

## 極低温における熱容量測定

佐藤 武郎\*

## § 1. はじめに

最近では、極低温 (very low temperature) という言葉の他に、超低温 (ultra low temperature) という言葉が用いられるようになった。これら二つの間の区別は明確ではないが、大体の了解として、液体ヘリウム ( $^4\text{He}$  或は  $^3\text{He}$ ) の単なる断熱蒸発によって到達できる温度 ( $^4\text{He}$  の場合  $\sim 1.2\text{ K}$ ,  $^3\text{He}$  の場合  $\sim 0.3\text{ K}$ ) までを極低温、それ以下を超低温と呼んでいる。本稿では、この超低温温度域も含めて、低温での熱容量測定について述べる。

低温物理学の歴史は、実験手段と実験技術の開発の歴史といっても過言ではない。その根幹をなすものは、(1) 低温生成、(2) 温度測定と温度目盛の確立、(3) 熱の伝達 (冷却) および (4) 断熱 (保冷) の手段技術である。これらは全て、正に熱容量測定のために必要なものである。逆に、低温生成を始めとする種々の低温実験装置の設計には、装置構成要素の熱容量および各要素間の熱伝達に関する知識が不可欠である。このように、熱容量の測定は、低温実験の最も基本的なものである。

本稿では、先ず、熱容量が関係してくる基本式の導出を行い (§ 2)、次に、これらの基本式を利用した熱容量測定法について述べる (§ 3)。§ 2 および § 3 で述べることは、温度領域には無関係な一般の話である。§ 4 において、極低温域或は超低温温度領域で注意すべきことを取り上げる。

## § 2. 基本的関係式

熱容量  $C$  は、図 1 のように、周囲から切りはなされた試料に微小熱量  $\Delta Q$  を加え、それによる温度上昇  $\Delta T$  を測定することにより

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (1)$$

で与えられる。

従って、一般に試料には、ヒーターと温度計が取付けられており、(1) 式で与えられる熱容量の中には、これら付加物 (addenda) の比熱  $C_a$  が含まれる。

\* 東北大学理学部：〒980 仙台市荒巻字青葉

Takeo Satoh; Tohoku University, Aramaki Sendai 980 Japan

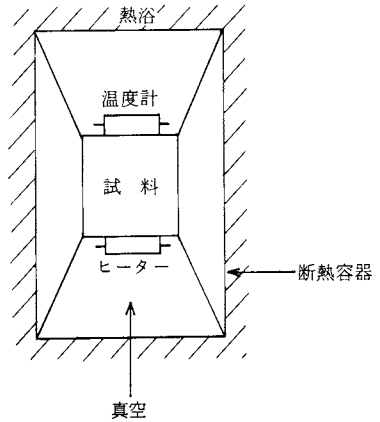


図 1 熱容量測定装置の基本

$$C = C_s + C_a \quad (2)$$

$$C_a = C_T + C_h$$

$C_s$ : 試料の熱容量

$C_T$ : 温度計の熱容量

$C_h$ : ヒーターの熱容量

更に、これらヒーターおよび温度計は、外部熱浴 (heat bath 或は heat sink) とリード線を通して結合してヒートリークを与える。また、試料支持具や断熱容器内残留ガスを通してのヒートリークも存在し得る。

このように、試料を熱浴との間に存在するヒートリークをまとめて、熱抵抗 (thermal resistance)  $R_b (= 1/K_b)$ ,  $K_b$ : 熱コンダクタンス) を用いて表わせれば、現実的な熱容量測定装置は図 2 のように考えられる。

図 2 で表わされる状況を取扱うために、これをもう少し一般化して、図 3 の場合を考えよう。図 3 において、時刻  $t=0$  に  $\Delta T \equiv T_1 - T_2 > 0$  である時、この系は時間経過と共にどのように熱平衡状態 ( $T_1 = T_2$ ) に近づくか

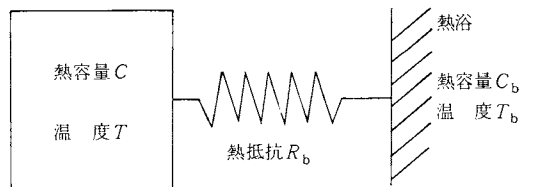


図 2 試料と熱浴との間にヒートリークが存在する場合

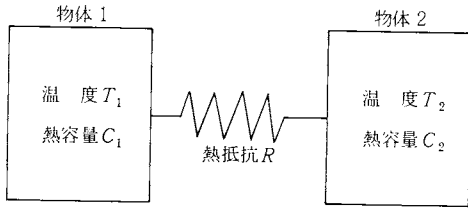


図3 熱抵抗で結合された系

を考へる。但し、 $\Delta T \ll T_1, T_2$ とする。この場合、熱抵抗  $R(T)$  の定義は、物体1から物体2への熱の流れを  $\dot{Q}$  として、

$$\dot{Q} \equiv \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{R(T)} (T_1 - T_2) \quad (3)$$

で与えられる。一方、エネルギー保存則と熱容量の定義(1)式より

$$C_1 \Delta T_1 + C_2 \Delta T_2 = 0 \quad (4)$$

が成立つ。(3)式と(4)式を用いて、

$$\frac{d}{dt} \Delta T = -\frac{1}{\tau} \Delta T \quad (5)$$

従つて、

$$\Delta T(t) = \Delta T(t=0) \exp(-t/\tau) \quad (6)$$

を得る。ここで、この系に特有な熱緩和時間 (thermal relaxation time)  $\tau$  は、

$$\tau \equiv \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} R \quad (7)$$

で与えられるものである。特に  $C_2 \gg C_1$  の場合には、

$$\tau \approx C_1 R \quad (8)$$

となる。

以上の取扱いから分るように、我々の取扱うべき系は、電気回路と類似しており、

$$\begin{aligned} \text{電 圧 } V &\longleftrightarrow \text{温 度 } T \\ \text{電 流 } I &\longleftrightarrow \text{熱 流 } P \equiv \dot{Q} \\ \text{電気抵抗 } r &\longleftrightarrow \text{熱抵抗 } R \\ \text{静電容量 } C &\longleftrightarrow \text{熱容量 } C \end{aligned} \quad (9)$$

の対応が成立っている。

さて、このような熱緩和の現象が顕著に見られるのは、試料に加えられる熱量が時間的に変化する交流加熱の場合である。図2において、試料ヒーター(電気抵抗  $r$ ) に加えられる電流  $I$  が

$$I = I_0 \cos \frac{\omega}{2} t \quad (10)$$

のように時間変化するとしよう。更に、現実的な場合

$$C_b \gg C \quad (\text{従つて } T_b \text{ は一定}) \quad (11)$$

を考へる。この場合の熱緩和時間は(8)式により

$$\tau_b \approx C R_b \quad (12)$$

で与えられる。単位時間当り試料ヒーターにより加えら

れる熱エネルギーは

$$P \equiv \dot{Q} = r I^2 = P_0 (1 + \cos \omega t), \quad P_0 \equiv \frac{r I_0^2}{2} \quad (13)$$

であり、 $T - T_b = \Delta T$  として、 $\Delta T$  の従うべき方程式は、

$$C \frac{d}{dt} \Delta T = P - \frac{1}{R_b} \Delta T \quad (14)$$

である。交流加熱をはじめてから十分時間が経過した状態では、方程式(14)の解は

$$\Delta T = P_0 \left\{ R_b + \frac{1}{C \omega} \left[ 1 + \left( \frac{1}{\omega \tau_b} \right)^2 \right]^{-1/2} \sin(\omega t + \alpha) \right\} \quad (15)$$

$$\tan \alpha = 1/\omega \tau_b \quad (16)$$

で与えられる。

さて、これまでの取扱いでは、試料自身の熱抵抗は零(熱コンダクタンスが無限大)と仮定している。試料内での熱緩和が問題になる場合には、これまで行って来た集中定数的取扱いを改めて、分布定数的に取扱わねばならない。最も簡単な場合として、図4のように、一様な断面積  $A$  をもつた半無限長の試料棒を考へる。試料の比熱(単位質量当りの熱容量)を  $c_0$ 、密度を  $\rho$ 、熱伝導率(thermal conductivity)を  $\kappa$  とする。試料の一端 ( $x=0$ ) を加熱する時、試料を流れる熱流は、

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -A \rho c_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

$$P = -A \kappa \frac{\partial T}{\partial x} \quad (18)$$

で記述される。

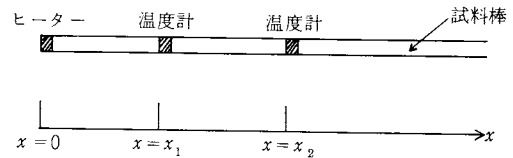


図4 試料中の熱緩和と温度波

(17)式および(18)式を合せて、熱拡散の方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (19)$$

を得る。ここで

$$D = \frac{\kappa}{\rho c_0} \quad (20)$$

は、熱拡散率(thermal diffusivity)と呼ばれる物質定数である。

図4の試料棒を電気回路の伝送線路の見なせば、直列インピーダンスを  $Z$ 、並列アドミタンスを  $Y$  として、伝送線路の式

$$\frac{dV}{dx} = -ZI \quad (21)$$

$$\frac{dI}{dx} = -YV \quad (22)$$

に対応して、(9)を考慮して、

$$\frac{dT}{dx} = -ZP \quad (23)$$

$$\frac{dP}{dx} = -YT \quad (24)$$

を得る。(18)および(23)より

$$Z = \frac{1}{A\kappa} \quad (25)$$

であることが分る。これは試料棒の単位長当りの熱抵抗である。次に、 $x=0$ でのヒーターによる加熱が(13)と同様に  $\exp(i\omega t)$ の時間依存性をもつとすれば、(17)および(24)より

$$Y = iA\rho c_0\omega \quad (26)$$

となる。これは、単位長当りの熱容量のアドミッタンスである。従って、試料棒の特性インピーダンス $Z_0$ は、

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \frac{1}{A(1+i)} \frac{1}{\kappa} \frac{1}{q} \quad (27)$$

但し

$$q = \sqrt{\frac{\omega}{2D}} \quad (28)$$

で与えられ、伝播定数 $r$ は

$$r = \sqrt{ZY} = q(1+i) \quad (29)$$

で与えられる。結局、方程式(19)の解として、 $\exp(i\omega t)$ の時間依存性をもつものとして、

$$T = \frac{P_0}{A\kappa q(1+i)} e^{-qx} e^{i(\omega t - qx)} \quad (30)$$

を得る。これが温度波(temperatuer wave)である。さて、このような温度波が伝播している時、図4のように試料棒中の任意の2点間の位相差

$$\Delta\phi = q(x_2 - x_1) = \sqrt{\frac{\omega}{2D}}(x_2 - x_1) \quad (31)$$

は熱拡散率 $D$ で定まることが分る。

### § 3. 熱容量測定法

§ 2で述べたことを考慮して、熱容量測定の実際的情況を図示すれば、図2は更に複雑となって、図5のようになる。

関係してくる特性時間としては、次のようなものが存在する。

$$\tau_b = \frac{CC_b}{C+C_b} R_b \quad (32)$$

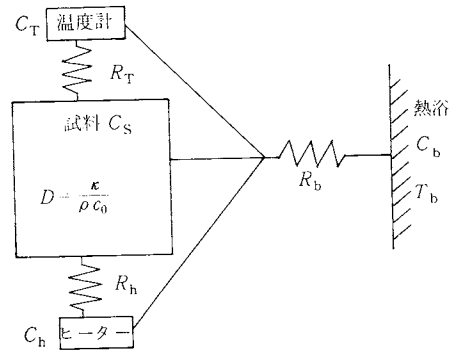


図5 図1および図2を更に現実に近い形で表わしたもの

$$\tau_T = \frac{C_S C_T}{C_S + C_T} R_T \quad (33)$$

$$\tau_h = \frac{C_S C_h}{C_S + C_h} R_h \quad (34)$$

$$\tau_s = \frac{L^2}{D} \quad (35)$$

ここで(35)の $\tau_s$ は、試料内が熱平衡に達する時間の目安を与えるものであり、 $L$ は試料の代表的長さである。

さて、熱容量測定に際して、測定の精度をあげるには、(2)式から分るように、測定法の如何によらず

$$C_S \gg C_a \quad (36)$$

であることが望ましい。この場合には、(33)、(34)は

$$\tau_T \approx C_T R_T \quad (37)$$

$$\tau_h \approx C_h R_h \quad (38)$$

となる。また、一般に(11)が成立しているので、(32)は(12)でおきかえられる。

次に明らかなことは、熱容量測定に際して、試料と温度計およびヒーターはできるだけ熱平衡にあることが望ましいということである。すなわち

$$\tau_{int}^2 \approx \tau_T^2 + \tau_h^2 + \tau_s^2 \quad (39)$$

として

$$\tau_{int} \ll \tau_b \quad (40)$$

であることが望ましい。

熱容量測定法は、結局 $\tau_b$ の長短により、断熱法と非断熱法とに分れる。非断熱法の中に熱緩和法(thermal relaxation method)と交流温度法(AC-temperature method)がある。

#### 3.1 断熱法( $\tau_b \approx \infty$ )

##### (i) 熱パルス法<sup>1)</sup>

加熱入力 $P$ と試料温度 $T$ を時間 $t$ の関数として図示すれば図6のようになる。これから分るように、この方法は熱容量の定義式(1)を実現している方法であり、加熱の前後で試料は熱平衡状態にある。図6を参照して、こ

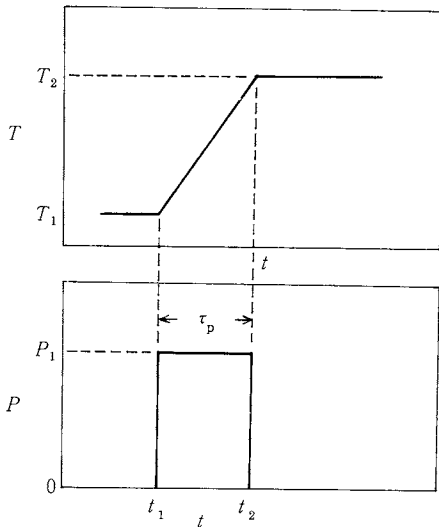


図6 断熱熱パルス法

の場合熱容量は

$$C(T_{AV}) = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (41)$$

但し  $T_{AV} = (T_1 + T_2)/2$ ,

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$$\Delta Q = P_1 \tau_p$$

で与えられる。この方法は最もまぎれのない熱容量測定法である。実際には $\tau_1$ は有限であることから温度ドリフトが存在し、加熱の前後で温度ドリフトが異なることが誤差の原因となる。また $\tau_1$ が有限になると(40)の条件を満たすことが必要になってくる。

(ii) 連続加熱法<sup>2)</sup>

図7に示すように加熱入力 $P = P_1$  (一定)で温度上昇

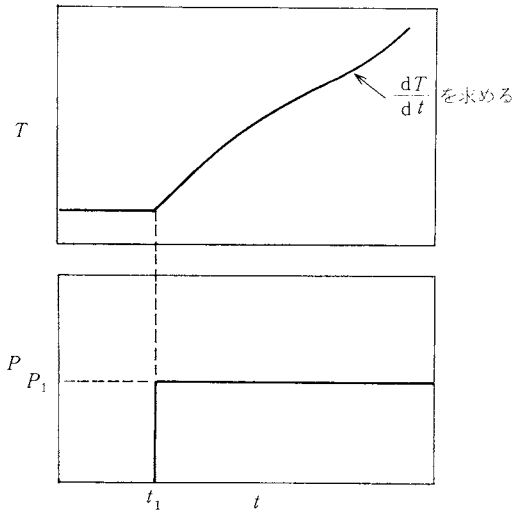


図7 断熱連続加熱法

曲線を得、これから $dT(t)/dt$ を求める。従って

$$C(T) = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{(dQ/dt)}{(dT/dt)} = \frac{P_1}{(dT/dt)} \quad (42)$$

によって熱容量を求めることができる。この方法は(i)に比して温度分解能をあげやすい利点をもつが、熱平衡状態でないので、 $\tau_{int}$ による誤差が入りやすい。

3.2 熱緩和法

(iii) 階段法<sup>3)</sup>

$\tau_b$ が有限の場合図6に対応するものは図8のようになる。(12)式から分るように、 $R_b(T)$ を知っていれば、温度緩和曲線より $\tau_b$ を求めて

$$C(T_{AV}) = \frac{\tau_b}{R_b(T_{AV})} \quad (43)$$

但し  $T_{AV} = (T_1 + T_2)/2$

$T_1 - T_b$  (熱浴の温度)

により熱容量を得ることができる。この方法では $R_b(T)$ の測定を別に行っておく必要がある。 $\tau_2$ が長くなると温度緩和曲線は単純な指数関数からはずれて誤差を与える。また、 $T_b$ のドリフトも誤差の原因となる。

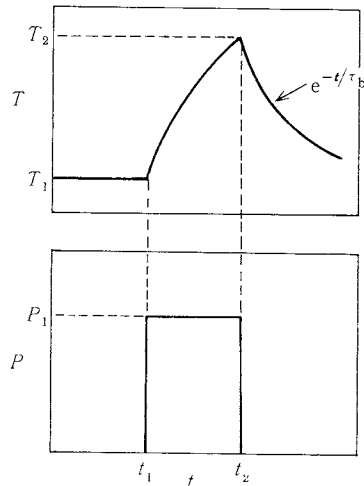


図8 熱緩和階段法

(iv) 連続法<sup>3)</sup>

図9に示したように、定常状態( $dT/dt=0$ )を追いながら順次加熱入力を増加させていく。定常状態では

$$P(T) = \int_{T_1}^T \frac{1}{R_b(T')} dT' \quad (44)$$

が成立つ。十分多くの点で $P(T)$ を測定して $P(T)$ 曲線を得たのち、加熱を止め、その冷却曲線から $dT/dt$ を求めれば、

$$C(T) = \int_{T_1}^T \frac{dT'}{R_b(T')} \bigg/ \left( \frac{dT}{dt} \right) \cdot P(T) \bigg/ \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad (45)$$

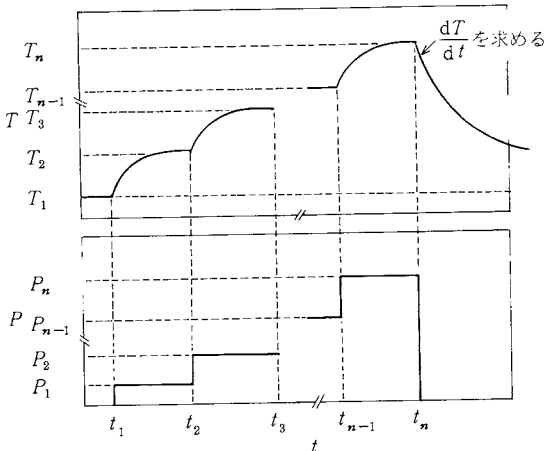


図9 熱緩和連続法

によって熱容量を得ることができる。

この方法は(ii)と同様に、熱容量を温度  $T$  の関数として連続的に得られるので、温度分解能をあげやすい利点を持つ。

(V) 外挿法<sup>4)</sup>

図8および図9では、 $\tau_{int}$  の効果は無視しているが、実際には  $\tau_{int}$  が有限なので、熱パルスによる加熱は図10に示すような温度上昇および下降曲線を与える。温度下降曲線より求めた  $\tau_b$  を用いて、図10のように外挿して有効な温度上昇  $\Delta T = T_2 - T_1$  を求めれば

$$C(T_{AV}) = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \tag{46}$$

但し  $T_{AV} = (T_1 + T_2)/2$   
 $\Delta Q = P_1 \tau_p$

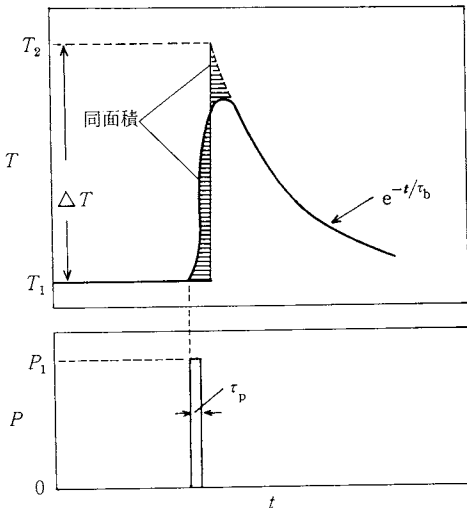


図10 熱緩和和外挿法

により熱容量を求めることができる。

3.3 交流法

(VI) 交流温度法<sup>5)</sup>(振幅測定法)

(15)式から分るように、交流加熱の場合、熱浴の温度に対する試料温度の上昇は

$$\text{直流成分}(\Delta T)_{DC} = P_0 R_b \tag{47}$$

$$\text{交流成分}(\Delta T)_{AC} = \frac{P_0}{C\omega} \left[ 1 + \left( \frac{1}{\omega\tau_b} \right)^2 \right]^{-1/2} \sin(\omega t + \alpha) \tag{48}$$

の2つに分れる。(48)から明らかのように

$$\omega\tau_b \gg 1 \tag{49}$$

の時、交流成分の振幅は

$$(\Delta T)_{AC} \approx \frac{P_0}{C\omega} \tag{50}$$

となるから

$$C = \frac{P_0}{\omega(\Delta T)_{AC}} \tag{51}$$

により熱容量を求めることができる。(49)の条件は(12)を用いて

$$R_b \gg \frac{1}{\omega C} \tag{52}$$

と同等である。(47)と(48)から(52)は

$$(\Delta T)_{DC} \gg (\Delta T)_{AC} \tag{53}$$

を意味することが分る。このように測定すべき信号  $(\Delta T)_{AC}$  は、温度上昇分に比して非常に小さいのであるが、交流成分であるために、位相敏感検波等エレクトロニクスの諸技術を駆使できる強味をもっている。また、この方法は、熱浴の温度を一定に保ってれば、非常に長時間に亘って一定温度での比熱を繰り返し測定することを可能とし、従って長時間での平均をとることによって、信号雑音比を改善することができる。外部パラメータ(磁場など)の変化による熱容量の変化を容易に測定し得ることもこの方法の特色である。熱緩和法と同じく  $\tau_{int}$  が誤差を与える。

(VII) 温度波法<sup>6)</sup>(位相差測定法)

図4に関連して示したように、長い試料棒の一端を交流加熱すれば、(30)式で与えられる温度波が伝播し、任意の2点間の位相差  $\Delta\phi$  を測定すれば(31)式により、熱拡散率  $D$  を求めることができる。従って、試料の熱伝導率  $\kappa$  および密度  $\rho$  が既知であれば、(20)式を用いて

$$c_0 = \frac{\kappa}{\rho D} \tag{54}$$

により比熱を得ることができる。この方法は、 $\tau_{int}$  の中の  $\tau_S$  を利用して熱容量を測定するという点で、これまで述べて来た方法と大きく異なっている。

$\tau_T$  による位相のずれや試料の長さが有限であるため

反射波が存在することなどが誤差の原因となる。

#### § 4. 極低温および超低温での注意事項

前節で述べた種々の熱容量測定法は、温度域によらず通用する。低温での熱容量測定実験がむずかしくなる度合あるいはどういう所がむずかしくなるかということは、測定対象物の種類(液体・固体、金属・非金属など)、試料の形状・量、必要な温度分解能、あるいは外部パラメータ(磁場、圧力など)の存在、などによって異なってくる。かなり一般的にいえることは、低温では、取扱うべき熱容量が小さくなる、ということからくるむずかしさである。熱容量が小さいことは、外部からの擾乱により試料の温度が大きく変化することを意味する。従って、最もオーソドックスな方法である断熱法の適用には種々の工夫が必要となり、場合によってはあきらめざるを得なくなる。熱緩和法や交流温度法は、このように断熱法をあきらめざるを得ない状況のもとで開発されて来たものである。

さて、あらゆる場合を想定して、クライオスタットの設計製作および測定に関する注意を述べることは、筆者の浅い経験では不可能である。ここでは、いくつかの項目に分けて文献を列挙する。

##### 4.1 低温生成<sup>7)</sup>

液体<sup>4</sup>Heの断熱蒸発による1.2 K、あるいは液体<sup>3</sup>Heの断熱蒸発による0.3 Kまでの温度域は容易である。これらの温度以下を得る方法として、常磁性塩の断熱消磁が用いられていたが、最近では<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He希釈冷凍機が普及して来ており、数十mK (mK≡10<sup>-3</sup> K)までの温度域は大衆化された感がある。現在では、市販品の希釈冷凍機で5 mK程度を実現するものもある。簡単な自作でも30 mK程度を得るのは容易である。

##### 4.2 温度測定<sup>8)</sup>

一次温度計として、液体ヘリウムの蒸気圧が用いられる。<sup>3</sup>Heを用いて0.5 Kまでは、油マンノメータを用いて蒸気圧測定を容易に行える。注意すべきことは、熱分子効果(thermomolecular effect)である。0.5 K以下は、常磁性塩(特にセリウムマグネシウム硝酸塩, CMN)の帯磁率(キュリー法則)を用いる。CMNを用いて数mKまでは温度を決定することは確立されている。

二次温度計として、通常抵抗温度計(カーボン抵抗、半導体など)が用いられる。注意すべきことは、抵抗体自身でのジュール熱の発生を押える(10<sup>-12</sup> W以下)ことである。

##### 4.3 ヒーターおよびリード線<sup>9)</sup>

通常マンガニン線を用いるが、これは1 K以下に大きな核比熱を有する。従って、1 K以下の実験では、細い

銅線あるいはカーボン抵抗を用いる。

リード線として、電気伝導はよくて熱伝導は悪いものが要求されることが多い。この目的のためには、超伝導線あるいはマンガニン線にハンダ・メッキを施したものが用いられる。

##### 4.4 熱スイッチ<sup>10)</sup>

これは断熱法クライオスタットの心臓部である。機械的熱スイッチは1 K以下ではあまり実用的でない。この場合は、超伝導スイッチ(超伝導状態と常伝導状態で熱伝導度が大きく異なることを利用したもの)を用いる。

##### 4.5 熱接触<sup>11)</sup>

温度計やヒーターと試料との間の熱接触は、できるかぎり良くせねばならない。また、リード線のサーマルアンカーも重要である。

このように熱接触が重要な所に用いられる接着剤として、グリース(アピエゾンN)やニス(GE 7031)がある。

#### § 5. おわりに

前節に関する文献の列挙は完全にはほど遠い。まごびきで補って頂きたい。

さて、種々のデータを参考にして装置ができ上ったら、まず、素姓の知れている標準試料を測定して、装置および測定系の全体的チェックを行うことが必要である。

また、試料の熱容量に何らかの異常を見出した場合には、熱容量と熱力学的関係式で結びつく他の熱力学量を独立に測定して、矛盾のないことを確かめることが望ましい。

#### 文 献

- 1) 大塚泰一郎, 佐藤武郎; 熱・温度測定と示差熱分析(科学技術社1968) p.1「極低温における比熱測定の現状」
- 2) J. F. Cochran, C. A. Shiffman and J. E. Neighbor *Rev. Sci. Instr.* **37**, (1966) 499
- 3) R. Bachmann, F. J. Disalvo, T. H. Geballe, R. L. Greene, R. E. Howard, C. N. King, H. C. Kirsh, K. N. Lee, R. E. Schwall, H. V. Thomas and R. B. Zubeck, *Rev. Sci. Instr.* **43**, (1972) 205
- 4) J. C. Lasjaunias, B. Picot, A. Ravex, D. Thou Thoulouze and M. Vandorpe, *Cryogenics* **17**, (1977) 111
- 5) P. F. Sullivan and G. Seidel, *Phys. Rev.* **173**, (1968) 679
- 6) D. H. Howing, E. Mendoza and J. E. Zimmerman, *Proc. Roy. Soc.* **229**, (1955) 86  
木暮嘉明, 比企能夫, 固体物理 **9** (1974) 281

- 7) O. V. Lounasmaa, *Experimental Principles and Methods Below 1K*, Academic Press (1974)  
 佐藤武郎, 沢田安樹, 「 $^3\text{He}/^4\text{He}$  希釈冷凍機と比熱測定」, 日本物理学会誌, **28** (1973) 217  
 佐藤武郎, 「 $^4\text{He}$  循環式希釈冷凍機」, 固体物理 **10** (1975) 185  
 なお, 常磁性塩漸熱消磁冷却を用いた比熱測定ク  
 ライオスタットについては,  
 佐藤武郎, 「比熱」, 低温工学 **4** (1969) 185
- 8) 0.3 K以下の温度測定に関する review として  
 R. P. Hudson, H. Marshak R. J. Soulen, Jr. and D. B. Utton, *J. Low Temp. Phys.* **20**, (1975) 1 D. S. Parker and L. R. Corruccini, *Cryogenics* **15**, (1975) 499  
 熱分子効果については  
 G. T. McConville, *Cryogenics* **9**, (1969) 122  
 Ge 温度計  
 E. Godratt A. J. Greenfield and Y. Schlesinger, *Cryogenics* **17**, (1977) 81 L. M. Besley and H. H. Plum, *Rev. Sci. Instr.* **49**, (1978) 68  
 カーボン抵抗温度計  
 W. C. Black, Jr., W. R. Roach and J. C. Wheatle *Rev. Sci. Instr.* **35**, (1964) 587 S. Kobayashi, M. Shinohara and K. Ono, *Cryogenics* **16**, (1976) 597  
 カーボン抵抗温度計に対する磁場の効果  
 J. Sanchez, A. Benoit and J. Flouquet, *Rev. Sci. Instr.* **48**, (1977) 1090 J. R. Thompson, *ibid* **48**, (1977) 1713  
 カーボン抵抗温度計の熱容量  
 S. Alterovitz and M. Gershenson, *Cryogenics* **14**, (1974) 618, M. Steinback, P. J. Anthony and A. C. Anderson, *Rev. Sci. Instr.* **49**, (1978) 671  
 キャパシタンス温度計  
 N. Lawless and E. A. Panchyk, *Cryogenics* **12**, (1972) 196
- 9) マンガン線線の熱容量  
 H. R. O'Neal and N. E. Phillips, *Rev. Sci. Instr.* **34**, (1963) 782 K. Marklund, S. Byström and M. Larson, *Cryogenics* **13**, (1973) 671  
 マンガン線線の熱伝導  
 D. T. Corzett, A. M. Keller and P. Seligmann, *Cryogenics* **16**, (1976) 505  
 ハンダメッキのマンガン線  
 A. C. Anerson and D. W. Bloom, *Rev. Sci. Instr.* **40**, (1969) 1243
- 10) 機械的熱スイッチ  
 T. Satoh and T. Ohtsuka, *J. Phys. Soc. Japan* **23**, (1967) 9 R. W. Hill and G. R. Pickett, *Ann. Acad. Sci. Fenn.* **A6**, No. 210 (1966) 40 G. Seidel and P. H. Keesom, *Rev. Sci. Instr.* **29**, (1958) 606  
 超伝導熱スイッチ  
 W. Reese and W. A. Steyert Jr., *Rev. Sci. Instr.* **33**, (1962) 43 V. P. Peshkov and A. Ya. Poshin, *Soviet Physics JETP* **21**, (1965) 258 M. Krusius, D. N. Paulson and J. C. Wheatley, *Rev. Sci. Instr.* **49**, (1978) 396
- 11) GE7031 ニスの比熱  
 J. L. Cude and L. Finegold, *Cryogenics* **11**, (1971) 394  
 GE7031 ニスの熱伝導  
 J. H. McTaggart and G. A. Slack, G. E. Report No.69-C-188 (1969)  
 アピエゾンN グリースの比熱  
 M. Wun and N. E. Phillips, *Cryogenics* **15**, (1975) 36  
 リード線のサーマルアンカー  
 A. C. Anderson, *Rev. Sci. Instr.* **40**, (1969) 1502 R. Radebaugh, N. V. Frederick and J. D. Siegarth, *Cryogenics* **13**, (1973) 41  
 カーボン抵抗温度計の熱接触  
 J. E. Robichaux and A. C. Anderson, *Rev. Sci. Instr.* **40**, (1969) 1512 E. Polturak, M. Rappaport and R. Rosenbaum, *Cryogenics* **18**, (1978) 27  
 機械的な熱接触  
 R. Berman, *J. appl. Phys.* **27**, (1954) 318 K. Muething, G. G. Ihas and J. Landan, *Rev. Sci. Instr.* **48**, (1977) 906 M. Maminen and W. Zimmerman, Jr., *ibid.* **48**, (1977) 1710