

明星学苑連携事業報告

— 低温物性物理学実験紹介 —

高 重 正 明¹ 山 口 俊 久¹ 清 水 俊 希²

Report of Meisei Academic Lab. — Introduction to Low-Temperature Physics Experiments —

Masaaki TAKASHIGE¹, Toshihisa YAMAGUCHI¹ and Toshiki SHIMIZU²

The present article describes the special lecture (call Meisei Academic Lab.) of the low-temperature physics experiments, performed for students of Meisei Junior and Senior High School. One of the characteristic points of this lecture is that we performed the simultaneous observation of the zero-resistivity state and magnetic-levitating state due to Meissner effect, using oxide superconductor and liquid nitrogen.

キーワード：物理教育，温度測定，電気抵抗測定，超伝導，マイスナー効果

Keywords : physics education, temperature measurement, resistivity measurement, superconductivity, Meissner effect

1. はじめに

筆者らは本業の物性物理学における特別な現象や先端的な実験装置を、一般に親しみやすく紹介するような活動を積極的に行っており、本紀要にもそれに関連した記事^{1, 2)}を最近 2 度ほど寄稿している。本年度は明星学苑内の連携事業の 1 つとして、明星中学・高等学校(以下、中高)において実験を中心とした講義を行う機会を得たので、本稿ではそれについて報告する。

この連携事業の趣旨は、明星学苑伝統の「体験教育」という教育方針に沿って、中高生達に日頃の座学では得られない「本物の物理実験」を行うことにより、彼らの物理分野への興味・関心を高め、今後の学習活動に役立ててもらおうというものである。中高での行事名称は「MEISEI アカデミック・ラボ」と呼んでおり、中 1～高 3 までの希望した生徒が行事に参加するというものである。

1 回目の授業は 2017 年 7 月 15 日に「超伝導と磁石で遊ぶ」というテーマで高重が、2 回目は 11 月 11 日に「温度を測る」というテーマで山口が主導して実施した。両日とも、大学から高重、山口の教員 2 名、アシスタントの大学院生 2 名、卒研究生 2 名が参加した。いずれも土曜日の午後であり、参加生徒は中 1～高 1 までの 12～15 名程度、また中高の教員、事務職員の方も数名参加見学された。授業時間は 30 分程度講演した後、実験を 1 時間程度行うというものである。な

お、全 3 回で企画されており、3 回目は 2018 年 2 月に大学の極低温物性測定室などの見学会を予定している。

行事の様子は、中高のウェブサイトに写真が掲載されているので、雰囲気などを知るにはそれを参照していただくことにして、本稿では物理教育の視点から、講義の趣旨や構成、特に工夫した点について記した。

2. 講義概要

授業は物性物理学の実験を紹介するという趣旨で参加生徒を募集した。実験の中核には超伝導をおいた。1 回目の「超伝導と磁石で遊ぶ」という授業の名称は、高重が担当している理工学部 1 年次科目のプロジェクト I のテーマ名であり、内容もその集大成として行っている「夏休み科学体験教室」を、アドバンストコースにしたものである。これは超伝導体のマイスナー効果などで、永久磁石軌道上で超伝導体が宙に浮かぶという不思議な性質を体感してもらうところがポイントで、「夏休み科学体験教室」では、まずそれを見て喜んでもらえればよい。しかし、今回のような授業では、それだけではなく、そこから物理的な事柄を見つけて深く学習してもらうことも必要と思う。

本来、超伝導は、電気抵抗がゼロになることで発見された現象であり、工学分野では「超電導」と書く。したがって、物質を冷却して電気抵抗がゼロになることも示すことができれば、学習効果は大きいことになろう。

1 明星大学理工学部総合理工学科物理学系 教授 物性物理学実験

2 明星大学大学院理工学研究科 物理学専攻 博士前期課程 物性物理学実験

しかし電気抵抗の概念や、その温度依存性を測る意味を中1～高1生に理解してもらうのは、そんなに簡単なことではない。そこで1回目では、電気抵抗や温度を下げることなどの説明もある程度は織り込むが、まずは魅力的な浮上現象を楽しんでもらい、超伝導やその周辺の低温物性測定技術に対する興味を喚起することを目標にした。

そして2回目の山口による「温度を測る」という授業では、温度の定義や温度測定の手段の説明をはじめとして、電気抵抗の本格的な測定手段にも言及して、超伝導体の電気抵抗がゼロになることを示す展示実験を行なった。単に電気抵抗がゼロになるのを見せるだけでなく、磁石上での磁気浮上現象と同時展示も行なったことは、画期的なことであると考えている。

以上が2度の授業の関係である。実際の授業では、超伝導に限らず、実験物理学の様々な話題にも触れたが、以下では各授業で行った実験の要点をまとめて記した。なお超伝導磁気浮上については、本紀要にすでに解説¹⁾があるので、より詳細な定量的な事項などはそれを参考にされたい。

3. 超伝導磁気浮上現象の実験

超伝導は物質を冷却しないと起こらない現象であり、超伝導体といっても室温では普通の物質(常伝導状態という)である。そこで1回目の授業は、冷却するために使う液体窒素に慣れ親しんでもらう実験から始めた。

よく学園祭などでも行われているような生花を凍らせる実験や、風船を液体窒素に漬けて収縮させる実験なども行った。風船の実験では、通常の場合より一歩進んで、ヘリウムガスを持ち込んで、空気入りとヘリウムガス入りの風船を液体窒素に漬けて収縮させて、その比較を行うことも試みた。これにより気体の液化現象や、さらに気体の膨張収縮を見ることで絶対温度という概念への興味を喚起することもできたのではないかと考えている。これについては次節で改めて説明することにする。

超伝導現象の物理的説明には、大学院レベルの知識が必要なので、この授業の中では、電気抵抗ゼロの現象の発見に関する歴史的な事柄と、これから実験を行う磁気浮上懸垂現象の説明にとどめた。それに関係するマイスナー効果や磁束のピン止め効果という現象は、表面の磁極がN、S、Nとなるように(図1)、板状(20×10×3 mm)の磁石を3列に並べて、断面の磁束分布を模式的に描き説明した。この板状磁石は希土類(NdFeB)磁石であり、図1のような組磁石の表面では、磁束密度が約0.5 Tと強いことを、実際に触って吸引力を感じて学んでもらった。

図1の(a)～(b)は液体窒素で冷却した超伝導体(灰色直方体)を、遠くから永久磁石に近づけた時の磁束の様子である。マイスナー効果では、磁束が排除されることで浮力が発生する(b)。磁束密度の濃い磁石表面に押し付けると、一部磁束が侵入してそれがピン止めされる(c)。ピン止めが起こると、超伝導体は一定の高さに拘束されるので、磁石を裏返しにすると磁石の下に釣り下がる(d)。

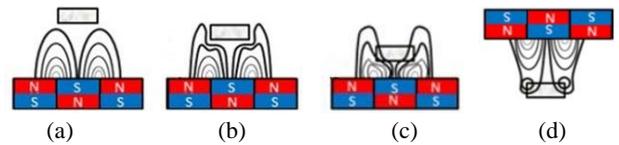


図1 マイスナー効果と磁束のピン止め効果

次に実際に超伝導体を磁石上に載せて運動させる場合、図1のような3列の組磁石をより広く展開する必要があるが、その際2種類の組み方がある。まず、図2(a)は表面の磁極がチェッカーボードパターンのように組む場合である。これは簡単に組むことができるが、水平面内x、y方向に動こうとすると、隣同士の磁極は逆向きであるので、超伝導体は浮上するが(b)、自由には動くことはできない。動かすには竹のピンセットなどで横に押してやれば、わずかに上下動をしながら動いていくのを観察できる。超伝導体の磁気浮上実験をする多くの場合は、このような組み方をしていいる。なお、図2(b)で浮上しているのは、円盤状のイットリウム系酸化物超伝導体(YBa₂Cu₃O_{7-y})である。

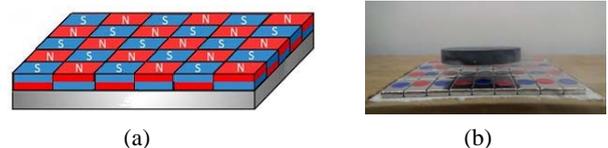


図2 チェッカーボード型組み磁石での超伝導体の浮上

これに対して、図3(a)は、横方向に表面がN、S、Nの磁極の単位を繰り返し配列して、その方向の磁束分布が均一になるように軌道状にした場合である。これは隣接して同磁極が並んでいるので大きな反発力が発生して容易には組めない。この組み方を実現するには透磁率の高い鋼板などを下に敷くなどの特別な工夫が必要である。

超伝導体をこのような軌道に載せると、あたかも摩擦がないように横方向に動く(b)。また超伝導体を強く押し付けてピン止めした後、軌道を裏返しにすると釣り下がって動かすこともできる(c)。これが最初に述べた超伝導体の不思議な性質である。なお、図3(b)、(c)では、超伝導体は保温のためにガーゼで包まれている。

授業では2種類の組み磁石上で超伝導体を液体窒素で冷却して、浮上や懸垂運動を楽しんでもらった。図4は液体窒素を発泡スチロールケースに注いでいるシーンである。上述した2種類の組み磁石も見えている。

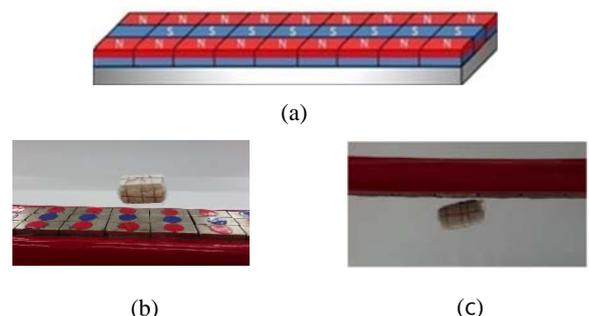


図3 均一磁場分布磁石軌道での超伝導体の浮上及び懸垂



図 4 実験風景

ただし、裸の超伝導体を液体窒素に漬けて冷却するだけではすぐに温度が上昇してしまうので、保温する必要がある。そこで、超伝導状態をある程度長い時間保持できるようにガーゼで包み保温することにしたが、生徒全員に 1 個ずつ超伝導体を配布して各自試してもらった。図 5 は、使用した超伝導体(直径で 5~10 mm 程度)である。使用している超伝導体の臨界温度は 90 K、液体窒素の沸点は 77 K であるが、ガーゼで覆うことで 1 分程度は超伝導状態(浮上状態)を維持できる。熱電対をガーゼ内に挿入することで、温度も測定したが、確かに 90 K 以下であることを確認した。



図 5 超伝導体とその保温

このようにして、超伝導体を使えば摩擦の少ない走行が可能なが分かった。そして力学の応用問題として斜面をつくり超伝導体を滑らせる実験を行った。図 6 のように、磁石軌道で 1 m 程度の斜面を作り、そこへ保温した超伝導体を決まった高さから滑らして、最終速度を市販の速度測定器(商品名:ピースピ, (株)ナリカ製)で測る実験である。

エネルギー保存則より、理想的な最終速度 v [m/s] は、斜面の高さ h [m] だけで決まり、 $v = \sqrt{2gh}$ であるので、例えば $h = 0.06$ m などとして、各自ガーゼで覆った超伝導体を滑らせて、速度を測ってみた。例えば $h = 0.06$ m、 $g = 9.8$ m/s² とすると理想値は 1.084 m/s となるが、測定値は非常に条件のよい場合は 1.07 m/s を超える場合もあったが、悪い場合は 1.0 m/s 以下の場合もあった。ガーゼの覆い方の不揃いなど、もう少し工夫が必要なようであり、この実験は、高校 2 年生以上の物理の知識が必要で、学年的にはやや早すぎるかと感じた。

なお、最終速度を求めるだけでなく、高さを系統的に変えて重力加速度 g をどの程度正確に決定できるかということも 1 つの興味であり、この種の実験は現在、高重研究室



図 6 磁気軌道で作った斜面走行実験

の卒業研究でもより精密に進めており、また、別の機会に発表したいと考えている。

ところで、図 3 (a) のような磁石軌道では、ある程度は曲線状に配列しても超伝導体はほとんど摩擦なく浮上して走行することができるので、この軌道を適当なパターンに敷設することで、図 7 に示したように、鉄道模型のジオラマのようなものを作ることができる。これは高重研究室の 2016 年度の卒業研究として製作したものであり、昨年度の本紀要²⁾ に紹介されているものを持ち込んだ。

これはネオジム磁石 3 列の軌道を総延長約 8.5 m のループ状に敷設して、途中 3 回のらせんループを回るようになっている。高低差は約 0.2 m、カーブの曲率半径は 0.15 ~ 0.3 m 程度である。周回磁気軌道の一部をできるだけ低い位置に敷設して、その部分に液体窒素を充たして、その中へ走行体を通過させ冷却するという機構を持っている。一番高い位置まではレゴブロックの可動部品を使って機械的に持ち上げて、その後は位置エネルギーを利用して、ほとんど摩擦のない軌道上を滑り、液体窒素を補給すれば、相当長い時間の連続的な周回走行を実現することができる。授業の最後に、このジオラマを運転したが、かなりの関心をもって見てもらうことができたようであった。



図 7 レゴブロックを使った磁気浮上走行ジオラマ

4. 温度測定、電気抵抗測定

第 2 回目の山口による授業は、物体を構成する分子の持つ運動エネルギーの平均値を測る指標が温度であるという、温度の定義や温度の単位の紹介から授業を始めた。温度の

単位は、摂氏(°C)：セルシウス、華氏(F)：ファーレンハイト、そして絶対温度(K)：ケルビンと3つを紹介した。1回目の授業でも液体窒素の沸点 77 K などで、絶対温度表示はすでに使っており、ヘリウムガスを持ち込んでシャルルの法則の実証なども試みたのであるが、時間的にかなり間があいたので、改めて図 8 のような風船の収縮のスライドを示して、絶対温度の説明を行った。

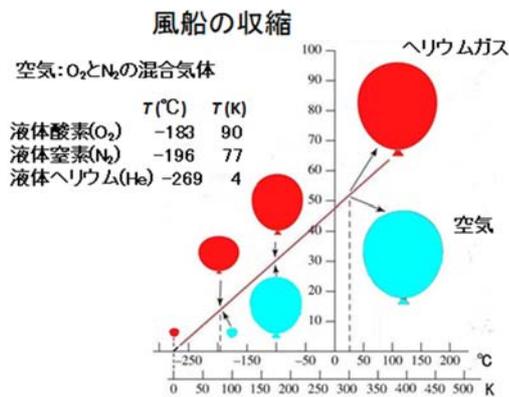


図 8 気体の収縮と絶対温度の説明

気体の収縮の状態を測定することにより絶対温度を決めるということから、物理量の変化を測定してそれを温度測定に使うという考え方を学んでもらい、どのような物理量を測定するかで様々な形の温度計ができるだろうというように話題につないだ。

まず熱膨張を利用した温度計としては、アルコール温度計や水銀温度計、バイメタル温度計、ガリレオ温度計を紹介した。とくに後者 2 つは実物を持ち込んで説明したが、大いに興味を引き、これらは原理も含めて初めて知ったという生徒も多いようであった。図 9 は、ガリレオ温度計の説明に使ったスライドである。実際の教室の温度をデジタル表示の温度計でも測り、持ち込んだガリレオ温度計の状態と比較を行った。授業が終わった後も、改めて手で触れて見学に来る生徒もいた。



図 9 ガリレオ温度計の説明

次は電気抵抗の変化を利用した温度計を紹介するのであるが、そのためには電気抵抗そのものの概念とそれを測定するとはどういうことかを理解しておく必要がある。またその技術(方法)は超伝導体の電気抵抗を測るためにも必要なことである。まず、電流は電荷をもったものの流れであり、水の流れに例えれば電圧は水圧のようなもので、抵抗は流れを邪魔するものという相当初歩的レベルからの説明をして、少なくともオームの法則と電気抵抗の単位についてはある程度理解したものととして、次のテスターを使った実験に進んだ。

テスターの実験は数人グループで3組に分けて、図 10 に示したようなものを用いた。まず測定用のミノムシクリップをオープンにした状態では電気抵抗は測れないほど大きいということ(OL: overload 負荷以上と表示されている)、ショートした状態では非常に小さくなるが、完全に 0 にはならない(0.12 Ωと表示)ということを見せた。特に後者は測定をするためのリード線の部分の電気抵抗が表示されているということも学んでもらった。



図 10 テスターのオープン(開放)、ショート(短絡)の実験

次に実際の電気抵抗を測定する実験を行った。これは何種類かの大きさの抵抗体を用意した。図 11 は銅線(0.3 mm φ、2 m)を巻いて作った 1 Ω 以下の小さい抵抗と 1.1 kΩ の金属皮膜抵抗を測定した例である。小さい場合の抵抗は、



図 11 テスターによる抵抗測定実験

0.69 Ω であるが、図 11 のショート時のリード線の 0.12 Ω を差し引かなければ正確な値は出ないことを説明したが、十分な理解を得た。このような実験を行うことで、生徒達にも、電気抵抗が大きければ電流が流れにくく、小さければ流れやすいという感覚ができてくるように思われた。

次に、図 11 のような状態で、抵抗をリード線につないだまま、液体窒素につけて電気抵抗の変化を見た。銅線の場合はかなりその値が小さくなっていくことを観測することができた。室温での抵抗値が液体窒素温度では、約 3 分の 1 以下に減少するのを見た。こうして電気抵抗は温度に依存して変わる物理量であることが十分に理解された。

そこで、図 12 のようにそれを利用した温度計の紹介をした。この種の温度計には測定温度範囲により多くの種類があり、温度変化の特性も温度を下げると抵抗が減るとは限らないが、白金抵抗温度計、ロジウム鉄抵抗温度計、ゲルマニウム抵抗温度計、またサーミスタと呼ばれる特別温度変化の大きい物質を用いた温度計など、目的に応じて使い分けられているということを紹介した。日常生活でよく目にするデジタル表示の温度計も、大抵はこのような温度変化をする電気抵抗素子を組み込んで応用したものであるということも付け加えた。

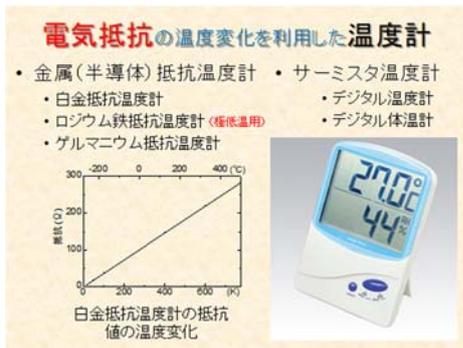


図 12 白金抵抗温度計の電気抵抗の温度変化とサーミスタ温度計の例

次に、中高生にはあまりに耳慣れない現象になるが図 13 のように熱起電力を応用した温度計を紹介した。これは熱電対と呼ばれており、物性物理学の実験ではしばしば使われる。その原理はゼーベック効果と呼ばれる現象を利用するが、ゼーベック効果とは、金属導線の両端に温度差があると電圧(熱起電力という)が発生する現象である。一般にその電圧は金属の種類により異なるために、2 種類の異なる金属をつないでループを作り、各接点を異なる温度に保つと電流が流れるが、図に示したように一方の接点を切り離して同一の基準温度 T_0 に保つと、その間にはもう一方の接点の温度 T_x と基準温度の差にほぼ比例した電圧が発生するので、それを利用して温度計を作るというものである。

金属の組み合わせにより多くの種類があり、図に示したように銅-コンスタンタン、金・鉄-クロメルなどというようにその組み合わせ名で呼ばれ、これも温度範囲によって使われるものが決まってくる。



図 13 熱電対温度計の説明

この他にも、量子論の起源となった物体から放射される赤外線や可視光線の強度を測る放射温度計、液晶の色の変化を利用した液晶温度計、蛍光を利用した光ファイバー温度計、低温でヘリウムガス圧を測る蒸気圧温度計なども紹介したが、詳細は省略する。

以上のように電気抵抗と温度の測定法を学んだので、超伝導体の電気抵抗を測ることにした。しかも、図 14 に模式的に示したように、電気抵抗が 0 を見るだけでなく磁気浮上現象も同時に見ようというわけであるが、やや高度な技術を要するので、これ以後は教壇上の展示実験とした。

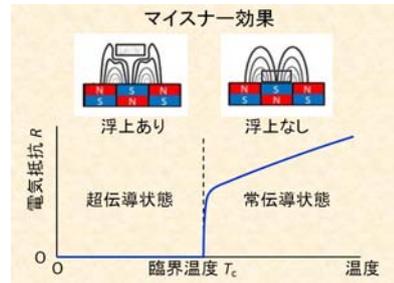


図 14 超伝導体の電気抵抗の温度依存性(模式図)とマイスナー効果(模式図)

超伝導体の電気抵抗を測るということが簡単でないのはその抵抗が非常に小さいためである。超伝導状態では電気抵抗は真にゼロであるのでそれは当然であるが、超伝導になる前の常伝導状態(図 14 参照)でも、電気抵抗はかなり小さい。前述のテスターで抵抗を測る場合、ショートの状態ですべてのリード線の電気抵抗が存在することを示したが、超伝導体の室温(常伝導状態)の電気抵抗は形状にもよるが、そのようなリード線の電気抵抗よりも小さいほどである。

そこで超伝導体の電気抵抗の測定には 4 端子法という方法を使う。詳しい説明は省略するが、試料に一定の電流を流す電流端子 2 本、測定したい電気抵抗の両端の部分の電圧を測る電圧端子 2 本をつけるのでこの名前がある。この方法を使うとリード線の電気抵抗の影響を受けずに試料の電気抵抗が測れる。実際に使った試料の模式図と実物写真を図 15 に示した。4 本のリード線は超音波ハンダという特殊な方法で試料に接着している。さらに熱電対も装着するので計 6 本の線が試料から出ている。これを保温のための

ガーゼで覆い、それを液体窒素に漬けて超伝導状態にする。その冷却過程での温度と電気抵抗を記録すれば、電気抵抗が臨界温度 90 K 以下でゼロになることが観察される。

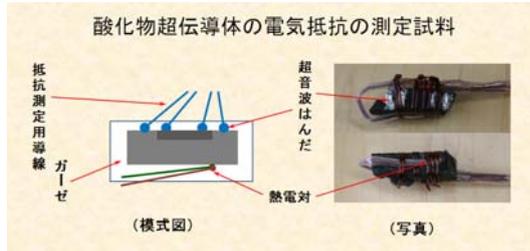


図 15 4 端子法による超伝導体の電気抵抗の測定

次にリード線の繋がった試料を永久磁石の上に取り出して置くと、温度上昇が始まるが、しばらくはガーゼの保温で臨界温度以下に保たれるので超伝導状態を持続し浮上している。図 16 の一番下はその浮上状態の写真である。やがて 90K 以上になり電気抵抗が発生すると、ほとんど同時にマイスナー効果もなくなり試料は磁石の上に落ち込むのが見られる。

図 16 には一番上に温度計測器、真中に試料に一定の電流



図 16 電気抵抗を測定しながら浮上している超伝導体

(今の場合は 100 mA) を流す定電流電源、下に超伝導体両端の電圧を測るマルチメータが見えているが、各測定器からの信号を PC へ取り込み、電圧値÷電流値の計算をしてグラフを描いたのが図 17 である。超伝導臨界温度での電気抵抗の変化が鮮やかに見えているが、青いカーブが降温時、赤い

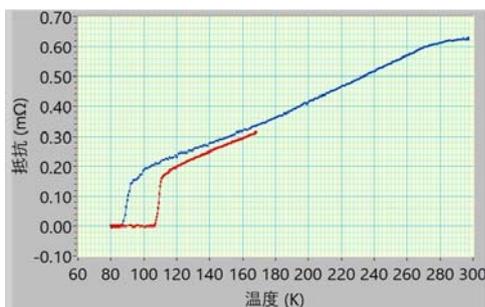


図 17 超伝導体の電気抵抗の測定例(PC 表示画面)

カーブが昇温時の特性である。両者の臨界温度にずれがあるのは、通常の実験に比べて、本実験では授業時間を考慮して、冷却昇温速度を非常に早くする必要があり、超伝導体内部の温度と熱電対の温度(試料表面)との間に差が生じているためである。

教室には電子黒板を 2 台用意して頂き、1 台には図 16 の試料周辺の様子を CCD カメラで映し出し、もう 1 台には図 17 のグラフを映し出して、2 つの現象の同時進行の様子を観察しやすくした。その結果、有限の電気抵抗が発生してカーブが立ち上がった次の瞬間、超伝導体が落ち込むのが成功裡に見られ、2 回目の講義を締めくくることができた。

最後に参考までに、使用した 4 端子法の原理図、及び熱起電力除去法を図 18 に示した。本実験のような急激な温度変化を含む電気抵抗測定では、電圧値は熱起電力の影響を受ける。そこで定電流源を、例えば 1 秒毎にオンオフしてオン時電圧からオフ時のそれを差し引くような補正をして測定電圧としていることを強調しておきたい。

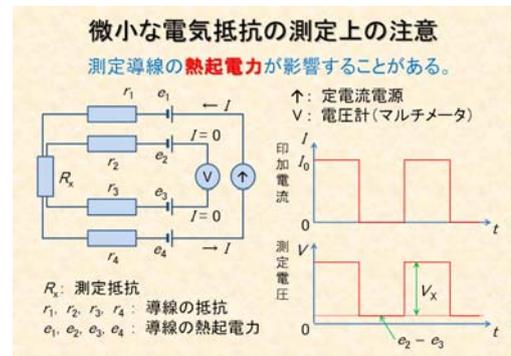


図 18 4 端子法の原理図

5. 終わりに

以上のように、物性物理学の実験を紹介するという趣旨で、2 度の授業を行った。生徒たちの様子は、説明を聞いている時にはどの程度に興味を持っているのかこちらも不安であったが、実験を始めると、全員生き生きとして参加してくれた。改良点、反省点は多々あるが、単なる娯楽ではなく、やや本格的に超伝導を紹介するという点では目的を達成したと思っている。

本授業の実施にあたり明星中学・高等学校の畠山武校長、一之瀬繁理科教科長をはじめ理科教員の皆様、佐々木克彦事務長、香川浩康補佐をはじめ事務室の皆様には、大変お世話になりました。ここに心よりお礼申し上げます。

また、実験補助で授業に参加した明星大学理工学研究科 M1 靄淵静佳さん、高重研卒研生の町田瑞季さん、椎橋涼太君、八木澤摩耶さんに、事前準備を手伝ってくれた他の卒研諸君にもここに感謝の気持ちを表します。

参考文献

- (1) 高重正明、勝呂吏湖、橋本明美、山口俊久：「超伝導磁気浮上走行体の速度測定」, 明星大学理工学部研究紀要, 52, pp.5-12. (2016).
- (2) 高重正明、山口俊久：「レゴブロックを使った科学教材展示機器の開発」, 明星大学理工学部研究紀要, 53, pp.13-18. (2017).