ* の条件における GPCR の動的構造平衡が明らかとなった。さらに、我々は、ATP 依存型イオンチャネル P2X₄ の、脂質二重膜条件におけるイオン透過能と直結する構造平衡も解明している [8]。今後、より高精度の動的構造平衡の情報を取得したり、類縁の膜蛋白質との機能および動的構造平衡における類似点や相違点を明らかにしたり、エフェクター分子との複合体における動的構造を明らかにしたりすることで、シグナル伝達やイオン透過のメカニズムの理解が一層進むことが期待される。実際、我々は、GPCR キナーゼによりリン酸化された状態およびアレスチンと結合した状態の β_2 AR の NMR 解析を行い、リン酸化された β_2 AR がアレスチンシグナルの活性化に特徴的な構造を形成することを最近明らかにした [9]。また、動的構造平衡における量比や交換速度の定量的な情報をシステム生物学の解析に組み込むことで、細胞内シグナル伝達の全体像の理解を深めることも可能である [10]。さらに、創薬においても、標的蛋白質との親和性のみを指標とする従来型のリガンド設計指針とは質的に異なる、シグナル選択性や薬効度を制御するリガンド設計指針が提示できるようになることが期待される。

5. 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] N. Nishida, M. Osawa, K. Takeuchi, S. Imai, P. Stampoulis, Y. Kofuku, T. Ueda, and I. Shimada, *J. Magn. Reson.* 241, 86 (2014)
- [2] J. Okude, T. Ueda, Y. Kofuku, M. Sato, N. Nobuyama, K. Kondo, Y. Shiraishi, T. Mizumura, K. Onishi, M. Natsume, M. Maeda, H. Tsujishita, T. Kuranaga, M. Inoue, and I. Shimada, *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 5771 (2015)
- [3] Y. Kofuku, T. Ueda, J. Okude, Y. Shiraishi, K. Kondo, T. Mizumura, S. Suzuki, and I. Shimada, *Angew. Chem. Int. Ed.* 53, 13376 (2014)
- [4] C. Yoshiura, Y. Kofuku, T. Ueda, Y. Mase, M. Yokogawa, M. Osawa, Y. Terashima, K. Matsuhshima, and I. Shimada, *J. Am. Chem. Soc.* 132, 6768 (2010)
- [5] C. Yoshiura, T. Ueda, Y. Kofuku, M. Matsumoto, J. Okude, K. Kondo, Y. Shiraishi, and I. Shimada, *J. Biomol. NMR* 63, 333 (2015)
- [6] S. Imai, M. Osawa, K. Mita, S. Toyonaga, A. Machiyama, T. Ueda, and I. Shimada, *J. Biol. Chem.* 287, 39634 (2012)

- [7] Y. Kofuku, T. Ueda, J. Okude, Y. Shiraishi, K. Kondo, M. Maeda, H. Tsujishita, and I. Shimada, *Nature Commun.* 10, 1038 (2012)
- [8] Y. Minato, S. Suzuki, T. Hara, Y. Kofuku, G. Kasuya, Y. Fujiwara, S. Igarashi, E. Suzuki, O. Nureki, M. Hattori, T. Ueda, and I. Shimada, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 4741 (2016)
- [9] Y. Shiraishi, M. Natsume, Y. Kofuku, S. Imai, K. Nakata, T. Mizukoshi, T. Ueda, H. Iwai, and I. Shimada, *Nat. Commun.* 9, 194 (2018)
- [10] 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

東京大学助教(大学院薬学系研究科)。薬博。



幸福 裕

構造生物学

東京大学特任助教(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。

SPIO 造影 MRI を利用した放射線性肝障害領域の描出

医学系研究科 生体物理医学専攻 放射線医学講座
古田 寿宏

私は放射線性肝障害領域を描出するための新たなクッパー細胞 MR イメージング手法を用いた研究を行っています。この手法では、SPIO を放射線照射後ではなく、照射前に投与します。ここで紹介する研究では、あらかじめ SPIO を肝に集積させたラット肝腫瘍モデルに 30 Gy の放射線を照射すると、照射域の肝信号の回復に遅延が生じることが示されました。肝腫瘍周囲の肝実質における放射線による障害を、クッパー細胞の機能障害を通して描出できた可能性があります。

1. 背景と目的

超常磁性酸化鉄製剤（SPIO）は磁気共鳴画像（MRI）用の造影剤のひとつである。様々なタイプの SPIO が開発・発売されてきたが、現在、日本の医療現場で使用されているものは、一般名で言うとフェルカルボトランで、カルボキシデキストランでコーティングされた酸化鉄のコロイド溶液である[1]。粒子径は約 60 nm である。

フェルカルボトランは静脈内に投与されると、肝臓に特異的に集積することが分かっている。しかも、集積する部位が特徴的であり、肝細胞ではなく、クッパー細胞に貪食されることが分かっている。クッパー細胞に貪食されたフェルカルボトランは局所の磁場を乱し、T2・T2*短縮効果を生じ、MRI では肝が低信号化する（黒く見える）。そ

の後、フェルカルボトランは分解され、肝の信号は徐々に回復する（画像では白くなっていく）。

我々は、あらかじめフェルカルボトランを静脈内投与したラットのモデルにおいて、肝臓に 50～70 Gy の放射線を照射すると、照射域における肝信号の回復に遅延が生じることを報告してきた（図 1）[2,3]。本研究では、ラット肝腫瘍モデルを用い、30 Gy の照射で肝信号の回復に遅延が生じるかどうかを調べた。

2. 対象と方法

本研究は主に国立がん研究センターの先端医療開発センター・機能診断開発分野にて行った。全ての動物実験は、国立がん研究センター動物実験

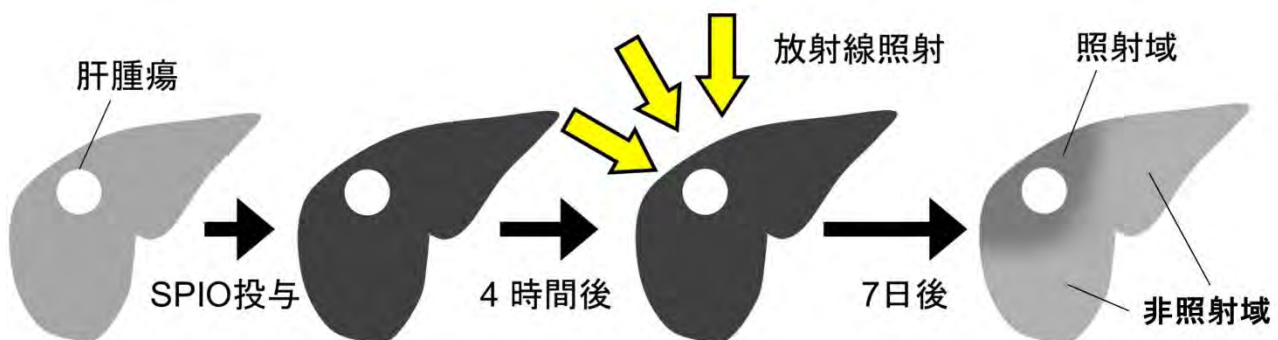


図 1. 我々の仮説を示す。あらかじめ SPIO を集積させた肝臓に放射線を照射すると、照射域では SPIO の肝からの洗い出しが遅延し、肝信号の回復が遅延する（非照射域と比べて黒く残って見える）。この結果を利用すれば、肝腫瘍に対する放射線治療マージンを評価できる可能性がある。

倫理委員会の承認を受けて実施した（承認番号 K15-022）。まず Sprague-Dawley ラット（雌、5 匹）の肝左葉に N1-S1 肝癌細胞を移植した[4]。1 週間後（Day 0）に腫瘍の生着を確認し、 $20 \mu\text{mol Fe/kg}$ 体重のフェルカルボトラン（Resovist; Fujifilm RI Pharma Co, Tokyo, Japan）を静脈内投与し、10 分後に肝の T2*強調 MRI (T2*WI) (TR/TE/FA = 500/10 ms/30°)、T2 強調 MRI (T2WI) (TR/TEeff = 1376–1651/27 ms) を呼吸同期にて撮影した。MRI は 9.4 テスラ装置 (Bruker Biospin, Ettlingen, Germany) を用いた。フェルカルボトラン投与の 4 時間後、腫瘍を含む左葉に対して 30 Gy の X 線を単回照射した (図 2)。7 日後 (Day 7) にフェルカルボトランの追加投与なしに T2*WI、T2WI を撮影し、Multiple Gradient Echo sequence (Bruker Biospin, TR/TE/FA = 1000/3.1–18.5 ms [5 steps]/25°) による T2* マッピングを行った。照射域である肝左葉、非照射域である肝右葉、腫瘍の相対信号強度（筋肉の信号強度との比を計算した）および T2* 値を計測し、それぞれの比較を行った。Day 7 の MRI 後、肝を摘出し、組織標本を作製した。鉄染色、CD68 免疫染色を行い、肝左葉、肝右葉における鉄沈着数、クッパー細胞数の比較を行った。

3. 結果

フェルカルボトラン投与 10 分後の T2*WI において、左葉（照射域）、右葉（非照射域）はともに低信号を示し (図 3A)、相対信号強度はそれぞれ 0.17 ± 0.017 、 0.17 ± 0.014 (以降データは全て平均値 ± 標準誤差、 $n = 5$) であった (図 4A)。T2WI での相対信号強度は照射域が 0.33 ± 0.0067 、非照射域が 0.29 ± 0.0093 であった (図 4B)。Day 7 の MRI では全てのラットで腫瘍が消失した。T2*WI での照射域は低信号域として描出された (図 3B の矢印)。照射域の相対信号強度は 0.23 ± 0.03 、非照射域は 0.52 ± 0.03 であり、照射域が有意に低値であった ($p < 0.001$, Tukey 法) (図 4A)。一方、T2WI



図 2. 放射線照射の方法を示す。吸入麻酔下にラットを開腹し、腫瘍を含む肝左葉を体外に出した。腹部臓器への被曝線量を低減するために、体外に出した肝左葉の下に鉛板を挿入した (左)。腫瘍と周囲の肝組織のみに照射されるよう、それ以外の部分を鉛で覆った (右)。鉛に空けられた窓のサイズは $15 \times 15 \text{ mm}^2$ である。以上の準備を行った後、前方 1 門照射により 30 Gy の単回照射を行った。

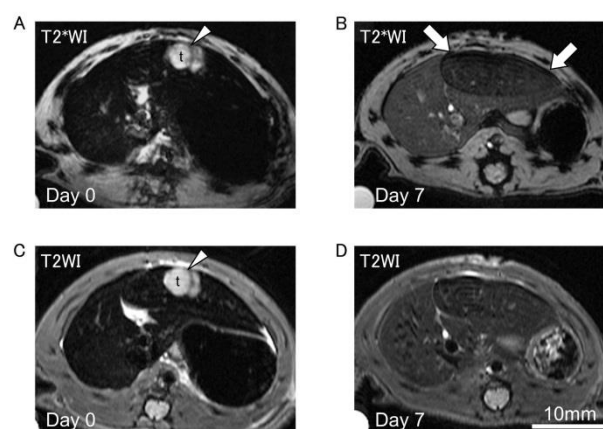


図 3. ラット肝の MRI 横断像。Day 0 において、フェルカルボトラン投与後、T2*WI でも T2WI でも、肝実質は全体に低信号を示している (A、C)。肝腫瘍 (t) の位置を矢頭で示す。この MRI を撮影した 4 時間後に、腫瘍を含む左葉に 30 Gy の放射線を照射した。Day 7 において、T2*WI では照射域 (肝左葉) が非照射域 (肝右葉) に比べて明瞭な低信号を示しているが (B の矢印)、T2WI では照射域と非照射域の差は不明瞭である (D)。

での照射域の相対信号強度は 0.46 ± 0.06 、非照射域は 0.56 ± 0.06 であった (有意差なし) (図 4B)。照射域の $T2^*WI$ 値は 3.2 ± 0.34 ms であり、非照射域の値 9.1 ± 0.17 ms よりも有意に低値であった ($p < 0.001$, t 検定)。照射域の鉄沈着数は、 0.5 mm²あたり 78 ± 5 であり、非照射域の値 27 ± 7 よりも有意に高値であった ($p < 0.001$, t 検定) (図 5A)。照射域と非照射域のクッパー細胞数に有意な差は見られなかった (図 5B)。

4. 考察

あらかじめ SPIO を集積させたラット肝に 30 Gy の放射線を照射すると、照射域の肝信号の回復に遅延が生じた。 $T2WI$ よりも磁化率効果に鋭敏な $T2^*WI$ でのみ、照射域が低信号域として描出された。これは、照射域において、クッパー細胞による SPIO の分解が遅延し、磁化率効果の高い鉄粒子が残存した結果、肝信号の回復が遅延して見えたものと考えられた。照射域の $T2^*WI$ 値が非照射域よりも低値であったこと、組織学的検索において、照射域の鉄沈着数が非照射域よりも高値であったことも、この考えを示唆する。

またこれらの実験結果は、照射域においてクッパー細胞の機能障害が生じたことも示唆する。肝細胞の障害が生じたかどうかは直接確認できてはいないが、本実験での照射線量では肝の耐容線量 (全肝分割照射で 30 Gy 程度とされる) を超えているため、放射線性肝障害は高い確率で生じたと考えられる [5]。ただし、EOB-MRI を利用した過去の報告によれば、30 Gy 照射により肝細胞障害が発生したとしても、障害領域の早期描出は難しいと言われている [6]。

以上をまとめると、本実験では、肝腫瘍周囲の肝実質における放射線による障害を、クッパー細胞の機能障害を通して、照射後早期に描出できた可能性がある。また、あらかじめ SPIO を肝に集積させる本手法は、肝腫瘍に対する放射線治療マージンの評価への応用が期待できる。

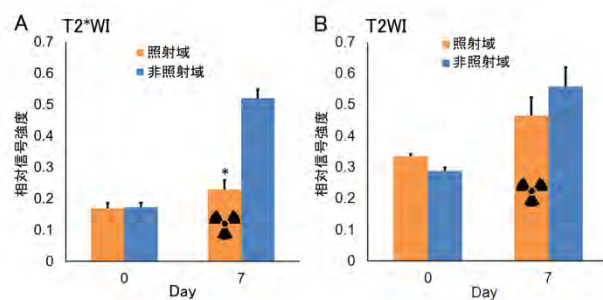


図 4. $T2^*WI$ および $T2WI$ における相対信号強度を、照射域と非照射域で比較したグラフ。Day 7 において、 $T2^*WI$ では照射域の相対信号強度は非照射域に比べて有意に低値であったが (A)、 $T2WI$ では有意差は見られなかった (B)。データは平均値±標準誤差 (n=5)。

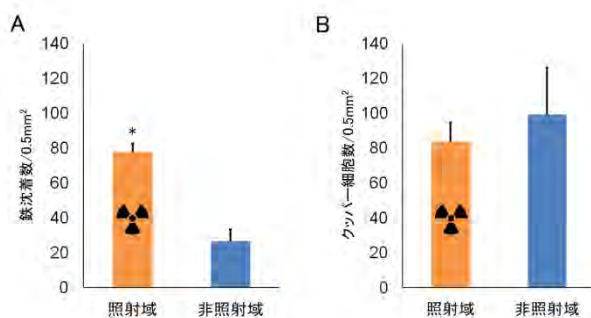


図 5. Day 7 の肝組織における鉄沈着数とクッパー細胞数。照射域 (肝左葉) と非照射域 (肝右葉) で比較した。照射域の鉄沈着数は非照射域に比べて有意に多かった (A)。クッパー細胞数に有意な差は見られなかった (B)。データは平均値±標準誤差 (n=5)。

5. 結論

SPIO 集積後の肝に 30 Gy の放射線を照射すると、 $T2^*WI$ において照射域の肝信号の回復に遅延が生じた。肝実質における放射線による障害を照射後早期に描出できた可能性がある。

6. おわりに

私は肝臓 MRI の研究を行っています。主に、国立がん研究センターの先端医療開発センター・機

能診断開発分野において、9.4 テスラと 3 テスラの研究用装置（後者は臨床機ですが研究専用）を使用しています。臨床業務では医学部附属病院の 3 テスラと 1.5 テスラの MRI 画像診断に従事しており、研究で得られた知見が臨床で役に立つことも時々経験しますし、その逆もあります。

私が使用している装置はいずれも超電導磁石型の MRI であり、コイルを冷却し超電導状態を保つため、液体ヘリウムが不可欠なものとなっています。

参考文献

- [1] R. Lawaczeck, et al. Acta Radiol 38, 584 (1997)
- [2] T. Furuta, M. Yamaguchi, R. Nakagami, M. Akahane, M. Minami, K. Ohtomo, and H. Fujii. Magn Reson Mater Phy 27, 501 (2014)
- [3] T. Furuta, M. Yamaguchi, M. Minami, K. Ohtomo, and H. Fujii. J Magn Reson Imaging 45, 303 (2017)
- [4] M. Yamaguchi, M. Mitsuda, K. Ezawa, R. Nakagami, T. Furuta, N. Sekine, M. Niitsu, and H. Fujii. J Magn Reson Imaging 38, 225 (2013)
- [5] B. Emami, et al. Int J Radiat Oncol Biol Phys 21, 109 (1991)
- [6] O. Clement, et al. Radiology 185, 163 (1992)

著者紹介



古田 寿宏

放射線診断学

いつも自分自身が楽しめるように心がけています。

植物の栄養吸収

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

神谷 岳洋

植物は土壌中に伸びた根から生育に必要な無機必須元素を吸収し、光合成により有機物を合成している。すなわち、根における栄養吸収は植物の生育にとって非常に重要なステップである。土壌中には無機必須元素だけではなく、植物の生育に不必要な物質が存在するが、根には、植物に必要な物質を必要な量だけ吸収する仕組みが存在する。我々は、その中でも、土壌からの植物体内への非特異的な物質の吸収を妨げるアポプラスト障壁と呼ばれる細胞壁構造に着目し、その形成機構や役割について明らかにしたので以下に紹介する。

1. はじめに

植物は独立栄養生物であり、光のエネルギーと無機必須元素（C、H、O、N、P、S、Ca、Mg、K、Fe、Mn、Zn、Ni、Cu、Mo、B、Cl）だけで生育することが可能である。我々、人を含む動物は従属栄養生物と呼ばれ、独立栄養生物により合成された有機化合物を消費することによりしている。

植物は無機必須元素の多くを土壌に伸びた根でイオンの状態で植物体内に吸収している。植物が生育する土壌に含まれる元素濃度は一定ではない。加えて、土壌には、植物の生育には必要ではない元素（例えば、As や Cd などの毒性元素）が含まれている。そのために、植物は必要な元素を必要な量だけ吸収する仕組みを有している。この仕組みに重要な役割を果たしているのが「輸送体」と「アポプラスト障壁」である。

私が所属する研究室では、アポプラスト障壁形成の分子機構、および、植物の輸送体の同定とその発現・蓄積制御機構を明らかにしている。本誌では、植物にしか存在しないユニークな構造である「アポプラスト障壁」について紹介する。

2. アポプラスト障壁

アポプラストとは細胞膜の外側を指す用語であり、逆に、細胞膜の内側はシンプラストと呼ばれ

る。植物が栄養を吸収する際にアポプラストとシンプラストを通過して、導管まで輸送される。導管まで輸送された栄養は水の流れに乗って地上部に輸送され、様々な組織に分配される（図1）。アポプラストは土壌とつながった空間であるため、植物に不必要な物質も侵入することが可能である。

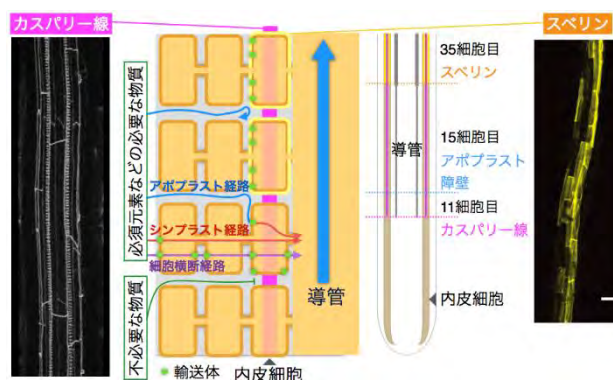


図1. 植物（シロイヌナズナ）の根における物質の輸送経路とカスパリー線およびスベリンの配置。模式図は、根の縦断面を示す。土壌中の物質はアポプラスト経路（青）、シンプラスト経路（赤）、細胞横断経路（紫）を通り、導管に輸送される。カスパリー線は、根を透過した後、リグニンの自家蛍光を、スベリンは Fluorol yellow 088 により染色した。スベリンの写真で黒く抜けているところは、スベリンが蓄積しない内皮細胞（通過細胞）を示す。

ただし、それは内皮細胞と呼ばれる細胞層までである。これは、内皮細胞の周囲にカスパリー線と呼ばれる構造が形成されており、隣り合う細胞同士の隙間を埋めているからである。この構造のため、アポプラスト空間を通ってきた物質もブロックされ、それより内側に入り、導管に入ることはない。必須元素は、細胞膜に存在する基質特異性を持った輸送体と呼ばれるタンパク質により取り込まれる。

3. カスパリー線

カスパリー線は 1865 年にドイツの植物学者である Robert Caspary によって発見された。先述したように細胞間を埋める構造であり、細胞膜に強く結合している[1]。カスパリー線は根端には形成されず、モデル植物であるシロイヌナズナの場合、根端にある伸長を開始する内皮細胞から数えておよそ 11 細胞目で形成が観察され、15 細胞目でアポプラストのトレーサーが導管に入らなくなりアポプラスト障壁として機能するようになる[1]。

カスパリー線が何でできているのか、その実体については長年の謎であったが、近年ようやくその実体がリグニンであるという実験結果が報告された[2]。

また、最近までカスパリー線の分子機構については明らかにされていなかったが、2011年に初めてカスパリー線形成に関わる遺伝子 CASP1 が同定されて以降、複数の遺伝子が同定されており、複数の遺伝子が関与して形成されることが明らかとなっている[3, 4, 5]。筆者はこれら複数のカスパリー線形成に関わる遺伝子の発現を制御するマスターレギュレーター遺伝子を同定したので、以下に紹介する。

筆者が所属していた David E. Salt 博士らの研究グループは植物の元素輸送機構を明らかにする目的で、ICP-MS (誘導プラズマ結合プラズマ質量分析装置) を用いて、地上部 (葉) の元素含量に異

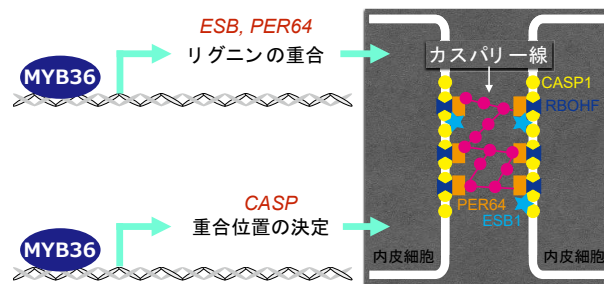


図2. MYB36 はカスパリー線の成分であるリグニンの重合と重合位置を決定する遺伝子の転写を正に制御している。

常がある変異株のスクリーニングを行った。その中の一つの変異株は、地上部の複数の元素濃度が親株とは異なっていた。原因遺伝子を同定したところ、MYB36 と呼ばれる転写因子に変異を有していた[6]。変異株は、元素濃度の異常に加えて、カスパリー線の形態異常が認められ、アポプラスト障壁としての機能も失われていた。マイクロアレイ解析により、MYB36 変異株で発現が低下している遺伝子には既知のカスパリー線形成に関与する複数の遺伝子が含まれ、そのうちのいくつかについては ChIP-qPCR により、MYB36 が直接プロモーターに結合することを確認した。また、変異株でカスパリー線形成位置を決定するタンパク質である CASP1 の細胞内局在を見たところ、本来形成位置に局在するタンパク質が正しい位置に局在していなかった。加えて、MYB36 を内在の MYB36 が発現していない細胞層 (表皮や皮層) で発現させたところ、CASP1 の局在やカスパリー線様の構造が観察された。以上のことから、MYB36 は 1) カスパリー線を構成しているリグニンの重合、2) カスパリー線形成の位置決定、の 2 点に関与していることを明らかにし、長年の謎であったカスパリー線形成のマスターレギュレーターを同定した。

4. スペリン

カスパリー線と同様に、アポプラスト障壁として機能しているのがスペリンである (図1)。スベ

リンは脂肪酸を主成分とするポリマーで、内皮細胞の細胞膜の外側に形成される。その機能は、シンプラスト経路の障壁として機能し、細胞内に物質が侵入することを防いでいる。そのため、スベリンが蓄積した細胞では、輸送体が細胞膜に局在していても細胞内への物質の輸送は妨げられる。そのため、通過細胞と呼ばれるスベリンが蓄積していない内皮細胞で物質の取り込みが起こるとされている（図1右）。

このスベリンがアポプラスト障壁として機能していることを偶然発見したので以下に紹介する。植物がどのようにしてカルシウムを吸収し、利用しているか、その機構を理解する目的で、低濃度のカルシウムを含む培地で正常に生育しないシロイヌナズナ変異株を単離した。この変異株は、カスパリー線の形態や機能に異常を有しており、原因遺伝子 **LOT1** はカスパリー線の形成に関与していることを明らかにした[7]。

LOT1 ではカスパリー線の異常に加えて、スベリンの過剰蓄積も観察された。これは、**MYB36** を始めとしたカスパリー線変異株で共通して観察される現象である。すなわち、植物にはカスパリー線が機能しなくなるとスベリンが蓄積する機構が存在することを示している。

では、この機構はなんのために存在するのであろうか。正常な植物でカスパリー線の切断が起きる場所の一つある。それは、側根の発生部位である。側根は、主根から分岐する根であり、側根の発生は、内皮細胞の内側（導管側）の内鞘細胞と呼ばれるところから発生する。その発生の過程で、内皮細胞の層を破り、表皮の外に出てくる。すなわち、この部分では、カスパリー線によるアポプラスト障壁は機能していない。では、何が障壁として機能するのであるか。結論から言うとスベリンである[4]。このことを示した実験が図3である。ここでは、アポプラストトレーサーである蛍光試薬 **propidium iodide (PI)** で処理した根の共焦点レーザー顕微鏡画像を示してある。野生型株では、

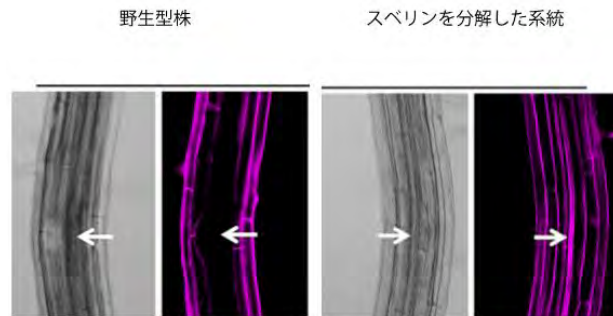


図3. 側根発生部位ではスベリンがアポプラスト障壁として機能している。矢印は側根発生部位を示す。

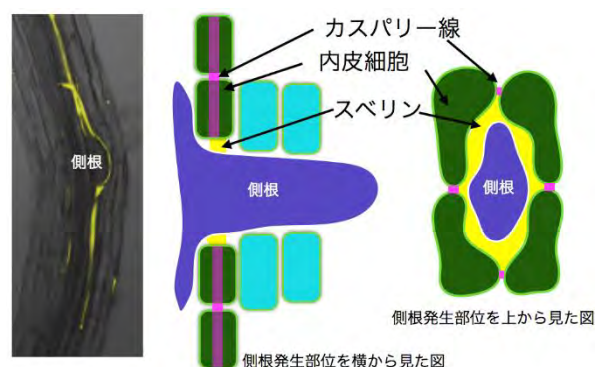


図4. 側根発生部位におけるスベリンの蓄積部位。スベリン（黄色）は内皮細胞と側根の表皮の間に蓄積し、その間の隙間を埋める。

マゼンタで示した **PI** の蛍光が、中心の維管束では観察されない。一方で、スベリンが蓄積しない系統では、中心まで染まっていることがわかる。この蛍光は矢印で示した側根発生部位で強いことから、側根から **PI** が侵入したと推測される。また、この結果と一致して、スベリンの蓄積は側根発生部位で観察される（図4）。

以上の結果から、カスパリー線がアポプラスト障壁として機能できない側根発生部位では、側根の表皮と内皮細胞の間にスベリンが蓄積することにより、アポプラスト障壁として機能することを明らかにした（図4）。

5. 今後の展開

植物の根における栄養吸収機構は主に輸送体タンパク質の研究と行っても過言ではなかった。しかし、筆者らの研究により、アポプラスト障壁が栄養吸収において重要な役割を果たしていることが明らかになってきた。

今後は、モデル植物であるシロイヌナズナだけでなく、実際の作物についてもアポプラスト障壁の栄養吸収における役割を明らかにし、より優れた作物の育種につなげていきたいと考えている。

本研究の成果は、低温センターにより提供された寒剤を用いて得られたものです。植物組織からのDNAやRNAの抽出には液体窒素が不可欠です。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] J. Alassimone, S. Naseer, N. Geldner, *Proc. Natl. Sci. Acad. U.S.A.* **107**, 5214 (2010)
- [2] S. Naseer, Y. Lee, C. Lapierre, R. Franke, C. Nawrath, N. Geldner, *Proc. Natl. Sci. Acad. U.S.A.* **109**, 10101 (2012)
- [3] D. Roppolo, B. DeRybel, V. Denervaud Tendon, A. Pfister, J. Alassimone, J.E. Vermeer, M. Yamazaki, Y.D. Stierhof, T. Beeckman, N. Geldner, *Nature*, **473**, 380 (2011)
- [4] P.S. Hosmani, T. Kamiya, J.M. Danku, S. Naseer, N. Geldner, M.L. Guerinot, D.E. Salt, *Proc. Natl. Sci. Acad. U.S.A.* **110**, 14498 (2013)
- [5] A. Pfister, M. Barberon, J. Alassimone, L. Kalmbach, Y. Lee, J.E. Vermeer, M. Yamazaki, G. Li, C. Maurel, J. Takano, T. Kamiya, D.E. Salt, D. Roppolo, N. Geldner, *eLife*, **3**, e03115 (2014)
- [6] T. Kamiya, M. Borghi, P. Wang, J. M. Danku, L. Kalmbach, P.S. Hosmani, S. Naseer, T. Fujiwara, N. Geldner, D.E. Salt, *Proc. Natl. Sci. Acad. U.S.A.* **112**, 10533 (2015)
- [7] B. Li, T. Kamiya, L. Kalmbach, M. Yamagami, K. Yamaguchi, S. Shigenobu, S. Sawa, J.M. Danku, D.E. Salt, N. Geldner, T. Fujiwara, *Curr. Biol.* **27**, 758 (2017)

著者紹介



神谷 岳洋

植物栄養学

共同利用研究室 研究実績報告

非線形磁気光学効果、白色発光を示す機能性磁性体

金属錯体は金属イオンや配位子の選択によって、様々な機能性を実現することが可能である。特に、シアノ基を介した磁性金属イオン間に比較的大きな超交換相互作用が働くシアノ架橋型金属錯体においては、磁気特性と機能性のカップリング効果の発現が期待できる。このような観点から当研究室では、これまでに光応答性、湿度応答性、イオン伝導性、スピン転移現象、発光などを示す強磁性錯体を報告してきた[1-7]。本研究では、ペンタシアノニトロシルモリブデン酸イオンとマンガンイオンを組み合わせ、セシウムイオンが間隙に挿入された磁性金属錯体 $\text{Cs}_{1.26}\text{Mn}_{0.87}[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})] \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ を合成し、磁化誘起第二高調波発生(MSHG)を観測した[8]。また、シアノ基で架橋された Dy-Co 二核錯体および Dy-Rh 二核錯体 $\{\text{Dy}^{\text{III}}(4\text{-pyridone})_4(\text{H}_2\text{O})_2\}[\text{M}^{\text{III}}(\text{CN})_6] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($\text{M} = \text{Co}$, $n = 2, 1$; $\text{M} = \text{Rh}$, $n = 4, 2$) を合成し、白色発光および遅い磁気緩和を示すことを明らかにした[9]。

1. 磁化誘起第二高調波発生を示す強磁性錯体

磁性金属錯体 $\text{Cs}_{1.26}\text{Mn}_{0.87}[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})] \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ は、ペンタシアノニトロシルモリブデン酸セシウムと塩化マンガンを不活性雰囲気において反応させることで黄色粉末として得た。粉末 X 線回折パターンの Rietveld 解析結果から、得られた錯体の結晶系は立方晶、空間群 $F\bar{4}m$ 、格子定数は $10.8970(\text{Å})$ であり、圧電性の結晶構造を有することが判明した(図 1)。Mn イオンと Mo イオンはシアノ基あるいはニトロシル基で架橋された次元ネットワーク構造を有していた。電荷中性を保つために、1% の Mn サイトに欠陥がランダムに存在していた。Cs イオンは 2 つの化学的に非等価なサイト(Cs1 および Cs2)に位置し、Cs1 と Cs2 の

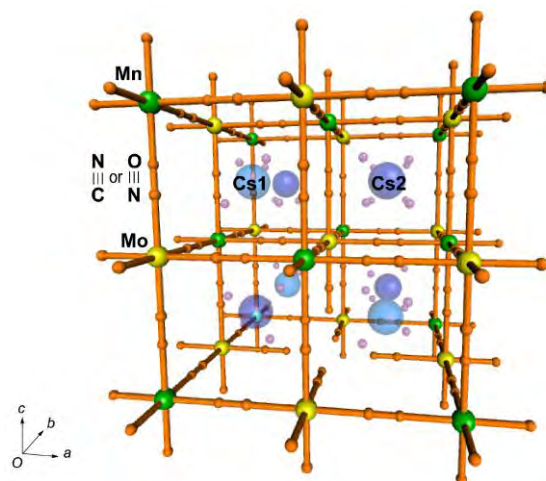


図 1. $\text{Cs}_{1.26}\text{Mn}_{0.87}[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})] \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ の結晶構造。

占有率はそれぞれ 66% および 60% であった。この占有率の違いにより空間反転対称性が破れて反転対称を持たない構造体となっていた。2 K における磁化の外部磁場依存性プロットの結果、飽和磁化の値は $0.4 \mu_B$ であった。この値は、 $\text{Mn}^{\text{II}}(S=5/2)$ と $\text{Mo}^{\text{I}}(S=1/2)$ のスピン間に反強磁性的な超交換相互作用が働き反平行に整列した場合の飽和磁化計算値と一致していたことから、本錯体はフェリ磁性体であることが示唆された。また、外部磁場 10 Oe 下における磁化の温度依存性の測定の結果、本化合物の磁気相転移温度は 65 K であることが明らかになった。分子磁場理論における磁気相転移温度と超交換相互作用定数の関係式から計算した結果、本化合物における Mn^{II} と Mo^{I} 間の超交換相互作用定数の値は -9.4 cm^{-1} であることが示唆された。

本錯体は反転対称が破れているため、第二高調波発生(SHG)が生じると期待される。実際に、Nd:YAG レーザー(波長 1064 nm)を基本波として用

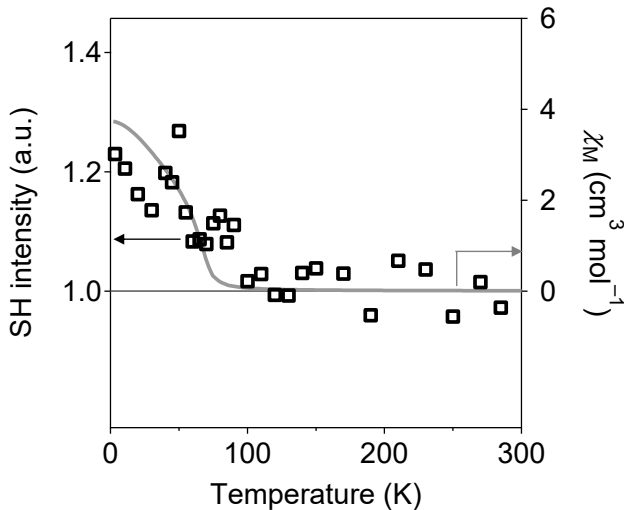


図 2. $\text{Cs}_{1.26}\text{Mn}_{0.87}[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})]\cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ の SHG の温度依存性(四角プロット)および磁化の温度依存性(灰色線).

いて本錯体の SHG の測定を行った結果、SHG の波長に相当する 52 nm の光が観測された。この 52 nm 光の強度は基本波強度の二乗に比例していたことから、この 52 nm 光は SHG であることが示唆された。また、SHG 感受率は 5×10^{-11} esu であり、リン酸二水素カリウムの 5%程度であった。また、SHG 強度の温度依存性の測定を行った結果、低温において SHG 強度の増大がみられ、外部磁場 5000 Oe における磁化の温度依存性と対応していたことから、MSHG が観測されたことが示された (図 2)。続いて、SHG および MSHG の起源を調べるために、テンソル解析を行った。二次の非線形分極($P_i^{(2)}$)は、二次の非線形感受率($\chi_{ijk}^{(2)}$)を用いて、 $P_i^{(2)} = \chi_{ijk}^{(2)} E_j E_k$ (ただし i, j, k は座標、 E_j 、 E_k は入射光電場)と表される。本錯体は、中心対称性を持たない空間群 $F\bar{4}m$ を有するため、互いに等しいノンゼロのテンソル成分として $\chi_{xyz}^{(2)\text{cry}}$ 、 $\chi_{yzx}^{(2)\text{cry}}$ 、 $\chi_{zxy}^{(2)\text{cry}}$ が現れる。さらに、磁気相転移温度以下では、磁化項($\chi_{ijk}^{(2)\text{mag}}$)が現れる。結晶軸方向に磁化した際の磁気点群は $4mm$ であり、 $\chi_{xyz}^{(2)\text{mag}}$ 、 $\chi_{yzx}^{(2)\text{mag}}$ 、 $\chi_{zxy}^{(2)\text{mag}}$ がゼロでないテンソル成分として加わることになるため、本錯体では低温で MSHG の効果により SHG 強度が増大することが明らかになった。

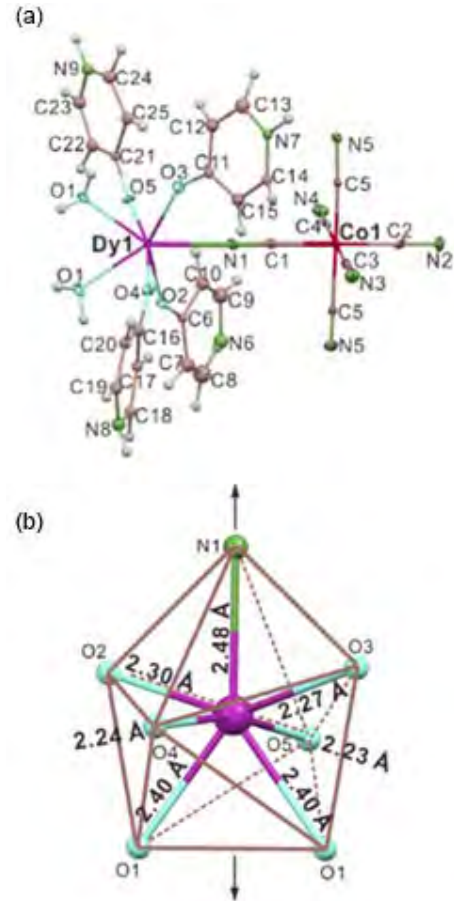


図 3. 錯体 1 の構造。(a) 分子構造および(b) Dy^{III} 周りの配位構造。

2. 白色発光および単分子磁性挙動を示す機能性分子

Dy-Co 二核錯体は、 $\text{DyCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、4-pyridone および $\text{K} [\text{Co}(\text{CN})_6]$ を水溶液中で反応させることにより、黄色透明結晶として得られた。一方、 Dy-Rh 二核錯体は、 $\text{K} [\text{Rh}(\text{CN})_6]$ を用いて同様の反応を行うことにより、透明な結晶として得られた。単結晶 X 線構造解析を行ったところ、どちらの結晶も反転対称のない空間群 $\text{Cmc}2_1$ に属し、Co または Rh が Dy とシアノ基で架橋された二核錯体であることが明らかになった (図 3)。また、Dy には 4 つの 4-pyridone、2 つの水分子、1 つのシアノ基が配位しており、7 配位構造をとっていることが明らかになった。その配位構造は、理想的なペンタゴナルバイピラミッド型から歪んでおり、アキシヤ

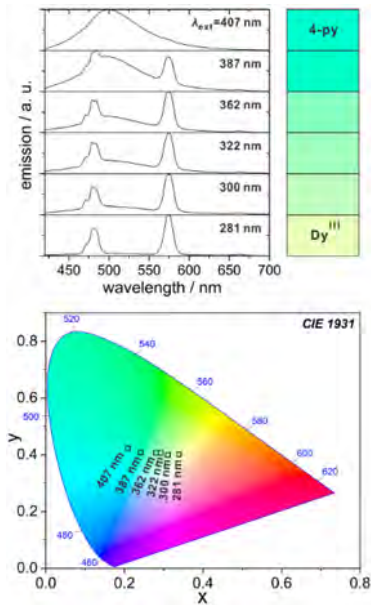


図4. 錯体 **1** の各励起波長における発光スペクトル (上図)。CIE 191 表色系における各発光の色 (下図)。

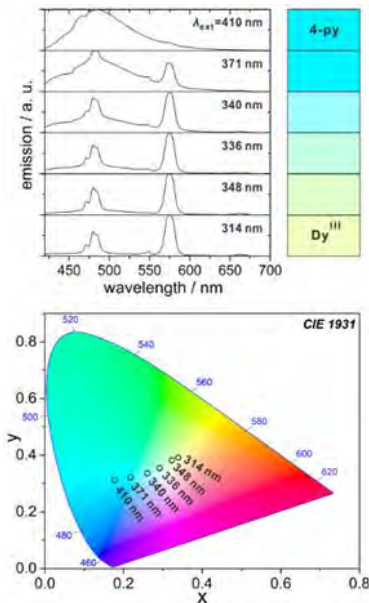


図5. 錯体 **2** の各励起波長における発光スペクトル (上図)。CIE 191 表色系における各発光の色 (中央図)。各発光素子のエネルギー準位の模式図 (下図)。

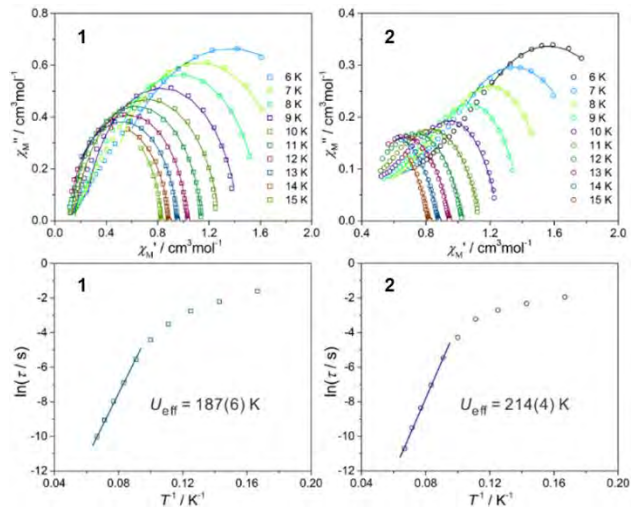
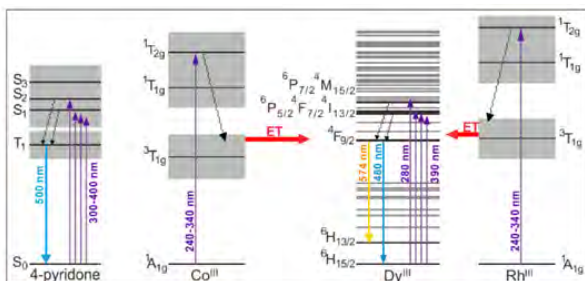


図6. 錯体 **1** および **2** の交流磁化率プロット (上図) および緩和時間の温度依存性 (下図)。

ル方向 (Dy-N1 方向, 図3下図) に伸長したペンタゴナルバイピラミッド型となっていた。

室温において錯体 **1**, **2** の発光スペクトルを測定したところ、励起光の波長に依存して、スペクトルが大きく変化することが明らかになった (図4、図5)。錯体 **1** では、波長 281 nm の励起光を用いた場合、Dy^{III} に由来する黄色の発光を示すが、励起波長を長くするに従い、4-pyridone 由来の発光が観測されるようになり、407 nm の励起波長では青緑色の発光を示した。錯体 **2** の発光は、励起波長に依存して錯体 **1** と同様に黄色から青緑色に変化するが、ややブルーシフトしており、6 nm の励起光を用いた場合に白色発光を示すことが明らかになった。これらの発光スペクトルにおける励起波長依存性は、各構築素子のエネルギー準位および構築素子間のエネルギー移動で説明される。

240 nm から 00 nm 程度までの励起光を用いた場合には、主に Co^{III} (または Rh^{III}) および Dy^{III} が励起され、Co^{III} (または Rh^{III}) から Dy^{III} にエネルギー移動が起こることによって、Dy^{III} からの発光 (主に ⁴F_{9/2} → ⁶H_{15/2,1/2}) が支配的になる。一方で、励起光が 00 nm を超えて長波長になるにつれて、4-pyridone からのりん光 (T₁→S₀) が支配的になったと考えられる。

図6に各周波数および各温度における交流磁化測定の結果を示す。両錯体 **1**, **2** ともに、ゼロ磁場

下において、実部 (χ_M') および虚部 (χ_M'') の交流磁化応答が観測された。デバイモデルによりフィッティングを行い、求められた緩和時間 $\ln(\tau)$ を温度の逆数 T^{-1} に対してプロットした。このプロットからアレニウス則にしたがい、異方的エネルギー障壁および緩和時間を求めたところ、錯体 **1** では $U_{\text{eff}} = 187(6) \text{ K (ca. } 10(4) \text{ cm}^{-1})$ 、 $\tau_0 = 1.9(8) \times 10^{-10} \text{ s}$ 、錯体 **2** では $214(4) \text{ K (ca. } 149() \text{ cm}^{-1})$ 、 $\tau_0 = 1.7(5) \times 10^{-11}$ となることが示された。また、10 K 以下では、磁化の量子トンネル効果が支配的になり、温度変化に対する緩和時間の変化は著しく小さくなった。錯体 **2** では 214 K の高いエネルギー障壁を示すが、これは主に Dy^{III} 周りの配位構造が、嵩高い Rh が存在することによって、より異方的になり、それに伴い Dy^{III} の磁気異方性が大きくなることに起因すると考えられる。

今回合成した磁性金属錯体 $\text{Cs}_{1.26}\text{Mn}_{0.87}[\text{Mo}(\text{CN})_5(\text{NO})] \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ は、反転対称が破れた結晶構造を有し、磁化誘起第二高調波発生を示すことが明らかになった。また、二核錯体 $\{[\text{Dy}^{\text{III}}(4\text{-pyridone})_4(\text{H}_2\text{O})_2][\text{M}^{\text{III}}(\text{CN})_6]\} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($\text{M} = \text{Co}, n = 2; \text{M} = \text{Rh}, n = 4$) は、励起波長によって色制御可能な発光および遅い磁気緩和現象を示す多機能磁性体であり、Co から Rh への金属置換により、白色発光を示し、さらに異方的エネルギー障壁も向上することが明らかになった。これらの二核錯体の結晶は、反転対称が破れた空間群に属しており、今後、非線形光学効果や強誘電性などのさらなる多機能化が期待できる。

-
- [1] S. Ohkoshi, S. Takano, K. Imoto, M. Yoshikiyo, A. Namai, and H. Tokoro, *Nature Photonics* **8**, 65 (2014).
 - [2] S. Ohkoshi, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, S. Takano, and H. Tokoro, *Nature Chemistry* **3**, 564 (2011).
 - [3] S. Ohkoshi, K. Arai, Y. Sato, and K. Hashimoto *Nature Materials*, **3**, 857 (2004).
 - [4] S. Ohkoshi, K. Nakagawa, K. Tomono, K. Imoto, Y. Tsunobuchi, H. Tokoro, *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 6620 (2010).
 - [5] E. Pardo, C. Train, G. Gontard, K. Boubekeur, O. Fabelo, H. Liu, B. Dkhil, F. Lloret, K. Nakagawa, H. Tokoro, S. Ohkoshi, and M. Verdagner, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 15 2 8–15 1 (2011).
 - [6] S. Chorazy, J. Stanek, W. Nogas, A. Majcher, M. Rams, M. Koziel, E. Juszynska-Galazka, K. Nakabayashi, S. Ohkoshi, B. Sieklucka, and R. Podgajny, *J. Am. Chem. Soc.* **138**, 16 5 (2016).
 - [7] S. Chorazy, K. Nakabayashi, S. Ohkoshi, and B. Sieklucka, *Chem. Mater.*, **26**, 4072 (2014).
 - [8] M. Komine, K. Imoto, Y. Miyamoto, K. Nakabayashi, and S. Ohkoshi, *Eur. m. J. m. org. m. Chem.* **1 67** (2018).
 - [9] J. Wang, S. Chorazy, K. Nakabayashi, B. Sieklucka, and S. Ohkoshi, *J. Mater. Chem. C*, **6**, 47 –481 (2018).

半導体シリコンへの高効率スピン注入の実現とスピン蓄積現象の解明

I. はじめに

スピン電界効果型トランジスタ (Spin-MOSFET) は電子のスピン自由度を利用した次世代の電子デバイスとして注目を集めている [1-5]。Spin-MOSFET は強磁性ソース・ドレイン電極と半導体シリコンチャンネルを持ち、その強磁性ソース・ドレインの磁化の向きに応じて伝達特性が変化する性質を有し、不揮発なデータの保持、大幅な消費電力の低減、再構成論理回路への応用が期待されている。このような機能を実現するためには、強磁性体から半導体シリコンへの高効率スピン注入技術の開発が不可欠である。

われわれはこれまで、強磁性/絶縁体界面に存在するデッドレイヤーが高効率スピン注入を妨げている可能性を指摘した [6]。本研究は Fe/Mg/MgO/Si トンネル構造において Mg 膜厚を変化させることで、Fe/MgO 界面のデッドレイヤーとスピン注入効率の関係を明らかにすることを目的として研究を行った [7]。二種類のデバイス構造 (縦型デバイス、横型デバイス) を作製し、Mg 膜厚依存性はより正確な解析が可能である縦型デバイスを用い、スピン伝導の確認には横型デバイスを用いる。シグナルの評価にはデバイスの形状を取り入れた解析式を用いて、デバイス構造に依存したシグナルの変化を定量的に解析する。

II. 縦型デバイスにおける Mg 挿入効果

図 1 に縦型デバイスの構造と三端子ハンル測定の設定アップを示す。スピン注入には Al (~160 nm) /Mg(1 nm)/Fe(3 nm)/Mg(t_{Mg})/MgO(0.8 nm)/ n^+ -Si という強磁性トンネル構造を用い、Mg の挿入膜厚 t_{Mg} は 0-2 nm で変化させた。縦型デバイスは 17.8 μm の円柱型に加工し、電気伝導特性の評価と、三端子ハンル測定を行った。

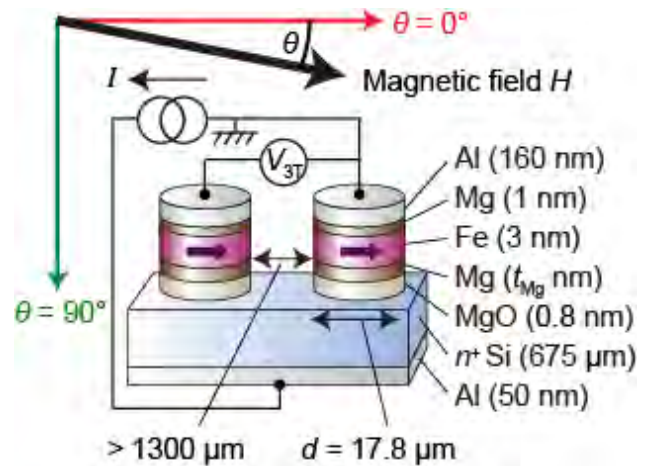


図 1 縦型デバイスの構造と三端子ハンル測定の設定アップ。外部磁場 H を面内 ($\theta = 0^\circ$) と面直 ($\theta = 90^\circ$) 方向に印加し、強磁性トンネル接合の電圧変化を測定する。

一方、Fe/MgO 間のデッドレイヤーの磁気特性を評価するため、同様の積層構造を持つ膜状サンプルを別に作成し、SQUID 装置を用いて飽和磁化 M_S の測定を行なった。図 2 に M_S の t_{Mg} 依存性を示す。 M_S は t_{Mg} の増加に伴い上昇し、おおよそ $t_{Mg} \geq 1$ nm で飽和した。この結果から、 $t_{Mg} = 0$ nm では 0.3 nm 程度のデッドレイヤーが形成されており、 $t_{Mg} \geq 1$ nm においてはデッドレイヤーの形成がほぼ抑えられていることを確認した。

図 3 に (a) $t_{Mg} = 0$ nm, (b) $t_{Mg} = 0.5$ nm, 及び, (c) $t_{Mg} = 1$ nm における三端子ハンル測定の結果を示す。印加磁場 $H = \pm 3000$ Oe の測定範囲で観測されたシグナルはブローダーハンル (B-3TH) シグナルと呼ばれ、スピン注入とは関係ないシグナルである。図 3 に示すように t_{Mg} を増やすことで面内磁場 ($\theta = 0^\circ$) での B-3TH シグナル (赤線) 著しく減少した。

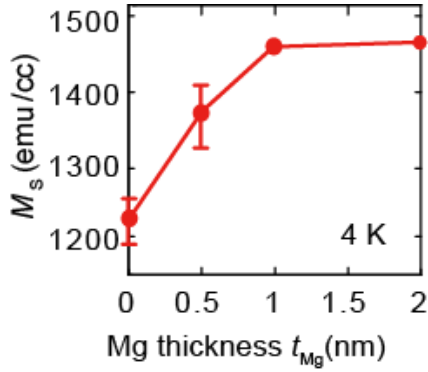


図2 Fe(3 nm)/MgO(0.8 nm)/Mg($t_{Mg}=0-2$)/Si 構造の飽和磁化 M_s の t_{Mg} 依存性。

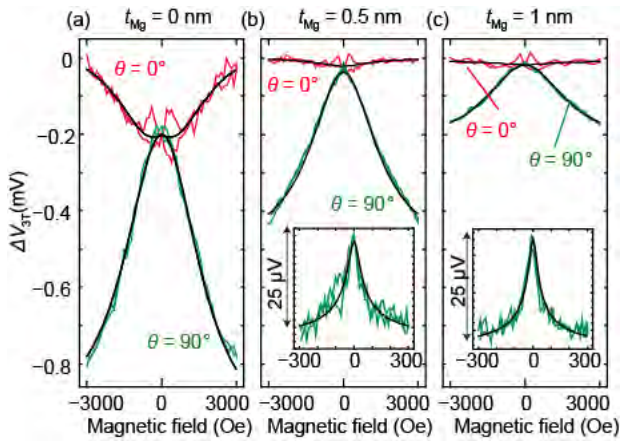


図3 縦型デバイスにおける三端子ハンルシグナルの t_{Mg} による違い。(a) $t_{Mg} = 0$ nm, (b) $t_{Mg} = 0.5$ nm, (c) $t_{Mg} = 1$ nm。(b), (c)内の inset は低磁場領域で観測されたナローハンルシグナル。(a)では明瞭なナローハンルは観測されなかった。

また、 $t_{Mg} = 0.5$ nm 以上では、低磁場領域においてナローハンル (N-3TH) シグナルと呼ばれる半導体中へのスピン注入に起因するシグナルが観測された。これらのシグナルの解析には以下の式を用いた[6]。

$$\Delta V^{B-3TH} = \Delta V_0^{B-3TH} \frac{(H \cos \theta + S)^2 + C^2}{(H \cos \theta + S)^2 + (H \sin \theta)^2 + B^2 + C^2}, \quad (1)$$

$$\Delta V^{N-3TH} = \Delta V_0^{spin} \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\gamma \tau_s H)^2}}{2 + 2(\gamma \tau_s H)^2} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \right], \quad (2)$$

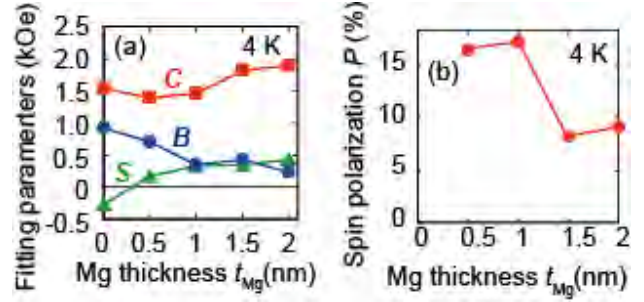


図4 (a) B-3TH シグナルのフィッティングにより得られた有効磁場 S, B, C の t_{Mg} 依存性。(b) N-3TH のフィッティングより得られたスピン注入効率 P の t_{Mg} 依存性。

ここで、 ΔV_0^{B-3TH} は B-3TH シグナルの振幅、 S, B, C はデッドレイヤー内の有効磁場を表すパラメーター、 $\Delta V_0^{spin} = J\rho\lambda_s P^2$ は N-3TH の振幅、 γ はジャイロ磁気定数、 λ_s は半導体中のスピン拡散係数、 τ_s はスピン寿命、 J は注入電流密度、 ρ は半導体中の抵抗率、 P はスピン注入効率である。デッドレイヤーモデルに基づく、 S, C は強磁性的、 B は常磁性的な内部磁場を表す[6]。フィッティング結果は図3中に黒線で示してある。得られた各パラメーを各 t_{Mg} について図4に示した。

挿入 Mg 膜厚 t_{Mg} を増やすに従い、強磁性的内部磁場 S, C は増大し、常時性的内部磁場 B は減少した。また $t_{Mg} = 0$ nm ではスピン注入に起因する N-3TH は観測されなかったが、 $t_{Mg} > 0.5$ nm では N-3TH は観測され、 $P = 8-15\%$ 程度の値が得られた。これらの結果はデッドレイヤーモデルと一致する。以上より、次のことが明らかになった。

- B-3TH は Fe/MgO 界面のデッドレイヤーに由来する。
- デッドレイヤーの存在によりスピン注入は阻害される。
- Fe/MgO 界面に Mg を挿入することで、デッドレイヤーが抑制でき、高効率スピン流入が実現可能となる。

III. 横型デバイスにおけるスピン輸送

シリコン中でのスピン輸送現象を評価するため、図5(a)(b)に示すような横型デバイスを作成し、四端子ハンル測定を行なった。デバイスは Silicon-on-insulator (SOI) 基板上に作成し、ドーピング濃度、及び磁気トンネル接合は図1に示す縦型デバイスと同様である。また t_{Mg} は 1 nm に固定した。より詳細な評価を行うため、図5(c)(d)に示すように三端子ハンルシグナルと四端子ハンルシグナルを同時に測定した。Setup I では短い電極 A からスピン注入し、長い電極 B でスピン検出を行う。Setup II ではそれぞれ逆に行い、シグナルの変化を確認する。

図6(a)(b)に三端子ハンルの結果を示す。B-3TH は同じ t_{Mg} の縦型デバイスの B-3TH (図2(c)) と

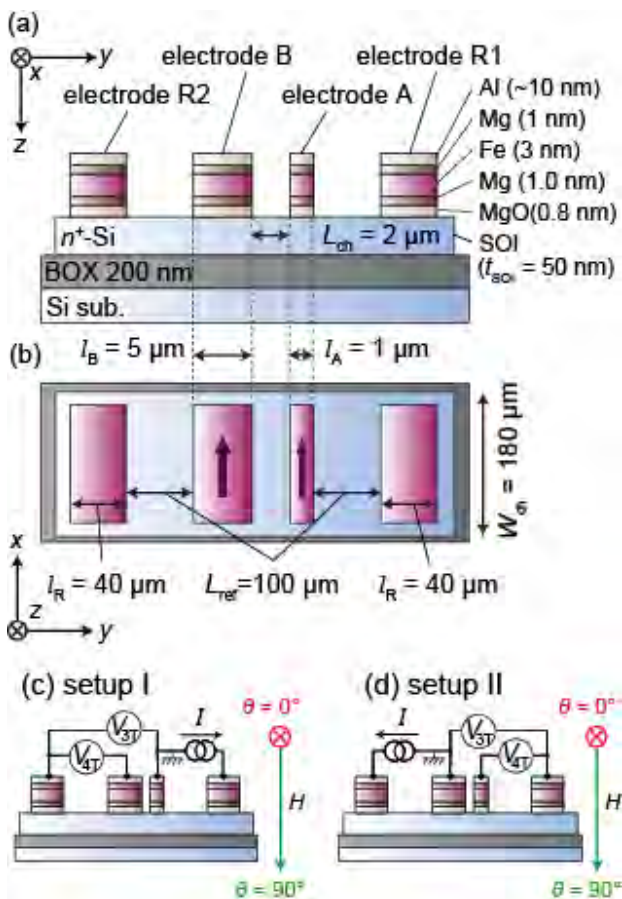


図5 (a)(b) 横型デバイスの(a)断面図と(b)上面図。電極 A, B はそれぞれ幅が異なる。(c)(d) 四端子ハンル測定の設定アップ(c) setup I, (d) setup II。

形状・大きさとも同様であり、これは縦型デバイスと同じくデッドレイヤーが抑制されていることを示している。一方で N-3TH は縦型デバイスと比較して著しく増大した。これは形状効果によるシグナルの変化と考えられ、詳しくは次章で評価を行うが N-3TH がシリコン中のスピン蓄積に由来することを示している。図6(c)(d)に各測定セットアップで得られた四端子ハンルシグナルを示す。これらの結果からスピン輸送の実現を確認した。

IV. 形状効果 (Geometrical effect) の定式化

デバイスの形状 (チャンネルの厚さや電極の長さ) によってスピン依存シグナルが変化するという理論的な予測は知られていたが、近似的な評価方法や数値計算による報告が主であり、実験的な検証も不十分であった[8-9]。前章で得られたスピン依存シグナルはデバイス形状による効果に大きく影響を受けていると考えられ、正確な表式が必要である。

本章ではスピンの従う拡散方程式から、形状効果を正確に取り入れたハンル効果の論理式を導出する。

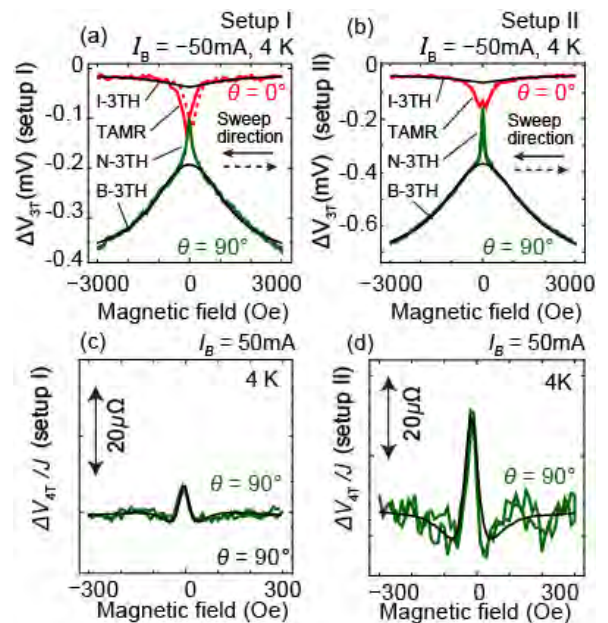


図6 横型デバイスで得られた(a)(b)三端子ハンルシグナルと(c)(d)四端子ハンルシグナル。(a)(c) setup I, (b)(d) setup II

図7に示したような半無限チャンネルにデルタ関数的スピンの注入が座標 $(x_0, y_0, 0)$ に存在する状況を考える。この時、スピンに関する拡散方程式は以下のように書ける。

$$D\nabla^2\hat{S} - \left(\frac{1}{\tau_s} + i\gamma H\right)\hat{S} + 2P\frac{Jdx_0dy_0}{q}\delta^3(x-x_0, y-y_0, z) = 0 \quad (3)$$

ここで D は電子の拡散係数で、スピンの歳差運動を虚数成分で表現している。スピニングナルは注入点からの距離 $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}$ 、及びスピン検出 $\Delta V = PqD\rho\text{Re}[\hat{S}(r, H)]$ を用いて、以下のようなになる。

$$\Delta V(r, H) = \Delta V_0^{spin} \text{Re}\left[\frac{dx_0dy_0}{2\pi\lambda_s} \frac{\exp(-\alpha r)}{r}\right] \quad (4)$$

ただし、 $\alpha = \sqrt{1 + i\gamma H\tau_s} / \lambda_s$ である。これはスピニングナルのグリーン関数であり、適切な境界条件のもと積分することで形状効果を取り入れたスピニングナルの一般式が得られる。なお、図1に示す縦型デバイスにおける N-3TH は式(2)と一致する結果が得られる。図5に示すような薄層チャンネルにおける N-3TH シグナルは、

$$\Delta V^{N-3TH} = \Delta V_0^{spin} \frac{\lambda_s}{t_{SOI}} \text{Re}\left[\frac{1}{1 + i\gamma H\tau_s} \left\{1 - \frac{1}{\alpha l'}(1 - \exp(-\alpha l'))\right\}\right] \quad (5)$$

また 4TH シグナルは、

$$\Delta V^{4TH} = \frac{\Delta V_0^{spin}}{2} \frac{\lambda_s}{t_{SOI}} \text{Re}\left[\frac{\exp(-\alpha L_{ch})(1 - \exp(-\alpha l^D))(1 - \exp(-\alpha l'))}{1 + i\gamma H\tau_s \alpha l^D}\right] \quad (6)$$

となる。これらの式を用いて横型デバイスでの N-3TH 及び 4TH を評価した結果、 $P = 6.6\text{--}12\%$ 、 $\tau_s = 1.3\text{--}2.3$ ns の値が得られた。これは縦型デバイスで得られた値 $P = 16\%$ 、 $\tau_s = 1.7$ ns とおおよそ一致する。このことから縦型、横型両デバイスで観測された N-3TH 及び 4TH はシリコンへのスピン注入に起因し、デバイス形状の違いによって見かけのシグナルの大きさが変化したものであることが実験的に確認された。

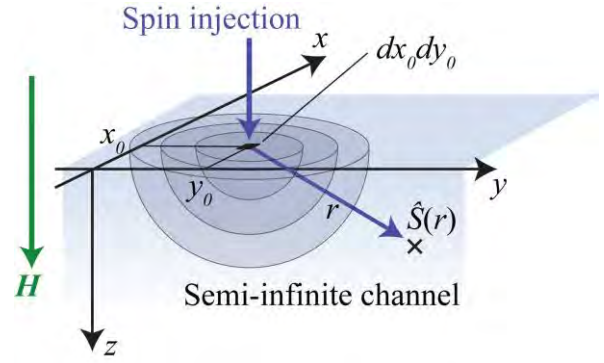


図7 半無限チャンネルへのデルタ関数的スピン注入の概略図。

V. 結論と総括

本研究ではシリコンへの高効率スピン注入とスピン蓄積現象について実験と理論から詳細な評価を行なった。Fe/Mg/MgO/Si 構造を用いた実験では、Fe/MgO 間のデッドレイヤーがスピン注入効率に大きく影響していることを明らかにした。またデバイス形状を取り入れた評価式を新たに導出し、縦型・横型デバイスにおけるスピニングナルの違いを定量的に説明した。これらの結果はスピン注入・蓄積現象を理解する上でのスタンダードになるだろう。

(文責：佐藤彰一、中根了昌、田中雅明)

-
- [1] S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **84**, 13 (2004).
 - [2] S. Sugahara and M. Tanaka, ACM Transactions on Strage **2**, 197 (2006).
 - [3] M. Tanaka and S. Sugahara, IEEE Trans. Electron Devices **54**, 961 (2007).
 - [4] R. Nakane, T. Harada, K. Sugiura, and M. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. **49**, 113001 (2010).
 - [5] T. Tahara, H. Koike, M. Kameno, S. Sasaki, Y. Ando, K. Tanaka, S. Miwa, Y. Suzuki, and M. Shiraiishi, Appl. Phys. Express **8**, 113004 (2015).
 - [6] S. Sato, R. Nakane, and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **107**, 032407 (2015).
 - [7] S. Sato, R. Nakane, T. Hada, and M. Tanaka, Phys. Rev. B. **96**, 235204 (2017).
 - [8] A. Fert and H. Jaffrès, Phys. Rev. B **64**, 184420 (2001).
 - [9] Y. Takamura, T. Akushichi, Y. Shuto and S. Sugahara, J. Appl. Phys. **117**, 17D919 (2015).

1. 背景

スピントロニクス分野では、電子の電荷とスピンの両方の性質を用いて、様々な機能を持つデバイスの研究および開発がなされている。その中で、最も良く研究が行われているスピントロニクスデバイスのひとつとして、磁気トンネル接合素子(MTJ: Magnetic Tunnel Junction)が挙げられる。MTJは強磁性体/絶縁体/強磁性体という3層構造を有しており、上下の強磁性体層の磁化の向きが平行か反平行かによって、素子のトンネル抵抗が異なる素子である。この2つの状態を0, 1に置き換えることにより、磁気ランダムアクセスメモリ等の様々な不揮発性デバイスへ応用することが可能である。これまでのMTJ素子の研究においては、強磁性体金属とトンネル酸化膜からなる多層構造が主に用いられてきた。これらの技術を、現在までに培われてきたIV族半導体技術と融合することができれば、応用の幅は格段に広がり、多様な研究、技術の創出につながると考えられる。また、MTJ素子のみに限らず、強磁性体金属とIV族半導体との融合デバイスとして、スピンMOSFETや、その他、不揮発性素子などが考案されている。それらの創出に向けて、強磁性体金属とIV族半導体とのハイブリッド構造を作製し、それらにおいて、どのような性質や特性が現れるのかを調べる必要がある。

2. 原理

2-1. トンネル磁気抵抗効果

トンネル磁気抵抗効果 (TMR: Tunneling Magneto Resistance) は、2つの強磁性体とそれらの間の薄い絶縁膜によって構成されるMTJにおいて、強磁性体同士の磁化の相対的な向きでトンネル抵抗が大きく変化する現象である。この現象は、強

磁性体におけるキャリアのスピン偏極によって生じる現象で、ハードディスクドライブの磁気ヘッドなどに応用されている。

2-2. トンネル障壁材料 MgO におけるスピントルター効果

単結晶 MgO は、MTJ 素子のトンネル障壁材料として広く利用されている。Fe などとエピタキシャルな界面を作製することが可能で、それらの強磁性金属薄膜中の 100%スピン偏極したバンド (Δ_1 バンド)を選択的にトンネルさせることが可能である[1,2]。そのため、MgO を用いた MTJ 素子では一般に高い TMR 比が得られる。

2-3. 強磁性体金属および MgO 系を用いた量子井戸二重障壁磁気トンネル接合

MgO 障壁に挟まれた極薄膜の強磁性体金属では、エネルギー準位が量子サイズ効果により離散化される。離散化された準位ではスピン偏極率が 100%であるため、この準位をキャリアが伝導することにより、巨大な TMR 効果が望める[3]。

3. 目的

本研究では Fe/MgO/Fe 量子井戸/MgO/Ge:B からなる 2 重障壁磁気トンネル接合素子を作製し、IV 族半導体である Ge:B から Fe 量子井戸にキャリア注入を行い、量子サイズ効果が得られるかを検証した[4]。量子サイズ効果は素子の界面の結晶性に大きく左右される。すなわち、上記素子において量子サイズ効果が観測されれば、IV 族半導体上に高品質の Fe/MgO/Fe MTJ 構造を作製できることを意味する。これは IV 族半導体と強磁性体多層膜構造の融合研究を進める上で、重要な知見となりうる。

4. 実験

分子線エピタキシー法(MBE)により p+-Ge(001) 基板の上に、二重障壁磁気トンネル接合素子 Co (20 nm)/ Fe (20 nm)/ MgO (3 nm)/ Fe QW (5.6–7.0 nm)/ MgO (2 nm)/ Ge:B (85 nm)/ p+-Ge(001)基板を作製した。括弧内は膜厚である。試料構造を図1に示す。作製方法は、まず洗浄した p+-Ge(001)基板を、MBE の成長室(base pressure: 8×10^{-9} Pa)へ移送する。つぎに前処理として、p+-Ge(001)基板を、基板温度 $T_s=300^\circ\text{C}$ で30分間アニールする。この処理により、表面についた不純物などが除去される。その後、 $T_s=700^\circ\text{C}$ で30分間アニールを行い、基板洗浄の過程で水素終端された界面から水素を除去することにより、Ge (2×2)の再構成界面が得られる。基板の熱処理が終わった後に、バッファ層である Ge:B を $T_s=300^\circ\text{C}$ で85 nm 成膜する。つぎに、バリア層である MgO を成膜する。MgO の成膜には電子ビーム蒸着を用いた。下部層の MgO は2 nm で、上部層は3 nm である。Fe 量子井戸層及び上部 Fe 電極層は、 $T_s=50^\circ\text{C}$ で成膜した。量子井戸層の膜厚は5.6~7.0 nm で、上部電極層は20 nm である。量子井戸層を成膜するとき、メインシャッターをモーターで動かし、基板の上に、膜厚を連続的に変化させた層を成膜している。各層ともに、平坦性を確保するため 200°C で30分間アニールを施した。後に示すように、アニールにより反射高速電子線回折(RHEED: Reflection High Energy Electron Diffraction) 像がスポットからストリークに変化し、平坦な界面が得られることがわかる。最後に Co 層を $T_s=50^\circ\text{C}$ で製膜する。これは上部 Fe 電極の保磁力を増加させるためである。

図2に、結晶成長中にその場観察して得られた RHEED 像を示す。ストリークなパターンが得られており、試料の各層がエピタキシャル成長していることがわかる。

図3に透過型電子顕微鏡 (TEM) による試料の断面像を示す。ここから、各層がエピタキシャル成長していることが確認できる。このとき、MgO

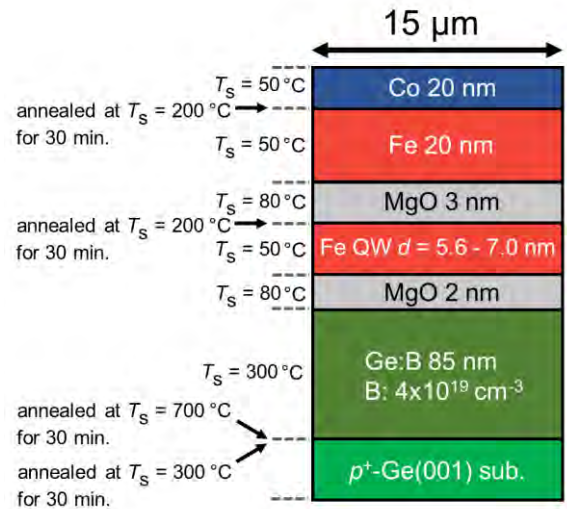


図1 成長した試料の断面構造

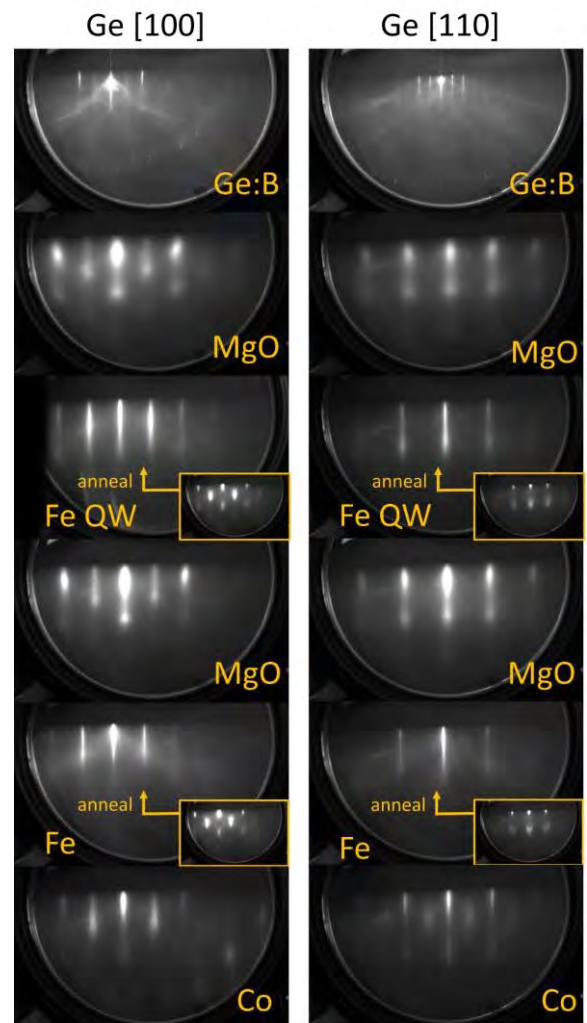


図2 成長中に得られた RHEED 像

などの層に穴（ピンホール）などの欠陥が多く存在すると、電子の位相が乱されてしまい、コヒーレントトンネルが起こらず量子効果が発現しない。

成長後の試料を、フォトリソグラフィ、Ar イオンミリング、SiO₂ のスパッタリング等により、半径 15 μm の円形メサに加工し、トンネル伝導特性や、磁場 (H) に対する依存性を調べた。

磁気伝導測定装置を用いて、試料のトンネル磁気抵抗効果(TMR)を測定した。TMR- H 曲線を図 4 に示す。横軸は印加磁場で、縦軸は RA (抵抗値×メサの面積)である。Fe 量子井戸層の膜厚は $d=6.4$ nm、電圧 V は -10 mV で、297 K および 3.5 K で測定を行った。このときキャリアの流れの向きは、Ge:B 層の正孔が Fe 量子井戸層へ注入される方向で、外部磁場 H は容易軸である試料面内の Fe[100]に印加している。図中の低磁場側の RA の飛び (3.5 K のとき $|H| \approx 0.01$ kG、および 297 K のとき $|H| \approx 0.01$ kG) は Fe 量子井戸層の反転磁化に対応し、高磁場側 (3.5 K のとき $|H| \approx 0.29$ kG、および 297 K のとき $|H| \approx 0.23$ kG) の方は Co 層により保磁力が増加した Fe 電極層の反転に対応する。本研究の試料では、297 K で TMR 比が 237%、3.5 K で 137% であった。これらの値は MgO 基板上 Fe/MgO/Fe 構造で得られている典型的な TMR 比 (室温で~180%) に匹敵する大きな値である。

図 5(a)に本試料の量子井戸層の膜厚 d を 5.7, 6.0, 6.4, 6.7 nm と変化させたときの、平行磁化状態の dI/dV - V 曲線を示す。このときの温度は 3.5 K である。正バイアス側が、縮退した Ge:B のフェルミ準位から、電子が Fe 量子井戸層へと正孔が流れる方向である。一方で負バイアス側は、Ge:B の正孔が Fe 量子井戸層へと注入される方向である。上向きの矢印は量子サイズ効果による微分コンダクタンスのピークを示している。このグラフから、量子化準位による微分コンダクタンスの振動が明瞭に現れていることが確認できる。また、同色の矢印は同じ量子化準位のピークを示しており、それが量子井戸層の膜厚の変化に応じて、移動して

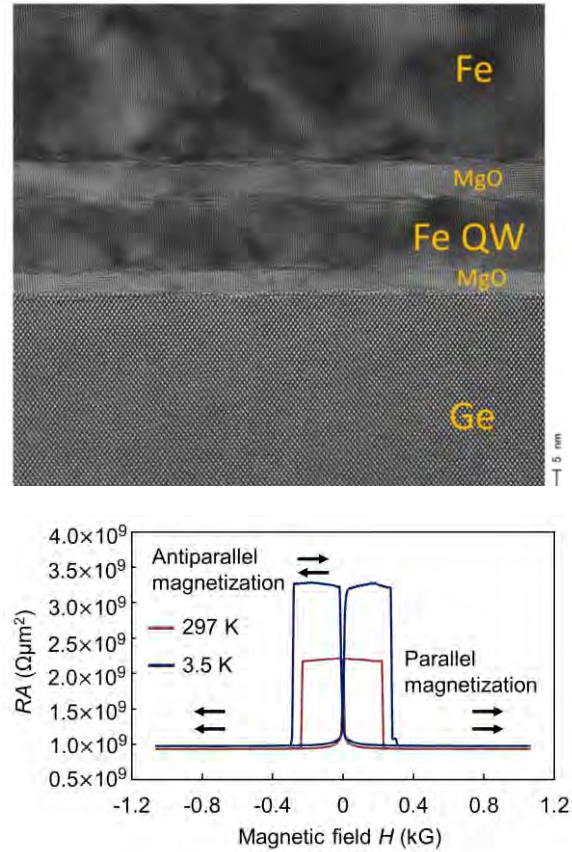


図 4 量子井戸層の膜厚 $d=6.4$ nm における、297 K、 $V=-10$ mV での、二重障壁磁気トンネル接合素子のトンネル磁気抵抗効果

いくさまが見て取れる。通常の量子井戸構造では、井戸層が薄いほどエネルギーの分裂幅が大きくなり、振動の強度も明瞭になると考えられる。しかしながら、図 5(a)を見てみると、最も量子井戸層が厚い $d=6.7$ nm の素子において、微分コンダクタンスの振動が一番明瞭に見えているのに対して、最も薄い $d=5.7$ nm の素子では、ピークの強度が他に比べて小さい。これは酸化物上の Fe の濡れ性の低さに起因して、薄い層ほど量子井戸の結晶性が低下しているからである。図 5(b) は試料の d^2I/dV^2 - V 特性である。こちらのグラフでは、より明瞭な量子振動を確認することができる。

図 6(a)に本構造のバンドダイヤグラムを示す。Ge:B 中の緑色の実線は、下側が価電子帯端 ($E_{v,Ge}$) であり、上側が伝導帯端 ($E_{c,Ge}$) である。破線は擬

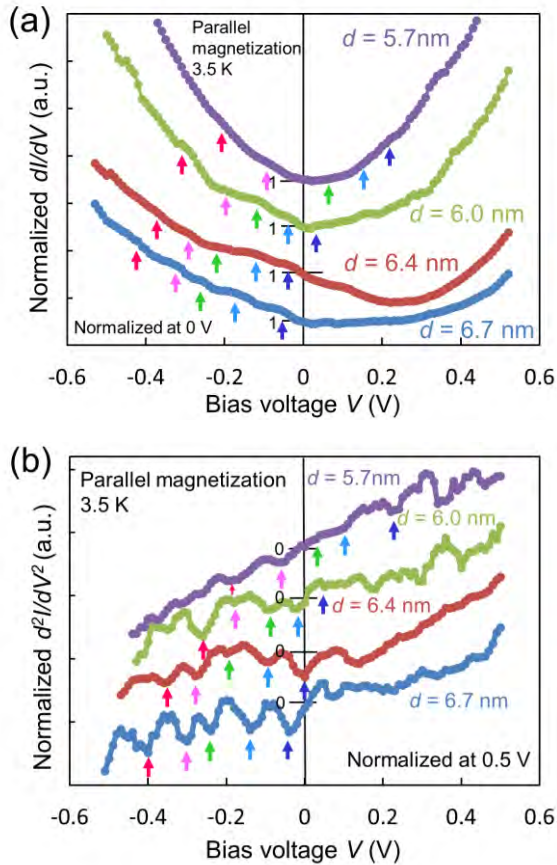


図 5 (a)(b) Fe 量子井戸二重障壁ヘテロ構造における dI/dV - V (a), d^2I/dV^2 - V 特性 (b)。

フェルミ準位で、Ge:B 側は $E_{F,Ge}$ で、Fe 側は $E_{F,Fe}$ と表されている。ここで Fe 量子井戸層中の赤い水平の線は、 Δ_1 バンドの量子化準位である (MgO のスピントラップ効果により、 Δ_1 バンドの伝導が支配的であることを考慮)。また、2 層の MgO を直列抵抗と考えたとき、Fe/MgO/Fe 構造よりも Fe/MgO/Ge:B 構造のほうが、抵抗値が高いため、すべての電圧は Ge:B 側の MgO に掛かると考える (図 6(b))。これらのことを考慮して、図 5 で得られた振動が量子サイズ効果に起因するものか調べるために、Phase Accumulation Model(PAM)によって計算を行った (図 6(c))。実線が計算結果であり、プロット点は実験結果である。両者がよく一致していることがわかる。従って、得られた dI/dV - V の振動は、量子サイズ効果に起因していると言える。

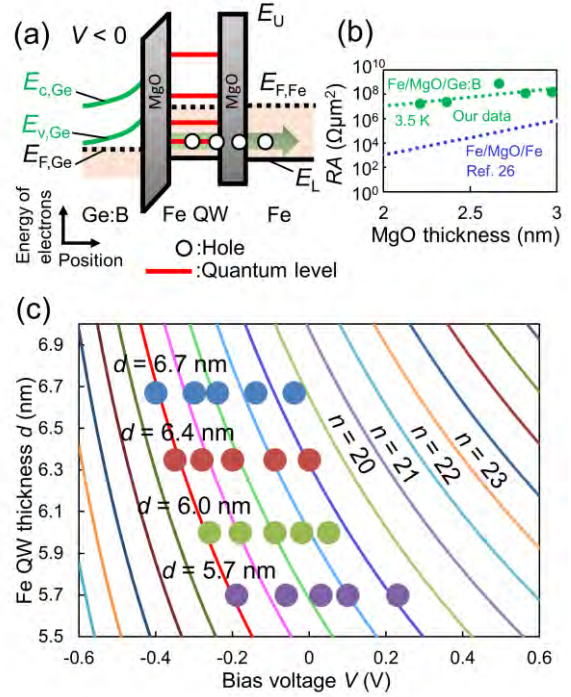


図 6 (a) 試料のバンドダイアグラム, (b) Fe/MgO/Fe および Fe/MgO/Ge:B の RA 対 MgO 膜厚依存性, (c) PAM による計算結果 (実線)

5. 結論

IV 族半導体 Ge 上に高い TMR 比を有する Fe 量子井戸二重障壁ヘテロ構造を作製し、量子サイズ効果の観測に初めて成功した。Ge 基板上の高品質な強磁性体ヘテロ構造を用いた新機能量子スピントラップの実現につながる有望な結果と言える。

(文責：鈴木亮太，田中雅明，大矢忍)

- [1] W. H. Butler *et al.*, Phys. Rev. B **53**, 054416 (2001).
- [2] J. Mathon *et al.*, Phys. Rev. B **63**, 220403 (2001).
- [3] Z.-Y. Lu and X.-G. Zhang, Phys. Rev. Lett. **94**, 207210 (2005).
- [4] R. Suzuki, Y. K. Wakabayashi, K. Okamoto, M. Tanaka, and S. Ohya, Appl. Phys. Lett. **112**, 152402 (2018).

イリジウム超伝導転移端センサマイクロカロリメータを用いた 光の単一光子検出に関する研究

1. 研究背景

超伝導転移端センサ (TES: Transition Edge Sensor) を適用した極低温マイクロカロリメータは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 線や γ 線のエネルギー spektrometers 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ており、X 線天文学や放射光分析等へ適用され始めている。

そして近年、TES の検出部を極小化し、光子の入射に対してさらに高い温度上昇を得ることにより、TES の感度を向上させる研究が進められている。米国 NIST では 10 μm 角のタングステン(W)製 TES を作成し、世界で初めて 1550 nm の波長領域での単一光子検出に成功した他、我が国の産総研においても福田等が 10 μm 角のチタン単層膜の TES を開発し、0.17 eV の超高エネルギー分解能を達成している。これらの成果は可視、赤外領域において単なる検出感度の向上のみならず、従来不可能であった精密な光子数識別、さらには単一光子での色情報の認識をも可能にし、光量子科学分野に大きなインパクトを与える画期的な成果として注目されている。[1][2][3]

本研究では TES の感度およびエネルギー分解能向上を目指して、140 mK で超伝導転移を示すイリジウム(Ir)から成る超伝導薄膜を極小化し、これを温度センサとして適用した TES の開発を目

指す。Ir はチタン(Ti)よりも低温で超伝導転移を示し、また W のように低温にて有する複数の結晶構造に起因した超伝導転移のばらつきを示さず、安定した転移状態を制御、維持できるため、良好な検出特性が期待される。本研究室ではこれまでに Ir を超伝導薄膜温度センサに用いた X 線や γ 線検出用 TES の開発を進め、優れた検出性能を達成している[4]。本研究ではこの優れた Ir-TES の特性を生かしつつ、TES ピクセルをさらに極小化することにより高感度特性の実現を目指す。近赤外・赤外領域において前述の先行研究例を凌ぐ精密な TES 単一光子検出技術が構築されれば、量子暗号通信や量子コンピュータ技術の発展に寄与することのみならず、THz 帯さらにはマイクロ波領域での高感度光子検出技術の確立へも道を開くものと考えられる。

2. これまでの研究成果

① 超伝導転移端センサ

TES は超伝導薄膜センサが熱リンクを介して外部の熱浴と接続される構造を持つ (図 1)。ここで超伝導薄膜センサに定電圧バイアスを印加し、

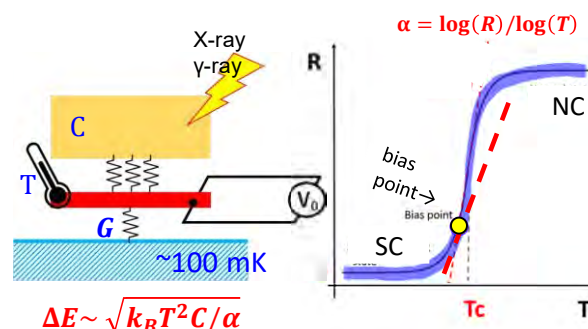


図 1: ETE-TES の動作原理

センサが超伝導転移領域内のある温度にて保持され、薄膜内で発生するジュール熱と、熱リンクを介して熱浴へ流れる熱量が釣り合う平衡状態を仮定する。このような系において、TESに光子が入射すると、温度が上昇し、それに伴い転移カーブに沿って抵抗値が急激に増大する。するとジュール発熱は定電圧バイアス下では抵抗に反比例して減少し、したがって系は冷える方向に負の熱的なフィードバック(ETF: Electro Thermal Feedback)が生じる。このようなETFが働くことによりセンサの温度は元のバイアス点へ急速に帰還することとなり、したがって急峻な温度抵抗変化を示す転移領域内においてセンサは安定してバイアスすることが可能となる(図2)。なおセンサの電流変化は磁束に変換されこれをSQUIDにより読み出すことにより低インピーダンスな信号増幅を行い読み出される[5]。

TESのエネルギー分解能は、センサの熱容量を C 、動作温度を T 、超伝導転移の傾きを表す温度感度を $d\log R/d\log T$ とすると

$$\Delta E_{FWHM} = 2.35 \sqrt{kT^2 C \sqrt{8n}/\alpha} \quad \dots \text{①}$$

で表される。ここで、 n は熱伝導のキャリアによって決まる定数であり、通常2~3をとる。①式より動作温度 T と熱容量 C を小さくすると高エネルギー分解能が得られることがわかる。

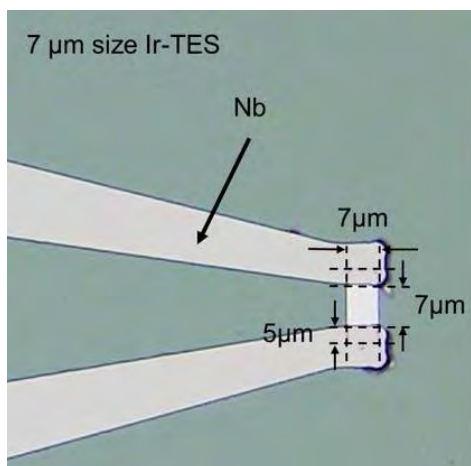


図2: 作成した極小イリジウムピクセル TES の顕微鏡写真

② TES素子の作製

TESの高感度化を実現するため、フォトマスクとマスクアライナを用いた微細加工精度の限界を考慮しつつ、超伝導センサに用いるIr薄膜の極小化を試み、最小7 μm角のIr単一膜センサの開発に成功した(図2)。Ir薄膜はマグネトロンスパッタリング法により成膜され、リソグラフィ、およびリフトオフ法により成型した。現在、国内外の多くのTES研究開発チームでは、Mo/Cu, Ti/Au等、超伝導層と常伝導層から成る近接2重層薄膜を適用し、超伝導膜の転移温度を100 mK近傍に低下させる手法を採用している。しかしこのような近接2重層を極小TESに導入すると、素子周辺部で生じる超伝導電流増加に伴うエッジ効果が発生し、センサ全域でETFによる安定した動作が実現されないことが予想される。本研究では、この難題を克服するべく、単一超伝導薄膜にて140 mKに超伝導転移を示すIr薄膜を用いることにより、センサを極小化しても100 mK近傍で安定した超伝導転移状態が得られるものと考えている。

③ 電流電圧特性評価

試作したIr-TES素子とSQUIDを用いた信号読み出し回路を希釈冷凍機のコールドステージに組み込み、100 mKまで冷却した。まず、素子の超伝導転移特性を調べたところ、試作した7 μm角素子は290 mK付近にて超伝導転移を示すことが明らかになった。

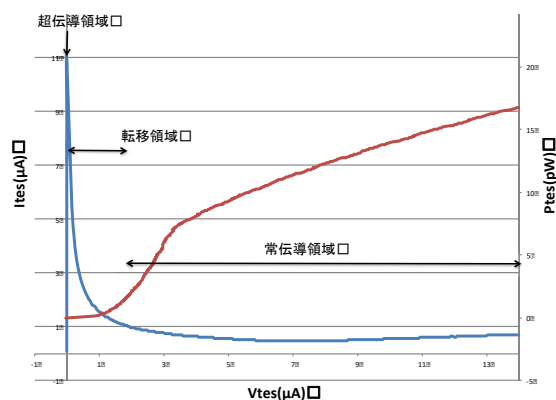


図3: 極小イリジウム TES の電流電圧特性

次に冷凍機のコールドステージの温度を 150 mK で安定化させ、検出素子の電流・電圧特性を評価したところ、図 3 に示す I-V 特性が得られた。I-V 曲線とは、TES に流れる電流（縦軸）と TES に印加される電圧（横軸）の関係を表す。本素子では 7.5 μV 以上において、電圧と電流が比例する領域が確認され、これより常伝導抵抗値は 24 Ω であることが確認された。そして 0.46 μV 以下のバイアス電圧において、電流と電圧は反比例する領域が出現し、この領域において素子の消費電力は一定となり、ゆえに超伝導転移領域内において ETF が働き、TES が安定して動作することが確認された。さらにこの I-V 特性から素子の ETF 動作中の実効的な抵抗値 R と転移温度 T_c を求め、その結果温度感度 α は 26.8 と得られた。

④ 光応答

現在、可視光および近赤外領域の光子を TES に照射してその応答特性を評価しているところである。まず、ANDO 社製の光源と AQ2140 オプティカルマルチメーターのユニットから光ファイバー（シングルモード）を介して冷凍機内コールドステージ上の TES にレーザー光を導き、照射する実験環境を構築した。そして波長 1310 nm のレーザー光をチョッパー上に発生させ、TES の応答を観察したところ、チョッパーの周期に合わせて TES のベースラインが大きく変動し、TES が光入射に対して応答していることがわかった。さらに光ファイバ接続部を適宜調整することにより、導入する光量を徐々に減光したところ、ベースラインの変動幅は小さくなり、やがてベースラインの変動は離散的かつ比較的波高値のそろったパルス状の信号に変化していくことが確認された。今後、確認された応答波形が、1330 nm 領域の単一光子入射に対応するものかについて、I-V 特性評価で得た α 等を用いた TES の電流感度の評価とも照合しつつ精査していく。

3. 今後の展望

本研究では単一光子検出の感度向上を目指して 7 μm 角の極小 Ir- TES を作製した。素子は $T_c = 290$ mK で超伝導転移を示し、ETF による安定した動作が確認された。さらに 1310 nm 波長の光入射実験により光入射応答を得るに至った。

高エネルギー分解能の実現には、 T_c の低減と α の増大が重要であるが、本研究では Ir のバルクの転移温度 140 mK に対して素子の転移温度は 290 mK となり、また実効的な α も 26.8 にとどまった。この原因として、狭小 TES において転移温度 9.5 K を有する Nb 電極に挟まれる構造に起因し、Nb が極小 Ir 膜の超伝導特性に影響を及ぼすことが考えられる。先行研究である Ti- TES においても、Ti の転移温度は 390 mK であるが、5 μm TES で $T_c = 416$ mK、10 μm TES で $T_c = 409$ mK と同様の傾向が明らかになっている。今後、Nb 電極の影響を抑制するため、Nb 電極の膜厚や形状を最適化し、低 T_c 、高 α を達成すると共に、1550 nm 領域における光入射での高感度な単一光子入射応答の実証を目指す。

-
- [1] A. E. Lita, A. J. Miller and S. W. Nam. “Energy collection efficiency of tungsten transition-edge sensors in the near-infrared” *Journal of Low Temperature Physics*, 151, 125–131(2008)
 - [2] D. Fukuda, G. Fujii, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, R. M. T. Damayanthi, H. Takahashi, S. Inoue and M. Ohkubo. “High speed photon number resolving detector with titanium transition edge sensor” *Journal of Low Temperature Physics*, 151, 100–105 (2008)
 - [3] D. Fukuda, G. Fujii, T. Numata, K. Amemiya, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, H. Fujino, H. Ishii, T. Itatani, S. Inoue and T. Zama, “Titanium-based transition-edge photon number resolving detector with 98%

detection efficiency with index-matched small-gap fiber coupling” Opt Express. 2011 Jan 17;19(2):870-5 (2011)

[4] M. Ohno, T. Irimatsugawa, H. Takahashi, C. Otani, T. Yasumune, K. Takasaki, C. Ito, T. Ohnishi, S. Koyama, S. Hatakeyama and R. M. T. Damayanthi, “Superconducting Transition Edge Sensor for Gamma-Ray

Spectroscopy” , IEICE TRANSACTIONS on ELECTRONICS, Invited Paper, Vol.E100-C No.3 pp.283–290 (2017)

[5] K. D. Irwin, G. C. Hilton, D. A. Wollman, and John M. Martinis, “X-ray detection using a superconducting transition-edge sensor microcalorimeter with electrothermal feedback” Applied Physics Letters 69, 1945 (1996)

平成29年度共同利用成果発表リスト

理学系研究科・化学専攻 大越研究室

1. "Achieving white light emission and increased anisotropic energy barrier by transition metal substitution in dinuclear Dy^{III}(4-pyridone)[M^{III}(CN)₆]³⁻ (M = Co, Rh) molecules"
J. Wang, S. Chorazy, K. Nakabayashi, B. Sieklucka, and S. Ohkoshi
J. Mater. Chem. C, 6, 473–481 (2018). (Highlighted as Back Cover Picture)
2. "Magnetizaion induced second harmonic generation on pentacyanidonitrosylmolybdate-based piezoelectric ferromagnet"
M. Komine, K. Imoto, Y. Miyamoto, K. Nakabayashi, and S. Ohkoshi
Eur. J. Inorg. Chem., 1367–1370 (2018). (Highlighted as Cover Picture and Very Important Paper)
3. "Chiral Ln^{III}(tetramethylurea)-[W^V(CN)₈] coordination chains showing slow magnetic relaxation"
O. Stefańczyk, A. M. Majcher, K. Nakabayashi, and S. Ohkoshi
Cryst. Growth Des., 18, 1848–1856 (2018).
4. "Antiferromagnetic exchange and long-range magnetic ordering in the supramolecular networks constructed of hexacyanido-bridged Ln^{III}(3-pyridone)-Cr^{III} (Ln = Gd, Tb) chains"
S. Chorazy, M. Rams, M. Wyczęsany, K. Nakabayashi, S. Ohkoshi, and B. Sieklucka
Cryst. Eng. Comm., 20, 1271–1281 (2018).
5. "Second harmonic and terahertz generation in a Prussian-blue-analog"
A. Ould-Hamouda, A. Iazzolino, H. Tokoro, S. Ohkoshi, and E. Freysz
Eur. J. Inorg. Chem., 378–384 (2018).
6. "Probing transient photoinduced charge-transfer in Prussian Blue Analogues with time-resolved XANES and optical spectroscopy"
S. Zerdane, M. Cammarata, L. Balducci, R. Bertoni, L. Catala, S. Mazerat, T. Mallah, M. N. Pedersen, M. Wulff, K. Nakagawa, H. Tokoro, S. Ohkoshi, and E. Collet
Eur. J. Inorg. Chem., 272–277 (2018).
7. "Fine Tuning of Multicolored Photoluminescence in Crystalline Magnetic Materials Constructed of Trimetallic Eu_xTb_{1-x}[Co(CN)₆] Cyanido-Bridged Chains"
S. Chorazy, K. Kumar, K. Nakabayashi, B Sieklucka, and S. Ohkoshi
Inorg. Chem., 56, 5239–5252 (2017).
8. "Octahedral Yb(III) complexes embedded in [Co^{III}(CN)₆]-bridged coordination chains: combining sensitized near-infrared fluorescence with slow magnetic relaxation"
S. Chorazy, M. Rams, J. Wang, B. Sieklucka, and S. Ohkoshi
Dalton Trans., 46, 13668–13672 (2017). (Highlighted at Inside Cover Picture)
9. "Modulation of Fe^{II} spin crossover effect in the nanosized {Fe₉[M(CN)₈]₆} (M = Re, W) clusters by facial coordination of tridentate polyamine ligand"
S. Chorazy, J. J. Stanek, J. Kobylarczyk, S. Ohkoshi, B. Sieklucka, and R. Podgajny
Dalton Trans., 46, 8027–8036 (2017).
10. "Metal-substitution effect in a cyanido-bridged three-dimensional spin-crossover system"
K. Imoto, S. Takano, and S. Ohkoshi
Inorganics, 5, 63 (2017).
11. 大越慎一, “イプシロン型-酸化鉄の磁気テープへの応用”, 日本磁気学会 第 218 回研究会, 中央大学駿河記念館 (東京都千代田区), 2018 年 5 月 18 日.
12. 大越慎一, “日本発の新ナノ材料: 高性能ハードフェライト~ありふれた元素からなる新機能酸化物材料! 基礎原理から応用まで~”, 技術講演会, アイシン・エイ・ダブリュ技術センター (愛知県安城市), 2018 年 3 月 30 日.
13. 大越慎一, “固体物理化学に立脚した機能性相転移物質の研究”, 研究報告会, アイシン・エイ・

ダブリュ技術センター（愛知県安城市），2018年3月30日。

14. S. Ohkoshi, “From the world smallest ferrite magnet to flexible light-induced spin-crossover magnets”, Scientific Seminar, Oxford (UK), March 19th, 2018.
15. S. Ohkoshi, “Design and development of novel functional metal oxide nanoparticles”, 23rd International Conference on Nanomaterials and Nanotechnology, London (UK), March 16th, 2018. (Plenary Lecture)
16. S. Ohkoshi, “New phenomena and functionalities on metal complexes and metal oxide materials”, International Conference on Nanomaterials and Nanochemistry (Nanochemistry 2017), Atlanta (USA), November 29th, 2017. (Keynote Lecture)
17. A. Namai, M. Yoshikiyo, S. Ohkoshi, “Large coercive field and high-frequency millimeter wave absorption in metal-substituted ϵ -iron oxide nanomagnet”, International Conference on Nanomaterials and Nanochemistry, Atlanta (USA), November 29th, 2017. (Keynote Lecture)
18. 大越慎一, “固体物理化学に立脚した機能性相転移物質の研究—キラル光磁性から高性能フェライト磁石および蓄熱セラミックスまで—”, 名古屋大学リーディング大学院 IGER グリーン自然科学レクチャー, 野依記念学術交流館（愛知県名古屋市）, 2017年11月16日。
19. 大越慎一, “光磁性錯体の合成とその新機能”, 第5回豊田理研ワークショップ「スピン秩序の動的制御」, トヨタ産業技術記念館（愛知県名古屋市）, 2017年10月19日。
20. S. Ohkoshi, “Advanced functional metal complex materials exhibiting photo-induced charge-transfer phase transition”, Impacting materials with light and electric fields and watching real time dynamics (IM-LED), Tokyo (Japan), June 1st, 2017.
21. 大越慎一, 第28回向井賞を受賞, 2017年5月29日。
22. 科学新聞 2018.3.16 (10面) “イプシロン酸化鉄を用いた高密度磁気テープ記録方式”
23. 日経産業新聞 2018.1.25 (5面) “結晶構造 計算で予測 東大など、蓄熱材料の発掘効率化”
24. 化学工業日報 2018.1.15 (1面) “東大—筑波大 固体物質の相転移現象を計算科学で予測”
25. 日本経済新聞電子版 2018.1.11 “東大と筑波大, 固体物質での相転移現象がコンピューター計算で理論的に予測可能であることを発見”
26. 日経産業新聞 2017.9.26 (8面) “フェライト磁石性能向上 東大、保磁力高く”
27. 日経産業新聞 2017.9.14 (8面) “テラヘルツ光でセシウム検出 東大”
28. 科学新聞 2017.9.8 (4面) “非接触でセシウムイオン検出 テラヘルツ光用いた手法開発”
29. 日刊工業新聞 2017.8.25 (27面) “遠距離の放射性セシウム テラヘルツ光で検出”
30. 日刊工業新聞 2017.5.30 “向井賞に大越氏”

(他、論文等12件、発表等49件、報道等7件)

工学系研究科・電気系工学専攻 田中・田畑・高木・大矢研究室

1. Iriya Muneta, Toshiki Kanaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka
“Artificial control of the bias-voltage dependence of tunnelling-anisotropic magnetoresistance using quantization in a single-crystal ferromagnet”
Nature Communications 8, 15387/1–8 (2017).
2. Tatsuya Matou, Kento Takeshima, Le Anh, Munetoshi Seki, Hitoshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya,
“Reduction of the magnetic dead layer and observation of tunneling magnetoresistance in $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ -based heterostructures with a LaMnO_3 layer”
Appl. Phys. Lett. 110, pp.212406/1–4 (2017).
3. Hiroshi Terada, Shinobu Ohya, Le Duc Anh, Yoshihiro Iwasa, and Masaaki Tanaka,

- “Magnetic anisotropy control by applying an electric field to the side surface of ferromagnetic films”
Scientific Reports 7, pp.5618/1–7 (2017).
4. Le Duc Anh, Noboru Okamoto, Munetoshi Seki, Hiroshi Tabata, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya,
“Hidden peculiar magnetic anisotropy at the interface in a ferromagnetic perovskite-oxide heterostructure”
Scientific Reports 7, pp.8715/1–7 (2017).
 5. 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, Ryosho Nakane
“Electronic structure and magnetic properties of magnetically dead layers in epitaxial $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}(111)$ films studied by X-ray magnetic circular dichroism”
Phys. Rev. B 96, pp.104410/1–11 (2017).
 6. Shinobu Ohya, Akiyori Yamamoto, Tomonari Yamaguchi, Ryo Ishikawa, Ryota Akiyama, Le Duc Anh, Shobhit Goel, Yuki K. Wakabayashi, Shinji Kuroda, and Masaaki Tanaka
“Observation of the inverse spin Hall effect in the topological crystalline insulator SnTe using spin pumping”
Phys. Rev. B 96, pp.094424/1–5 (2017).
 7. Shoichi Sato, Ryosho Nakane, Takato Hada, and Masaaki Tanaka
“Spin injection into Si in three-terminal vertical and four-terminal lateral devices with Fe/Mg/MgO/Si tunnel junctions having an ultrathin Mg insertion layer”
Phys. Rev. B 96, pp.235204/1–10 (2017).
 8. Kosuke Takiguchi, Yuki K. Wakabayashi, Kohei Okamoto, Masaaki Tanaka, and Shinobu Ohya
“Fe concentration dependence of tunneling magnetoresistance in magnetic tunnel junctions using group-IV ferromagnetic semiconductor GeFe”
AIP Advances 7, 105202/1–6 (2017).
 9. Hirokatsu Asahara, Toshiki Kanaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka
“Large spin-valve effect in a ferromagnetic-semiconductor GaMnAs-based lateral spin-valve device”
Appl. Phys. Express 11 pp.033003/1–4 (2018).
 10. Le Duc Anh, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka
“Electrical tuning of the band alignment and magnetoconductance in an n type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As-based spin-Esaki diode”
Appl. Phys. Lett. 112, pp.102402/1–4 (2018).
 11. 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).
 12. 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, 6901/1–6 (2018).
 13. C.-Y. Chang, C. Yokoyama, M. Takenaka, Member, IEEE and S. Takagi
“Impact of $\text{La}_2\text{O}_3/\text{InGaAs}$ MOS Interfaces on the Performance of InGaAs MOSFETs”
IEEE Trans. Electron Devices, vol. 64, No. 6, p. 2519–2525 (2017).
 14. C.-Y. Chang, K. Endo, K. Kato, M. Takenaka and S. Takagi
“Modulation of sub-threshold properties of InGaAs MOSFETs by La_2O_3 gate dielectrics”
AIP Advances, 7, 095215 (2017).

15. T. Gotow, M. Mitsuhashi, T. Hoshi, H. Sugiyama, M. Takenaka and S. Takagi
 “Effects of impurity and composition profiles on electrical characteristics of GaAsSb/InGaAs hetero-junction vertical tunnel field effect transistors”
 J. Appl. Phys. 122, 174503 (2017).
16. “Iron Ores and Iron Oxide Materials” (Chapter 1: Iron Oxide Epitaxial Thin Films for Solar Energy Harvesting 分担執筆)
 M. Seki, Intech Open, 2018年2月出版
17. 「磁性材料の最新開発事例と各種応用技術」(第8章1節 室温光・磁気・電子機能素子応用に向けた酸化鉄単結晶薄膜の磁気制御 分担執筆)
 関 宗俊、足立 真輝、山原 弘靖、田畑 仁、2018年3月出版
18. H. Tabata(invited)
 “Functional Hybridised Oxide Semiconducting Sensors for Wearable Health Condition Monitoring”
 2017 Tsinghua University-University of Tokyo Joint Symposium on Multidiscipline, Beijing, China, 2017.4.15
19. S. Ohya, I. Muneta, T. Kanaki, H. Terada, and M. Tanaka (invited)
 “Spin transistors and novel spin-related quantum phenomena obtained with ferromagnetic semiconductors”
 3rd Computational Chemistry (CC) Symposium -The main symposium of ICCMSE 2017-, Thessalonki, Greece, 21–25 April 2017.
20. H. Tabata (invited)
 “酸化物エレクトロニクスと強誘電体 —歴史的経緯とその関わり—”
 The 34th Meeting on Ferroelectric Materials and Their Applications(FMA34), Kyoto, Japan, 2017.6.1
21. Le Duc Anh, Nguyen Thanh Tu, Pham Nam Hai, and Masaaki Tanaka (invited)
 "Fe-based narrow-gap ferromagnetic semiconductor: New materials for high-performance spintronic devices"
 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2017, Jeju Island, Korea, June 26–30, 2017.
22. H. Tabata (invited)
 “Noble functionalities created by "Yuragi/Fluctuation" in strongly correlated electron compounds”
 2017 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2017), Gyeongju, Korea, 2017.7.4
23. H. Tabata (keynote)
 “New electronic devices for low power consumption by learning from bio system”
 The 14th International Symposium on Sputtering and Plasma Processes (ISSP2017), Kanazawa, Japan, 2017.7.7“
24. H. Tabata (keynote)
 “Ferrite Oxide Engineering for Solar Energy Harvesting and Spin-based Electronics”
 The Core-to-Core Workshop, INSA, Lyon, France, 2017.7.8
25. H. Tabata (keynote)
 “High Resolved Bio-signal Monitoring by Oxide Semiconducting and THz Wave Techniques”
 UT-SNU Workshop, Seoul, Korea, 2017.7.31
26. Pham Nam Hai, Tomohiro Ostuka, Munehiko Yoshida, Nguyen Thanh Tu, Le Duc Anh, and Masaaki Tanaka (invited)
 "Fe-doped ferromagnetic semiconductors for high-performance semiconductor spin devices"
 29th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS 2017), Matsue, Japan, July 31–August 4, 2017.

27. Masaaki Tanaka (invited)
 “Control of Ferromagnetism and Transport by Material Growth and Wavefunction Engineering in Ferromagnetic Semiconductors and Heterostructures”
 Spintronics X, Symposium: OP17N SPIE Nanoscience + Engineering, Paper No.: OP115-21, San Diego, USA, August 6–10, 2017.
28. H. Tabata, M. Adachi, H. Yamahara, M. Seki (keynote)
 “Spin Fluctuated Garnet Ferrites for Brain Mimetic Memory Devices”
 IUMRS-ICM 2017(the 15th International Conference on Advanced Materials), Kyoto, Japan, 2017.8.28
29. T. Katoh, R. Matsumura, R. Takaguchi, M. Takenaka, and S. Takagi
 “Performance enhancement of GOI tunneling FETs with source junctions formed by low energy BF₂ ion implantation”
 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), PS-3-02 (2017) pp. 743–744, 19–22 Sept. 2017, Sendai International Center, Sendai, Japan
30. Masaaki Tanaka (invited)
 “Recent progress and topics in semiconductor spintronics and ferromagnetic semiconductors”
 Junjiro Kanamori Memorial International Symposium —New Horizon of Magnetism—, Koshiba Hall at the University of Tokyo, September 27–29, 2017.
31. Iriya Muneta, Hiroshi Terada, Toshiki Kanaki, Shinobu Ohya, and Masaaki Tanaka (invited)
 “Sudden restoration of the band ordering associated with the ferromagnetic phase transition and magnetic anisotropy control using the quantum size effect in a ferromagnetic semiconductor”
 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (2017 MMM), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, November 6–10, 2017.
32. Masaaki Tanaka (invited)
 “Recent progress and topics in semiconductor spintronics and ferromagnetic semiconductors”
 5th International Meeting on Frontiers of Physics (IMFP2017), Pullman Kuala Lumpur Bangsar, Kuala Lumpur, Malaysia, December 3(Sun)–7(Thur), 2017.
33. C. Yokoyama, C.-Y. Chang, M. Takenaka, and S. Takagi
 “Pre-cleaning Effects for Al₂O₃/p-In_xGa_{1-x}As MOS Interfaces”
 48th IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference (SISC), 5.9, Bahia Resort Hotel, San Diego, December 6–9 (2017)
34. 大矢忍、宗田伊理也、金木俊樹、寺田博、田中雅明（招待講演）
 “スピントランジスタの原理動作実証に向けた材料開拓と新規物性探索”
 平成 29 年度磁性材料研究会「スピントロニクスによるデバイス開発の最前線」、エッサム神田ホール、2017 年 10 月 12 日(木)。
35. レデウックアイン、グエンタントゥ、ファムナムハイ、田中雅明（招待、基調講演）
 “狭ギャップ強磁性半導体とヘテロ構造の作製と機能物性”
 第 1 回 CSRN-Tokyo Workshop 2017「新しいスピントロニクス機能材料の開発とその物性制御」東京大学本郷キャンパス、2017 年 10 月 27 日（金）～28 日（土）。
36. 田中雅明（招待講演）
 “強磁性半導体の最近の進展とスピントロニクス・デバイス”
 日本学術振興会 分子系の複合電子機能第 181 委員会 第 29 回研究会「スピントロニクスの最前線」、東京大学本郷キャンパス工学部 2 号館、2018 年 3 月 26 日–27 日
37. 坂本祥哉 2017 年 9 月 6 日
 応用物理学会スピントロニクス研究会第 6 回英語講演奨励賞
38. レデウックアイン (Le Duc Anh) ベストプレゼンテーションアワード 2018 年 2 月 21 日
 第 9 回低温センター研究交流会、O-08, 東京大学本郷キャンパス伊藤国際学術研究センター、

2018年2月20日-21日.

39. 宗田伊理也 2018年3月19日
第9回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会研究奨励賞
40. 金木俊樹 2018年3月19日
応用物理学会スピントロニクス研究会第7回英語講演奨励賞
41. 東京大学電気系工学専攻優秀博士論文賞 専攻長賞 金木俊樹 2018年3月22日
“Fabrication and spin-dependent transport of spin field-effect transistors: Vertical spin field-effect transistors (V-Spin-FETs) and current-in-plane spin-valve field-effect transistors (CIP-SV-FETs) (スピン電界効果トランジスタの作製とスピン依存電動特性: 縦型スピン電界効果トランジスタと面内伝導型スピバルブ電界効果トランジスタ)”
42. 2017年5月23日, 東大、バンドエンジニアリングを用いて磁性を人工的に制御できる可能性を開拓, 日本経済新聞 (電子版 速報、プレスリリース),
http://www.nikkei.com/article/DGXLRS445817_T20C17A5000000/
43. 2017年5月25日, 東大、バンドエンジニアリングで磁性制御の可能性を証明,
OPTRONICS ONLINE, <http://www.optronics-media.com/news/20170525/46831/>
44. 2017年5月24日, 【注目プレスリリース】バンドエンジニアリングを用いて磁性を人工的に制御できる新たな可能性を開拓, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/articles/view/58698>
45. 2017年5月30日, 東大、バンドエンジニアリングと量子閉じ込め効果を用いた磁化制御を実証, マイナビニュース テクノロジー, <http://news.mynavi.jp/news/2017/05/30/114/>
46. 2017年5月, 東大、バンドエンジニアリングと量子閉じ込め効果を用いた磁化制御を実証, ESTART 注目記事, <http://start.jword.jp/topics/link/1041629/business>

(他、論文等7件、発表等100件)

工学系研究科・原子力国際専攻 高橋研究室

1. “Superconducting Transition Edge Sensor for Gamma-ray Spectroscopy”,
Masashi Ohno, Tomoya Irimatsugawa, Hiroyuki Takahashi, Chiko Otani, Takashi Yasumune, Koji Takasaki, Chikara Ito, Takashi Ohnishi, Shin-ichi Koyama, Shuichi Hatakeyama, R.M. Thushara Damayanthi,
IEICE TRANSACTIONS ELECTRONICS, INVITED PAPER, E100-C No.3, 283–290,
2017
DOI: 10.1587/transele.E100.C.283
2. Calorimetry of Heavy Charged Particle by superconducting transition edge sensor (oral)
M. Ohno (T. Irimatsugawa, Y. Miura H. Takahashi, T. Ikeda, C. Otani, M. Sakama, N. Matsufuji)
17th International Workshop on Low temperature Detectors, 2017/7/17–21, Kurume City Plaza in Kurume city, Fukuoka Japan
3. Detection of a Gamma-ray Photon with a TES based on Microwave SQUID multiplexer (poster)
T. Irimatsugawa, (F. Hirayama, H. Yamamori, S. Kohjiro, A. Sato, S. Nagasawa, D. Fukuda, M. Hidaka, Y. Sato, M. Ohno, and H. Takahashi)
17th International Workshop on Low temperature Detectors, 2017/7/17–21, Kurume City Plaza in Kurume city, Fukuoka Japan
4. Development of a small pixel Ir-¹⁰⁰TES for optical applications (poster)
Y. Miura, (T. Irimatsugawa, Y. Ishii, M. Ohno, H. Takahashi)
17th International Workshop on Low temperature Detectors, 2017/7/17–21, Kurume City Plaza in Kurume city, Fukuoka Japan
5. 極小ピクセル Ir-¹⁰⁰TES の開発および評価
三浦 義隆、(入松川 知也、寺内 大貴、大野 雅史、高橋 浩之)

- 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018/3/17-20, 早稲田大学西早稲田キャンパス
6. マイクロ波多重読出し回路の共振器 Q 値と作製プロセス
山森 弘毅、(入松川 知也、中島 裕貴、平山 文紀、佐藤 昭、神代 暁、永沢 秀一、日高 睦夫、藤井 剛、大野 雅史)
第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018/3/17-20, 早稲田大学西早稲田キャンパス
 7. 超伝導転移端センサによる重粒子線カロリメトリ
大野 雅史、(松藤 成弘、坂間 誠、池田 時浩、入松川 知也、三浦 義隆、高橋 浩之)
第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017/9/5-8, 福岡国際会議場
 8. TES マイクロ波読出による γ 線分光測定の実証
入松川 知也、(平山 文紀、佐藤 昭、山森 弘毅、永沢 秀一、福田 大治、日高 睦夫、佐藤 泰、神代 暁、大野 雅史、高橋 浩之)
第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017/9/5-8, 福岡国際会議場
 9. 日本学術振興会 超伝導エレクトロニクス第 146 委員会賞 大野雅史 (平成 29 年 4 月 20 日)

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、超高速レーザー・テラヘルツ分光の手法を用いて、凝縮系における光と物質の相互作用の解明、光励起によって発現する多体の量子現象、量子凝縮相の探求に取り組んでいる。特に最近は、極低温で発現する量子凝縮相と光との相互作用の解明を通して、光による量子凝縮相の制御と生成することを目指し研究を進めている。本年度は、以下に挙げる研究を進めた。

半導体高密度電子正孔系

励起子間相互作用の定量評価

半導体中に光励起された電子正孔系は、低密度では電荷中性の束縛状態、励起子を形成する。励起子は希薄極限で近似的にボース粒子とみなせるため、極低温では励起子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が生じると考えられている。しかし、励起子は厳密にはボース粒子ではなく有限の励起子間相互作用が存在し、特に高密度下ではその影響は無視できないほど大きくなるため、高密度下での励起子 BEC の可能性を検証するためには、励起子間相互作用のメカニズムを定量的に理解することが重要である。これまで励起子間相互作用は、主に二次元量子井戸系を舞台に理論・実験の両面で議論がなされ、特に実験では発光・吸収スペクトルや四光波混合などの非線形光学応答からその振る舞いが詳しく調べられてきた。一方、量子凝縮の観点からも興味深い3次元系においては、実験が困難であることから、その定量的な評価は意外なことにこれまでほとんどなされなかった。

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、選択的励起子共鳴励起による近赤外円偏光ポンプ-プローブ分光法を用いて実験を行った。初期状態として極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、励起子吸収線のエネルギーシフトから励起子間相互作用を定量的に評価することに成功した。

さらに光パルス励起後のエネルギーシフトのダイナミクスを詳細に調べた結果、励起直後 20 ps 程度までは励起子吸収線の比較的大きな高エネルギーシフトが観測され、その後 50 ps 程度でシフト量が大きく減少し、100 ps 以降は準平衡状態に至る振る舞いが、どのような偏光条件でも観測された。この振る舞いは、共鳴励起直後の極低温の励起子が格子温度まで熱化していく様子を反映していると解釈される。励起子と格子との相互作用を微視的に取り入れた理論計算を行ったところ、電子格子相互作用だけでは観測された緩和時間を説明できず、励起子間の非弾性散乱が影響していることを示唆する結果を得た。

また、励起直後のスピン偏極した状態においては励起子から励起子分子の誘導吸収も観測された。特に軽い正孔励起子と重い正孔励起子から成る混合励起子分子の誘導吸収に関しては、バルクでは初めて観測することに成功した。励起子分子への誘導吸収の信号強度の減衰時間は数 10 ps 程度とであることがわかったが、これは励起子を構成する電子・正孔のスピン緩和時間を反映していると解釈された。今後は、励起子間相互作用や極低温励起子の励起子熱化現象、および励起子スピン緩和のメカニズムを明らかにしていく予定である。

テラヘルツ電場パルスによる励起子のイオン化ダイナミクス

近年、ピコ秒の時間スケールで変化するテラヘルツ電場パルスを用いて半導体の光応答を超高速変調する試みが盛んになっている。バンドギャップエネルギー付近の光応答は励起子共鳴に支配されるため、そ

の機構を理解する上では励起子とテラヘルツ波との相互作用を理解することが必要不可欠である。我々は高純度なバルク GaAs 結晶を対象にテラヘルツポンプ・近赤外プローブ分光を行い、励起子吸収線の超高速な変化を観測した。その結果、近赤外プローブパルスがテラヘルツポンプパルスよりも早く試料に入射した場合に、励起子吸収線近傍の吸収スペクトルに顕著な振動構造が現れた。これは近赤外プローブパルスによりつくられた励起子の分極が、テラヘルツポンプパルスによる励起子のイオン化によって高速に変調されたことを反映した信号（摂動を受けた自由誘導減衰信号）であることを示唆していた。

この過程について理解を深めるために、微視的モデルの一つである半導体ブロッホ方程式に基づいた数値シミュレーションを行った。計算された吸収スペクトルは実験結果をよく再現し、観測された信号が確かにテラヘルツ電場による励起子のイオン化を起源とするものであることが確かめられた。さらに計算結果を実空間における励起子の波動関数に変換することにより、励起子の波束がテラヘルツ電場パルスの変化とともにどのように時間変化し、イオン化に至るのかを可視化することに成功した。これらの結果は、強いテラヘルツパルス中にある励起子と強いレーザーパルス中にある原子との類似を考える上でも重要な知見である。

励起子の光ドレスト状態

半導体中に光励起された励起子は、極低温においてボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を起こすと考えられている。励起密度が高くなるとクーロンポテンシャルが遮蔽され、励起子そのものは不安定化するものの、十分低温ではやはり電子正孔クーパー対という束縛状態を作って凝縮し、電子正孔 BCS 状態になると考えられる。いずれの量子凝縮相においても全ての電子正孔対が同じ量子状態を取るため、超放射など協力現象に由来する特異な光学応答が発現すると期待されている。電子正孔 BCS 状態の存在は約 50 年前に理論予想されていたにもかかわらず未だ明確な実証がなされていない。その一つの理由は、半導体の電子正孔系では一般に電子正孔有効質量が異なり、電子正孔対形成にとって重要なフェルミ面のネスティングが悪いこと、さらに電子正孔対のコヒーレンスが多体効果によって壊れやすいことなどが挙げられる。そこで、我々は励起子を共鳴的に光励起し、強制的にコヒーレントな電子正孔対を生成したときの光応答を調べることで、動的な量子凝縮相の実現を試みた。物質系としてバルク GaAs 結晶を用い、近赤外ポンプ・近赤外プローブ分光法を行った。近赤外ポンプ光には、波長選択によって励起子に共鳴した狭帯域した光パルスを用いた。また、近赤外プローブ光には広帯域の超短光パルスを用いた。測定の結果、ポンプ光が照射されている間にプローブ光を入射した場合に励起子吸収線の分裂が観測された。これは物質中の励起準位が光電場をまとってエネルギー固有値が繰り込まれること、すなわち光ドレスト状態の生成によって説明できると考えられる。もっとも、二準位原子系の光ドレスト状態とは違い分裂は非対称的で、高エネルギー側のピークが低エネルギー側のピークよりも大きかった。これは励起子の高エネルギー側にある連続準位の影響によるものであり、電子正孔系特有の事情であると思われる。また、ポンプ光強度を強くしていくと、高エネルギー側のピークは光励起後に残る電子正孔プラズマ的な応答へとなめらかに移り変わっていくことがわかった。これはポンプ光によって注入されたコヒーレントな電子正孔相関が、準熱平衡状態における相関へと移行したことを示唆している。この光で駆動されたコヒーレントな高密度電子正孔状態と電子正孔 BCS 状態との対応関係を低温における多体効果の理論的な解析により詳しく調べている。

超伝導体

我々はこれまでに非線形光学結晶 LiNbO_3 による光整流発生過程を利用した高強度 THz 波パルス光源の開発に成功し、THz 波による物質相制御に向けた研究を行ってきた。そしてこの開発した光源を用いて、 s 波超伝導体 $\text{Nb}_{1-x}\text{Ti}_x\text{N}$ における秩序パラメーターの振幅の振動に相当する集団励起モード、いわゆるヒッグスモードの観測に成功したことをこれまでに報告してきた。

本年度は、銅酸化物高温超伝導体におけるヒッグスモードの観測、鉄系超伝導体の高強度 THz 波を用いた時間分解測定を調べた。また銅酸化物高温超伝導体において、強い光励起が超伝導にどのような影響を与えるかを、 CuO 面間ジョセフソン結合に起因する c 軸ジョセフソンプラズマ共鳴の観測から調べた。さらに、電流注入によるヒッグスモードの赤外活性化の検証実験を行った。

銅酸化物高温超伝導体におけるヒッグスモードの観測

従来型 s 波超伝導体におけるヒッグスモードの観測に端を発し、ヒッグスモードの観測は、超伝導オーダーパラメーター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高い注目を集めている。例えば、銅酸化物高温超伝導体に代表される d 波ペアリング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制御の可能性が模索されており、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。実際、 d 波超伝導体におけるヒッグスモードに関して近年数多くの理論的な研究が報告され、例えば複数のペアリングチャンネルが存在すると複数のヒッグスモードが現れるという理論や、超伝導ギャップにノードがある場合には、ヒッグスモードから個別励起への素早い緩和が起こると予測する理論が報告されている。しかしながら、 d 波超伝導体ではこれまで実験による観測は報告されていなかった。

そこで我々は、典型的な d 波超伝導体である銅酸化物高温超伝導体におけるヒッグスモードの観測を目指した。高強度テラヘルツ波パルスを $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_{8+x}$ に照射し、誘起された非平衡ダイナミクスを近赤外光パルスの反射率変化を通して測定した。その結果、反射率変化に s 波超伝導体と同様に入射テラヘルツ電場の 2 乗波形に追従して振動する信号成分（振動成分）と、テラヘルツ波パルス励起後も残存し有限寿命で減衰する信号成分（減衰成分）が現れることが分かった。減衰成分は温度に依存して符号が変化し、可視光で励起した際のダイナミクスと類似していることから、テラヘルツ波パルスによる準粒子励起であると結論した。一方、振動成分は超伝導転移温度 T_c 以下で急激に発達することから、超伝導秩序の発達に関連する 3 次の非線形光学応答であることがわかった。この超伝導状態において顕著に現れる非線形応答の起源としては、ヒッグスモードの他に個別励起による電荷密度ゆらぎも考えられるが、 s 波超伝導体においては両者の偏光依存性の違いから、テラヘルツ波パルス励起によって現れる非線形応答がヒッグスモードであることが結論付けられた。そこで、本研究においてもポンプテラヘルツ波パルスとプローブ近赤外光パルスの電場の偏光に注目したところ、反射率変化のダイナミクスはポンプ光とプローブ光の偏光角度に無依存な A_{1g} 成分と依存する B_{1g} 成分に分解できることがわかった。さらに、正孔ドーパ濃度を変化させても A_{1g} 成分が常に支配的であることがわかった。理論計算により d 波超伝導体における THz テラヘルツポンプ・近赤外光プローブ信号に相当する非線形感受率の偏光依存性を評価すると、ヒッグスモードは A_{1g} 成分しか持たない一方で、電荷密度ゆらぎは B 成分が最も支配的であることがわかった。従って、実験で観測された A_{1g} 成分はヒッグスモードに由来すると結論付けられ、 d 波超伝導体で初めてヒッグスモードの観測に成功した。今後はヒッグスモード観測の手法を用いて、超伝導転移温度以上の超伝導揺らぎや隠れた秩序の抽出、光励起非平衡超伝導の研究へと展開する予定である。

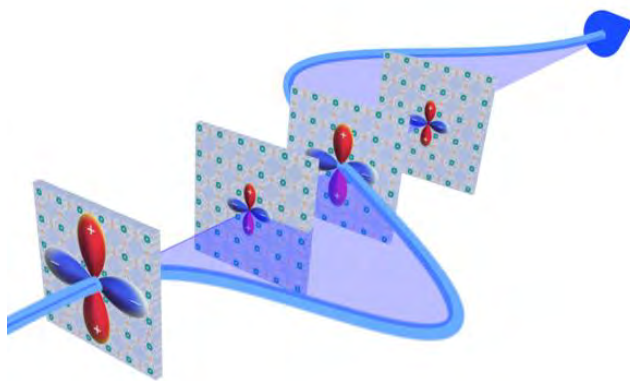


図 1 照射するテラヘルツ波パルスの振動に追従して d 波超伝導のオーダーパラメーターの大きさが振動する様子の概念図。

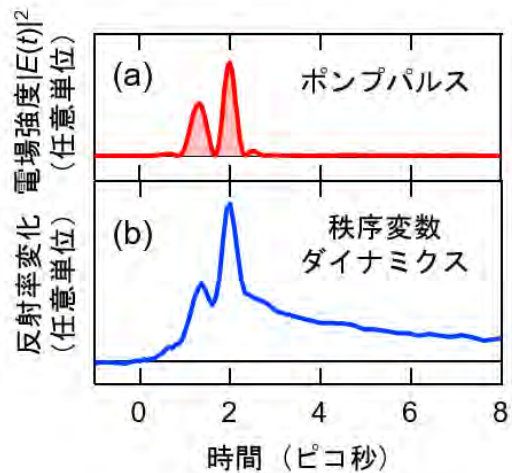


図 2 実験で観測された超伝導オーダーパラメーターの振動の様子。(a)は照射したテラヘルツ波パルス（ポンプパルス）の自乗電場波形。(b)は、超伝導転移温度以下の 10 K におけるテラヘルツ波パルス照射による近赤外光の反射率変化のダイナミクス。

鉄系超伝導体 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜の THz ポンプ-プローブ分光

FeSe は常圧下では超伝導とネマティック秩序が長距離の磁気秩序を伴わずに共存している鉄系超伝導体の中でも特異な系である。 FeSe 薄膜のネマティック秩序は Se を Te に置換していくとやがて消失し、それに伴って超伝導転移温度が大きく上昇することが最近報告されており、超伝導と競合する秩序であることが予想されている。しかし、その起源や超伝導秩序との関係についてはまだ明確な理解は得られていない。また、 FeSe は BEC-BCS クロスオーバー領域に位置する強結合超伝導体であると考えられており、超伝導転移温度 T_c より高温域からクーパー対が形成されていると予想されている。さらには圧力下ではスピン密度波 (SDW) が発現することも知られており様々な秩序がひしめく興味深い物質である。

我々は、テラヘルツ波で強励起された非平衡状態のダイナミクスを通して内在する複数の秩序の関連性について知見を得るため、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜に対してテラヘルツポンプ-テラヘルツプローブ分光を行った。試料はパルスレーザー堆積法により作成された CaF_2 基板上的 $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜 ($x = 0, 0.2, 0.4, 0.6$) を用いた。

その結果、 T_c 以下ではテラヘルツポンプ光による超伝導クーパー対の破壊とその回復のダイナミクスを反映して数 10% 以上もの大きな変化が表れた。一方、 T_c 以上においても T_c 以下と類似のポンププローブ信号が残留することを観測した。この信号は、 T_c より数 10 K 上の温度から現れる。その起源は現時点では不明だが、予想される超伝導揺らぎの温度よりも十分高いため、ネマティック秩序や磁気揺らぎ等内在する秩序に由来している可能性が高いと考えられ、現在、その詳細な解析を進めている。

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

銅酸化物高温超伝導体は超伝導を担う CuO 面がブロック層を挟んで 1 方向 (c 軸方向) に層状に積層した構造をとっている。超伝導転移温度 T_c 以下になると、 CuO 面内のクーパー対は面間ジョセフソン効果によって c 軸方向にトンネル伝導する。このとき c 軸方向のテラヘルツ帯反射率には、クーパー対の集

団運動を反映した急峻なプラズマ反射端(ジョセフソンプラズマ端)が現れる。ジョセフソンプラズマは、超伝導コヒーレンスの発達の光学プローブになるが、特に近年では光誘起超伝導状態を探る手がかり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研究例が乏しく、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-テラヘルツプローブ分光の系を構築し、複数種類の試料を用いて、銅酸化物高温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手がかりに調べた。典型的な銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の最適ドーピングの試料を用いて、転移温度以下の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。すると、光励起によってジョセフソンプラズマ周波数は低周波側へとシフトしていき、新たな準安定状態へと変化していくことを示唆するような実験結果が得られた。また、La の一部を Nd に置換した $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ を用いて、超伝導と競合するストライプ秩序がある際の光励起状態の c 軸応答に関して調べた。すると、励起直後に反射率の上昇が見られ、それが超伝導転移温度を超えた電荷秩序の発達する温度領域まで生じることがわかった。今後はさらにこれらの現象の正孔ドーピング依存性について詳しく調べ、銅酸化物の光励起ダイナミクスに関して追究していく。

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、 s 波超伝導体である NbN の薄膜 (26 nm 厚、 $T_c=14.5$ K) に、 $T=0.34T_c$ の低温で、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、電流密度の 2 乗に比例するピークが観測された。このピークは、電流と偏光が直交する配置では消失する。また、ピーク幅は印加する電流に依存しない。これらの特徴は、先述の理論提案と矛盾しない。観測されたピークのエネルギーは、同様の NbN 薄膜において、強い THz 波を用いた非線形励起で観測された自由振動の周波数ともよく一致している。このピークは、測定温度を $T=0.55T_c$ まで上げてても成長しない。これは、このピークが準粒子に関連する現象ではなく、超流動成分に起因する現象であることを強く示唆している。

電流注入の手法によって、弱い THz 波照射でもヒッグスモードが観測できれば、ヒッグス分光の対象を、不安定な超伝導体や、光ポンプによって現れる過渡的な相、共存する秩序との相関にも広げることができる。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。

研究成果リスト

受賞

1. Kota Katsumi: Best Poster Award at 6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions (2017 年 6 月)
2. 高山正行: 低温センター第 9 回研究交流会ベストポスターアワード (2018 年 2 月)
3. 勝見恒太: 理学系研究科研究奨励賞 (2018 年 3 月)

原著論文

4. Ryusuke Matsunaga, Naoto Tsuji, Kazumasa Makise, Hiroataka Terai, Hideo Aoki, and Ryo Shimano:
Polarization-resolved terahertz third-harmonic generation in a single-crystal superconductor NbN: Dominance of the Higgs mode beyond the BCS approximation,
Phys. Rev. B **96**, 020505(R) (2017).
5. Fumiya Sekiguchi and Ryo Shimano:
Rate Equation Analysis of the Dynamics of First-order Exciton Mott Transition,
J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 103702 (2017).
6. Yuta Murotani, Masayuki Takayama, Fumiya Sekiguchi, Changsu Kim, Hidefumi Akiyama, and Ryo Shimano:
Terahertz field-induced ionization and perturbed free induction decay of excitons in bulk GaAs,
J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 114001 (2018).
7. Go Yumoto, Ryusuke Matsunaga, Hiroki Hibino, and Ryo Shimano:
Ultrafast Terahertz Nonlinear Optics of Landau Level Transitions in a Monolayer Graphene,
Phys. Rev. Lett. **120**, 107401 (2018).
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: Higgs Mode in the *d*-Wave Superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ Driven by an Intense Terahertz Pulse,
Phys. Rev. Lett. **120**, 117001 (2018). **Editor's suggestion.**

学位論文

9. 勝見恒太 : Study of Higgs mode in a *d*-wave superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ using an intense terahertz-pulse (修士論文)

プレスリリース

10. 島野亮, 勝見恒太, 青木秀夫 : 「銅酸化物高温超伝導体で超伝導の“さざ波”のヒッグスモードの観測に成功」、2018年3月9日

国際会議

一般講演

11. Kota Katsumi, Yuki I. Hamada, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Yann Gallais, and Ryo Shimano:
Exploring THz-induced dynamics of a *d*-wave superconducting condensate in the cuprate $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$,
6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, Sendai, Japan, June 5–6, 2017.
12. Keisuke Tomita, Ryusuke Matsunaga, Masataka Kawai, Daisuke Asami, Fuyuki Nabeshima, Atsutaka Maeda, Ryo Shimano:
Terahertz pump-probe spectroscopy of thin film $\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$,
6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, Sendai, Japan, June 5-6, 2017.
13. Kota Katsumi, Ryusuke Matsunaga, John Schneeloch, Ruidan D. Zhong, Genda D. Gu, Yann Gallais, and Ryo Shimano:
Terahertz pulse induced non-equilibrium dynamics of a *d*-wave cuprate superconductor,
The International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS 2017, Corse, France, August 23, 2017.

招待講演

14. Ryo Shimano:
Higgs mode in conventional and unconventional superconductors,
6th International Conference on Photoinduced Phase Transitions, Sendai, Japan, June 9, 2017.
15. Ryo Shimano:
Ultrafast THz nonlinear optics in a Landau-quantized graphene,
2017 PKU-UTokyo NanoCarbon Workshop, Univ. of Tokyo, July 28, 2017.
16. Ryo Shimano:

Extreme Nonlinear Optics in Graphene in the THz range,
CLEO Pacific Rim, Marina Bay Sands Expo and Convention Center, Singapore, Aug. 1, 2017.

17. Ryo Shimano:
THz study of photoexcited dynamics in high T_c superconductors,
International Workshop on Non-Linear Effects and Short-Time Dynamics in Novel Superconductors and Correlated Spin-Orbit Coupled Systems,
Center for Theoretical Physics of Complex Systems, Institute for Basic Science, Daejeon, Korea, Sept. 18, 2017.
18. Ryo Shimano:
A light-induced metastable phase in superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$,
International Workshop on Ultrafast dynamics and metastability, Georgetown Univ., Washington, USA, Nov. 15, 2017.
19. Ryo Shimano:
A light-induced nonequilibrium phenomena in high T_c cuprate superconductors,
International Workshop on Frontiers of Research in Quantum Materials,
Max Planck Institute, Stuttgart, Dec 18, 2017.

国内会議

日本物理学会 2017 年秋季大会(2017 年 9 月 21–24 日、岩手大学)

20. 松永隆佑, 辻直人, 牧瀬圭正, 寺井弘高, 青木秀夫, 島野亮:
超伝導体 NbN の偏光分解テラヘルツ第三高調波発生: ヒッグスモードの支配的寄与と BCS 近似の破綻
21. 丹羽宏彰, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮:
テラヘルツ分光による銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の光励起ダイナミクスの観測
22. 高山正行, 金昌秀, 秋山英文, Loren N. Pfeiffer, Ken W. West, 島野亮:
バルク GaAs における励起子間相互作用のカイラリティ依存性
23. 富田圭祐, 松永隆佑, 川合将敬, 浅見大亮, 鍋島冬樹, 前田京剛, 島野亮:
テラヘルツポンププローブ分光で探る Fe(Se,Te)薄膜の超伝導およびネマティック秩序
24. 飯田雄大, 松永隆佑, 中村祥子, 寺井弘高, 島野亮:
超伝導体 NbN における直流電流とヒッグスモードの結合

第 9 回東京大学低温センター研究交流会(2018 年 2 月 20–21 日、東京大学)

25. 勝見恒太, 辻直人, 濱田裕紀, 松永隆佑, Ruidan D. Zhong, John Schneeloch, Genda D. Gu, 青木秀夫, Yann Gallais, 島野亮:
高強度テラヘルツ波励起による d 波超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ におけるヒッグスモードの観測
26. 高山正行, 江馬英信, 前田健人, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮:
極低温高密度下におけるバルク GaAs 中の励起子間相互作用と励起子熱化ダイナミクス
27. 中村祥子, 飯田雄大, 松永隆佑, 寺井弘高, 島野亮:
電流注入下の s 波超伝導体 NbN における THz 線形分光による超伝導ヒッグスモードの観測
28. Kota Katsumi, Romain Grasset, Yann Galles, Joshua Higgins, Richard Greene and Ryo Shimano:
Higgs spectroscopy in a d -wave superconductor
29. 丹羽宏彰, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮:
銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ における光誘起準安定相の発見
30. 勝見恒太, 辻直人, 濱田裕紀, 松永隆佑, Ruidan D. Zhong, John Schneeloch, Genda D. Gu, 青木秀夫, Yann Gallais, 島野亮:
高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ の高強度テラヘルツ波励起非平衡ダイナミクス、
第 10 回 文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム、
京都大学国際科学イノベーション棟、2018 年 1 月 23 日

日本物理学会第 73 回年次大会(2018 年 3 月 22–25 日 東京理科大学)

31. 室谷悠太, 高山正行, 関口文哉, 金昌秀, 秋山英文, 島野亮:

テラヘルツパルスによる励起子のイオン化と自由誘導減衰

32. 丹羽宏彰, 吉川尚孝, 泊開人, 松永隆佑, Dongjoon Song, 永崎洋, 島野亮:
銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ のテラヘルツ帯光励起非平衡ダイナミクスの観測

招待講演

33. 島野亮:
高強度テラヘルツ波が拓く固体物性研究の新展開、
日本分光学会年次講演会シンポジウム「テラヘルツ分光技術の最先端応用」
早稲田大学西早稲田キャンパス, 2017年5月23日
34. 島野亮:
高強度テラヘルツ波が拓く物性研究の新展開、
強光子場科学研究懇談会, 東京大学 理学部化学本館講堂, 2017年10月21日
35. 島野亮:
光による物質相制御の現状と展望、
東北大学金属材料研究所ワークショップ「多自由度・多階層性が協奏する物質材料システムの科学」
東北大学金属材料研究所講堂, 2017年12月6日

セミナー等

36. Ryo Shimano:
Nonequilibrium dynamics of superconductors,
MPI-UBC-UTokyo Winter School, Koshiba Hall, The Univ. of Tokyo, Feb. 16, 2018.

村川研究室

村川研究室は、村川と大学院生3名の計4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、新たな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し、三重点が存在しないということがあげられる。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。

ヘリウムには中性子が一つのヘリウム3 (^3He) と中性子が二つのヘリウム4 (^4He) という二つの安定同位体があり、各々、フェルミ統計に従うフェルミ粒子とボース統計に従うボース粒子となっているため、ボース粒子によるボースアインシュタイン凝縮によるものとフェルミ粒子によるBCS機構によるものと超流動になる原理が異なる量子統計性の違いを意識した実験が容易に行えるのも大きな特徴として挙げられる。そのうえ、液体ヘリウムは非常に不純物の少ない系であり、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の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

近年の物性物理学の分野でホットな話題の一つがトポロジカル物質についてである。トポロジカル物質の大きな特徴は表面にバルク-エッジ対応のためにギャップレスの状態が現れることであり、そのため、表面状態の研究が盛んに行われている。本研究室で対象にしている超流動ヘリウム 3 (^3He) はトポロジカル超流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り、またバルクの物性もクーパーの対称性も含めて詳細に知られているため、理論予測との比較が非常に容易な系である。また、不純物も非常に少なく、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る 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 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。

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の議論から予測されるものである。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実験に着手している。

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。過去に超流動 ^3He -B 相の自由表面での量子アンドレーエフ反射が生じることが報告されているが、この実験では入射角は一つであった[2]。理論計算によって準粒子の入射角とエネルギーによる量子アンドレーエフ反射率が計算されているため[3]、これを実験で再現できれば、分散関係を明らかにすることができる。

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に半球型の内部容器を設置し、そこに穴を開け、内部と外部に温度差をつけることで穴から準粒子ビームを取り出す(図 1 上)。内部容器は二重にし、内側にはスリット、外側にはさまざまな角度に穴を開け、片方を回転させ穴とスリットが重なったところからのみ準粒子ビームが射出することにより、さまざまな角度の表面に対する入射角を持った測定を行うことができる(図 1 下左)。低温で半球を動かすための低温高真空で動作するモーターは、3 K での動作をメーカーが保障している **phytorn** 社の **VSH-UHVC cryo** シリーズ(図 1 下右)を採用し、研究室で液体 ^4He に浸した状態でテストしたところ 4 K での動作の確認ができた。

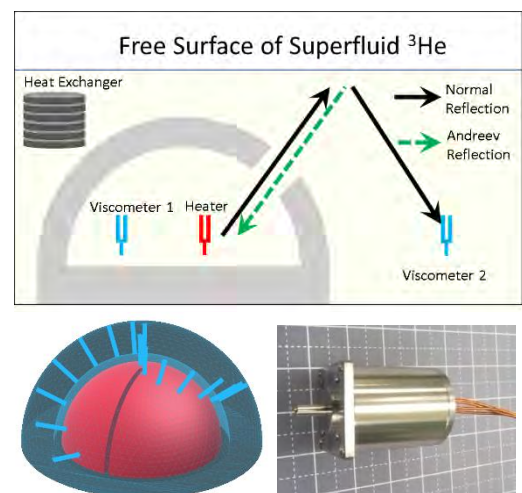


図 1：上：黒体輻射実験セルの模式図。下左：二重スリットのビーム発生容器の模式図。赤いものが内側の半球で水色の部分に孔が空いている。下右：動作用のステッピングモーター。

輻射体から放出された準粒子はある一定の確率でアンドレーエフ反射し、輻射体に戻ってくる。これは、輻射体の熱収支として反射ビームが加わることになり、輻射体の温度がアンドレーエフ反射の確率によって変化する。本研究では輻射体の温度を精密に測定することで、アンドレーエフ反射率を求める。

この測定に必要なものは温度計とヒーターである。ここでは、それに音叉方水晶振動子を用いる。振動体の共鳴周波数や半値幅は、流体中ではその媒質の粘性によって変化することを利用し、水晶振動子を液体 ^3He に浸し、その粘性を測ることで温度を決める。またこの振動による摩擦によって液体の温度を上昇させることができるため、ヒーターとしても使用できる。メーカーから購入できる振動子は金属製の真空容器の中に入っているために、我々の手で真空容器を取り外す。本研究では複数の振動子を用いるが、金属製の真空容器を取り外した結果、共鳴周波数の近いもの同士を近接して設置すると共振してしまい、使用できない。そのため、複数の異なる共鳴周波数の振動子が必要である。そこで、本研究室では、20 kHz、25.6 kHz、32.768 kHz、38.4 kHz の振動子を手に入れ、窒素温度まで冷却し、真空から 0.1 MPa 程度まで共振周波数の圧力依存性を取った。図 2 に示されているように、すべての振動子で共鳴周波数は大まかに圧力の一次関数となり、その傾きも大きな違いが無いことが分かり、本測定に使用できることが確認できた。

【学会発表 1、2、国際会議 1、2】

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バルク状態と比べ大きくなる。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。本年度はスリットの作成の条件を探し、異方性エッチングを行うことやプロセスガスの導入の条件を最適化することで、幅 1 μm で深さ 40 μm の貫通スリットが作成できた。また、最終的にはこのスリットを用いて流れを観測する Josephson 流実験装置のテストセルを作成し超流動 ^4He を用いてテストを行っている。【国際会議 5、6】

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。

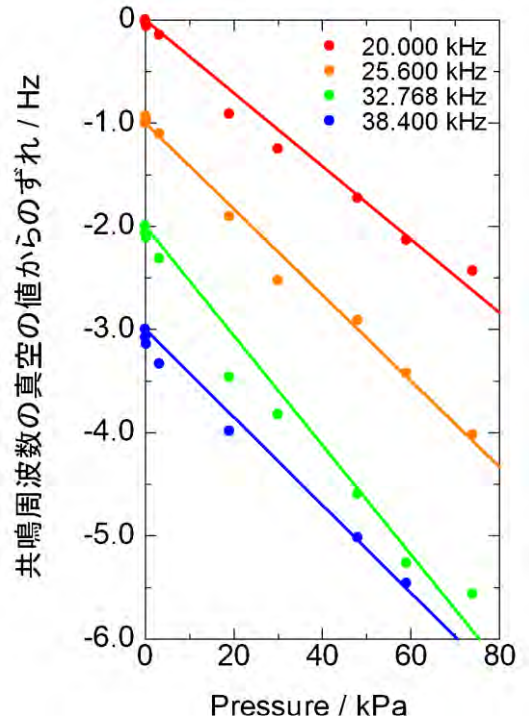


図 2: 液体窒素温度における音叉型水晶振動子の圧力依存性。グラフの縦軸は見やすいように異なる振動子のものは 1 Hz ずつ下にずらしてある。

ナノワイヤーによる超流動の流れの検出

超流動の性質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おり、従来は直径数百 μm の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より大きいため、期待していない表面の乱雑さの効果や期待していない付着残留渦の影響を受ける可能性も高い。

そこで、本研究では架橋カーボンナノチューブをベースにした超伝導ナノワイヤー共振器の開発を行っている[4]。この方法を用いると直径が数 nm から数百 nm オーダーの振動ワイヤーが作成できる。現在、室温での試料作成ののち、真空中で液体ヘリウム温度における挙動を調べている。【学会発表 7、国際会議 7】

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。

回転下におけるヘリウム 4

超流動における回転は超伝導における磁場と影響が同じである。近年、固体 ^4He は超流動と固体の両方の性質を持つ超固体とも言われていたが、最近の理解では不純物である ^3He が固体 ^4He の格子欠陥に束縛されることで説明がされていた。しかし、この固体 ^4He を回転させたときにこの理論では説明できない現象が見られており、超流体の渦との関連性が指摘されていた。そこで、慶應義塾大学白濱研究室および理化学研究所の河野グループと共同で固体 ^4He の弾性率の回転による影響を調べた。結果、弾性率の回転依存性は不純物である ^3He がコリオリ力によって局在し、格子欠陥に到達しないためにおきていることが明らかになった。【発表論文 2】

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、装置が長大であり、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。シリコンはドーパ量によって熱伝導率をコントロールすることができるため、構造材として選択の幅が広く、微細加工がしやすいためにマイクロ流路の母材として最適である。本年度は3インチウエハに希釈冷凍機の主要パーツである熱交換器、混合器、分留器、インピーダンスが納まるように設計し、試作を行った。各部分の深さは300 μm で熱交換器の流路の幅は150 μm 、300 μm であり、c相とd相の間の壁は30 μm である。(図3) 光学顕微鏡で確認したところ、全長1 m にわたる欠陥の無い溝形成に成功した。【学会発表 6】



図3: 試作したマイクロ流路[5]

この研究は日本女子大学の石黒研究室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。【発表論文1、学会発表3-5、国際会議3、4】

本年度は前年度に条件出しを行った熱スイッチを実際作成し、その性能評価を行った。希釈冷凍機を用いて100 mK以下まで測定したところ、超伝導時の熱が流れないときの熱伝導度は目標と同等のものが得られた。また、超伝導マグネットの磁気シールドの選定を行い、強磁体のFeCoVが最適であり、超伝導マグネットの設計が完了した。

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] T. Okuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80**, 2857 (1998).
- [3] Y. Nagato, M. Yamamoto, and K. Nagai, J. Low. Temp. Phys. **110**, 1135 (1998).
- [4] K. Masuda, H. Maki *et al.*, Appl. Phys. Lett. **108**, 222601(2016)
- [5] 日本物理学会 第73回年次大会 講演概要集 23pK505-4

研究成果リスト

発表論文

1. Design and expected performance of a compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator for sub-mK applications
Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama
Journal of Physics: Conference Series **969**, 012093 (2018).
2. Effect of rotation on the elastic moduli of solid He-4
T. Tsuiki, D. Takahashi, S. Murakawa, Y. Okuda, K. Kono, K. Shirahama
Physical Review B **97**, 054516 (2018).

学会発表

1. 超流動ヘリウム3における量子アンドレーエフ反射角度依存性観測装置の開発
吉田研介, 村川智
第9回低温センター研究交流会 (東京大学) 2018年2月
2. 超低温下で用いるヘリウム3融解圧温度計の設計
山崎翔太, 村川智
第9回低温センター研究交流会 (東京大学) 2018年2月
3. 小型連続核断熱消磁冷凍機の開発
戸田 亮, 植松 祐真, 瀧本 翔平, 村川 智, 福山 寛
第2回東京大学技術発表会 (東京大学) 2018年2月
4. 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9回 低温センター研究交流会（東京大学）2018年2月

5. 超小型サブミリケルビン連続冷凍システムの開発 III
戸田亮, 瀧本翔平, 植松祐真, 村川智, 福山寛
日本物理学会 第73回年次大会（東京理科大学）2018年3月
6. マイクロ流路式希釈冷凍機の開発
笠倉麻優子, 村川智, 池上弘樹, 石黒亮輔
日本物理学会 第73回年次大会（東京理科大学）2018年3月
7. 超流動流れ場検出のための架橋ナノワイヤー共振器の開発
永合祐輔, 田中悠, 高木将, 谷川俊太郎, 大里啓孝, 津谷大樹, 牧英之, 村川智, 白濱圭也
日本物理学会 2017年秋季大会（岩手大学）2017年9月

国際会議

1. Preparation of experiment for direct observation of Majorana cone at surface of superfluid helium three B phase
Satoshi Murakawa, Kensuke Yoshida
28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (イエテボリ、スウェーデン)
2017年8月
2. Black Body Radiator with Various Angle Quasiparticle Beam Emitting Port in Superfluid Helium
S. Murakawa, K. Yoshida, S. Yamazaki, T. Suzuki
International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2017) (ハイデルベルク、ドイツ)
3. Design and expected performance of a compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator for sub-mK applications
R. Toda, S. Murakawa, H. Fukuyama
28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (イエテボリ、スウェーデン)
2017年8月
4. Compact nuclear demagnetization refrigerator to keep a sub-mK temperature continuously – Design and expected performance
S. Murakawa, R. Toda, Y. Uematsu, H. Fukuyama
International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2017) (ハイデルベルク、ドイツ)
5. Microfabrication of multi-slit structures for studies of topological properties of quasi-2 dimensional superfluid ^3He
T. Tani, S. Murakawa, R. Wada, K. Kaiya, K. Yamada, K. Itoh, Y. Mita, K. Shirahama
28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (イエテボリ、スウェーデン)
2017年8月
6. Flow properties of superfluid ^4He in nanoporous media probed by Helmholtz resonator
T. Tani, S. Murakawa, K. Shirahama
28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (イエテボリ、スウェーデン)
2017年8月
7. Nanomechanical Resonator based on Carbon Nanotube for Study of Superfluid He
Y. Nago, Y. Tanaka, T. Takagi, S. Tanigawa, H. Osato, D. Tsuya, H. Maki, S. Murakawa, K. Shirahama
International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT2017) (ハイデルベルク、ドイツ)

福山研究室

1. 秩序-無秩序転移に対する量子統計効果 — 単原子層吸着ヘリウムの整合相

グラファイト表面上の希ガス原子に対する吸着ポテンシャルは、ハニカム格子の六角形の中心 (hollow サイト) 上が元も深い (図 1(a))。面密度が hollow サイト数の $1/3$ のとき ($\rho_{1/3} = 6.37 \text{ nm}^{-2}$)、低温で吸

着子系は $1/3$ 整合相あるいは $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 整合相と呼ばれる三角格子構造の局在相を形成する。この相転移は秩序-無秩序転移と呼ばれ、3 状態 Potts モデルの臨界現象が観測できる貴重な実験系である。本研究では、零点振動エネルギー（量子効果あるいは質量効果）が大きなヘリウム 3 (^3He) とヘリウム 4 (^4He) の 2 種類の同位体をグラファイト表面にそれぞれ吸着させた系の比熱を、 $1/3$ 整合相を含む広い密度範囲で調べ、秩序-無秩序転移に対する量子効果と量子統計効果を調べた。吸着基板には、単結晶サイズが従来の Grafoil より 1 桁大きい ZYX を用いた。

図 1(b)は、整合密度で観測される比熱異常の温度依存性である。軽い ^3He の方が重い ^4He より 3% 転移温度が高い。これは直感とは異なるが、剛体球系の量子局在（融解）現象では一般的に見られる量子効果で、過去の報告とも一致する。例えば、水素分子の 3 種類の同位体 H_2 、 HD 、 D_2 の $T_{\text{peak}}(\rho_{1/3})$ はそれぞれ 20.4, 19.3, 18.1 K である。図 1(c)は、比熱のピーク温度 (T_{peak}) の密度依存性である。 ^3He も ^4He もほぼ整合密度で T_{peak} が最大となることから、 $1/3$ 整合相（完全結晶）に自発的に導入される零点欠陥は最大でも 1% 程度と思われる。次に、密度を整合値からずらし、人為的に不足粒子や過剰粒子を導入すると、水素分子系では知られていなかった同位体効果が観測された。水素系では、 T_{peak} を $T_{\text{peak}}(\rho_{1/3})$ で規格化すると（質量効果を消すと）、図 1(d)のようにボース粒子の H_2 も D_2 もフェルミ粒子の HD も同じ密度依存性となる。つまり統計効果は観測されない。これは、それぞれの T_{peak} 温度での熱的ドブロイ波長 (λ_T) が粒子間距離 ($a = 0.34 \text{ nm}$) より短いためだと考えられる。ボース粒子の ^4He もこれとほとんど同じように振る舞うが、フェルミ粒子の ^3He のみ明らかに密度依存性が強い。ここには示していないが、比熱のピーク値 (C_{peak}) についても同じように ^3He の方が密度依存性が強い。不足粒子や過剰粒子は、図 1(e)(f)のように $1/3$ 整合相に対するさまざまな欠陥（点欠陥、interstitial、転位、ドメイン壁）として存在すると予想される。He 系では $\lambda_T > a$ が満たされていることから、我々の結果は、これらが零点欠陥として量子統計力学的に振る舞う可能性を示している。本研究は、物質へのホール・電子ドープとも密接な関係があり、乱れや異方性に邪魔されず、かつ量子効果や統計効果も調べられる点がユニークである。

本研究は、低温センター研究開発部門の中村祥子特任助教との共同研究であり、同氏はこの発表で第 28 回低温物理学国際会議（於スウェーデン）にて Best Poster Award を受賞した。

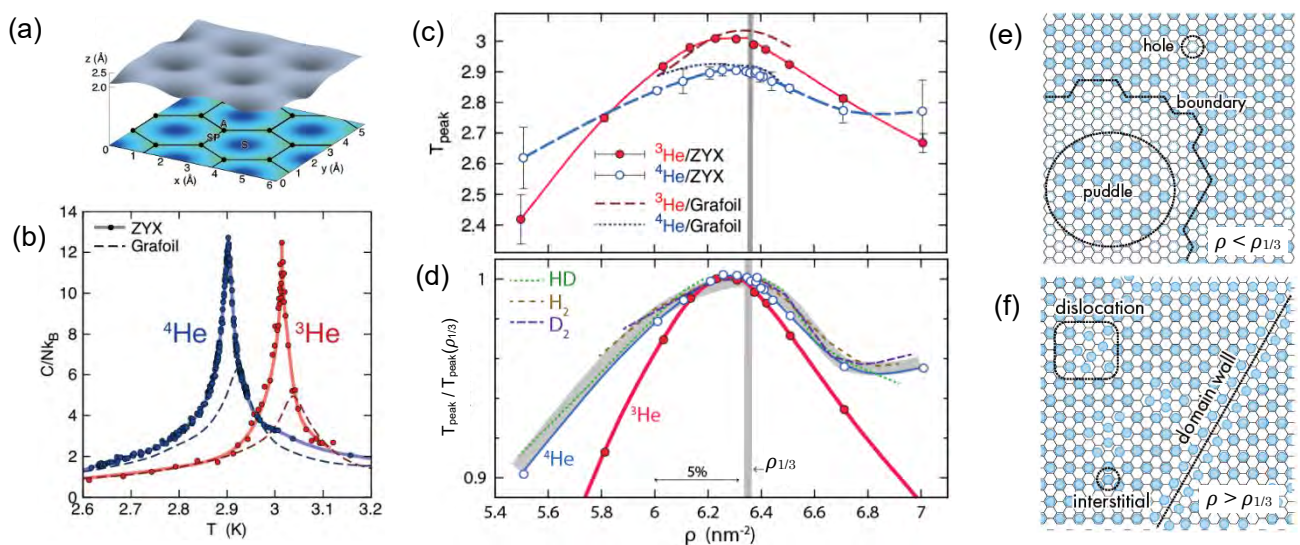


図 1. グラファイト上に吸着した ^3He と ^4He の $1/3$ 整合相の秩序-無秩序転移に伴う比熱異常。

2. 小型超低温連続冷凍システムの開発

近年、物質科学や宇宙科学など様々な分野で数十 mK の極低温環境での実験が日常化している。そこで、次世代実験への応用を見据えて、 $T \leq 1$ mK のサブミリケルビン温度域を、省スペースかつ簡便に作り出せる連続冷却式の小型核断熱消磁冷凍機を開発している。構成は、PrNi₅ (0.2 mol) からなる 2 つの核ステージを、熱スイッチを介して直列接続し、予冷段として希釈冷凍機を用いる。増強核磁性体の PrNi₅ では、磁場誘起した電子磁気モーメントが超微細相互作用を通じて大きな有効磁場として Pr³⁺ の核スピンの働くため、印加磁場が 1 T 程度と低くても mK 温度域で有効な冷却力を確保できる。

今年度は、亜鉛の超伝導熱スイッチを設計製作し、その性能を評価した。小型化と高熱伝導度を両立するため、Ag 熱リンクに電子ビーム溶接した Ag フォイル (厚さ 0.5 mm) を超伝導 Zn フォイル (厚さ 0.25 mm) と積層し、熱拡散接合した。スイッチ全体の電気抵抗は $T = 4.2$ K で 114 nΩ、熱伝導度は 1 K で 0.20 K/W であった。これらは Wiedemann-Franz 則をよく満たしている。また、 $0.07 \leq T \leq 0.9$ K の温度域で実測した超伝導状態 (スイッチ「開」時) の熱伝導度も超伝導亜鉛の文献値とよく一致した (図 2(a))。これらから推定される熱スイッチ比は 30 mK で 10^5 であり、冷凍機は期待通り 0.8 mK で約 10 nW の冷却力をもつと予測される。

次に、磁気シールド付小型超伝導マグネットの詳細な設計を行った。線材はフィラメント径 10 μm の NbTi 多芯 (54 本) 超伝導線とし (ボビン内径 22 mm、コイル部の長さ 161 mm、20 層)、これを鉄-コバルト合金 (外径 42 mm、長さ 169 mm、厚さ 4 mm) で磁気シールドすることで、6 A の電流のもとで 1.2 T の中心磁場を発生できる (図 2(b))。そのときのシールド外側面での漏洩磁場は 1 mT 以下である。さらに、線材とシールド材の低温磁化曲線のヒステリシスを実測し、現実的な磁場掃引速度 1 mT/s のもとでの線材の発熱量を 0.1 mW と見積もった。つまり、このマグネットを希釈冷凍機の分留器に熱アンカーすればその温度を 0.7 K 程度に保つことができ、核ステージへの熱輻射を 1 nW 以下に押さえることができる。これは、冷凍機の冷却力 (10 nW) より十分小さい。

本開発は、共同利用部門の戸田亮技術専門職員、研究開発部門の村川智准教授との共同研究である。

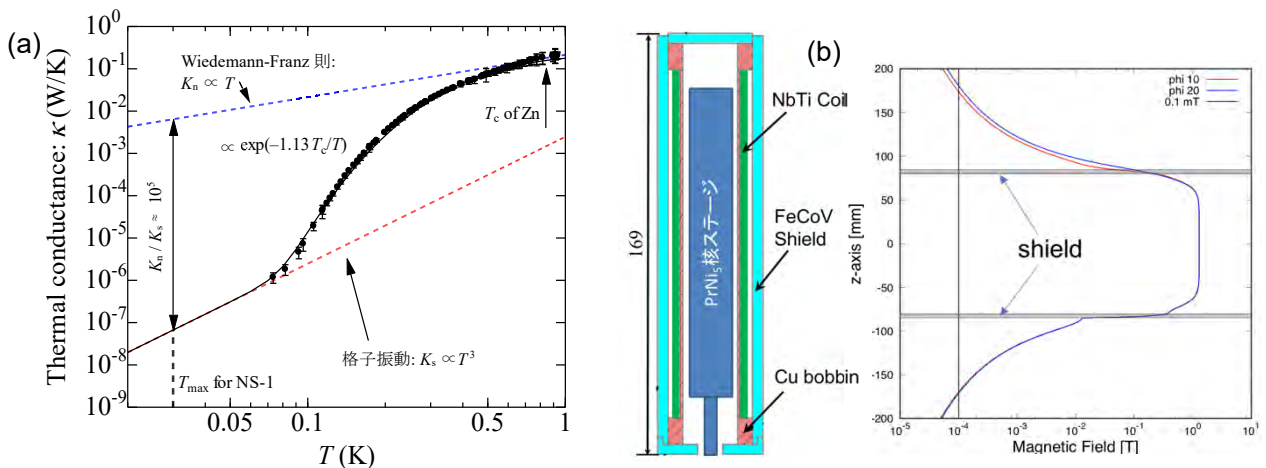


図 2. (a) Zn 熱スイッチの熱伝導度測定。超伝導転移温度 (0.87 K) 以下で常伝導成分の減少に伴って熱伝導度は指数関数的に減少し、80 mK 以下で格子振動からの寄与に漸近する。(b) 磁気シールド付小型超伝導マグネットの模式図 (左) と、 $I = 6$ A 時の中心軸上で発生する磁場分布の計算値。

3. 低熱損失・低振動伝達の液体ヘリウム移送管の開発

極低温走査型プローブ顕微鏡（SPM）の冷却手段としてパルス管冷凍機を組み合わせることができれば、液体ヘリウムの再充填で中断されることなく長時間の走査トンネル分光測定ができることや、液体ヘリウム寒剤の入手が困難な地域でも実験が可能となる。その場合、ヘリウムを再凝縮するパルス管冷凍機を外部に隔離して設置し、SPMと移送管で連結してヘリウム循環冷却する方法が有望である本研究では、そのための低振動伝達で低熱損失のヘリウム移送管を開発している。これは、機械振動を嫌う極低温実験の他、一般のフロー冷凍機に用いても液体ヘリウムの消費を抑える上で有用である。

前年度までに、試作した移送管の熱損失量を実測し（ 0.29 ± 0.06 L/h）、その値が市販品や過去の開発例と比べて高性能であり、事前の熱計算ともよく一致することが分かった（2016年度低温センター年報 p.88）。ただし、移送量が周期的に自励振動する現象（液移送 10 分間、休止 30 分間）が観測されたので、今年度はその原因を探った。具体的には、送液／受液双方の圧力と受液側のヘリウム液面を自動計測し、それらを入力信号として送液側の圧力を制御して、できるだけ均一な移送を実現するための計測制御システムを構築した。液面計は超伝導線（直径 0.08 mm、長さ 950 mm）を素子として自作した（図 3(a)）。その結果、送液は、受液側圧力の急激な低下が原因で送受液間の差圧が送液側の移送管揚程（液面から移送管最上部までの高さ）に対応する液柱の静水圧に達したとき開始することが分かった。逆に差圧がその静水圧を下回ると送液は停止する。しかし、受液側圧力の急低下（図 3(b)のピンク色の矢印）の原因は未だ分かっていない。図 3(b)は、ヘリウム液面で移送速度を制御しようとしたときに見られた振動現象の時間推移である。今後は、受液側急減圧の原因究明と移送管の振動伝達率の実測を目指す。

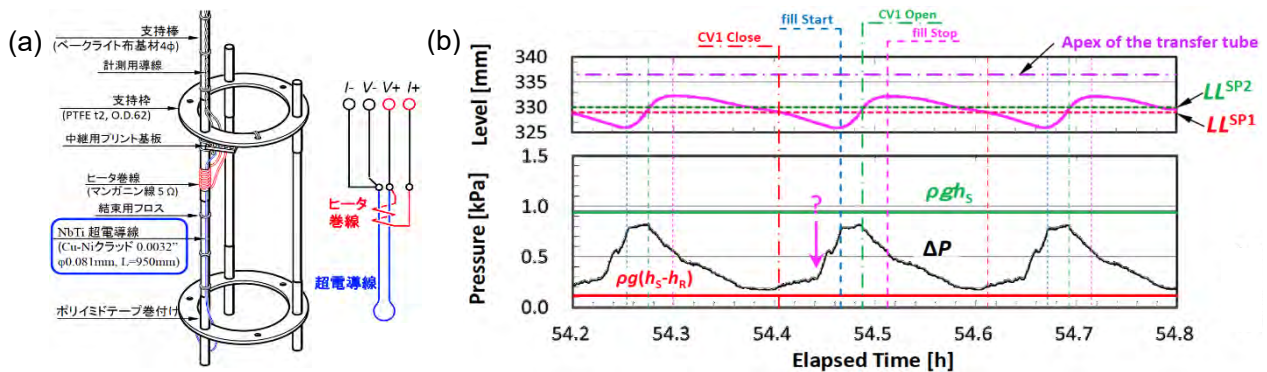


図 3. (a) 自作した受液側ヘリウム液面計。(b) ヘリウム液面で制御したときに見られた移送の周期振動現象。上図が液面、下図の黒線が送受液間の差圧、緑実線が送液側移送管の揚程から期待される液体ヘリウム静水圧。

本研究は、(株)ユニソクとの民間等共同研究「高効率な極低温冷却機構の研究開発」（プロジェクト番号：172200000008）として、液化供給部門の寺岡総一郎技術専門職員と共に実施した。

4. カーボンナノチューブ・ランダムネットワークの電気伝導特性

さまざまな応用が期待されるカーボンナノチューブ（CNT）の 3 次元ランダムネットワークである buckypaper の電気伝導特性を $T = 0.4$ K の極低温まで調べている。前年度までに、高純度金属型 2 層 CNT（直径 1.4 nm、純度 99%以上）ネットワークの電気伝導度 G が $2 \leq T \leq 100$ K の広い温度範囲で $G \propto T^{0.24 \pm 0.01}$ というべき乗則に従うこと、その温度域で磁気抵抗測定から求めた位相緩和長が CNT-CNT

接合間の平均距離 (100~200 nm) より短いことなどを見出した。これらは、厚みが 10~20 μm 大きさが数 mm 角もあるこの 3 次元バルク試料が、朝永-Luttinger 液体 (相互作用する 1 次元フェルミ粒子系) として振る舞うことを強く示唆している。今年度はその電流電圧特性を測定し、やはり TLL モデルでよく説明できる特徴的な非線形性を確認することができた。

本研究は、低温センター研究開発部門の藤井武則助教、共同利用部門の戸田亮技術専門職員との共同研究である。

研究成果リスト

受賞

1. Sachiko Nakamura,
Best Poster Award, 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August 9–16, 2017).
2. Kazuma Kita,
Best Poster Award, The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), (Tsukuba Japan, October 22–26, 2017).

原著論文

3. Sachiko Nakamura, Daisuke Miyafuji, Takenori Fujii, Tomohiro Matsui, and Hiroshi Fukuyama, “Low temperature transport properties of pyrolytic graphite sheet”, *Cryogenics* **86**, 118–122 (2017).
4. 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).
5. Sachiko Nakamura, Takenori Fujii, Shoji Matsukawa, Masayuki Katagiri, and Hiroshi Fukuyama, “ ^4He permeation and H_2O uptake of cyanate ester resins — an alternative to commonly used epoxy resins at low temperature”, *Journal of Physics: Conference Series* **969**, 012080-1–6 (2018), accepted for publication.
6. Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama, “Design and expected performance of a compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator for sub-mK applications”, *Journal of Physics: Conference Series* **969**, 012093-1–6 (2018), accepted for publication.

学位論文

7. Masahiro Kamada
“Quantum Phase Diagram of Helium Three Monolayer on HD Plated Graphite”, (Ph.D. thesis).
8. André E. B. Amend,
“Scanning Tunneling Spectroscopy Studies of Graphite Edges Fabricated by Hydrogen Plasma Etching”, (M.C. thesis).
9. 小川 勝之
水素膜上単原子層ヘリウム 3 の比熱測定と NMR 試料セルの設計製作 (修士論文)
10. 喜田 和馬
グラファイト及び劈開グラフェン表面のジグザグナノピット：整形法と電気輸送特性 (修士論文)

学会発表

国際会議

11. “Hexagonal Nanopits with Zigzag Edges on Graphite Surfaces”, Tomohiro Matsui, Hideki Sato, Kazuma Kita, André E. B. Amend, Hiroshi Fukuyama, Tsinghua University — the University of Tokyo Joint Symposium on Multidiscipline (Beijing China, April 12–16, 2017), *invited talk*.

12. “Recent Progress in Studies of Emergent Quantum Phases of 2D Helium Systems”,
Hiroshi Fukuyama, Masahiro Kamada, Sachiko Nakamura,
International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT 2017): Frontiers of Low
Temperature Physics (Heidelberg Germany, August 17–21, 2017), *invited talk*.
13. “Self-Condensed Liquid Phase of Helium-3 Adsorbed on Hydrogen Preplated Graphite”,
Masahiro Kamada, Katsuyoshi Ogawa, Ryuji Nakamura, Tomohiro Matsui, and Hiroshi
Fukuyama,
28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August
9–16, 2017).
14. “Low temperature properties of cyanate ester resins — an alternative to commonly used epoxy
resins”,
Sachiko Nakamura, Takenori Fujii, Shoji Matsukawa, Masayuki Katagiri, and Hiroshi Fukuyama,
28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August
9–16, 2017).
15. “Order-Disorder Transition in 2D Quantum Systems and Its Doping Effects”,
Sachiko Nakamura and Hiroshi Fukuyama,
28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August
9–16, 2017).
16. “Design and expected performance of a compact and continuous nuclear demagnetization
refrigerator for sub-mK applications”,
Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama,
28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28), (Gothenburg Sweden, August
9–16, 2017).
17. “Compact nuclear demagnetization refrigerator to keep a sub-mK temperature continuously —
Design and expected performance”,
Satoshi Murakawa, Ryo Toda, and Hiroshi Fukuyama,
International Conference on Ultra Low Temperature Physics (ULT 2017): Frontiers of Low
Temperature Physics (Heidelberg Germany, August 17–21, 2017).
18. “STS Studies of Zigzag Edge State and Quantum-Hall Edge State at Graphite Surfaces”,
Tomohiro Matsui, Hideki Sato, André E. B. Amend, Kazuma Kita, and Hiroshi Fukuyama,
The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), (Tsukuba Japan, October 22–26,
2017).
19. “STS Studies of Graphite Edges Produced by Hydrogen-plasma Etching”,
André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Hideki Sato, Kazuma Kita, and Hiroshi Fukuyama,
The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), (Tsukuba Japan, October 22–26,
2017).
20. “Hydrogen-plasma Etching of Graphite and Multi-layer Graphene”,
Kazuma Kita, Tomohiro Matsui, Hideki Sato, André E. B. Amend, and Hiroshi Fukuyama,
The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8), (Tsukuba Japan, October 22–26,
2017).

国内会議

21. 走査プローブ顕微鏡用ヘリウム循環冷却システムの熱解析(II)
寺岡総一郎、横田統徳、佐々木徹、宮武 優、福山 寛
第 94 回 2017 年度春季低温工学・超電導学会 (東京、2017 年 5 月 30 日–6 月 1 日)
22. 表面弾性波を用いた超伝導 NbSe₂ 薄膜の伝導特性変調 2
横井雅彦、河村智哉、荒川智紀、福山 寛、新見康洋、小林研介
日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月 21–24 日)
23. 劈開グラフェン試料へのジグザグ・ナノピット形成とその伝導度測定
喜田和馬、松井朋裕、André E. B. Amend、福山 寛
日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月 21–24 日)
24. 水素膜上 2 次元ヘリウム 3 の量子液体相の比熱測定

- 小川勝之、鎌田雅博、中村龍司、松井朋裕、福山 寛
日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月 21-24 日)
25. 超流動フィルムフロー速度と基板表面粗さの関係 II
宇佐美潤、松井朋裕、福山 寛
日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学、2017 年 9 月 21-24 日).
26. 小型連続核断熱消磁冷凍機の開発
戸田 亮、植松拓真、瀧本翔平、村川 智、福山 寛
第 2 回東京大学技術発表会 (東京大学、2018 年 2 月 15-16 日)
27. 超流動ヘリウムのフィルムフローの律速メカニズム
宇佐美潤、松井朋裕、福山 寛
第 9 回低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日)
28. 単原子層ヘリウム 3 の新奇スピン液体状態の解明に向けた NMR セルの設計・製作
鈴木尚将、小川勝之、中村龍司、鎌田雅博、松井朋裕、村川 智、福山 寛
第 9 回低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日)
29. 単原子層ヘリウム 3 の気液相転移の観測
小川勝之、鎌田雅博、吉富愛望アビガイル、松井朋裕、福山 寛
第 9 回低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日)
30. “Scanning Tunneling Spectroscopy Study of Graphene Zigzag Nano-ribbon”,
André E. B. Amend, Tomohiro Matsui, Hiroshi Fukuyama,
第 9 回低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日)
31. 小型超低温連続冷凍システムの開発 II
戸田 亮、瀧本翔平、植松拓真、村川 智、福山 寛
第 9 回低温センター研究交流会 (東京大学、2018 年 2 月 20-21 日)
32. ヘリウム再液化のエコノミクスとヘリウム研究のフィジクス
福山 寛
東京大学低温センター設立 50 周年記念講演会 (東京大学、2018 年 2 月 21 日)、招待講演
33. グラフェン・ナノリボンにおけるジグザグ端状態の STM/S 観測
松井朋裕、André E. B. Amend, 喜田和馬、佐藤秀樹、福山 寛
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月 22-25 日)
34. 超小型サブミケルビン連続冷凍システムの開発 III
戸田 亮、瀧本翔平、植松拓真、村川 智、福山 寛
日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学、2018 年 3 月 22-25 日)

セミナー等

35. ヘリウムの 2 次元系で新奇な量子相を探す
福山 寛
物理部会談話会 (東京大学教養学部物理部会、2017 年 6 月 22 日)
36. 極低温への招待
福山 寛
静岡東高校・研究室見学会講義 (東京大学、2017 年 8 月 4 日)
37. 単原子層ヘリウム研究の新展開 ～量子液晶と量子スピン液体
福山 寛
教室談話会 (大阪市立大学理学部物理学科、2017 年 11 月 17 日)

藤井 武則

電気二重層キャパシタ構造を応用した新規熱電変換素子の作製

電界効果トランジスタ (FET) は半導体上のゲート絶縁膜に電圧を印加することでキャリアを制御することができるが、その中でも、電気二重層トランジスタ (EDLT) は FET の絶縁層として電解液を用いたものであり、従来の FET よりも 10 倍以上多い $10^{14}\sim 10^{15}\text{cm}^{-2}$ のキャリアを誘起できる。本研究では EDLT を応用し、p 型と n 型の物質の間に電解液を満たし、その間にゲート電圧を印加することで 2 つのチャネルを同時に制御する電気二重層キャパシタ構造の作製を試みた。半導体型単層カーボンナノチューブ(SWCNT)は、巨大な熱起電力を示すことが報告されており [1]、さらに、電気二重層トランジスタ(EDLT)によってゲート電圧の符号を逆転させることで、p 型と n 型の両方のキャリアを誘起できることが知られている [2]。ここでは、2 つの SWCNT を p 型と n 型の電極に用いその熱電性能を制御した。

ゲート電圧を印加すると、正極の熱起電力は正に、負極の熱起電力は負に増大し、ホールと電子がそれぞれの電極に注入されることが確認された。熱起電力が最大になるゲート電圧は正負ではほぼ対称となっており、ホールドーピングで $80\ \mu\text{V}/\text{K}$ 、電子ドーピングで $-40\ \mu\text{V}/\text{K}$ となった。今後、熱起電力が最大となるゲート電圧をかけたまま温度を下げ、電解液が凍って蓄積電荷が固定された状態で p-n 間を短絡することによって、新しい概念の熱電変換素子の試作を行う。

[1] Y. Nakai *et al.*, APEX 7, 025103 (2014).

[2] K. Yanagi *et al.*, Nano Lett. 14, 6437 (2014).

研究成果リスト

発表論文、著書等

1. Trade-off studies on LiteBIRD reflectors
H. Sugai, T. Matsumura, J. Suzuki, M. Maki, M. Hosumi, M. Hazumi, N. Katayama, S. Utsunomiya, S. Kashima, Y. Sakurai, H. Imada, H. Ishino, T. Fujii
Proceedings of SPIE 10372, 103720I (2017)
2. Low temperature transport properties of pyrolytic graphite sheet
S. Nakamura, D. Miyafuji, T. Fujii, T. Matsui, H. Fukuyama
CRYOGENICS 86, 118 (2017)

学会発表

3. 鉄系超伝導体の圧力下における熱起電力およびネルンスト効果
藤井武則
日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学) 2017 年 9 月
4. Au-SM-RE 系近似結晶の構造と磁性
石川明日香, 常盤和靖, 松下能孝, 藤井武則, 竹内恒博, 田村隆治
日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学) 2017 年 9 月
5. バルク Bi-2223 単結晶における Kosterlitz-Thouless (KT) 的な超伝導転移の観測
佐々木菜絵, 小杉健太, 足立伸太郎, 藤井武則, 木村尚次郎, 伊藤利充, 渡辺孝夫
日本物理学会 2017 年秋季大会 (岩手大学) 2017 年 9 月
6. 磁気抵抗から観たアンダードーピング Bi-2223 の超伝導揺らぎ
渡辺孝夫, 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, 近藤晃弘, 金道浩一
日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大学) 2018 年 3 月
7. Bi-rich な Bi-2212 単結晶の輸送特性
川村圭輔, 佐々木菜絵, 藤井武則, 伊藤利充, 木村尚次郎, 足立伸太郎, 谷口晴香, 中西良樹, 吉澤正

人, 渡辺孝夫

日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大学) 2018 年 3 月

8. 鉄系超伝導体と金属における異常な界面効果

田島稜雅, 宮本幸宏, 松田梓, 藤井武則

日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大学) 2018 年 3 月

9. Au-Ga-Tb 系 1/1 近似結晶の作製と磁性 II

稲垣和樹, 石川明日香, 廣戸孝信, 常盤和靖, 藤井武則, 田村隆治

日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大学) 2018 年 3 月

10. トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{2-x}\text{Sn}_x\text{Te}_2\text{Se}$ の STM/STS 観測

森田亮, 酒井健一, 藤井武則, 松田梓

日本物理学会 第 73 回年次大会 (東京理科大学) 2018 年 3 月

11. 電気二重層キャパシタ構造を応用した新規熱電変換素子の作製

藤井武則

第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学) 2018 年 3 月

12. FZ 法を用いた透明導電性酸化物 InGaZnO_4 の大型バルク単結晶育成

田中佑典, 藤井武則, 和田一啓, 清水将乃斗, 廣地佑介, 加瀬直樹, 田村隆治, サリーム デンホルム, 君塚昇, 宮川宣明

第 65 回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学) 2018 年 3 月

国際会議

13. Anomalous Metal Interface Effect of Iron-based Superconductors

Ryoga tajima, Yukihiro Miyamoto, Takenori Fujii, Azusa Matsuda

30th International Symposium on Superconductivity (Tokyo, Japan) 2017 年 12 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、極低温におけ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 6 研究室、206.5 m²の貸出を行った。使用料金は昨年度と同じく 2,000 円 /m²/月とした。電気・水道・電話など、研究活動に伴うランニングコストについては別途実費を請求している。本年度後半に実施された「東京大学低温センターヘリウム液化回収設備の増強工事」に伴い、一部の研究室については年度途中で貸出を終了した。このため、本年度末時点での共同利用研究室は全 4 研究室、138 m²となった。

共同利用装置

本年度の装置使用料金は、昨年度と同じく PPMS と MPMS に関しては 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 円とした。また本年度から、MPMS に限り、産学連携利用を開始した（1 日 25,000 円）。

本年度も昨年度と同じく、PPMS および MPMS(1)は通年稼働、MPMS(2)は繁忙期のみの稼働とした。過去からの使用日数推移を図 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 MPMS が 198 日、PPMS が 137 日であった。共同利用に占める依頼測定の割合は PPMS が 3%、MPMS が 4%であった。共同利用による PPMS の利用者は 6 部局 13 研究室、MPMS の利用者は 4 部局 15 研究室、全体では 7 部局 24 研究室であった。産学連携利用は 1 社で利用日数は 55 日であった。

MPMS(1)は導入後 22 年、PPMS は同 19 年が経過しており、MPMS(2)は製造から約 30 年が経過している。本年度は PPMS 電源盤の故障、MPMS(1)の制御装置の電源故障、MPMS(2)の試料駆動装置の故障、ヘリウム液面計の故障が発生し、それぞれ交換修理を行った。

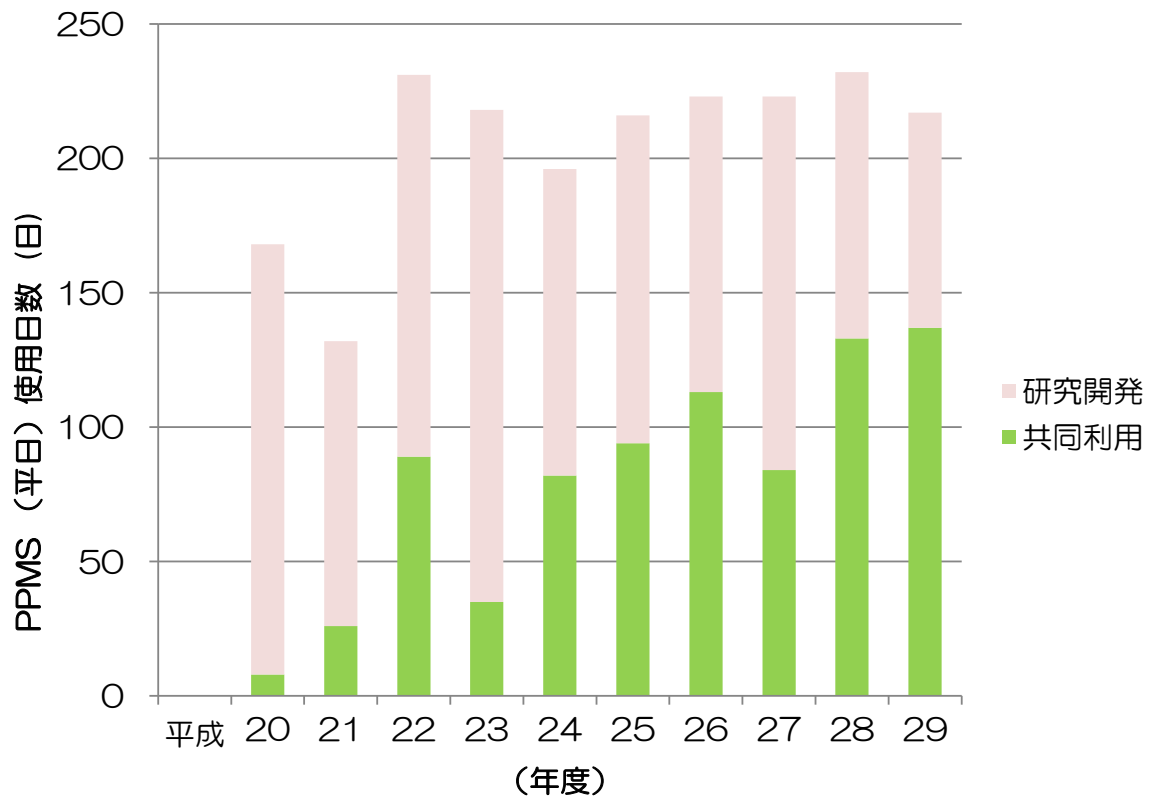


図1 物性評価システム(カンタム・デザイン社 PPMS)の使用日数

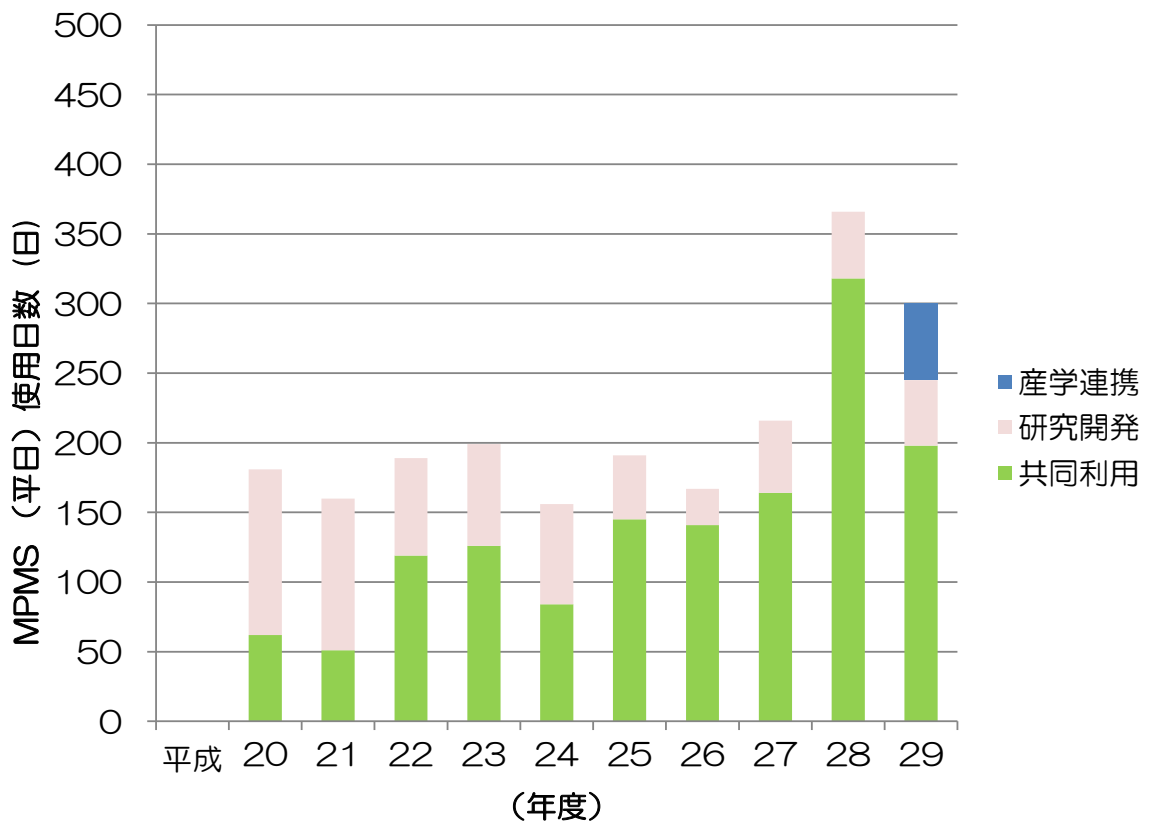


図2 SQUID 磁化測定装置(カンタム・デザイン社 MPMS)の使用日数

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 29 年度の液体窒素供給量は 426,166 L (図 1)、また液体ヘリウム供給量は 237,477 L (図 2) と、ともに前年度より少ない値となった。

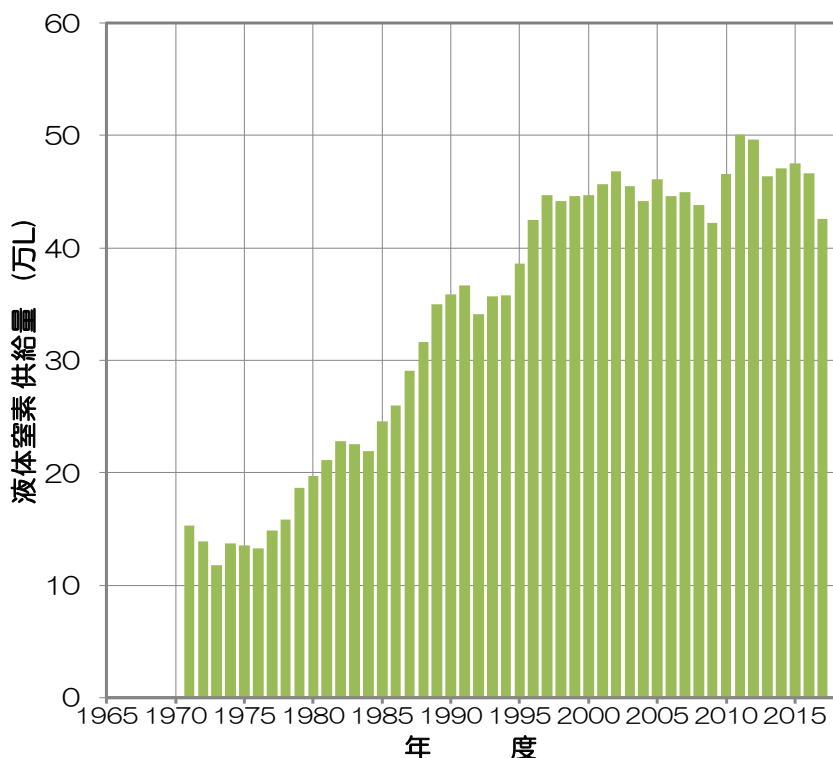


図 1 年度別 液体窒素供給量

表 1 平成 29 年度 液体窒素使用研究室 登録数

医学系研究科	39 研究室	生物生産工学研究センター	5 研究室
工学系研究科	93 研究室	先端科学技術研究センター	1 研究室
理学系研究科	61 研究室	総合研究博物館	2 研究室
農学生命科学研究科	78 研究室	大気海洋研究所	1 研究室
薬学系研究科	28 研究室	地震研究所	3 研究室
アイソトープ総合センター	4 研究室	附属病院	56 研究室
アジア生物資源環境研究センター	1 研究室	分子細胞生物学研究所	19 研究室
環境安全研究センター	3 研究室	VDEC	1 研究室
情報理工学系研究科	2 研究室	素粒子物理国際研究センター	1 研究室
新領域創成科学研究科	1 研究室	低温センター	2 研究室

合計 20 部局、401 研究室

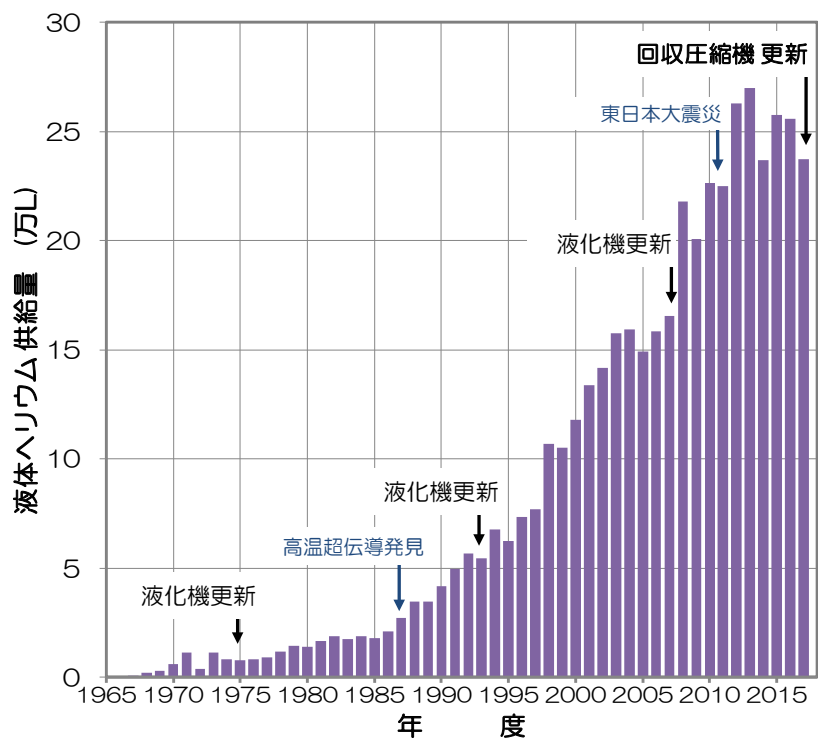


図2 年度別 液体ヘリウム供給量

表2 平成29年度 液体ヘリウム使用研究室 登録数

医学系研究科	1 研究室	薬学系研究科	7 研究室
工学系研究科	26 研究室	附属病院	1 研究室
理学系研究科	20 研究室	低温センター	4 研究室
農学生命科学研究科	3 研究室	合計 7 部局、62 研究室	

2. 寒剤供給料金

平成29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29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29年度液体ヘリウム使用料金

【平成29年4月～平成30年3月】

$$\text{供給価格} = 184 \times \text{課金対象供給量 (L)} + 1,168 \times \text{損失ガス量 (m}^3\text{)} \dots (1)$$

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 29 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 29 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 51 台だった。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 29 年度は定期的な点検等作業の他、以下の 3 件の修理等を実施した。

- ・ 2017 年 5 月 ヘリウム液化システム制御用低温長軸弁修理および保守
これに伴い、液化システムを室温まで昇温するため 2 日間液体ヘリウム供給を休止した。
- ・ 2017 年 9 月 液体ヘリウム移送用三重管(液化機-大型容器間)閉塞解除作業
- ・ 2017 年 11 月～2018 年 3 月 電動式リフト(テーブルリフター)修理

平成 29 年度の液体ヘリウムの供給量減少の主な要因はテーブルリフター故障に伴う供給制限であった。テーブルリフターは液体ヘリウム汲み出しポンプでの汲み出し作業で移送管に小分け容器を取り付けるときに使用する設備であるが、平成 29 年 11 月 6 日午後上下に作動できない状態となった。原因はシリンダー部分の経年劣化だった。修理部品の手配に時間がかかり復旧は平成 30 年 3 月 16 日となった。11 月以降は通常 2 系統で行う汲み出し作業を予備の 1 系統だけで行なわざるを得ず申込通りの供給本数を確保できなくなったため、特に繁忙となる 1 月には物性研究所からの協力を得て物性研究所から低温センターへ液体ヘリウムを移送した。加えて、12 月下旬にはテーブルリフター用ピットに架台を仮設して 1 月中旬からハンドリフターにより小分け容器をポンプ付き移送管に取り付け・取り外ししての汲み出し作業を開始し、通常の 7 割程度の供給本数を確保した。

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、平成 29 年度はヘリウムガス回収設備の更新及び増強を実施した。主要な事業はヘリウム回収圧縮機、油水分離器、高圧ヘリウムガス乾燥器、液体窒素充填系統の更新と、1125 m³相当の長尺カードルの増設である。平成 29 年 11 月 13 日の開札の結果、施工業者が日本エア・リキード(株)に決定し、

1月下旬から設置作業を開始し、納入期限は3月30日であった。この設備設置作業に伴い、次の期間の寒剤供給を休止した。

- ・平成30年2月27日(火) 液体窒素供給休止
- ・平成30年3月18日(日)～3月20日(火) ヘリウムガス回収休止、(平日)液体ヘリウム配達休止

ヘリウムガス回収を休止した間に低温センター建物から計772 m³のヘリウムガスを大気放出した。

当初は寒剤供給休止期間がより長期にわたる可能性があったため、12月に寒剤供給制限の事前調査を行ない、液体窒素使用研究室、液体ヘリウム使用研究室のうちおよそ半数からの回答があり、回答された必要数量の合計は液体窒素、液体ヘリウムいずれも通例の概ね8割程度だった。平成30年度から平成31年度にかけてはヘリウム液化システムの増設事業が計画されているので、寒剤ユーザへの負担をできる限り軽減できるよう、速やかに工程調整を行ないたいと考えている。

全般的な活動報告

東京大学低温センター設立 50 周年記念式典

平成 30 年 2 月 21 日に低温センター設立 50 周年記念式典、記念講演会、記念祝賀会を、伊藤国際学術研究センター謝恩ホールおよび多目的スペースにおいて開催した。式典は大越慎一センター長の式辞に始まり、大学執行役・副学長 相原博昭教授、小林俊一元センター長（元理化学研究所理事長）、東北大学金属材料研究所極低温科学研究センター長 佐々木孝彦教授、理学系研究科長 武田洋幸教授および工学系研究科長 大久保達也教授よりご祝辞を頂いた。その後、島野亮教授より低温センターの現況報告がなされ、続いて式典前日と当日午前で開催した学内寒剤利用研究室若手研究者による恒例の研究交流会のアワード表彰式を行った。式典への参加者は、学内外合計で 187 名であった。

記念講演会では、元センター長 福山寛理学系研究科教授・低温センター兼任教授、前センター長 樽茶清悟工学系研究科教授、田之倉優農学生命科学研究科教授、十倉好紀工学系研究科教授・東京大学卓越教授による記念講演が行われた。

講演会後には多目的スペースにて記念祝賀会を開催した。記念式典、記念講演会、記念祝賀会の参加者は総計 209 名と大変盛会となった。又、当日は、低温関連企業 10 社によるブース出展も行われた。

本記念事業の発起人の方々を以下に記載いたします（五十音順、敬称略）。磯部 寛之、岩佐 義弘、岩本 敏、大越 慎一、大戸 梅治、大矢 忍、岡本 徹、小野瀬 佳文、鹿野田 一司、川崎 雅司、島野 亮、関野 正樹、高橋 浩之、田中 雅明、田之倉 優、田畑 仁、為ヶ井 強、樽茶 清悟、十倉 好紀、永田 宏次、福山 寛、藤森 淳、三田 吉郎、村川 智、山下 穰、山本 希美子、柳澤 茂孝、脇原 徹、以上 28 名。



左上から順に、記念式典において式辞を述べる大越センター長、来賓祝辞を下された相原大学執行役・副学長、小林元センター長、佐々木東北大学教授、武田理学系研究科長、大久保工学系研究科長。



左から順に、記念講演会で御登壇いただいた、福山元センター長、樽茶前センター長、田之倉教授、十倉教授。



左から順に、記念祝賀会で御挨拶をいただいた大塚洋一 筑波大学名誉教授（元低温センター助教授）、乾杯の音頭をとってくださった鹿野田一司 工学系研究科教授（元センター長）、祝賀会の風景。

東京大学低温センター50周年 記念式典・記念講演会・記念祝賀会



2018年2月21日（水）
於 東京大学伊藤国際学術研究センター
伊藤謝恩ホール・多目的スペース

式次第

<p>記念式典 13:30～</p> <p>式辞 東京大学低温センター長</p> <p>来賓祝辞 東京大学副学長 元理化学研究所理事長・元東京大学低温センター長 東北大学極低温科学センター長 東京大学理学系研究科長 東京大学工学系研究科長</p> <p>低温センター現況報告・研究交流会アワード表彰式 東京大学低温センター教授</p>	<p>伊藤謝恩ホール 大 越 慎 一 相 原 博 昭 小 林 俊 一 佐々木 孝 彦 武 田 洋 幸 大久保 達 也</p>
<p>記念講演会 15:15～</p> <p>15:15～ 「ヘリウム四酸化のエコミクスとヘリウム研究のフィジクス」 東京大学理学系研究科教授・元東京大学低温センター長</p> <p>15:45～ 「固体における量子位相と量子もつれの検出と制御——低温環境の物理として」 東京大学工学系研究科教授・前東京大学低温センター長</p> <p>16:15～ 「クライオ技術を支える構造生命科学」 東京大学農学生命科学研究科特任教授・東京大学名誉教授</p> <p>16:45～ 「トポロジカル磁性体の創発物性」 東京大学工学系研究科教授・東京大学卓越教授</p>	<p>伊藤謝恩ホール 福 山 真 樽 茶 清 彦 田 之 倉 健 十 倉 祥 紀</p>
<p>記念祝賀会 18:00～</p>	<p>多目的スペース</p>

当日配布したリーフレット（抜粋）。

（島野 記）

第9回低温センター研究交流会

平成30年2月20日(火)、21日(水)、伊藤国際研究センターにて「第9回 低温センター研究交流会」が開催された。本年度は低温センター設立50周年にあたり、低温センター設立50周年記念事業の一環としての研究交流会であった。理学系、工学系、農学生命科学、附属病院、低温センターの5部局から、125名の参加者、11件の口頭発表と58件のポスター発表があり、広く寒剤を用いた、様々な分野の最先端研究に触れることが出来る講演会であった。発表を行った若手研究者にとっても、伊藤謝恩ホールという大会場で発表する経験は、これからの研究活動において大きな自信になったと思われる。また、ポスターセッションの時間には、低温関連企業10社によるブースの出展も行われ、低温技術に関する様々な展示を見ることが出来た。

アワード表彰式は設立50周年記念式典で行われ、Le Duk Anhさん(工学系研究科・電気系工学専攻・助教)にベストプレゼンテーション・アワード、高山 正行さん(理学系研究科・物理学専攻・博士課程2年)、金子 竜馬さん(工学系研究科・物理工学専攻・修士課程2年)、石 玄さん(農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・PD)の3名にベストポスター・アワードが贈呈された。

来年度以降も、さらに多くの若手研究者に参加していただけます様、よろしくお願い致します。



講演会の様子



ポスターセッションの様子



受賞者の方々(左から高山 正行さん、石 玄さん、大越センター長、金子 竜馬さん、Le Duk Anhさん)

(藤井 記)

第9回 低温センター研究交流会 プログラム

口頭発表

- O-01 吉清 まりえ 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）
イプシロン酸化鉄ナノ磁性体の分光学的および理論的研究
- O-02 遠山 晴子 理学系研究科・物理学専攻・M1（長谷川研究室）
その場電気伝導測定による半導体基板上のPb超薄膜における超伝導特性
- O-03 中川 裕治 工学系研究科・物理工学専攻・D1（岩佐・中野研究室）
層状物質の低キャリア領域における強結合2次元超伝導
- O-04 勝見 恒太 理学系研究科・物理学専攻・M2（島野研究室）
高強度テラヘルツ波励起によるd波超伝導体Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+x}におけるヒッグスモードの観測
- O-05 宇佐美 潤 理学系研究科・物理学専攻・M1（福山研究室）
超流動ヘリウムのフィルムフローの律速メカニズム
- O-06 服部 裕也 工学系研究科・マテリアル工学専攻・D1（枝川・徳本研究室）
PbBi₂Te₄系トポロジカル絶縁体の作製とバルク絶縁性
- O-07 西早 辰一 工学系研究科・物理工学専攻・D1（川崎研究室）
ディラック半金属Cd₃As₂薄膜における量子輸送現象とトポロジカル相転移
- O-08 Le Duc Anh 工学系研究科・電気系工学専攻・助教（田中・大矢研究室）
Fe-based narrow-gap ferromagnetic semiconductors: New materials for high performance spintronic devices
- O-09 中塚 祐子 生産技術研究所・助教（井上研究室）
マンガンホウ酸塩ガラスの磁気的性質
- O-10 都 浩之 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・D2（分析化学研究室）
アコヤガイ稜柱層のカルサイト結晶の欠陥に関する研究
- O-11 林 義之 理学系研究科・物理学専攻・D2（高木・北川研究室）
ハイパーハニカム β -Li₂IrO₃のNMR・磁化測定による高圧相図

ポスターセッション

- P-01 湯本 真人 附属病院てんかんセンター・センター長
液体ヘリウムで冷却されたSQUID磁束計の臨床応用
- P-02 荒城 綾香 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・M2（分析化学研究室）
バイオミネラル内の酸性タンパク質における塩基性残基の役割の解析
- P-03 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）
免疫染色に用いる磁性ビーズの評価
- P-04 陸 鵬 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・D1（食品生物構造学研究室）
好熱菌の鉄結合タンパク質の鉄結合特性に対するpHの影響の解析
- P-05 中川 幸祐 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）
シアノ架橋配位高分子におけるプロトン伝導性

- P-06 Zhendong Liu 工学系研究科・システム工学専攻・助教（大久保・脇原研究室）
Recent Development in Ultrafast and Continuous Flow Synthesis of Crystalline Microporous Materials
- P-07 秦 峰 工学系研究科・物理工学専攻・D2（岩佐・中野研究室）
Diameter dependent superconductivity in individual WS₂ nanotubes
- P-08 石 玄 農学生命科学研究科・応用生命化学専攻・養生訓を科学する医食農連携研究室・PD
構造情報に基づく 4-HIL 合成酵素の立体選択性の制御
- P-09 中林 耕二 理学系研究科・化学専攻・助教（大越研究室）
Cyanido-bridged metal assemblies with nano channeled or thermally stable structures
- P-10 兼古 寛之 工学系研究科・システム工学専攻・D2（堂免・嶺岸研究室）
ソーラー水素製造用半導体光電極に対する表面コーティングの検討
- P-11 浅原 弘勝 工学系研究科・電気系工学専攻・D1（田中・大矢研究室）
強磁性半導体 GaMnAs を用いた横型スピンバルブデバイスにおけるスピン依存伝導
- P-12 上田 健人 工学系研究科・物理工学専攻・M2（樽茶研究室）
超伝導 Al-並列二重ナノ細線 InAs-超伝導 Al デバイスでの超伝導電流の非局所信号の検出
- P-13 池 震棟 理学系研究科・物理学専攻・M2（藤森研究室）
Orbital magnetic moment anisotropy in heavy metal-Co heterointerfaces studied by x-ray magnetic circular dichroism
- P-14 西野 隆太郎 工学系研究科・物理工学専攻・M2（川崎研究室）
イオン液体を用いた PZT/Nb-SrTiO₃ 界面の伝導制御
- P-15 Olaf Stefanczyk 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）
Design and synthesis of chiral Ln(III)-W(V) molecular magnets
- P-16 柏原 悠太 工学系研究科・物理工学専攻・M1（岩佐・中野研究室）
絶縁体的遷移金属カルコゲナイドヘテロ界面における電気伝導
- P-17 山崎 翔太 理学系研究科・物理学専攻・M1（村川研究室）
超低温下で用いるヘリウム3融解圧力型温度計の設計
- P-18 入松川 知也 工学系研究科・原子力国際専攻・D3（高橋研究室）
マイクロ波信号多重化回路による γ 線 TES 読出実証
- P-19 吉田 郁哉 理学系研究科・化学専攻・M1（大越研究室）
集積型 Co-W オクタシアノ錯体のテラヘルツ波吸収特性
- P-20 室谷 悠太 理学系研究科・物理学専攻・D1（島野研究室）
GaAs の励起子共鳴励起下における光ドレスト状態の観測
- P-21 鈴木 亮太 工学系研究科・電気系工学専攻・M2（田中・大矢研究室）
p型ゲルマニウムから注入した共鳴トンネルキャリアによる鉄量子井戸中の量子サイズ効果の検出
- P-22 田中 未羽子 工学系研究科・物理工学専攻・M2（樽茶研究室）
2層グラフェンの zLL（ゼロランダウ準位）における非局所輸送測定
- P-23 井元 健太 理学系研究科・化学専攻・特任助教（大越研究室）
シアノ架橋型 Fe(II)スピנקロスオーバーネットワーク錯体における金属置換効果

- P-24 村瀬 秀明 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (鹿野田研究室)
一軸圧下における θ -(ET)₂I₃ の電気伝導特性
- P-25 鈴木 尚将 理学系研究科・物理学専攻・M1 (村川研究室)
単原子層ヘリウム 3 の新奇スピン液体状態の解明に向けた NMR セルの設計・製作
- P-26 松岡 秀樹 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (岩佐・中野研究室)
分子線エピタキシー技術を用いて作製した NbSe₂ エピタキシャル薄膜における超伝導
- P-27 小峯 誠也 理学系研究科・化学専攻・D2 (大越研究室)
中心対称性を持たないシアノ架橋型金属集積体における非線形磁気光学効果の観測
- P-28 大内 祐貴 工学系研究科・物理工学専攻・D3 (川崎研究室)
強磁性 Co 酸化物薄膜における磁気輸送特性と電荷移動効果
- P-29 Chun LIN 理学系研究科・物理学専攻・M2 (藤森研究室)
Electron-doped superconductor Pr_{2-x-y}La_yCe_xCuO₄ after protect annealing
- P-30 神永 健一 理学系研究科・化学専攻・D3 (長谷川研究室)
LaO エピタキシャル薄膜の超伝導特性
- P-31 早川 奈伊紀 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田中・大矢研究室)
Transport and magnetic properties of n-type ferromagnetic semiconductor (In,Fe)As co-doped with Mn ; (In,Fe,Mn)As
- P-32 高山 正行 理学系研究科・物理学専攻・D2 (島野研究室)
極低温高密度下におけるバルク GaAs 中の励起子間相互作用と励起子熱化ダイナミクス
- P-33 Kunal Kumar 理学系研究科・化学専攻・M1 (大越研究室)
Emission Color Modulation and Slow Magnetic Relaxation in the Series of Trimetallic Complexes
- P-34 若松 浩大 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (鹿野田研究室)
Measurements of thermoelectric effects in the quasi-2D organic conductor κ -(BEDT-TTF)₄Hg_{2.89}Br₈
- P-35 吉田 研介 理学系研究科・物理学専攻・M2 (村川研究室)
超流動ヘリウム 3 における量子アンドレーエフ反射角度依存性観測装置の開発
- P-36 王 越 工学系研究科・物理工学専攻・D1 (岩佐・中野研究室)
Transport properties of transition-metal dichalcogenide thin films grown by molecular beam epitaxy
- P-37 WANG Junhao 理学系研究科・化学専攻・M2 (大越研究室)
Cyanido-bridged d-f bimetallic frameworks showing dual functionalities of Dy-centered slow magnetic relaxation and color-tunable photoluminescence
- P-38 丸橋 一輝 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (川崎研究室)
SrTiO₃ 基板上的 EuTiO₃ 薄膜の高移動度化と磁気輸送特性
- P-39 山原 弘靖 工学系研究科・電気系工学専攻・助教 (田畑研究室)
Co-Si 置換希土類鉄ガーネット薄膜におけるクラスターガラス状態とスピン波励起
- P-40 中村 祥子 低温センター・研究開発部門・特任助教
電流注入下の s 波超伝導体 NbN 薄膜におけるテラヘルツ線形分光による超伝導ヒッグスモードの観測

- P-41 岡本 浩平 工学系研究科・電気系工学専攻・M2 (田中・大矢研究室)
p-InFeAs/n-InMnAs 強磁性ヘテロ接合におけるスピン依存伝導
- P-42 Romain Grasset 低温センター・研究開発部門・PD
Higgs spectroscopy in a d-wave superconductor
- P-43 生井 飛鳥 理学系研究科・化学専攻・助教 (大越研究室)
イプシロン酸化鉄のミリ波磁気回転
- P-44 稲垣 雄介 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (鹿野田研究室)
有機 α -(BEDT-TTF)₂I₃における電荷秩序相および massless Dirac 電子相の磁気輸送特性
- P-45 小川 勝之 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 3 の気液相転移の観測
- P-46 越川 翔太 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (岩佐・中野研究室)
3次元バルク超伝導体における非相反電荷輸送現象
- P-47 塚本 聖哉 理学系研究科・化学専攻・M1 (大越研究室)
イプシロン酸化鉄の磁気特性における金属置換の効果
- P-48 中澤 佑介 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (川崎研究室)
化合物半導体基板上に成長した Cd₃As₂ 薄膜の結晶性および輸送特性の評価
- P-49 関 宗俊 工学系研究科スピントロニクス学術連携研究教育センター・特任准教授 (田畑研究室)
機能性酸化鉄薄膜を用いた太陽光エネルギー変換素子
- P-50 宮内 恵太 理学系研究科・物理学専攻・M1 (長谷川研究室)
Li インターカレートした青リンのエピタキシャル成長とその電気伝導特性
- P-51 林 洋平 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (千葉研究室)
Pt/Co/Pd/MgO 構造における磁気異方性に対する電界効果の基板依存性
- P-52 丹羽 宏彰 理学系研究科・物理学専攻・M1 (島野研究室)
銅酸化物超伝導体 La_{2-x}Sr_xCuO₄ における光誘起準安定相の発見
- P-53 佐藤 彰一 工学系研究科・電気系工学専攻・研究生 (田中・大矢研究室)
Geometrical effect on spin accumulation signals in a diode structure fabricated on Si substrate
- P-54 金子 竜馬 工学系研究科・物理工学専攻・M2 (十倉・藤岡研究室)
(Nd_{1-x}Pr_x)₂Ir₂O₇ のモット臨界点近傍におけるホールドーピング効果
- P-55 Andre E. B. Amend 理学系研究科・物理学専攻・D1 (福山研究室)
Scanning Tunneling Spectroscopy Study of Graphene Zigzag Nano-ribbons
- P-56 板橋 勇輝 工学系研究科・物理工学専攻・M1 (岩佐・中野研究室)
Magnetochiral Hall effect in a 2D trigonal superconductor
- P-57 濱崎 拓 工学系研究科・マテリアル工学専攻・D2 (枝川・徳本研究室)
Bi-Sb トポロジカル絶縁体中転位の電氣的性質
- P-58 戸田 亮 低温センター・技術専門職員
小型超低温連続冷凍システムの開発 II
Development of a Compact and Continuous Sub-mK Refrigerator II

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。本年度も、一昨年度より引き続いて年6回、キャンパス内の複数の会場を用いて開催し（表1）、588名が受講した。従来は、修士課程や学部4年生で研究室に配属されたばかりの学生が受講者のボリュームゾーンであったが、近年は、より低年次での受講が増加しているだけでなく、図1のグラフに見るように、博士課程の学生や、教職員、研究員、外部の請負業者にも定常的に受講されるようになってきている。これは、寒剤を使用し始める人が、経験や職分、作業内容に関わらず、あまねく講習会を受講するようになってきたことを示していると考えられ、非常に良い傾向である。一方で、ただでさえ分野がまちまちな受講者の多様性がさらに増したということでもあり、すべての受講者に対して、集中力を切らせることなく必要な知識を伝えるためには、相応の配慮も必要である。

アンケートで見られる典型的な不満は、「〇〇は、自分の研究（学業）に関係ない」である。講習会では、液体窒素ユーザーが液体ヘリウムを使い始めたり、ガスの保管方法を高圧ガスボンベから液体に切り替えたりという将来における拡張性を考慮し、液体窒素、液体ヘリウム、高圧ガスボンベ、高磁場に関わる安全教育を広く行っている。そのため、一部のトピックが現在も未来においても関係ないという場合も実際に起こりうる。しかし、それが誤認であったり、それが原因で関係のあるトピックも聞き逃してしまったりすることは避けなくてはならない。低年次の学部生の場合は、寒剤を使用する実際の場面を知らないだけなので対策は簡単で、寒剤が使用される装置の具体例や講習の目的にひとこと触れるだけで好評価が得られた。一方、自身の研究・業務における寒剤の使用方法が既に固定化している高年齢層の場合は、本人の判断に委ねるしかないので、過度に具体的な例示を避けつつ、事故事例等を差し挟んで、現在行っている作業に直接の関係がなくても退屈しにくい講習内容を心がけている。

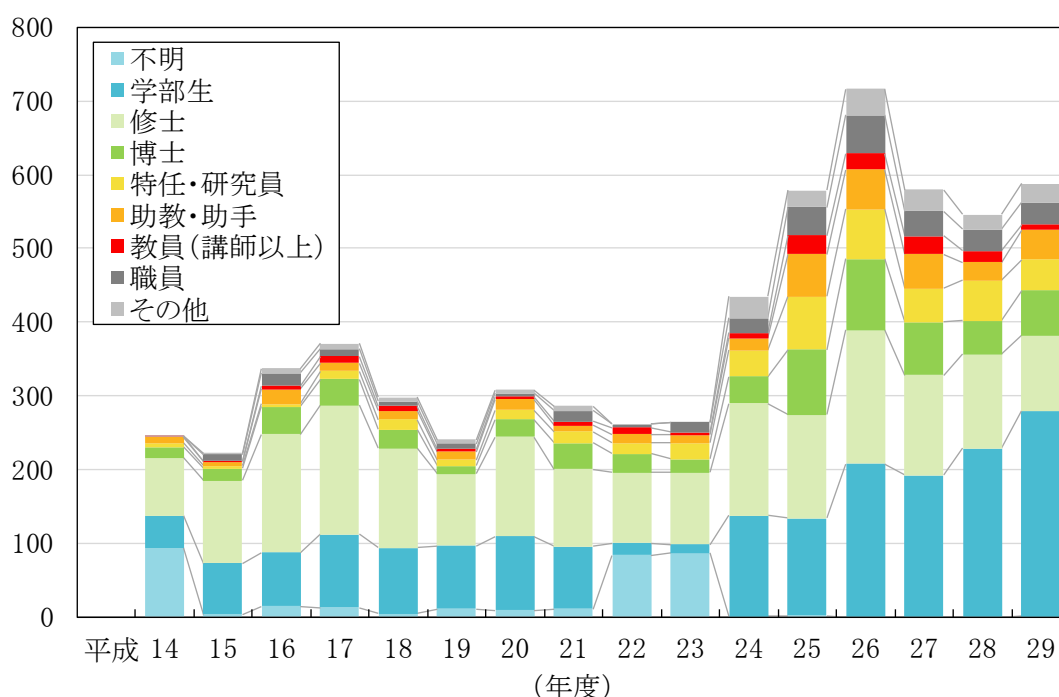


図 1 安全講習会受講者の身分の推移（平成 22, 23 年度の身分不明の参加者は大部分が学部生）。

表 1 平成 29 年度の安全講習会一覧

回	日時	会場
第 1 回	4 月 27 日 (木) 10:25-12:10	武田ホール
第 2 回	5 月 10 日 (水) 13:00-14:45	武田ホール
第 3 回	6 月 13 日 (火) 16:50-18:35	小柴ホール
第 4 回	10 月 2 日 (月) 14:55-16:40	弥生講堂 一条ホール
第 5 回	10 月 31 日 (水) 16:50-18:35	鉄門記念講堂
第 6 回	1 月 18 日 (木) 13:00-14:45	理 1 号館 233 号室



図 2 講習会風景 (第 2 回)。和文と英文のスライドを 2 面のスクリーンに同時投影している。

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。講習は日本語で行っているが、外国人の受講者には英文のレジュメを配布し、2面のスクリーンがある会場では図2のように英文のスライドも映写している。講習終了後には理解度確認のミニテストを課し、合格者には修了証と回答例を送付した。

近年、経済産業省による産業保安のスマート化の一環で、高圧ガス関連法規も、より効率的・効果的な規制となるように改正が進められている。合算基準の変更や、高沸点の液化ガスの一部適用除外といった、規制対象の緩和・明確化に注目してしまいがちだが、このスマート化の基本的な主旨は、技術革新に加えて設備の老朽化、人員交代によって多様かつ複雑に変化するリスクに備えるために、現場の自主保安力を高めることで安心・安全を確保し、同時に国際競争力を強化することである。自主保安力強化の具体的な方法としては、非定常時のリスク評価や危険予知の教育、IoTを活用した様々なパラメータの常時監視、過去の事故事例の共有・一般化、既存のリスクの合理的な再評価等が挙げられていた。先に挙げた規制対象の見直しも、合理的なリスク評価を根拠に行われており、連鎖事故リスク軽減のための障壁の活用や、新技術への対応において、評価可能な基準を与えている。

実際のところ、研究室での高圧ガス・寒剤の使用に対して、今回の高圧ガス関連法規の改正の影響はほとんど無い。たとえ貯蔵量の基準が緩和されても、不必要な高圧ガスを研究室に貯めるリスクは避けるべきだし、保安力を強化して認定を受けることのインセンティブは大規模事業所向けのものである。一方で、大学の研究室は、頻繁な人員交代の中で新物質・新技術を取り扱いながら人材を育成する機関であり、スマート化の具体的な試みを行う保安上のメリット、教育効果は大きいと考えられる。低温センターでは、これまでも、事故事例や対策についての検討を行い講習会での注意喚起に努めてきたが、IoTを活用した平時からのモニタリングや、高圧ガス以外の脅威も考慮した具体的なリスク評価等、各研究室が、それぞれの環境に則して行うべき、より先進的な試みについても積極的に呼びかけ、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。

(中村 記)

平成 29 年度東京大学技術職員研修「低温技術研修（初学コース）」

東京大学には、技術職員に職務と責任の遂行に必要な知識・技術等を修得させること、その能力・資質等を向上させることを目的として実施する全学技術研修の制度がある。近年、低温センターではこの全学技術研修として「低温技術研修（初学コース）」を開催している。本研修では、低温実験の初学者を対象とし、低温技術に関する講義および実習を通じて、液体寒剤の安全な取り扱い方法、液体寒剤の有効な利用方法、低温実験機器の使用方法などの基本的知識・技術を修得することを目的としている。

準備は主担当である技術職員の戸田、寺岡を中心に行った。講義の講師として村川准教授、中村特任助教、加茂技術職員を加え、平成 29 年 11 月 28 日（火）から 11 月 30 日（木）の 3 日間の日程で実施した。講義については低温センターのセミナー室、実習は共同利用装置室および液体ヘリウム供給室で行った。定員 6 名の募集に対し 1 名の応募があった。研修修了者には修了証書を授与した。また修了の事実は人事記録に記載された。研修日程は表 1 のとおりである。

	9:30- -9:50	9:50- -10:50	10:50- -12:00		13:00- -16:30
1日目	受付 開講式	講義(60分) 低温科学技術入門	講義(70分) 低温寒剤の取り扱い	屋休み	実習(210分) 液体窒素の使用実習 (運搬・汲出・冷却実験・結果考察)
	9:30- -10:20	10:20- -11:10	11:10- -12:00		13:00- -15:30
2日目	講義(50分) 低温実験の基礎	講義(50分) 液体ヘリウムの使い方	実習(50分) 高圧ポンプの使用実習	屋休み	実習(150分) 液体ヘリウムトランスファー実習 実習・見学(60分) トランスファー実習のまとめ 液化回収設備見学
	9:30- -10:30	10:30- -11:20	11:20- -12:00		13:00- -15:30
3日目	実習(60分) 真空シール実習	講義(50分) 低温の生成	実習(40分) 液体ヘリウム 使用実習I	屋休み	実習(150分) 液体ヘリウム使用実習II・まとめ 講義(40分) 低温実験技術 閉講式

表 1:低温技術研修（初学コース）日程

講義「低温科学技術入門」（村川准教授）では、低温環境の意義、低温科学の歴史、低温センターの業務について紹介した。続く「低温寒剤の取り扱い」（加茂技術職員）では、寒剤使用に関するルール・法規制や、寒剤の性質を踏まえての安全な取り扱い方法について講義した。初日の午後は「液体窒素使用実習」と題して、自加圧式容器の銘板の内容確認、容器再検査が必要となる日の導出、100 L 自加圧式容器の運搬、エレベータを使用した移動など、実際に実務で必要となることを行った。100 kg を超える重量となる 100 L 自加圧式容器の運搬では、日常生活では気にとめない程度の小さな段差や凹凸、傾斜が問題となることを実感してもらった。続いて、容器からの汲み出しを行った。自加圧式容器の場合には、組み込まれている加圧機構を利用して液体窒素を簡単に汲み出すことができる。開放容器には汲み出し用の機構がないが、最近では専用の蒸発器付移送管が市販されているため、これを利用した汲み出しを行った。最後に、汲み出した液体窒素を用い、液体窒素に浸漬したときの物質の冷え方（温度の時間変化）や、物質によって熱収縮率が異なること、液体窒素による空気の液化とその蒸発、電気抵抗の温度変化などの実験、観測をおこなった。

2 日目の講義「低温実験の基礎」（戸田技術職員）においては、温度の定義や温度測定の方法、各種温度計の特徴などを紹介した。また、前日の実習内容を踏まえつつ、熱伝導や熱容量、熱膨張などの基礎的知識について解説した。続く講義「液体ヘリウムの使い方」（寺岡技術職員）では、午後からの液体へ

リウムを用いた実習を前に、液体ヘリウムの利用方法について解説した。ヘリウムは希少資源であるため、低温センターから供給する液体ヘリウムは、キャンパス全体でリサイクル利用することを前提としている。液体窒素に比べると利用にあたっての準備や注意点が多くなるため重点的に解説した。「ガスボンベ使用実習」では、低温寒剤と同様に高圧ガスとして規制を受ける高圧ガスボンベの使用方法やボンベの刻印の内容確認等について解説を行い、実際に圧力調整器を取り付けて気体を取り出し、圧力調整器を取り外して片付ける一連の作業を行った。午後は「液体ヘリウムトランスファー実習」として、実際に液体ヘリウムを移送する実習を行った。移送だけでなく、熱音響式液面計を用いた容器中の液面測定（図1）や、重量の測定による内容量測定、流量計を用いた蒸発ガス回収量の計測など、液体ヘリウムをリサイクル利用するうえで不可欠な各種計測についても実際に行い、移送効率や回収率の算出を行った。また、実際にヘリウムを回収、液化しているセンターの液化設備を紹介した。

3日目は、液体ヘリウムを用いた低温実験の流れにそって、低温実験で用いる技術的要素を紹介した。まず実習「真空シール」において、真空断熱容器のシール（インジウムシール）を行い、続いてヘリウムリークディテクタを用いたリークテストを行った。講義「低温の生成」（戸田技術職員）では、物体を冷却する方法、低温寒剤を作る方法など、低温あるいは寒剤を作り出す方法について紹介した。「液体ヘリウム使用実習」では、真空シール実習で封じた真空断熱容器を用い、液体窒素による予冷、デュワー内のヘリウム置換、液体ヘリウムの移送など、典型的な低温実験の手順を紹介するとともに、真空断熱や構造材の使い分けによる熱制御（温度差の作成）、真空断熱容器に熱交換ガスを入れる（真空をやぶる）効果などを実際に観察した。また、超伝導式液面計や熱音響式液面計と目視液面との比較、液体ヘリウムの減圧冷却、ヘリウムの超流動転移の観察も行った。講義「低温実験技術」（中村特任助教）では、低温で真空を得るための気密シールの作成方法やリークテスト法、物質の熱伝導率の違いを利用した熱制御、微小信号測定法、超伝導の利用、低温技術関係の文献紹介など、低温実験を行う際に必要となる基礎的な実験技術について紹介した。

今年度は二年ぶりの開催となったが、通算三回目ということもありスムーズに実施することができた。実際に受講者自身の手で運搬や移送などの作業を行ってもらい、寒剤の使用や低温環境についてより身近に感じていただけたものと考えている。低温センターでは、学内の様々な部局に寒剤を提供しているが、本研修の受講希望者は例年少ない。開催日程などをより工夫できればよいのではないかと考えている。

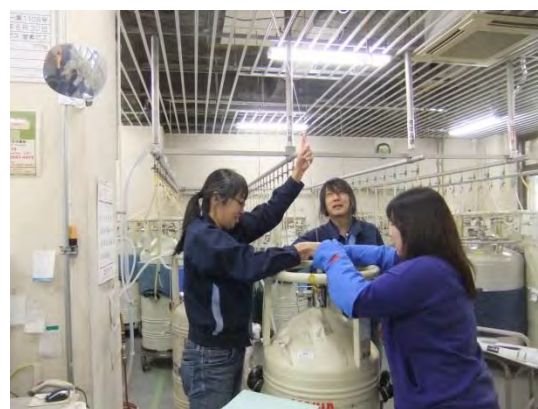


図1:熱音響式液面計による液面測定

(戸田 記)

2017 年度 低温センター技術研修

低温センターは寒剤を供給することが業務の大きな柱ではあるが、低温環境が科学研究に幅広く浸透している現在、低温環境特有の技術を紹介することも、寒剤を有効に使用してよりよい研究を行ってもらうためには非常に有益である。そのため、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。

2017 年度は五月祭の準備日である 5 月 19 日(金)に実施した。参加者は大学院生 4 名、学部生 1 名、特任助教 1 名の合計 6 名であった。所属の内訳は理学系研究科が 4 名、農学生命研究科が 2 名であった。

研修内容は 2015 年度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。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。

午後はず、開放型の液体窒素容器からの汲み出し実習を行った。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サイフォン[3]が製品化されている。しかしながら、正しい使い方はあまり周知されていないようであるため、センターで所有する該当製品を用いて実習を行った。

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]。移送前後で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しなかった。詳細は未だに不明ではあるが、液面測定の不確かさや容器内のガスの温度分布等のモデルと現実との違いなどから現れていると考えている。

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たため、実習ともに受講者にはおおむね好評であった。今後も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)

低温センター見学

2017年度も6月にフランス CNRS 国際共同研究所 IM-LED の構成員の方々、8月に静岡県立静岡高校の生徒と教諭、年が明けた2月にシンガポール国立大学とオーストラリアのラ・トローブ大学の学生と多数の方々が低温センターの見学に訪れた。高校生から海外の研究者まで幅広く低温センターおよびその活動に興味を持っていただき、大変感謝しています。

フランス CNRS 国際共同研究所 IM-LED

2017年6月2日(金)、大越センター長が共同代表を務めるフランス CNRS 国際共同研究所 IM-LED の構成員の方々19名(フランスの大学より12名、ルーマニアの大学より1名、日本の大学から7名)が国際研究会 IM-LED2017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し、大越研究室で利用している共同利用研究室の見学を行った。各研究者の方々の中には研究で日常的にヘリウムを使用している方もいたが、実際の液化システムを見る機会はそれほど無く、貴重な経験であったようで、興味を持って説明を聞いていただけた。



フランス CNRS 国際共同研究所 IM-LED の方々の見学の様子

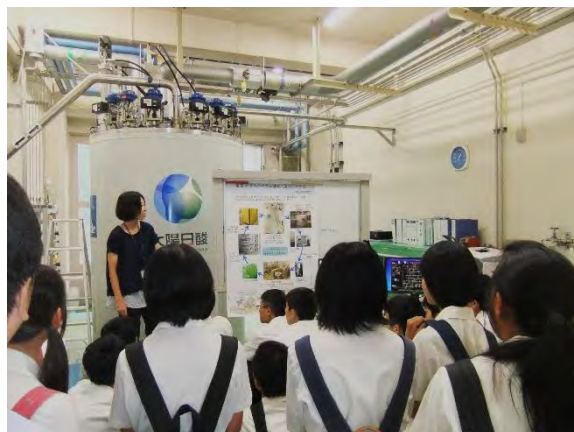
静岡県立静岡東高校

昨年に引き続き、2017年8月4日(金)に静岡県立静岡東高校の2年生の生徒38名と引率教諭3名が低温センターの見学に訪れた。最初に全員で大越センター長による低温センター紹介と福山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



大越センター長によるセンターの説明

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最先端の研究に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。高校生という若い世代に、最先端の研究における低温実験環境の必要性やその環境を安定的に維持するために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伝えることが出来、非常に有意義だったと思う。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。



リサイクルシステムを説明する様子

シンガポール国立大学およびラ・トローブ大学

2018年2月14日(水)に、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各3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。中村特任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。各々の設備の大きさもさることながら、ヘリウムガスの回収配管網が、公道の地下をも横切り本郷地区キャンパス全体に広がっているというスケールの大きさに感銘を抱いている様子で、短い見学時間だったにも関わらず質問が途切れなかった。

近年、アジア諸国では、ヘリウムの需要が年々増加しており、それに応じてオーストラリアでは、オセアニア初の液体ヘリウムプラントが2012年に生産を開始し、我が国同様の島国であるシンガポールにも、国内初のヘリウムリサイクルシステムが導入されたとのことである。設立から50周年を迎えた低温センターでは世界有数の液化装置を有する組織として、今回のようなアジア諸国の学生に対するアウトリーチ活動などを行い、東京大学および日本のみならず、近年発展の著しい近隣の諸外国に対しても、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いきたいと考えている。



シンガポール国立大学とラ・トローブ大学の学生等による見学の様子

(村川 記)

職員研修

1. 2017 年度第 1 回冷凍部会(公開)例会 低温工学基礎講座 Space Cryogenics

日 時 2017 年 4 月 13 日(木)
場 所 霞会館(東京都港区)
主 催 公益社団法人 低温工学・超電導学会
講 師 村上 正秀(筑波大学), 檜崎 勝弘(住友重機械工業)
参加者 寺岡 総一郎、他計 38 名

2017 年度の例会の年間テーマは「宇宙と低温技術」前半は筑波大学の村上正秀名誉教授から「Space Cryogenics—その貢献と今後への展開」と題した講演であった。内容にはかつて高校生を対象としたレクチャーの経験が反映されており、明快なスライドと語りでわかりやすく解説頂いた。冒頭で可視光領域は宇宙からやってくるシグナルの「窓」であること、そのため従来の天体観測が可視光領域が中心であった経緯を説明、宇宙からの微弱な電磁波は大気によって吸収されてしまうため、大気圏外からの観測の重要性を強調された。また赤外線観測に際して背景雑音低減のため望遠鏡を冷却する必要があり、宇宙空間での極低温環境の実現するための課題と方策について説明された。赤外線望遠鏡衛星の系譜と X-線天体観測衛星技術の紹介があり、今後の展望としてニュートリノや重力波などによる天体物理観測に言及された。講演でとくに筆者が関心を寄せたのは節点法と称する有限要素法による熱計算の概略の紹介であった。設計段階で所期の温度分布が得られるかどうか検討するために、連続体である冷却システムを有限個の代表点 i で記述して、各代表点の熱収支 $m_i C_{pi}(dT_i/dt) - \sum Q_{Ri} - \sum Q_{Ci} = 0$ の定常状態(第一項 = 0)を数値解によって求める。ここで第一項～第三項はそれぞれ代表点の熱量変化、輻射、および固体伝導による入熱である。当時筆者も、次ページの「2. 第 94 回 2017 年度春季 低温工学・超電導学会」で報告している冷却システムについてこのような熱計算を行っており、衛星搭載の冷却システムを同様の手法で解析していることは大いなる励みであり、非常に参考になった。

後半は住友重機械工業の檜崎勝弘氏による「宇宙用小型冷凍機の開発経緯と今後の展望」と題した講演であった。同社が宇宙機器事業に参入して以来 30 年に亘る極低温冷却装置の開発史の説明、1 段スターリング冷凍機(80 K), 2 段スターリング冷凍機(20 K), 2 段スターリング+JT ^4He (4 K), 2 段スターリング+JT ^3He (1 K)の各レベルの冷凍機の開発経緯が紹介された。

冷凍機は消耗部品の定期的な、または一定稼働時間毎の交換が不可欠であるが、地上の実験室と異なり打ち上げ後は定期的な保守作業のできない宇宙空間での稼働状況で耐用年数などに関して活発な質疑応答が行われていた。本講演で紹介された冷凍機の発展の歴史とトレンドは、本学のように低温機器が大規模に集積した事業所における集約型ヘリウムリサイクルの優位性を将来に亘り維持してゆくうえで大変貴重な知見であり、それらを不断の日常業務改善に反映させてゆく所存である。

(寺岡 記)

2. 第 94 回 2017 年度春季 低温工学・超電導学会

日 時 2017 年 5 月 22 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(5/22)、他多数

液体水素応用 / 解析, ポスター手短か紹介, 展示案内(午前)、冷却・冷凍機, 沸騰・熱伝達(午後)の各セッションにて聴講を行った。水素社会の実現に向けた取り組みの一環として, 液体水素タンクの海上輸送実験(前川 他), 液化天然ガス(LNG)と比べて蒸発しやすい液体水素の貯蔵に関して真空断熱が改めて注目を集めており, 各種材料の放出ガスに関する報告(猪俣 他), 配管、熱交換器における気液二相流状態の圧力損失・熱伝達特性(大平 他)に関する報告等がなされていた。

液体水素応用 / 解析のセッションにて「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(II)」と題して口頭発表[1]を行った。本講演は研究開発部門/理学系研究科福山 寛教授、株式会社ユニソクとの共同研究である。極低温走査型顕微鏡は基礎研究分野で広く使われているが、その冷却にヘリウム循環方式を採用できれば応用範囲はさらに広がり、長時間連続測定による性能向上も期待できる。ヘリウム循環冷却システムの主要構成要素である低振動・低熱損失移送管の試作品の断熱性能を測定し、熱解析で期待される断熱性能結果を報告するとともに数 10 分程度の周期でサイクルを繰り返す間欠的な送液について報告した。

講演後の質疑応答では数 10 分程度の周期でサイクルを繰り返す間欠的な送液に関心が集中し、連結管でつないだ液体ヘリウム槽の場合に類似な液面の自発的揺動が起こり、その原因は未解明であることなどの情報が寄せられた。

[1]寺岡 総一郎, 横田 統徳, 佐々木 徹, 宮武 優, 福山 寛 第 94 回 2017 年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集 p47

(寺岡 記)

3. 平成 29 年度 高圧ガス保安教育 参加報告

日 時 平成 29 年 7 月 28 日(金)
場 所 東京都港区 新コスモス電機株式会社 体験型ショールーム
主 催 日酸 TANAKA 株式会社
参加者 低温センター 戸田 亮、志村 芽衣、加茂 由貴、寺岡 総一郎
本学他部局および近隣大学の高圧ガス製造業務従事者 (13 名)

平成 29 年度 高圧ガス保安教育に参加し、ガス警報器に関する基礎知識を学んだ。

始めに新コスモス電機株式会社の概要を聴き、ガス警報器に関する法体系や警報器の種類について講義を受けた。講義では酸素欠乏の危険性をミニモデルで再現した動画も上映された。この動画では「酸素濃度の常時計測」と「部屋の換気」、「検知器の設置場所」がいかに重要か、口頭で説明を受けるよりも分かりやすく、強く印象に残った。この動画は学内の講習会で使えるように掛け合うこともできるとのことだった。

講義後は体験型ショールームで各種ガス警報器の見学と、ガスの爆発許容濃度に関するデモ実験を体験した。このデモ実験では、イソブタンを使用していたが、空気と混ぜるイソブタンの量がわずかでも少ないときは爆発しなかった。爆発において濃度の条件が非常に重要な要素であると改めて実感した。

今回の保安教育では、日常業務で取り扱っている酸素濃度計を始め、酸素欠乏、ガス爆発に対する理解

を深めることができた。ガス警報器は身近な存在であるため、正しい知識を身に付けて円滑な寒剤供給業務の維持を心がけていきたい。

(加茂 記)

4. 第2回東京大学技術発表会参加報告

日 時 平成30年2月15日(木)
場 所 駒場キャンパス
主 催 東京大学総合技術本部
参加者 阿部 美玲、戸田 亮

駒場Ⅰ、駒場Ⅱの両キャンパスに所在する生産技術研究所、先端科学技術研究センター、大学院総合文化研究科・教養学部の3部局の協力のもと、第2回東京大学技術発表会が2月15日と16日、2日間の日程で開催され、学内外合わせて200人以上の参加者があり、46件の口頭発表とポスター発表があった。低温センターからは1日目に阿部と戸田が参加した。

冒頭の開会式では光石衛総合技術本部長と藤井輝夫生産技術研究所長からご挨拶をいただき、本発表会の実行委員長である三澤徹技術専門職員(生産技術研究所)から開会が宣言された。続いて実行委員会から特別企画「駒場キャンパス紹介」として駒場キャンパス各部局の技術職員業務が紹介された。さらに、生産技術研究所の高間信行技術職員による特別講演「東京大学の技術職員 —総合技術本部の役目と技術職員の在り方—」を聴講した。本学技術職員が担う業務の多彩さをうかがい知ることができたとともに、技術継承や業務引き継ぎの在り方や、技術職員のキャリアプランを深く考えるきっかけとなった。

講演に続いて口頭発表セッションが行われ、低温センターからは第2分野(大型装置、実験装置、回路計測、制御、低温技術)で阿部と戸田がそれぞれ口頭で発表した。阿部は汲み出し時における大型貯槽の内圧の最適化について、戸田は現在開発中の小型超低温連続冷凍機についての発表を行った。1日目午後の最終セッションのポスター発表は、全6分野合同で行われた。例えば、演習林でドローンを試用した事例を聴講して「低温センター内の設備でも高所の点検へ応用することはできないか？」など日常業務における大きな課題から潜在的な悩みまでを幅広く振り返ることができた。

(阿部 記)

5. 平成29年度 高圧ガス製造保安係員講習(2月) 参加報告

日 時 平成30年2月5日(月)~2月6日(火)
場 所 TKP 神田ビジネスセンター ANNEX(東京都千代田区)
主 催 高圧ガス保安協会
講 師 高圧ガス保安協会 山川 雅美氏、島田 隆氏
千葉高圧ガス保安協会 江藤 治敏氏
元・産業技術総合研究所 堀口 貞茲氏
参加者 低温センター 加茂 由貴、他131名(外部)

平成29年度製造保安係員講習を受講した。講習では平成28年に高圧ガス保安法施行令が改正されたことを受けて、改正に至った背景やこれまでの体制が改正によってどう変わるのか、近年普及している水素自動車を例に高圧ガスの定義から改めて説明を受けた。

また、講習会の受講者を6名ずつに分けてグループを作り、各受講者の所属する事業所で行っている保安管理体制と災害時の緊急措置およびその訓練についてグループディスカッションを実施した。また

話し合った内容を踏まえて、動画でも実際の事故事例についても詳しく解説を受けた。

今回の講習会では、日常業務で取り扱っている高圧ガスに関する最新の事故事例や法改正に対する理解を深めることができた。ささいなミスが重大事故に発展する事例は過去何度と生じているため、常に最新の情報を取り入れて、円滑な寒剤供給業務を維持できるように取り組んでいきたい。

(加茂 記)

6. 平成 29 年度 高圧ガス製造保安係員講習（3月） 参加報告

日 時 平成 30 年 3 月 1 日（木）～3 月 2 日（金）
場 所 TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター（東京都 新宿区）
主 催 高圧ガス保安協会
講 師 高圧ガス保安協会 山川 雅美 氏、島田 隆 氏
千葉高圧ガス保安協会 江藤 治敏 氏
元・産業技術総合研究所 堀口 貞茲氏
参加者 低温センター 志村 芽衣、他 73 名（外部）

平成 29 年度下期保安係員講習を受講した。初日に高圧ガス保安法令の改正状況を始め、高圧ガスの危険性・有害性および保安係員の役割と心構えに関する話を、二日目に災害防止のための安全管理、保安係員のための設備管理、および事故事例の分析と活用に関する話を聞いた。初日午後はグループディスカッションを行った。6 人前後のグループを作り、緊急時の対処に関してどのような訓練を行っているか情報交換をした。ディスカッションでは、訓練のマネリ化を解消するために、火災であったら出火場所を変えるなどして変化をつけているというような各製造所での工夫を聞くことができた。二日目の講義では、実際に起きた事故の資料や映像から具体的な事故事例をイメージできて現場のどのような個所に危険が潜んでいるのかを考え直すことができた。今回の講習会で学んだことを今後の円滑な寒剤供給業務に活かしていきたいと考えている。

(志村 記)

7. 日本物理学会「第 73 回年次大会(2018 年)」 参加報告

日 時 平成 30 年 3 月 22 日(木)～3 月 25 日(日)
場 所 東京理科大学 野田キャンパス（千葉県 野田市）
主 催 一般社団法人 日本物理学会
参加者 低温センター 戸田 亮、他多数

日本物理学会、第 73 回年次大会の 2 日目(23 日)および 4 日目(25 日)に参加した。23 日のセッションでは「超小型サブミリケルビン連続冷凍システムの開発 III」と題し、現在開発中の小型超低温連続冷凍機について発表した。当セッションでは、近年発展してきた多孔体やマイクロ流路などの微細構造を用いた小型希釈冷凍機的能力改善や希釈冷凍機小型化の試みなど、他にも冷凍機の開発に関する発表があり、大変興味深かった。希釈冷凍機や核断熱消磁冷凍機を必要とする極低温・超低温域の実現は、単に液体ヘリウムに浸漬して得られる温度域に比べるとはるかに敷居が高い。これを軽減し、より広い分野で極低温・超低温環境を利用できるようにすることを目指して今後も開発を続けていきたい。

(戸田 記)

技術系職員 発表リスト

発表論文、著書等

1. “Design and expected performance of a compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator for sub-mK applications”
Ryo Toda, Satoshi Murakawa, and Hiroshi Fukuyama
Journal of Physics: Conference Series **969**, 012093 (2018).

セミナー・講習等（依頼講演）

2. 平成 29 年度高圧ガス講習会
阿部 美玲
平成 29 年度 化学物質・UTCRIS・高圧ガス・レーザー取り扱い講習会（東京大学医科学研究所）
2017 年 6 月
3. 平成 29 年度高圧ガス講習会
阿部 美玲
平成 29 年度 化学物質・UTCRIS・高圧ガス・レーザー取り扱い講習会（東京大学薬学部総合研究棟）
2017 年 6 月

セミナー・講習等（一般講演）

4. ヘリウム液化システム大型貯槽内圧の最適化
阿部 美玲, 寺岡 総一郎, 加茂 由貴, 志村 芽衣
第 2 回東京大学技術発表会（東京大学生産技術研究所）2018 年 2 月

国内会議（一般講演）

5. 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(II)
寺岡 総一郎, 横田 統徳, 佐々木 徹, 宮武 優, 福山 寛
第 94 回 2017 年度春季 低温工学・超電導学会（船堀タワーホール）2017 年 5 月
6. 小型連続核断熱消磁冷凍機の開発
戸田 亮, 植松 祐真, 瀧本 翔平, 村川 智, 福山 寛
第 2 回東京大学技術発表会（東京大学）2018 年 2 月
7. 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 9 回 低温センター研究交流会（東京大学）2018 年 2 月
8. 超小型サブミリケルビン連続冷凍システムの開発 III
戸田 亮, 瀧本 翔平, 植松 祐真, 村川 智, 福山 寛
日本物理学会第 73 回年次大会（東京理科大学野田キャンパス）2018 年 3 月

国際会議（一般講演）

9. “Design and expected performance of a compact and continuous nuclear demagnetization refrigerator for sub-mK applications”
Ryo Toda, Satoshi Murakawa, Hiroshi Fukuyama
28th International Conference on Low Temperature Physics, LT28（Gothenburg, Sweden）2017 年 8 月
10. “Compact nuclear demagnetization refrigerator to keep a sub-mK temperature continuously – Design and expected performance”
Satoshi Murakawa, Ryo Toda, Yuma Uematsu, Hiroshi Fukuyama
International Conference on Ultra Low Temperature Physics ULT2017: Frontiers of Low Temperature Physics（Heidelberg University, Heidelberg, Germany）2017 年 8 月

技術ノート

技術ノート

電気伝導測定 ～四端子測定でも接触抵抗には注意を～

低温センター・共同利用部門

戸田 亮

1. はじめに

電気機器あふれる現代社会において、電気伝導（抵抗）測定は重要かつ普遍的な測定である。低温センターでは、温度 0.5–400 K、印加磁場±9 T と広範な温度・磁場下で電気伝導特性、比熱等を評価できる物性評価システム（カンタム・デザイン社製 PPMS、以下 PPMS という。）を共同利用に供しており、基礎、応用の別を問わず、様々な研究のために使用されている。PPMS には 3 つの電気伝導測定オプションがあり、それぞれ測定方法や対応できる抵抗範囲が異なっている [1]。センターで利用可能なのはそのうちの 2 種類（Resistivity, ACT）で、およそ 1 $\mu\Omega$ から 1 M Ω までの抵抗を測定することができる。

PPMS への試料の挿入は、専用の測定台（図 1）と専用工具を用いて行う。試料と測定台を結ぶ配線の接続作業を除けば、即日身につく程度の簡単な作業である。温度や磁場の変更、測定実行などは専用アプリケーションを通じて行う。PC 上で、目的の温度や磁場、測定条件を入力し、希望の実行順に並べるだけで、詳細な制御方法や測定方法を意識せずとも結果が得られる。自動制御のため拘束時間も短く、休日や夜間を使って測定することも可能である。

操作が簡便で結果が自動的に得られるため、装置の動作原理、測定原理の学習はおろそかになりがちである。しかし、測定の前提条件や適用限界を意識せずに用いると、誤解釈に繋がることもあるため注意が必要である。試料自身の電気抵抗値が装置の対応可能範囲にあることの他に、試料と測定器の間の接続性についてもチェックする必要がある。電気抵抗測定では、測定台に設けられた電極から試料へと測定用配線を接続すること（端子付け）が不可欠であり、このできは実験者の技術力によって大きく異なる。端子付けの難易度は試料の性質やサイズによっても大きく異なり、現実にはある程度の妥協も必要となるが、接続状態が悪い場合、目的とする抵抗を正しく評価できなかったり、目的とする精度を得られなかったりする。

本稿では、試料と測定器間の接続条件が悪い場合に発生する不都合について、その影響をできるだけ定量的にわかるように紹介する。端子付けの妥協点を判断するための目安として、またより正確なデータ解析のために役立てば幸いである。電気伝導測定は非常に広範なバリエーションをもつが、本稿では PPMS の Resistivity オプションで使用される低周波での測定を想定している。電気伝導測定は非常に一般的な測定であるため、その実験技術に関して詳しく書かれた有用な解説書が複数ある [2, 3]。高精度測定を必要とする方、極端な低抵抗、高抵抗の測定を必要とする方などには一読をお勧めする。

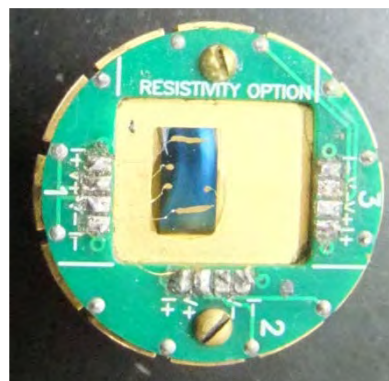


図 1. Resistivity 用測定台

2. 二端子測定法と四端子測定法

電気伝導特性を評価するには、試料を流れる電流 I と、試料に発生している電位差 ΔV の両方を正確に知ることが必要である。この 2 つの物理量から電気抵抗は $R = \Delta V / I$ として求められる。最も単純な電気抵抗測定の構成は図 2 で、試料に接続される端子の数から二端子測定法と呼ばれている。一般的なデジタルテスターを用いた抵抗測定はこの形式である。系には測定したい試料の抵抗 R の他に、試料までのリード線や試料への接触抵抗（以下、合わせて接続抵抗と呼ぶ）からなる R_1, R_4 、電圧計までの接続抵抗 R_2, R_3 、電流計や電圧計自身の内部抵抗 R_A, R_V が存在している。測定器の測定値 $I_m, \Delta V_m$ はこれらの影響を受けるため、測定目的である試料の $I, \Delta V$ （以下、目的の値という。）と全く同じとはならず、以下のようになる。

$$I_m = \left(1 + \frac{R_1 + R_4 + R}{R_2 + R_3 + R_V}\right) I$$

$$\Delta V_m = \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_V}\right)^{-1} \left(1 + \frac{R_1 + R_4}{R}\right) \Delta V$$

目的の値と測定値との差を小さくするためには、式中の $(R_2 + R_3) / R_V$ 、 $(R_1 + R_4) / R$ 、および $(R_1 + R_4 + R) / (R_2 + R_3 + R_V)$ を小さくする必要がある。汎用的な電圧測定器の内部抵抗は $10 \text{ M}\Omega$ 程度で、接続抵抗は銅線同士のような条件のよいケースでは数 Ω 以下にすることが可能なので、対象が $100 \Omega - 100 \text{ k}\Omega$ 程度の抵抗（以下、中抵抗と呼ぶ）であれば、簡単に精度よく測定を行うことができる。

試料の抵抗が $100 \text{ k}\Omega$ を超える高抵抗の測定では、 $(R_1 + R_4 + R) / (R_2 + R_3 + R_V)$ を小さくすることが難しくなってくるため、電流計の接続位置を変え、図 3 のような構成にするとよい。この場合、目的の値と測定値との関係は次のようになる。

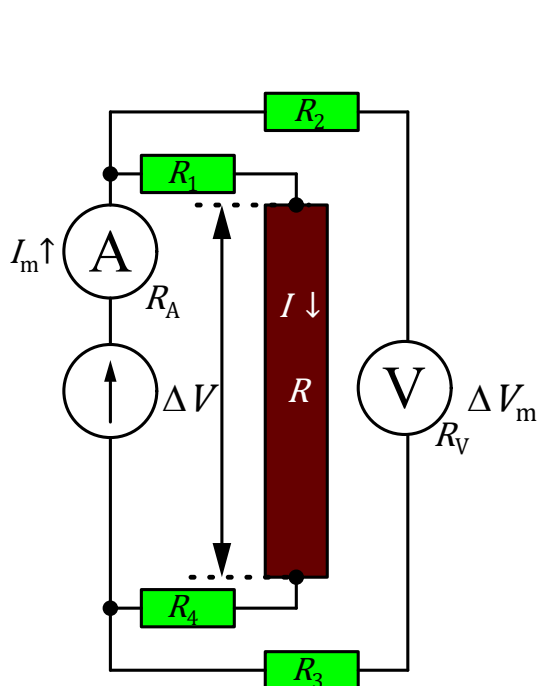


図 2. 二端子測定法の構成

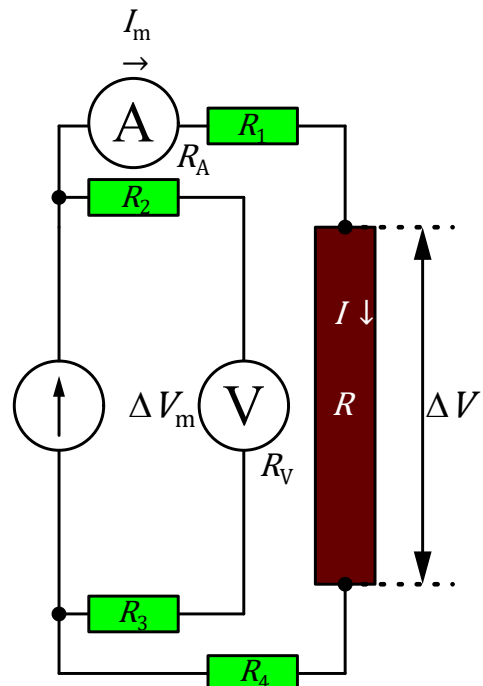


図 3. 二端子測定法（高抵抗用）の構成

$$I_m = I$$

$$\Delta V_m = \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_V}\right)^{-1} \left(1 + \frac{R_A + R_1 + R_4}{R}\right) \Delta V$$

こちらも二端子法であるが、試料に流れる電流をそのまま測定することができる。代償として、電位差の測定値には電流計の抵抗 R_A の寄与が含まれてしまうが、通常、電流計の内部抵抗は小さいため、高抵抗試料の測定では影響が小さい。ただし、全体に高抵抗となる回路では、絶縁不良によって想定外の電流リークが発生し、正しい測定ができなくなることがあるため注意が必要である。抵抗値によっては、指で直接触れるなどした際に付着する脂分でも問題になるし、測定器や配線、測定回路の絶縁性によって測定限界が決まってしまう場合もある。このセットアップは、センターの PPMS に導入されているオプションだけでは対応できないが、別途ピコアンメータなどの測定器を準備すれば、温度や磁場の制御だけを PPMS に任せ、外部測定器で抵抗測定を行うことも可能である。

どちらの接続方法でも、試料の抵抗が接続抵抗と比して大きくない低抵抗試料 (100Ω 以下) の場合、試料部分の電位差を高精度に評価することは難しい。これを回避することが可能な方法として四端子測定法が知られており (図 4)、目的の値と測定値との関係は以下のようになる。

$$I_m = \left(1 + \frac{R}{R_2 + R_3 + R_V}\right) I$$

$$\Delta V_m = \left(1 + \frac{R_2 + R_3}{R_V}\right)^{-1} \Delta V$$

この構成では、試料の途中に電位差測定端子を取るため、測定系の評価上は、試料全体の抵抗のうち電位差測定端子間の抵抗のみを R 、残りの部分はそれぞれ R_1, R_4 に含まれるものとして考える。試料抵抗と接続抵抗の比 $(R_1 + R_4)/R$ に依存する寄与がなくなるため、図 3 のような接続が適する高抵抗試料の場合を除き、二端子測定法より目的の値に近い値を得られる。このため、低抵抗から中抵抗を精密に測定したい場合の標準的な測定方法となっている。試料抵抗と接続抵抗の大小関係は試料の特性や形状に応じてまちまちであるが、電圧計の内部抵抗は通常接続抵抗より大きくできるため、これをもって四端子測定では接続抵抗を無視できると一般に言われている。しかし、電圧測定端子側の寄与 $(R_2 + R_3)/R_V$ 、 $R/(R_2 + R_3 + R_V)$ については二端子測定法の場合と同じなので、電圧端子の接続抵抗が大きくなればその影響を無視できないことについては意識しておくべきである。

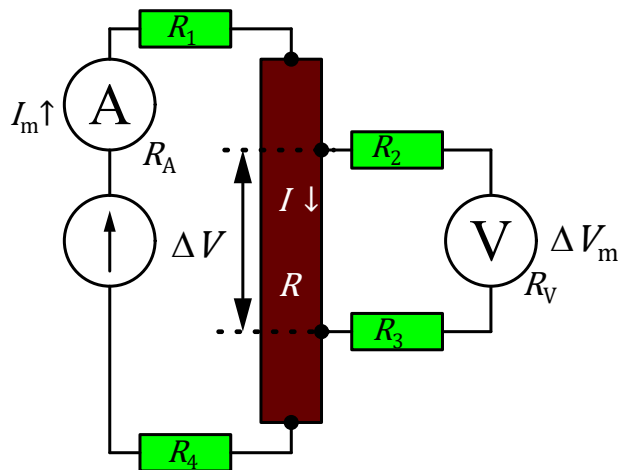


図 4. 四端子測定法の構成

3. 差動増幅器による電圧測定

微小な電位差を高精度に測定する必要がある精密測定では、差動増幅器を用いるのが一般的であり、PPMSにおいてもそうになっている。電位差測定を差動増幅器によって行う場合、測定回路は図4よりも図5のように考えた方が実態に近いようである。理想的な差動増幅器の場合、2つの入力端子の電位差 ΔV_m に比例した出力が得られるが、現実には差動増幅器の基準電位(GND)から見た2つの入力端子の平均電位（同相入力電圧） \bar{V}_m に依存する寄与がわずかに出力に混じってしまうため、以下のようなになる。

$$V_{out} = A \Delta V_m + B \bar{V}_m$$

PPMS の場合、 A/B (CMRR: 同相除去比と呼ばれる) は 10^5 – 10^6 である [5]。加えて、測定負荷の中心電位が GND に近くなるよう、両側に絶対値が等しい逆の電圧を印加して測定するように工夫されているため、平均電位からの寄与は通常は十分に小さく、無視することができる。

これまでの例と同じように、差動増幅器の入力と測定対象のあいだには有限の接続抵抗があるため、差動増幅器の入力端子間の電位差は、測定対象の電位差と異なってしまう。測定したい場所の電位差と平均電位を $\Delta V, \bar{V}$ とすると、差動増幅器入り口では以下のようなになる。

$$\Delta V_m = \left[\frac{R_V(R_V + R_L)}{(R_V + R_L)^2 - \frac{1}{4}\Delta R_L^2} \right] \left[\Delta V - \frac{\Delta R_L}{(R_V + R_L)} \bar{V} \right]$$

$$\bar{V}_m = \left[\frac{R_V(R_V + R_L)}{(R_V + R_L)^2 - \frac{1}{4}\Delta R_L^2} \right] \left[\bar{V} - \frac{\Delta R_L}{4(R_V + R_L)} \Delta V \right]$$

ここで $R_L = (R_2 + R_3)/2$ 、 $\Delta R_L = R_2 - R_3$ である。全体にかかっている補正係数は、前章で紹介したケースと同じく、接続抵抗によって測定器にかかる電位差が低下してしまう効果によるものである。前章と異なる点は、増幅器までの接続抵抗に差 ΔR_L がある場合、試料の平均電位が増幅器入り口では電位差に変わることである。 ΔR_L が大きくなると、測定系の同相除去比は本来の差動増幅器のそれよりも低下し、 $(R_V + R_L)/\Delta R_L$ 程度となる。測定試料の平均電位が十分小さい場合には

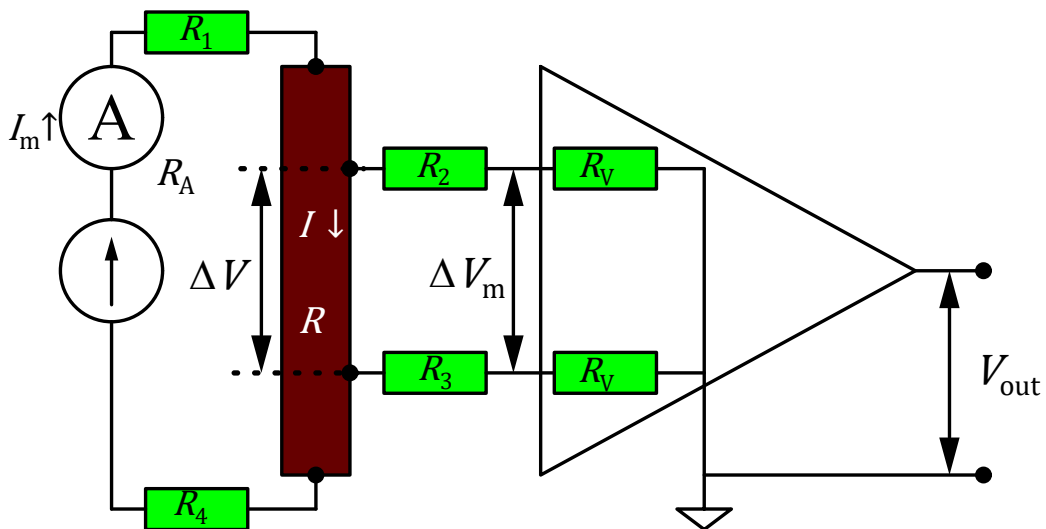


図5. 差動増幅器を用いた構成（四端子法）

問題が起こらないが、試料の平均電位は、電流端子側の接続抵抗の差に依存して下記のような（電圧端子に流出する電流の影響は微小と仮定して無視している）ため、試料との接触抵抗の低減が難しい系では大きな値となってしまうことが多い。

$$\bar{V} \sim \frac{I}{2}(R_4 - R_1)$$

極端な例であるが、試料自身の抵抗が 0.1Ω 程度であるのに対し、接続抵抗の差が $1 \text{ k}\Omega$ 程度となるような場合には、 $\bar{V}/\Delta V \sim 10^4$ と試料の平均電位が測定上の目的値である電位差よりはるかに大きくなってしまう。電圧端子の接続抵抗の差によって起こる同相除去比の低下とあいまって、接続抵抗自体は差動増幅器の内部抵抗（PPMS の標準抵抗オプションでは $1 \text{ G}\Omega$ 、ACT オプションではレンジによるが $1 \text{ M}\Omega$ 程度）より何桁も小さいにもかかわらず、試料の抵抗値とは全く異なる値を測定値として得るといったことも起こる。このため、四端子測定法であっても、特に低抵抗試料の測定では接続抵抗の低減を意識する必要がある。

4. よりよい測定を行うために

接続抵抗が大きいと、ここまでに紹介した測定エラー以外にも、熱ノイズの増大や、電流発生器の駆動電圧不足、抵抗発熱の増大による試料の冷却不良などの不都合が発生し、測定精度の低下に繋がる。測定器の端子から試料に至るまでのすべての配線、接続が接続抵抗に寄与するが、多くの場合、トラブルの原因となるのは測定試料とこれに直接接する配線間の接触抵抗である。接触抵抗は、接触部のマイクロな隙間や表面状態、双方の電気的性質の違いなどに起因しており、双方の物質の連続的接続で期待されるような低抵抗を得ることはほぼ不可能であるが、前章までの議論を考慮して低抵抗とみなせる範囲内であるならば大きな問題はない。ただし、抵抗値が電流の向きや大きさに依存して変化する非オーミック接合が形成される場合もあるため、電流の向き、大きさを変えた確認が必要である。非オーミック接合の不都合は単に高抵抗であるだけではない。測定時にわずかな電流しか流れない電圧測定端子の場合、テスター等での評価値よりはるかに大きな、定量的な確認検証が難しい高抵抗となりうるし、AC 測定においては検出波形の歪みが発生して結果に大きな影響を与える。測定端子の接続では、オーミック接合を実現することが大変重要である。

試料を問わず、安定的に低抵抗なオーミック接合を実現できる万能な方法はないため、試料に応じて適切な方法を模索する必要がある。はんだ付けが可能な試料であれば、フラックスや表面処理によって酸化膜等を除去し、適切に接着することによって、 1Ω に満たない低抵抗接合を実現できる。桁違いに大きな値となった場合には酸化膜等の絶縁層の形成が疑われる。これは非オーミック接合の原因ともなるため接合をやり直すべきである。比較的簡単に低抵抗接合が得られるが、試料がはんだ付け可能な物質である必要があり、対応可能な試料は限定される。金属同士であればスポット溶接などのボンディングも有効であるが、こちらも対応可能な試料は限られる。

多くの試料に適用可能な方法として、金や銀などの導電性金属微粉末と溶剤もしくは樹脂材が混合された導電性ペーストがある。同種のものに、導体としてカーボンを用いたカーボンペーストもある。温度を上げて硬化させるものや常温で硬化できるものなど様々な種類があり、試料によって使い分ける。ペーストによる接着のときは数 Ω 程度以下から数 $10 \text{ k}\Omega$ 以上まで幅広く、

試料とペーストの相性や、配線と試料との距離（ペーストの厚み）、試料の表面状態などに依存する。良好な接合を得るためには、試料表面の酸化膜等を取り除くこと、配線と試料表面を近接接触させ、間に挟まるペースト層が厚くならないようにすることが有効である。その他、スペースが取れる場合に限られるが、ネジ止めやバネを用いた圧着なども有効である。

半導体試料の場合には、配線に用いる金属との電位の違いによって、不可避免的に非オーミック接合となることがある。この場合、オーミック接合を得るためには、端子に局所的なキャリア注入を行うなどの試料特性操作が必要となる。端子形成のためのキャリア注入によって、目的の試料の特性自体に影響を与える可能性も考えられるため、最適な手段を個別に検討する必要がある。

オーミック接合の形成はときに技術的難易度が高いため、やむをえず、非オーミック性を示す端子を用いて測定を行うケースもある。非オーミック性を示す範囲よりも十分大きな電流・電圧を用いることができれば、オーミック接合とみなした測定が可能となるが、適用できないことも多い。試料の抵抗値を評価するためには、非オーミック接合の影響を考慮した解析が必要である。端子付けのときは試行のたびに变化する可能性があるため、本測定に用いた端子をそのまま調べることが必要であるほか、一般には温度依存性をもつため、試料と同様に温度依存性を調べる必要もある。四端子測定のそれぞれの端子について、様々な組み合わせの二端子あるいは三端子を選び、電流の大きさや向きを変えて測定を行うことで、測定端子の特性についてある程度の知見を得ることができる。ただし、電圧測定端子は四端子測定を行う場合と同じ条件に揃えることが難しいため、不確かさがある程度大きくなることは避けられない。端子付けを変えて複数回測定し、整合性を確かめるなど、慎重な検討が必要である。

5. まとめ

低温センター共同利用装置の1つであるPPMSを利用すると、広範な温度・磁場下において、電気抵抗測定を簡便に行うことができる。四端子測定法を用いることで、 $1\ \mu\Omega$ という微小抵抗から $1\ M\Omega$ 程度の高抵抗までを精度よく測定することが可能であるが、試料と測定器の間の接続抵抗（特に試料と測定配線との接触抵抗）次第では、目的とする抵抗を精度よく評価できなくなる。特に端子ごとに抵抗の差がある場合や非オーミック接合となってしまった場合に測定誤差が大きくなる。良好な端子づけを行って測定するべきであるが、やむをえず高抵抗な端子で測定を行うことになった場合には、接触抵抗の詳細な評価と、その影響を考慮した慎重な解析、検討が必要である。

参考文献

- [1] Quantum Design, “Six Things to Consider when Making Electrical Transport Measurements”, Application Newsletter Fall 2013 (2013).
- [2] 大塚洋一・小林俊一 (1999) 『輸送現象測定』 (丸善実験物理学講座 11) 丸善.
- [3] 高感度測定ハンドブック第6版 ケースレーインスツルメンツ株式会社
- [4] Quantum Design, “Cause and Effects of Common-Mode Leakthrough”, PPMS Application Note 1584-201 (2015).

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 129 回運営委員会 (平成 29 年 5 月 31 日開催)

第 130 回運営委員会 (平成 29 年 11 月 27 日開催)

題 131 回運営委員会 (平成 30 年 3 月 12 日開催)

運営委員会 名簿 (任期 29.4.1~31.3.31)

(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
永田 宏次	准教授	大学院農学生命科学研究科応用生命化学専攻
小野瀬 佳文	准教授	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 77 回専門委員会 (平成 29 年 5 月 18 日開催)

専門委員会 名簿 (任期 28.4.1~30.3.31)

(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
大戸 梅治	講師	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
藤井 武則	助教	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
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 29.4.1~31.3.31)

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
國松 聡	教授	大学院医学系研究科放射線医学講座
上田 卓見	助教	大学院薬学系研究科薬科学専攻
永田 宏次	准教授	大学院農学生命科学研究科応用生命化学専攻
小野瀬 佳文	准教授	大学院総合文化研究科関連基礎科学系
(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 技術職員

板垣 信則 技術補佐員

事務室

柳澤 茂孝 主査

佐々木 陽子 特任専門職員

片岡 一夫 係長

新川 恭弘 一般職員

辻 仁佳子 事務補佐員 (～H29.5.31)

細野 久美 係長 (育休～H30.4.24)

お知らせ

人事異動

職員

片岡 一夫	係長	平成 29 年 4 月 1 日	異動（農学生命科学研究科より）
辻 仁佳子	事務補佐員	平成 29 年 5 月 31 日	辞職

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 村川 智

2017年度は低温センターが1967年に設置され50周年にあたる年でした。記事の中にもありますように2018年2月に50周年記念事業を行い、多くの人に参加して頂きました。懐かしい方々にもお会いすることができ、我々センター教職員一同、参加者の方々には大変感謝しております。このたび、50周年記念事業をするにあたり、センターの歴史を勉強しなおしました。50年前に理学部、工学部を中心に、当初より農学部、薬学部、教養学部などさまざまな関係部局の先生方のご尽力のもとに設置され、ビッグネーム並ぶ歴代のセンター長によって運営されてきたセンターに今我々がいるのだなと考えると身が引き締まる思いがしました。

個人的には低温センターとは20年ほど前に学部・大学院の学生時代に1ユーザーとして、関わっていたのが最初になります。そのときは、若気のいたりでセンターに不平不満を持ちたりなどしていました。しかし、大学院を出て他の大学で液体ヘリウムを寒剤として使用して研究してみると、安定して安価に毎日でも液体ヘリウムを利用できる低温センターのありがたみを感じ、その後、教員としてセンターにまた関わるようになり、技術職員の人たちが液化機のトラブルを抱えながらもユーザーのために一生懸命な様子を見るに、反省することしきりであり、未だに1ユーザーでもあります。低温センターに恩返ししていかねばと感じています。

また、現在行われている全学的な全学センターの見直しなどあり、形式上の形は変わるかもしれませんが、寒剤の安定供給および低温研究の拠点として今後70年、100年と続くようセンター教職員一同努力してまいりますので、今後とも、低温センターをよろしく願い申し上げます。

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 雅明	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	助教	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 2017

(Cryogenic Research Center, the University of Tokyo)

平成 29 年度低温センター年報

東京大学低温センター

第 9 号 2018 年 11 月

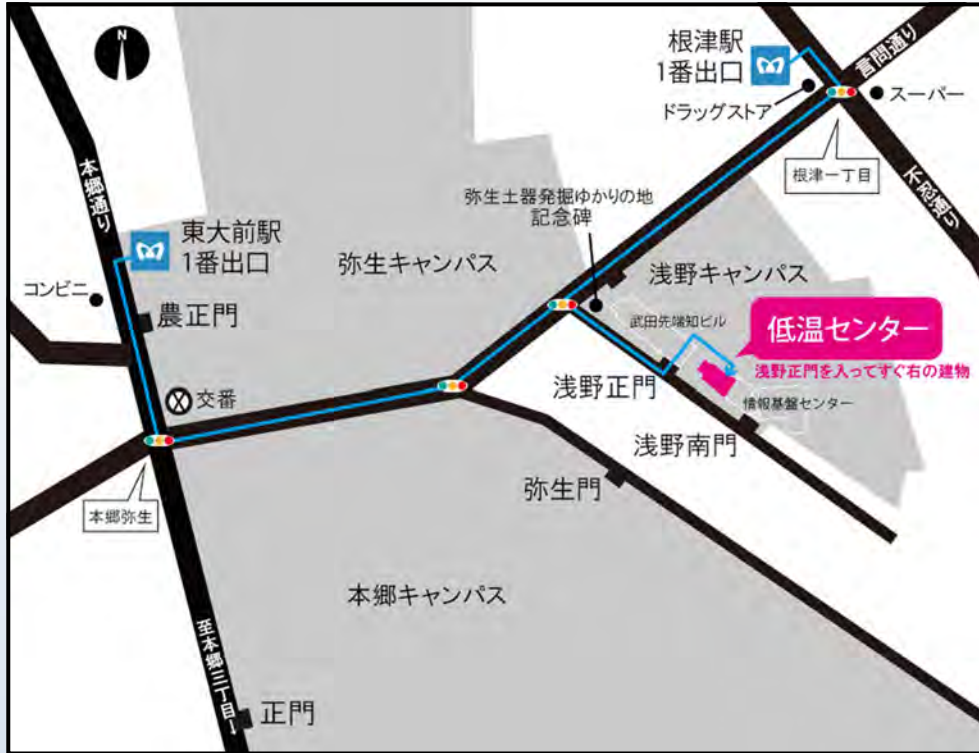
Volume 9, November 2017

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：大日本印刷株式会社

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