

コンピュータ支援物理学実験「空気の比熱比」の開発 —測定システムと教材—

（平成15年11月27日 原稿受付）

工学基礎実験室 城 井 英 樹
工学基礎実験室 吉 弘 満
機能システム創成工学専攻, 工学基礎実験室 鈴木 芳 文
機能システム創成工学専攻, 工学基礎実験室 近 浦 吉 則

Computer-assisted experiment on specific heat of air — its measuring system and teaching materials —

by Hideki KII

Mituru YOSHIHIRO

Yoshifumi SUZUKI

Yoshinori CHIKAURA

Abstract

The Clement-Desormes experiment has been widely adopted for the thermodynamics of gas in a course of undergraduate physical experiment. We have developed a computer-assisted measuring system of the experiment and its teaching materials. Students likely acquire, through the experiment, the laws of thermodynamics, experimental skills and a computer literacy.

1. 緒 論

物理学実験室は、工学基礎科目として2年生全学科を対象に物理学実験を実施している。実験実施テーマのなかで熱を教材にした実験は、昔よりクレマン・デザルム (Clement-Desormes) の方法が用いられている¹⁾²⁾。これは、空気の定圧比熱と定積比熱の比（比熱比）を測定することによって熱力学の第1法則および気体の熱力学を理解させることを目的にした実験テーマで、この方法に基づいた装置の製作を行い実験を実施してきた³⁾。この実験テーマで学生に熱力学を理解させるには、時々刻々と変化する温度を正確に測定させ、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が必要である。しかし、当初の実験装置は、温度計測に水銀温度計を用いていたため正確に温度の時間経過をとらえることができなかった。近年、他の温度計に比べて時間的応答性の高いサーミスタをセンサにしたデジタル温度計が比較的安価で利用できるようになったことから、我々は温度計測にこれを採用し実験装置の計測方法の改善を行った。これにより確かな温度情報が得られる

こととなった。しかし限られた授業時間内に所定の実験を終え、結果を整理し図表を具体的にその場で求めさせ、本法を理解させるには時間的な制約があった。

今日、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えてきた。我々は、コンピュータによる数値計算と計算機実験の重要性を理解させることを目的にコンピュータによるシミュレーション実験を開発し、以前より物理学実験の1テーマとして実施してきた^{3)~5)}。しかし計算機の維持、管理等の問題から廃止せざるをえなくなったが、これとは別に我々は物理学実験の測定にコンピュータを利用する案をもっていた。最近、コンピュータと接続するインターフェイスを付属したデジタル温度計が市販されていることと、コンピュータの価格が急激に下がってきたことなどから、我々は「コンピュータによる計測実験—空気の比熱比および熱電対」のプロジェクトを推進した。その結果、教育支援経費からコンピュータとプリンタを5組購入できることとなり物理学実験へのコンピュータ利用が可能となった。

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、そのデータを表計算ソフトによって計算させ、その場で作図させることで熱の現象を理解させ、実験に興味や関心を喚起させることができると考えて、我々はコンピュータによる新しい計測システムの構築を進めた。そしてこのシステムを系統立てて組み立てたことで、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確かめられた。よって本法が学生実験に用いることが可能となった。

2. 比熱比測定の概要

クレマン・デゾルムの方法によれば、空気の定圧比熱 C_p と定積比熱 C_v の比、すなわち比熱比 γ は、

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (1)$$

で与えられる。この γ を求めるには、大気圧を p_0 、温度を T_0 とし、一定質量の気体（例えば空気）の状態を次の三段階の変化をさせる。

- (1) 図1 I に示すように、コック C_2 を閉じた後コック C_1 から空気を送って、しばらく放置すれば、一定質量の気体が、圧力 $p_1 = p_0 + h_1$ 、体積 v_1 、温度 T_0 の状態にある。ただし、 h_1 はこのときの終状態での容器内外の圧力差である。
- (2) 次にコック C_2 を急激に開閉すると、気体は外気に噴出し、一定質量の気体の瞬時の状態は図1 II のように、圧力 p_0 、体積 v_2 、温度 $T_1 (< T_0)$ となる。
- (3) これを図1 III のように、体積 v_2 を一定のまましばらく放置すると温度が T_1 から T_0 にもどる。このときの気体の圧力は $p_2 = p_0 + h_2$ ($h_2 < h_1$) となる。ただし、 h_2 はこのときの終状態での容器内外の圧力差である。

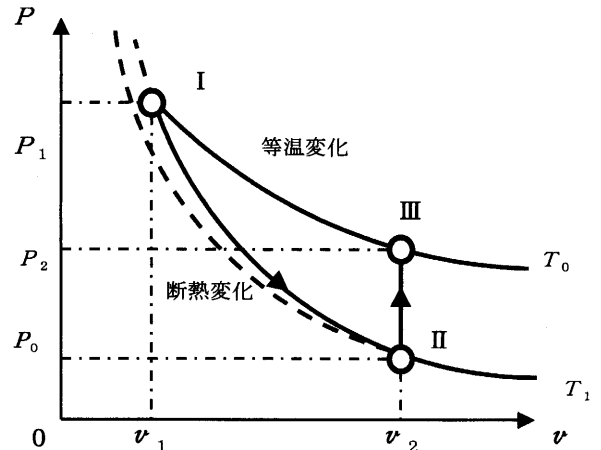


図2 断熱変化と等温変化からなるサイクル曲線

この三段階の変化をグラフに示すと、図2のようなサイクル図が得られる。このサイクルの等温、断熱過程に熱力学の法則を適用することで、 γ は近似的に

$$\gamma \doteq \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (2)$$

となる。

次に、断熱膨張による温度降下 ($\Delta T = T_0 - T_1$, T_0 ; 室温) を考えると、図1 II および III における状態

$$p_0 v_2 = nRT_1 \quad (3)$$

$$p_2 v_2 = nRT_0 \quad (4)$$

から

$$\Delta T = T_0 - T_1 = \frac{h_2}{p_0 + h_2} T_0 \quad (5)$$

が得られる。

よって、状態 I での h_1 と状態 III での h_2 を知れば空気の比熱比 γ の略値が求まる。この h_1 と h_2 を得るには両開管の U 字型水銀圧力計を用い、温度は今回導入した新しい計測システムを用いる。

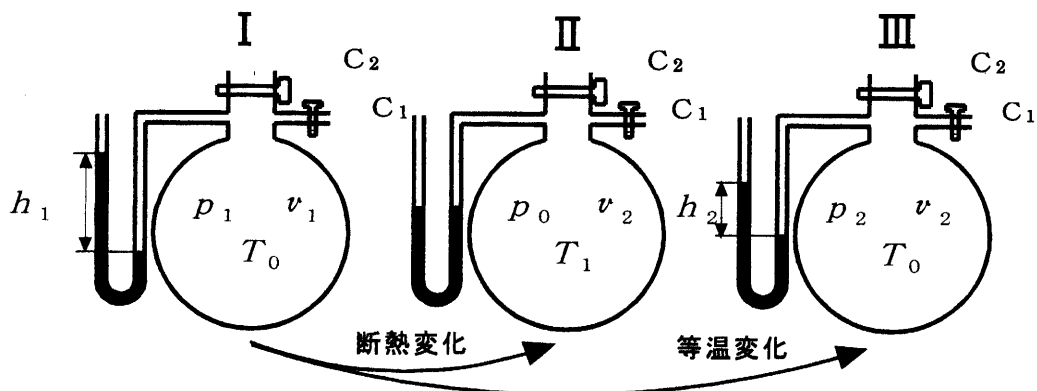


図1 断熱変化と等温変化の過程

3. 装置の製作

クレマン・デゾルムの方法に基づいて製作した実験装置の概略図を図3に示す。Jは気体容器、C₁は乾燥剤を入れた瓶を通してフイゴLから空気を容器に入れるコック、C₂は容器と大気との間の開閉を行うコックである。Mは容器内外の圧力差を測定する水銀圧力計、Thはサーミスタ温度センサ、TRはサーモレコーダ、PCはパーソナルコンピュータである。

気体容器Jは、容積が20リットルを有する広口瓶、もう一つの口を瓶中央に設けた2口瓶を用いている。今後の温度測定法の改善が容易に行えるように、温度測定専用の口を設けている。この容器を木箱におさめ、そして図2のサイクルが適切な時間内に終了するように、容器と木箱との隙間に適量の断熱材を入れて容器内への熱の流れ込みを調節している。次に断熱膨張させるには、コックC₂を素早く開き、容器中の気体を瞬時に膨張させることが必要である。よってコックは直径が大きく、しかも気密で自由に回転することが望ましい。これらの条件を考慮して、吐き出し口径の大きな金属製コックを特別に製作した。これを図4に示す。

容器内の温度を測定するには、図3に示す瓶中央の口を用いる。温度計は、測定精度が $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ を有する中村理科K.Kのデジタル温度計D-617を今まで使用していた。これはマイコンを内蔵した小型で高性能・多機能なハンディ型のデジタル温度計であるが、外部出力端子を所有していない。今日、コンピュータと通信する機能を有するデジタル温度計が多数市販されているので、この中より一桁精度の高いティアンドデイK.KのサーモレコーダTR-72Sを使用することにした。このサーモレコーダは、温度を測定、表示、記録できるデータロガーである。これに付属しているソフトウェアは、表示画面機能、通信機能、そして他の表計算ソフトでデータの利用が可能なファイル保存機能等を持つので、このソフト

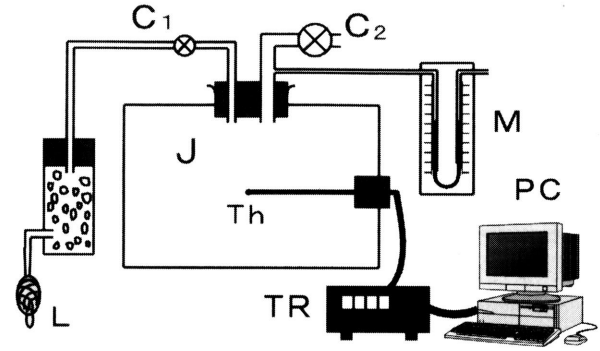


図3 クレマン・デゾルムの装置の概略図

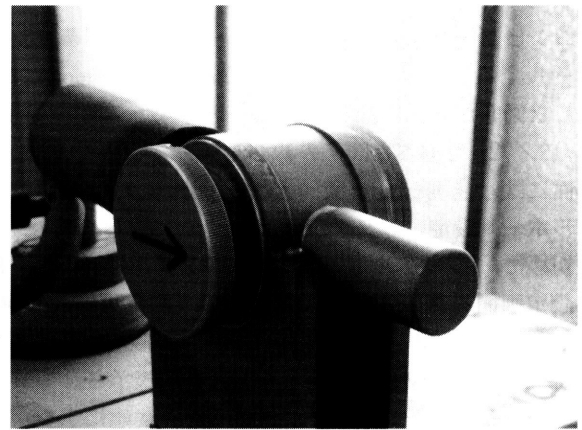


図4 自作した金属製コック

を利用してサーモレコーダで記録したのデータをコンピュータに取り込む。サーミスタ温度センサには、熱時定数が空気中15秒、水中2秒、測定精度が平均 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ を有するティアンドデイK.Kのテフロン被覆センサTR-1106を用いる。コンピュータはデルのDimension 2300C 1.70GHz、プリンタはキャノンのレーザーショットLBP-1210である。サーモレコーダとの接続は、付属

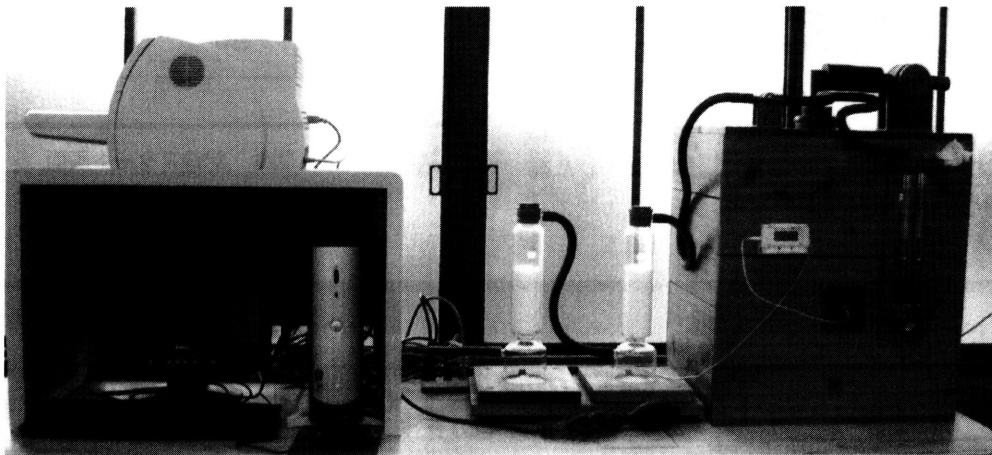


図5 自作装置の全体写真

の通信ケーブル（RS232C : D-Sub 9ピン）を使って、コンピュータ本体の背後にあるシリアルポートへ接続する。この装置の全体写真を図5に示す。

実験装置にコンピュータとサーモレコーダを組み込むことで、容器内で刻々と変化する温度を自動的に記録、保存するシステムが完成した。次に、このシステムが正しく動作する条件を求め、導入前に得られた実験結果と同等、またはそれ以上の結果が得られる測定環境を作る。

4. 実験方法

4.1 システムの初期設定

コンピュータを起動させて、サーモレコーダをコントロールするプログラム「T&D Recorder for Windows」を開くと図6が表示されるので、サーモレコーダの型番 TR-71S/72S を選ぶと図7の初期画面が表示される。この画面には、[記録データ吸い上げ] [記録スタート] [シリアルポート設定] のタグがある。

初めに、[シリアルポート設定] のタグを押して、図8の設定画面を表示させる。画面上の「測定可能なCOMポート」をCOM1にして、自動検出のボタンを押すと「TR-71SをCOM1に検出しました」と表示させてコンピュータとサーモレコーダが通信できる状態にする。

次にサーモレコーダに記録する条件の設定を行う。それは[記録スタート]のタグを押すと図9が表示される。この画面表示にそって機種はTR-71S/72S、記録開始日時は即時スタート、記録間隔は1(sec)、記録モードはエンドレス、本体温度単位は摂氏(°C)と選択すると記録できる状態になったことになる。記録を開始するには、[記録開始]のボタンを押すと記録条件を自動的にレコーダに送信し、温度データの蓄積が始まる。停止するには、[記録停止]ボタンを押すとデータの蓄積作業が終了する。

これでサーモレコーダをコントロールするプログラムの初期設定が決定したので、比熱比の測定を開始する。レコーダの容量を考えて、図2ⅢからⅠの状態変化(等温的)における温度経過は緩やかであるので、測定は従来どおり測定者の目で読み取る。ⅠからⅡの状態変化(断熱的)とこれに続くⅢまでの過程は、今回導入した測定システムを利用して温度を記録する。

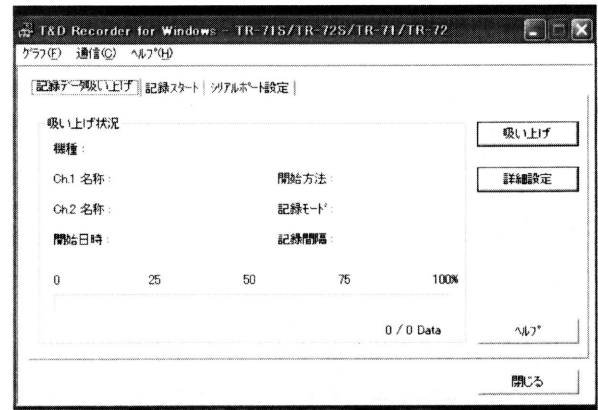


図7 プログラムの初期画面

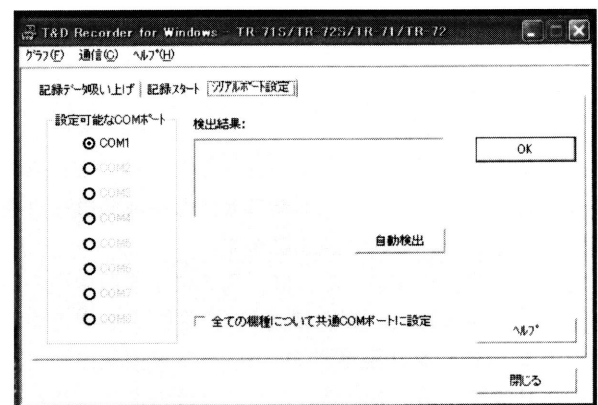


図8 シリアルポート設定画面

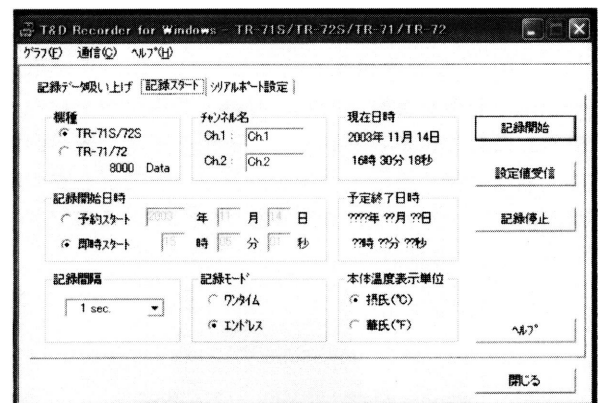


図9 記録スタート画面

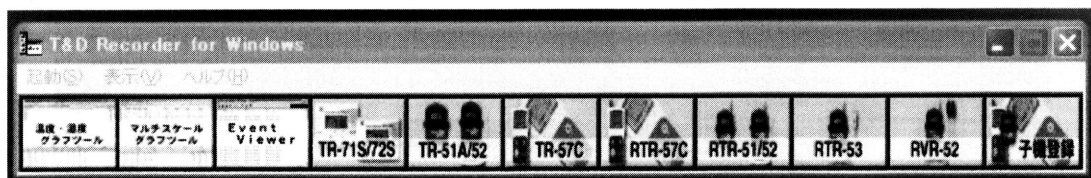


図6 コントロールプログラムの一覧

4.2 圧力と温度の計測

(1) 状態Ⅰへの等温的過程

図3に示すコック C_2 を開いてコック C_1 より乾燥空気を送る。容器 J の温度がほぼ一定 (室温 ; T_0) になると C_2 を閉じて C_1 より乾燥空気を送り、図2に示したように気体の体積を v_1 から v_2 に変化させる。このとき圧力計 M の水銀柱は数cmの高さになる。この過程では気体を圧縮したため、容器内の温度が上昇する。よって時間が8~10分程度の自然冷却で容器内の温度、圧力が一定になるように、容器と木箱の間に適切な断熱材を入れている。温度経過は各自サーモレコーダの表示から読み取り記録する。図2Ⅰの終状態になると、容器内外の圧力差 h_1 を水銀圧力計 M で読み取る。

(2) 状態Ⅱへの断熱的過程と状態Ⅲへの移行

今は図2Ⅰの終状態にある。断熱変化を行う前に [記録開始] のボタンを押して、サーモレコーダで温度計測をするプログラムをスタートさせる。その後、コック C_2 を短時間開いて容器内の圧力を大気圧と同じにし、素早くコックを閉じる。そのとき、気体は断熱膨張によって温度が T_1 まで下がる。これより時間の経過にともなって容器外部から熱が流入しⅢの状態、室温 T_0 に近づき終状態となる。この温度変化は、サーモレコーダに表示されているで、室温 T_0 に近づいたことを確認した後、[記録停止] ボタンを押してデータの蓄積作業を終了させる。このときの容器内外の圧力差 h_2 を水銀圧力計 M で読み取る。

次に、サーモレコーダに蓄積されたデータをコンピュータに移す作業を行う。それには、図7の[記録デー

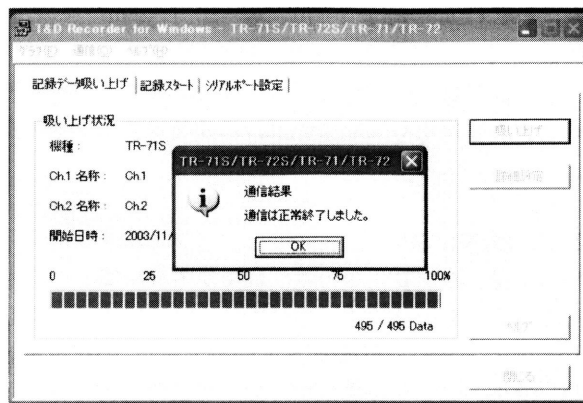


図10 記録データ吸い上げ画面

タ吸い上げ] タグを押して、記録データ吸い上げ画面を表示させる。画面中の [吸い上げ] ボタンを押すと図10の表示があらわれる。これでサーモレコーダからコンピュータへデータの転送が終了し、図11のようなデータのグラフが表示される。

このソフトはデータの加工ができないので、いったんテキスト形式でデータを保存し、グラフの表現法が充実しているマイクロソフト社の表計算ソフト、エクセル (Exsel) でデータ処理を行わせる。

5. データ処理と検討

5.1 比熱比の算出

状態変化後の終状態における容器内外の圧力差 h_1 , h_2

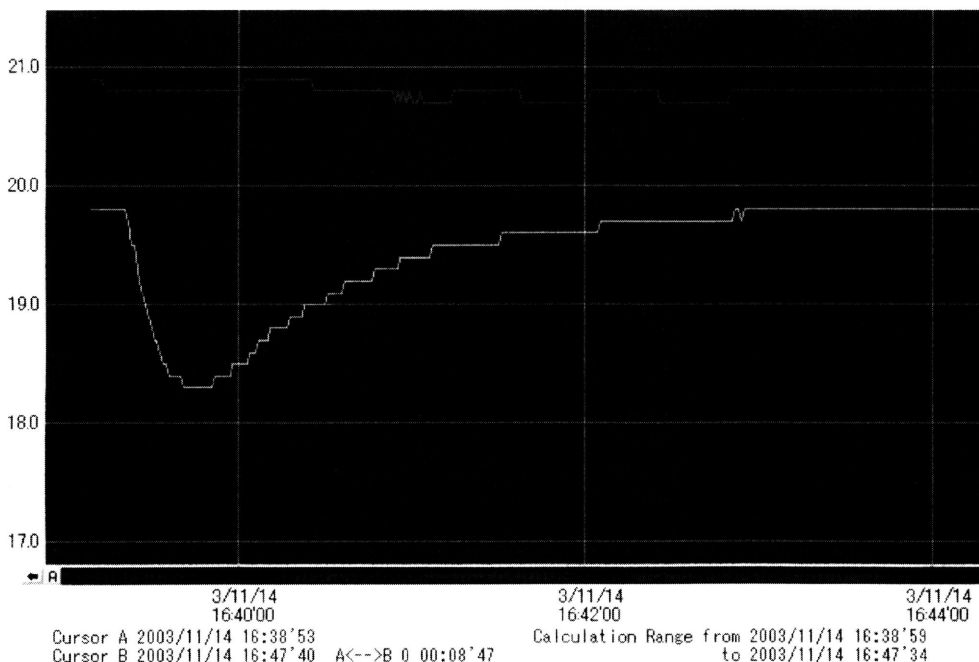


図11 サーモレコーダのグラフ表示

は、それぞれ $h_1=46.2$ (mm)、 $h_2=10.4$ (mm) を得た。この値を式 (1) に代入して空気の比熱比 γ は、 $\gamma=1.30$ となった。容器内外の圧力差 h_1 、 h_2 の測定は、当初より水銀圧力計を使用しているの、ここでは詳しく述べない。

5.2 温度変化の算出

前節では、断熱膨張後の温度経過 T をサーモレコーダで計測し、そのデータをテキストファイル形式で保存した。このデータから温度降下 $\Delta T (=T_0 - T)$ の算出を表計算ソフト、エクセルを用いて以下のように行った。

エクセルを起動させ、このファイルを開くと、データがテキスト形式で保存されているので、まずテキストファイルウィザード-1/3 が表示される。画面上でデータのファイル形式を「カンマやタブなどの区切り文字によってフィールドごとに区切られたデータ (D)」を選択し、取り込み開始行 (R) を「1」にして次へ進むと、次にテキストファイルウィザード-2/3 が表示される。同様に区切り文字を「カンマ (C)」を選んで次へ進むと、最後にテキストファイルウィザード-3/3 が表示される。列のデータ形式を「G/標準 (G)」を選んで完了させると、図12のようにデータの並びが表示される。前節で述べたサーモレコーダを制御するソフトウェアは、温度測定範囲が異なるデータでも8チャンネルまで、一つのグラフや表に集計可能な機能をもつので、エクセル上でこのデータを表示すればCからJ列の8列までデータ枠として割り振られる。この列の中で必要な温度データはD列に格納されているので、このデータの中から断熱膨張前の温度、室温 T_0 を選び、これに0.1 (°C) 加えた値をあらためて T_0 とおく。この室温 T_0 と断熱膨張後の温度 T との差 ΔT を例えばL列に計算させる。

断熱膨張後、容器外部から徐々に熱が流入し、サーミスタの示度は室温 T_0 の一定値に近づく。熱の流れは、熱

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Measurement Data Text Output >							
2								
3	Date/Time	@date0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6
4			°C	°C				
5	2003/11/14	37939.69	20.9	19.8				
6	2003/11/14	37939.69	20.9	19.8				
7	2003/11/14	37939.69	20.9	19.8				
8	2003/11/14	37939.69	20.9	19.8				
9	2003/11/14	37939.69	20.9	19.8				
10	2003/11/14	37939.69	20.8	19.8				
11	2003/11/14	37939.69	20.8	19.8				
12	2003/11/14	37939.69	20.8	19.8				
13	2003/11/14	37939.69	20.8	19.8				
14	2003/11/14	37939.69	20.8	19.8				
15	2003/11/14	37939.69	20.8	19.8				
16	2003/11/14	37939.69	20.8	19.8				
17	2003/11/14	37939.69	20.8	19.8				
18	2003/11/14	37939.69	20.8	19.7				
19	2003/11/14	37939.69	20.8	19.5				
20	2003/11/14	37939.69	20.8	19.5				
21	2003/11/14	37939.69	20.8	19.3				

図12 表計算ソフトに転送したデータの並び

伝導によるので、このときの温度変化は時間に対して指数関数的に変化するものと考えられる。そこでグラフウィザードを起動し、ユーザー設定のタブを押してグラフの種類を対数に選び、この計算値を縦軸が対数目盛のグラフに描かせる。そのグラフを図13に示す。サーミスタ温度計は他の温度計に比べると時間的応答性が高い特徴をもつが、それでも数秒程度の遅れがあるので温度降下の最高値は正しい値より小さくでると考えられる。しかし、図13の30 (sec) 以降の温度変化はゆるやかなので、サーミスタの応答の遅れはなく、指数関数的に減少している。よって断熱膨張直後の温度降下の最高値 ΔT は、この直線部分を時間軸まで外挿してその接辺の値から、 $\Delta T=3.2$ (°C) が得られた。

次に物理実験室の大気圧は、そこに備え付けてある気圧計の読みから $P_0=782$ (mmHg) を得た。断熱膨張前の室温は $T_0=19.8$ (°C)、容器内外の圧力差 h_2 は $h_2=10.6$ (mmHg) であるので、式 (5) を用いると温度降下の最高値は $\Delta T=3.84$ (°C) となった。この理論式 (5) に基づいて得た ΔT の値と、測定データを図示 (図13) して得られた ΔT の値とを学生に比較、検討させることで、測定法だけでなく熱力学の理解もより深めさせることが

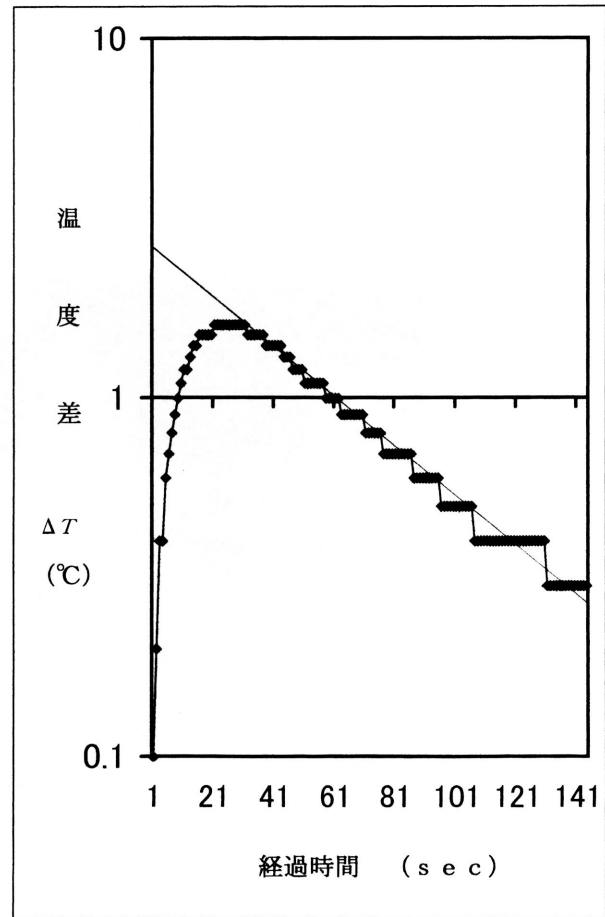


図13 断熱膨張後の温度差 ΔT の時間変化

できる。

6. 結 言

物理学実験の測定にパーソナルコンピュータを利用した新しい計測システムを構築した。このシステムを系統立てて組み立て、実験で得た温度データを表計算ソフトで処理させることにより、測定を終了させグラフを描かせるまでに要する時間は20分程度となった。よって今までと同じく、1回の実験で5回以上繰り返し測定ができる。このシステムを用いることにより、コンピュータ計測は勿論のこと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トレーニングの役目を果たすことが可能となった。

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) 奥田 毅：基礎過程 物理学実験 共立出版
- 2) 吉田卯三郎，武居文助：五訂 物理学実験 三省堂
- 3) 近浦吉則，高木清志，鈴木芳文，出口博之：工学基礎過程 物理学実験 初版 東京教学社
- 4) 近浦吉則：応用物理教育研究会会報 12 56-61 (1987)
- 5) 近浦吉則：応用物理 60 393-395 (1991)