

# 「金属結晶の格子比熱容量測定」

理学部物理学教室 加納 誠  
大学院理数教育専攻 水野統太

## 1) 主旨

今日、急速な勢いで情報化社会への移行が進められていることは衆知の事実である。学生実験においても、装置の基本的な思想を崩さずに、かつ、物理の本質を見失うことなく、情報処理教育を導入する試みが実施された。今回は三年次の「金属結晶の格子比熱容量測定」の実験に対して、従来のものからより近代的なものへと移行するために、「LabVIEW プログラム」と、「GP-IB システム」を使用してその内容を充実させた。測定解析のメインツールとしてパーソナルコンピュータを用いて、情報処理教育の一環として実験室全体のインフラも含めて大幅な改善を実施した。



金属結晶の格子比熱測定装置

## 2) 今回の目的

従来の「金属結晶の格子比熱容量測定」の課題の具体的には、学生実験室の実験装置にコンピュータを導入して、学生実験データを情報処理手段の対象とする。旧態然とした測定方法を

現代化し、測定作業に費やされていた学生のエネルギーを物理現象をリアルタイムに考える作業に移行させる。

更に、従来の電卓・グラフ用紙を用いた手作業では必要十分に読み取ることの出来なかった実験データを、コンピュータを用いて自在に読み、解析、判断して、その場で Interactive に実験にフィードバックをかける要素を現行の実験課題に導入することを目的とした。

## 3) 定積比熱容量の導出

一般に理論的取り扱いには定積比熱、実際の測定では定圧比熱が用いられていることは自明の理である。

比熱容量を求めるためには、既知の熱量を与えなくてはならない。

一般に熱量が与えられると物質は、相転移点を除いて格子振動の非調和項が寄与する体膨張による仕事加わる。よって実験では、定圧比熱を求めて、以下の関係式に代入することによって定積比熱容量を求める。

$$C_p - C_v = - \frac{T \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \right]}{\left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T} \quad (1)$$

## 4) 更新された測定方法

実験にはクライオスタットを用いた恒温壁法による比熱測定法を採用して、液体窒素温度から水の沸点に至る比熱容量の温度変化を測定する。従来の測定はデジタル電圧計を用いて、学生が値を記録換算して作図した。改善は、実験の基本的な思想を崩すことなく情報処理教育を導入して、学生実験の時間において行うことができる様になっている。

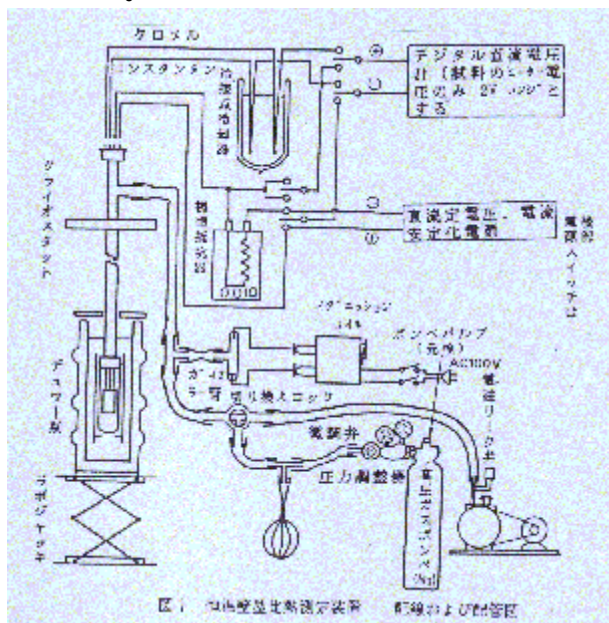
先ず、従来使用していたデジタル電圧計を Keithley 社の Model 2000 Multimeter に変更した。そして、デジタルスキャナカードを通し

て [GP-IB システム] を接続してフロッピーディスクに値を自動的にとりこみ、試料温度、ヒーター電流、ヒーター電圧を同時に測定できるようにした。測定値を読み取り解析するためにプログラムしたソフトは、[LabVIEW]を用いた。試料部に装着されたクロメル・コンスタンタン熱電対(CR-C)の起電力をメモリーされた JIS 標準基準熱電力表を用い、換算して試料温度を求め、時間と試料温度のグラフをリアルタイムに書けるようにした。

この方法によって、全データの取り込み解析・作図をパソコンを用いて全てリアルタイムに行うことが出来るようになった。また測定時間も自由に設定できるようになり、より正確な、多点測定が実験時間内に行えるようになった。

### 「装置」

装置は、図1の如くクライオスタット部、測温部、及び試料ヒーターへの電力供給部に分かれている。



### ・試料

試料は、図2の如く、3つの部分に分かれたアルミニウムブロックをアルミニウムのねじで締めつけ円柱状試料とした。

試料の重さは、ビスも含めて 14.27g である。コンスタンタン線試料ヒーターの重さは 0.06g で、試料に対する質量比は 0.4% である。よって比熱容量の算出の際には、このヒーター部の

寄与を無視した。

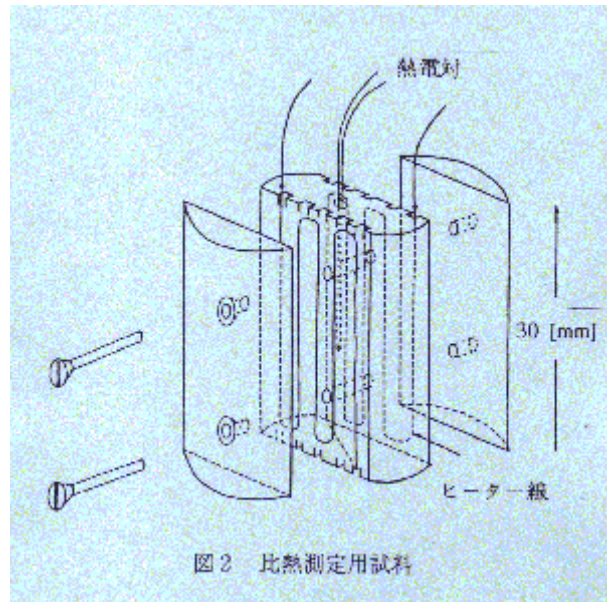


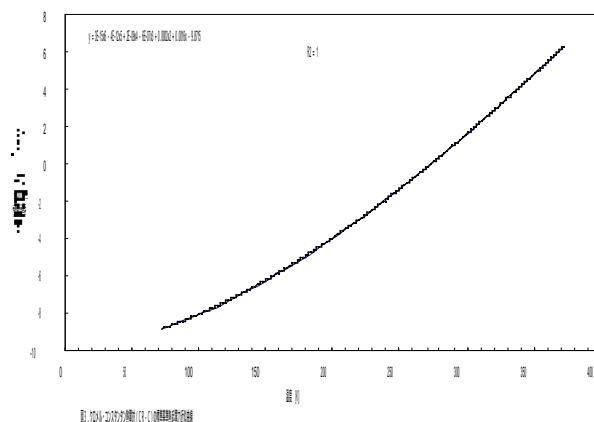
図2 比熱測定用試料

### ・温度測定

検出にはガラスウール被覆のクロメルコンスタンタン熱電対を用いた。線径は 0.1mm である。信号の読み取りには熱量測定の場合も含めて全てデジタル電圧計を用いた。

### 5) 測定結果及び考察

クロメル・コンスタンタン熱電対に対する JIS 標準規準熱起電力表(図3)を用いて、6次の近似式をつくり測定電圧から温度に変換した。



これらの作業は全て LabVIEW によるプログラミングで行われた。図4はデュワー瓶に液体窒素

を入れて測定した結果である。今回の実験は、5秒ごとに測定し、試料ヒーターの通電時間は、150秒及び600秒とした。

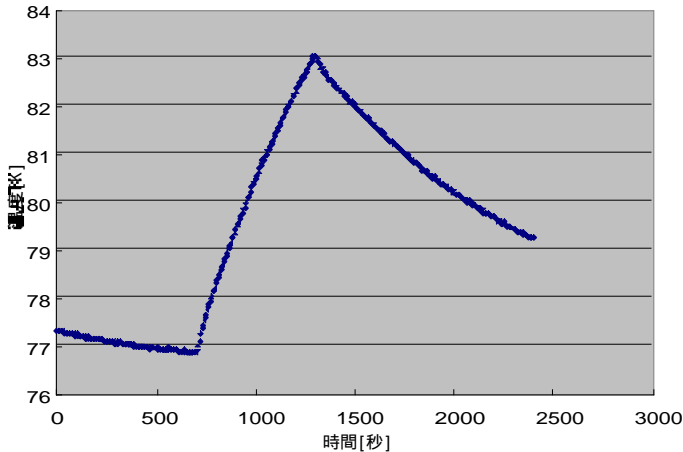


図4. 恒温壁型カロリメータを用いた比熱容量測定時の試料温度の

「補正」

恒温壁法における熱交換の補正は、加熱前後における試料温度の時間変化を追跡して、グラフまたは、計算から求める。この時間変化はニュートンの冷却法則に従うと考えられるので

$$T - T_f = Ae^{-\alpha t} \quad (2)$$

の曲線になる筈である。

ここで、 $T_f$ は  $t$  にしたときの終局温度とする。その決定には、 $t_3 = t_1 + \frac{t_2}{2}$  の関係を持った時間  $t_1, t_2, t_3$  の各々の温度  $T_1, T_2, T_3$  において

$$T_f = \frac{(T_1 T_2 - T_3)^2}{(T_1 + T_2 - 2T_3)}$$

の関係を用いる。

また(2)において  $t=0$  とすれば

$A = T_i - T_f$  ( $T_f$ は、供給電力を切ったときの温度)

$$\alpha = \frac{-\ln \frac{T - T_f}{T_i - T_f}}{t}$$

よって、加熱前後の温度変化が、見かけ上、一定速度で起こるものとすれば、これらを加熱期間の midpoint に補外して、試料の初期温度  $T_0$  及び上昇温度  $T$  を求める。

すると試料の定圧比熱は

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{V \cdot I \cdot T}{m(T - T_0)}$$

で求められる。(証明は(2)より容易に導かれる)

ここで、 $V, I, t$  は、試料ヒーターに供給する電圧、電流、時間を表し、 $m$  は質量を表す。

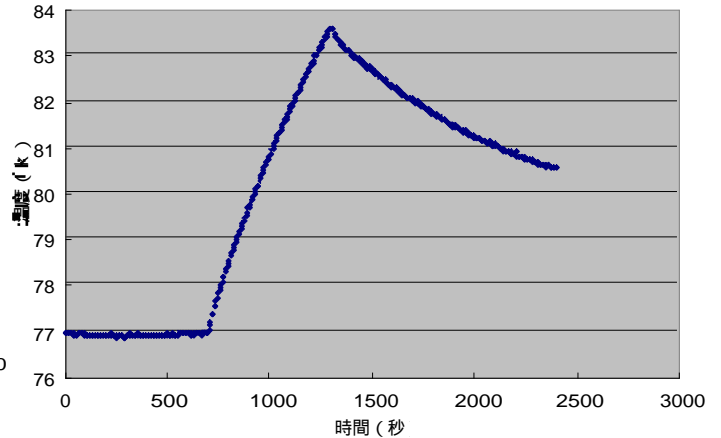


図5. 補正後の試料温度の時間変化

補正後の測定値をその漸近線  $T_f$  から引いた値が(2)である(図5)。これを片対数に取れば直線になるはずである。その結果を図6に示し

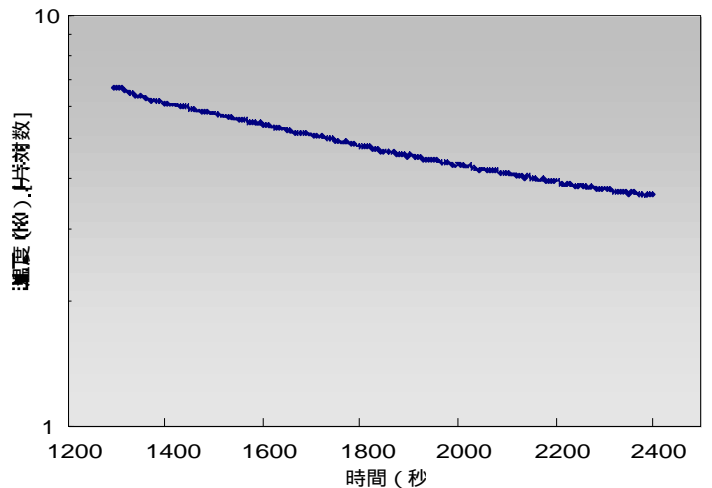


図6. 補正後の冷却曲線のアレニウスプロ

た。

通電前の温度基線

ニュートンの冷却法則によると、試料温度は時間に対して一定のはずである。しかし、一般的には結果は時間に対して増加または低下する(図4)。この補正は、通電前の温度変化が全測定領域で同様に推移すると見做すことによっ

て、解析的に可能となる。つまり、この変化分を差し引くことによって通電前の試料温度を一定とみなし、通電後は外界からの熱の流入出分を差し引くことになるので、ニュートンの冷却法則を用いて解析することが出来る。

試料室内の残留ガスによる対流や支持パイプと各種リード線による熱伝導と輻射によって試料温度が時間変化するのは、通常に見られる事であり、こうした補正法を教えることは教育上重要である。

### 通電後の試料温度変化

通電直後約1分の試料温度変化はニュートンの冷却法則からずれて、急激な温度変化を見せている。これは、実験解析の際に教育すべき過度現象を表し、エネルギー供給の急激な停止に伴う試料温度の脈動に起因する。よって試料内温度勾配が非定常状態から定常状態に遷移した後は、当然、試料温度の時間変化はアレニウスプロットにすると直線となり冷却則に合致する。また、通電後10分ほど経過してからは直線からずれていることが分かる。

この要因は、寒剤等の冷媒の温度ムラにも起因するが、一義的には対数グラフの下方の分解能が、桁上りで向上するので、当然ズレも拡大される。そこで解析する際には、直線になった通電後1分後から10分を解析することにする。

補正後の冷却曲線(図5,6)から上昇温度Tを求め、定圧比熱容量の式に代入して、算出した比熱容量は以下の通りである。

$$C_p = 2.571 \text{ [cal/mol K]}$$

$$T = 80.76 \text{ [K]}$$

$C_p$  と  $C_v$  の関係を以下に記す。

$$C_v = \frac{C_p}{1 + \gamma T}$$

：体積膨張率

：グリユナイゼン定数

アルミの場合の値  $\gamma = 2.17$   $\gamma T = 6.9 \times 10^{-5}$  を代入すると以下の値を得る。

$$\text{定積比熱容量 } C_v = 2.554 \text{ [cal/mol K]}$$

試料は純金属アルミニウムを用いた。測定値は、A.I.P.H(American Institute of Physics

Handbook) による標準値と  $\pm 4.5\%$  の精度で一致した。比熱容量の温度変化曲線は、デバイスモデルによる理論曲線と良い一致を示した。

またこれまでの測定方法では1分おきにデータを取り込み、通電時間は5分、冷却時間は20分以上かかっていた。ちなみに LabVIEW による自動計測の結果を液体窒素の沸点における測定を行なって比較する。通電時間を150秒と600秒として、それぞれデバイの比熱容量曲線(図7)と比較してみる。どちらも理論値に良い一致を示した。つまり、従来よりも長時間掛かる測定は勿論のこと、今回の目的である短時間測定の場合も高精度で測定が可能である

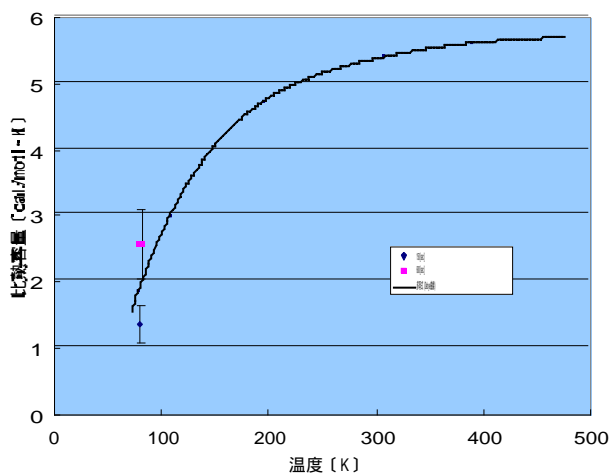


図7 比熱容量の温度変化曲線

ことを確認した。

### 6) 学生実験へのコンピュータ導入による成果

コンピュータ導入の際に、以下の四点に留意した。データの信頼性、客観性の向上 測定時間の短縮(精度の向上) 情報処理教育(パソコンでの計測、データ処理)の導入 定点(液体窒素と水の沸点、水と氷の共存温度)及びそれ以外の温度領域での多点測定を可能にする。

それらに留意して、コンピュータプログラムによって制御し、計時、測定を行った結果、従来、学生が測定、記録していた方法に比べて、測定の実数が少なく、短時間で確実な測定が行われるようになった。また、学生自身がコンピュータを操作して計測し、データをフロッピーディスクに取り込み持ち帰れるので、コンピュ

ータを用いて好きな時間に解析が出来る様になった。このことは副次的にもコンピュータの使用を促すものと思われる。

加えて本システムでは、リアルタイムでの測定値、グラフの変化を追えるため、現象の実体験・理解に飛躍的な進歩が期待される。また、測定時間の短縮により、これまで難しかった「液体窒素とアルコールの共存温度」でも高精度の測定が可能となった。

よって、デバイの比熱容量曲線と実験結果との比較が温度定点以外の領域でも正確に行なえる様になり、比熱容量の統計的取り扱いの理解と定量的比較に大きな効果を生んだ。

## 7) まとめ

この実験の主目的は「恒温壁型カロリメータを用いて、金属結晶の比熱容量の温度依存性を測定し、格子振動の統計力学的取り扱いに理解を深める」ことにある。つまり物理学科学生実験への導入に際して本実験は、量子論、物性論及び統計力学、熱力学との相関を考慮に入れて開発されている。

またこの実験は、寒剤の準備、設定、熱交換ガスの封入、引き抜き、真空達成、熱平衡確認、測定という一連の作業で真空、熱平衡、熱量解析といった物理学実験の基本を教える役割も考慮されている。

それらを考慮した上で、情報処理教育の導入を旗印に、計測の自動化、精密化を今回進めた。学生実験には実体験教育という重要な要素があり、自動化することで、操作が容易になり学生の実体験による学習機会を逸失させる要因となり、また理論値と実験値の間の誤差要因その他がブラックボックス化されてしてしまう要因もある。

功罪、両面を持つ課題であるが、実際に導入した結果は現場の指導によってマイナス面はかなり改善されると思われる。指導書の記述も、それを考慮すれば、学生は、測定のみには掛っていた時間を、物理的背景の考察に当てられることが、明らかになった。学生のレポートを比較した結果(6)章で述べた様に正確な測定とその物理的理解に有意義であったと思われる。

以上のことから、従来の教育理念を継承しつつ、今回得られた研究成果は、今後の情報処理教育の導入も視点に入れた学生実験運営に極めて有効であると結論する。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、本学理学研究科博士後期課程 高沢章院生に終始、積極的に御協力いただいた。また、本研究は私立大学等経常費補助金特別補助金及び東京理科大学教育助成金を得て行なわれた。併せて深甚なる謝意を表す。