

8 超低温タンクの防熱方式 (I)

正 上 村 晃

(船舶技術研究所)

1. はしがき

近年液化天然ガスの低温輸送等の目的から超低温域における保冷層の防熱方式が問題となってきた。筆者はこれらに対処するため、これまで比較的明らかでなかった、各種保冷材の超低温域における熱伝導率特性、熱収縮特性および機械的強度特性などを明らかにし、超低温域における適用性を比較検討した。また、熱伝導率が小さく、吸水、吸湿性が少なく、自己接着性を有し、かつ現場発泡が可能であるなど他の保冷材にみられない特色を有する硬質ウレタンフォームを主保冷材に用い、金属との熱収縮対策としてグラスウールを組合わせて保冷層を構成した場合のメンブレンタンクについて、保冷層内の温度分布、自然蒸発率および層内の損傷状況等の実験的研究を行ったので、その結果を述べる。

2. 各種保冷材の超低温域における特性

2.1 超低温試験装置および測定方法

試験雰囲気温度を常温から超低温域まで急速に冷却し、その後任意時間一定温度に保持するため図-1のごとき試験装置を用いた。本装置は低温槽、温度制御装置、冷却装置より構成されており、液体窒素加圧貯槽(容量1,500 l)から低温槽(850 X 500 X 650 mm)へ一定圧力で送り出された液体窒素が、温度調節計と連動する電磁弁を通り、低温槽内に設けられたノズルより噴霧され、液体窒素の気化熱で設定温度まで冷却するようになっている。

この試験装置を基本設備とし、低温槽内に定常熱流、絶対法の Guarded Hot Plateを組み込んで、保冷材の超低温域における各温度の熱伝導率の測定を行ない、熱伝導率と温度との関係を求めた。

また、差動トランスをトランスジューサとする熱収縮量測定装置を

考案し、試料支持部を低温槽内に組み込んで、保冷材の各温度における熱収縮量の測定を行ない、熱収縮率と温度との関係を求めた。さらに、保冷材の超低温域における機械的強度特性を調べるため、低温槽内で強度試験が可能ないように基本設備に付加装置を取り付けた。そして、保冷材の超低温域での引張試験、圧縮試験を行ない、引張

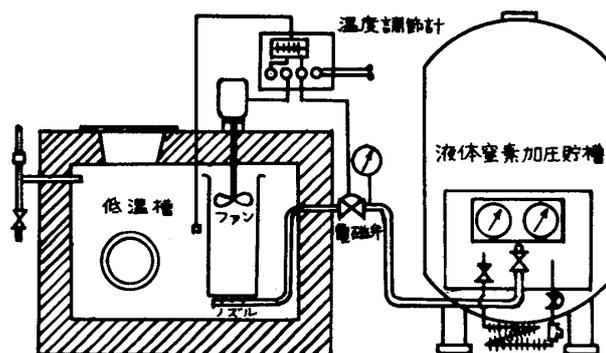


図-1 超低温試験装置

強さと温度との関係、圧縮強さと温度との関係を求めた。

2.2 測定結果と考察

プラスチックフォームを主とした10種類の保冷材について平均温度-50, -100, -130, -160℃において熱伝導率を測定した結果は図-2のごとくである。一般に温度の低下とともに熱伝導率はほぼ直線的に減少する。しかし、フォームガラスは他のものと異なり、-100℃付近までは温度とともに熱伝導率は小さくなるが、-100~-150℃付近では逆に大きくなる。そして、-150℃よりさらに温度が低下すると再びその値は小さくなる。

保冷材は一般に10%圧縮付近において一次破壊を起す。このような状態下におけるものと常態下のものとの熱伝導率の温度特性の比較をしたものが図-3である。10%圧縮状態のものは常態下のものよりかさ比重が増したにもかかわらず、熱伝導率が-40℃付近で約6%小さくなるが、-160℃付近では殆んど同じ値を示した。

図-4は0~-180℃までの各種保冷材の熱収縮特性である。いずれも-100℃付近までは直線的に収縮率は変化するが、-100℃をこえると収縮率のふえ方はやや減少し、二次的に変化する。この種の保冷材の0~-100℃における平均線膨張係数は $40 \sim 70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。10%圧縮状態下のものは常態下のものより低温になるにつれて収縮率は大きくなり、-160℃付近で20~50%大きくなった。

引張試験、圧縮試験はDIN 53 455 および421に準拠して、表-1の供試材について行なっ

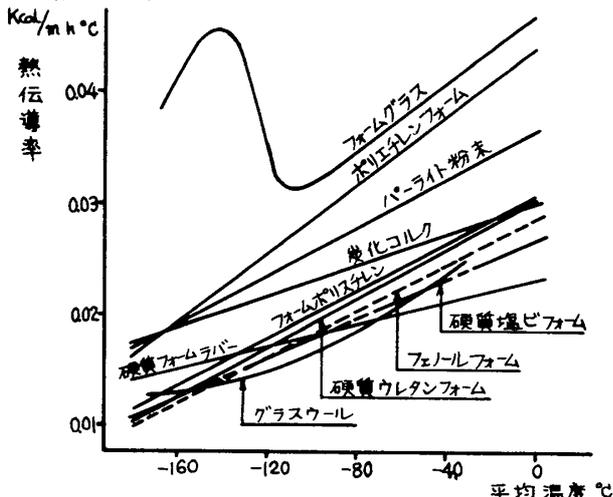


図-2 保冷材の熱伝導率と温度との関係

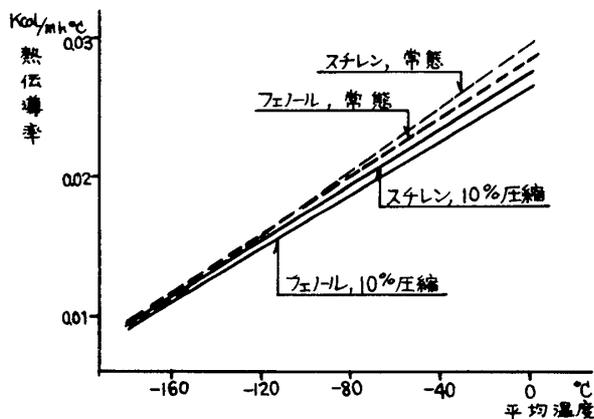


図-3 10%圧縮状態下と常態との熱伝導率の比較

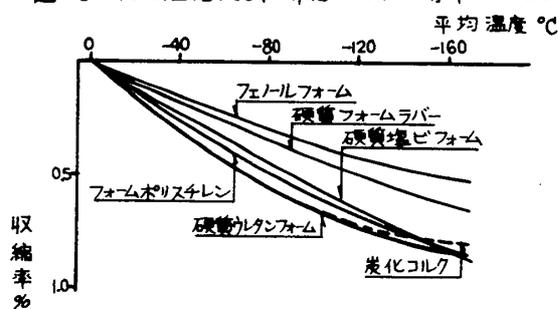


図-4 保冷材の熱収縮率と温度との関係

表-1 供試材

試料番号	供試材	かさ比重
1	炭化コルク	0.116 g/cm ³
2	フォームポリスチレン	0.020
3	硬質フォームラバー	0.053
4	硬質塩ビフォーム	0.043
5	硬質ウレタンフォーム	0.043
6	フェノールフォーム	0.035
7	ポリエチレンフォーム	0.038
8	フォームガラス	0.142
9	パーライト粉末	0.064

た。引張強さと温度との関係は図-5に示すごとく、大半のものが温度の低下にとま
ないや、強度を増すが、またはそれ程変化しない傾向を示した。しかし、ポリエチレ
ンフォームと硬質ウレタンフォームBはこれに反し減少した。圧縮試験では一次破壊
をおこした点をその試験片の耐圧荷重として、圧縮強さを求めた。図-6に圧縮強さ
と温度との関係を示す。

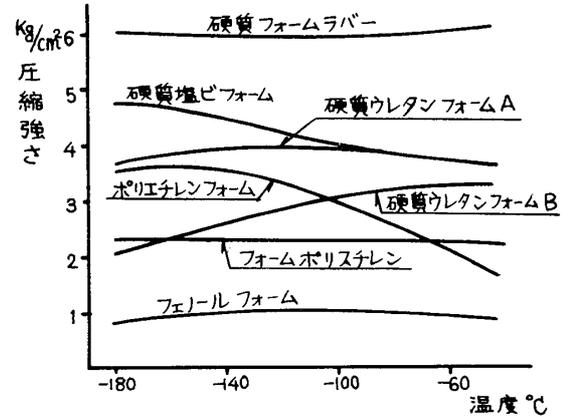
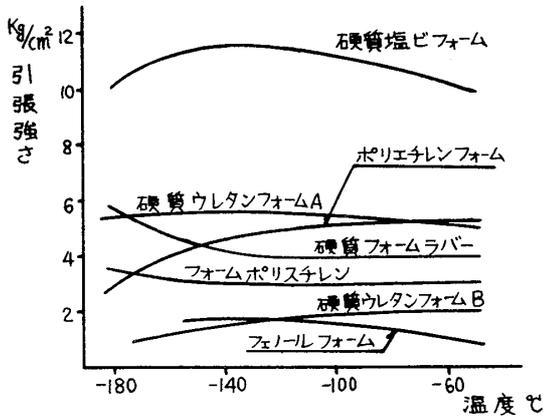


図-5 保冷材の引張強さと温度との関係

図-6 保冷材の圧縮強さと温度との関係

3. 硬質ウレタンフォームとグラスウールを組合わせた防熱方式

3.1 試験タンクと試験方法

試験タンクの内槽に板厚 1.5 mm の SUS 27 を用い、その大きさを 300 × 300 ×
300 mm とした。そして、液注入口と蒸発ガス放出口とを兼用させ、上部に 1^φ × 300
mm のノズルを取り付けた。保冷層として、第1層に 25 mm 厚さのグラスウールを
密着させ、その継目が同一箇所にならないように、さらにその上に 25 mm 厚さの
グラスウールを密着させて第2層とした。第3層に硬質ウレタンフォームの注入発泡、

表-2 ウレタン原液の処方および
施工方法

試験タンク	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
組成 (%)									
ポリエーテルポリオール	36.4	36.4	40.5	36.4	24.7	34.5		39.5	39.5
ポリエステルポリオール					3.1				
架橋剤ポリオール					3.1		26.7		
触媒	0.5	0.5	1.0	0.5	0.3	0.5	1.6	0.4	0.4
界面活性剤	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4
発泡剤 H ₂ O	0.5	0.5	8.1	0.5	0.3	0.8	0.3	0.4	0.4
発泡剤 F-11					9.2		16.0	4.8	4.8
難燃剤					6.2		5.3		
クールド MDI	62.0	62.0	49.8	62.0	52.5	63.7	49.6		
変性イソシアネート								54.5	54.5
フォーム比重 (g/cm ³)	0.085	0.085	0.063	0.081	0.041	0.063	0.039	0.059	0.054
施工方法	注入 発泡	注入 発泡	注入 発泡	注入 発泡	注入 発泡	注入 発泡	スプレー 発泡	スプレー 発泡	スプレー 発泡

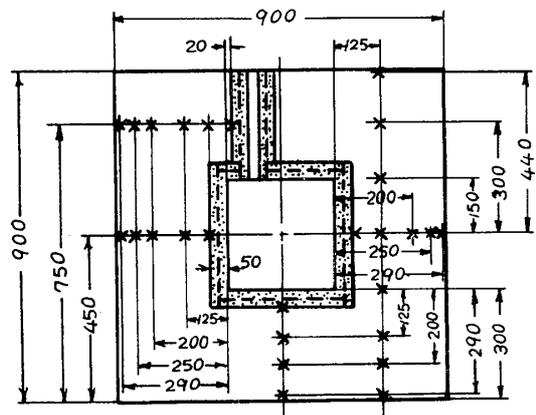


図-7 温度測定箇所

スプレー発泡またはスラブの接着などを行ない、外装寸法 900 × 900 × 900 mm の試
験タンクを作製した。使用したウレタン原液の処方、フォーム比重および施工方法は
表-2のとおりである。

保冷層内の温度分布を実測するため、1.6 mmφ のシース熱電対を図-7のごとき

位置に挿入し、各点の冷却曲線を温度記録計で記録させた。測定箇所は保冷層中心付近のタンク側壁部およびコーナー部の高さ方向、タンク中央部の防熱厚(ヨコ)方向およびノズルの中央付近の防熱厚(ヨコ)方向、内槽底部の防熱厚方向、保冷層外面の表面温度等計46点で行なった。また、自然蒸発量の測定は秤量機で計量するとともに、静電容量式液面計を併用して行なった。タンクからの放散熱量は保冷層外面の各面の中央付近に Schmidt belt を取り付けて計測を行なった。冷却試験終了後は各試験タンクを解体して、クラックの発生の有無、欠陥箇所の発生状況などを観察した。

3.2 試験結果と考察

3.2.1 保冷層内の温度分布

保冷層内の各点における冷却曲線の一例を図-8に示す。液体窒素を充填してから約48時間後に層内がほぼ定常状態に達することがわかる。定常状

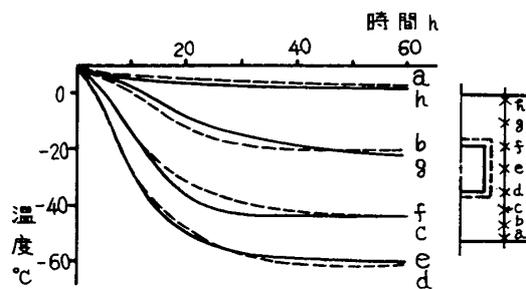


図-8 保冷層内の冷却曲線

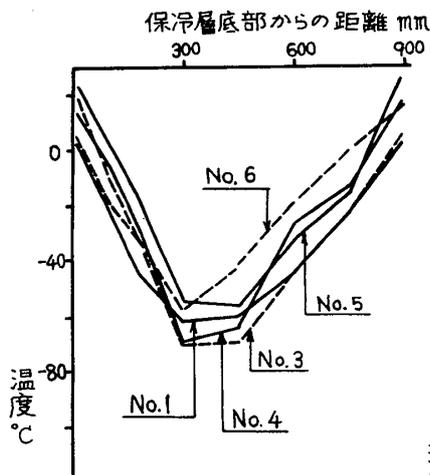


図-9 タンク側壁部の高さ方向の温度分布

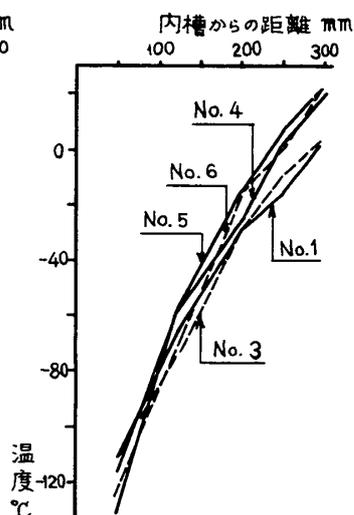


図-10 タンク中央部の防熱厚(ヨコ)方向の温度分布

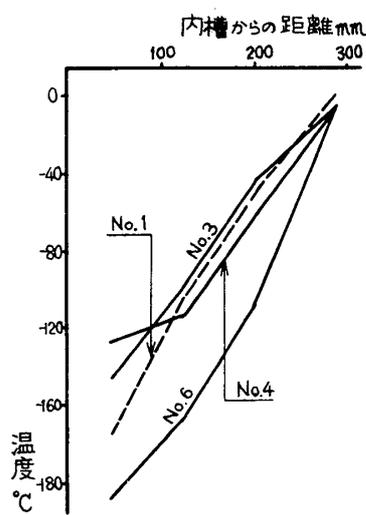


図-11 内槽底部の厚さ方向の温度分布

態における保冷層中心付近のタンク側壁部の高さ方向の温度分布を求めたものが図-9である。タンク中央部から底部にかけての箇所、すなわち、液が常に充填されている部分が最低温度になり、それを中心として温度分布がほぼ対称的になっている。また、タンク中央部の防熱厚(ヨコ)方向の温度分布を求めたものが図-10である。これと相対する側壁面についても調べたが、殆んど同様の分布を示した。図-11は内槽底部の防熱厚方向の温度分布を示したものである。タンク底部は他の側壁面に比べ、損傷を受けやすいので、一体に温度は下がり気味である。試験タンク No.6は保冷層内面から外面近くまでクラックが入ったため、他のものにくらべ、かなり温度が低下している。

3.2.2 自然蒸発率

各試験タンクに液体窒素を内容積の約90%充填した場合、自然蒸発により減量していく経過を示したものが図-12である。充填後5時間経過した時点のタンク充液量とさらに、24時間経過後のタンク充液量とから自然蒸発率を求めたものが同図中の表である。試験タンクNo.1, 2, 4は同種刃方フォームであるが、No.4は保冷層が損傷したため蒸発率がやゝ大きい。また、No.2は防熱厚さを200mmにした場合である。No.5は保冷層に損傷があったが、クラックが層内部にとどまり、外面近くまで伝播しなかったため、比較的蒸発率は小さい。また、No.6は他のものにくらべ、損傷の度合いが大きく、層外面に結露した箇所もあったので、蒸発率は大きい。

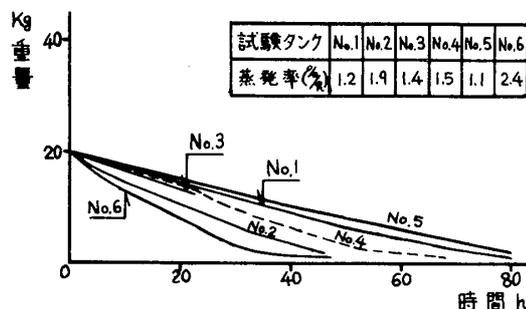


図-12 自然蒸発量と時間との関係

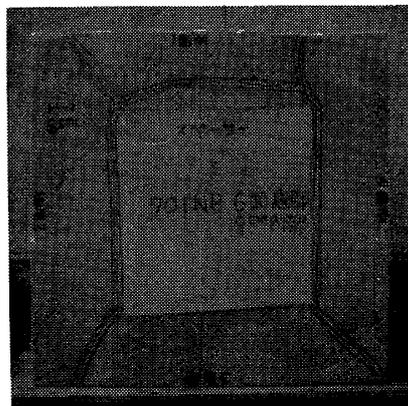


写真-1 保冷層の損傷状況

3.2.3 保冷層の損傷状況

一般にタンクの底部コーナー付近にクラックが発生し、保冷層が冷却されるにつれて、コーナーに沿ってクラックが伝播していく。また、フォームの継目付近はCellが流れ、不均一になるためクラックが発生しやすい。破損状況の一例を写真-1に示す。これは、タンク底部にスペーサーとして、同種の成型品を用いて発泡

させた場合であるが、成型ブロックとの継目にはクラックが入りやすい。また、発泡時の圧締治具の取り付けが不良の場合、フォームがゲル化した後に、発泡圧でタンクを持ち上げると、フォームに弱い層ができ、冷却した際、保冷層内に一面に細かいクラックが入る。

4. あとがき

本研究ではプラスチックフォームを主とした各種の保冷材の超低温域における特性を明らかにしたが、発泡保冷材はその製法上、同種のものでも発泡法、メーカーなどにより特性値にある程度の差があることがわかった。また、超低温タンクの防熱方式として、硬質ウレタンフォームとグラスウールとを組合わせて保冷層を構成する方法が有効な防熱方式であることがわかった。なお、本稿では硬質ウレタンフォームのスプレー発泡の場合およびスラブの積層の場合などについてふれなかったが、ともに有効な防熱方式であることが確認されたので、次回に報告する予定である。