

えて、液体窒素タンクからくみ出し、液体窒素デュワー（メッキあり）へ液体窒素を注いだ。(1)では、4端子法を用いた電気抵抗測定方法の説明を受けた後、電流反転の手法を取り入れて、室温付近における3種類の温度計の電気抵抗を測定した。測定システムは、高抵抗と安定化電源を用いた簡易型の定電流源と高インピーダンスの電圧計で構成されている。なお、温度校正済みのGe抵抗温度計を用いて、カーボン抵抗温度計の温度特性を調べることとし、Pt抵抗温度計は参考温度計とした。液体ヘリウムデュワー（メッキあり）内部にヘリウムガスを導入し、液体窒素による予冷の間、昼休憩とした。

午後より、再度液体窒素の補充を行い、(2)液体ヘリウムの移送を行った。移送の前には、各自でサーマルオシレーション（タコニス振動）を利用した液面計（SUS薄肉パイプ）を液体ヘリウム容器（30 L）へ挿入して液量を計測した。また、蒸発ヘリウムガスの回収ラインの確認およびガス流量計指示値の計測を行った。トランスファーチューブによる液体ヘリウムの移送経験がない者がほとんどで、貴重な経験となったようである。液体窒素デュワー内部では沸騰による気泡が液中を下から上に移動しており、その内側の液体ヘリウム液面は見えにくい状況であったが、溜まり始めた液体ヘリウムを目視できたときは、歓声が上がった。

続いて、(3)と(4)を行うために、ドライポンプを起動し、1つのバルブを用いて、液体ヘリウムの減圧による温度コントロールを試みた。1つのバルブ操作だけで温度を一定に保たねばならず、調整に苦勞する受講者が多かった。温度がほぼ一定となったところで、Ge抵抗温度計とカーボン抵抗温度計の電気抵抗値を測定し、温度を徐々に下げながら最低温度（1.3 K）まで細かく温度変化させた。得られたデータを基にして、(5)カーボン抵抗温度計の抵抗と温度の関係を調べた。PCの解析ソフトに入力してグラフ化し、両対数グラフ上で半導体的な電気抵抗の温度依存性を確認した。

「超流動ヘリウム実験」は、総合研究5号館地下1階実験室で行われた。実習内容は、以下のとおりである。

- (1) 液体ヘリウムの移送
- (2) サーマルオシレーションの観測
- (3) 液体ヘリウムの減圧による温度コントロール
- (4) 超流動転移の観測
- (5) スーパーリーク、フィルムフローの観測
- (6) 熱機械効果（噴水効果）の観測

初めに、液体ヘリウムデュワー内部（メッキなし）をロータリーポンプで排気した。その後、液体窒素容器（100 L）から液体窒素デュワー（メッキなし）へ液体窒素を注いだ。液体ヘリウムデュワー内部には、スーパーリーク装置（ガラス製ポットの下部に、スーパ-

ーリークとして、細孔に細かなアルミナ粉が詰まっている）、フィルムフロー装置（ガラス製ポット、細孔はなし）、噴水効果装置（ガラス製容器の下部にスーパーリーク、上部に内径の細いノズル、中間にヒーターあり）が釣り下げられており、メッキがないため観測が容易である。ただし、湿度が高いと液体窒素デュワー表面に空気中の水分が凝結するため、十分注意した。

液体ヘリウム容器（100 L）からトランスファーチューブを用いて液体ヘリウムを移送した後、(2)サーマルオシレーションの観測を行った。受講者一人ずつ SUS薄肉パイプを液体ヘリウムデュワー内部に入れてタコニス振動を体感してもらい、他の受講者はパイプ先端とヘリウム液面との位置関係や液面揺動の様子を観察した。次に、減圧による強制蒸発によって徐々に温度を下げて行き、蒸気圧測定による(3)の温度コントロールを体験した。超流動温度（2.17 K）に到達すると、それまでの激しい蒸発が一瞬で消滅し、(4)の劇的な超流動転移を目の当たりにして、大きな歓声が上がった。

続いて、最低温度に到達する前に、(5)スーパーリークの観測を行い、ガラス製ポット下部の細孔から超流動ヘリウムが糸のように落下する様子が観察できた。また、(5)フィルムフローの観測を行い、ガラス製ポットの縁を超えて超流動ヘリウムの液滴が滴り落ちる様子が観察できた。最後に、(6)噴水効果の観測を行い、ヒーター加熱すると、超流動ヘリウムがスーパーリークを通して装置内部に流入し、細いノズルの先から勢いよく噴き出す様子が観察できた。(4)~(6)の観測時は、写真撮影・スマホでのビデオ撮影を許可したので、撮影大会さながらであった。

その後、総合研究5号館地下1階低温物理学研究室の超低温実験装置の見学が行われた。大型の希釈冷凍機とその下部に取り付けられた核断熱消磁装置を用いた、超流動ヘリウム3（2 mK以下）のNMR実験の説明を受けた。この実験装置は、電磁遮蔽板で完全に囲まれた部屋の中にある、大型防振台に取り付けられており、なお且つ3 m以上のピットを有している。巨大な最先端物性実験装置を見て受講者の中には、度肝を抜かれている人もいた。最後に、会議室に戻って質疑応答・自由討論が行われた。超流動ヘリウムの応用例として、国際熱核融合炉の超伝導磁石の冷却、天体観測衛星に搭載された各種センサーの冷却および熱機械ポンプによる冷媒補給、超高レイノルズ数状態の風洞実験装置などの話題が提供され、大いに盛り上がった。

（神戸大学 武田 実・前川一真、
京都大学 佐々木 豊）



京都大学での実習風景

実習風景 2

「超伝導基礎物性の測定および磁気分離技術」

大阪大学では、9月20日（火）および9月21日（水）に「超伝導基礎物性の測定および磁気分離技術」の実習を行った。参加者は20日と21日で学生と社会人のグループに分けられ、それぞれ6名（学生）および7名（社会人）であった。

実習項目は以下のとおりである。

- (1)「高温超伝導テープ線材の超伝導転移現象の観察」
- (2)「高温超伝導ペレットを用いたマイスナー効果および磁束ピンニング効果の観察」
- (3)「磁気分離技術を用いた排水処理の基礎実験」

午前の部では、午前10時から午後0時30分にかけてレーザー科学研究所・超伝導フォトンクス研究棟において、上記項目の(1)および(2)の実習を行った。この実習に先立ち、実習内容をより効果的に理解してもらう上で重要な基礎知識について40分程の簡易講習を行った。講習内容は以下の通りである。

項目(1)については、極低温における代表的な温度測定方法について紹介したあと、この実習で実際に用いる熱電対について、その基本原理となるゼーベック効果や測定における零接点の必要性などについて説明した。

極低温測定における代表的な熱流入源について紹介したあと、今回の実習でも実際に観察する輻射による熱流入を理解するために、ステファン・ボルツマン法則（温度 T の4乗則）から低温の輻射シールドがとても重要であること。また、固体伝導による熱流入を防ぐためには超伝導線材や合金などの低熱伝導材料の利用やサーマルアンカーの設置がとても重要であることを説明した。

最後に、今回超伝導体試料の電気抵抗測定に用いる4端子法について、テスターなどを使って計測する2端子法による電気抵抗測定法との違いについて詳細に説明

した。

また、項目(2)については、実際に実習で体験してもらうマイスナー効果や第2種超伝導体における磁束ピンニング効果を説明するために、予め製作していた教材用の動画（YouTube動画「超伝導と磁束のおもろい関係」）を用いて、適宜解説も加えながらの説明を行った。

この簡易講習のあと、講義室から実験室へと場所を移動して実習を行った。項目(1)の実習では、住友電気工業株式会社製のPLD法によるイットリウム系薄膜高温超

電導線材を使用した。以前の高温度超伝導体試料の転移温度の測定には、GM型冷凍機を用い、また超伝導線材の電気抵抗の温度変化はロックインアンプを用いて計測していた。このような測定装置では、実習生たちが試料に取り付けられた端子の様子や、試料の取り付け方法、輻射や固体伝導などによる熱流入を実際に自分たちの目で直接確認できないため、今回からはその測定系を根本的に改訂した。

今回の測定では、高温超伝導テープ線材試料は厚み3mmのアルミニウムチャンネル（コの字型の台）の天板の上に絶縁両面テープを使って貼り付けられ、このアルミニウムチャンネルの脚部分を液体窒素に浸すことで天板部分を徐々に冷却していった。その際、アルミニウムチャンネル天板と試料との熱コンタクトを良好にするためApiezonグリスを使った。また低温で温度を変化させながらの物性測定においては、試料と温度計

（今回は0.2 mmφの銅-コンスタンタン熱電対を使用）との位置関係や温度計の温度に対するレスポンスがとても重要であるが、試料中央部に近接し真横に取り付けた熱電対ヘッド部分を実際に指先で軽く触れたときの熱起電力の変化（レスポンス）を実際に観察してもらい、極細の熱電対であれば余程の急速冷却や急速加熱でない限り十分に温度変化に対応して熱起電力が変化することを体験してもらった。このような冷却装置を用いて4端子法によって試料の抵抗の温度変化を観測するのだが、電気抵抗を測定するために試料に流した電流は約1アンペアであった。また、この際の室温での電圧降下は約3 mVであった。これら値から室温における試料の抵抗値を確認させ、その後試料台を入れた発泡スチロール容器内に少しずつ液体窒素を注入させ、ゆっくりと試料の温度が下がっていき超伝導転移を起こす様子を観測させた。またこの際、配布した銅-コンスタンタン熱電対の熱起電力表を用いて、約85K程度で超伝導転移を起こすことを確認してもらった。

この超伝導転移を起こしたあと最低到達温度に達した熱平衡状態において、固体伝導による熱流入や輻射による熱流入を実際に観察してもらうため、実験装置



大阪大学での実習風景

横の室温環境に設置していた4端子測定用の銅のリード線を巻き付けた銅の円柱棒を液体窒素の中に浸けたときに生じる最低到達温度の変化、およびアルミニウムチャンネルを含んだ試料台全体を厚み0.5mmの銅板で囲んで、この銅板を冷却した際に生じる最低到達温度の変化を観察してもらうことで、低温実験におけるサーマルアンカーや低温の輻射シールド板が如何に重要であるかを実感してもらった。

このあと、高温超伝導ペレットを用いたマイスナー効果および磁束ピンニング効果の観察を行ったが、これについては、講習で用いたYouTube動画「超伝導と磁束のおもしろい関係」で見た内容をそのまま受講生一人一人に再現してもらった。特に、動画ではわからない実習事項として、磁束フリー状態にある高温超伝導線材のリング内部や高温超伝導ペレットに磁石を自分たちの手でもって近づけた際、反磁性電流によって生じるとても強い反発力を実際に体感してもらうことで、超伝導体のもつ潜在能力について少なからず興味を抱いてもらったと思う。

午後の部では、吹田キャンパスA1棟大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻量子線生体材料工学領域にて、(3)「磁気分離技術を用いた排水処理の基礎実験」を行った。まず磁気分離の基礎的な概念と手法、水質浄化や資源リサイクルへの応用例について、動画を交えて説明を行った。その後、実験室に移動して、吸着法を用いた染料の磁気分離、凝集法による生活排水の磁気分離の2つの実験を行った。

まず、吸着法を用いた実験では、磁気シーディング剤となるマグネタイト（酸化鉄の一種）を調製し、それに染料を吸着させて磁石で分離する方法で排水浄化実験を行った。本手法は主として水溶性物質の除去に適用される手法である。マグネタイトの調整では、沈殿の色が黒になったことを見極め、60°Cで結晶成長さ

せることでどのグループも永久磁石に引き寄せられる粒子が生成したことが確認できた。この粒子を用いて、モデル染料であるオレンジIIの水溶液を使った磁気分離を行った。マグネタイトの添加量を変化させ、最適な添加量について検討した。

次に、みそ汁希釈水、米のとぎ汁、食器洗浄液、ミルクコーヒー希釈水の4種の身近な生活排水を対象に凝集法を用いた磁気分離を行った。今回用いた凝集法は、無機凝集剤と高分子凝集剤の併用による手法で凝集体（フロック）を作り、そこに市販マグネタイトを添加してフロックを磁場により回収する手法である。4種類の排水のうち、米のとぎ汁と食器洗浄液はほぼ透明になったが、他の排水については、濁りはなくなったものの、抽出物など水溶性の物質の色が残った。この結果をもとに、本手法は粒子状物質の除去を得意とする手法であること、残った水溶性物質は吸着法で分離できることを説明した。

最後に10 T超電導ソレノイド磁石と火力発電所給水系を模擬した循環型実験装置、および表面最大磁束密度約3.1 Tの超電導バルク磁石を見学いただいた。磁気アルキメデス法によるプラスチックの分離、1円玉による渦電流の体感をしていただいた。強磁場の体験が初めての方からは驚きの声が上がった。

最後の質疑応答では、なかなか現場で超電導磁石が装置として受け入れられない理由や、超電導と超伝導の違いなどについて、講義との関連も含め活発な質問が行われた。

(大阪大学 村上博成・秋山庸子)