

## 6. 貯槽内液面のスロッシング現象に関する実験的研究

奥村哲夫・鈴木森晶

### 1. はじめに

石油タンクで代表されるような各種の大型貯槽内の液面は、人体に感じない程度の加速度（10gal以下）で、周期が数秒から十数秒程度の非常にゆっくりとした地震動、いわゆる長周期地震動を受けると液体の共振によって、長いものでは数日間という長時間に亘って大きく揺動（Liquid Sloshing）し、これが貯槽本体に多大な被害をもたらすことが知られている。たとえば、新潟地震（1964年、M=7.5）や十勝沖地震（2003年、M=8.0）では、石油タンク内の液面上の浮き屋根が大きく上下に揺れ、これによって浮き屋根の破壊・沈没や浮き屋根周面とタンク側面との摩擦に起因した火災が発生した。

中部圏においては、伊勢湾岸を中心に数多くの石油備蓄基地や工場が存在し、直径40m以上の大型石油タンクや工場内の大型貯槽の長周期地震動に対する安全性の確保が急務とされている。しかしながら、この種の研究は殆どなされておらず、効果的な対策方法の提示には至っていない。そのため、液面を下げることにより地震時に貯槽内の液体があふれ出すことを抑制する程度の対策しか採られていないのが現状である。従って、早急に現象を解明するとともに効果的な対策方法の構築の必要があると考えられる。

本報告は、水平地盤上および、側方流動などによる地盤の変形や浮き上がりによって生じた傾斜地盤上の石油タンクを対象として、スロッシングに及ぼす振動数 $f$ 、液深 $H$ 、浮き屋根の有無の影響を調べるために行った基礎実験の結果に関するものである。

### 2. 実験概要

実験に用いた円筒形模型タンク（実物の約1/100）は直径60.0cm、高さ50.0cmの塩化ビニール製である。タンク内の液体は入浴剤を用いて着色した水道水、液面上に設置する浮き屋根はビニール製の円板（直径59.0cm、厚さ1.0mm、外周に $\phi$ 8mmのゴム付、質量470g）を用いた。タンクの加振は、台寸法 $0.7 \times 1.4$ m、ストローク $\pm 80$ mm、加振振動数DC～10Hz、油圧サーボ方式の振動台によって行った。

実験は、①水平地盤上のタンクでは、液深 $H$ を5.0～35.0cmの範囲で5種類変化させ、各液深において、振幅一定で加振振動数を変化させ、タンク側壁での波高が一定状態で最大となった時の振動数をその液深におけるスロッシングの固有振動数 $f$ とした。なお、浮き屋根設置の場合は側壁における浮き屋根の上下動に着目した。また、②傾斜地盤上のタンクでは、液深 $H=10, 20, 30$ cmの3ケース、傾斜率 $\theta = \text{傾斜高 } s / \text{内径 } 2r$ とし、 $\theta = 0 \sim 25\%$ の間で6ケース変化させて行った。図-1は、地盤が傾斜した場合を想定した実験の模式図である。

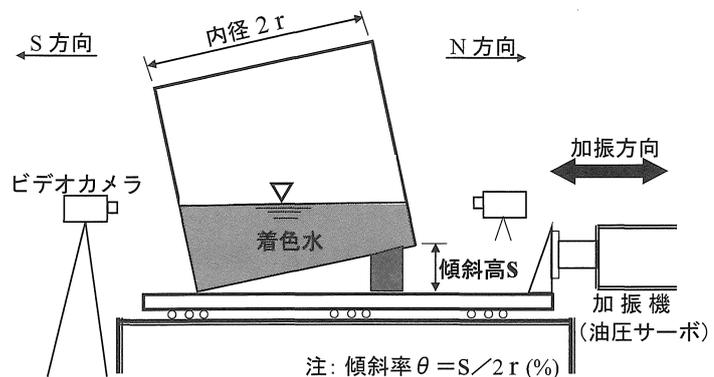


図-1 実験装置の模式図（傾斜地盤）

### 3. 結果および考察

#### 3-1. 水平地盤上タンク

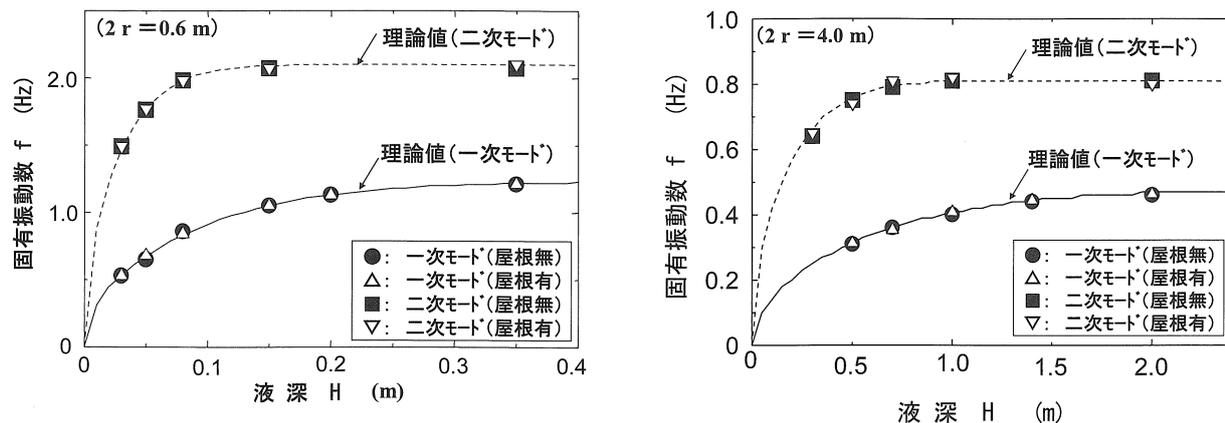
##### (1) スロッシングの固有振動数 $f$ について

図-2 (a) は、液深 $H$ と液面のスロッシング固有振動数 $f$ の関係を示したもので、図中の実線および破線

は次式より得られる一次および二次モードに対する理論値である。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r} \times \varepsilon_i \times \tanh\left(\varepsilon_i \times \frac{H}{r}\right)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

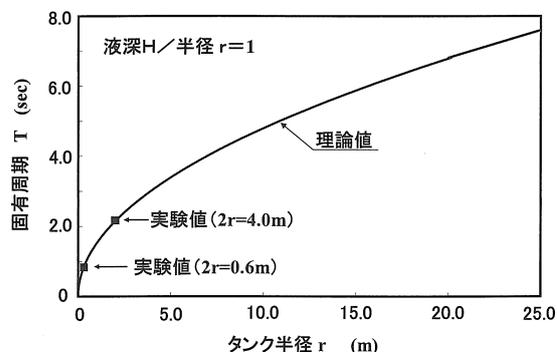
ここで、H：液深 (m)、g：重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)、r：タンクの半径 (m)、 $\varepsilon_i$ ：1次モードでは 1.841、2次モードでは 5.33 である<sup>1)</sup>。図より、スロッシング固有振動数は、液面の揺れ（モード）の違いおよび浮屋根の有無に関わらず実験値と理論値がほぼ一致することが分かる。このことは、同図 (b) に示した直径 4 m のタンクを用いた結果<sup>2)</sup> からも知ることができる。



(a) 直径 0.6m タンク (b) 直径 4.0m タンク

図一2 液深 H とスロッシングの固有振動数 f の関係

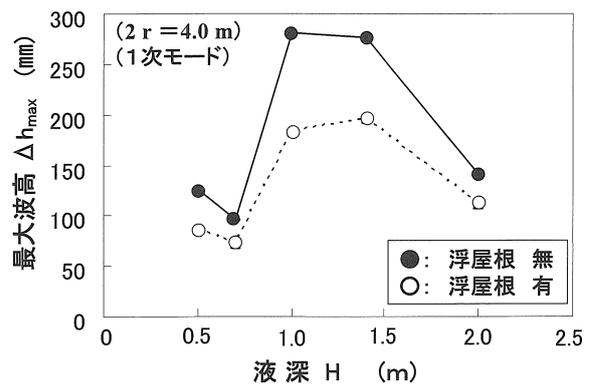
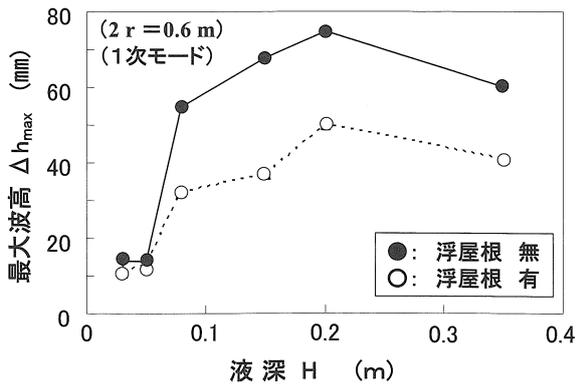
図一3は、液深 H / タンク半径 r = 1.0 の下で得られた実験結果をタンク半径 r とスロッシング固有周期 T（最大波高状態における周期）の関係で示したものである。図中の理論値と実験値は一致しており、長周期地震動（T ≒ 6 ~ 8 秒）においては半径 r = 20 ~ 25m のタンクに対してスロッシングの危険性が高いと言える。



図一3 タンク半径 r と固有周期 T の関係

(2) 最大波高について

図一4 (a) は、スロッシング現象に対して最も危険な一次モードの波高について、液深 H と最大波高  $\Delta h_{max}$  の関係を示している。図を見ると、浮屋根設置の最大波高は浮き屋根が無い場合と比較していずれの液深においても小さくなっており（約 10 ~ 40%）、浮屋根によるスロッシング抑制効果が認められる。このことは、同図 (b) に示した直径 4 m のタンクを用いた結果<sup>2)</sup> からも知ることができる。

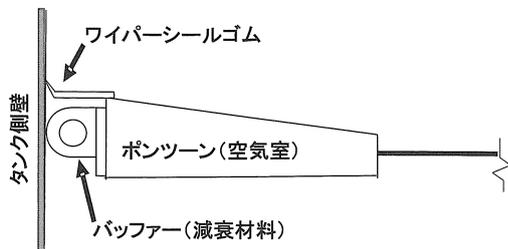


(a) 直径 0.6m タンク

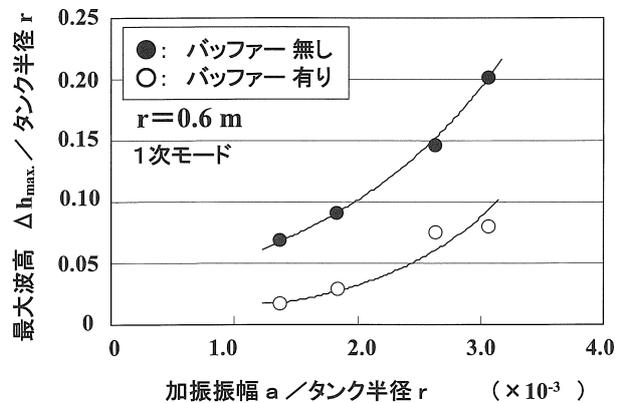
(b) 直径 4.0m タンク

図一四 浮き屋根の有無がスロッシング波高に及ぼす影響 (一次モード)

一般に、タンク側壁と浮き屋根ポンツーン (空気室) の間には、雨水侵入防止のためのワイパーシールおよび衝突防止のためのバッファが固定されている。図一五は、バッファに減衰効果を持たせることによって液面揺動時には振動エネルギーを吸収してスロッシングを抑制し、さらに浮屋根 (ポンツーン) の損傷・破壊の防止機構を有するバッファの概略図である。図一六は、減衰効果のあるバッファのスロッシング低減効果を調べた結果であり、最大波高  $\Delta h_{max}$  と加振振幅  $a$  との関係で示している。図より、加振振幅の増大に伴って最大波高が大きくなり、また、バッファを取り付けることによって最大高が  $1/2$  程度減少していることが分かる。



図一五 浮き屋根に取り付けたバッファ



図一六 最大波高とバッファの有無

### 3-2. 傾斜地盤上タンク

#### (1) スロッシングの固有振動数 $f$ について

実験より得られた各々の液深における傾斜率と固有振動数との関係を表一に示す。表より、傾斜率  $\theta = 0\%$  の各液深の 1 次モードのスロッシング固有振動数は理論値とほぼ一致していることが分かる。また、図一七は、液深 20cm における固有振動数と傾斜率  $\theta$  (%) の関係を示している。なお、図中の理論値は、タンクが傾斜することによって液面が楕円形になり、この時の長径を見かけ上の直径として算出した。図より、固有振動数は、実験値と理論値共に、傾斜率の増加に伴ってほぼ同様の傾向で低下することが分かる。

液深と振動数の関係については、式 (1) から液深が大きくなると固有振動数も大きくなることは明らかである。しかし、式 (1) はタンクの内径  $r$  と液深  $H$  のみがパラメータとなっているため傾斜率が 20%程度に大きくなるとやや差が大きくなるようである。

表-1 液深、傾斜率と固有振動数の関係（浮屋根無し）

液深 \ 傾斜率	理論値	実験値					
	0%	0%	5%	10%	15%	20%	25%
100mm	0.91	0.92	0.92	0.91	0.90	0.89	0.86
200mm	1.13	1.13	1.13	1.12	1.12	1.11	1.10
300mm	1.20	1.20	1.20	1.19	1.19	1.18	1.17

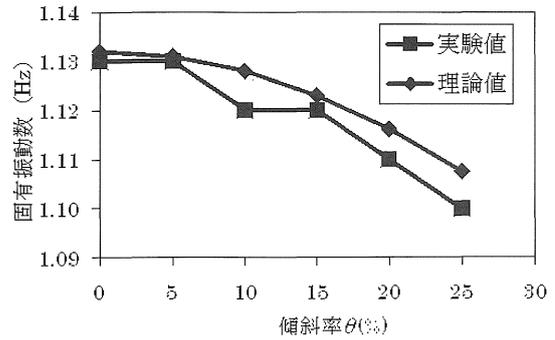


図-7 傾斜率と固有振動数の関係（液深 20cm，浮屋根無し）

(2) 最大波高について

図-8は、浮き屋根が無い場合の傾斜率 $\theta$ とスロッシング波高 $\eta_{max}$ の関係を各液深について示した結果である。同様に、浮き屋根のある場合の結果を図-9に示した。図より、液深100mmにおける液面挙動(●印)は傾斜率の増加に伴い減少傾向、液深200mm(■印)ではほぼ一定値、一方で、液深300mm(▲印)では増加傾向にあることが分かる。傾斜率300mmに着目すると、傾斜率25%の波高 $\eta_{max}$ は0%と比較して60mm(直径に対して約10%)増大している。また、実験時における液面挙動の観察において、液深100mm時に傾斜率の増加に伴う液面挙動の著しい変化がみられた。特に傾斜率25%では、タンク南側での内容液の滞水と北側への跳水現象が繰り返し確認された。

また、図-9より、浮屋根を設置した場合のスロッシング波高 $\eta_{max}$ は、傾斜率 $\theta$ の違いに対して最大5mm程度の変動で、ほぼ一定値であることが分かる。すなわち、浮屋根式タンクにおけるスロッシング波高 $\eta_{max}$ は、浮屋根無しの状態と比較して、傾斜による影響が非常に少ないことがわかる。しかしながら、浮屋根が有る場合は、加振終了後しばらくすると、南北のタンク側壁に浮屋根が衝突する現象が確認された。この現象は傾斜率の増加に伴って顕著に現れ、液深が大きいほど衝突する現象が激しくなった。このことはタンクの傾斜によってタンク側面と浮屋根の隙間が増加するため、タンク内での浮屋根の移動可能距離が大きくなり、結果的に衝突速度が増加したことが主因であると考えられる。なお、本実験で用いた浮屋根はポンツーンに相当する部分に用いた材料の浮力が大きく沈没することは無かったが、実タンクでは、ポンツーンの損傷などに起因して沈没などが懸念される。

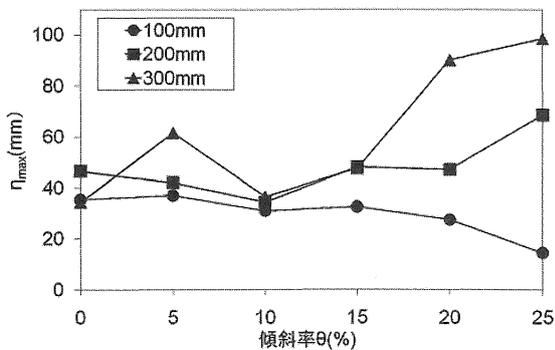


図-8 傾斜率と $\eta_{max}$ の関係（浮屋根無し）

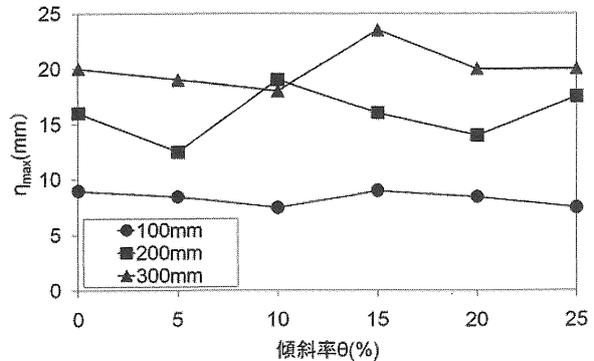


図-9 傾斜率と $\eta_{max}$ の関係（浮屋根有り）

#### 4. まとめ

本実験より得られた結果を以下に示す。

水平地盤上タンクの模型実験では、

- 1) スロッシング固有振動数は、液面の揺れ（モード）の違いおよび浮屋根の有無に関わらず、実験値と理論値がほぼ一致する。
  - 2) 浮屋根設置のタンクは、設置しないタンクと比較してスロッシングを 10～40%程度抑制することができる。
  - 3) さらに、浮屋根にバッファ（減衰材料）を設置することにより、波高を最大 50%程度低下することができる。
- 傾斜地盤上タンクの模型実験では、
- 4) タンク傾斜時における固有振動数は、どの液深においても傾斜率が大きくなるにつれ低下した。
  - 5) 傾斜したタンクの楕円状液面の長径を見かけ上の直径とした式（1）から求めた固有振動数と実験から求めた固有振動数は比較的一致する。
  - 6) 浮屋根無しの場合、傾斜率の違いによって液面挙動（スロッシング波高）の変化が顕著に現れた。一方、浮屋根設置の場合は傾斜率の違いによる液面挙動の変化は小さい。
  - 7) タンクの傾斜が大きくなるほど浮屋根がタンク側面に激しく衝突することが確認された。この衝突は浮屋根の破損、沈没、浮屋根上部への内溶液の漏水、タンクへの損傷などに繋がり、甚大な被害の生じる可能性があるかと推察される。

#### （参考文献）

- 1) Housner,G.W.: Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bull.Soc.Am,Vol.47,1967
- 2) 地震情報活用と防災拠点形成による地域防災力向上技術開発,平成 16～20 年度「私立大学学術研究高度化水深事業」産学連携研究推進事業最終報告書,2009
- 3) 仁尾浩之・鈴木森晶・青木徹彦・奥村哲夫：固定屋根式タンクのスロッシング現象の検証試験,土木学会第 61 回年次学術講演会概要集,pp.877-878,2006.9
- 4) 鈴木森晶・奥村哲夫・山城屋誠一：傾斜した貯蔵タンクのスロッシング現象に関する実験,土木学会中部支部平成 21 年度研究発表会講演概要集,pp.67-68,2010.3