

# 液体水素タンク用断熱構造の一試験

小野田 淳次郎・今 沢 茂 夫・森 大吉郎  
砂 川 恵・秋 葉 鏡二郎・棚 次 亘 弘

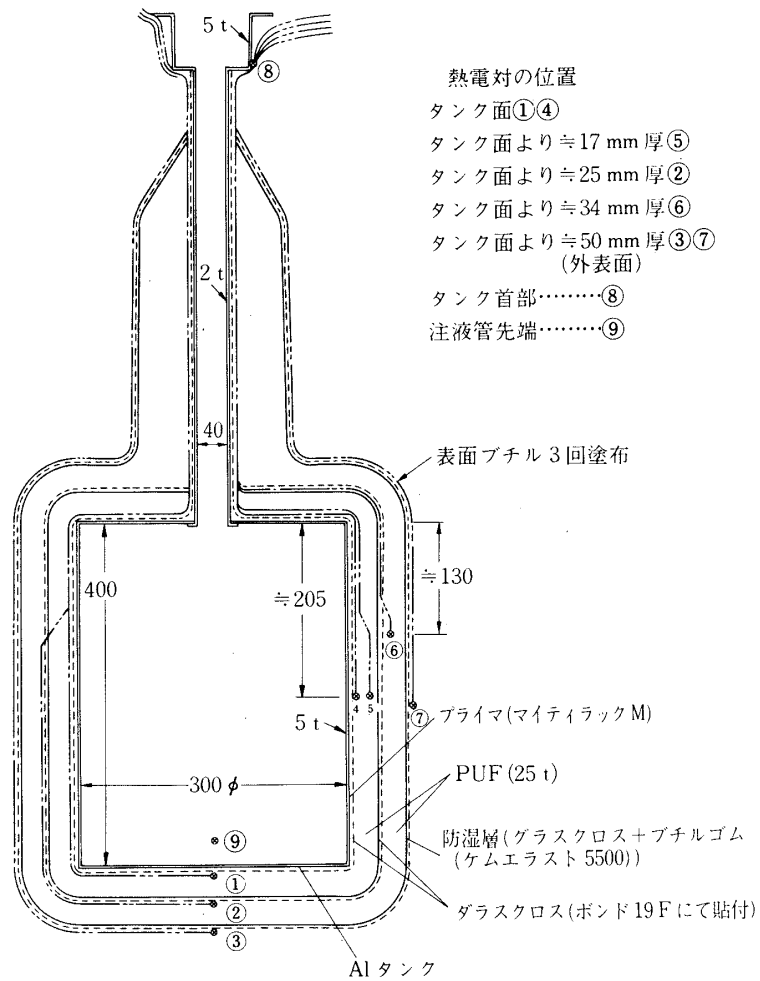
## 1. はじめに

液体水素ロケットタンクには断熱が必要であり、この場合の断熱材としてはポリウレタンフォーム（PUF）が最も広く用いられている。タンクに断熱を施す場合には、断熱特性等のほかに、液体水素をタンクに注液した場合の、タンク面と断熱層との密着性及び断熱層の強度の確保、断熱層表面の防湿層及び保護層などの問題についても考える必要がある。また、これらの性能は PUF の発泡条件等施工時の各種条件により大きく影響を受けることが考えられ、適切な施工技術の確立が必要である。そこで液水ロケットタンク用断熱構造及びその施工技術の研究のために、容積約 28 l のモデルタンクに PUF を用いて断熱施工を行い、これに液体水素を注液して断熱構造の性能及び耐候性試験を行った。

## 2. 供 試 体

試験に用いた供試体は、第 1 図に示すように、内径 300 mm、高さ 400 mm、板厚 5 mm の円筒形アルミ容器に断熱施工を行ったもので、同図に示した断熱構造のもの（Type B）及び図中の断熱層中央の補強グラスクロス層を省いたもの（Type A）の 2 体である。各供試体の首部は内径 40 mm、長さ 500 mm、板厚 2 mm である。容器及び首部への断熱施工は概略次の手順によって行われた。

- 1) タンク表面処理（ペーパー磨き、脱脂処理）
- 2) プライマ処理（マイティラック M）
- 3) 接着剤塗布（ボンド 19 F）
- 4) 補強グラスクロス貼付
- 5) PUF 第 1 層吹付発泡（厚さ約 30 mm）
- 6) 厚さ調整（サンダー削りにより 25 mm に）
- 7) 接着剤塗布（ボンド 19 F）…… Type B のみ
- 8) 補強グラスクロス貼付…… Type B のみ
- 9) PUF 第 2 層吹付発泡（厚さ約 30 mm）
- 10) 厚さ調整（サンダー削りにより全厚さ 50 mm に）
- 11) ブチルゴム塗布（ケムエラスト 5500）
- 12) グラスクロス貼付
- 13) ブチルゴム塗布（ケムエラスト 5500）



第 1 図 断熱材試験供試体

第 1 表 断熱構造厚さ (平均値, mm)

	Type A	Type B
容器部平均厚さ	50.4	50.4
首部平均厚さ	55.8	51.6

上記手順 10) 終了後の断熱構造厚さ測定結果 (平均値) を第 1 表に示す. 本供試体を使用した PUF の物性値を求めるために, 断熱施工時に同一条件で約 200  $\phi$  の円筒に PUF を吹付発泡させ, これより試験片を切出して各種測定を行った結果を第 2 表に示す. 同表の各値は 2 ~ 6 個の試験片による測定結果の平均値である.

これら供試体は, 本試験実施の約 7 か月前に断熱施工したものである. その間供試体 B は通常に保管したが, 供試体 A は本試験の約 4 か月前に液体水素の注液を試み(最低温度約 30K),

第2表 使用した PUF の物性値

比 重			0.0522
熱伝導率 (at 297 K)(kcal/(m·h·K))			0.0154
低温寸法安定性 ( $\Delta L/L$ ) (296 K $\rightarrow$ 253 K) $\times$ 48時間, (%)	// 方向		- 0.02
	$\perp$ 方向		- 0.04
線膨脹率 (室温 $\sim$ 108 K)		$\perp$ 方向	$7.3 \times 10^{-5}$
独立気泡率 (%)			91.2
引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	室 温	// 方向	5.0
		$\perp$ 方向	4.6
	108 K	// 方向	5.5
		$\perp$ 方向	5.0
引張伸び率 (%)	室 温	// 方向	7.7
		$\perp$ 方向	11.4
	108 K	// 方向	3.0
		$\perp$ 方向	3.2
弾 性 率 (kgf/cm <sup>2</sup> )	室 温	// 方向	89
		$\perp$ 方向	72
	108 K	// 方向	224
		$\perp$ 方向	208

“//” はタンク壁面に平行方向, “ $\perp$ ” は垂直方向を示す.

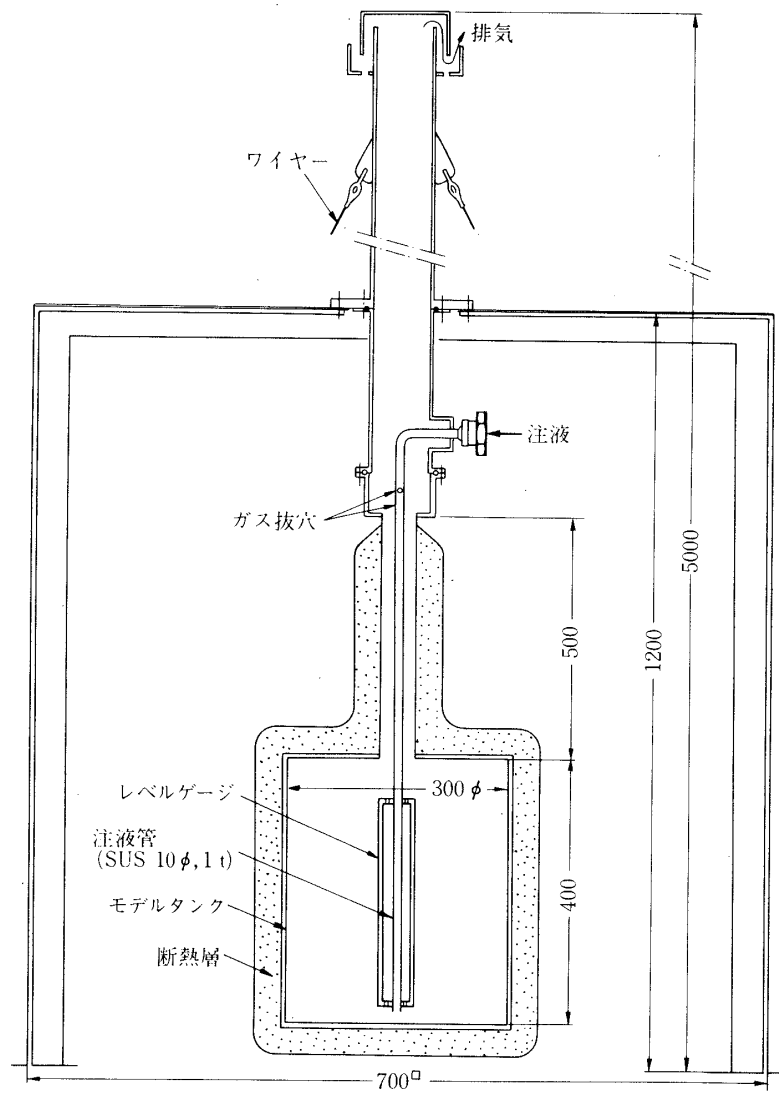
海岸の砂を含む強風と雨とにさらしたことがある.

### 3. 試験装置及び方法

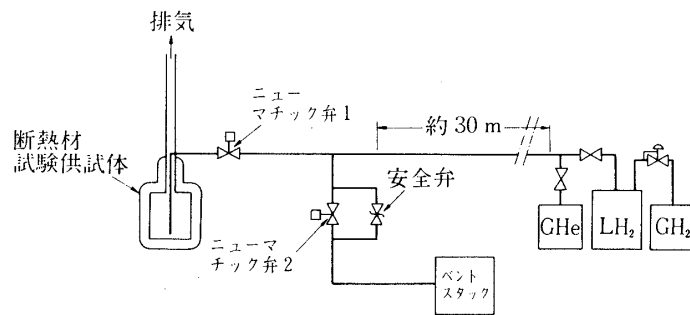
上記の供試体に液体水素を注液し, 供試体内の全液体水素が蒸発するまで液位及び各部の温度測定を行った.

試験は屋外の日陰で行い, 供試体は第2図に示すように首部で支えた. 液体水素はニューマチック弁の遠隔操作により, 約30 m離れた液水貯蔵タンクから移送注入した [1]. 注液系の概略を第3図に示す. ベントスタックは, 注液終了後移送管内の液体水素を廃棄するためのものである. 配管及びバルブ類の断熱は, 約30 mの真空断熱の移送管を除き, すべてグラスウールなどによる簡易断熱とした. 供試体への液体水素の注入及びガス化した水素の排気は第2図に示すようにして行い, 供試体に内圧をかけることは避けた. なお, 供試体Aの試験終了直前及びBの試験開始直後から雨となったが, 試験中供試体に直接多量の雨がかかることは無かった.

液位の測定は, 第2図に示すように注液管の先端に取付けた静電容量型液位計により行っ



第2図 注液方法



第3図 配管系概略

た。液位計の校正は、液体窒素を用いて、液体及び気体の水素と窒素との誘電率の違いを考慮して行った。温度計測は断熱施工時に断熱層内にあらかじめ埋込んである熱電対など第1図に示す合計9点の熱電対を用いて行った。使用計測器の概略を以下に示す。

液位計	静電容量型	田丸電機製
	センサ：25 φ，30 φ同軸ステンレスパイプ	
	測定範囲：370 mm	
温度計	Co・Au-Cu 熱電対	エンゲルハード社製他
記録器	ペンレコーダ	理化電機 MOOEL BK-681L
	デジタル電圧計	FLUKE MODEL 75417

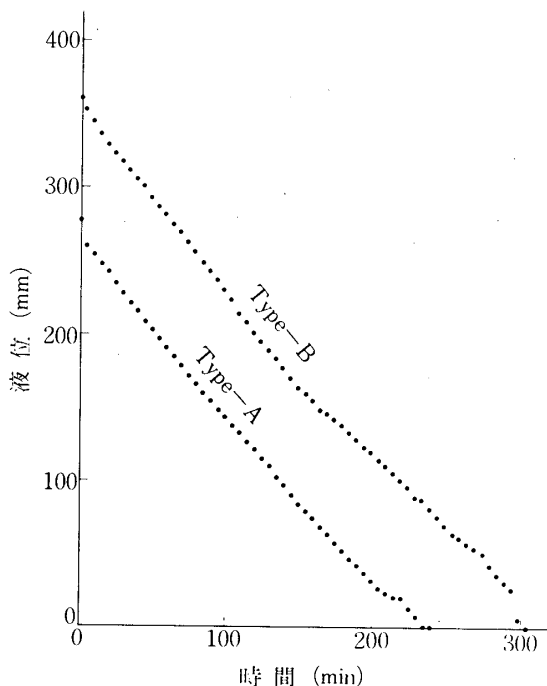
#### 4. 試験結果

##### 4.1 外 観

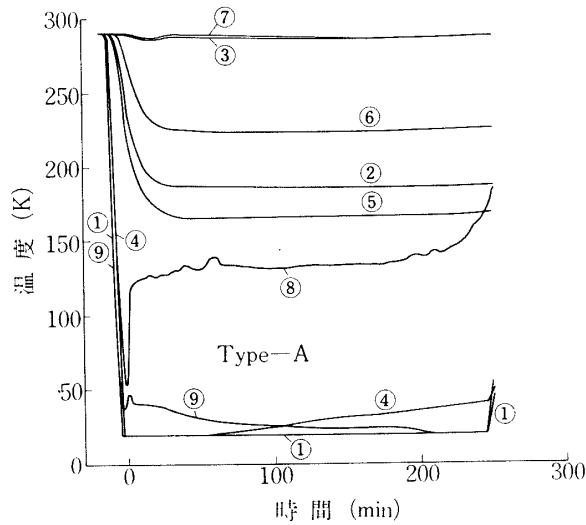
供試体Bについては外観上の異常は認められなかったが、供試体Aには試験後表面に直径3 mm～10 mm程度の円形のふくらみが20個程度現れていた。供試体Aは前述のように砂を含む強風や雨にさらされたために、防湿層が劣化して浮き上がった疑いがある。

##### 4.2 液 位

液位計測結果を第4図に示す。横軸は注液停止後の時間である。供試体Bでは、雨中の遠隔測定のためか、試験末期にはノイズが大きくなり、データの質はやや低下している。液位低下速度は供試体Aでは比較的一定であるが、供試体Bでは前半と後半とで若干差が見られる。しかし、いずれについても試験途中における急激な断熱性能の低下などの異常は見られない。平均低下速度について見ると、共に約1.1 mm/min程度で大差はない。



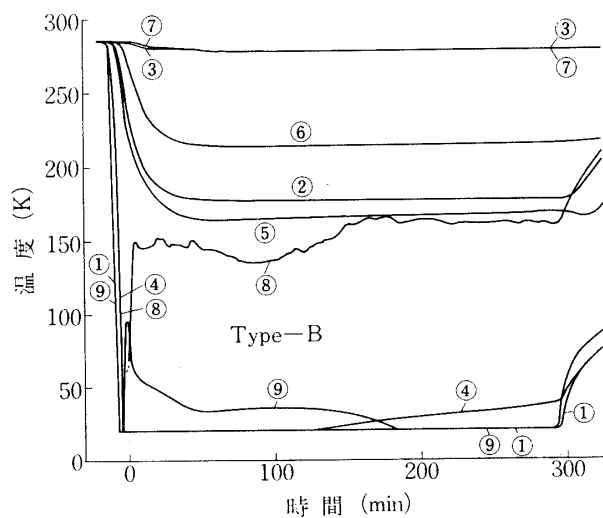
第4図 液位計測結果



第 5 図 (a) 温度測定結果 (供試体 A)

### 4.3 温 度

第 5 図に温度測定結果を示す。断熱層内の温度分布は注液終了後約 40 分ではほぼ定常状態に達している。タンク底部表面付近の温度①は終始ほぼ液水温度となっている。タンク側面表面付近の温度④は、最初は液水温度であるが、途中から徐々に上昇しており、液体水素の液位が熱電対④の位置より低くなると、温度が上昇し始める様子が分かる。注液管先端の温度⑨は注液終了直後はやや高く、その後徐々に液水温度に近づいている。注液終了後は第 3 図のニューマチック弁 1 を閉じるために、この弁と供試体との間の管の中に残された液体水素が気化して注液管から排出される。注液管には第 2 図に示すように直径 3mm のガス抜き



第 5 図 (b) 温度測定結果 (供試体 B)

穴を4個明けてあるが、注液停止直後には急激に気化して注液管下端からもガスが排出され、液水温度より高い温度が計測されることが考えられる。しかし、管の中に残った液体水素の気化に長時間を要するとは考え難く、上記の議論では計測結果を十分に説明することはできない。

#### 4.4 断熱特性

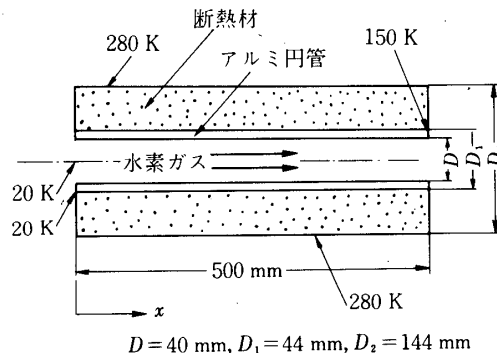
PUF等の熱伝導率は温度に大きく依存するが、ここで、全断熱構造の熱伝導率を一定とみなした時の等価的熱伝導率 $\lambda_{eff}$ を、液位の低下速度から求める。モデルタンクへの流入熱量は、断熱構造を通過して入る熱量及び首部のアルミ部分から固体伝導として流入する熱量のみと考える。またアルミ容器の温度は一様で、液水温度に等しいと仮定する。両供試体とも液体水素の蒸発速度は約4.8 l/hであり、蒸発潜熱を107.8 kcal/kg、液水の比重を0.0707とすると、全流入熱量は36.6 kcal/hとなる。簡単のために、首部上端は150 K、下端は液水温度(20 K)と考え、付録に示すようにして内部の低温水素ガスや外部からの熱入力を考慮すると、首部から容器への流入熱量は12.0 kcal/hと算定される。円筒部断熱構造については軸対称の熱伝導を、上下の平板部については平面的熱伝導を仮定すると、上記値より $\lambda_{eff} = 0.008 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ を得る。この値は常温における値の約1/2である。

### 5. むすび

液水ロケットタンク用断熱構造の液水温度における性能確認のための試験を行った。試験は断熱構造の中央に補強ガラス層のあるものと無いものと2供試体について行ったが、両者の断熱特性には大差はなく、等価熱伝導率は約 $0.008 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ であった。一方の供試体は、本試験の約4か月前に、雨と砂を含む強風とにさらされるなどの悪環境にも置かれたものであり、これらが一応所期の性能を発揮していることから、防湿層についての若干の改良の余地を残しながらも、基本的には断熱構造の実用への見通しを得たと考えている。

本供試体は現在解体検査により剥離、クラック等の有無、物性の変化の有無等を確認中であり、その結果については別途報告したい。

なお、本試験は航空機環境研究設備費による液水貯蔵性試験装置を用いて行ったものであ



第6図 供試体首部の熱計算モデル

る。

本試験を行うに当り御協力頂いた東大宇宙研究液水実験班の方々ならびに供試体製作を担当された三菱重工高砂研究所の方々に深く謝意を表する。

1978年12月9日 新設部(工学)  
航空力学部

### 付 録 首部からの熱流入量の評価

首部を第6図に示す様にモデル化し、定常状態の温度分布及び熱流量を以下の関係式及び境界条件を用いて求めた。

記 号

- $T_G$  : 水素ガス混合平均温度 [K]
- $T_W$  : アルミ円管温度 [K]
- $T_O$  : 断熱材外側表面温度 [K]
- $k_G$  : 水素ガス熱伝導率 [kcal/(m·h·K)]
- $k_W$  : アルミ熱伝導率 [kcal/(m·h·K)]
- $\mu$  : 水素ガス粘性係数 [kg/(m·h)]
- $C_P$  : 水素ガス定圧比熱 [kcal/(kg·K)]
- $G$  : 単位断面積あたりの水素ガス重量流量 [kg/(m<sup>2</sup>·h)]
- $h$  : 熱伝達率 [kcal/(m<sup>2</sup>·h·K)]
- $A$  : アルミ円管断面積 [m<sup>2</sup>]
- $\lambda$  : 断熱材の熱伝導率 [kcal/(m·h·K)]
- $D, D_1, D_2$  : 第6図参照

方程式

$$\frac{dT_G}{dx} = 4h(T_W - T_G)/(DGC_P),$$

$$\frac{d}{dx} \left( A k_W \frac{dT_W}{dx} \right) = \pi Dh(T_W - T_G) - 2\pi\lambda(T_O - T_W)/[\ln(D_2/D_1)],$$

$$\text{熱流入量} = \left( k_W A \frac{dT_W}{dx} \right)_{x=0}$$

ここでは断熱材内部の  $x$  方向への熱の流れは考えていない。また熱伝達率は次式によった [2].

$$hD = 0.023 k_G (DG/\mu)^{0.8} (\mu C_P/k_G)^{0.4}$$

境界条件

$$T_G = T_W = 20 \text{ K}, \quad x = 0 \text{ m において,}$$

$$T_W = 150 \text{ K}, \quad x = 0.5 \text{ m において,}$$

$$T_O = 280 \text{ K}, \quad (\text{一定}).$$



使用数値

$$G = 270 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}), \quad k_w = 200 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}),$$

$$\lambda = 0.01 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}).$$

各温度に於ける  $k_G$ ,  $\mu$ ,  $C_p$  は文献 [3] によった.

#### 参 考 文 献

- [1] 秋葉ほか：液体水素の送液実験，東京大学宇宙航空研究所報告，**14** (1978)，pp. 531 - 539.
- [2] Giedt, W. H. (横堀，久我訳)：基礎伝熱工学；丸善 (1960).
- [3] Mc Carty, R. P.：Hydrogen Technological Survey：Thermophysical Properties, NASA SP-3089 (1975).