

UDC 621.565:
536.7:
620.178.3

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-312

材料試験用簡易小型低温槽

池田為治・藤沢良昭

1976年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

材料試験用簡易小型低温槽*

池田為治**・藤沢良昭**

1. まえがき

金属材料の機械的性質を調べるための材料試験は、特殊な場合の他は、小型の試験片で行うことが多い。ここでは、小型試験片で低温試験を行う場合に利用できるよう小型軽量で取扱いが容易な低温装置について述べる。

この装置はCO₂ガス断熱膨張式で、試験片を挿入できる程度の小型の断熱箱（以下低温槽といふ）と、高圧容器（ポンベ）入りの第2種液化CO₂およびこれらの間の配管で構成される簡単なものである。この低温槽の低温生成は、ポンベ内の高圧CO₂ガスが槽内ではなく大気圧まで等エンタルピ膨張することで得られる。この膨張が槽内において常に一定条件で継続できるようにすれば、槽内を一定温度に保持することができる。

本装置は、高空を飛行する航空機の機体外板を接着剤で接合した場合における接着継手の低温特性を調べることを目的として設置したものである。この場合の低温雰囲気条件は、常温から約-55°Cの大気中である。この種の低温試験には、従来は二段式冷凍機またはドライアイスや液体窒素等で冷却した気体（空気等）あるいは、ドライアイスで冷却したアルコールやエーテル等が用いられる。これらはいずれも冷媒等で冷却された気体や液体を低温槽に供給する方式であり、所要の温度に達するまでに時間がかかり、特別な制御装置も必要であり、断熱対策も重要である。特に液体中で試験を行う場合には、負荷方法や振動および試験片の破断に対する制約がある他、液体の漏洩にも留意しなければならない。また、試験条件によっては、試験片を液体中に浸漬することや、試験片に水蒸気が凍結することを好まない場合には、試験片が濡れたり、着霜することを防ぐ対策も必要である。

本低温槽は、CO₂ガスの断熱膨張によって得られたCO₂の低温ガス中で低温試験が行えるようにしたもので、供給ガスの一次圧力の制御のみで極めて容易に、しかも短時間に任意の所要温度が得られ、試験片に水蒸気が凍結することもなく、負荷による試験片の変形や振動および破断等に対し何ら支障がない等の特長がある。また、

装置も簡単であり、低温槽も小型軽量であるため、手軽に低温試験が行える。

以降に、CO₂ガスの断熱膨張による低温生成と、本低温槽の性能と構造および運転試験とその結果等について述べる。

2. 記号・単位

A(a) ; 面積, m² (cm²)

C ; ステファン・ボルツマン定数
 $= 4.88 \text{ kcal} / \text{m}^2 \text{h} (\text{°K}/100)^4$ (4)

C_p ; 定圧比熱, kcal/kg °C

C_v ; 定容比熱, kcal/kg °C

d ; 板厚, m

G(G') ; ガス流量, kg/h (kg/sec)

g ; 重力加速度 = 9.8 m/sec²

H ; 高さ, m

i ; エンタルピ, kcal/kg

k ; 比熱比 = 1.3, (CO₂)

l ; 長さ, m

P ; 圧力, kg/cm²

Q ; 伝熱量, kcal/h

R ; ガス定数 = 19.27 kg m/kg °K, (CO₂)

S ; エントロピー, kcal/kg °K

T(t) ; 温度, °K (°C)

v ; 比容積, m³/kg

w ; ガス流速, m/sec

α ; 热伝導率, kcal/m²h °C

τ ; 比重量, kg/m³

δ ; ジュールトムソン効果, °C/(kg/cm²)

ε ; 放射率

λ ; 热伝導率, kcal/mh °C

ν ; 動粘性係数, m²/sec

σ ; 温度伝導率, m²/h

右下の主なそえ字

1, 2, 3, C, r ; 膨張前(ノズル前), 膨張後(低温槽内), 槽外, 鮎和状態, 実験室内等の圧力や温度を示す, ただし Q_r は放射伝熱量を示す。

L, U, S ; 低温槽の下, 上, 側壁を示す。

* 昭和51年6月30日 受付

** 原動機部

これらの他のそえ字と、それらを組合せたものについては本文中で示す。

3. CO_2 ガスの等エンタルピ膨張による低温生成

CO_2 ガスの等エンタルピ膨張による温度降下について古くからよく知られている。図1は日本冷凍協会選定の⁽¹⁾ CO_2 の $P \cdot i$ 線図である。それぞれの曲線は、等エンタルピ (S) 線と、等温 (t °C) 線である。図の縦軸は、 CO_2 の三重点以下では目盛を4倍に拡大してある。

図1でも明らかのように、 CO_2 の特徴は、他の冷媒に比べて室温では蒸気圧が高いことと、大気圧中では固体（ドライアイス）を含むしめりガスの状態もあるということである。これらの性質によれば、膨張比が大きくなるため、断熱膨張で降下する温度がより低くなるといえる。しかし、膨張後の状態がしめりガスになれば、膨張比が大きくとも、膨張ガス温度は膨張後の圧力できる温度より低くならない。この温度は $P_2 = 1 \text{ kg/cm}^2$ においては、ドライアイスが昇華する温度の -78.9°C （この槽での低温限界といいう）である。

ポンベに充てんされている液化 CO_2 は、室温では、 $P_c = 40 \sim 60 \text{ kg/cm}^2$ の飽和蒸気圧がある。いま室温 5°C で、 $t_c = 5^\circ\text{C}$ 、 $P_c = 40 \text{ kg/cm}^2$ の飽和状態 ($S \doteq 1.20 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$) にあるポンベ内の CO_2 ガスを、 P_2

= 1 kg/cm^2 の低温槽内に細いノズルを通して噴出し、槽外に自由放出するものとする。この噴出では、槽内において、槽壁やノズルからの伝熱、および噴出ガスと空気との混合による伝熱等がないと仮定する。この場合のガス噴出は断熱膨張であり、これが $S = \text{一定}$ の膨張であれば $t_2 = -78.9^\circ\text{C}$ の低温限界となり、 $i = \text{一定}$ の膨張であれば $t_2 = -67.5^\circ\text{C}$ になるはずである。なお $S = \text{一定}$ の場合には、 $P = 5.3 \text{ kg/cm}^2$ (三重点の圧力) までは気液体状、それ以下 $P_2 = 1 \text{ kg/cm}^2$ までは固体状での膨張である。

$i = \text{一定}$ の膨張である場合、ノズル前のガス温度 $t_1 = t_c = 5^\circ\text{C}$ 、 $P_1 = 40 \text{ kg/cm}^2$ 、 $t_2 = -67.5^\circ\text{C}$ 、 $P_2 = 1 \text{ kg/cm}^2$ とすれば、見掛け上のジュールトムソン効果 δ は次式(3.1)から、 $\delta = 1.86^\circ\text{C}/(\text{kg}/\text{cm}^2)$ となる。この δ は同じ条件での空気の値 ($\delta \doteq 0.25^\circ\text{C}/(\text{kg}/\text{cm}^2)$) に比べて7倍以上である。

$$\delta = (t_1 - t_2) / (P_1 - P_2) \quad (3.1)$$

前述のように、 CO_2 が高圧から一気圧まで断熱膨張した場合には、ドライアイスを含むしめりガスの状態もある。このドライアイスは、含有割合が少ない場合には、ノズル噴流の運動エネルギーを失うことと、他からの伝熱とによって昇華することもあるが、割合が多くなると昇華しきれなくなつて周辺に蓄積するようになる。この状態では、降下温度の限界になる他、この状態が長時間続ければガスを槽外に自由放出できなくなる恐れもある。 $P_2 = 1 \text{ kg/cm}^2$ において、 CO_2 が乾燥ガスの状態であるエンタルピの最低値は、 $i_2 \doteq 154 \text{ kcal/kg}$ である。等エンタルピ膨張である場合には、膨張前のエンタルピが $i_1 < i_2 \doteq 154 \text{ kcal/kg}$ であれば、膨張後の CO_2 にはドライアイスを含み、降下温度も限界になるといえる。 $i_1 = 154 \text{ kcal/kg}$ の CO_2 の飽和状態は $t_c \doteq 13^\circ\text{C}$ 、 $P_c \doteq 50 \text{ kg/cm}^2$ である。従って室温が高い場合には、 $t_c > 13^\circ\text{C}$ 、 $P_c > 50 \text{ kg/cm}^2$ で $i_1 < 154 \text{ kcal/kg}$ になり、この状態から $P_2 = 1 \text{ kg/cm}^2$ まで等エンタルピ膨張したときには槽内にドライアイスが蓄積する可能性がある。

本低温装置では、槽内の膨張ガスの温度 t_2 は、 P_1 と t_1 で制御することが考えられる。 P_1 は、バルブの開度により、 $40 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ から 1 kg/cm^2 まで広範囲に簡単に制御できる。これに比べ t_1 は、ガス噴出に伴う t_c の変化もあり、特別な装置で制御する必要がある。従って t_2 の調整には、 P_1 を制御することがより得策である。しかし、 $P_c > 50 \text{ kg/cm}^2$ の場合、 $P_1 < 50 \text{ kg/cm}^2$ まで減圧しても、この減圧が $i = \text{一定}$ の膨張であれば、槽内の膨張 CO_2 はしめりガス状態の可能性がある。本装置では、より簡単な機構で、取扱いを容易に

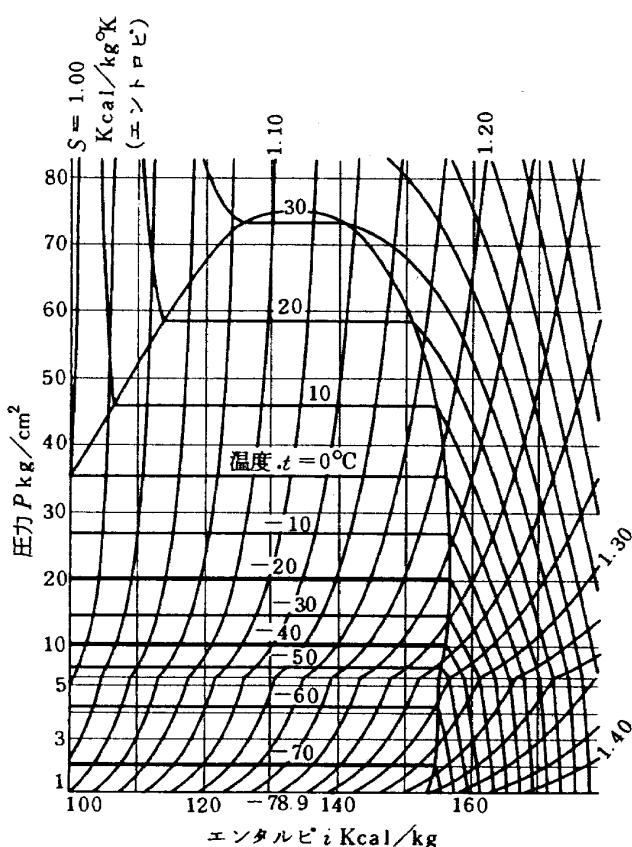


図1 $\text{CO}_2 P \cdot i$ 線図

するため、ポンペやガス供給系統の保温や断熱を行わず、ポンペの放出弁の開度のみで P_1 を制御することにした。また、本装置のガス供給量が後述(5.1)のように僅かである。このことから、本装置では、ノズルまでの供給ガスの減圧は、エンタルビ増加の傾向がある。従って $P_c > 50 \text{ kg/cm}^3$ の場合でも、ポンペの放出弁の開度により、 P_1 を適宜制御すれば、槽内にドライアイスが蓄積することを防ぎ、また槽内のガス温度を任意に調整することができる。

図2はCO₂が高圧(P_1)から $P_2 = 1 \text{ kg/cm}^3$ まで等エンタルビ膨張したときの温度降下をわかりやすく示したもので、縦軸に t_1 、横軸に t_2 をとり、4本の右下りの曲線が、 $P_1 = \text{一定}$ の線を示し、右側の右上りの曲線($t_c = t_1$)が飽和蒸気線で、この右側では、しめりガス状態であること等を示す。例えば、 $t_1 = 25^\circ\text{C}$ 、 $P_1 = 45 \text{ kg/cm}^3$ の状態から、 $P_2 = 1 \text{ kg/cm}^3$ まで膨張したときのガス温度は $t_2 = -40^\circ\text{C}$ となる。また、 $t_c = 9^\circ\text{C}$ 、 $P_c = 45 \text{ kg/cm}^3$ の飽和蒸気線上(飽和状態)からのときには、 $t_2 = -70^\circ\text{C}$ となることもわかる。なおこの図には、縦軸に t_c 、横軸(上辺)に P_c をとってCO₂の飽和曲線($t_c \sim P_c$)も示してある。これらのうち、($t_c \sim P_c$)曲線は次の(3.2)式から求め、他の曲線は(3.3)式から誘導した(3.4)式を用いて、 $i_1 = i_2$ として求めた。なお(3.2)式と(3.3)式

はPlankとKuprianoff等によるものである⁽²⁾。

$$P_c = 8.494 \times 10^4 \left(\frac{T_c}{100} - 1.281 \right)^{3.852} \quad \dots\dots (3.2)$$

$$v = \frac{R T}{P} - \frac{0.0825 + 1.225 \times 10^{-7} P}{(T/100)^{10/3}} \quad \dots\dots (3.3)$$

$$i = 169.34 + (0.1965 + 1.15 \times 10^{-4} t)t - 8.3724 \times 10^{-4} P \cdot \frac{(1 + 7.424 \times 10^{-7} P)}{(T/100)^{10/3}} \quad \dots\dots (3.4)$$

ただし基準は $t = 0^\circ\text{C}$ 、 $i_0 = 100 \text{ kcal/kg}$ 、 $C_p = 0.1965 + 2.3 \times 10^{-4} t$ 、 P の単位は kg/m^2 である。

これらの式の適用範囲は 0°C までとされているが、ここでは t_2 を求めるにも便宜上上式をそのまま用いた。この計算結果は、図2に示した範囲内では、図1の $P \cdot i$ 線図とほぼ一致している。

4. 低温装置の概要

CO₂ガスの等エンタルビ膨張による低温生成現象を低温槽に利用することができる。この槽の低温ガス雰囲気内で材料試験を行うには、試験片を槽内に収納し、かつ外部の負荷装置と連結することと、負荷による試験片の変形および破壊に対し低温槽が何等支障にならないことが必要である。また槽内温度を一定に持続するため、

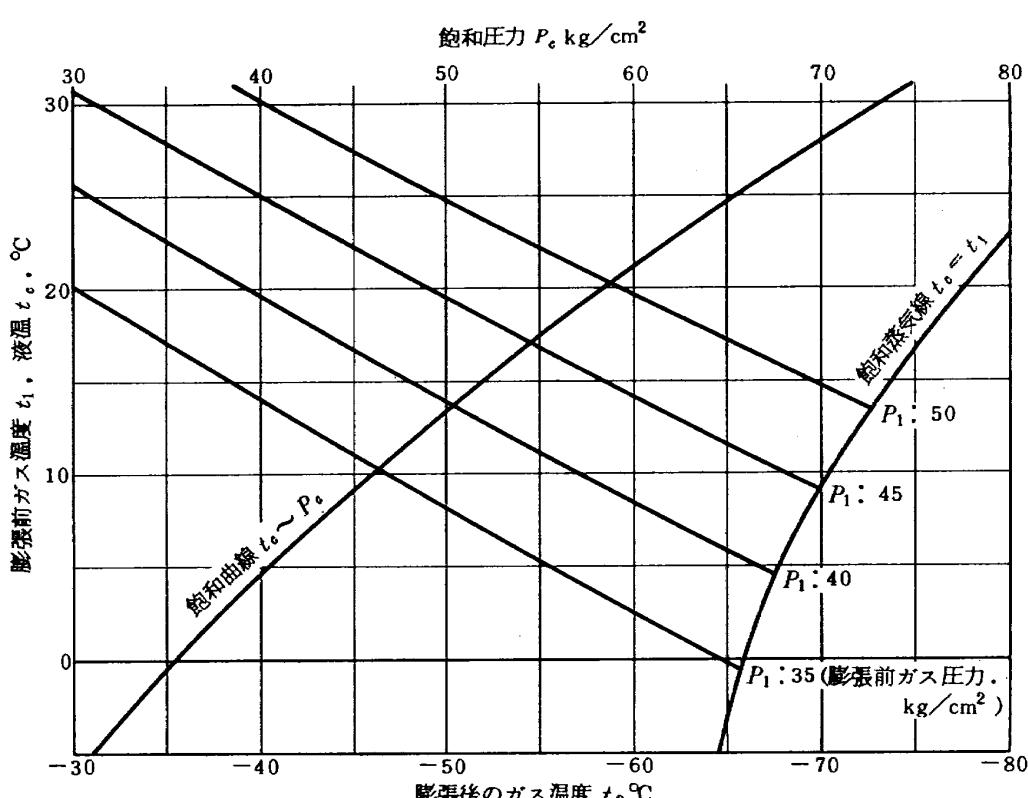


図2 CO₂ガス等エンタルビ膨張による温度降下

外部からの伝導、対流および放射等による伝熱を考慮し、妥当な条件で一定量のガスの供給・排出が継続できる構造でなければならない。以降に本低温装置の所要性能と構造仕様の概要について述べる。

4.1 低温槽の所要性能

- 1) 温度範囲；室温から -70°C
- 2) 一定温度持続時間；約 3 時間 (-55°C)
- 3) 収納試験片；幅 $\cdot 20\text{ mm}$, 厚さ $\cdot 3.5\text{ mm}$, 長さ $\cdot 130\text{ mm}$
- 4) 温度調整法；圧力制御（ガス放出弁の手動開閉）
なお CO_2 消費量については次節 5.1（ガス供給ノズル）で述べる。

4.2 低温槽の主要構造と装置の構成仕様および取扱いの概要

図 3 に本低温槽の概略を示す。槽本体は蝶番片開きふ

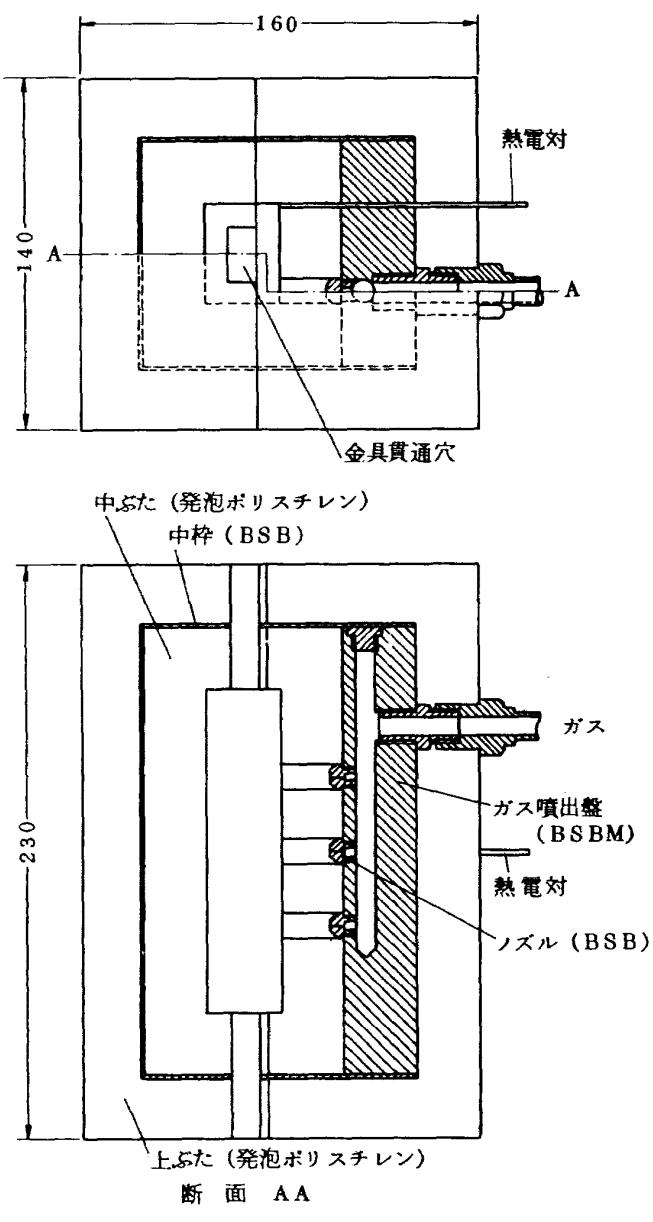


図 3 低温槽

た付きの金属性ガス噴出盤と中枠、および二重の断熱材からなる箱である。

- 1) ガス噴出盤と中枠；BSBM 材
- 2) 断熱材；50 倍発泡ポリスチレン・厚さ各 25 mm ,
- 3) 槽内寸法；高さ $\cdot 130\text{ mm}$, 幅 $\cdot 40\text{ mm}$, 奥行 $\cdot 30\text{ mm}$, 槽内アルミニウム箔充てん
- 4) 槽外寸法；高さ $\cdot 230\text{ mm}$, 幅 $\cdot 140\text{ mm}$, 奥行 $\cdot 160\text{ mm}$, 外面アルミニウム箔貼布
- 5) 試験片支持金具貫通部； $22\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,
- 6) ガス放出口； 128 mm^2 (金具と貫通部の隙間 $\cdot 1\text{ mm}$)
- 7) ガス噴出ノズル；約 0.1 テーパ末広ノズル・BSB 材, 末広比 $\cdot 4$ (入口 $\cdot 0.3\varnothing$, 出口 $\cdot 0.6\varnothing$, 全長 $\cdot 3.5\text{ mm}$, 図 5 参照)
- 8) 温度検出；I・C 熱電対 (ガラス纖維被覆, 素線径 $\cdot 0.65\varnothing$), 誤差階級 $\cdot 0.75$
- 9) 温度指示器；ミリボルト計, $+50 \sim -150^{\circ}\text{C}$
- 10) ガス供給源；第 2 種液化 CO_2 , 30 kg ボンベ 2 本並列連結,

11) 試験片の支持機構；機構の概略, 図 4 の通り
12) 試験荷重；軸方向の繰返し部分片振引張
写真(1)は低温槽を疲れ試験機に取付けた状態を示す。
①はガス噴出箱(固定部), ②は試験片を支持金具に締付けた状態, ③はノズル, ④は熱電対, ⑤は上ぶた(中ぶたは除いてある)の各々である。

実験に際しては箱①の奥にアルミニウム箔を敷き, 図 4 に示したように十字ピン継手によって試験片②を試験機の把み板に連結する。試験片の上に, さらにアルミニウム箔, 発泡ポリスチレンの中ぶたを順次かぶせる。ぶたの合せ目を密閉し, 上ぶた⑤をかぶせる。最後に支持金具貫通穴の隙間に綿を挟み, 上ぶたの合せ目にも綿や発泡ポリスチレンを詰めて外気の逆流を極力防ぐようにした。

5 低温槽の主要な性能要素の検討

材料試験用の低温槽としては, 所要の温度が短時間で得られ, しかも一様な温度分布で一定時間持続できる必要がある。

本低温槽は, CO_2 の断熱膨張による温度降下を利用したもので, 膨張開始, 即ち CO_2 ガスの噴出開始とともに槽内に低温ガスが生成され, これが槽内の大气を排出し, 試験片と支持金具および槽壁等を冷却し乍ら槽外に自由放出されるものである。槽内の低温ガスの温度は, 前 3 節で述べた膨張前後の圧力と温度の条件できる膨張ガスの温度 t_2 と, 試験片と支持金具, 槽内アルミニ

ウム箔および槽壁の温度との相互関係による。後者のうち、試験片と支持金具、アルミニウム箔等は比熱と熱容量が小さく、熱伝導が良く、しかも低温ガスが常にこれらを強制冷却し乍ら槽外に放出されるため、短時間で膨張ガスの温度に近くなる。従って、これらが槽内ガス温度に及ぼす伝熱の影響は僅かであると考えられる。しかし槽内壁の温度は、外壁面が大気中であるため、槽壁を

通しての伝熱による影響がある。また槽内温度保持のためには、一定の条件でガス膨張、即ちCO₂ガスの噴出を継続する必要がある。なお、ガス噴出開始とともに、槽内の大气が排出されるため、槽内では大気中の水蒸気が凍結する恐れがない。

本節では、槽壁、試験片その他の温度、およびガス膨張の条件等が定常状態であるとして、ガス噴出量、槽外からの伝熱量、槽内温度その他について検討する。

5.1 ガス供給用ノズルの形状と配置および予想流量

槽内温度分布の均一性を期待するためには、広い範囲から多数の微小口径ノズルで一様にガスを噴出することが望ましい。本低温槽では、図4に示したように、ガス噴流が直接試験片に当らないように、片側寄りの直線上に3個のノズルを等間隔に配置した。このノズルの口径は0.3Φで、この大きさはドリル加工で手軽にあけられる程度である。CO₂ガスをこのようなノズルで噴出する場合には、前述のように、膨張条件により、ノズル出口では固気体の状態であることも予想される。そのため、ノズル口径が小さい場合には、ノズル出口がドライアイスの付着によって目詰りを生ずる恐れがある。この目詰り予防と、ノズル内でのガスの膨張促進のため未広ノズルが有利である。図5に示した未広ノズルの寸法形状では、未広比が、 $a_2/a_c = 4$ （ただし a_c はのど部

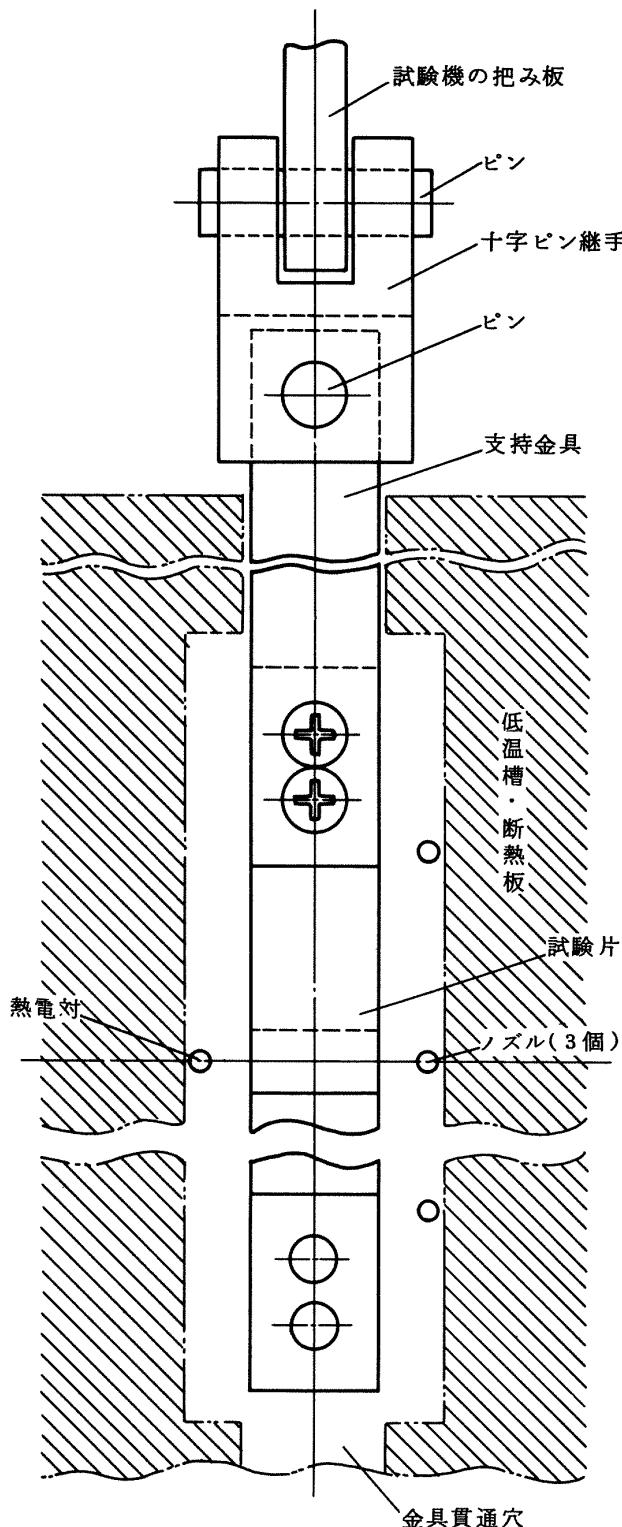


図4 試験片支持機構

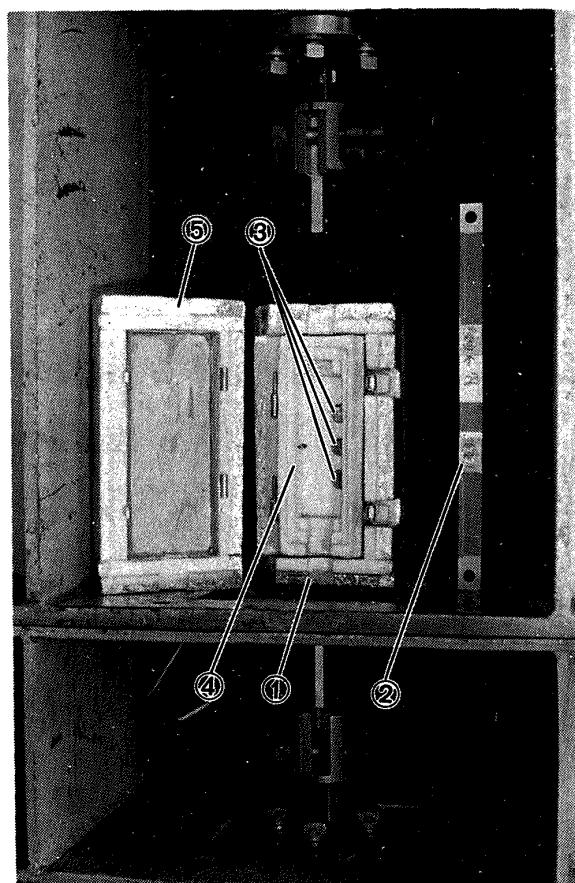


写真1

の面積)であり、 $k = 1.30$ のガスに対して得られる予想圧力比は $25 < P_1 / P_2 < 50$ ⁽³⁾ である。このノズルでは、 $P_1 = 45 \text{ kg/cm}^2$ に對し、 P_2 がほぼ 1 気圧に近い値まで膨張すると推定される。

このノズルを用いて、一定条件のガス膨張を継続することで所要の槽内平均温度 t_{2f} を一定に持続することとし、これに必要なガス流量 G について検討する。 t_{2f} は、膨張ガスの温度 t_2 と G および槽外からの伝熱量 Q との相互関係できる。このうち t_2 は、前節図 2 に示したように、一定の膨張条件によって得られるものとすれば、 t_2 と G の間には一定の関係がある。この膨張条件で所要の t_2 を得るために、 P_1 または t_1 を任意に選べるが、 P_1 と t_1 は相互関係にあるため、 P_1 を任意に選ぶと t_2 に対する t_1 はきまった値となる。この関係できまる t_2 に対する P_1 と t_1 、およびノズル面積 a_c とから、所要の t_2 に対する G が末広ノズルよりの断熱噴流として求められる。なおノズル前後の圧力比が 35 ~ 50 と極めて大きいため、ノズル平行部での流速は音速であると仮定し、次式を用いて G を求める。ここでは $t_2 = -30 \sim -70^\circ\text{C}$ 、 $P_1 = 35 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ の範囲について計算する。

$$G' = \psi_c a'_c P_1 / \sqrt{RT_1}, \quad (\text{kg/sec}) \quad (5.1)$$

$$\psi_c = \sqrt{gk} \left\{ \frac{2(1+x_1)}{k+1} \right\}^{\frac{k+1}{k-1}} \quad (5.2)$$

$$x_1 = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{w_1^2}{2gRT} \quad (5.3)$$

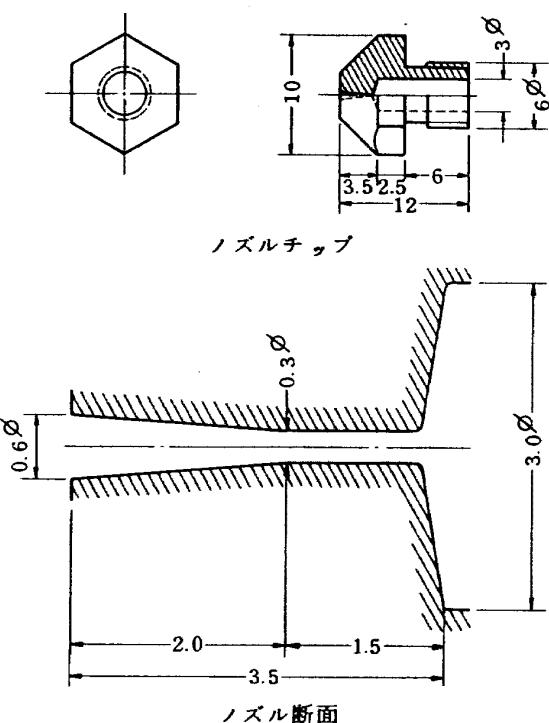


図 5 ガス噴出ノズル

ただし、ノズル前のガス流速 w_1 が微少であるとして、 $x_1 = 0$ とみなす。 a'_c はノズルのガス流路有効面積で、流量係数を 0.8 とみなし、 $a'_c = 0.8 a_c = 1.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ とした。

計算結果では、図 6 に示すように、一定の t_2 を得るための G は、 P_1 の違い (t_1 も変わる) によりほぼ直線的に変化する。また、 P_1 が一定であれば、 G が僅かに変わる (t_1 が変わる) ことで t_2 が変化することもわかる。なお次項で述べるように (図 7.8 参照) G の増加 (t_1 が低く、 P_1 が高くなる) につれて t_{2f} は t_2 に近くなる。

5.2 低温槽の断熱性と槽内温度

低温槽の断熱材を通して槽外から伝わる伝熱量は、主として断熱材の熱伝導と槽内外壁における熱伝達の条件による。この低温槽では、槽内の低温ガスが槽上下の試験片支持金具貫通穴の隙間から大気中に自由放出する。放出ガスは大気中に拡散し、室温より低い大気との混合ガスとして、放出ガス流に伴って槽外周辺を循環する。従って槽外周辺の流れや温度の条件は複雑である。槽内の流れについても、槽内形状、ガス噴出方向、噴出量および槽内の障害物等を考えれば極めて複雑である。ここでは、アルミニウムに包まれた試験片の大きさが支持金具と同じ大きさの断面 (200 mm^2) であるとし、これと槽壁との空隙を噴出ガスが上下方向に等分に流れ、かつ P_1 、 t_1 、 P_2 、 t_2 、 G および槽内平均温度 t_{2f} 等が定常状態であるとしたときの条件で、レイノルズ数、グラッシュフ数およびプランタル数を検討のうえ、槽外からの伝熱量を積算する。手順としては、先ず側壁について、壁内外面での熱伝達、壁の熱伝導、および実験室内からの放射伝熱等を考慮し、ガス流量と槽内ガス温度との均衡を保ちながら外部からの伝熱量を求め、次いで上下壁について同様 (放射伝熱は側壁に含む) に計算した。また、これらの伝熱による槽内のガス温度上昇 (放出ガス

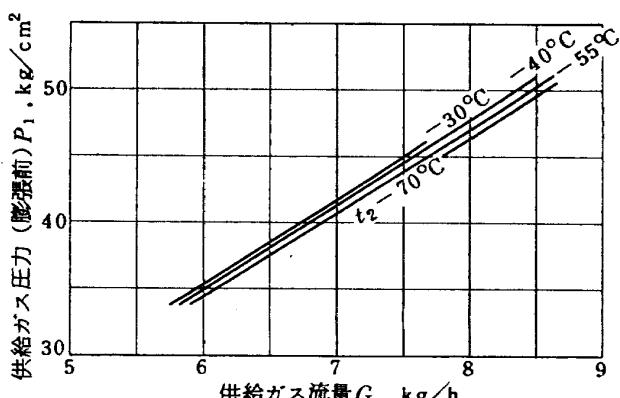


図 6 膨張ガス温度とガス供給圧・流量

温度)も検討した。なおこの場合の温度条件を、 $t_2 = -30, -40, -55$ および -70°C の4通り、 $t_r = 20^{\circ}\text{C}$ 一定とした。その他の計算条件は次の通りである。

1) 側壁における伝熱量 Q_s , kcal/h

(a) 内側面の熱伝達(強制対流での平板の層流)

$$Q_s = \alpha_{s2} \cdot A_{s2} \cdot (t_{s2} - t_{2fs}) \quad (5.4)$$

$$\alpha_{s2} = 0.664 \cdot l_{s2}^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda^2 w}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\nu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.5) \quad (3)$$

$$\text{ただし, } t_{2fs} = t_2 + \frac{1}{2} \delta t_{2s}, \quad w_{2fs} = \frac{G'}{2} \cdot \frac{1}{r_{2fs} \cdot A_{2s}}$$

右下のそえ字, $S, S2, 2S, 2fS$ は側壁, 壁の内側面, 側壁槽内, 側壁槽内平均を示す。

(b) 側壁の熱伝導

$$Q_s = \lambda_s \cdot A_s (t_{s3} - t_{s2}) / d_s \quad (5.6)$$

右下のそえ字 $S3$ は壁の外側面を, その他(a)と同じ。

(c) 外側面の熱伝達(自然対流での垂直平板の層流)

$$Q_s = \alpha_{s3} \cdot A_{s3} (t_r - t_{s3}) \quad (5.7)$$

$$\alpha_{s3} = 1.22 [(t_r - t_{s3}) / H_{s3}]^4 \quad (5.8) \quad (3)$$

右下のそえ字 r は室内を, その他(b)と同じ。

(d) 全外面の放射伝熱 Q_r , kcal/h

$$Q_r = C \cdot A_3 \cdot \epsilon_{al} \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{s3}}{100} \right)^4 \right] \quad (5.9) \quad (3)$$

右下のそえ字 $r, 3, al$ は放射, 全外面, アルミニウムを, その他(c)と同じ。

(e) 側壁からの伝熱による CO_2 ガスの平均温度上昇

$$\delta t_{2s} = Q_{sr} / GC_p \quad (5.10)$$

$$C_p = [7.0 + 6.56 \cdot \frac{T_{2fs}}{10^3} - 2.53 \cdot \frac{T_{2fs}^2}{10^6} + 3.93 \cdot$$

$$\frac{T_{2fs}^3}{10^{10}}] / 44 \quad (5.11) \quad (1)$$

$$\text{ただし, } T_{2fs} = T_2 + \frac{1}{2} \delta t_{2s}, \quad Q_{sr} = Q_s + Q_r$$

寸法その他次の通り

$$A_s = 0.0475 \text{ m}^2,$$

[側壁熱伝導面積, $\{(A_{s3} \times A_{s2})^{\frac{1}{2}}\}$]

$$A_{s2} = 0.0182 \text{ m}^2,$$

[壁の内側面積, $\{(0.13 \times 0.03 + 0.13 \times 0.04) \times 2\}$]

$$A_{2s} = 0.001 \text{ m}^2, \quad \text{[側壁内ガス通路面積,}$$

$$(0.03 \times 0.04 - 0.01 \times 0.02)]$$

$$A_{s3} = 0.1242 \text{ m}^2, \quad \text{[ガス噴出盤がないとした壁の外側面積} \{(0.23 \times 0.13 + 0.23 \times 0.14) \times 2\} \text{]}$$

$$A_3 = 0.1828 \text{ m}^2, \quad \text{[穴なしで, 壁の外表面積, ガス噴出盤を含む, } \{(0.23 \times 0.16 + 0.16 \times 0.14 + 0.14 \times 0.23) \times 2\} \text{]}$$

$$d_s = 0.05 \text{ m, [側壁厚]}$$

$$l_{s2} = 0.065 \text{ m, [側壁内ガス通路長, } (0.13 \times \frac{1}{2})]$$

$$H_{s3} = 0.23 \text{ m, [壁の外側高さ]}$$

$$\epsilon_{al} = 0.03 \quad \text{[アルミニウムの放射率]}$$

$$\lambda_s = 0.028 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}, \quad [-20^{\circ}\text{C} \text{における壁の熱伝導率}] \quad (5)$$

2) 上(下)壁における伝熱量 $Q_U (Q_L)$, kcal/h

(a) 上(下)壁内面の熱伝達(側壁と同様)

$$Q_U = \alpha_{U2} \cdot A_{U2} (t_{U2} - t_{2fU}) \quad (5.12)$$

$$\alpha_{U2} = 0.664 \cdot l_{U2}^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda^2 w}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\nu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.13)$$

$$\text{ただし, } t_{2fU} = (t_2 + t_{exU}) \frac{1}{2}, \quad w_{2fU} = \frac{G'}{2} \cdot \frac{1}{r_{2fU} \cdot A_{2U}}$$

右下のそえ字, $U, U2, 2U, 2fU, exU$ は上壁, 上壁内面, 上壁槽内, 上壁槽内平均, 上壁放出口を示す。

(b) 上(下)壁の熱伝導

$$Q_U = \lambda_U \cdot A_U (t_{U3} - t_{U2}) / d_U \quad (5.14)$$

右下のそえ字, $U3$ は上壁外面, その他は(a)と同じ

(c) 上壁外面の熱伝達(自然対流での水平板の層流)

$$Q_U = \alpha_{U3} \cdot A_{U3} (t_r - t_{U3}) \quad (5.15)$$

$$\alpha_{U3} = 1.13 [(t_r - t_{U3}) / l_{U3}]^{\frac{1}{4}} \quad (5.16) \quad (3)$$

(d) 下壁外面の熱伝達, (c)と同様

$$Q_L = \alpha_{L3} \cdot A_{L3} (t_r - t_{L3}) \quad (5.17)$$

$$\alpha_{L3} = 2.27 [(t_r - t_{L3}) / l_{L3}]^{\frac{1}{4}} \quad (5.18) \quad (3)$$

右下のそえ字, $L3$ は下壁外面を示す。

(d) 上(下)壁外面の放射伝熱

外面温度が側壁外面と同じとして, 側壁の Q_r を含む。

(e) 上(下)壁放出口における放出ガス温度 t_{exU} (t_{exL}), °C

$$\delta t_{2U} = 2Q_U / GC_p, \quad (C_p \text{ は側壁と同様}) \quad (5.19)$$

$$t_{exU} = t_2 - (\delta t_{2s} + \delta t_{2U}) \quad (5.20)$$

寸法その他次の通り。(ガス噴出盤なしとする)

$$A_U (A_L) = 0.0424 \text{ m}^2, \quad [\text{上(下)壁の熱伝導面積} \{(A_{U2} \times A_{U3})^{\frac{1}{2}}\}]$$

$$A_{U2} (A_{L2}) = 0.001 \text{ m}^2, \quad [\text{上(下)壁の内面積} (0.03 \times 0.04 - 0.01 \times 0.02)]$$

$$A_{2U} (A_{2L}) = 0.001 \text{ m}^2, \quad [\text{上(下)壁内流路面積} (0.03 \times 0.04 - 0.01 \times 0.02)]$$

$$A_{U3} (A_{L3}) = 0.018 \text{ m}^2, \quad [\text{上(下)外壁面積} (0.13 \times 0.14 - 0.01 \times 0.02)]$$

$$d_U (d_L) = 0.05 \text{ m, [上(下)壁厚]}$$

$$l_{U2} (l_{L2}) = 0.001 \text{ m, [上(下)壁内流路長, ($$

内側壁から放出口までの最短距離とする)]

$$l_{U3} (l_{L3}) = 0.134 \text{ m}, \quad [\text{上(下)外壁長}, (A_{U3}^{\frac{1}{2}}, A_{L3}^{\frac{1}{2}})]$$

夫々の計算の結果を図 7 と 8 に示す。図 7 は膨張ガス温度 t_2 が -55°C であるときの G に対する t_{s2} , t_{s3} , t_{ex} , Q_r , Q_{U-L} , Q_s および Q_t の関係を示し、図 8 は t_2 が -30 , -40 , -55 および -70°C であるときの G に対する t_{ex} と Q_t の関係を示したものである。ただし、 $t_{ex} = (t_{exU} + t_{exL}) \frac{1}{2}$, $Q_{U-L} = Q_U + Q_L$, $Q_t = Q_r + Q_{U-L} + Q_s$ である。

計算の結果から次のようなことがわかる。

(1) 本低温槽の外部からの伝热量は、側壁からの Q_s が最も大きく、上下壁の各々の Q_U と Q_L が Q_s の約 11 %、放射伝熱量 Q_r がさらに小さく約 8 %である。

(2) これらの伝熱が槽内温度に及ぼす影響については、槽内の低温ガスが常に槽上下の放出口に向って流れているため、槽上下壁からの伝熱は、側壁からの伝熱に比べて影響が少ないといえる。

(3) 伝熱による槽内低温ガス温度の上昇($t_2 - t_{ex}$)は、 $t_2 = -55^{\circ}\text{C}$, $G = 2 \text{ kg/h}$ のときでも約 5°C と僅かである。本低温槽のガス流量を図 6 に示した $6 \sim 8.5 \text{ kg/h}$ の範囲内とすれば、 $t_2 = -55^{\circ}\text{C}$, $G = 6 \text{ kg/h}$ のときには 1.7°C , $t_2 = -30^{\circ}\text{C}$, $G = 8 \text{ kg/h}$ のときには 0.9°C とさらに少い温度上昇が予想される。なお計算では、上下壁からの放出ガス温度には、ほとんど差がない。

上述のことから、本低温槽では、前項 5.1 に示した予

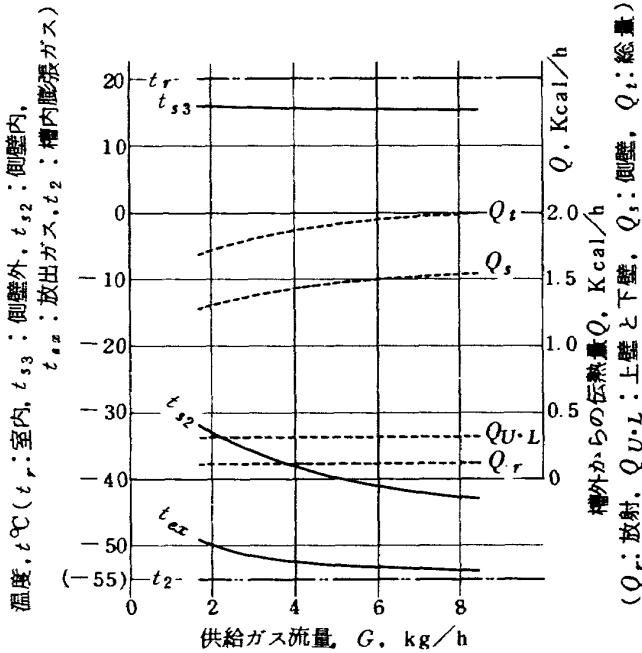


図 7 槽壁・放出ガス温度；外部からの伝热量
($t_2 = -55^{\circ}\text{C}$)

想流量が得られれば、槽内の平均ガス温度は、ほぼ膨張ガス温度 t_2 に近い値で、槽内温度分布の一様性も期待される。

5.3 ガス放出口と、試験片支持機構および外部からの伝熱

1) ガス放出口からの対流伝熱

本低温槽では、試験片支持金具と、その貫通穴との隙間の他に開口部がなく、この隙間も狭く(隙間 1 mm)て長く(50 mm)、さらに実験に当っては、ここに綿を挟む。槽内の低温ガスが常に高速でこの隙間を通って槽外に放出される。従って CO_2 ガス供給中には外部からの対流による伝熱がないといえる。

2) 試験片支持機構と金具からの伝導伝熱

試験片の支持機構は図 4 に示した通りである。試験片は、断熱材としてサンドペーパーを挟んで支持金具にボルト・ナットで固定する。支持金具は、一端が槽外で、隙間のある十字ビン継手を介して試験機の把み板にビン接合される。この十字ビン継手には種々の配慮⁽⁶⁾があり、この継手を用いることで、支持機構は負荷に対する自在性がある他、次に述べるような断熱性も期待される。また低温槽は支持機構と互いに接触しないため、負荷に対する試験片の変形、振動および破断に対し何等支障にならない。

本低温槽では、槽内の低温ガスが支持金具と穴の狭い隙間を常に高速で流れているため、支持金具と継手等はこの低温ガスで強制冷却される。しかも金具等を冷却し

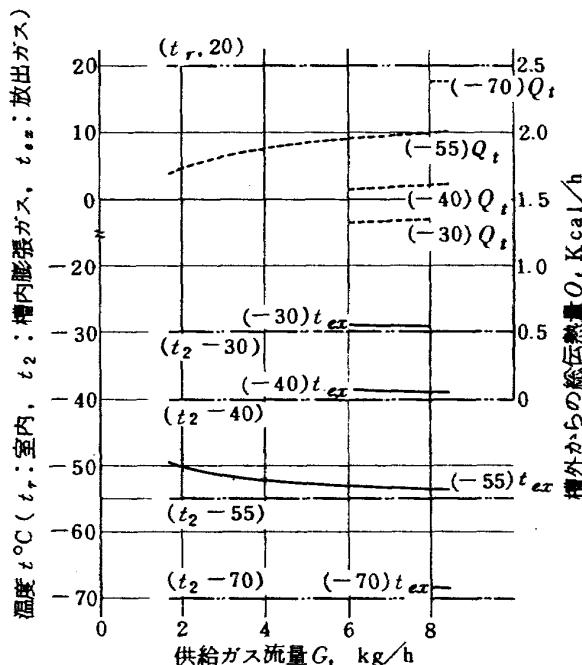


図 8 放出ガス温度；外部からの伝热量

た低温ガスは槽外に放出されて再び槽内に逆流するところがない。放出ガス温度は、前項 5.2(図8)に示したように、膨張ガス温度 t_2 より僅かに高いだけである。試験片、支持金具および継手等は、いずれも熱の良導体で、しかも小型であるため熱容量が小さく、金具および継手のピン穴とピンの接触領域が僅かであり、試験片は完全に槽内に収納され、また支持金具の大部分は槽内または低温ガスの放出路の中である。これらのことから、試験片や支持金具等は、ガス噴出(冷却)開始とともに温度が急速に降下し、また定常状態では相互の温度差が僅かになり、支持機構の外部からの伝導伝熱に対する試験片の断熱効果を期待した。これについては後節の低温試験において考察することとした。

5.4 ガス供給法、温度検出法その他

1) ガス供給法

CO_2 ガス供給源としては、 -55°C で約3時間(予想流量 20 kg/h)の連続使用を考慮し、第2種(気体放出式)液化 CO_2 の30kg入りポンベ2本を並列連結にして設置することにした。このポンペと槽との配管には、ポンペ側で内径6φ、外径8φの銅管、低温槽側では内径4.8φのフレキシブル高圧管を用いた。これらには、いずれも保溫や断熱の対策を講じないことにした。ガス供給方法は、取扱いを容易にするため、所要の槽内温度が得られるように、ポンペの放出弁を手動で開閉することで、ノズル前のガス圧 P_1 を制御することにした。なお3時間の連続使用時間では、当所の高速型疲れ試験機(島津UV-1)⁽⁶⁾を用いて、繰返し数 $N = 5 \times 10^5$ まで可能である。

2) 槽内の温度検出

温度検出には熱電対を用いた。これについても、槽外からの伝熱を少なくするため、金属や磁性の保護管を避け、ガラス纖維で被覆しただけで切損の恐れのない太さで、検出感度が高いこと等を考慮して、素線径0.65φの鉄・コンスタンタン(I・C)熱電対を用いることとした。温度指示計には、測定範囲 $+50 \sim -150^{\circ}\text{C}$ の特製ミリボルト計を用いた。温度検出位置は、図3と4に示したように、ノズル取付位置の反対側壁面である。

3) 槽内温度分布対策

ノズルからの噴出ガスを直接試験片に吹付けないこと、槽内の熱容量を大きくして急激な温度変化を少なくすること、ノズル噴流を速やかに緩慢な流れにすること、噴流に含まれる恐れのあるドライアイスが広範囲に飛散することの防止、および槽内温度分布の均一性を期待し、槽内には“しわ”にしたアルミニウム箔を敷き詰めることとした。

6. 低温性能試験とその結果および考察

本低温槽の性能試験は、実際に低温疲れ試験を行う場合と同じ条件で、前3節の図2に示した膨張条件で、所要の温度が得られることの他、温度変化特性、一定温度持続時間、ガス消費量および槽内温度分布等を調べる目的で行った。以降に試験方法と結果について述べ、その考察を行う。

6.1 温度変化特性試験

本低温槽では、 CO_2 ガス噴出と同時に槽内には低温ガスが充満するため、槽内温度の降下速度が早いことが予想される。

図9は P_1 一定で5分間ガス噴出したときの槽内温度の降下・上昇曲線を示したものである。図に記入した P_c は噴出停止後のポンペ内圧である。

試験結果では、ガス噴出開始後の約30秒間はほぼ直線的に温度が降下し、その後は緩やかな温度降下が続くことがわかった。前者は低温ガスが槽内に急速に満たされる状態を示している。後者については、槽壁等が冷却されて温度が降下することと、ポンペ内の CO_2 液が液体自身から気化熱を吸収して蒸発するため、液温 t_c と蒸発ガスの温度が徐々に低下し、併せて t_1 も降下することによるといえる(図2参照)。

なお、 t_1 が降下しても $P_1 < P_c$ のうちは t_2 は上昇しないが、ガス噴出時間が長くなると P_c がさらに低下するため、所要の P_1 が得られなくなり、ついに t_2 を一定に保つことができなくなる。それまでが本低温槽の連続使用時間である。この時間を延ばすには、蒸発に要する熱量をポンペ外部から供給することである。これにはポンペの直接加熱は危険であるため、適度の温風加熱か、ポンペの数を増すことが有効であろう。

前3節で述べたように、 P_1 が高く、 t_1 が低い場合には噴出ガスにドライアイスが含有することが予想される。この含有量が多い場合には、ドライアイスは槽内で昇華しきれなくなつて蓄積するようになる。このような恐れのある膨張条件は、膨張前のエンタルピが、 $i_1 = 154 \text{ kcal/kg}$ 以下($t_c = 5^{\circ}\text{C}$, $P_c = 50 \text{ kg/cm}^2$ 以上)と予想され、また、この条件では膨張ガスの温度 t_2 が低温限界になると考えられる。図9の曲線のうち、 $P_c = P_1 = 56.5 \text{ kg/cm}^2$ の条件で得られた試験結果では、噴出開始後の約20秒間で室温から -78°C まで降下するが、その後は一定温度のままである。この温度が本低温槽の低温限界であり、これは一気圧におけるドライアイスの昇華温度の -78.9°C にほぼ一致している。この試験例では、他の例と異なり、噴出停止後の約40秒間

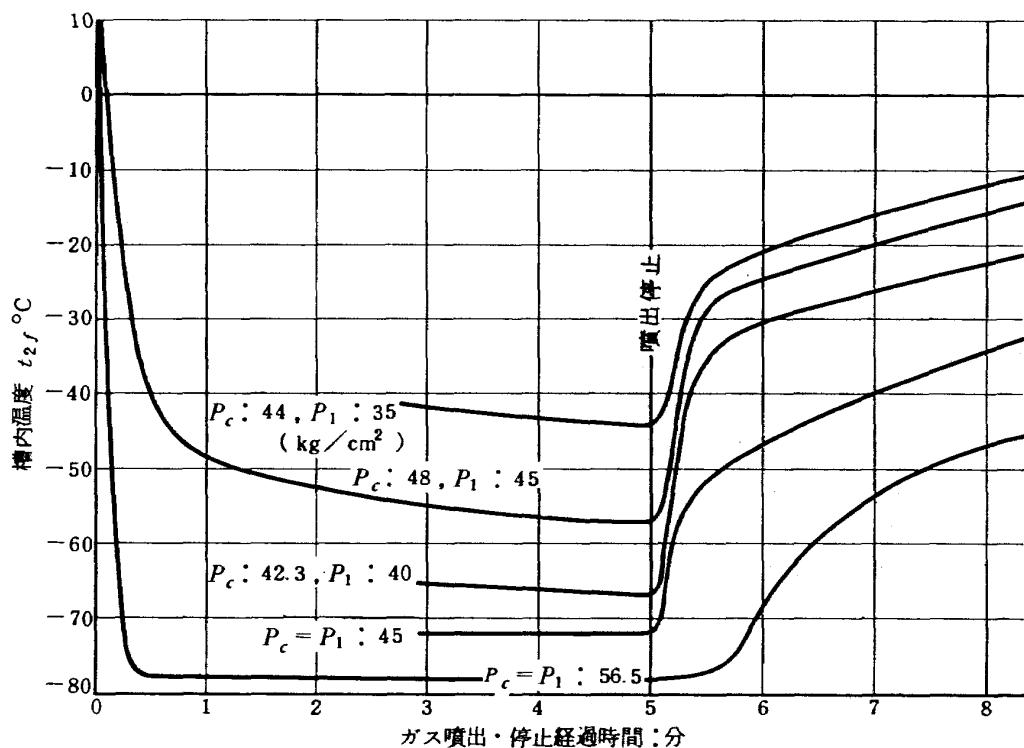


図 9 槽内温度の降下・上昇～時間曲線

はかなり緩やかな温度上昇を示すことから、槽内に蓄積したドライアイスが徐々に昇華しているものといえる。試験後の槽内の観察でも、ノズル出口周辺にドライアイスが残っていることを確認した。なお、この場合でも、槽内には水蒸気が凍結した形跡は全く認められなかった。

6.2 降下温度試験

この試験では、前項の試験と同様に、種々の P_1 で数分間ガス噴出したときの槽内温度 t_{2f} を測定し、図 2 の線図から推定できる膨張ガス温度 t_2 と比較した。なお、図 2 から t_2 を推定するには t_1 も実測する必要があるが、ここでは、ガス噴出停止後の P_c を実測し、図 2 の飽和曲線 ($t_c \sim P_c$) から t_c を求め、 $t_c = t_1$ と仮定した。

図 10 に実験結果を示す。実験結果では、図に示した測定値は、その 75 % のものが $t_{2f} = t_2 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲内であった。このことから、図 2 に示した線図から、槽内温度をほぼ推定できることと、この槽における低温生成がほぼ等エンタルピ膨張によるものであることがわかる。

本低温装置では、ガス噴出開始とともに、ポンベ内の CO_2 液温 t_c が低下し、これに伴って蒸発するガス温度も低くなるが、これより高い温度のガスがポンベ内に残留することと、ガスがノズルから噴出するまでの配管等からの伝熱により、ノズル前のガス温度 t_1 は、 $t_c < t_1 < t_2$ である。特にガス噴出が長時間にわたるときや、ポンベ内の液量が少ないとときには t_c と t_1 の差が大きくな

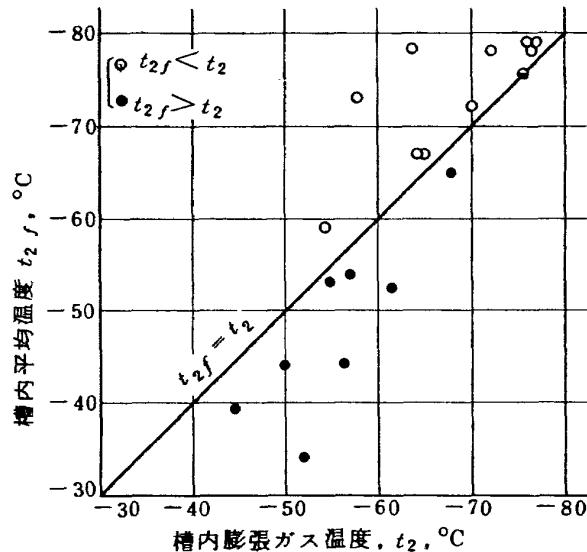


図 10 槽内温度降下

なるといえる。従って $t_1 = t_c$ と仮定したときには、実際の t_1 より低く見積ることになる。他方では、ドライアイスが槽内に蓄積するような状態では、等エンタルピ膨張とみなせなくなり、 $-78.9^\circ\text{C} < t_{2f} < t_2$ になることもある。図 10 に示した測定値のうち、 $t_{2f} = t_2$ より著しく離れているものは上述の 2 つの理由によるといえる。

6.3 槽内温度分布、ガス消費量および断熱効果等 低温槽の温度分布については、できるだけ均一である

ことが望ましい。これについては、前5節で述べたように、アルミニウム箔を“しわ”にして槽内に敷き詰めたことの他、試験片の支持機構、低温槽の構造および温度検出等の種々の断熱対策、および適切なガス供給等によって温度分布の均一性を期待した。

温度分布を調べるために、3本の熱電対を試験片長手方向に等間隔に取付けて温度を測定した。結果では、夫々の指示値が、これらの平均値の -55°C に対し約 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ で、この種類の熱電対の等級(0.75)に対する許容誤差の範囲内であった。また槽内監視用熱電対の指示値ともよく一致し、温度の降下・上昇についてもほぼ一様な指示が得られ、槽内温度分布が良いことと、試験片の温度が槽内温度にほぼ追従することを確認した。これらは、前5節で検討した低温槽や試験片の断熱性、および温度分布対策等の効果がほぼ期待したように得られていることを示す。

一定温度の持続試験では、30 kg入ポンベ2本の並列連絡で、充分な液量があれば、 -55°C で約3時間一定温度に持続できることも確認した。

図11は、槽内温度を -55°C 一定に一時間持続したときの経過時間に対する P_1 の変化の一例を示したものである。図の右側縦軸には、図6に示した P_1 に対する流量 G の目盛を付記した。この図の曲線を積分した平均流量は約 6.7 kg/h であり、このときの実測流量 6.8 kg/h とほぼ一致している。これについても前5.1節で検討したガス供給量の推定がほぼ妥当であることを示す。

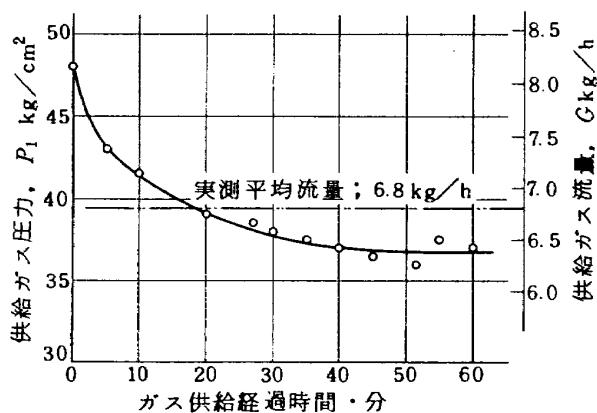


図11 ガス供給時間と圧力・流量($t_2 = -55^{\circ}\text{C}$, 一定)

7. むすび

ポンベに充てんされている液化 CO_2 の高圧の気化ガスが一気圧まで等エンタルピ膨張するときの膨張条件と降下温度の関係について調べ、この現象を利用した低温装置の機構の概要と、小型材料試験用低温槽の構造と断熱

性およびガス消費量等について検討した。

なお、この装置の低温性能試験も行い、その結果から、本装置は、極めて単純な構成で、低温槽も小型軽量であり、取扱いが容易であるにもかかわらず、予期したように、試験片および槽内の温度降下が早く、温度調整も容易であり、温度分布が良好で、水蒸気が凍結することもなく、2~3時間所要の温度を一定に持続できること等が確認された。また、本装置を用いて、薄板の接着継手の低温における疲れ試験と静引張試験⁽⁶⁾を行い、負荷に対する試験片の変形や振動および破断に対し低温槽が何等支障にならないこともわかり、本装置は充分実用性があることを確認した。

本装置では、温度調整が手動であり、またガス供給能力も少ないため、 -55°C で一定に持続できる時間が約3時間である。この装置に自動温度制御と、試験片破断時の自動停止との機能を備え、さらにガス供給能力を増すことと、より長時間の疲れ試験等に供することができる。なお、この槽に対する試験片支持機構にピン継手が使用でき、これが断熱対策に有効であった。これは負荷条件が軸方向の片振引張荷重であることによるもので、ピン継手が使用できないときには、支持機構からの断熱対策に充分な配慮が必要であろう。

終りにのぞみ、この低温装置の検討に当り、種々貴重なご助言を戴いた東京大学の甲藤教授、当所原動機部の松木部長、近藤、宮地、鈴木、能瀬の各研究室長に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 高圧ガス技術便覧；(昭和36) PP. 291~308, 産業図書
- (2) 柏場重男・柏場重正；解説工業熱力学，(昭和36) PP. 168~169, 共立出版
- (3) 機械工学便覧, (昭和37) PP. 11~15~65, 日本機械学会
- (4) Warren H.Giedt (横堀進・久我修 共訳) : 基礎伝熱工学(昭和35) PP. 213, 丸善
- (5) 小谷敏雄他3名;保冷材の伝熱特性, 日本機械学会誌, Vol. 65, No. 525 (1962/10) PP. 109
- (6) 池田為治・藤沢良昭;薄板接着継手の疲れ強さについての実験的研究, 航技研報告 TR-432(昭和50)

航空宇宙技術研究所資料312号

昭和51年9月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武藏野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社共進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)

Printed in Japan

This document is provided by JAXA.