

ポリウレタンフォームを使用した サンドイッチ構造タンク車の開発

Developments of Polyurethan-foam Insulation Sandwich Tank Car

松田 紀元* 石田 登士夫*
Toshiharu Matsuda Toshio Ishida

要 旨

最近、石油化学工業の急激な発展により、それに使用される原料や中間材料を液状で高温、または低温輸送する機会が増大してきた。

そしてこれらの輸送には高い断熱性能をもったタンク車が要求される。この需要に対処するため、日立製作所では比較的安価で、しかも断熱性能のすぐれた、ポリウレタンフォーム使用のサンドイッチ構造タンク車を開発した。このタンク車の特長は内外タンク間の金属接触を全くなくしたことで、それによって断熱性能が在来断熱タンク車の約2倍に向上され、在来断熱タンク車では輸送が困難であった液化エチレン、モルトンカプロラクタムなど、許容温度変化のきびしい液体の輸送が可能になり、今後の発展が期待される。

1. 緒 言

従来、タンク車の断熱構造は大別して在来断熱方式と真空断熱方式の2種類であった。在来断熱方式は安価で、技術的に問題になることもないので広く一般に使用されているが、断熱性能が低く、一方、真空断熱方式は断熱性能が高い代わりに、高真空の保持や内タンクの固定方法に技術的問題があり、それが原因で高価になるため、いままでの使用例でみても液体酸素、液体水素などの極低温液体で危険性の大きいものに限られていた。ところが最近の石油化学工業に使用される原料や中間材料のなかには、輸送中の許容温度変化から考えて、在来断熱方式では性能的に要求を満足できないが、真空断熱方式を採用するほどではないというものがかかなりあり、両者の中間の断熱性能を有するタンク車の出現が要望されていた。筆者らはこの要求にこたえるため、在来断熱方式において最も熱が伝わりやすい内タンクと台わくの金属結合をやめて、外タンクを台わくに固定し、内タンクを内外タンクの間で充てんしたポリウレタンフォームで支持するサンドイッチ構造タンク車の開発に着手した。サンドイッチ構造タンク車において問題となるのはポリウレタンフォームの強度であるから、これについては別途、強度試験を行ない、一方ではモデルおよび現車において内外タンクの相対変位を測定し、ポリウレタンフォームがサンドイッチ構造タンク車の強度部材として適用できるかどうかを実験的に確認した。

2. タンク車断熱方式の比較

タンク車の断熱方式は緒言で述べたように、サンドイッチ断熱方式を含めて3種類あるが、これらの性能、特長をわれわれの実績および文献から引用して比較すると表1のようになる。すなわち在来断熱方式は一般の場合、平均熱貫流率は $0.3 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 以上であり、タンク受け板や受け台の一部にFRPを使用するなどの改良をしても平均熱貫流率はたかだか $0.25 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 程度である⁽¹⁾。一方、真空断熱方式はLinde社の積層断熱材を使用した場合で、平均熱貫流率が約 $0.0016 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、粉末パーライトを使用した場合でも約 $0.01 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ となっており⁽²⁾、在来断熱方式と真空断熱方式との断熱性能の差は大きい。両者の中間的な存在であるサンドイッチ断熱方式は平均熱貫流率が $0.1\sim 0.15 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ である⁽⁴⁾。またサンドイッチ断熱方式の技術的問題は内外タンク間のポリウレタンフォーム層が積載物と外気との温度差によって生ずる熱応力および

表1 各断熱方式の比較

項 目	在来断熱方式	サンドイッチ断熱方式	真空断熱方式
(1) 内タンク支持方法および台わくとの固定方法	内タンクと台わくを金属結合、またはFRPなどを介して結合、外タンクは断熱材の被覆のみ	断熱材の自己接着により内外タンクを接合、外タンクを台わくに金属結合。	小断面の金属片で内外タンクを結合、外タンクを台わくに金属結合。
(2) 断熱施工法	グラスウール、フォームポリスチレンの巻付けおよびポリウレタンフォームの注入発泡	ポリウレタンフォームの注入発泡。	粉末真空断熱、積層真空断熱
(3) 断熱層厚さ	150 mm	190 mm	38~89 mm
(4) 平均熱貫流率	$0.25 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 以上	$0.1\sim 0.15 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$	$0.01 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 以下
(5) 製作例被輸送物	モルトンカプロラクタム (1)	プラスチック原料 (4)	液体酸素、液体窒素 (2)(3)
(6) 技術上、性能上の問題点	技術的な問題は少ない。断熱性能は他方式に比較して劣る。	ポリウレタンフォームの強度が問題	高真空の保持、内タンクの支持構造が問題

車両連結時の衝撃力に耐えうるかどうかということであり、本報告ではこの点について検討した。

3. サンドイッチ構造タンク車の開発過程

サンドイッチ構造タンク車の開発に際し、対象となった積載物は液化エチレンとモルトンカプロラクタムであった。そして問題となったのは、積載物と外気との温度差およびタンク内圧によって内外タンク間のポリウレタンフォーム層に生ずる静的の変形、応力および車両連結時の車端衝撃力によってポリウレタンフォーム層に生ずる動的の変形、応力であった。そこでそれらについてまず簡単な理論検討を行ない、さらにモデル試験で検討した。一方、ポリウレタンフォームの強度については、従来ほとんどデータがなかったので強度試験を行ない、上記の検討結果と比較してポリウレタンフォームが内タンクの支持部材として適用できるかどうかを判定することにした。

3.1 理論計算式の説明

3.1.1 温度差およびタンク内圧による変形、応力計算式

タンクを円筒と円板の結合体と考え、変形はタンクの長手方向中央を境にして対称であるとし、長手方向の内外タンク相対変位を計算した。計算の順序と考え方は図1に、計算式は(1)~(5)

* 日立製作所笠戸工場

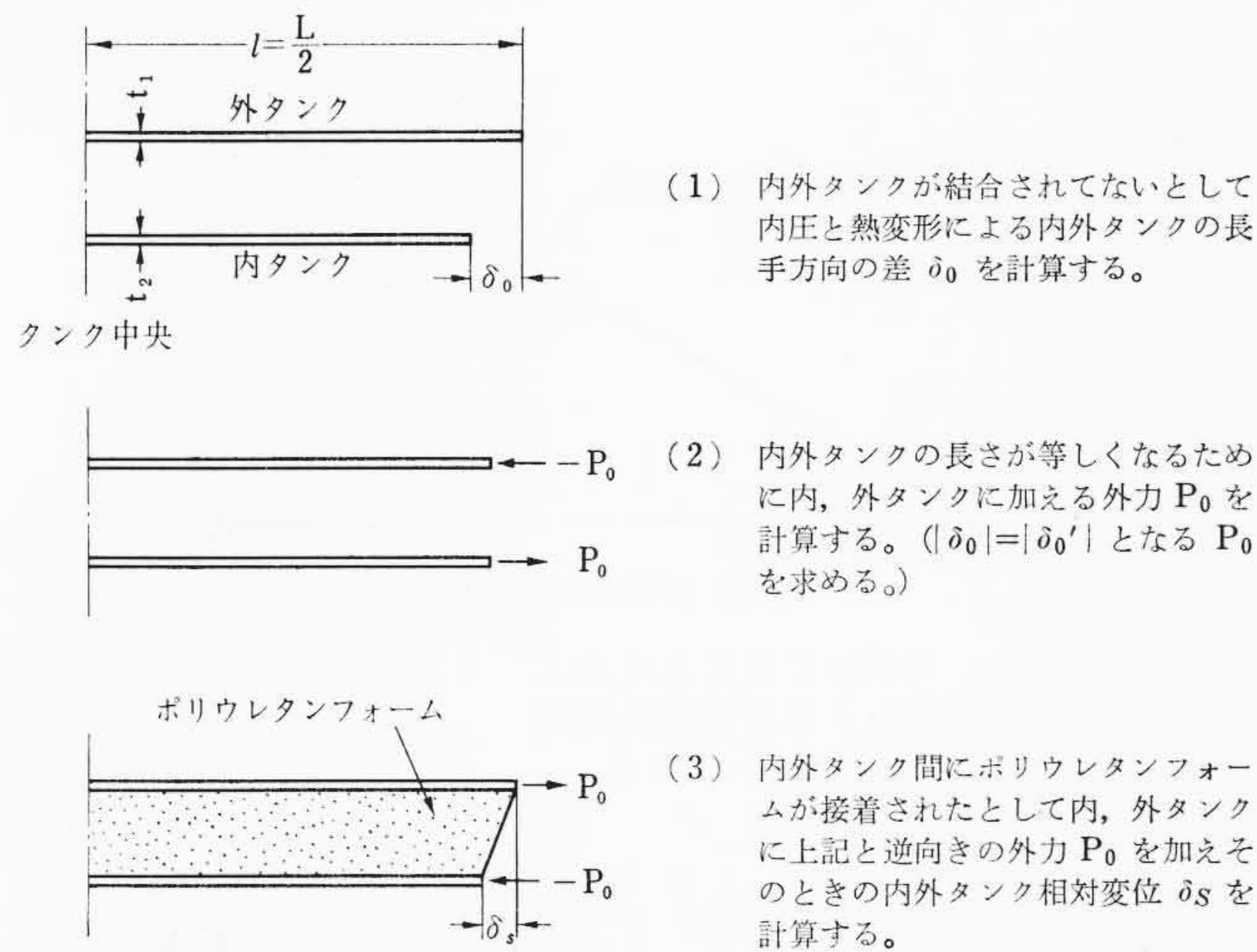


図1 計算の順序と考え方

に示すとおりである。すなわち静的な内外タンク相対変位 δ_s は(3)式で表わされ、円筒部断熱層に生ずる静的せん断応力 τ_s は(6)式で、鏡板部断熱層に生ずる静的引張(または圧縮)応力 σ_s は(7)式で表わされる。

$$\delta_0 = \alpha_0 \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot l - \frac{pDl}{2Et_2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \nu\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta_0' = \frac{P_0 l}{E \pi (D + 2t_p) t_1} + \frac{P_0 l}{E \pi D t_2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\delta_s = \frac{P_0}{\pi E \lambda \sinh \lambda l} \cdot \left(\frac{1}{(D + 2t_p) t_1} + \frac{1}{D t_2}\right) \cdot (\cosh \lambda l - 1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\mu}{\pi E (D + 2t_p) t_1} \left\{1 + \frac{(D + 2t_p) t_1}{D t_2}\right\}} \dots\dots\dots (4)$$

$$\mu = G_p \frac{\pi D}{t_p} \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau_s = \frac{\lambda P_0}{\pi D} \frac{\cosh \lambda l}{\sinh \lambda l} \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_s = \frac{\delta_s + \delta_s'}{t_p} E_p \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta_s' = \frac{1}{2} \alpha_p \cdot t_p \cdot (\theta_2 - \theta_1) \dots\dots\dots (8)$$

- ここに、
 α_0 : タンク材料の線膨張係数
 θ_1 : 積載物積込み直後の平衡温度
 θ_2 : 積載物積込み直前の内タンク温度
 l : 内タンク円筒部長さの半分
 p : タンク内圧
 D : 内タンク直径
 t_1 : 内タンク板厚
 t_2 : 外タンク板厚
 ν : タンク材料のポアソン比
 E : タンク材料の縦弾性係数
 t_p : 断熱層厚さ
 E_p : ポリウレタンフォームの縦弾性係数
 G_p : ポリウレタンフォームせん断弾性係数
 α_p : ポリウレタンフォーム線膨張係数

3.1.2 車端衝撃力による変形、応力計算式

ポリウレタンフォームの圧縮弾性係数と引張弾性係数が等しいと仮定し、タンク車が車端衝撃を受けたときの断熱層における力の平衡を考えると、断熱層に生ずるひずみが弾性限度内ならば近似的に(9)式の関係が成り立つ。

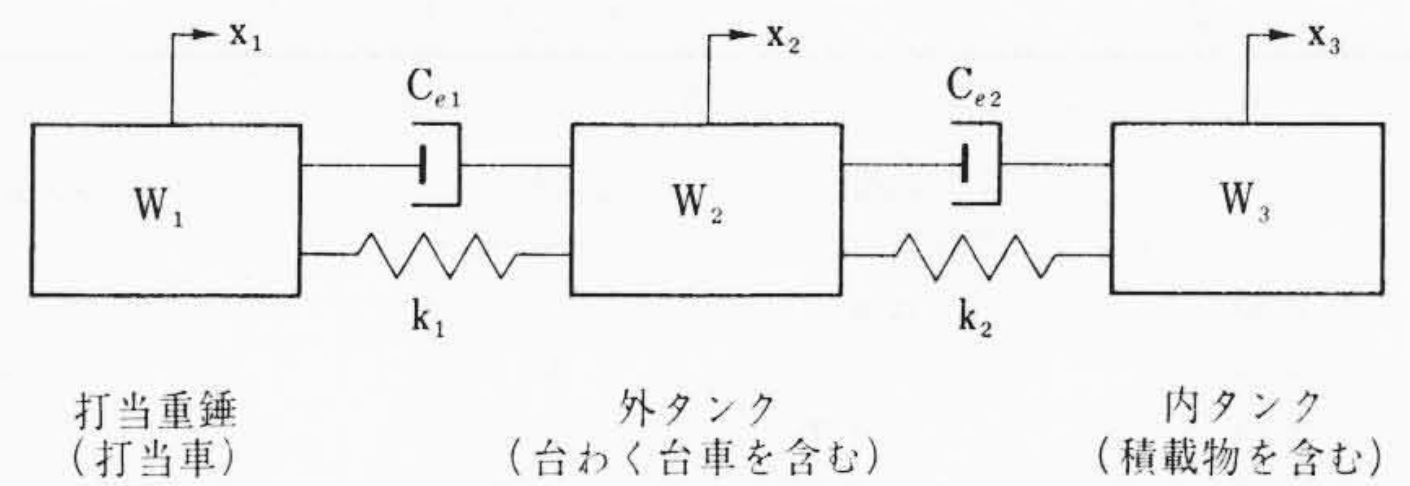


図2 タンク車連結状況の振動系モデルへの置換

$$\frac{\pi}{2} D^2 \sigma_d + \pi D L \tau_d = (W_t + \eta \cdot W_i) \cdot \alpha \dots\dots\dots (9)$$

- ここに、
 σ_d : 鏡板部ポリウレタンフォームに生ずる動的引張、圧縮応力
 τ_d : 円筒部ポリウレタンフォームに生ずる動的せん断応力
 W_t : 内タンク重量
 W_i : 積載物の重量
 α : 衝撃係数(衝撃力/タンク車総重量)
 η : 衝撃圧の実験値と理論値の比(液圧効率)
 L : タンク円筒部長さ

次にタンク円筒部と円板部の境界においてポリウレタンフォームの変形量が等しいことから(10)式の関係が成り立つ。

$$\delta_d = \frac{\tau_d}{G_p} t_p = \frac{\sigma_d}{E_p} t_p \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 δ_d : 動的な長手方向内外タンク相対変位
 すなわち連結時の打当速度に対する α と η の関係が与えられれば(9)、(10)式から σ_d 、 τ_d および δ_d が求まる。ところが筆者らの開発段階ではサンドイッチ構造タンク車について、この種の実験データがなかったため、 α や η の値がわからなかった。そこで筆者らはタンク車を、図2に示すような振動系モデルに置換して、逐次計算により打当速度と α の関係および打当速度と δ_d の関係を推定する方法を併用した。図2の振動系に対する運動方程式は(11)~(13)式で表わされる。

$$F_1 = \frac{W_1}{g} \ddot{x}_1 = -C_{e1}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) \dots\dots\dots (11)$$

$$F_2 = \frac{W_2}{g} \ddot{x}_2 = C_{e1}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - C_{e2}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_1(x_1 - x_2) - k_2(x_2 - x_3) \dots\dots\dots (12)$$

$$F_3 = \frac{W_3}{g} \ddot{x}_3 = C_{e2}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2(x_2 - x_3) \dots\dots\dots (13)$$

- ここに、
 F_1 : 打当車に作用する力
 F_2 : 外タンクに作用する力
 F_3 : 内タンクに作用する力
 W_1 : 打当車の重量
 W_2 : 外タンクの重量
 W_3 : 内タンクおよび積載物の重量
 C_{e1} : ゴム緩衝器の等価粘性減衰係数
 C_{e2} : ポリウレタンフォームの等価粘性減衰係数
 k_1 : ゴム緩衝器のバネ定数
 k_2 : ポリウレタンフォームのバネ定数
 g : 重力加速度

上記の定数のうち、 C_{e1} 、 k_1 についてはゴム緩衝器の静的な荷重~変形量曲線から算出した。 C_{e2} 、 k_2 については後述のモデル試験の際の同時測定によってオシログラムに記録された衝撃力~時間曲線と内外タンク相対変位~時間曲線から、衝撃力~内外タンク相対変位曲線を描き、その特性曲線から算出した。

表2 モデルタンク車と対象現車の寸法諸元

項目	モデルタンク車	液化エチレンタンク車	カプロラクタムタンク車
タンク内径	410 mm	2,050 mm	1,900~2,348 mm
タンク外径	493 mm	2,463 mm	
内タンク全長	1,225 mm	12,550 mm	10,340 mm
内タンク板厚	2.3 mm	12 mm	4.5 mm
外タンク板厚	1.2 mm	4.5 mm	4.5 mm
断熱層厚さ	38 mm	190 mm	190 mm
公称内容積	0.162 m ³	40.2 m ³	34.6 m ³
積載容積	0.141~0.162 m ³	35.0 m ³	34.6 m ³
自重	104 kg	27,000 kg	18,600 kg
積載荷重	141~162 kg	15,000 kg	35,000 kg

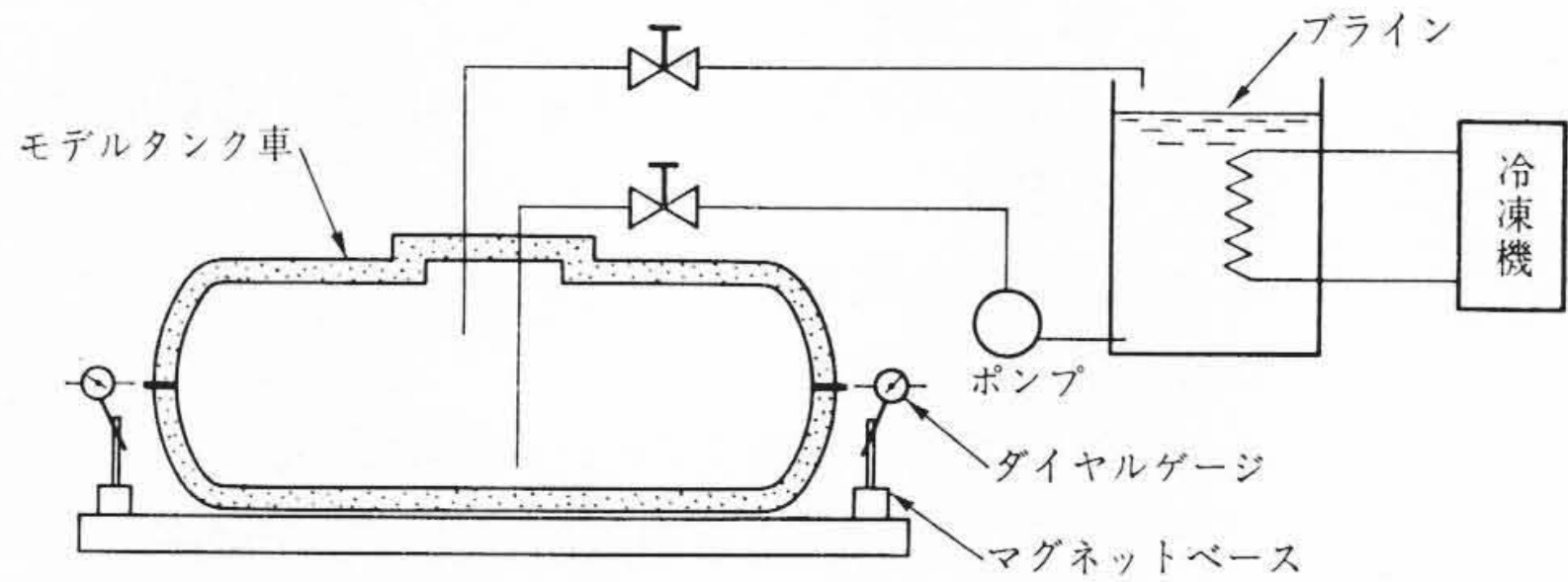


図3 温度差による内外タンク相対変位測定用実験装置

3.2 計算結果とモデル試験結果との対比

3.2.1 モデルタンク車の寸法, 諸元

モデル試験に使用したタンク車の寸法, 諸元は表2に示すとおりである。表には比較のために開発の対象となったタンク車の寸法, 諸元も記載してある。

3.2.2 温度差による変形

タンク内液温と外気温との差によって生ずる内外タンク相対変位測定用の試験装置は図3に示すとおりである。圧力による内外タンクの相対変位量は一般に小さいし, 計算による推定も簡単なので省略した。同一条件における実験結果と(1)~(5)式による計算結果を比較すると図4に示すようによく一致することがわかる。したがって静的な内外タンクの相対変位は(1)~(5)式で計算すればよい。

3.2.3 車端衝撃による変形

打当試験の装置全体図は図5に示すとおりである。測定装置としては車端衝撃力の測定にはロードセルを用い, 内外タンクの相対変位の測定には自家製のストレインゲージ接着式変位計を内外タンク鏡板の間に取り付け, あらかじめ静的に検定したものを使用した。

(11)~(13)式による計算結果と実験の結果を比較すると図6, 図7のようになり, 計算値はいずれも実験値よりも大きくなっているが, この程度の差ならば概略値を推定するには実用上さしつかえなからうと考える。また図7の点線が実験値によく一致することから衝撃係数が既知の場合には $\eta=0.65$ を(9), (10)式に代入して計算すればよいことがわかる。

3.3 現車の試算結果

(1)~(8)式および(11)~(13)式を使って, 対象現車についてポリウレタンフォームに生ずる静的および動的の応力, さらには内外タンクの相対変位を試算してみた。表3は計算条件と結果を示したものである。すなわちポリウレタンフォームに生ずる応力としては静的圧縮応力 σ_c が 0.45 kg/cm^2 静的引張応力 σ_t が 0.68 kg/cm^2 , 静的せん断応力 τ_s が 1.04 kg/cm^2 , また動的応力は σ_d が 0.3 kg/cm^2 , τ_d が 0.07 kg/cm^2 程度である。

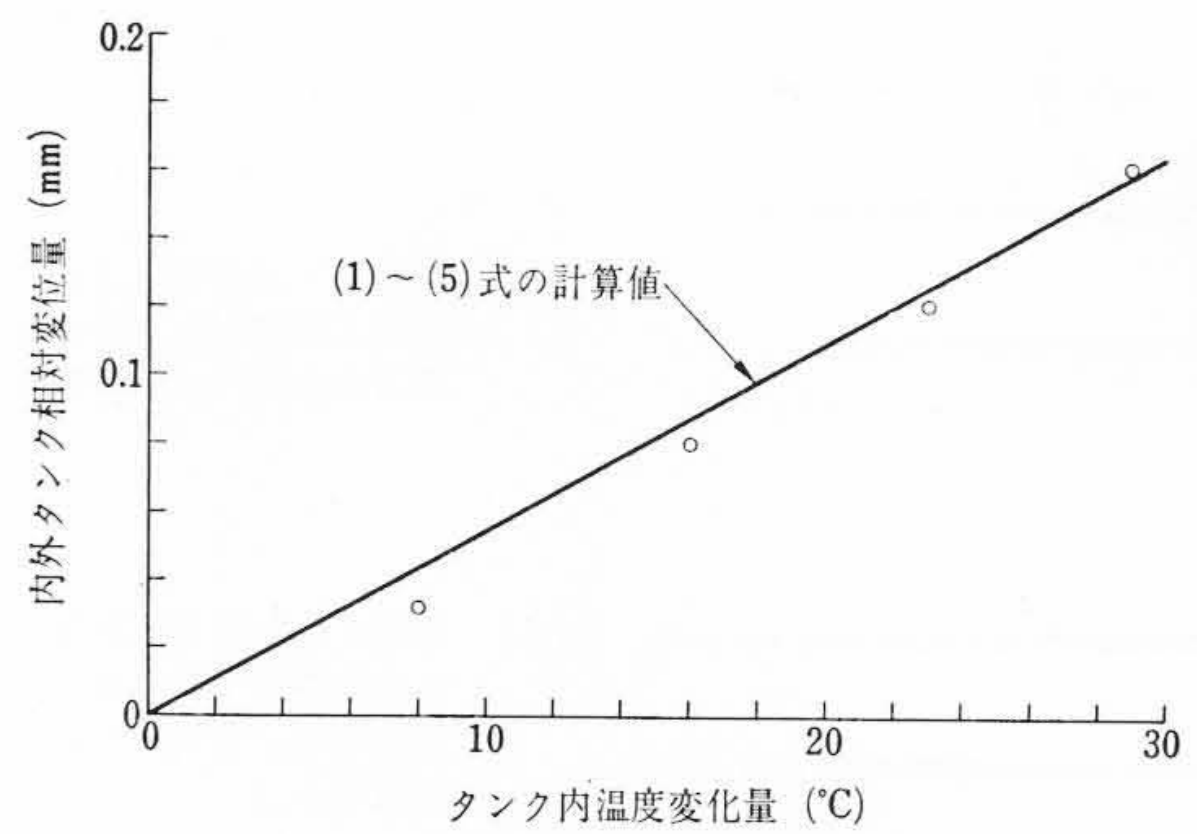


図4 モデル試験におけるタンク内温度変化と内外タンク相対変位の関係

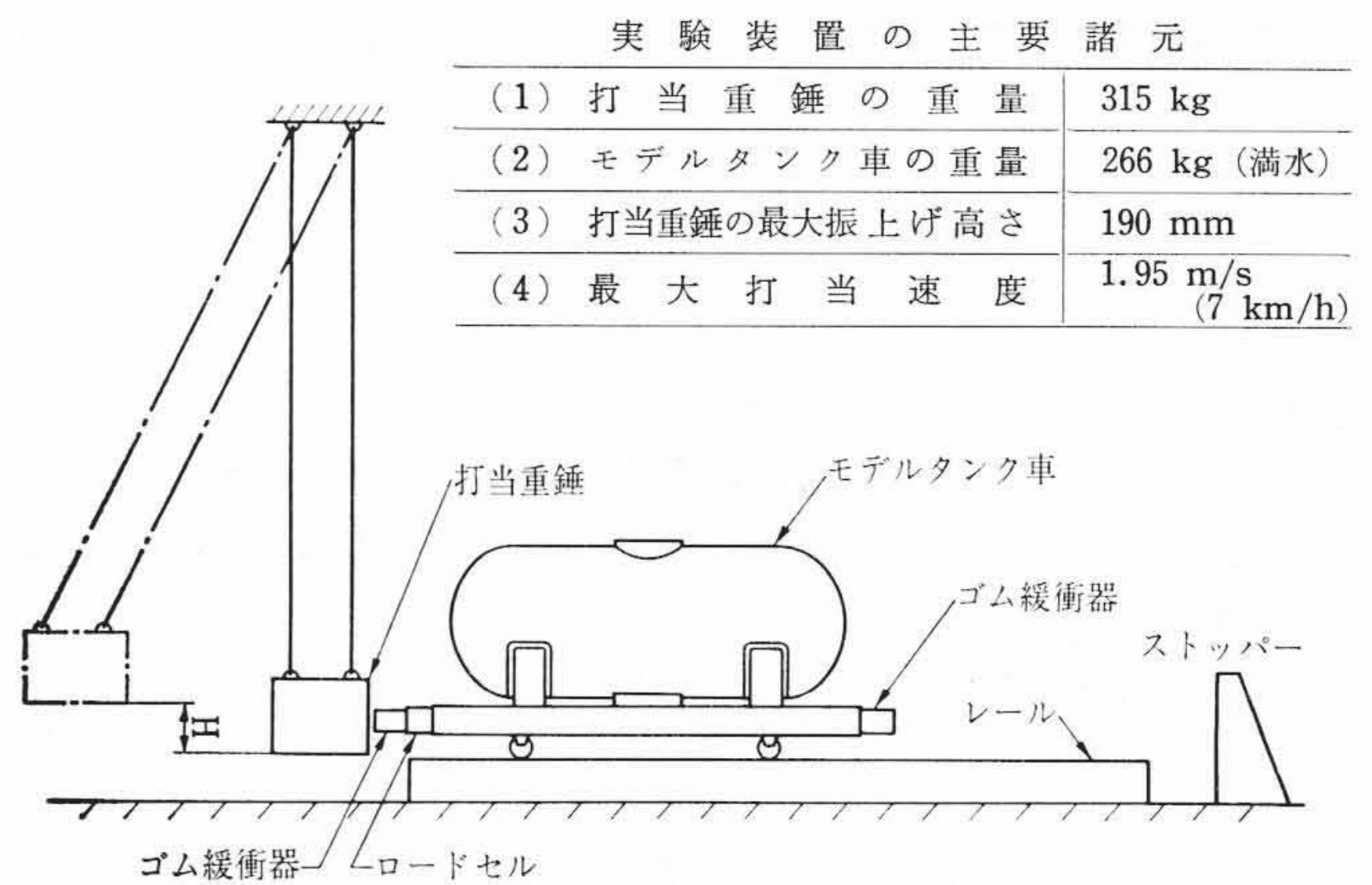


図5 打当試験装置の全体図

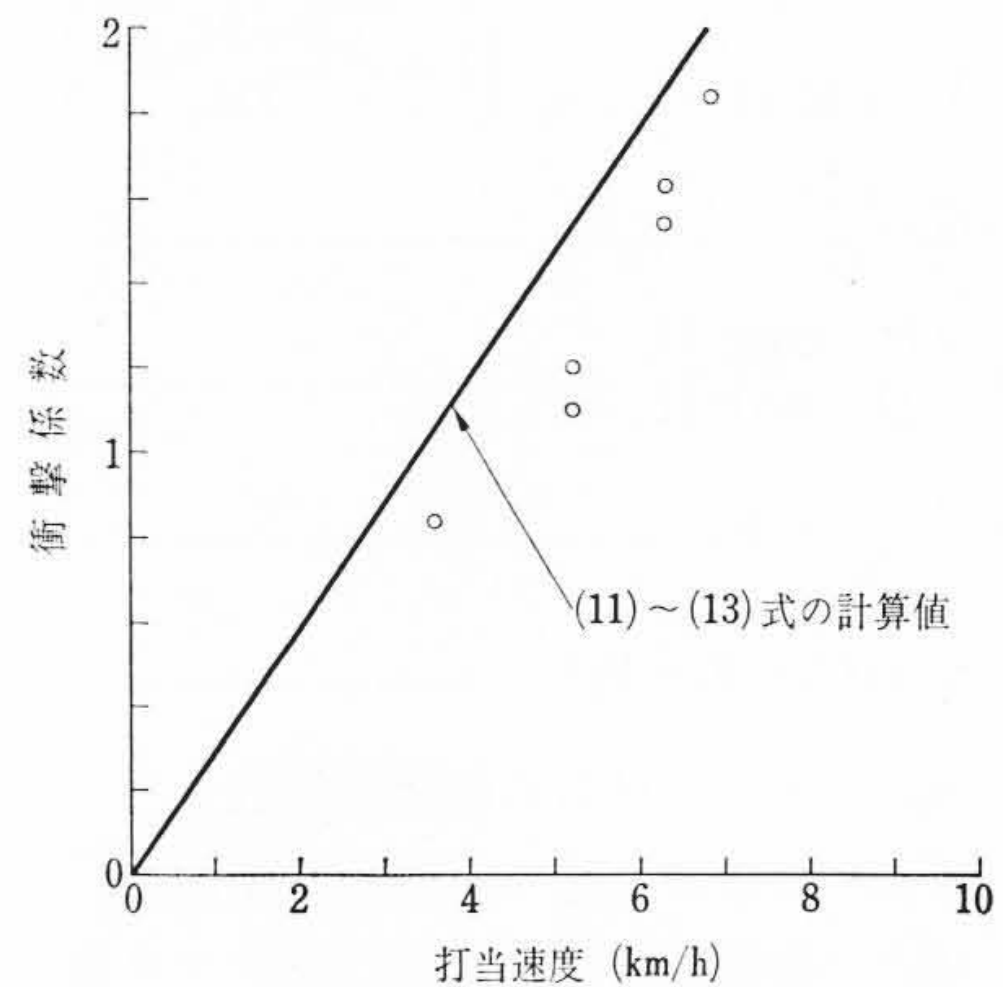


図6 モデル試験における打当速度と衝撃係数の関係

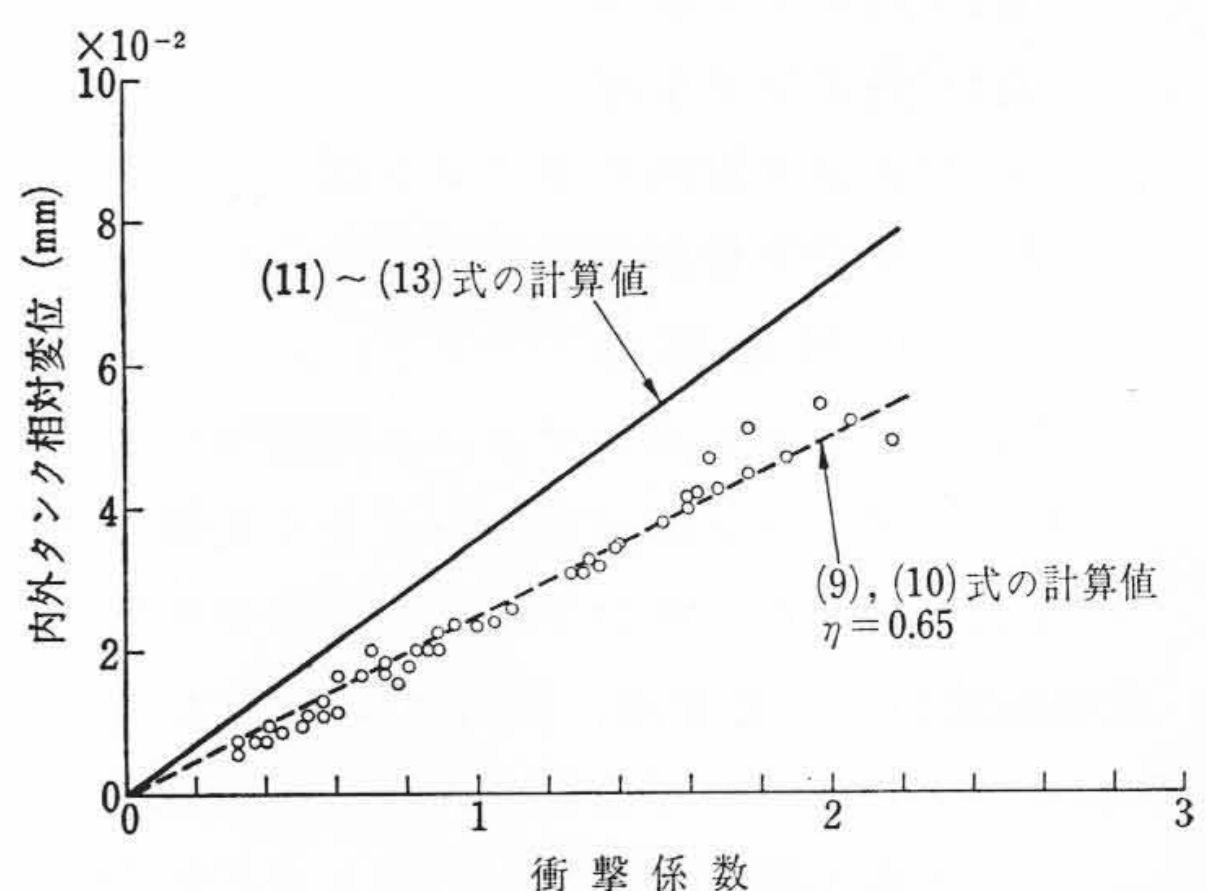


図7 モデル試験における衝撃係数と内外タンク相対変位の関係

表3 現車における試算の条件と結果

項目	項目	液化エチレンタンク車	カプロラクタムタンク車
		積込前タンク内温度	30℃
計算条件	積込後タンク内温度	-40℃	80℃
	タンク内圧力	15 kg/cm ² G	2 kg/cm ² G
	連結時打当速度	7 km/h	7 km/h
	計算結果		
	σ_s (kg/cm ²)	0.68	-0.45 *
	τ_s (kg/cm ²)	0.98	1.04
	δ_s (mm)	2.24	-2.46 *
	σ_d (kg/cm ²)	0.24	0.30
	τ_d (kg/cm ²)	0.05	0.07
	δ_d (mm)	0.95	1.65

注：*印はポリウレタンフォームが圧縮されることを示す。

表4 供試材の種類と発泡条件

項目	種類		
	A	B	C
原液の名称	CRF-304	CRF-304	MRF-304A
原液温度(℃)	16.5	15.0	20.0
周囲温度(℃)	19.0	15.0	20.0
モールド寸法(mm)	1,000×2,000 ×100	1,000×2,000 ×100	960×2,100 ×100
モールド内容積(m ³)	0.2	0.2	0.2
原液注入量(kg)	10.5	11.0	8.5
見かけ比重量(kg/m ³)	52.5	55.0	42.5
発泡方法	フローズ法	フローズ法	フローズ法
モールド設置方向	垂直	垂直	垂直
キュア時間(hr)	1.0	1.0	1.0

3.4 ポリウレタンフォームの強度試験

ポリウレタンフォームの強度については多くの人々が実験し、文献^{(5)~(7)}にもデータが発表されているが、それらは常温における静的強度が大部分であり、低温や高温における強度データは非常に少ない。しかも実際の使用に際して必要な疲労やクリープ特性に関するデータはほとんどない。さらに静的強度データについても発泡(はっぼう)条件や原液成分の相違から実験者によって差があり、ばらつきが大きい。そこで筆者らはサンドイッチ構造タンク車に使用するものと同じ主成分の原液を使用し、発泡条件も大現場作業時にあわせて試料を発泡し、その試料から採取した試験片を用いて、静的強度試験および低サイクル疲労試験を行なった。

3.4.1 試験方法

- (1) 供試材：試験に使用した供試材の種類と発泡条件は表4に示すとおりである。使用原液はいずれもPAPIをベースにしたものである。
- (2) 試験片寸法：引張、圧縮試験片は50mm×50mm×50mm、せん断試験片は30mm×10mm×120mm
- (3) 試験機：島津オートグラフIM-100形
- (4) 試験速度：静的強度試験2mm/min 低サイクル疲労試験10mm/min (いずれもクロスヘッド速度)
- (5) 荷重負荷方向：ポリウレタンフォームの発泡方向と荷重負荷方向の関係は現車と同じである。
- (6) 繰返数：低サイクル疲労試験における繰返数は日本国有鉄道の連結器用ゴム緩衝器の耐久試験における繰返数と同じく3×10⁸回までである。

表5 ポリウレタンフォームの静的強度と弾性係数

試験温度(℃)	静的強度(kg/cm ²)			弾性係数(kg/cm ²)		
	圧縮	引張	せん断	圧縮	引張	せん断
-20	2.55	1.25	1.93	55	55	20
20	1.43	1.02	1.58	31	47	8.8
80	1.50	1.00	1.45	27	32	7.0
90	1.13	0.92	1.42	26	40	6.8

注：圧縮の場合は10%ひずみ応力、引張、せん断は破断応力を示す。

表6 ポリウレタンフォームの低サイクル疲労耐久応力

試験温度(℃)	圧縮耐久応力(kg/cm ²)	引張耐久応力(kg/cm ²)	せん断耐久応力(kg/cm ²)
-20	1.15	0.80	1.10
90	0.75	0.50	0.70

注：圧縮の場合は永久ひずみが発生する繰返数を限界繰返数とし、引張、せん断の破断繰返数と同様な取扱いにした。

3.4.2 試験結果

試験結果は表5、表6に示すとおりである。表中の値はいずれも平均値であるが、同一グループ(原則として10本)でのデータのばらつきは平均値に対して約±30~50%である。

試験温度と静的強度の関係は表5からわかるように、常温から温度が下がれば強度が増加し、温度が上昇すれば強度は低下する。ただし温度が90℃までであれば常温における強度に比べて約10%低下する程度である。試験温度と弾性係数の関係も上述の静的強度の場合とほとんど同じである。またポリウレタンフォームの低サイクル疲労耐久応力は表5、表6からわかるように、同一試験温度における静的強度の約50~60%である。表5、表6の結果と表3の値を比較してみると静的強度はポリウレタンフォーム層に生ずる静的応力を上まわっており、低サイクル疲労耐久応力もまた動的応力を上まわっているため、一応ポリウレタンフォームをサンドイッチ構造タンク車の内タンク支持強度部材として適用できるとの見通しを得た。

4. 試作サンドイッチ構造タンク車の設計条件および特長

サンドイッチ構造を採用した最初の試作タンク車は、35t積モルトンカプロラクタムタンク車で、その設計条件および特長は次のようなものである。

4.1 設計条件

4.1.1 輸送条件

顧客側から与えられた輸送条件は下記のとおりである。

- (1) 積込液温：80℃
- (2) 荷卸液温：72℃
- (3) 輸送日数：外気温度0℃のとき3日
- (4) 外気温度：0℃

この条件からみると、許容液温変化は外気温度0℃のとき2.6℃/dayであるが、タンク内の液温分布が一様でないことを考慮して余裕をとり、設計目標は1.5℃/dayとした。

4.1.2 モルトンカプロラクタムの性状

- (1) 比重：1.014 (80℃にて)
- (2) 凝固点：69.2℃
- (3) 比熱：0.51 kcal/kg℃
- (4) 蒸気圧：0.42 mmHg (80℃にて)
- (5) 融解熱：29 kcal/kg

4.2 試作車の仕様および構造

試作車の主要諸元は表7のとおりである。また試作車の全体構造は図8に、外観は図9に示すとおりである。試作車の仕様上および構造上の特長は次のとおりである。

- (1) 内外タンク間の金属接触は全くない。タンク受け板、受け台はもちろんのこと液出入管や弁類を収納しているドーム部分、および加熱管の取付部分などにも金属接触は全くない。
- (2) 軽量化のため、台わくをセミフレームレス構造にし、さらに内外タンクを円すい形にしてタンク径を中央に向かって大きくすることによって内容積を増し、車長を短くした。
- (3) 車両連結時の車端衝撃力がポリウレタンフォームに伝わるのを減らすために大形ゴム緩衝器 RD 18 を採用した。

表7 カプロラクタムタンク車の主要諸元

形 式	タ キ	17500
荷 重		35.0 t
自 重		18.6 t
公 称 容 積		34.6 m ³
全 長		11,900 mm
全 幅		2,754 mm
全 高		3,860 mm
走 り 装 置		TR41C
連 結 器 装 置		ピン付き縦わく上作用
緩 衝 器		RD 18 形 ゴム 緩 衝 器
断 熱 材		ポリウレタンフォーム

5. 試作サンドイッチ構造タンク車の性能試験

5.1 試験方法

サンドイッチ構造タンク車として試作されたモルトンカプロラクタムタンク車の性能試験の種類および試験の方法を表8に示す。また各試験の測定点は図10～図12に示すとおりである。測定機器としてはタンク応力測定にはストレインゲージと静的および動的ひずみ計を使用し、内外タンク相対変位の測定には静的はダイヤルゲージ、動的は新興通信製のIDS形高精度変位計を使用し、温度測定には銅-コンスタンタン熱電対と温度記録計を使用した。

5.2 試験結果および検討

試験の結果内外タンクの応力は表9で示されるように、内タンクで最大+10.3 kg/mm²、外タンクで最大+3.1 kg/mm²であり、タンク材料の許容応力に比べて小さいので問題はない。次に内外タンクの相対変位は静的の場合、表10に示すように約2.1 mm、動的の場合

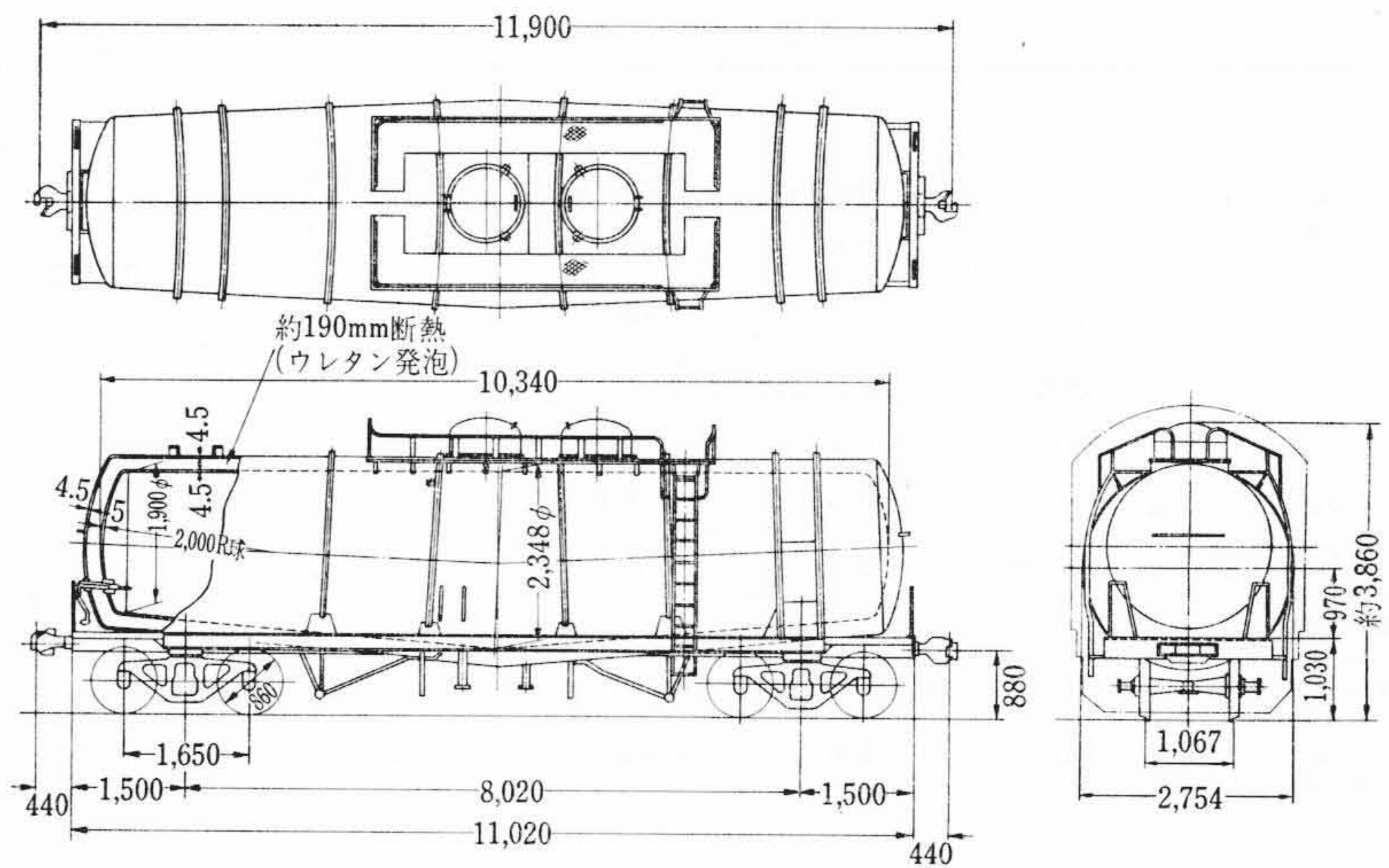


図8 35t積モルトンカプロラクタムタンク車の全体構造

表8 カプロラクタムタンク車の性能試験方法

試験の種類	試験の方法	測定項目
静荷重試験	水 35 t 注入	内、外タンクの静的応力 内、外タンク相対変位
圧力試験	水 35 t 注入後、2 kg/cm ² G加圧	内、外タンクの静的応力 内、外タンク相対変位
加熱試験	水 35 t 注入後、80℃ に加熱	内、外タンクの静的応力 内、外タンク相対変位
打当試験	水 35 t 注入した供試タンク車に同一重量の打当車を 3, 5, 7, 9 km/h の打当速度で連結	内、外タンクの動的応力 内、外タンク相対変位 車端衝撃力
断熱性能試験	水 35 t 注入、80℃ に加熱後長時間放置	タンク内水温 外タンク表面温度

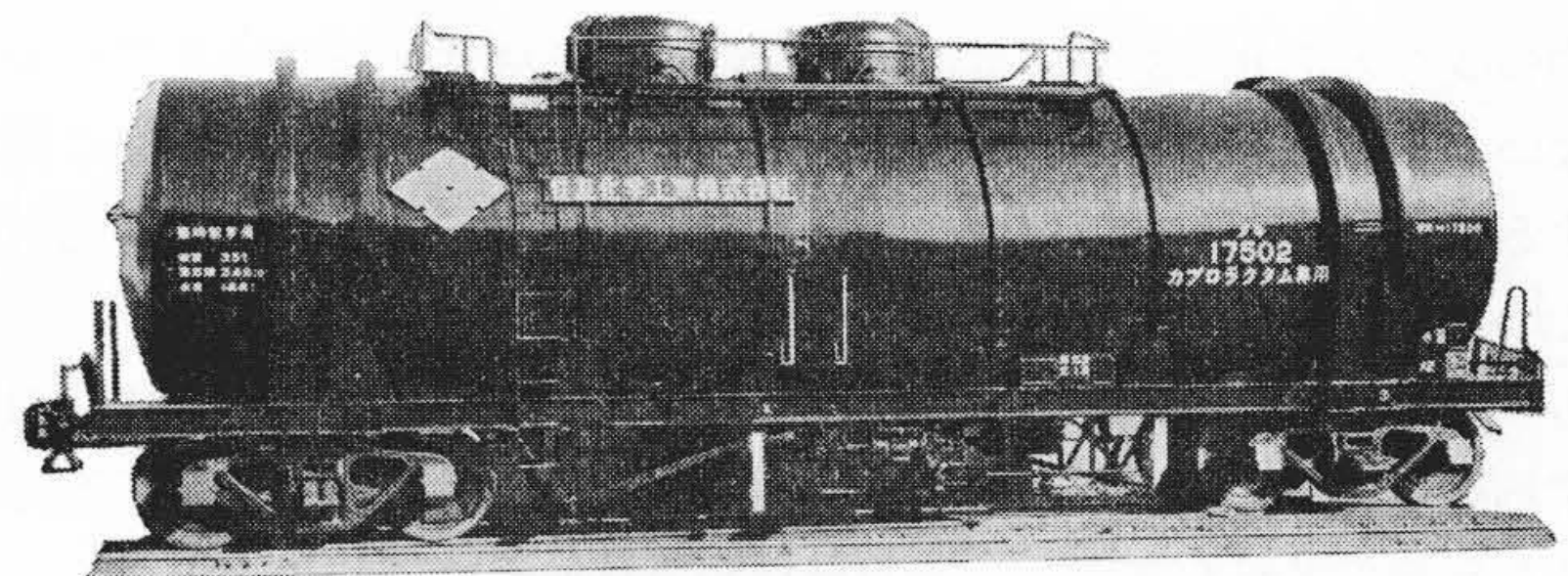


図9 35t積モルトンカプロラクタムタンク車

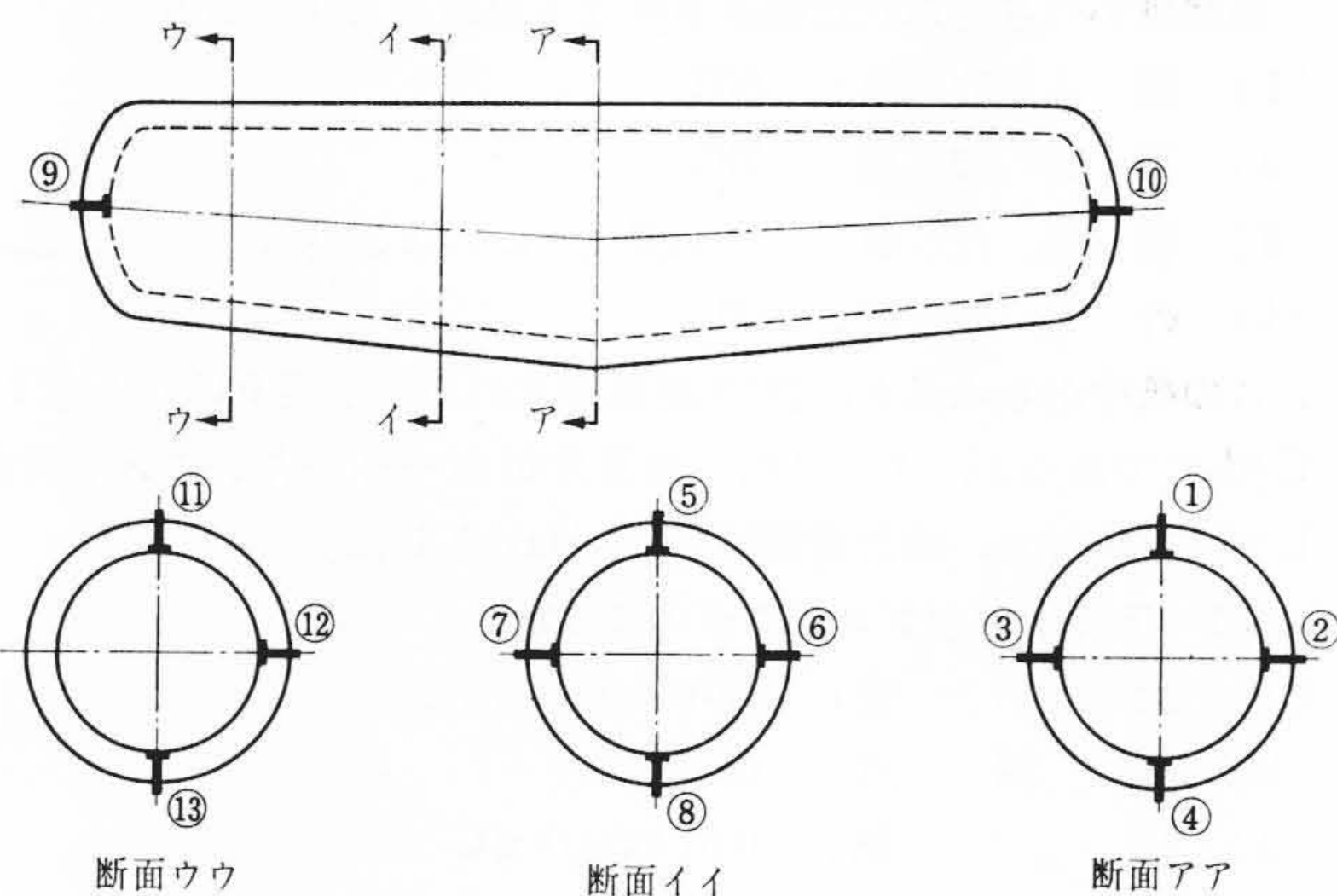


図11 内外タンク相対変位測定点

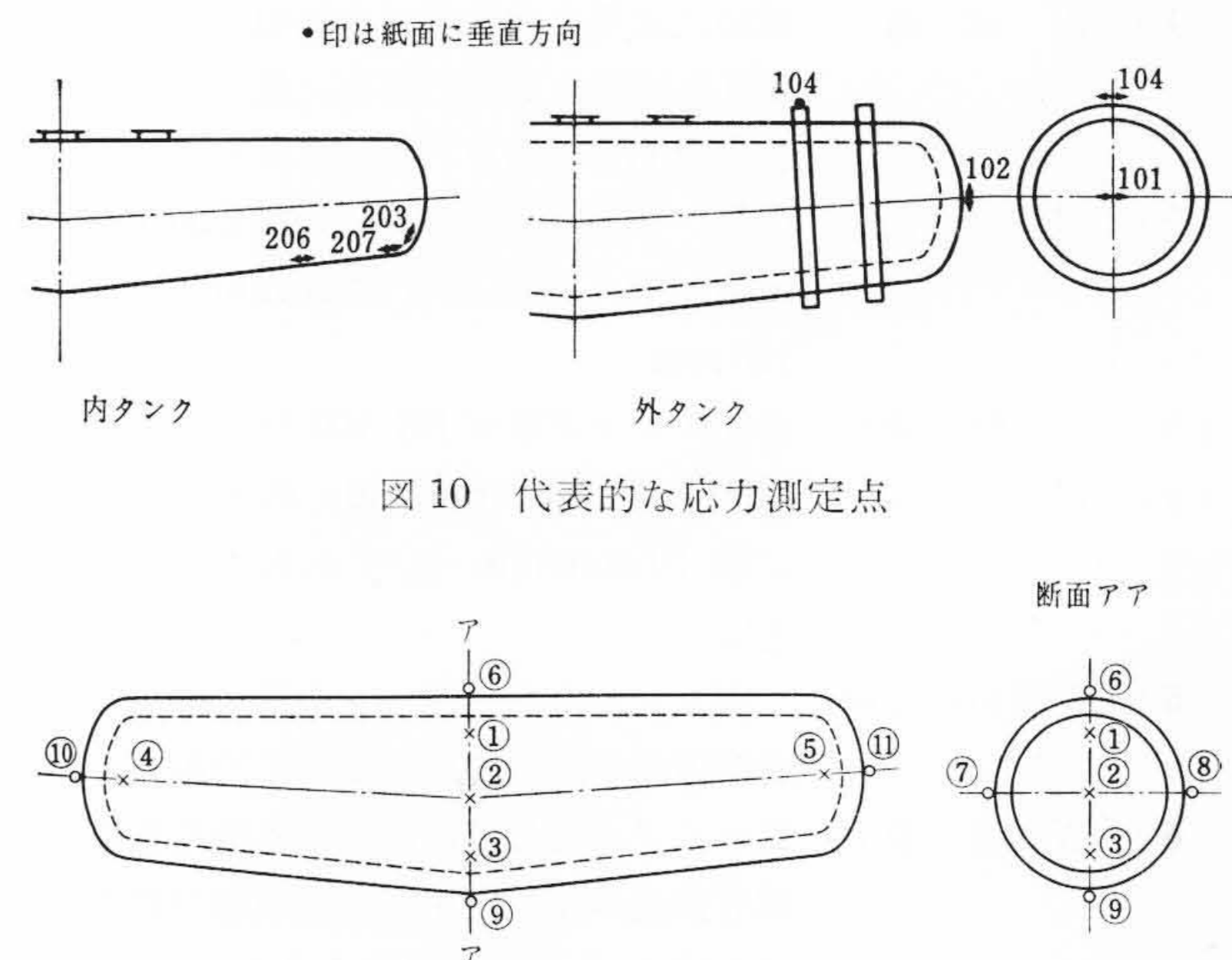


図12 水温、外タンク表面温度測定点

表9 内外タンク応力値

	測定点	静荷重試験	圧力試験	加熱試験	打当試験
外タンク	101	+0.1	+1.8	+2.5	+1.7
	102	-0.2	+2.3	+3.1	—
	104	-0.6	+1.8	-2.9	—
内タンク	203	-2.1	+10.3	-10.3	+5.4
	206	-0.8	-0.2	-5.5	—
	207	-0.1	+6.6	-3.2	—

注：(1) 単位は kg/mm²
(2) 打当試験は 7 km/h のときの測定値

表10 内外タンク相対変位

	静荷重試験	圧力試験	加熱試験
アア断面平均値	-0.02	-0.47	-1.28
イイ断面平均値	-0.11	-0.81	-1.59
前後平均値	-0.07	-1.19	-2.08

注：単位は mm

合は図13、図14に示されるように打当速度7 km/hのときで約0.9 mmであり、いずれの場合も、表3に示した試算値よりも小さく、したがってポリウレタンフォームに生ずる応力も表3の試算値よりも小さいと考えられる。

断熱性能試験の結果は図15の実線で示すとおりである。この結果からタンク車の平均熱貫流率を算出すると約0.17 kcal/m²h°Cであり、これは在来断熱タンク車の約2倍の断熱性能である。さらにタンク内にモルトンカプロラクタムを80°Cで積み込んだときの輸送中のタンク内液温変化を水とカプロラクタムの比熱の相違を考慮して計算すると外気温度0°Cのもとで図中点線のようになり、約1.3°C/dayである。したがって所期の目標は満足している。

6. 今後の問題点

ポリウレタンフォームが実用化されてからまだ歴史が浅く、特に強度部材として使用された例が少ないので経年変化を考慮したクリープ特性に関する資料がない。今回の試作に際しても筆者らは静的圧縮試験片を使って60hの圧縮クリープ試験を実施し、その結果から現車において積載物による内タンクの沈下を推定して、1,000h後(回送時間その他を考えると1年後に相当)では2.3mm以下、10,000h後では3.8mm以下になるとの見通しを得た後に製作したが、今後の資料を得るため現車において長い年月の間に経年変化によって、それがどのようになるかを調べることにした。現在のところ納入後6ヶ月における測定では図11の測定点⑨⑫では変化がなく、測定点⑪⑬では約1mm沈下している程度であり、問題にならないが、今後も引き続き調査していくことにしている。

7. 結 言

日立製作所において開発されたポリウレタンフォーム使用のサンドイッチ構造タンク車について、その開発過程と試作した35t積モルトンカプロラクタムタンク車の概要を説明したが、結果を要約すると次のとおりである。

- (1) カプロラクタムタンク車の断熱性能は、平均熱貫流率で約0.17 kcal/m²h°Cであり、これによって輸送中の液温変化を推定すると外気温度0°Cのとき約1.3°C/dayである。
- (2) タンク内温度変化ならびにタンク内圧によってポリウレタンフォームに生ずる静的応力は積載液温が-40~+80°C、タンク内圧が2~15 kg/cm²Gの範囲では、せん断が約1 kg/cm²、引張、圧縮がそれぞれ約0.7 kg/cm²、0.45 kg/cm²程度である。

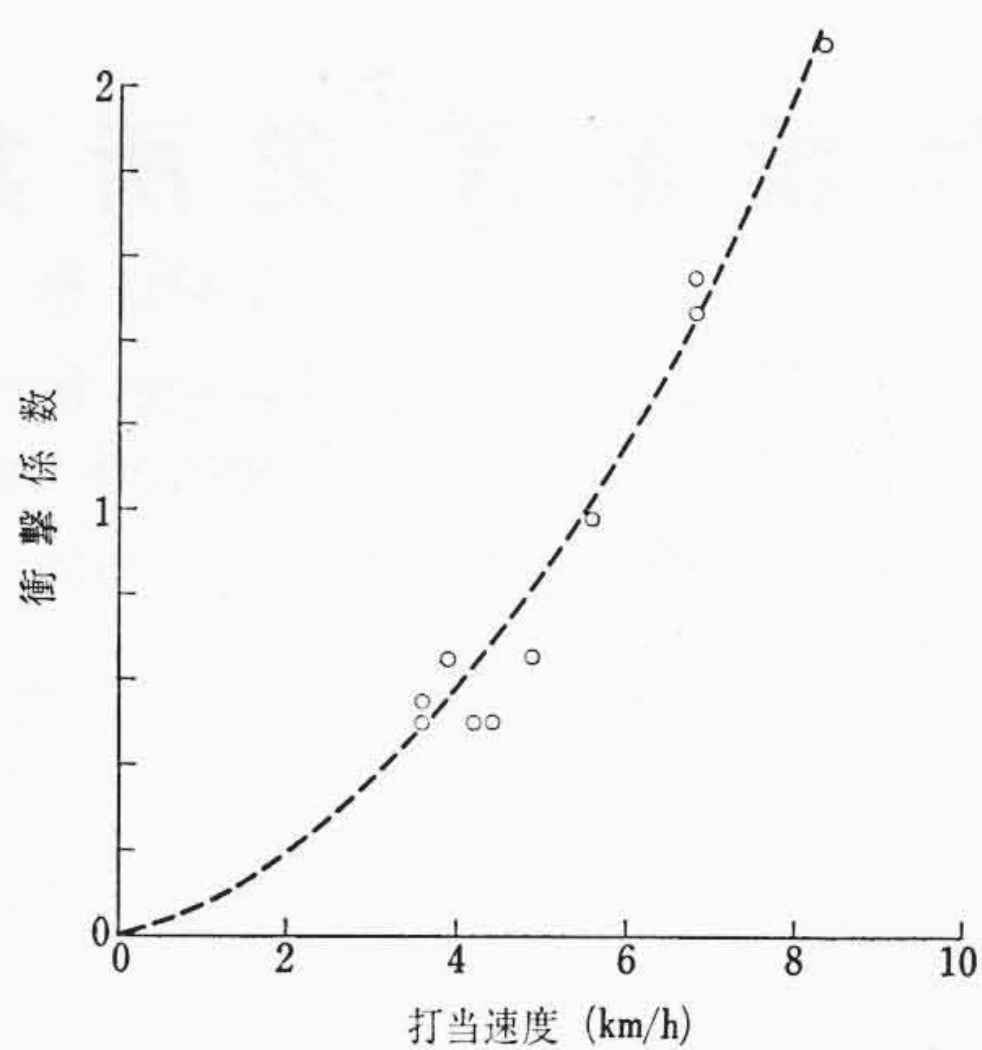


図13 現車打当試験における打当速度と衝撃係数の関係

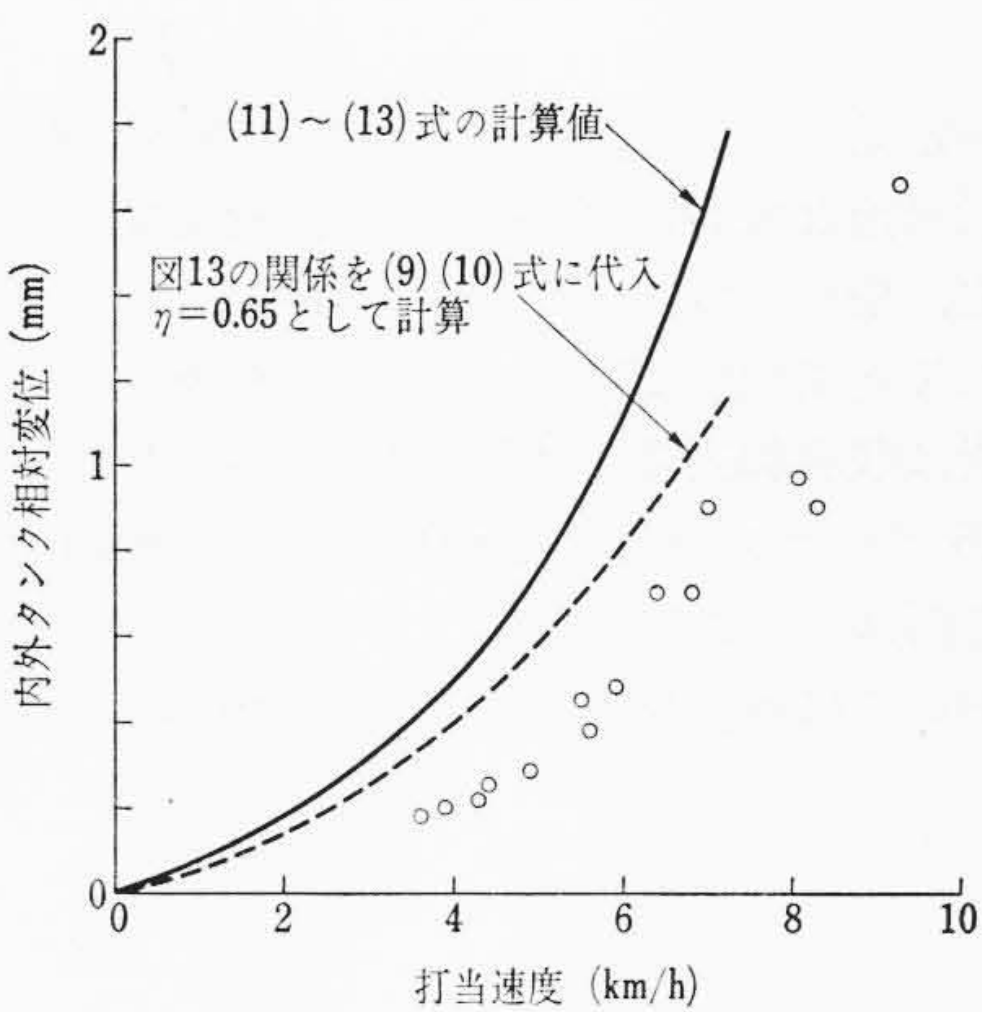


図14 現車打当試験における打当速度と内外タンク相対変位の関係

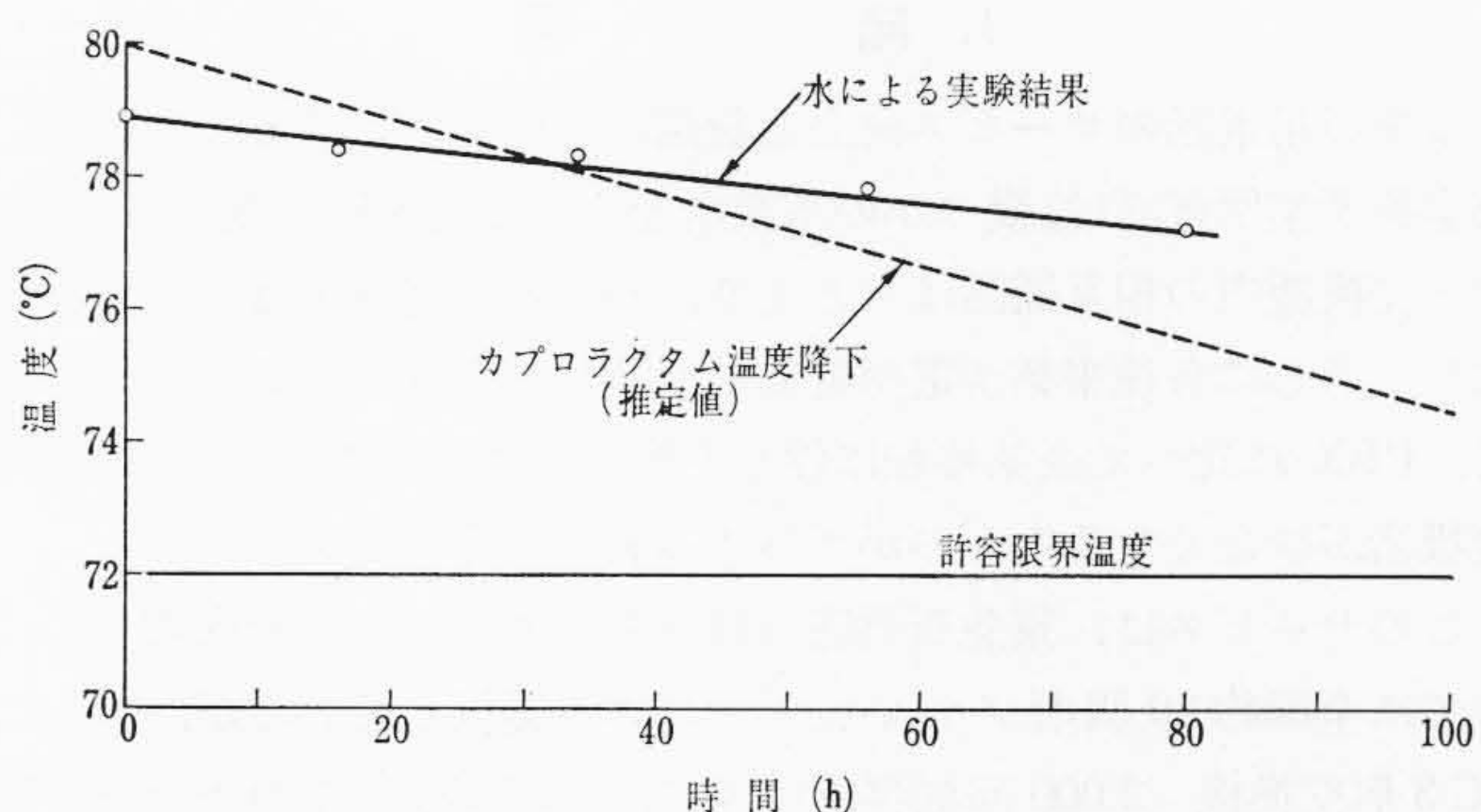


図15 タンク内平均液温の時間的变化

- (3) 車両連結時にポリウレタンフォームに生ずる動的応力は引張(または圧縮)が約0.3 kg/cm²、せん断が0.07 kg/cm²程度である。
- (4) ポリウレタンフォームの静的強度ならびに低サイクル疲労耐久応力は、いずれも上記のポリウレタンフォームに生ずる静的ならびに動的応力を上まわることがわかり、ポリウレタンフォームを内タンク支持強度部材として適用できることが確認された。終わりに臨み、35t積モルトンカプロラクタムタンク車の設計、製作、ならびに性能試験に関し、ご指導いただいた日本国有鉄道、車両設計事務所 村井主任技師、鉄道技術研究所 杉本技師、またポリウレタンフォームの発泡、作業ならびに強度試験にご協力いただいた東邦化学工業株式会社追浜工場および技術研究所の関係各位に対して深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 小西：化学工場 13 [10] 89~93 (昭和44-10)
- (2) N. Y. Tonawanda: Matelials in Design Engineering 55 [4] 128~129 (1962)
- (3) G. E. Irrgang: Glas. Ann. 87 [6/7] 391~393 (1963)
- (4) : Railway Locomotive & Car 140 [12] 38 (1966)
- (5) 島村：サンドイッチ構造 83 (昭和39 日刊工業)
- (6) 駒田：空気調和と冷凍 63~68 (1968 12)
- (7) 遠藤：硬質プラスチックフォーム (昭和41 朝倉書店)
- (8) 上村、花島、渡辺、井筒：冷凍 41 [465] 11~27 (昭和41-7)