

固体の融点遠隔実験装置の開発

藤井 弘也・山下 茂・芝原 雅彦・原 弘高

Development of Experimental Equipment for Investigating,
the Melting Point of Solid States by Remote Control

FUJII, H., YAMASHITA, S., SIBAHARA, M. and HARA, H.

大分大学教育福祉科学部研究紀要 第35巻第1号

2013年4月 別刷

Reprinted From

THE RESEARCH BULLETIN OF THE FACULTY OF

EDUCATION AND WELFARE SCIENCE,

OITA UNIVERSITY

Vol. 35, No. 1, April 2013

OITA, JAPAN

固体の融点遠隔実験装置の開発

藤井 弘也^{*1}・山下 茂^{*2}・芝原 雅彦^{*3}・原 弘高^{*4}

【要 旨】 固体の融点を調べ物質の状態変化を知る実験装置をインターネット経由で制御するシステムを開発し、その実用性を調べた。その結果、温度を冷やすしくみや温度や状態を観察するために必要な解像度など、従来の装置と比較して十分であることがわかった。ここではこの装置を使つてのシステムの構成と特徴について詳説する。

【キーワード】 遠隔実験 固体の融点 ペルチェ素子

I はじめに

筆者らはこれまでに ICT (Information and Communication Technology) 教育活用の一環としてコンピュータによる実験装置の制御方法とそれを活用した自動測定 (気柱の共鳴実験装置¹⁾, 光の回折実験装置²⁾ および陰極線実験装置³⁾) について報告をした。また、この制御方法とインターネットの特徴を生かして、実験機器や試料が身近になくとも遠隔操作により装置をカメラを通して目視しながら実験が可能な手法の開発研究の一環として気柱の共鳴実験装置を新たに作製し、これについて報告をした⁴⁾。今回はこの遠隔システムを活用し、固体の融点を調べる実験装置を開発した。

一般に中学校および高等学校の教科書において、固体の融点の実験は物質の三態および状態変化を知る教材として古くから用いられてきた。特に高等学校では状態変化のために熱の出入りがあることを知ることが単元の目標として挙げられ、実験を通して状態変化の間温度が変化しないことを観察することになっている。しかし、大分県下の高等学校では授業の中で実験を行っている学校は少ないのが実状である⁵⁾。これは比較的装置が大きく加熱が必要であり準備に時間がかかる上、実験や片づけに時間をとられたくないなどの理由のためである。今回は特に加熱による実験方法ではなく、冷却による実験方法をとることにより、試料の酸化による影響などを避けることを考えた。

ICT 活用のうち、今回はネットワーク (インターネット) の利用に着目した。インターネットの利便性は「どこでも、誰でも利用できる」、「距離と時間を短縮できる」点にある。そこで、学校間の距離を短縮して対面でリアルタイム、双方向にコミュニケーションをとる利便性を活

平成 24 年 10 月 31 日受理

*1,2,3 ふじい・ひろなり, やました・しげる, しばはら・まさひこ 大分大学教育福祉科学部理数講座

*4 はら・ひろたか 大分大学大学院教育学研究科教科教育専修理科専攻

かす方法を考えた。実験機器のコンピュータ制御については従来から取り組んでいたもので、これをインターネットと組み合わせて実験装置を制御し、その結果を遠隔地から直接観測し、実験を行う方法に関する研究に取り組むことにした。すでに筆者らは参考文献4)で開発実証結果を得ていたこともあり、比較的簡単に遠隔制御と映像、音声による観測を同じプログラム上で行うことができた。ここでは遠隔制御による固体の融点実験装置について報告する。

II 原理と理論

物質には三態があり、固体、液体および気体である。固体から液体への相転移を融解といい、図1に示すように、原子や分子が整列し、決まった位置を中心に熱振動をしている状態が固体である。熱を加えていくと熱振動が大きくなりすぎ、ある温度で原子、分子同士の結合が切り

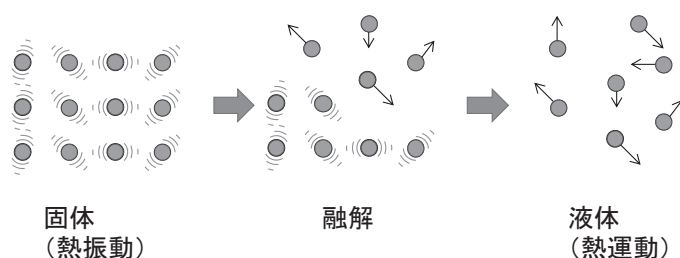


図1 融解のしくみ

離され相互に干渉し合いながら熱運動を始める。このとき、結合を切り離すために熱エネルギーを消費する。このときの温度を融点といい、結合を切り離すために必要な熱を融解熱という(図2)。融点や融解熱は物質により異なり、例えば水であれば融点 0°C 、融解熱 335J/g である。

一般に学校現場における融点測定は室温以上で加熱しながら行うのが一般的であり、パラフィンなどが使用される。一方、教科書で取り扱われる物質としては水が一番多い。

今回室温以下での実験を取り上げることにした。これは、①高温で試料が酸化されるため繰り返しの実験に向かない、②標準試料として扱われる水の融点が 0°C であるという2点からである。冷却するためにはアルコールを冷媒にして、ドライアイスを入れることにより、 -70°C まで温度を下げる方法が用いられるが、

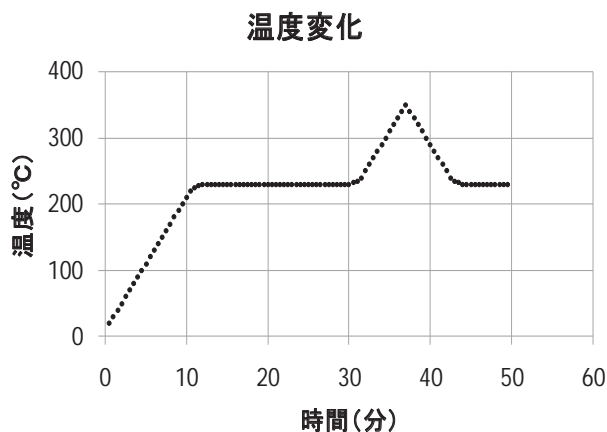


図2 融解の温度変化

遠隔実験においては、この方法を用いることが出来ない。そこで、コンパクトで電氣的に冷却できる装置として、ペルチェ素子を使用したシステムを使用することにした。ペルチェ素子は2種類の金属を接触させ電流を流したときに熱流を生じるというペルチェ効果を動作原理とした素子である。

ペルチェ効果は熱電気効果の一つで、熱電対の原理であるゼーベック効果が熱流から電流が生じることを示す理論であることに対して、電流から熱流を生み出す効果のことである。

例えば、開いた回路の上においた試料の中に温度勾配をつくったと仮定しよう。このときの

起電力 E は一般的な輸送関数から電流値を 0 、温度勾配 ∇T 、熱量 Q と置くと

$$E = Q\nabla T$$

という式を求めることができる。従って、起電力が観測される。

2つの金属 A, B からなる閉回路の連結点を異なる温度 T_1, T_2 にする。さらに、その回路の中間に電圧計を入れて、その温度を T_0 にする。この回路の回りの起電力は、電線の長さ方向に沿って E を積分したもとして求めることができる。

$$\begin{aligned} \varphi &= \int_0^1 E_B dx + \int_1^2 E_A dx + \int_2^0 E_B dx \\ &= \int_2^1 Q_B \frac{\partial T}{\partial x} dx + \int_1^2 Q_A \frac{\partial T}{\partial x} dx \\ &= \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT \end{aligned}$$

回路の中に生じた電圧は2つの連結点の温度差と、2つの金属の熱量 Q の差の関数である (図 3(a))。これがゼーベック効果であり、熱電対の動作原理である。

回路の回りで温度勾配が 0 だとすると、一般的な輸送関数に代入して、

$$U = eK_1E, J = e^2K_0E$$

$$U = \frac{1}{e}K_0^{-1}K_1J = \Pi J$$

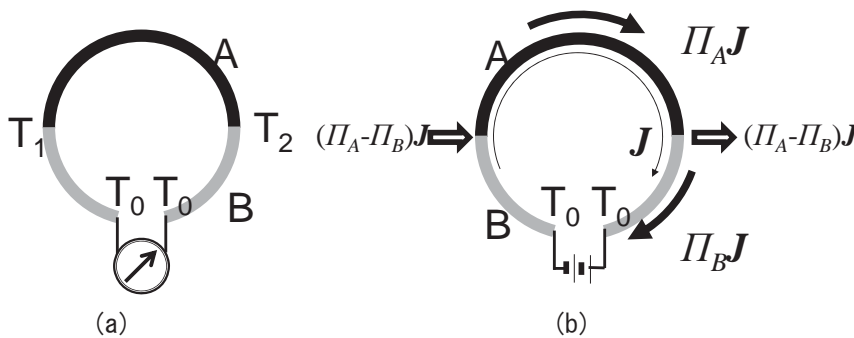


図3 ゼーベック効果(a)とペルチェ効果(b)

ここで U はエネルギー、 K_0, K_1 は輸送関数の係数である。

つぎに、電池を使って回路の回りに電流 J を流す。分岐 A においては、熱流 $\Pi_A J$ が流れ、分岐 B においては、

これとは異なる熱流 $\Pi_B J$ が流れる。連結点においては熱のつりあいが再現されなければならないから、一つの連結点では、熱量 $(\Pi_A - \Pi_B)J$ が放出され、他の連結点ではこれに等しい熱量が吸収される。したがって、一つの連結点は暖かくなり、他は冷たくなる。これがペルチェ効果である (図 3(b))。今回使用したペルチェ素子は P 型半導体と N 型半導体を交互にならべ電流を流したときに、接合部に熱流が生じる効果を利用したものである。

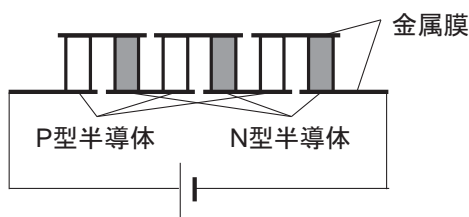


図4 ペルチェ素子

III 固体の融点遠隔実験装置

図 5 に今回製作した遠隔実験装置の概念図を示す。試料セルは銅板を加工して 4cm 角の立方

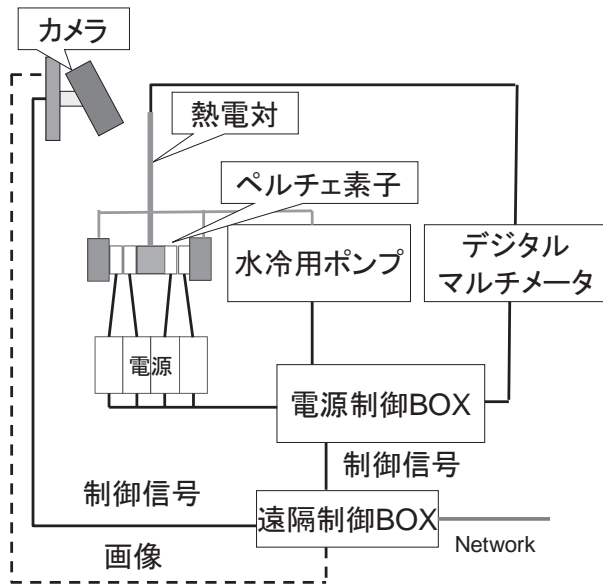


図5 遠隔装置概念図

Box に対して汎用パラレル IO から ON-OFF 信号が送られ、電源制御 Box では、スイッチングのトランジスタ回路にリレーを組み込み、リレーの ON-OFF を行う。今回ペルチェ素子用の電源、水冷ポンプ用電源、温度表示用のデジタルマルチメーターの電源の ON-OFF を制御する必要がある。リレーでは電力をまかなえないため、サイリスタを組み込み、リレーでサイリスタの ON-OFF を行うように工夫した。カメラ映像は遠隔制御 Box を通してネットワーク上に送信する。カメラは遠隔制御 Box から COM ポートを通してズーム、パン、チルトの動きを制御する。

体にした。ペルチェ素子は MAX15V6A タイプの TEC1-12706 (40mm×40mm) を使用した。最大吸熱量: 53.3W 最大温度差: 68℃という仕様となっている。ペルチェ素子の高温側を冷却し一定の温度に保つと低温側の温度を室温以下に下げることが出来る。このペルチェ素子を2枚重ねて使用し、これを2組用意して試料セルの対面に密着させる。高温側の冷却用銅ブロックを水冷し、水温に保つ。水冷用の循環ポンプは汲み上げ用の水中ポンプを使用した。

温度は T 型熱電対を使用し、温度が直読できるデジタルマルチメーターにつなぎ、温度はカメラを通して読み取る。ネットワークを通して、遠隔制御 Box に制御信号が送られると、自作した電源制御

電源のスイッチが入ると、ペルチェ素子に電流が流れて、銅の容器を冷却する。試料の温度は熱電対によって測定し、デジタルマルチメーターで表示する。この温度表示と試料の様子をカメラを通して観察する。

遠隔制御 BOX には九州エレクトロニクスシステム社製の LiveServer LsBox-S を使用した。この装置の詳細については気柱の共鳴遠隔実験装置の論文に詳述している⁴⁾。

IV 制御プログラム

プログラムのフローチャートを図6に示す。左のフローがユーザー側のプログラム処理の流れで、中央のフローが遠隔制御 Box の処理の流れ、右が実験装置の処理の流れである。ユーザー側からのアクセス要求を受けて遠隔制御 Box はビデオカメラの映像を送信す

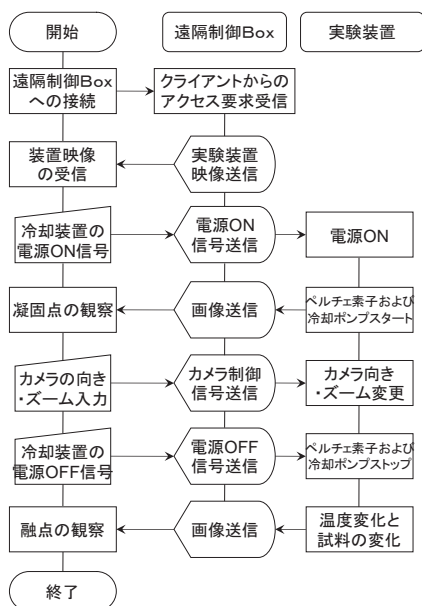


図6 処理のための流れ図

る。ユーザーは冷却器の電源および水中ポンプの電源を入れる命令を送るボタンを実行画面上でクリックする。遠隔制御 Box はパラレルインターフェースから電源制御 Box に電源スイッチを入れる信号を送信し、電源が入る。試料セルの温度が下降し始めるのをデジタルマルチメーターを一定時間間隔で読み取り記録する。この画像を遠隔制御 Box 経由でユーザーへ送信する。表示されている画面を見ながら、カメラのパン、チルトおよびズームを変化させるボタンを画面上でクリックする。遠隔制御 Box は、制御信号を COM ポートから送信し、指令通りにカメラを駆動する。送られてきた画像を見ながら、観測しやすい位置、大きさの画像に調整する。温度の下がり方を見ると同時に試料の様子を観察し、試料が凝固することを確認して、冷却装置のスイッチを切る信号を送る。遠隔制御 Box は電源 OFF の信号を電源制御 BOX に送る。冷却装置の電源が OFF になるので、温度が上昇を始める。この温度を一定時間間隔で読み取ることによって、試料の融解の様子を観察することが出来る。現在は室温から熱を受け取って温度を自然上昇させているが、測定に時間がかかるため、高等学校の時間内に実験を終了するためには、ヒーターをとりつけて、加熱する必要があるため、今後改良を進める。

V 実行画面と装置写真



図7 実行画面

図7に実行画面を示す。左側にビデオ画像が表示され、右上に接続・切断ボタンが配置してある。その右側には冷却器の電源を入れる命令を送るボタンがあり、右中段にカメラのパン、チルト、ズームを変更するボタンが配置してある。

ズームボタンには、ズーム可能範囲のうち、どの程度拡大しているかがわかるように、スライドバーと一緒に配置してある。このスライドバーをマウスで直接動かすことによってもズームを操作することができるようにしている。パン、チルトを制御するコントローラは方向ボタンを16分割しており、細かくカメラの向きを変えることが出来る用にと共に、ホームボタンを配置し、温度と試料セルをちょうど画角に納める位置に戻れるようにした。図の画面上のビデオ画像は実際に観測した時の画像であり、左のデジタルマルチメーターに温度が表示されている。右下にはストップウォッチを配置しており、温度を一定時間間隔で読み取ると共に、

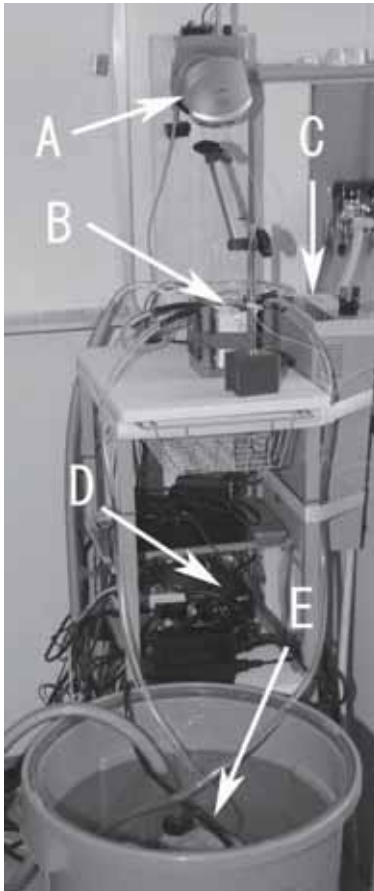


図 8 装置外観写真

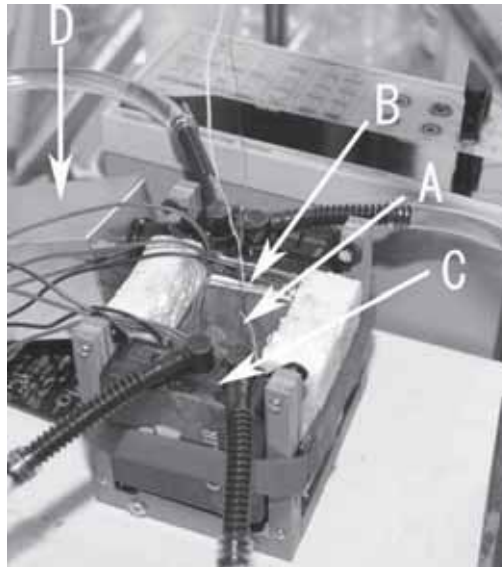


図 9 試料部分拡大図

試料セル内の様子を画像で確認し、凝固、融解を確認する。実際の実験装置の写真を図 8 に示す。(A)がカメラで、(B)が試料部、(C)がデジタルマルチメーター、(D)が遠隔制御 BOX、(E)が水中ポンプである。全体を一つのメタルラックに収めており、板に固定したカメラをラックに固定してある。デジタルマルチメーターは表示面が試料部と一緒にカメラの視野に入る必要があるため、ラックに結束ベルトで固定した。温度を測定する熱電対は試料セル手前のスタンドに固定している。遠隔制御 BOX の手前に AC アダプターが見えるが、これはペルチェ素子の電源である。

試料部の拡大図を図 9 に示す。(A)が試料セルで、銅板を切り、サイコロ状に組み立て半田付けした。(B)がペルチェ素子であるが、最大出力で用いるとすぐに壊れてしまうため、12V 電源を使用した。また一枚では十分に温度が下がらなかったため、もう一枚に 5V をかけ、さらに熱勾配を設けることにより、室温 20°C で試料温度

-29.3°C まで下げることに成功した。(C)の冷却ブロックは CPU 水冷クーラー用のブロックを転用した。当初これも手作りしたが、熱設計がうまくいかず、十分な冷却性能を得ることが出来なかった。(D)は電源制御 BOX である。

試料部の温度特性を調べるために、水銀を使用して、温度の下降曲線を得た。図 10 に電源制御回路を

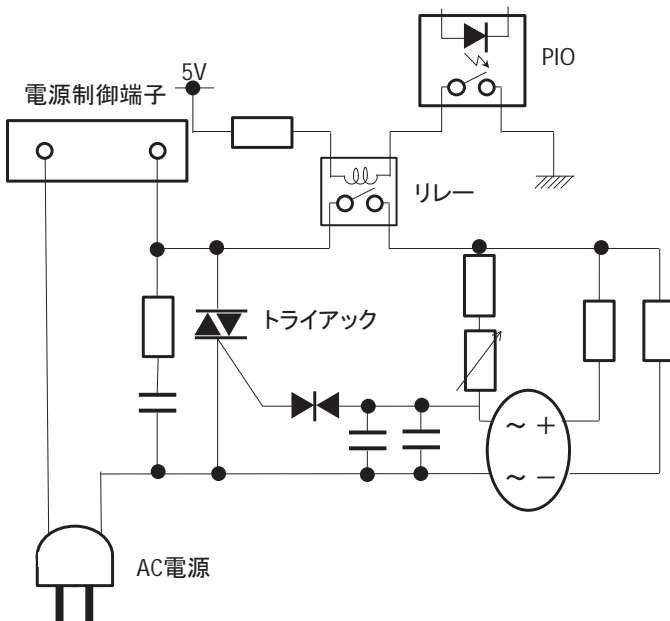


図 10 電源制御回路

示す。今回電源制御が必要なのはペルチェ素子用の電源4台、水冷ポンプ用電源、温度表示用のデジタルマルチメーターの電源である。消費電力が380Wあるため、100V4Aの電源をON-OFF制御しなければならない。

図10に電源制御回路図を示す。この図は大きく3つの部分で構成されている。1つめは右上のPIO部である。これは遠隔制御BOXの背面に用意してあるインターフェースで、スイッチング出力になっている。BOX内部の回路を保護するためにフォトカプラが使用しており、光信号で外部回路と切り離されている。PIOのスイッチ出力部の許容最大電流は200mAであり、直接つなぐと容量を超えてしまうため、2つめの部分であるリレー回路に接続する。リレーは一次側に電流が流れると二次側のスイッチがONになるしくみになっているので、PIOからスイッチON信号が届くとリレーがONになる。リレーの二次側の許容電流が2Aなので、これでも容量が不足する。そこでトライアックという交流電源制御を行う素子を使って電源を制御することにした。これが3つめの部分で、図中の可変抵抗を変化させると60%から100%まで出力を変化させることが出来る。今回は可変する必要はないので最大出力に固定し、リレーの二次側スイッチがONになれば電源制御端子から最大100V6A(600W)の出力が得られるようにした。右下のブリッジダイオードはトライアックの直流制御電流を作るための素子である。

VI 遠隔実験による測定結果

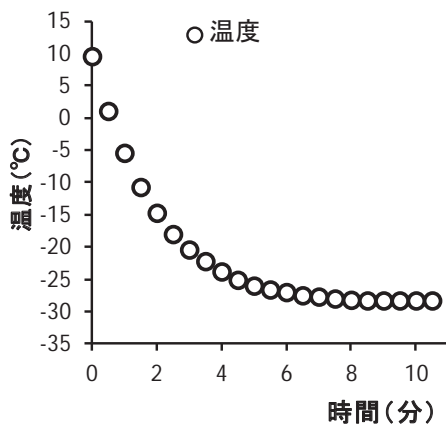


図 1 1 水銀の温度変化

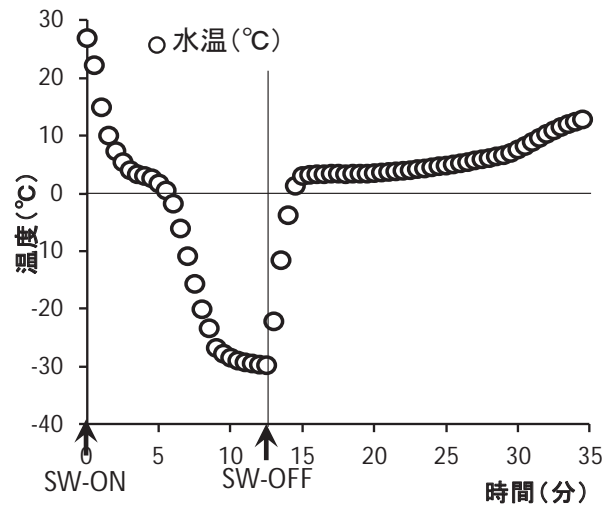


図 1 2 水の温度変化 (10mL)

実際にこの実験装置を使用して温度特性を調べるために水銀を試料として測定を行った。その結果を図11に示す。温度の下降曲線は指数関数的であるものの、 -20°C までは十分に実験に使用できると判断される。最低到達温度は -28.3°C であった。次に遠隔で画像を見ながら測定した実験結果を表1と図12に示す。

試料は水 10mL である。時間間隔 30 秒で測定を行っているが、温度下降は実質 8 分程度で終わってしまい、その後 12 分までは温度下降が止まってしまっている。温度上昇は、融点まではわずか 2 分で到達してしまい、その後 15 分程度融点温度を維持している。水が氷に相変化の様子は実効画面 (図 7) にあるように試料セル内を撮影しているカメラ画像で確認する

ことが出来る。しかし、10mL という量は観察には十分な量であったが、やはり水面の高さが低いと、少し暗かった。

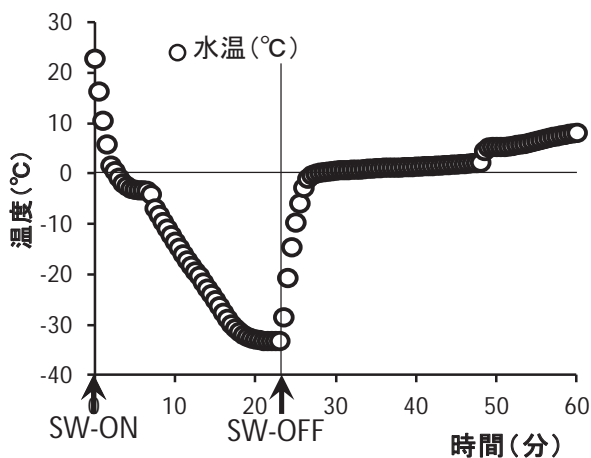


図 1 3 水の温度変化 (20mL)

次に水の量を 20mL にして実験を行った(図 1 3)。10mL のデータと比べると、温度の下降に時間がかかっているため、温度下降の曲線がより見やすくなったこと、凝固点の観察がやりやすくなっている。また、水面の高さは観察には十分な量となった。しかし、全体の温度曲線の傾向は 10mL のデータとあまり変化が無く、10°C 付近まで温度上昇すると、室温との温度差が小さすぎるから温度上昇速度が遅くなったため、全体の実験時間を 60 分で打ち切った。この時間設定では高

表 1 水の温度変化 (10mL)

| 時間(分) | 水温(°C) | 時間(分)2 | 水温(°C)2 | 時間(分)3 | 水温(°C)3 |
|-------|--------|--------|---------|--------|---------|
| 0.0 | 27.1 | 12.0 | -29.5 | 24.0 | 4.7 |
| 0.5 | 22.4 | 12.5 | -29.6 | 24.5 | 4.9 |
| 1.0 | 15.1 | 13.0 | -22.0 | 25.0 | 5.0 |
| 1.5 | 10.2 | 13.5 | -11.4 | 25.5 | 5.2 |
| 2.0 | 7.5 | 14.0 | -3.6 | 26.0 | 5.4 |
| 2.5 | 5.6 | 14.5 | 1.5 | 26.5 | 5.6 |
| 3.0 | 4.2 | 15.0 | 3.2 | 27.0 | 5.9 |
| 3.5 | 3.5 | 15.5 | 3.4 | 27.5 | 6.1 |
| 4.0 | 3.2 | 16.0 | 3.5 | 28.0 | 6.3 |
| 4.5 | 2.8 | 16.5 | 3.5 | 28.5 | 6.6 |
| 5.0 | 1.9 | 17.0 | 3.6 | 29.0 | 6.8 |
| 5.5 | 0.7 | 17.5 | 3.6 | 29.5 | 7.2 |
| 6.0 | -1.6 | 18.0 | 3.5 | 30.0 | 7.8 |
| 6.5 | -5.9 | 18.5 | 3.6 | 30.5 | 8.4 |
| 7.0 | -10.7 | 19.0 | 3.6 | 31.0 | 9.1 |
| 7.5 | -15.5 | 19.5 | 3.6 | 31.5 | 9.8 |
| 8.0 | -19.9 | 20.0 | 3.7 | 32.0 | 10.5 |
| 8.5 | -23.2 | 20.5 | 3.8 | 32.5 | 11.1 |
| 9.0 | -26.6 | 21.0 | 3.9 | 33.0 | 11.7 |
| 9.5 | -27.6 | 21.5 | 4.0 | 33.5 | 12.2 |
| 10.0 | -28.3 | 22.0 | 4.1 | 34.0 | 12.6 |
| 10.5 | -28.8 | 22.5 | 4.2 | 34.5 | 13.0 |
| 11.0 | -29.1 | 23.0 | 4.4 | | |
| 11.5 | -29.3 | 23.5 | 4.5 | | |

等学校の授業時間である 50 分内には収まらないことが分かる。また、温度下降の速度調節は水の量によって調整可能であるが、温度上昇の曲線が下降曲線にくらべ緩やかすぎるのが問題としてあげられる。

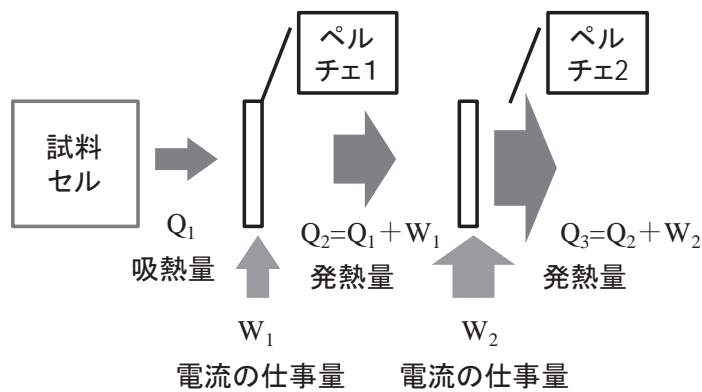
また、温度を下降していったときの凝固点の温度が 10mL では 3°C、20mL では -3°C となっており、理論上の 0°C とずれている。これは、温度センサーである熱電対の設置位置によって変わってくることと、温度変化の速度によって、試料全体で温度勾配ができてしまうこと、過冷却状態になることが理由としてあげられる。これは温度センサーの設置位置を適切な位置に

固定することによって、再現性の良い実験結果が得られる。

VII 考察

今回の実験装置では気柱の共鳴の遠隔実験装置と同様に、一つの実行画面に制御パネル部と映像部が配置できているため操作性がよい。また、実際にインターネット経由で操作、観測を行ったが、帯域の不足によるコマ落ちや遅延もなく、実験装置の制御も全く問題なかった。今回使用したカメラおよび LiveServer の KAM Codec による動画像の解像度は今回の観測を行うには十分であり、融点の観察には必要な温度の精度を得ることができた。しかし、温度下降については満足のいくデータとなったが、温度上昇については室温との温度差との関係から、

熱の流入量が低すぎることで問題点として挙げられる。遠隔制御 BOX の出力ポートは全部で 8 ポートあるので、他の出力ポートを使って加熱のためのヒーターを取り付け、温度上昇の際に加熱源として使用することが改良点として考えられる。今回 2 枚のペルチェ素子を重ねて使用したが、ペルチェ素子の原理から、片面の吸熱量よりももう一方からの発熱量が多いため、試料に近い方のペルチェ素子については電流量を小さく押さえる



冷却可能条件: ペルチェ1の発熱量 < ペルチェ2の吸熱量

図 1 4 冷却部での熱の流れ

る必要があった (図 1 4)。冷却ブロック側のペルチェ素子を吸熱量の大きいものに変えることで到達温度を下げる事が出来る。

今後はプログラム使用方法のマニュアルを作成すること、原理等教材をホームページに載せ、公開し併用できるようにする作業を進める。また、シミュレーションによる教材を使用して授業を行った場合と、この遠隔実験装置を使用して授業を行った場合とを比較して教育効果、理解度の差を検証する調査を行い、改良を加えると共にどのような教材にこのシステムが効果的かなどの研究を行う予定である。

参考文献

- 1) 藤井弘也他：大分大学教育学部教育研究紀要 13 359 (1991)
- 2) 藤井弘也他：大分大学教育学部教育研究紀要 16(2) 423-428 (1994)
- 3) 藤井弘也他：大分大学教育福祉科学部研究紀要 30(1) 15-20 (2008)
- 4) 藤井弘也他：大分大学教育福祉科学部研究紀要 30(2) 123-132 (2008)
- 5) 軸丸勇士他：大分大学教育福祉科学部研究紀要 27(2) 243-256 (2005)
- 6) 山下次郎他：固体物性論の基礎 昭和 42 年 1 月 20 日

Development of Experimental Equipment for Investigating the Melting Point of Solid States by Remote Control

FUJII, H., YAMASHITA, S., SIBAHARA, M. and HARA, H.

Abstract

We developed a system for controlling and/or observing the experimental equipment for investigating the melting point of solid states by means of the Internet. We then looked into its effectiveness and thereby verified the usefulness and practicality of the system. We obtained good results, such as the method for cooling samples and the resolution good enough to observe the temperatures and states of samples. This paper presents a detailed explanation of the construction and characteristics of the system.

【Key words】 Experiment by remote control, Melting point of solid state, Peltier device