

# 屋外石油貯蔵タンクのスロッシング防止方策

## について 第4報(最終回)

伏 見 英\*  
川 田 孝\*

### 1. ま え が き

水島流出油事故を契機として、屋外石油タンクの安全対策に関する技術基準が、51年1月、消防庁から通達されたことにより、保安対策も一段と強化されることになった。

筆者らは、地震時の石油タンクの安全対策のうち、浮屋根型タンクのスロッシング防止対策研究を実施してきたが、第3報までの問題点として、ソフトシールの液面減衰効果の有無、およびスロッシング防止装置の鋼製タンクへの適用の問題等が未解明であったことから、その最終回として、相似法則を緩和した鋼板モデルによる対震挙動実験を実施した。

また近年、大気汚染防止の観点から、揮発性液体を貯油する既設の石油タンク内に設置する傾向が見られる蒸発損失防止装置(インターナルフロート)の対震実験を行ったのでその実験結果について報告する。

### 2. 実験に関する諸項目

#### (1) 実験項目

- ア、ソフトシール、ガイドポールの減衰効果
- イ、スロッシング防止装置の効果
- ウ、シールの破壊試験
- エ、シールのひずみ測定(底板傾斜  $\frac{8}{200}$ )
- オ、蒸発損失防止装置の対震実験

#### (2) 供試実験体の構造概略

- ア、タンク本体……………写真1—(1), (2)
- イ、ポンツーン……………図1—図2
- ウ、防波プレート……………図3—図6
- エ、ソフトシール……………図7
- オ、インターナルフロートモデル…写真2—写真4

#### (3) 供試実験体の材質

- ア モデルタンク本体……………S S 41

- イ トップアングル……………S P C C
- ウ ウィンドガーター……………S P C C
- エ ゲージポール……………S G D A
- オ ポンツーン  
デッキプレート  
防波プレート……………S P G I
- カ ポンツーンサポートパイプ  
デッキプレートサポートパイプ……………S T P Y 41
- キ ユニバーサルジョイント……………S T P Y 41
- ク ソフトシール……………C R, ウレタン
- ケ インターナルフロートモデル……………A I P I H
- コ シールワイパー……………ブナN

#### (4) 計測機器

- ア 液面計
- イ 動歪計
- ウ 変位計
- エ 起振機
- オ 記録計

### 3. 実験結果

実験項目(1)のア、イ、に関する実験結果を図8—図10に示した。図8は、ソフトシールのない浮屋根モデルフロートの、共振時( $T_0/T=1$ )における最大応答液位とランダム波(300gal white noise+ 10gal sine wave)による最大応答液位を示したものである。なお、静水位100cm時の、1次共振振動数は0.96Hzである。

図8から、正弦波 30gal 時の最大応答液位  $h_{max}=300\text{mm P-P}$  であり、ランダム波 300gal 時の  $h_{max}=210\text{mm P-P}$  である。これに対して、ソフトシール(図7)をポンツーン外周に接合して、気密性と滑動性をもたせた場合の浮屋根モデルの応答が図9、図10である。いま、最大ピークについて比較すると、正弦波 30gal 時のソフトシールの液面減衰効果として、浮屋根モデル

\* 第二研究室

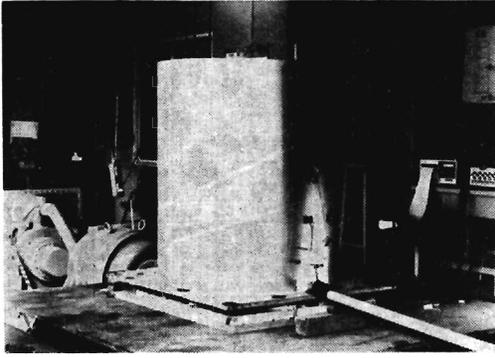


写真1-(1) タンク本体

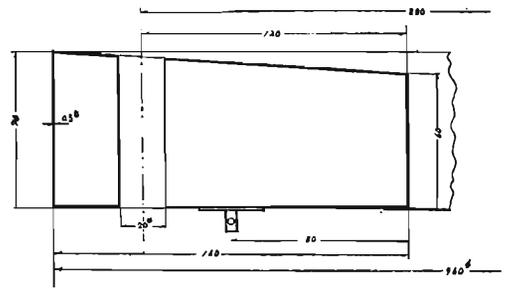


図2 ポンツーン拡大図

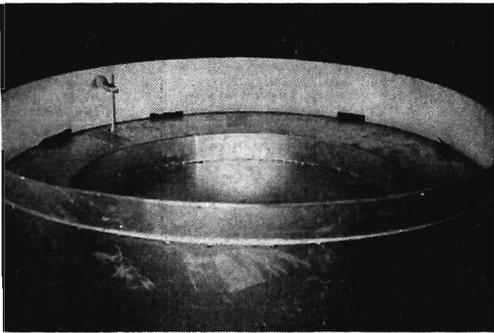


写真1-(2) タンク斜視図

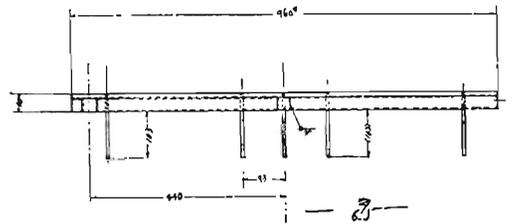


図3 防波プレート側面図

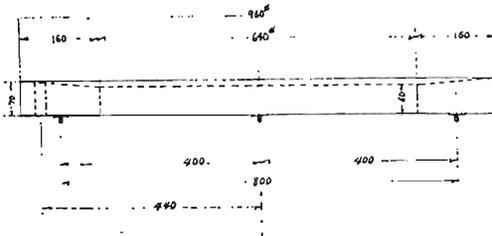


図1 ポンツーン側面図

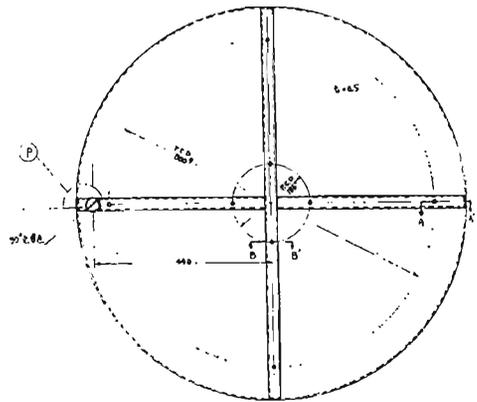


図4 防波プレート補強 (スチフナ)



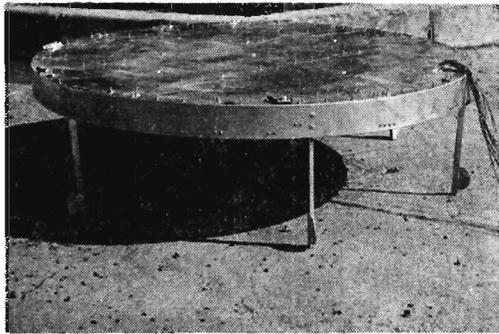


写真2 インターナルフロートモデル

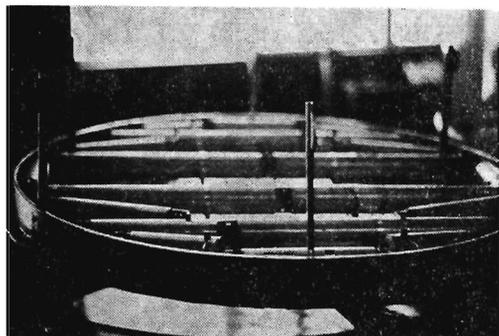


写真3 アルミポンツーン配置図

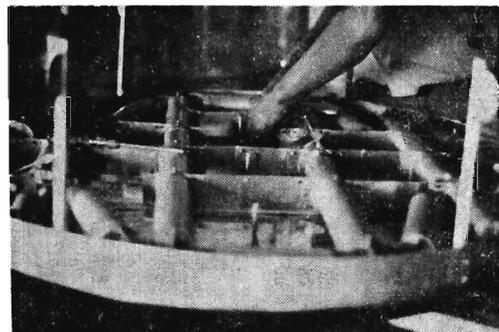


写真4 防波プレート配置図

の1/100を得る。また、ランダム波 300gal 時でも 1/12減衰する。このことから、ソフトシールは自由液面、フロートモデルに比較すれば、相当の減衰性を有していると考えられるが、この実験では、一定加速度レベル (60gal) を越えるとフロートモデルがロッキングして、液体が大動揺するから、ソフトシールの液面減衰効果に限度のあることが判明した。

また、ガイドポールには液面減衰効果は認められなかったが、浮屋根の回転防止に役立つことは実験過程で明らかになった。

スロッシング防止装置の液面減衰効果に関する実験結果を図9、図10から検討すると、連結手の間隔を

図8 ソフトシールのない浮屋根モデルタンク

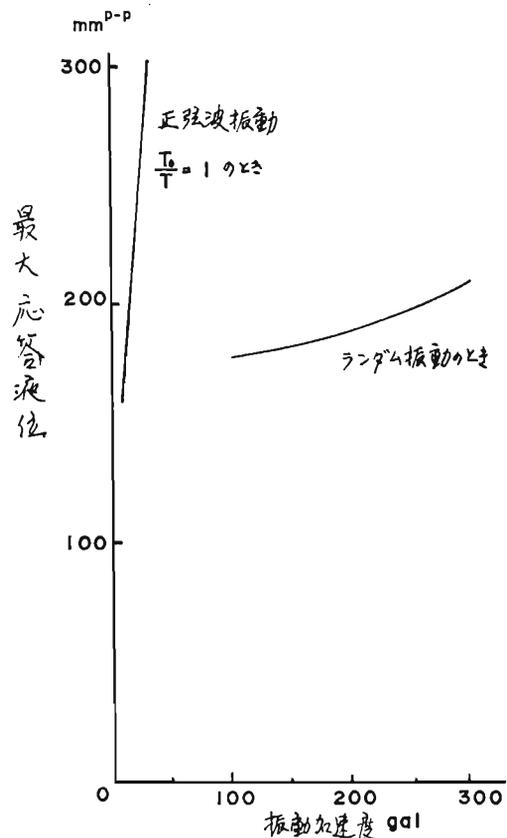


図9 ソフトシールのある浮屋根モデルタンク

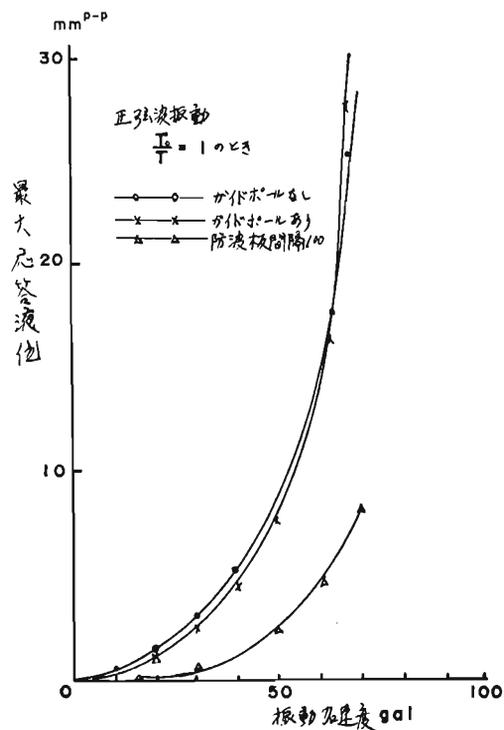
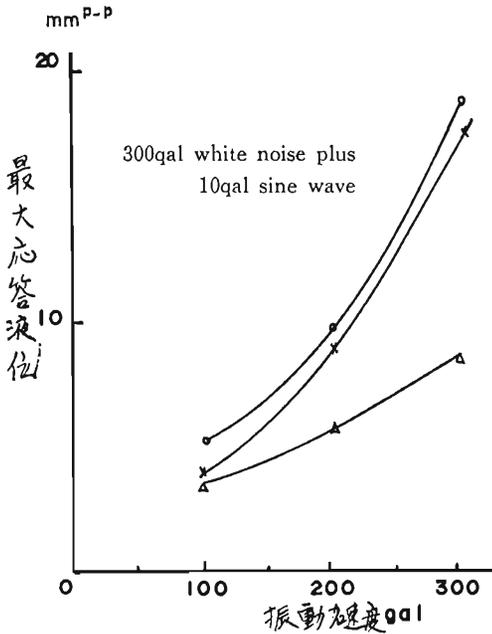


図10 ソフトシールのある浮屋根モデルタンク



100% (100dp)としたとき、正弦波 70gal 時で  $\frac{1}{25}$ 、ランダム波 300gal 時で  $\frac{1}{2}$  減衰し、100gal ( $T_0/T=1$ ) まで、容易に、液体のスロッシングを防止することが確認された。

故に、第3報の実験結果と類似することが、鋼板モデルタンクでも実証されたが、原型タンクの適用の問題については考察にゆずる。

実験項目(1)のウのシエルの破壊試験に関しては、400gal ランダム波+10gal 正弦波による強制振動実験を行ったが、シエルの損壊は認められなかった。

実験項目(1)のエの試験結果を図11～図14に示した。静水位を80cm、加振条件として、 $T_0/T=1$ 、10gal 正弦波時において、図11はタンク底板傾斜角0、図12はタンク底板傾斜角  $\frac{8}{200}$  としたときのシエルのひずみ量(%)を示している。(底板から110cmを測点とする。)

この実験結果から、 $\frac{8}{200}$  傾斜によるタンクの異常な変形は見られなかったが、これは振動床台が剛体と考えられるため結論に述べる。

図13、図14は自由液面の低加速度域 ( $T_0/T=1$ 、10gal) と浮屋根モデルの高加速度域 ( $T_0/T=1$ 、70gal) のひずみ量(%)を示している。(測点：底板より20, 40, 60, 80, 100, 120cm) 図14は浮屋根モデルがロッキングして、シエルとルーフ側面のシール部から液体が噴出するときの、シエルのひずみ量(%)を示している。300gal ランダム波加振と10gal 正弦波加振を

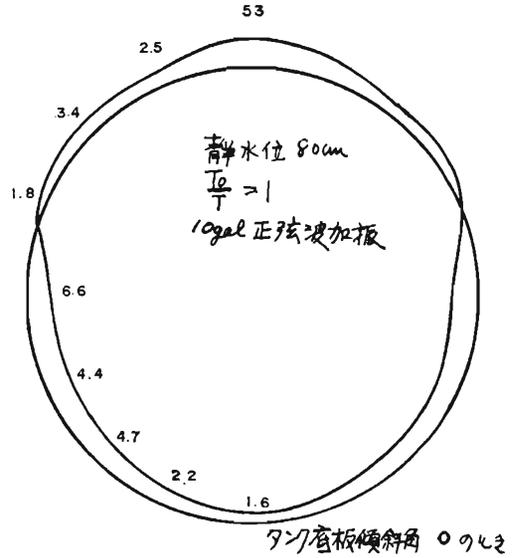


図11 シエルのひずみ試験-1

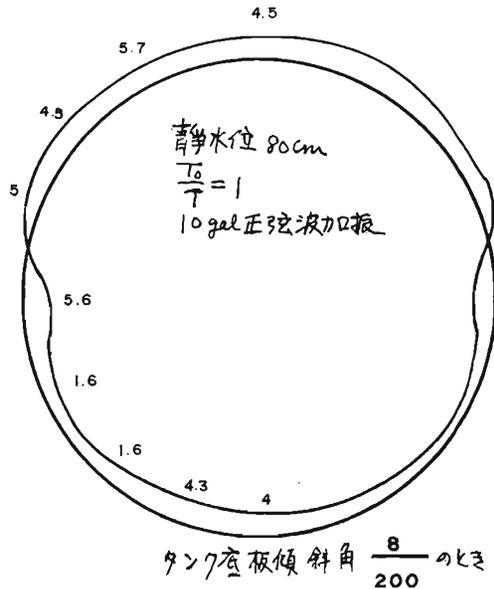


図12 シエルのひずみ試験-2

比較すれば、シエルのひずみ量はランダム波加振の場合が小さい。

したがって、浮屋根がロッキング運動するとき、トップアングル周辺のシエルは大きなひずみを生じると考えられるが、スロッシング防止装置を設置したとき、同一条件の実験からは、シエルにはほとんど変形が認められなかった。

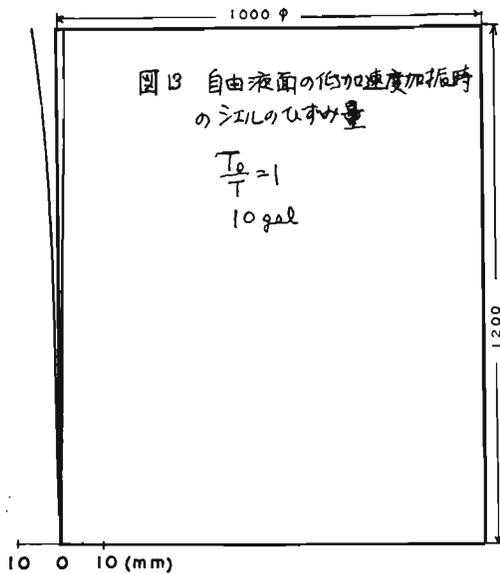


図13 自由液面の低加速度加振時のシエルのひずみ量

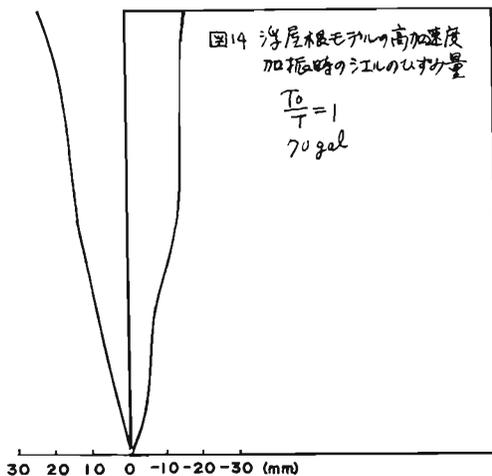


図14 浮屋根モデルの高加速度加振時のシエルのひずみ量

実験項目(1)のオのインターナルフローティングルーフモデル(原型1/5尺縮)の対震実験を、直径100cmφの静水位を420%として実験を行った。実験要領は(1)と同様であるが、写真3に示すように、インターナルルーフのシール部はブナNゴムをワイパーとしてシエルに密着させたものである。また、ルーフは相似構造モデルと重量相似構造モデルのA型、B型と、ポンツーンを加振方向と平行とするC型と垂直とするD型の4種について実験を行った。防波プレート(50%dp)は写真4のように配列し、フロートとプレート間に間

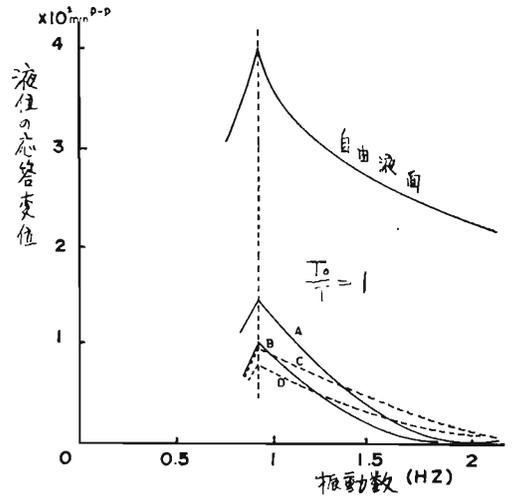


図15 モデルルーフをとりつけた時の液位の応答変位

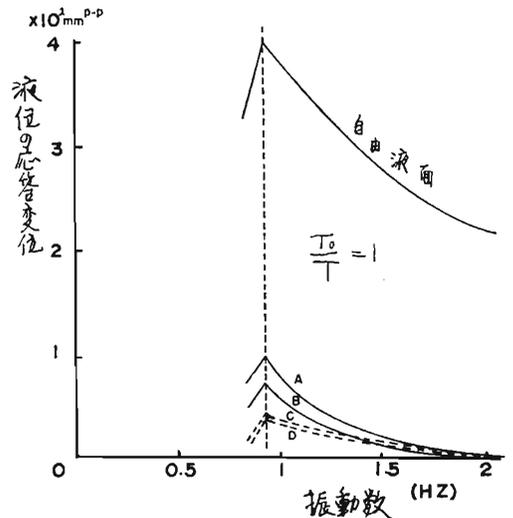


図16 防波プレートを設置したモデルルーフをとりつけた時の液位の応答変位

隔を与えた。

図15～図17に実験結果を示した。図15はモデルルーフの1次、2次、3次共振点の応答を示している。加振力は $\alpha_1=15\text{gal}$ 、 $\alpha_2=60\text{gal}$ 、 $\alpha_3=80\text{gal}$ とした。

図16は防波プレートをポンツーン間に設置したときの応答を示し、加振条件は同一である。

図15で、A、B、C、Dタイプの応答をみると、ポンツーンは振動方向と垂直の位置としたときの方が減衰が大きく、また、重量相似構造モデルの方が効果的である。

図16はポンツーン間に防波プレートを設置したときの応答であるが、図15と同様な結果を得た。したがって、防波プレート設置による液面の減衰効果に関し

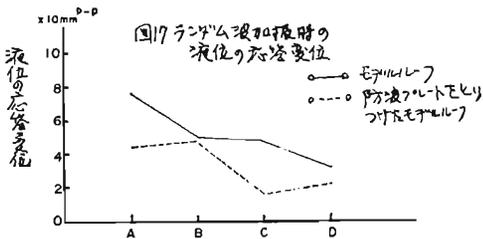


図17 ランダム波加振時の液位の応答変位

て、確実に評価することができると同時に、インターナルフローティングルーフの構造補強策としても有効であるといえる。

図17にランダム波 (300gal white noise + 10gal sine wave) の対震実験結果を示した。実線はモデルルーフ、破線は防波プレートを設置したモデルルーフの応答を示している。実験結果から、液面の減衰が大きいのはC型の重量相似構造モデルである。

#### 4. 結 論

- (1) シール方式の相異、あるいは、相似条件を充分考慮しなければならないが、一定加速度レベル (60 gal) を越えて、ソフトシールの減衰効果の評価できない。
- (2) スロッシング防止装置を設けることによって、100gal 程度まで浮屋根のロッキングを容易に防止できる。
- (3) タンク底板 8 / 200 傾斜による振動実験結果から、シールの異状な変形はみられなかったが、この種の実験では、地盤の弾性的性質を考慮したモデルを設定する必要がある。
- (4) 蒸発損失防止装置 (インターナルフローティングルーフモデルの 300gal 対震実験から、フロートがシールを損壊する危険性はみられなかった。
- (5) フロートのワイパーシールの減衰効果も、(1) と同様であるが、フロート下部に防波プレートを設置することにより、ロッキングを防止できる。

#### 5. 考 察

新潟地震 (地動卓越周期 6 秒, 最大加速度 50gal, 地動変位  $100\text{cm}^{\text{P-P}}$ ) に見られた石油タンク内液体のスロッシング現象は、地動卓越周期 ( $T_c$ ) と貯槽液体の固有周期 ( $\omega_r, \omega_c$ ) が一致、あるいは近似すれば必然的に発生する現象で特異な事例でないことは、第 3 報までに述べた。

しかし、貯槽液体のスロッシング現象は、小規模地震では発生しにくいようである。例えば、東京で感知した過去の数年間の地震 (49. 5. 9 : 伊豆沖地震, 50.

2. 8 : 銚子沖地震, 50. 4. 2 : 八大島地震) を見ると、銚子沖地震は震度 IV の中震であるが、管内の石油施設でスロッシングを誘発した事例は報告されていないが、前述した新潟地震は関東地方でも遠地震として感知され、出光興産千葉製油所内の大型石油貯蔵タンクの浮屋根がロッキングした事例が報告されている。したがって、スロッシング現象がただちに構造破壊、あるいは二次災害につながるものではない。

従来、スロッシングによる液体の溢流防止策として、ルーフストッパーの設置とか、浮屋根の破損、接触スパーク防止方策として、ガイドポールを増設する方式等が提案されたが、理想的には軟弱地盤を改良すると同時に地盤の防振対策を考慮すべきである。

筆者らは、研究過程において、スロッシング防止方策の一手段を提示しているが、今回の鋼板モデルによる実験結果から、装置の 1 次共振時のスロッシング防止効果として、100gal を得た。

スロッシング防止装置の原理に関しては、第 3 報に述べたが、構造面から、連結手の可変性をどのようにするかが問題である。実験過程の経験則から、静水位の 10% を限度として仮定すると、液位 10m, 20m で、それぞれ 1m, 2m となるが、油圧技術によれば、困難ではない。また、標準タイプの浮屋根の、ルーフサポートパイプ、あるいはデッキプレートサポートパイプの可動範囲から考えても、ボルトナット締め方式を利用した方が簡便になる。

防波プレートの板成は、当然、液体の動圧、衝撃圧、あるいは浮屋根の浮揚条件を考慮しなければならないが、最小肉厚とする場合、ポンツーンタイプのスチフナを防波プレート下側で溶接し、補強することも有効である。また、防波プレートには、排水パイプと泡消火液送水パイプを通すための貫通孔を設ける必要がある。

#### 6. 終 り に

現在までのプラントメーカー側の研究によれば、地震時のシールとアニュラープレートの応力解析結果として、降伏点の 3 倍で検討を試みているが、スロッシング対策として、区画板型のスロッシング防止装置を理論的、実験的に詳解している。いずれにしても、新潟地震以後 10 年間、スロッシングによる施設の損壊事例がみられないが、平常時の安全対策と同時に、地震時のスロッシング対策を講じておく必要があると考えられる。

終りに、本研究全般にわたって多くの文献を参考とし、また、ソフトシールに関しては、日本化工機 (株) の有益な助言を得た。ここに謝意を表します。

中であるが、放射された液に細かい気泡が混入し乳白色に変っていること、及びノズル部分で流速約 20m/sec の速度で噴出されることから気泡による粘度の低下ではないかと考えられる。

d 50mmホースでの水ゲルの放射

今までホースの摩擦抵抗を考慮して、65mmφホースのみ使用していたが、今回実験用として50mmφホースによる放射を実施してみた。ラインプロポーション（内径 10mmφ）16型ノズルを使用した。ラインプロポーションの吸入が不安定で予定より多く吸入しすぎたが、放射が可能であることが分った。特に射程は23型と同様な飛距離が得られたことで、水量でなく粘度による相関関係があった。

e 水ゲル泡について

この実験は粘度を有する液体でも、泡剤を混入することによって容易に泡放射ができるか否かを調査するためのものであったが、粘度約50CPで発泡率が、4.5倍の泡が同射程で放射でき、6時間後の消泡性は泡剤のみに比較し約1/2の消泡率で泡が消えにくいこと等、増粘性の特徴が明らかになった。

表3-3 水平落下距離の比較

実験別	ノズル圧 3 kg/cm <sup>2</sup>		ノズル圧 5 kg/cm <sup>2</sup>		粘度 (CP) 14°C
	距離 (m)	のび率	距離 (m)	のび率	
実験1	32	1.00	38	1.00	約1.5
実験2	34	1.06	42	1.11	約3,600
実験3	36	1.13	49	1.27	約4,900
実験4	32	1.00	—	—	約700

表3-4 圧力損失一覧表

実験別	ノズル圧 3 kg/cm <sup>2</sup>		ノズル圧 5 kg/cm <sup>2</sup>		備考
	ラインプロ	ホース	ラインプロ	ホース	
実験1	4.0	0.5	6.5	0.5	65mmφホース延長 2本 水
実験2	3.5	1.0	6.5	1.0	" 水ゲル
実験3	2.7	1.8	5.5	3.5	65mmφホース延長 4本 水ゲル
実験4	2.7	2.3	—	—	65mmφホース延長 6本 水ゲル

表3-5 500型ラインプロポーションの吸入試験結果（水の場合）

送水圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	流量 (ℓ/分)	ノズル圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	圧損 (kg/cm <sup>2</sup> )	吸入率(%)
6.0	500	1.5	4.5	3.1
6.5	520	3.0	3.5	2.9
6.0	500	3.5	2.5	少量
6.0	500	4.0	2.0	逆流し吸入せず

但し 65mmホース1本延長して実施した。

表3-6 粘度実測値とPH値, 吸入率による粘度差

実験別	実測粘度 (CP)	PH値による粘度 (CP)	吸入率による粘度 (CP)
実験2	3,600	15,300	15,800
実験3	4,900	13,500	7,300
実験4	700	8,000	100
実験5	3,200	15,400	15,500

B型粘度計 6.0rpmにて測定

5. おわりに

今回の実験から、水ゲルの持つ再燃防止効果、水が増粘されることによる注水対象物に対する集中性、界面活性剤泡剤に水ゲルを添加することによって泡剤の欠点である消泡性の解消など一般火災における水ゲルの有効性が確認された。反面、ホースを延長するにつれてポンプ圧力も増加しなければならないほどの問題点もあり、今後水ゲル放射に有効なラインプロポーションの開発も併せて進めてゆく必要があることが痛感された。

今後、適当な実験可能な建物があれば、実大規模の火災実験により、水ゲルの持つ水損防止効果並びに消火効果について検討を加えていきたい。