

理学部物理学科学生実験の開発

大学院理学研究科・極低温科学センター 木村憲彰 (kimura@mail.clts.tohoku.ac.jp)

1. はじめに

東北大学理学部物理学科では、平成19年度から学部教育における学生実験のカリキュラムの改革を行った。これまでは2年次後期から3年次前期にかけて通年の科目(科目名:一般物理学実験)だったのが、新しいカリキュラムでは Semester ごとに科目を分け(物理学実験I、II)、各レベルに応じた教育目標を設定した。物理学実験Iでは、学部初年度と次年度で学ぶ科目をくまなく体験できる内容とし、IIでは選択制として、より専門的なテーマをじっくり取り組む内容になっている。新カリキュラムの策定にあたり、筆者もいくつかの実験テーマの開発を行ったので、何かの参考になるかとも思い、ここで紹介させていただくことにした。また、3年次後期の学生実験(物理学実験III)は、学生が実験系の各研究室に配属され、それぞれの研究室の特長を生かした実験教育を行うというスタイルを採用しているが、そこで数年前まで試行的に行っていたテーマがあるので、これもあわせて紹介する。

2. 磁性体の比熱と磁気熱量効果

物理学実験Iでは、熱力学に関する課題を開発した。熱力学の教科書ではピストンを使った思考実験が良く出てくる。学生実験でも、熱力学の実験といえばピストンを使った実験が一般的と思われる。実際昔の学生実験のテキストを見るとまさに教科書どおりの実験が行われていた。筆者は常々、学生の中に「熱力学」といえば「気体」を扱う物理という固定観念が出来上がっているのでは、という危惧があり、気体を扱うテーマは気が進まな

かった。一方、熱力学といえば、エントロピーをはじめとする飲み込みにくい概念が登場するが、これを実験的に体感できるようにできないものかという思いがあった。エントロピー以外の熱力学変数である温度、圧力、体積などは温度計、圧力計、容積計(たとえば計量カップ)と、測ることが可能なので比較的身近に感じる。一方、エントロピー計というものは存在するわけではないため、実態がつかみにくいと思いがちである。しかしエントロピーの温度変化は比熱(を温度で割った値)として測定可能であり、決して抽象的な物理量ではない。しかも、比熱とは温度を上げるのに必要な熱量のことであり、これは直感的に理解しやすい。そこで、比熱の測定を通してエントロピーの概念を理解できるようになるのではと考えた。また、かねてより磁性を実験テーマで取り入れたいという思いもあったので、磁性体を対象物質として採用し、磁気熱量効果もテーマに取り入れることにした。

比熱の測定方法には断熱法、交流法、緩和法、示差熱法などいろいろあり、通常、物質の種類や温度域などに応じて適切な方法を選択するが、本テーマでは断熱法を採用した。本来、室温では外からの輻射の影響が非常に大きいため断熱法は不向きであるとされるが、測定原理が直接的でわかりやすいのと、断熱状態を作り出す過程で、熱の伝わり方をよく理解できると考え、あえてこの方法を採用した。そのかわり、測定試料の熱容量に合わせて熱容量(比熱)計を設計して、それなりの測定ができるように工夫した。試料には室温付近

で強磁性に相転移するガドリニウムを選んだ。

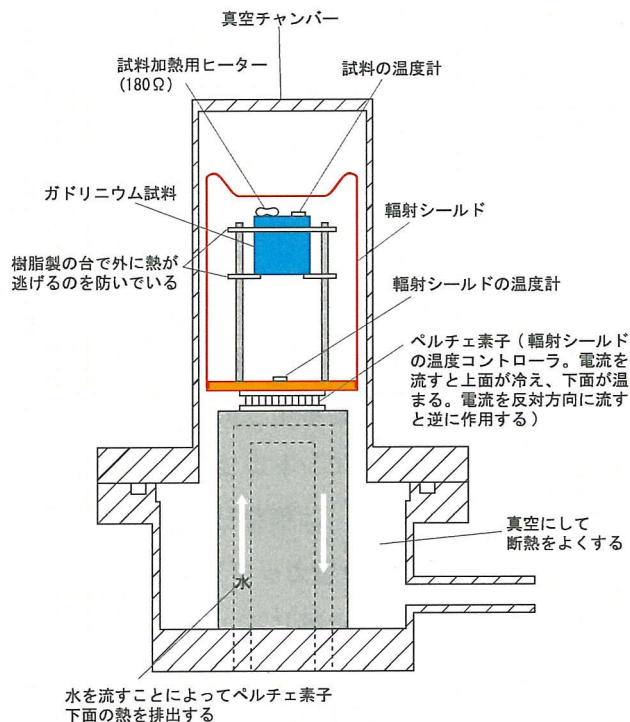


図 1. 熱容量計の概略図。

図 1 に実験で用いる熱容量計の概略図を示す。試料のガドリニウムにアルミテープで直接温度計の白金抵抗体とヒーターの金属皮膜抵抗 (180 Ω) を取り付ける。これをガラスエポキシ製の試料台に置く (図 2)。試料の外側にアルミ缶でできた放射シールドをかぶせる。放射 (断熱) シールドはペルチェ素子で温度調節ができるようにしてある。(そのため放射シールドにも温度計を取り付ける。) ペルチェ素子の下側は水冷ができる熱アンカーを取り付ける。試料までの配線は熱伝導の悪いマンガニン線を用いて、ミニチュアコネクタで銅線と接続するようになっている。これらを真空チャンバーにとりつけるようになっている。

本実験では電磁石に挿入できるようにするため、小型に設計してある。そのため熱容量計の組み上げには細かい作業を必要とするが、もし磁気熱量効果の測定をしないのであれば、もっと装置を大きくしてもよいかもしれない。

白金抵抗体は JIS 規格のもので、0 °C で 100 Ω、

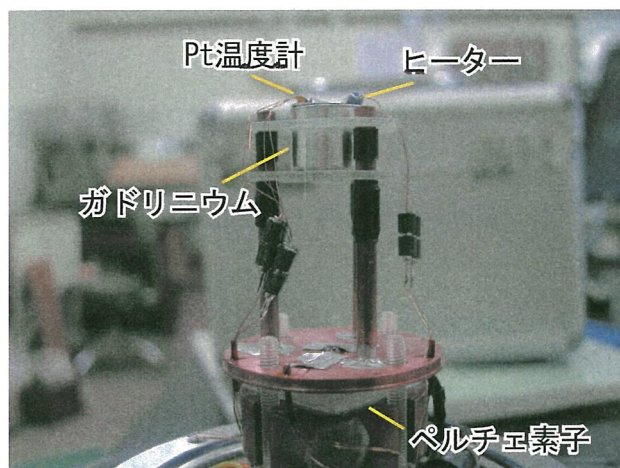


図 2. 熱容量計の実際の写真。

100 °C で 138 Ω (0.38 Ω/K) のものを用いる。マルチメータは 1×10^{-4} Ω の精度で測定できるので、約 3 mK の分解能で温度が計測できることになる (ただし抵抗体の確度が 0.1 % なので絶対値の精度はせいぜい 0.1 K 程度)。試料の加熱はヒーターのジュール熱で行う。与える熱量が大きすぎると、比熱の誤差は少なくなるが温度変化を細かく調べられない。一方熱量が小さすぎると、温度変化を細かく測定できる代わりに比熱の誤差が大きくなる。あらかじめ何度か予備実験を行って適切な熱量を選ぶ。

実験課題では、(1) 真空にしないとき、(2) 真空にしたとき、(3) 放射シールドを取り付けて試料の温度上昇に合わせて放射シールドも加熱したときの 3 つの条件で加熱曲線を測定する。初年度は 0 °C から 40 °C まで比熱の温度依存性を測定し、強磁性転移を観測する課題にしていたが、コツをつかむまでに結構時間がかかり、時間内に終了できないグループが多かったため、次年度からはやめにした。ちなみに、この熱容量計のテスト時に測定したガドリニウムの熱容量の温度依存性を図 3 に示す。

次に磁気熱量効果であるが、電磁石であらかじめ 2 kOe 程度の磁場を発生させておき、磁極間に熱容量計を出し入れすることによって温度変化を

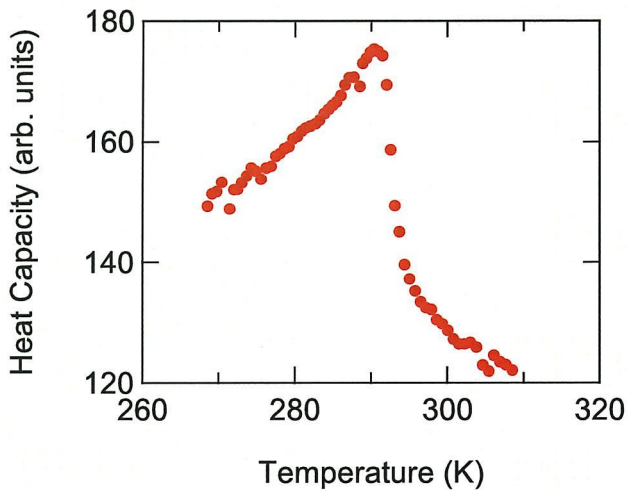


図3. 熱容量計で測定したガドリニウムの熱容量の温度依存性。

測定する。最大でおよそ 1K 程度の温度変化を観測することができる。この磁気熱量効果の温度変化を 5℃から 40℃まで測定し、キュリー温度 (19℃) でどのような変化をするかを考察する内容になっている。すなわち、磁気熱量効果による温度変化は、マクスウェルの関係式から

$$\left(\frac{\partial T}{\partial B}\right)_S = -\frac{T}{C_B} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_B \quad (1)$$

とかける。「磁気熱量効果」、「比熱 C_B 」および「磁化 M 」のそれぞれの温度変化のうちどれか 2つがわかれば、残りのひとつを導くことができる。考察ではあらかじめ C_B/T vs T 、 M vs T のグラフを与えておき、 $\left(\frac{\partial T}{\partial B}\right)_S$ と実験結果を比較するようになっている。前述の比熱の実験で図 3 のような実験ができれば、実験結果だけから測定していない M を導くこともできる。

磁気熱量効果をテーマとして取り上げた意図は、単純に磁場の上下だけで温度が変化することに興味を持ってもらうだけではなく、そこにエントロピー (とその起源となる磁気モーメントの配列) が背後にあることを理解してもらいたいということがある。また、磁気熱量効果はいわゆる断熱膨張・断熱圧縮と同じで (圧力 \leftrightarrow 磁場、体積 \leftrightarrow 磁化)、熱力学が気体以外にも広く一般に適用できることに気がついてもらえればと思っている。

3. 酸化物超伝導体の磁化測定

物理学実験 II では超伝導を担当することになった。一般物理学実験のときは、いまや学生実験の定番ともいえる酸化物超伝導体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (以後、YBCO と略す) の合成と電気抵抗測定という課題を行っていた。しかしながら、数年前に学部 1 年生向けの実験カリキュラム改革があり、YBCO の電気抵抗測定が課題として取り上げられることになった。同じことを再びやってもあまり意味がないように思われるので、物理学実験 II では電気抵抗測定以外の測定も行うようにして、より超伝導を深く理解してもらうようにしようと考えた。

超伝導の著しい性質といえば電気抵抗ゼロと完全反磁性 (マイスナー効果) なので、磁化測定がふさわしいと考えた。磁化測定には磁気天秤や引き抜き法などいくつか方法があるが、それらを学生実験向けに新たに作るお金も時間もなかった。そこで、ホール素子を使って (表面) 磁化を測定する方法を採用することにした (図 4)。なお、磁化測定のほかに、(交流) 磁化率の測定も検討してみたが、超伝導体、特に第 2 種超伝導体の交流磁化率のデータの意味を正しく理解するのは必ずしも容易ではないので、(測定方法自体は大変教育的だと思うのだが、) 採用しないことにした。

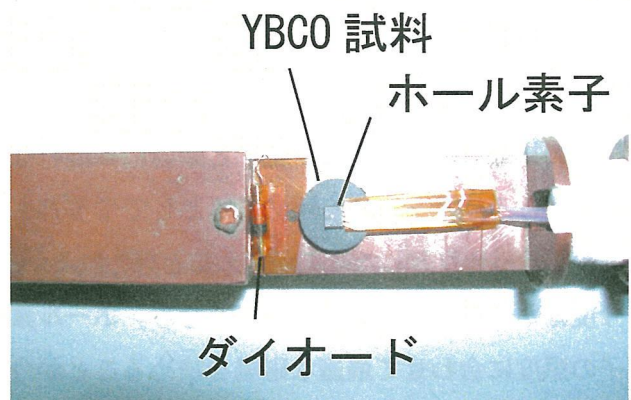


図 4. 円盤状の YBCO 焼結体に取り付けたホール素子。左側のダイオードは温度測定用。

このホール素子による磁化測定はきわめて簡単で、試料表面にホール素子を貼り付けるだけである。ホール素子も市販のもので、簡単・安価に手に入る。本テーマでは旭化成電子(株)製のGaAsホール素子HG302Cを用いている。クライオスタットはかつて一般物理学実験で使用していたものを流用し、磁場は物理学実験Iの磁気熱量効果で用いた電磁石を流用した。なお、電磁石で発生する磁場は強すぎるため、実際には電流を流さずに、磁極に残る残留磁場(200 Oe程度)を利用した。ホール素子を用いた測定の利点は簡便というだけではない。測定したいのは磁化(M)であるが、観測されるのは磁束密度(B)であるため、 B から M を導く過程で H (外部磁場)と B の違いを理解することができる。

市販のホール素子のオフセット電圧は、低温で複雑な温度依存性を示す上に再現性がよくないという欠点があるが、超伝導転移温度で磁束の排斥を観測することができる。しかも、きちんと磁場中冷却とゼロ磁場冷却で異なる磁化-温度曲線が得られる。しかしながら、オフセット電圧が温度変化するのは、必ずしもデータやその背後にある物理現象を理解する上で好ましいとはいえないかもしれない。その場合は、低温でも動作が保証されている研究用の素子(たとえばF.W.Bell社BHT-921)を使ったほうがよいだろう。

なお、磁極の残留磁場(200 Oe)は高温超伝導体の磁化測定に用いる印加磁場としては少し大きく、磁束の排除は電気抵抗の変化ほど顕著には現れない。かける磁場を数Oe程度に落としてやるともう少しはっきりとした変化が見えると思われるが、今度はホール電圧の変化が少なくなる。ホール素子の感度に合わせて最適な磁場を決めることが今後の課題である。

4. 断熱消磁冷凍機の試作

3年後期の物理学実験IIIでは、常磁性塩を使った断熱消磁冷凍機の試作をテーマとした。断熱消磁冷凍は大きな磁気モーメントをもつ常磁性塩の磁気熱量効果を利用した冷凍法であり、手軽に1K以下の極低温を得る方法として知られている。最近では0.1Kまで冷却可能な断熱消磁冷凍機が市販されている。

ここで簡単に断熱消磁冷却の原理を説明しておく。常磁性体の局在磁気モーメント J によるエントロピー S は以下のようにかける。

$$S = R \left(-\alpha B_J(\alpha) + \ln \frac{\sinh \left(\frac{2J+1}{2J} \alpha \right)}{\sinh \left(\frac{1}{2J} \alpha \right)} \right). \quad (2)$$

ここで、 $\alpha = \frac{gJ\mu_B JB}{k_B T}$ 、 $B_J(\alpha)$ はブリルアン関数である。エントロピー S の温度依存性をグラフにすると図5のようになる。磁場 B をかけるとグラフが横に拡大されたようになる。

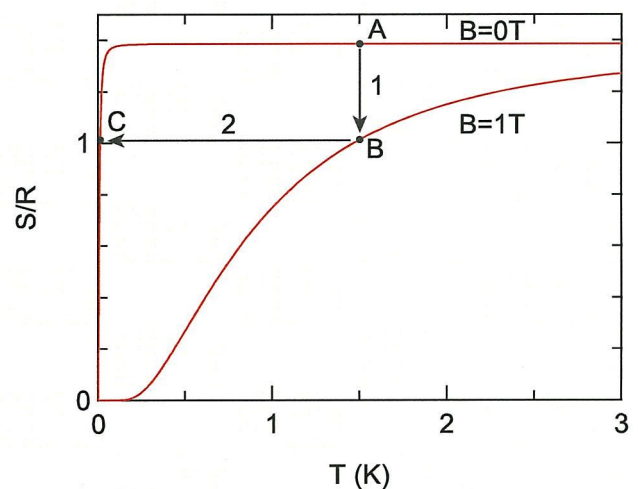


図5. CPAの磁気エントロピー図(理論値)。1、2は等温、断熱過程を表す。 B は外部磁場をあらわす。 $B=0$ でも内部磁場0.01 Tがある。

断熱消磁は以下のようにして行う。はじめに常磁性塩を熱浴に接触させ、適当な温度に冷却しておく(状態A)。熱浴に接触したまま磁場をかけると過程1を経て状態Bに移動する。その際エントロピーの減少分 $T\Delta S$ が排熱される。つぎに常磁性塩を熱浴から切り離し、断熱状態のまま磁場を

ゼロにする。過程 2 により状態 C に移る。これが断熱消磁による冷却である。

3 年後期になると、統計力学を履修しているため、エントロピーのミクロスコピックな裏づけが理解できるようになる。そこで、実験前のガイダンスで、式 (2) の導出を含めた磁性の簡単な講義を行う。そして、測定を行う CPA の磁気モーメントの大きさや実験条件などの情報を与えおき、断熱消磁によってどれだけ温度が下がるかを計算させておく。実際の実験でどのようになるかを確認し、計算どおりにならない場合は、何が原因かを考えさせる。

常磁性塩はガーネット、ミョウバン、セリウム・マグネシウム硝酸塩などが知られているが、このなかでミョウバンは再結晶法で単結晶が容易に作成できる。そこで実験テーマに単結晶作りのエッセンスを入れ込むことができると考え、クロム・カリウム・ミョウバン (CPA) を選んだ。実際には単結晶である必要はないのだが、市販の試薬 (粉末あるいは粒状) を使うより密度 (充填率) が大きい単結晶の塊を用いたほうが冷却能力の点で有利である。過飽和になるまで試薬を溶かし、1 週間ほど静置しておくだけで、サファイアブルーの六角柱の単結晶を得ることができる。これに温度計 (RuO_2 のチップ抵抗) を貼り付け、温度計に配線したワイヤーで CPA ごとプローブにつるす。プローブを断熱容器に入れ、断熱容器ごとガラスデュワーで 1.5 K まで冷却する。熱交換ガスを満たした状態で外部から磁場をかける (我々の実験では 0.2 T)。CPA の温度が 1.5 K になったところで熱交換ガスを取り除く。熱交換ガスはヒーターを取り付けたチャコールをプローブ先端につけておいてヒーターのオン・オフでコントロールする。十分時間がたったところで磁場をゼロにすると温度が下がることになる。

実際の実験では最低温度は 0.8 K で、わずか 1

分で 1.5 K に戻ってしまう。本実験で使用した断熱容器とプローブは試作のもので、輻射シールドが施されておらず、うまくいかなかったものと思われる。また、熱交換ガスをヒートスイッチとして用いたが、メカニカルなものの方がよいかもしれない。その場合は CPA 全体を冷やすための工夫が必要になるであろう。しかしながら、これ以上は装置の改良が大掛かりになりそうだったため、追及するのをやめてしまい、別のテーマに替えてしまった。いつか機会があれば再びチャレンジしてみたいと思う。

5. おわりに

以上筆者が開発した 3 つの学生実験のテーマについて紹介した。ガドリニウムの比熱 (磁気熱量効果) と超伝導の実験は始めてから 3 年目なので、教材としてはまだ発展途上と考えている。今後も、学生の反応を見ながら改良を重ねていきたい。

謝辞

ホール素子の選定にあたり、旭化成電子 (株) にはホール素子のサンプルをいくつか無償で提供していただいた。ここに改めて御礼を申し上げます。