

# コンピュータ支援物理学実験「熱電対」の開発 ―測定システムと教材―

(平成16年11月30日 原稿受付)

物理学実験室 城 井 英 樹

物理学実験室 吉 弘 満

機能システム創成工学専攻, 物理学実験室 鈴木 芳 文

機能システム創成工学専攻, 物理学実験室 近 浦 吉 則

## Computer-assisted experiment on temperature measurement with a thermocouple ― its measuring system and teaching materials ―

by Hideki KII

Mituru YOSHIHIRO

Yoshifumi SUZUKI

Yoshinori CHIKAURA

### Abstract

A student experiment using a thermocouple has been important, because thermocouples are widely used in various thermal-engineering processes involving high-temperature measurement of materials. We have developed a computer-assisted student experiment on thermocouple. Details of the total experimental system are described including teaching manual and some student's remarks.

### 1. 結 論

工学部基礎課程で行われる物理学実験の目的には、①. 実験を通じての物理法則の理解、②. 基礎的な実験方法の習得、③. 測定データの処理と報告書作成の訓練がある。我々は、時代の進展とともに目的②と教育的効果向上の観点から、新しい実験方法の開発・導入および実験装置の改善を押し進めてきた。

当初の実験テーマは、微小電流を測定する反照検流計、起電力や熱電対の検定に用いた電位差計、そのほか弾動検流計、複電橋など計測機器の動作原理とその測定法を重視した内容が主であるが、その当時としては最新のテーマであった。しかし古典的な計測器からエレクトロニクス計器へと代りつつある中で、従来までの実験テーマを見直して維持しつづけるには不適切と思われるテーマを改善の対象としてきた。これより昭和50年代始めには39題目あった実験テーマが、現在19題目にまで改善さ

れた<sup>1)</sup>。この中の一つに「熱電対」の実験がある。

この実験は、熱電対の性質とその計測法を学ぶことができるだけでなく、物質の融解・凝固の温度変化を測定し凝固過程で起こる過冷却現象を観察し、その結果をもとにして測定の根拠となる理論と方法をその場で考えさせることにより材料物性への道を開く重要なテーマである。しかし、限られた授業時間内で、ただひたすらに時刻を計り、熱電対の起電力をミリボルトメーターで読み記録しつづけるという作業で大半の時間を費やしてしまう。そのために、結果を整理してグラフを作成し物理法則を理解するところまで終わらず、実験の目的が達成できないことに問題を残した。これを解決することが今までの課題であった。

また今日では、コンピュータの急速な普及により、教育、研究現場や社会生活のさまざまな場所に情報機器が導入され、誰でもがコンピュータを容易に操作する必要性が増してきた。このような状況のもとで、物理教育へ

のコンピュータ利用の必要性を考慮して、我々はコンピュータによる数値計算と計算機実験を、独自の方法により学生に分かりやすく解説したコンピュータシミュレーション実験を開発し、物理学実験の1テーマとして実施してきた<sup>2)3)</sup>。そして、最近コンピュータと接続するインターフェイスを内蔵したデジタル・マルチメータが安価で市販されていることから、実験テーマ「空気の比熱比」に、これらを利用した新しい温度計測システムの導入をはかった<sup>4)5)</sup>。

そこで物理教育へのコンピュータ利用の一環として、今回は実験テーマ「熱電対」にあつた温度計測システムを導入したので報告する。教育、研究現場で温度計測の道具として今でも利用されている熱電対は、実験テーマとして重要であるにもかかわらず実験の進行上に問題を残していた。この問題を解決することを含め、コンピュータによる計測法の習得と、そのデータを表計算ソフトで処理させ、その場で具体的な図表を求めさせることで物理現象を理解させることを目的にコンピュータを利用した新しい計測システムを構築し「熱電対」の実験に適用した。そしてこのシステムを組み立てたことで、学生が授業時間内に所定の実験を行い、実験レポートをまとめるまでの実験の流れを終了させることが可能となった。

## 2. 熱電対の性質

ここで述べる熱電対の性質は特に新しいことではないが、学生に理解させることと、次節の説明のために取り上げる。

2種類の金属の両端を接合して閉回路を作り、接合点間に温度差を与えると、回路に電流が流れる。これは熱起電力に起因する現象(Seebeck, 1822)で、このようにして起電力を得る素子を熱電対と呼ぶ。この現象について定性的に述べる。

1種類の金属でできた1本の導線の両端に温度差を与えると、導線内部に温度勾配が生じ、高温度側から低温度側へ熱が流れる。これと同時に高温部から低温部へ電子の流れを生じる。そのため低温部の電子密度が大きくなり導線の高温側は正に低温側は負に帯電する。その結

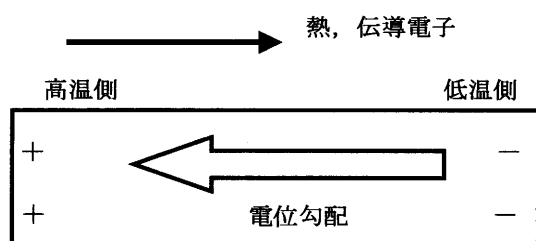


図1 熱起電力

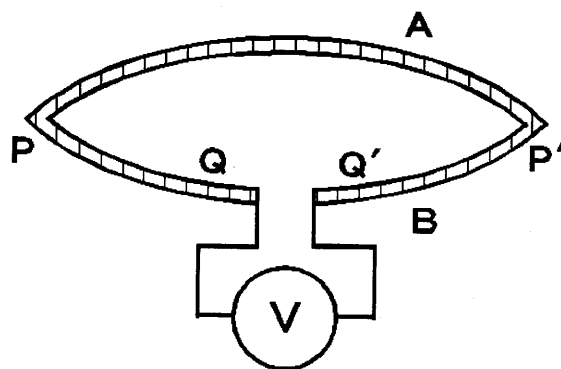


図2 熱電対

果、導線の内部に図1に示すような電位勾配ができて導線の両端には電位差すなわち熱起電力が発生する。この熱起電力と正負に帯電した電荷による電界とが釣り合うと伝導電子の移動は止まる。導線に沿った位置座標を $x$ 、導線内の電位を $\varphi(x)$ 、温度を $T(x)$ とすると、両者の勾配の比が温度のみの、ある関数 $e(T)$ に等しくなったときに平衡状態で

$$\frac{d\varphi}{dx} = e(T) \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

と表わせる。 $e(T)$ は熱電能で金属に固有な物性量である。平衡状態では、持続的な熱電流は流れない。したがって、単一の金属だけでは、熱起電力があっても実際に観察することは出来ない。しかし、2種類の金属を接合して接合点を異なる温度に保つと、両者の熱電能に差があるため、持続的な熱電流が流れ、しかも外部に取り出すことが可能となる。図2のように金属A, Bを2点P, P'で接合した回路の一部を切断した場合、QQ'に現れる電位差 $V$ は

$$V = - \int_Q^P \left( \frac{d\varphi}{dx} \right) dx - \int_P^{P'} \left( \frac{d\varphi}{dx} \right) dx - \int_{P'}^{Q'} \left( \frac{d\varphi}{dx} \right) dx \quad (2)$$

で与えられる。金属A, Bの熱電能を $e_A$ ,  $e_B$ とし、 $T_Q = T_{Q'}$ であるとすれば、式(1)より

$$V = \int_{T_P}^{T_P} (e_A - e_B) dT \quad (3)$$

となる。これから熱起電力は金属内部も含んだ現象であるにもかかわらず、接合点の温度差のみに依存することがわかる。熱電能は温度の1次式で近似できるので、式(3)を積分して得られる熱起電力は、温度の2次式となる。

一般に、熱起電力を測定するときの温度の基準点は氷の融点を使うので、高温接点の摂氏温度を $t$ とすれば、

$$V = at + \frac{1}{2} \beta t^2 \quad (4)$$

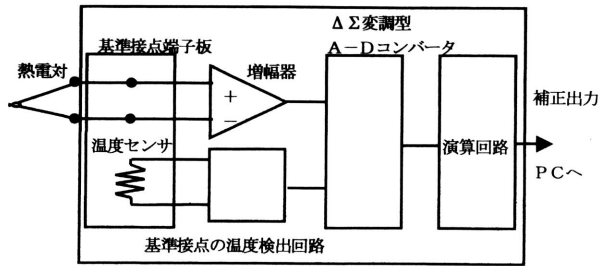


図3 デジタル・マルチメータ回路のブロック図

と書ける。ある金属の組合せに対し、 $\alpha$ と $\beta$ を検定しておけば、熱起電力を測定して温度を求めることができる。

今日、熱電対を使った温度測定には温度補償回路を含んだマルチメータを利用することが多く、この開発テーマもそうである。よって熱起電力を測定するには、 $\alpha$ と $\beta$ の検定が必要であることと、基準点に氷の融点を使うことを知らずに実験を進める学生が多い。そこで次にデジタル・マルチメータの構造を簡単に述べる。

### 3. デジタル・マルチメータの構造

温度測定に使用するデジタル・マルチメータ(DMM)の回路図を図3に示す。前節で述べたように、熱電対による温度測定では、温度の基準点として通常氷の融点( $0^{\circ}\text{C}$ )を使うので、高温接点の摂氏温度を $t$ とすれば、熱起電力は式(4)のように書ける。熱電対による温度測定においては原理的には熱起電力の基準点となる温度定点が必要である。従来、それに氷の融点などが使われ

ていた。デジタル・マルチメータは、熱起電力の基準点となる温度定点を準備する代わりに温度センサを含む電子回路を用いることによりデジタルデータ表示されている。それは熱起電力の補正および熱起電力から温度への換算が電子回路によって行われているからである。本法の温度計測システムで測定したデータは、デジタルデータとしてマルチメータ側より、コンピュータ側へRS-232Cの通信ケーブルを介して送っている。

## 4. パーソナルコンピュータ利用温度計測システムによる金属の融解・凝固

### 4.1 温度計測システム

熱電対を温度センサに用いたデジタル・マルチメータ(DMM)とパーソナルコンピュータを利用してリアルタイムに温度を計測するシステムを作成した。図4は、その装置写真でEFは電気炉、SDは電気炉にかける電圧を調整するスライダック、PCはパーソナルコンピュータ、PRはプリンター、DMMはデジタル・マルチメータである。DMMは、安価であること、通信機能を有する、測定精度が高い等の理由から岩崎通信kkのVOAC 21を用いた。デジタル・マルチメータの出力データは、RS-232Cケーブルを介してコンピュータに送っている。このシステムで使用した熱電対はシース形で、測定温度範囲は $-200^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ 、種類はTYPE:K(CA,クロメル・アルメル)、階級はクラス2(旧0.75級)である。試料は錫と鉛で、図5の磁製坩堝(タンマン管)に入れて、その中央には熱電対の保護管を挿し込んでいる。

デジタル・マルチメータと通信を行うDMMアプリケーションを開くと図6に示す初期画面が表示される。メニューバーにある「リアルタイムデータ受信」の中

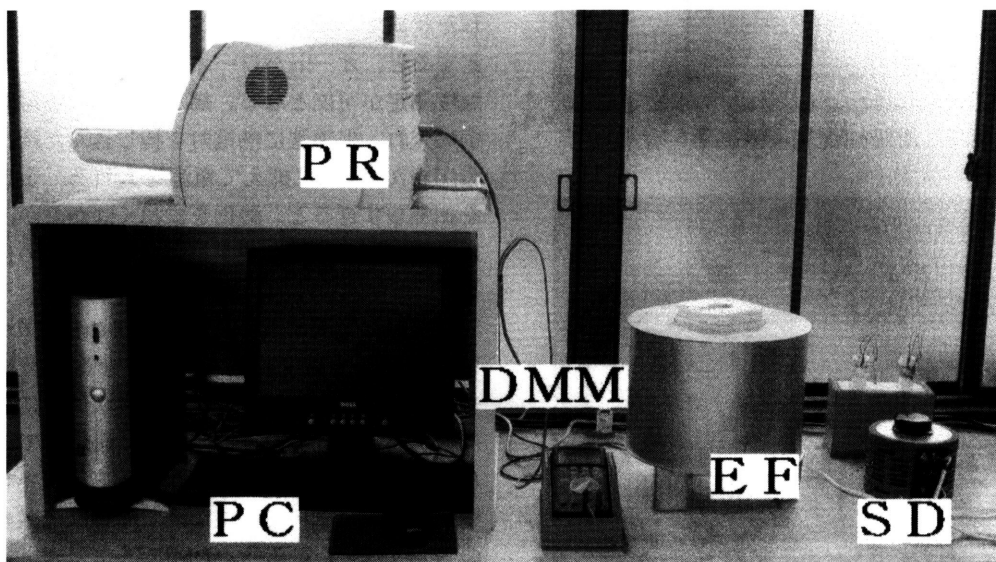


図4 自作装置の全体写真

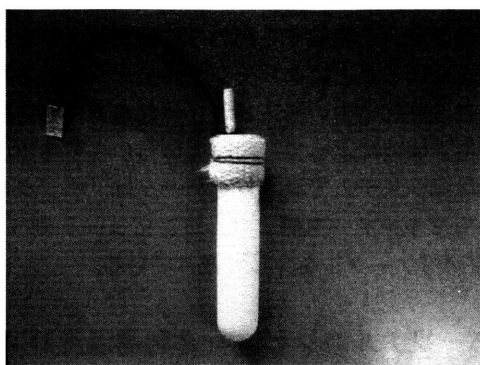


図5 磁製坩堝

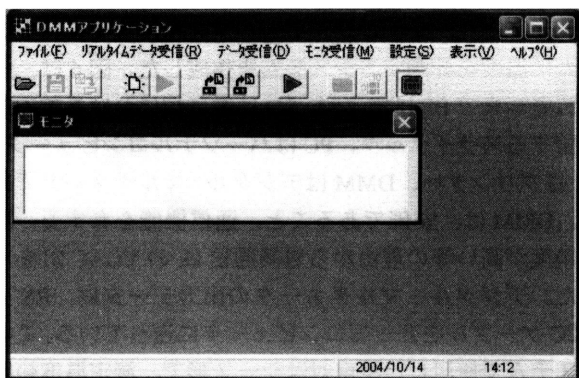


図6 DMMアプリケーションの初期画面

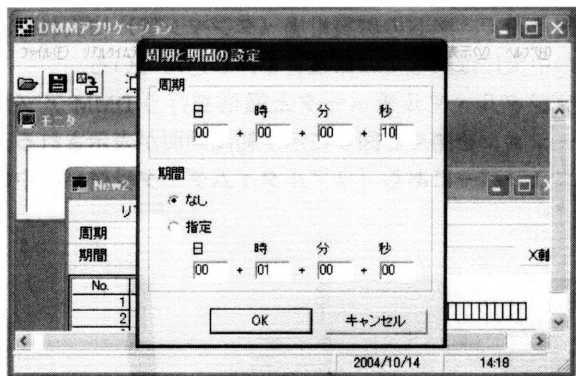


図7 周期と期間の設定画面

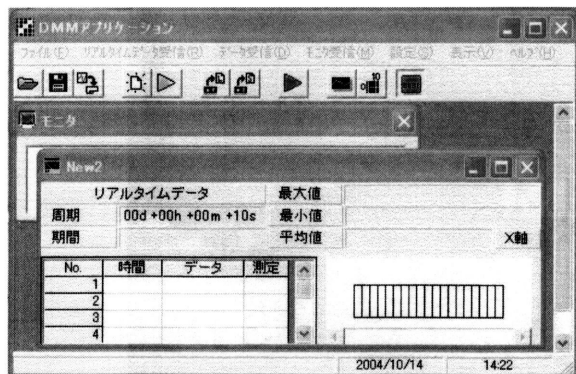


図8 リアルタイムデータ受信スタートボタンの表示画面

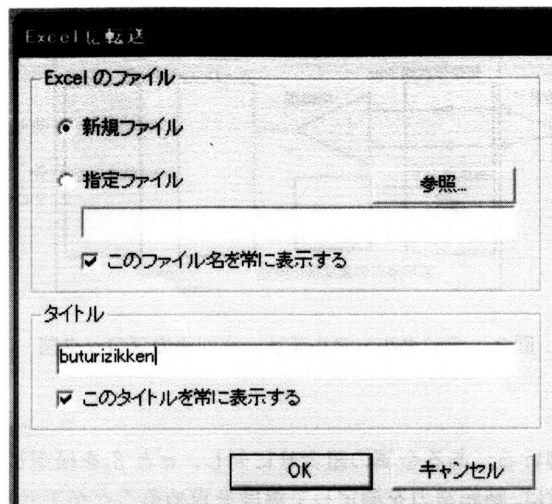


図9 エクセルへの転送ファイル入力画面

「ファイルの新規作成」をクリックして図7を表示させる。ここで周期を“10秒”、期間を“なし”に設定して次に進むと図8の表示が現れる。「リアルタイムデータ受信スタートボタン」を押すとエクセル (Excel) への転送を問いかけてくるので「はい (Y)」をクリックすると、リアルタイムデータをエクセルに転送ができ、図9が現れる。ここで新規ファイルを選び、タイトルを入力してOKボタンをクリックすると、測定を開始すると同時にエクセルのアプリケーションが起動され、表示が始まる。この一連の操作を学生に習得させて、金属の融解・凝固の実験を進める。

#### 4.2 金属の融解・凝固

デジタル・マルチメータは自動的に電源が切れるオートパワーオフ機能がついている。そこで HOLD キーを押した状態でファンクションスイッチを温度測定位置に設定すると、オートパワーオフ機能が解除されて長時間の温度測定が可能となる。錫が入っている磁製坩堝を電気炉に入れ、保護管に熱電対を挿し込んだ後、炉にかける電圧を70 (V) に抑えて電源を入れる。金属 (錫、鉛) を加熱しすぎると、酸化をまねくばかりか、冷却するのに必要以上の時間を要するから電圧を低めに設定している。

電気炉に電流を流してから、DMM アプリケーションを実行させて温度計測を開始させると図10が現れて、データの転送状況、グラフと温度が同時に表示され、進行状況が常に把握できる。完全に融解して、融点、231.9 (°C) を過ぎてから炉の電源を切って冷却させ凝固点を観察する。次に試料を鉛にかえて同様な実験を行う。以上の実験が終了すると、DMM アプリケーションのメニューバーにある「リアルタイムデータ受信」をクリックし、その中のストップボタンをクリックして受信を停

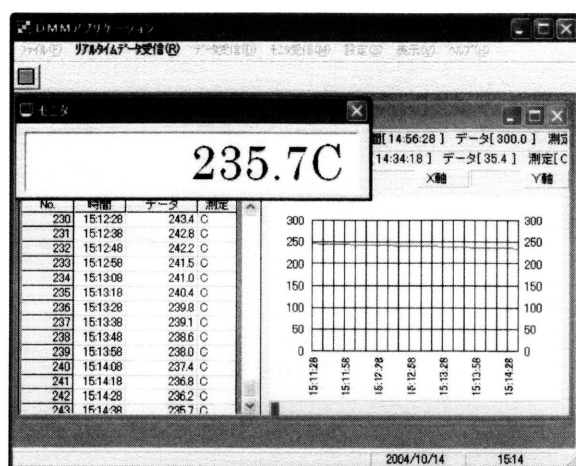


図10 温度モニタと受信データの表示画面

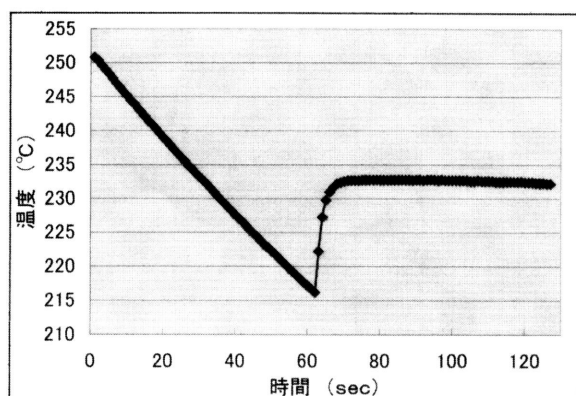


図11 錫の冷却曲線

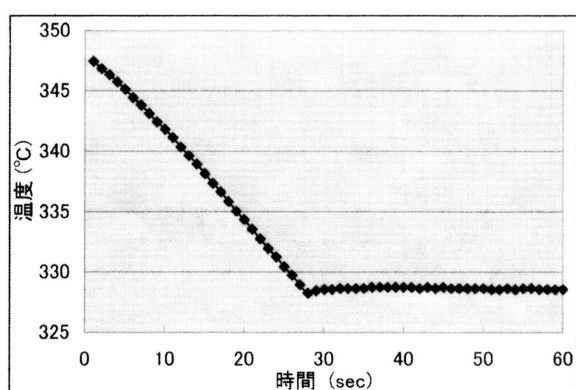


図12 鉛の冷却曲線

止させ、データを保存する。

実験は錫、鉛を融解、凝固させて、その温度変化を連続して測定しているのでエクセルに転送されたデータも連続したものになっている。そこで、データ範囲を指定して錫、鉛、それぞれの冷却曲線のグラフを作成すると図11、図12の曲線が得られる。錫の冷却曲線は、凝固点の手前では過冷却のために温度はいったん凝固点よりも

下がり、しばらくした後に再び上昇して一定温度の状態に落ち着いている。鉛は過冷却がほとんど見られない。この過冷却現象を、その場で観察させ発生メカニズムを考察させることにより、固体の凝固現象の理解をより深めることとなる。

## 5. 結 言

物理学実験の測定に、パーソナルコンピュータとデジタル・マルチメータを利用して温度を計測、保存する新しいシステムを構築した。これによりコンピュータによる計測法を学生に習得させ、測定結果を整理して表計算ソフトを使って図表を具体的にその場で求めさせることで物理実験の目的を達成させることが可能となった。このシステムを用いることにより、コンピュータ計測ばかりかデータ整理を表計算ソフトで行わせることにより、計算機リテラシーの具体的なトレーニングとなった。本実験システムの導入以前は、限られた授業時間内で、ひたすら時刻を計り、メータを読み記録しつづける作業で大半の時間を費やしてしまうために、きつい、目が疲れた等の疲労感だけが残し、物理実験本来の目的が達成できなかった。導入後の今は、学生が自らコンピュータを動かして計測システムを学習し実験に興味や関心をいただくようになり、所期の目的を達成した。

## 謝 辞

本研究は学内公募教育支援経費による物理学実験テーマ開発研究である。関係各位に厚く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 近浦吉則, 高木清志, 鈴木芳文, 出口博之: 工学基礎課程 物理学実験 6版 東京教学社
- 2) 近浦吉則: 応用物理教育研究会会報 12 56-61 (1987)
- 3) 近浦吉則: 応用物理60 393-395 (1991)
- 4) 城井英樹, 吉弘 満, 鈴木芳文, 近浦吉則: 九州工業大学研究報告 (工学) 第76号 1-7 (2004)
- 5) 城井英樹, 鈴木芳文, 近浦吉則: 平成16年度応用物理学会九州支部講演会講演予稿集 28Aa-3