

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 補足-028-10-23 改0
提出年月日	2024年1月22日

容器のスロッシングによる影響評価について

2024年1月

東京電力ホールディングス株式会社

容器のスロッシングによる影響評価について

目 次

1. 概要	1
2. 評価対象の選定	1
3. 評価方法	2
3.1 評価方針	2
3.2 応力評価方法	2
3.3 評価フロー	4
4. 屋根の接続部に対する評価手法の選定について	6
5. 屋根の接続部に対するスロッシングの影響評価結果	8
5.1 評価対象	8
5.2 評価条件	8
5.3 評価結果	12
〈参考1〉スロッシングを考慮した場合の内包液の挙動について	13
〈参考2〉円筒形タンクのスロッシング評価 抜粋	15
〈参考3〉スロッシングに対する評価対象部位の妥当性について	16
〈参考4〉容器構造設計指針・同解説 抜粋	18
〈参考5〉固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計（第2報） 抜粋	20
〈参考6〉スロッシングにより屋根に衝突する液体が屋根を離れる際の負圧の影響について	22
〈参考7〉速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期及び波高の算出方法	23
〈参考8〉屋根板における地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳について	24
〈参考9〉スロッシング影響評価における評価の保守性について	27

1. 概要

容器の内包流体には、水平方向の地震によりスロッシングが発生し、地震のエネルギーが分散される。そのため、容器胴板及び基礎ボルトの耐震強度評価は、スロッシングを考慮して内包流体を固定質量と揺動質量に分けて評価するより、スロッシングを考慮せずに内包流体全てを固定質量で評価する方が保守的な評価結果となる（参考1）。したがって、容器の耐震強度評価においては、内包流体を固定質量で評価している。

一方、容器の屋根においては、スロッシングで内包流体が屋根に到達する場合、スロッシングによる荷重が作用する。そこで、スロッシングで内包流体が容器の屋根に与える影響について評価する。この屋根への影響評価でも内包流体を固定質量で評価する保守的な評価方法を用いる。

2. 評価対象の選定

スロッシングによる影響評価の対象は、耐震重要度分類Sクラス及び重大事故等対処設備から、スロッシングによる溢水等のおそれがあるものを選定する。なお、VI-1-1-9「発電用原子炉施設の溢水防護に関する説明書」において、地震時に溢水源とする容器（基準地震動S_sに対する耐震性を確認していない機器）は、本評価の対象外とする。表1に影響評価の対象とした容器を示す。

表1 影響評価の対象容器

名称	形状	耐震重要度分類	設備分類	内径 (mm)	全高 (mm)	胴高さ (mm)	液位 (mm)
軽油タンク A (6号機)	平底たて置き円筒形容器	S	常設/防止 (DB拡張) 常設/緩和 (DB拡張)	9,800	10,344	9,500	7,495
軽油タンク B (6号機)	平底たて置き円筒形容器	S	常設/防止 (DB拡張) 常設/緩和 (DB拡張)	9,800	10,392	9,500	7,495
軽油タンク A (7号機)	平底たて置き円筒形容器	—	常設耐震/防止 常設/緩和	9,800	10,392	9,500	7,495
軽油タンク B (7号機)	平底たて置き円筒形容器	—	常設耐震/防止 常設/緩和	9,800	10,344	9,500	7,495
ほう酸水注入系貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器	S	常設耐震/防止	3,300	4,100	4,079	3,736
原子炉補機冷却水系サージタンク	平底たて置き円筒形容器	S	常設/防止 (DB拡張) 常設/緩和 (DB拡張)	2,500	3,547	3,515	3,305
復水貯蔵槽	ライニング槽 (矩形)	B	常設耐震/防止 常設/緩和	たて:11,500 横:11,850	16,593	16,400	9,200

3. 評価方法

3.1 評価方針

容器のスロッシングによる波面が屋根に衝突することで、屋根に荷重が作用する。スロッシングによる波高は地震動の増加により大きくなるが、波面衝突によってスロッシング形状の乱れが大きくなり、衝突圧力が抑えられる傾向がある。一方、波面衝突による荷重は、内包流体の上部（揺動質量）が屋根に沿って上昇することによるものである。

本評価ではスロッシングによる流体力として、容器内包液の質量 m に、内包液のスロッシングによる水平方向応答加速度 α_H が作用した際の荷重 F が、側壁や重力の影響を受けずに、屋根に対して鉛直上向き方向に全て作用するものと保守的に仮定し評価（以降「保守的な評価」と称す。）を行う。保守的な評価の概略図（軽油タンクの例）を図1に示す。

内包液をスロッシングにより生じる動液圧荷重として考慮した場合、内包液の荷重は一部が上方向に逃げてしまうが、「保守的な評価」を用いる場合、内包液に作用する荷重の全てが一方向に作用するものと扱うことから、保守的な評価となる。また、スロッシングによる波は、衝突により砕けること、発生する荷重のうち瞬間的な荷重は、屋根の変形に与える影響は限定的であることが電力共同研究「円筒形タンクのスロッシング評価」〈参考2〉に示されている。

なお、スロッシングによる波が屋根に衝突し離れる際の負圧の影響は参考6に示すとおり軽微である。また、評価に用いる荷重については、屋根の鉛直方向地震力による慣性力とスロッシングによる荷重 F との組合せが考えられるが、参考8に示すとおり柏崎刈羽原子力発電所6/7号機での屋根の質量は容器内包液の質量 m に比べて十分に小さいため、本評価ではスロッシングによる荷重 F のみを評価する。

3.2 応力評価方法

本評価ではスロッシングによる流体力として、タンクを上方から見たときの屋根の接続部より内側の面積（水平投影面積）で液位の高さの容器内包液の質量 m に、内包液のスロッシングによる水平方向応答加速度 α_H が作用した際の荷重 F が、側壁や重力の影響を受けずに、鉛直上向き方向に全て作用するものとする。

スロッシングによる荷重が、屋根全面に均一に作用するものとした場合、屋根に負荷される荷重を設計弱部である屋根の接続部で負担すると仮定し、屋根の健全性を屋根の接続部に対して確認する。評価部位の妥当性を参考3に示す。

評価部位は、屋根と胴板の溶接部（部位Ⅰ）及び、屋根の設計弱部（部位Ⅱ）（以下、部位Ⅰと部位Ⅱを合わせ「屋根の接続部」という。）とする。評価部位を図1に示す。

屋根の接続部は円周方向に一樣の断面であり、荷重が均等かつ一樣に引張荷重として上向き一方向にのみ作用し、せん断破壊は想定されないことから、屋根の接続部に作用する応力は、せん断応力ではなく膜応力として扱う。応力評価モデルを図2に示す。なお、設計・建設規格において、溶接部の継手効率に関する要求は、屋根部に対して規定されていない。

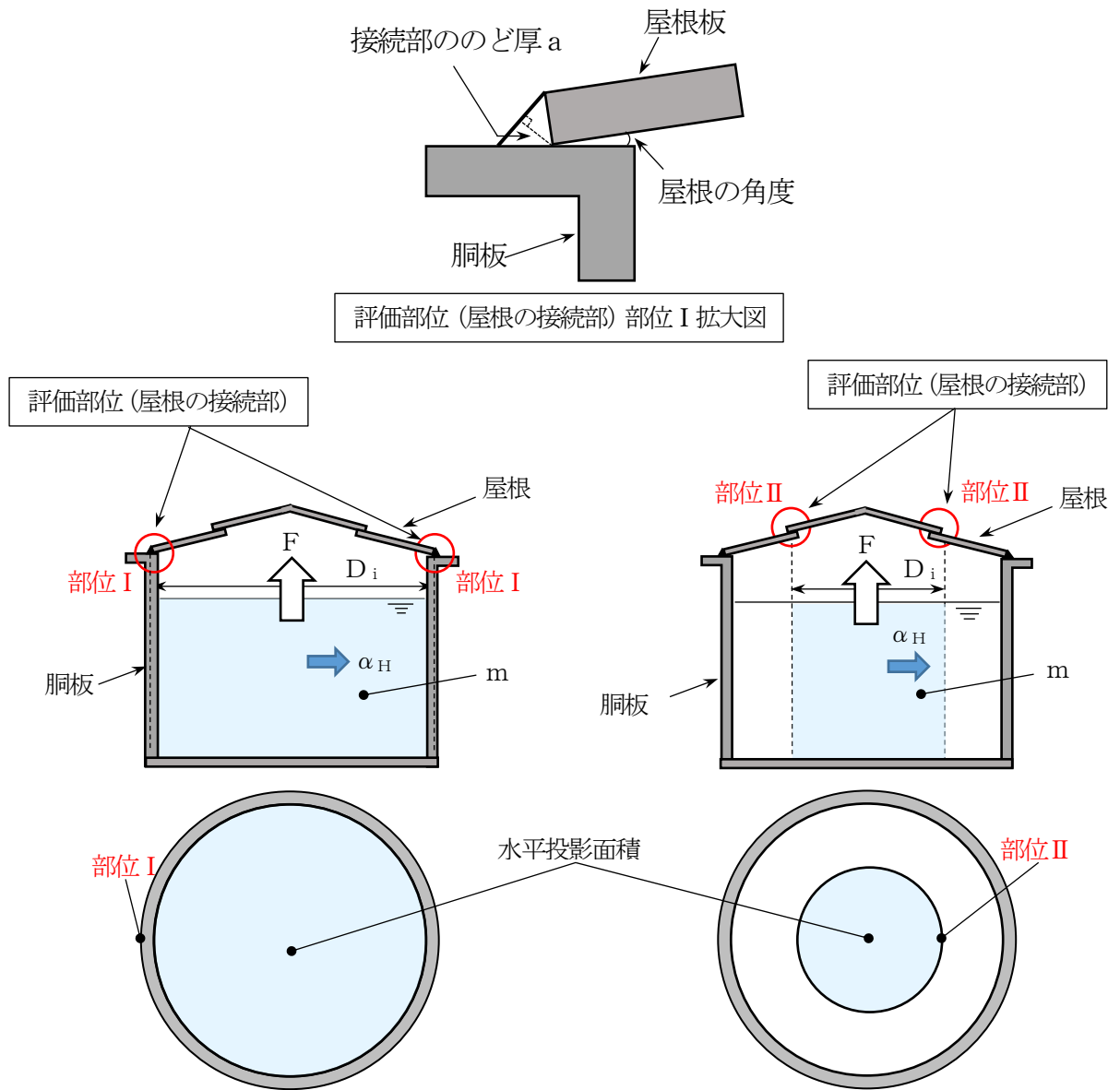


図1 保守的な評価の概略図 (軽油タンクの例)

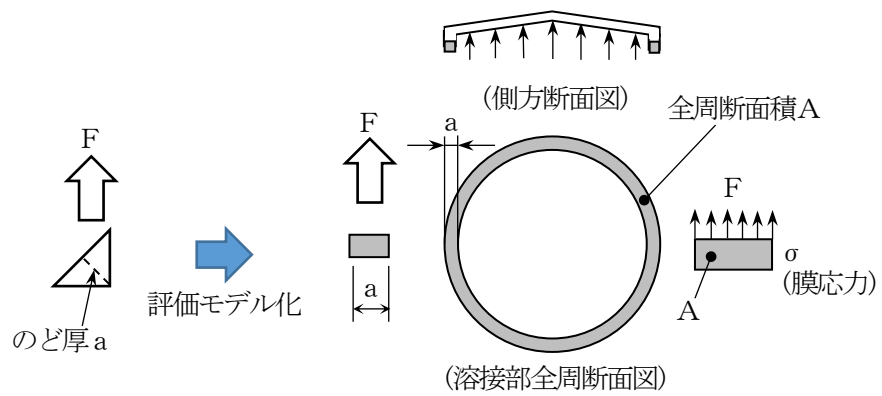


図2 応力評価モデル図

荷重Fを、屋根の接続部の全周断面積Aで除した応力 σ が許容値以下となることを確認することで、屋根の接続部の応力評価を行う。スロッシングによる評価に用いる評価式を以下に、記号の説明を表2に示す。

一般にスロッシング評価では、速度応答スペクトルを用いるため、内包液のスロッシングによる水平方向応答加速度 α_H は、速度応答スペクトルから求める。減衰定数は、VI-2-1-6「地震応答解析の基本方針」に記載の減衰定数（液体の揺動0.5%）を用いる。

$$\text{発生応力 } \sigma = \frac{F}{A}$$

$$\text{ここで, } F = m \alpha_H$$

$$A = \pi a D_i$$

表2 評価に用いる記号

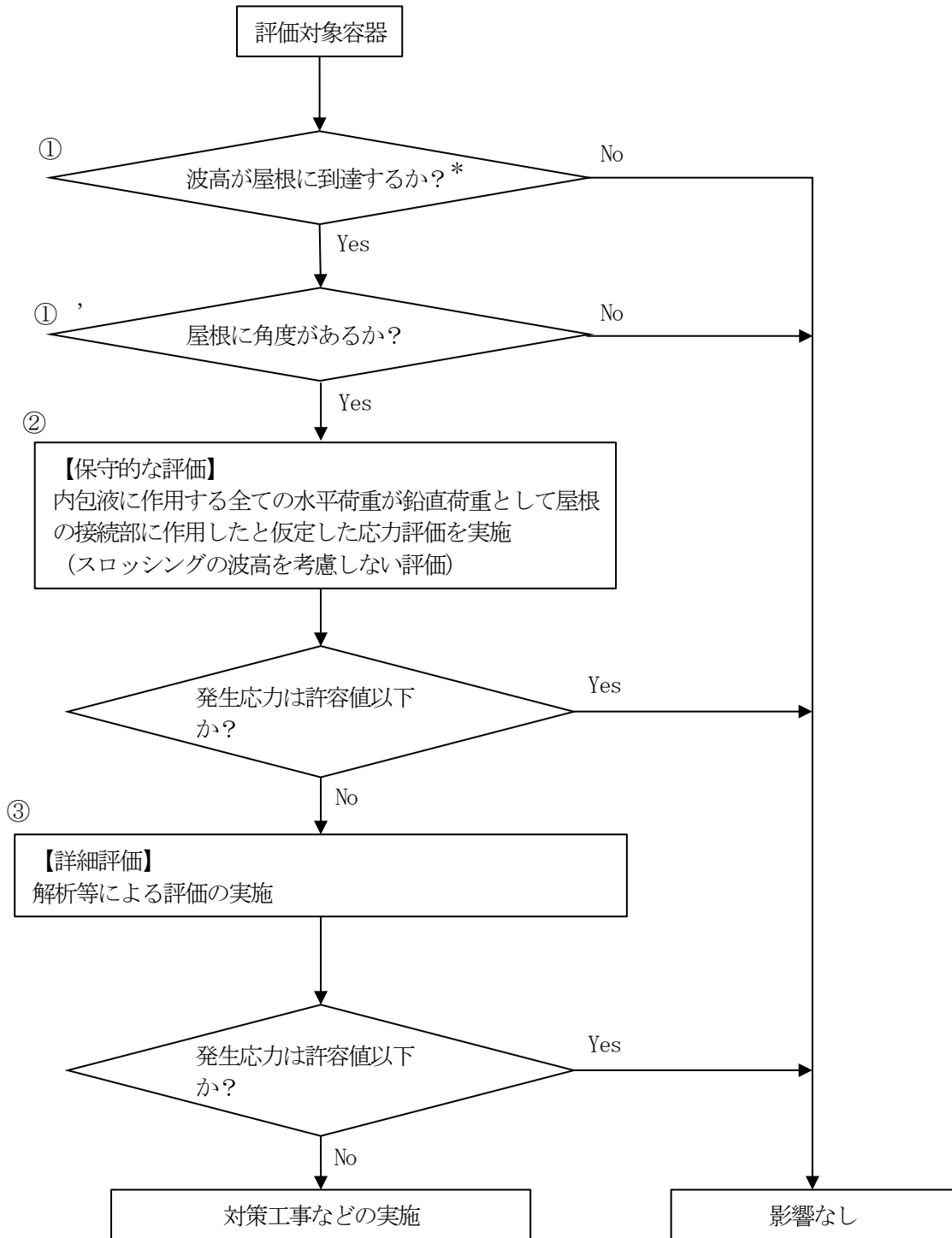
記号	記号の説明	単位
F	スロッシングによる荷重	N
m	容器内包液の質量	kg
α_H	容器内包液の水平方向応答加速度	m/s^2
a	屋根の接続部ののど厚	mm
D_i	屋根の接続部の平均直径	mm
A	屋根の接続部の全周断面積	mm^2

3.3 評価フロー

容器について、屋根の接続部の強度を下記の手順で評価し、スロッシングの影響が無いことを確認する。評価フローを図3に示す。

- ① 屋根に内包液が到達するか。
- ①' 屋根に角度があるか*1。
- ② 内包液が到達する場合は、「保守的な評価」で屋根の接続部の発生応力が許容値以下か。
- ③ 屋根の接続部の発生応力について、「詳細評価」が必要な場合は、解析等による評価を実施。

*1 参考資料（容器構造設計指針・同解説（参考4））より容器の屋根の角度が小さい場合、固定屋根によるスロッシングの影響が拘束され、スロッシングを起こした内包液が上昇できず腰掛圧が生じないことが示されている。また、参考資料（固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計（第2報）（参考5））にも、腰掛圧は受圧点における最高液位からの静水圧に大略等しいので、平板及び平板に近い屋根の場合は無視してよいと示されている。よって、平板屋根の場合には、②以降の評価の対象外とする。



* : 柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号機の基準地震動 S_s は長周期成分の地震動が大きいため、スロッシングによる波高は屋根に到達するものとして評価を行う。

図 3 柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号機の屋根の接続部に対する耐震評価フロー

4. 屋根の接続部に対する評価手法の選定について

図3に示す評価フローにおいて、①にて波高は容器屋根に到達するものとして評価し、①'にて容器の屋根に角度がある場合には、「②【保守的な評価】」を実施し、判定を満足しない場合はフローにより「③【詳細評価】」の評価を行う。

図3の評価フローによる各容器の評価手法の選定結果を表3に、構造概要図を図4から図7に示す。
 軽油タンクは、図3の評価フローにて①'屋根に角度があることから、②「保守的な評価」を行う。
 ほう酸水注入系貯蔵タンク及び復水貯蔵槽は、図3の評価フローにて①'屋根に角度がないことから、影響なしとして評価を終了する。

表3 容器の評価手法の選定結果

名称	形状	屋根形状 (角度)	選定結果
軽油タンク A (6号機)	平底たて置き円筒形容器	円すい形 (約9°)	②「保守的な評価」
軽油タンク B (6号機)	平底たて置き円筒形容器	円すい形 (約9°)	②「保守的な評価」
軽油タンク A (7号機)	平底たて置き円筒形容器	円すい形 (約9°)	②「保守的な評価」
軽油タンク B (7号機)	平底たて置き円筒形容器	円すい形 (約9°)	②「保守的な評価」
ほう酸水注入系貯蔵タンク	平底たて置き円筒形容器	平板	—
原子炉補機冷却水系サージタンク	平底たて置き円筒形容器	平板	—
復水貯蔵槽	ライニング槽 (矩形)	平板	—

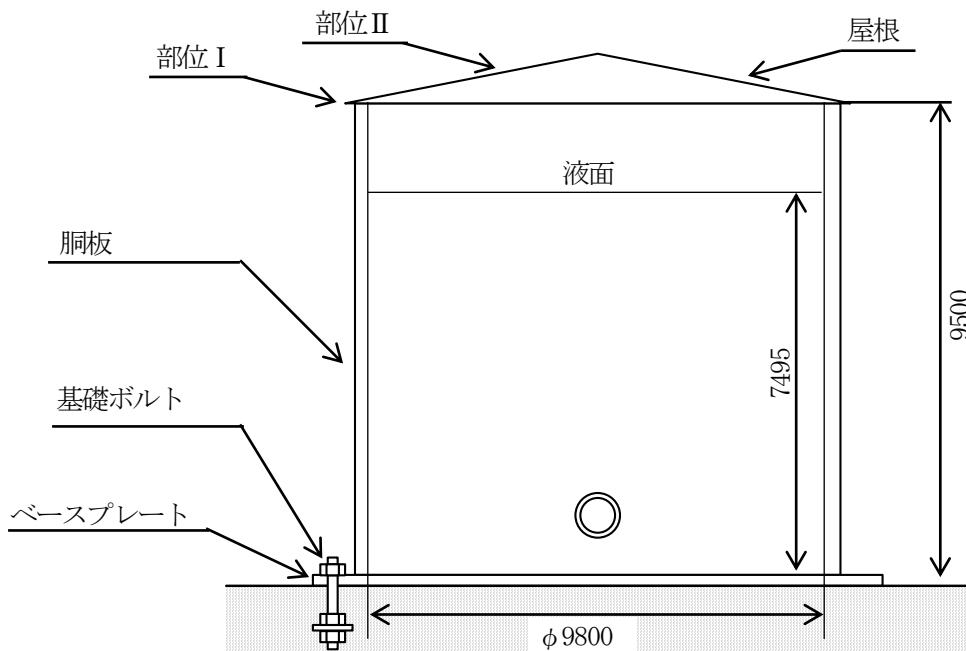


図4 構造概要図 (軽油タンク)

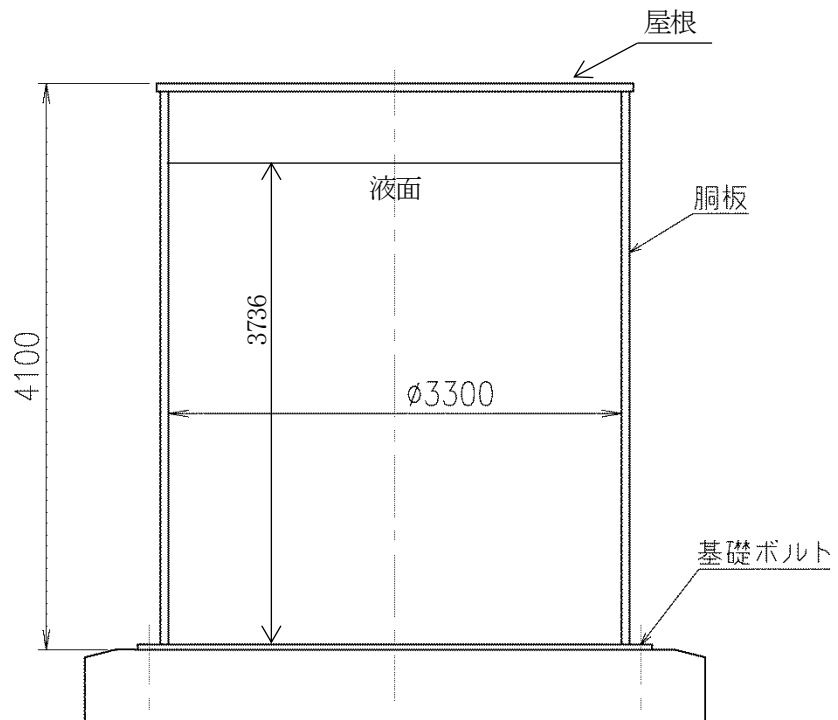


図5 構造概要図 (ほう酸水注入系貯蔵タンク)

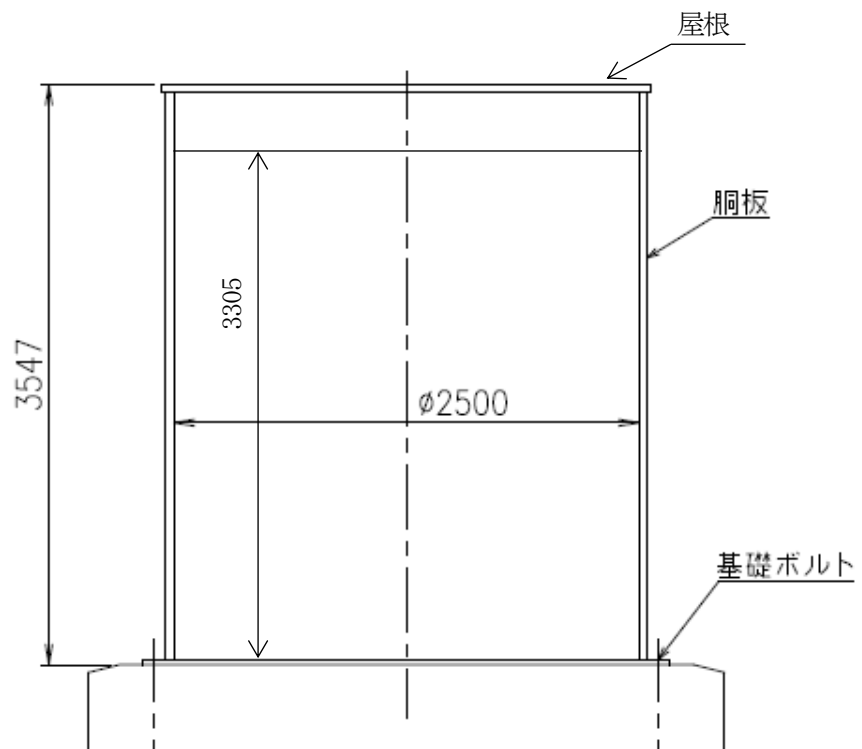


図6 構造概要図 (原子炉補機冷却水系サージタンク)

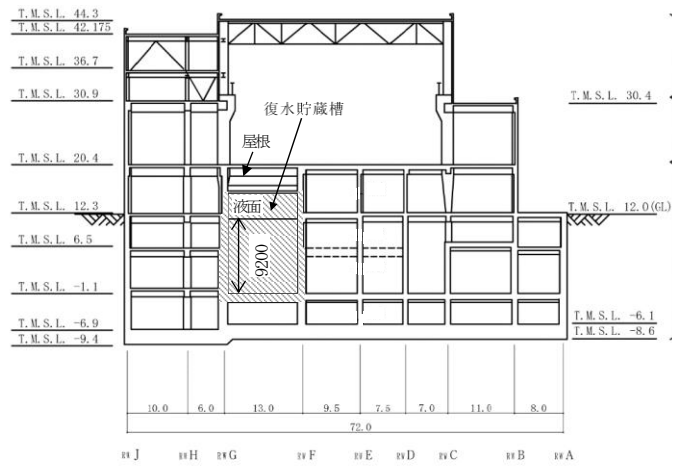
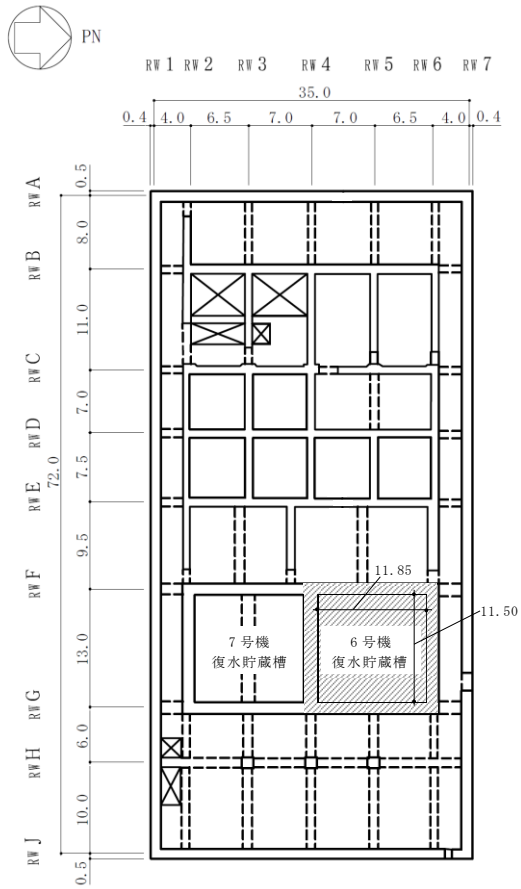


図7 構造概要図 (復水貯蔵槽を含む廃棄物処理建屋)

5. 屋根の接続部に対するスロッシングの影響評価結果

5.1 評価対象

4項の選定結果から軽油タンクの評価を行った。

5.2 評価条件

軽油タンクについて、評価諸元を表4-1及び表4-2に、評価条件を表5に示す。

柏崎刈羽原子力発電所6/7号機の基準地震動 S_s は、長周期成分の大きい地震動であることから波高が大きくなる可能性がある。参考7に示すとおり、速度ポテンシャル理論が適用できるスロッシングと仮定したときの内包液のスロッシング1次固有周期は3秒程度である。そこで、図7に示す基準地震動 S_s のスロッシング評価用速度応答スペクトルの固有周期が2秒以上の範囲に着目する。容器内包液の水平方向応答加速度は、図7に示す速度応答スペクトルに固有円振動数($\omega=2\pi/T$)を乗じることで求め、そのときの最大となる応答加速度を用いる。

表4-1 評価諸元 (軽油タンク, 部位I)

記号	記号の説明	6号機		7号機		単位
		A	B	A	B	
m	容器内包液の質量					kg
a	屋根の接続部ののど厚					mm
D_i	屋根の接続部の平均直径					mm
α_H	容器内包液の水平方向応答加速度 (固有周期2秒以上の範囲の最大) $\alpha_H = S_v \cdot 2\pi/T$					m/s^2
T	卓越した固有周期*2					s
S_v	速度応答スペクトル*2					m/s

*1: 体積 m^3 × 密度 kg/m^3 , 体積は容器内径及び液位より求める ($1/4 \times \pi \times 9.8^2 \times 7.495$)。

*2: 固有周期2秒以上の範囲で水平方向応答加速度が最大となるときの値。速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期とは異なる。

表 4-2 評価諸元 (軽油タンク, 部位II)

記号	記号の説明	6号機		7号機		7号機
		A	B	A	B	
m	容器内包液の質量					kg
a	屋根の接続部ののど厚					mm
D _i	屋根の接続部の平均直径					mm
α _H	容器内包液の水平方向応答加速度 (固有周期 2 秒以上の範囲の最大) $\alpha_H = S_v \cdot 2\pi/T$					m/s ²
T	卓越した固有周期* ³					s
S _v	速度応答スペクトル* ³					m/s

*1: 体積 m³ × 密度 kg/m³, 体積は屋根の接続部の平均直径及び液位より求める
(1/4 × π × × 7.495)。

*2: 体積 m³ × 密度 kg/m³, 体積は屋根の接続部の平均直径及び液位より求める
(1/4 × π × × 7.495)。

*3: 固有周期 2 秒以上の範囲で水平方向応答加速度が最大となるときの値。速度ポテンシャル理論によるスロッシングの 1 次固有周期とは異なる。

表 5 評価条件 (軽油タンク, 部位 I 及び部位 II)

名称	材料	温度条件 [°C]	許容応力状態	許容限界*
軽油タンク A (6号機)		66	IV _A S	0.6 · S _u
軽油タンク B (6号機)		66	IV _A S	0.6 · S _u
軽油タンク A (7号機)		66	IV _A S	0.6 · S _u
軽油タンク B (7号機)		66	IV _A S	0.6 · S _u

*: 許容限界は, 発生応力を全周にわたる溶接部に一様に作用する荷重を全断面積にて除して求めることから, 膜応力に対する許容限界として, J E A G 4601・補-1984 における第 3, 4 種容器 (クラス 2, 3 容器) の一次一般膜応力の許容応力を適用した。

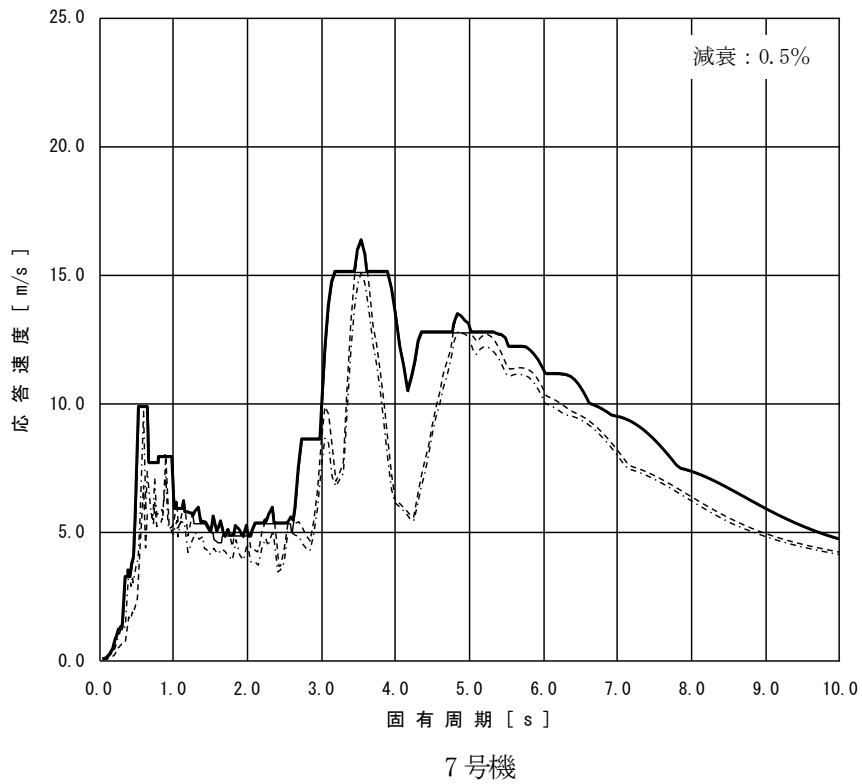
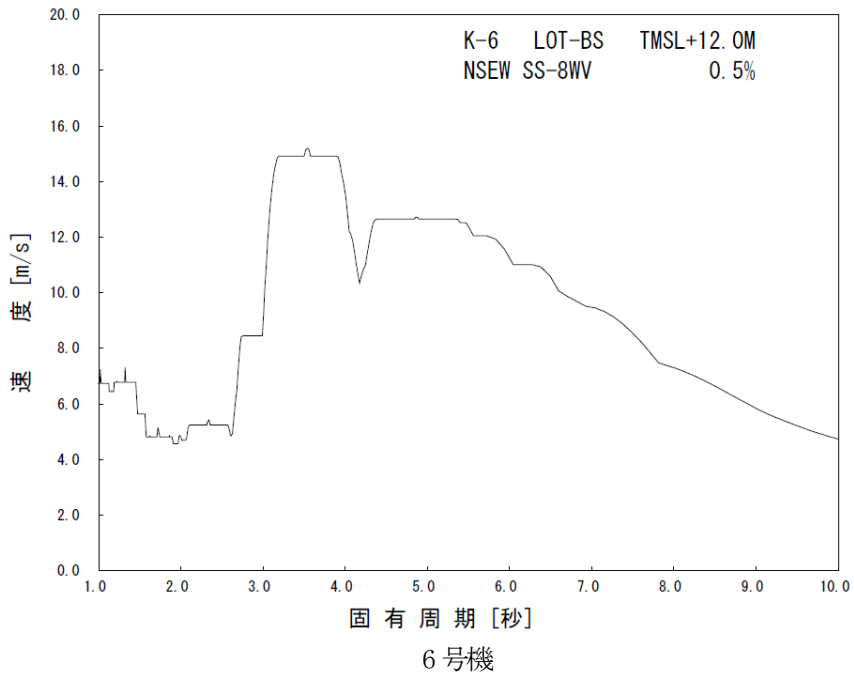


図7 スロッシング評価用速度応答スペクトル (S s)

5.3 評価結果

評価結果を表 6-1 及び表 6-2 に示す。3 項で示す評価式を用いて軽油タンク屋根について「保守的な評価」を行った結果、屋根の接続部の発生応力は許容応力を下回っており、スロッシングで内包流体が容器の屋根に与える影響については、構造強度上問題がないことを確認した。

表 6-1 評価結果（軽油タンク，部位Ⅰ）

名称	発生応力 [MPa]	許容応力 [MPa]
軽油タンク A (6 号機)	31	
軽油タンク B (6 号機)	42	
軽油タンク A (7 号機)	42	
軽油タンク B (7 号機)	31	

表 6-2 評価結果（軽油タンク，部位Ⅱ）

名称	発生応力 [MPa]	許容応力 [MPa]
軽油タンク A (6 号機)	85	
軽油タンク B (6 号機)	84	
軽油タンク A (7 号機)	85	
軽油タンク B (7 号機)	85	

参考資料

- 〈参考 1〉 スロッシングを考慮した場合の内包液の挙動について
- 〈参考 2〉 円筒形タンクのスロッシング評価 抜粋（日本保全学会第 7 回学術講演会 2010. 7. 15 予稿集）
- 〈参考 3〉 スロッシングに対する評価対象部位の妥当性について
- 〈参考 4〉 容器構造設計指針・同解説 抜粋
- 〈参考 5〉 固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計（第 2 報） 抜粋（圧力技術 17 巻（1979）4 号）
- 〈参考 6〉 スロッシングにより屋根に衝突する液体が屋根を離れる際の負圧の影響について
- 〈参考 7〉 速度ポテンシャル理論によるスロッシングの 1 次固有周期及び波高の算出方法
- 〈参考 8〉 屋根板における地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳について

〈参考1〉 スロッシングを考慮した場合の内包液の挙動について

タンクに地震荷重が作用した際に、内包液にスロッシングが生じる。

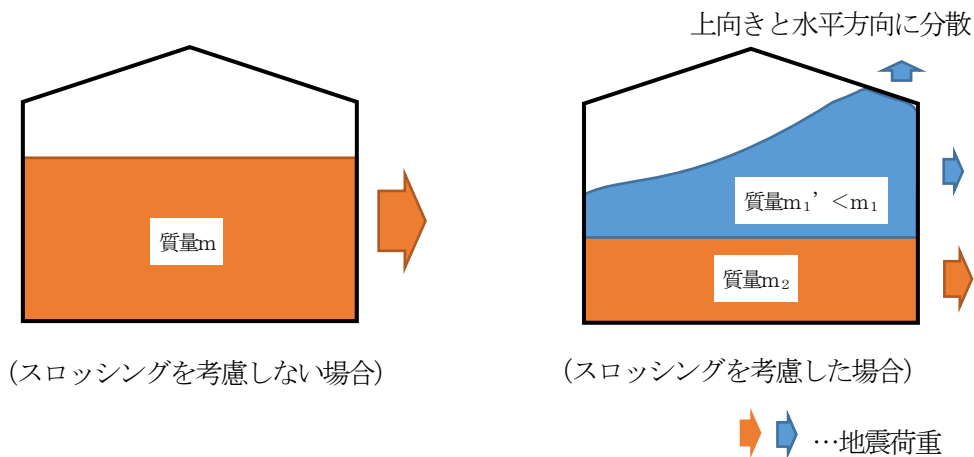
スロッシングが生じることで内包液は上下方向にも動くことになり、内包液に作用する地震エネルギーの一部が上下方向のエネルギーに変換され、タンク胴板に水平方向荷重として作用するエネルギーの総量が減少する。

また、内包液がスロッシングにより揺動することで荷重の作用方向が逸散し、内部流体に対する荷重作用点の重心高さが、内包液を揺動しない固定質量と見做した場合に比べ低くなる。

それらを考慮することで、水平方向に作用するエネルギー総量の減少及び荷重作用点の低下となり、タンク本体及び基礎ボルトに作用する地震荷重（水平方向荷重及び転倒モーメント）が低減される。

スロッシングによる重心高さ及び荷重低減のイメージを以下に示す。

スロッシングによる波高は地震動の増加により大きくなるが、波面衝突によってスロッシング形状の乱れが大きくなり、衝突圧力が抑えられる傾向である。したがって、地震動が大きいときのスロッシングによる内包液の挙動に対しても考え方は同様である。



モーメントを水平方向荷重で除したものが重心高さとなると、重心高さ l_g は以下の式で表される。

$$\text{モーメント} M = \text{水平方向荷重} F \times \text{重心高さ} l_g \text{ より, } l_g = M / F$$

$$\text{ここで, 水平方向荷重} F = \text{水平方向加速度} \alpha_H \times \text{質量} m$$

内包液を揺動液と固定液に分けて考えた場合、質量 $m = \text{揺動液質量} m_1 + \text{固定液質量} m_2$ となる。

スロッシングを考慮した場合、揺動液質量 m_1 は揺動により荷重作用方向が分散することから、水平方向荷重が減少するが、加速度は変化していないため質量 m_1 が小さくなるものとして、等価質量 m_1' と見做す。次に、重心高さ l_g は、

$$l_g = (m_1 \times m_1 \text{の重心高さ} l_{g1} + m_2 \times m_2 \text{の重心高さ} l_{g2}) / \text{質量} m \text{ により求まる。}$$

スロッシングを考慮することにより、 m_1 が等価質量 m_1' として小さくなることで、 m_1' の重心高さも等価重心高さ l_{g1}' と見做し、スロッシングを考慮した重心高さは、

$$l_g' = (m_1' \times l_{g1}' + m_2 \times l_{g2}) / m \text{ となり, } l_g \text{ より低くなる。}$$

注：揺動液質量 m_1 はスロッシングにより揺動すると仮定する内包液の質量を、固定質量 m_2 はスロッシングにより揺動しないと仮定する内包液の質量として、質量 m を分けたそれぞれの質量を示す。また、等価質量 m_1' は揺動することによる荷重分散を質量が低減するものとして表したものである。

以上より、スロッシングを考慮した場合、上下方向へのエネルギーの分散が生じることにより、水平方向の地震荷重は低減される。また、揺動液質量部分の荷重低減を等価質量として質量低減と見做すことにより、荷重作用点である重心高さが低くなり、水平方向モーメントも低減される。

〈参考2〉円筒形タンクのスロッシング評価 抜粋

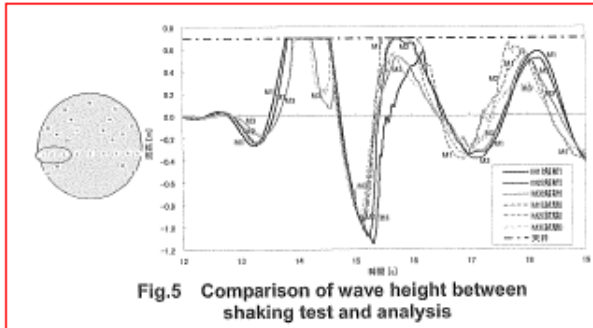


Fig.5 Comparison of wave height between shaking test and analysis

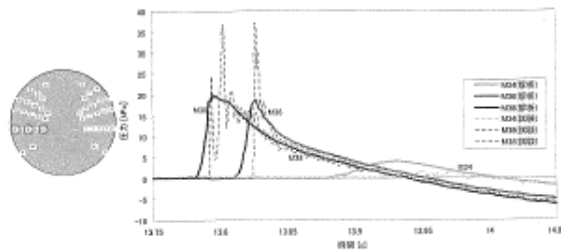


Fig.6 Comparison of pressure between shaking test and analysis

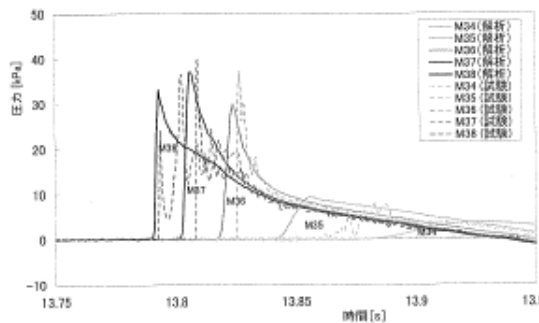


Fig.7 Analysis with segmentalized model

それぞれのひずみの時刻歴結果を Fig.9 に示す。応答解析結果は周期的な振動が発生しているが平均的には試験結果をほぼ再現している。また、20000Pa 以上をカットした応答解析結果においては、振動の各ピークで若干小さくなっているものの、衝撃圧を含む結果とほとんど変わらない。よって瞬間的な衝撃圧が変形に与える影響は限定的であり全体的なひずみはそれ以外の圧力の影響が支配的であると言える。

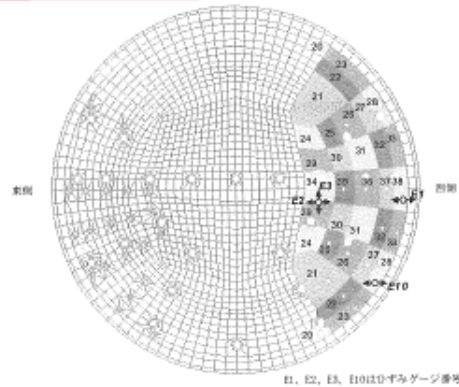


Fig.8 Analysis model to calculate strain on top board

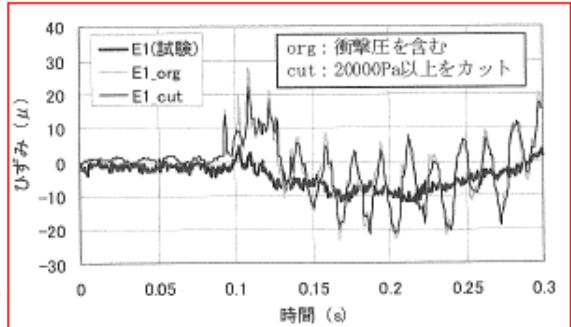


Fig.9 Measured strain and that calculated with measured pressure

3.3 天板の健全性評価

スロッシングによる波面衝突が天板強度へ与える影響を確認することにより、天板健全性の合理的な評価手法を検討した。

天板の健全性評価に必要な変形量は、振動試験においてひずみデータとして取得している。また先述のとおり天板の圧力データも得られているため、Fig.8 に示すように天板をモデル化し、各圧力計の周囲の領域に圧力時刻歴を与えて応答解析を実施し、発生するひずみを試験により計測されたひずみと比較した。さらに、瞬間的な圧力のピークが天板の変形に与える影響を評価するため、20000Pa 以上の衝撃圧をカットした圧力時刻歴による応答解析結果も合わせて確認した。

また、流動解析により得られた圧力時刻歴を用いたひずみを Fig.10 に示す。衝撃圧に相当する部分はないが、全体として試験圧力による応答解析およびひずみを模擬しており、流動解析で得られた圧力時刻歴を用いた天板の動的応答解析によっても、天板の変形挙動を模擬できることが分かった。

最後に、試験で計測された圧力時刻歴および、流動解析で得られた圧力時刻歴それぞれの最大値を静的に加えた結果を Fig.11 に示す。いずれの結果も試験で計測されたひずみに対し大きく、これらの評価が安全側の評価であることが分かった。

〈参考3〉 スロッシングに対する評価対象部位の妥当性について

平底たて置円筒形容器を含む開放型タンクの屋根については、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005/2007年追補版) JSME S NC1-2005/2007」のうち、クラス2容器に係る要求事項である「PVC-3930 屋根がない場合の形状規定」及び同解説(別紙参照)に基づき、以下のとおり設計を行っている。

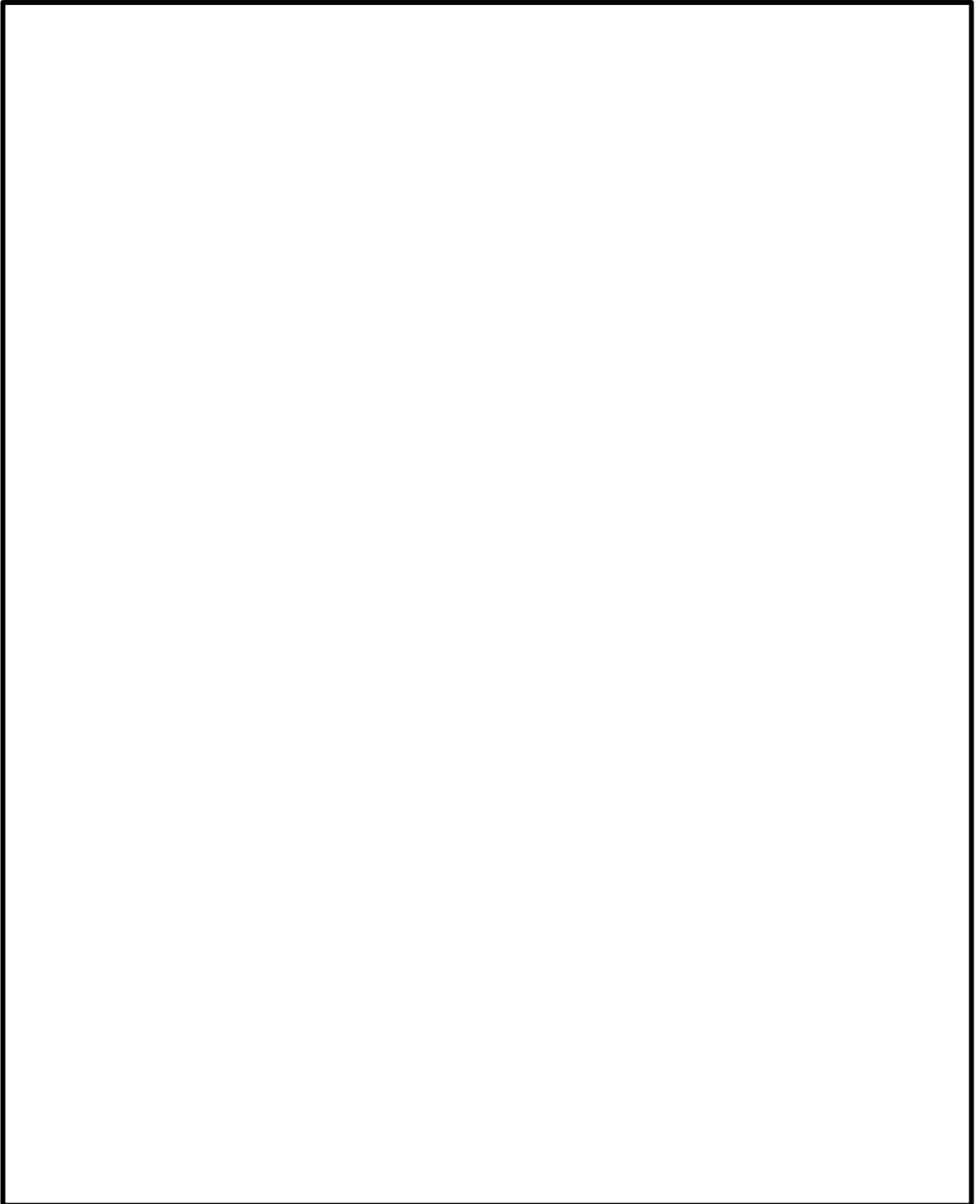
- ・屋根の板厚は、4.5 mm 以上であること。
- ・(屋根と胴板の) すみ肉溶接部が4.5 mm を超える場合は、過圧力時の逃がし装置を設けること。

上記2点から、すみ肉溶接部を4.5 mm 未満と設計する場合は、当該部位が最弱部となり、過圧時にここから圧力を逃がすような設計となっている。

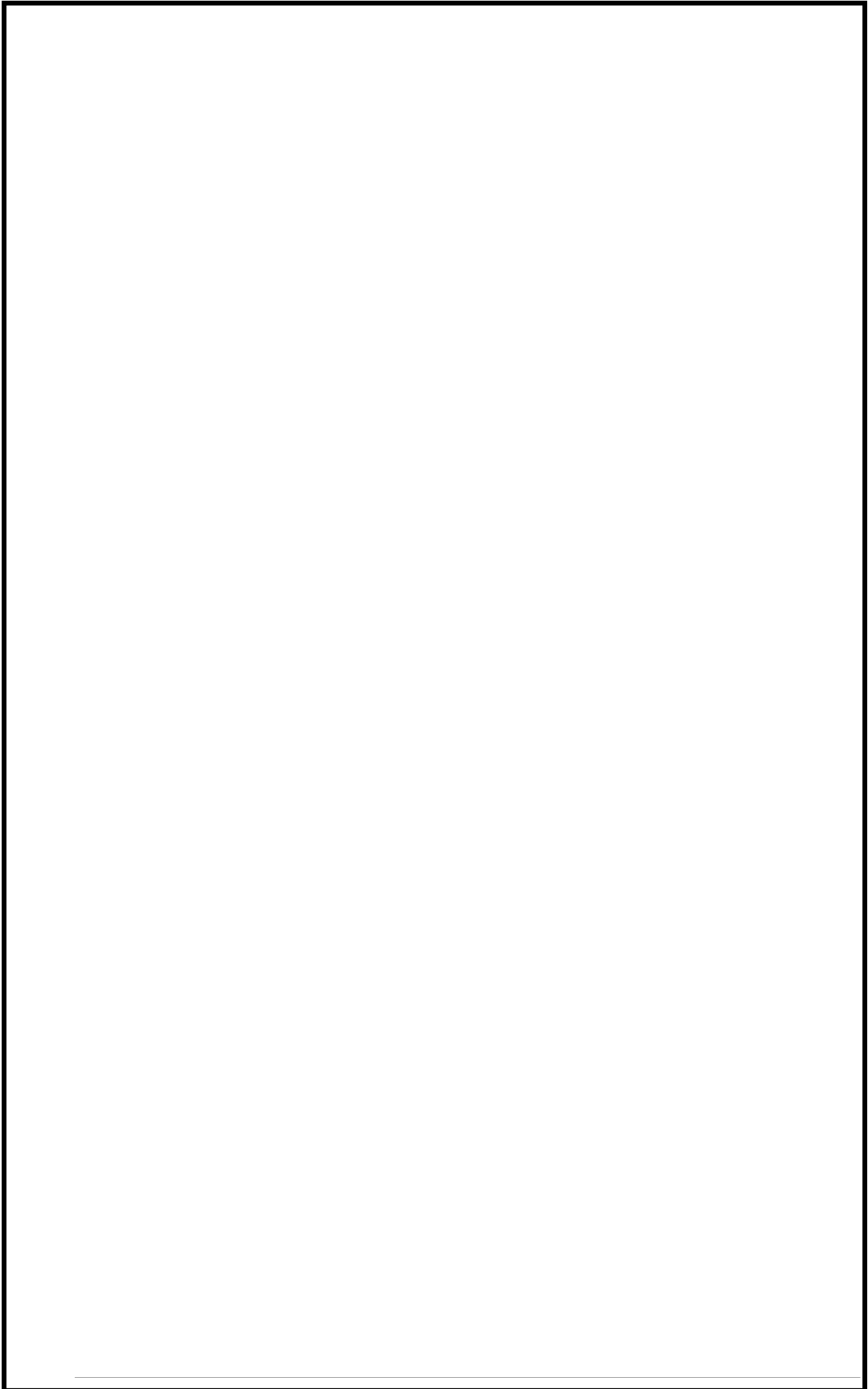
軽油タンクは、平底たて置円筒形容器に該当し、

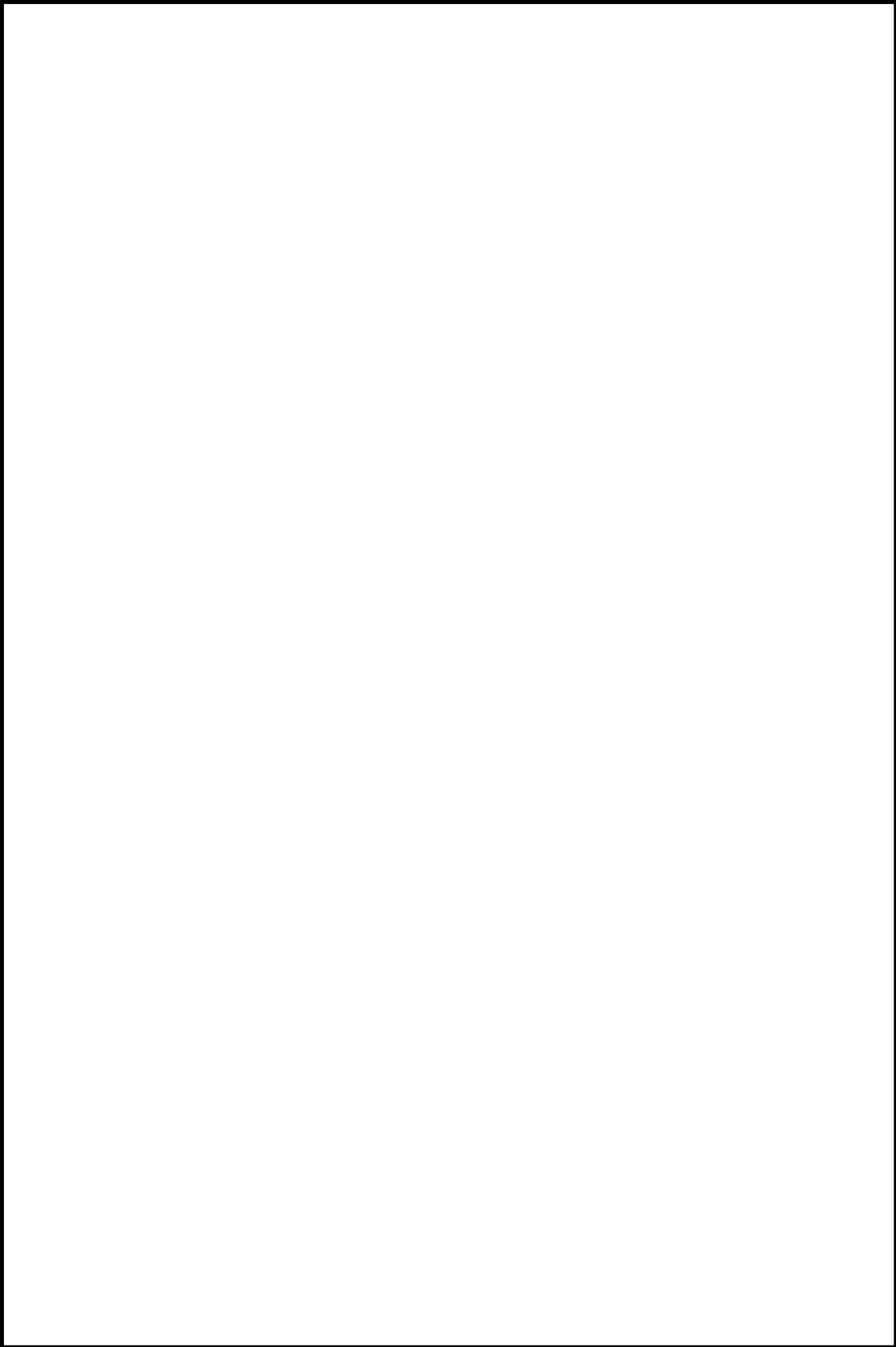
スロッシングによる荷重は、屋根と胴板の接続部(図1の部位I)に最も大きな荷重が作用する。

荷重を負担する断面積が小さいことから、当該すみ肉溶接部(「屋根の接続部」)を評価対象部位に設定し、当該屋根の接続部の水平投影面に対する内包流体の質量を考慮して評価を行うことは妥当であると考ええる。



〈参考4〉 容器構造設計指針・同解説 抜粋





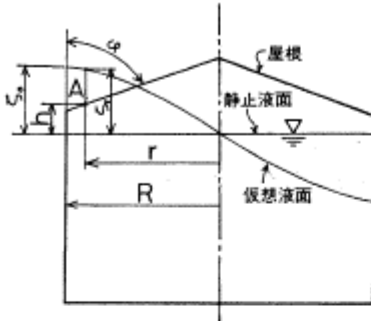


図1 衝撃圧力

る。文献(6)ではこの問題について充分検討を加えていない。平板の落下衝撃に関する2, 3の研究例^{(8), (9)}を参考にして, 第3章にて実験式を考える。

屋根掛圧 P_A は, 図1の受圧点Aにおける最高液位からの静水圧に大略等しいので, (2)式から求められる。

$$P_A = \rho g (\zeta_0 - h) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (2)$$

平板及び平板に近い屋根の場合 P_A は無視してよいと考えられる。

又, ζ_0 及び $\dot{\zeta}_r$ は次のようにして求められる。

屋根により波高の成長がさまたげられないときの円筒容器内のスロッシング波高 ζ は速度ポテンシャルから求められ^{(3), (4), (5)}, 特に正弦波過渡応答については簡略計算式がある。n波目の応答波高 $\zeta_r(n)$ は

$$\zeta_r(n) = \frac{\alpha}{g} R A_{(n)} \beta_p \frac{J_1(1.841 \frac{r}{R})}{J_1(1.841)} \quad (\text{cm}) \quad (3)$$

となる。ここで

α : 加振加速度 (cm/sec^2)

R : タンク半径 (cm)

r : タンク中心からの距離 (cm)

$A_{(n)}$: n波目の応答倍率 (図12)

J_1 : 第1種1次の Bessel 関数 (図13)

β_p : 刺激係数 0.8371

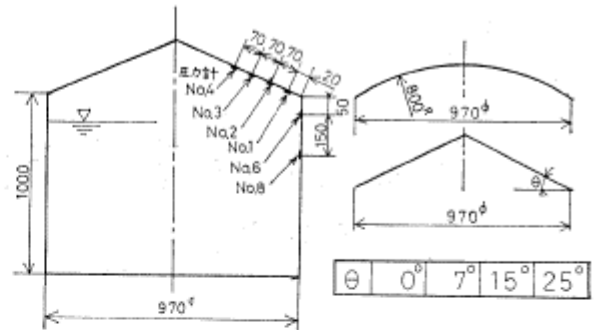


図2 円筒タンク, 圧力計配置図

ζ_0 は(3)式で $r=R$ とおけば求まる。 ζ_r は加振力と同じ振動数で正弦振動しているので, その円振動数を ω_f , 静止液面と屋根の受圧点Aの間隔を h とすれば

$$h = \zeta_r \sin \omega_f t \quad (\text{cm}) \quad (4)$$

と近似できるから, タンク屋根に到達した時の液面速度 $\dot{\zeta}_r$ は(5)式で示される。

$$\dot{\zeta}_r = \zeta_r \omega_f \cos^{-1} \left(\sin \frac{h}{\zeta_r} \right) \quad (\text{cm/sec}) \quad (5)$$

(5)式で, r を変えて液面速度を計算することにより, 衝撃圧の分布は定まる。

共振時の ω_f は次式で示される。

$$\omega_f = \sqrt{1.841 \frac{g}{R} \tanh 1.841 \frac{H}{R}} \quad (\text{rad/sec}) \quad (6)$$

ここで

H : 液位 (cm)

3. 実験

3.1 ドーム及び円錐屋根

スロッシング時, タンク屋根に作用する荷重を調べるため, アクリル製の直径1m×高さ1mの円筒模型タンクによる実験を行った。⁽⁶⁾ 模型タンク及び圧力計配置を図2に示す。

実験はタンク内容液の一次固有振動数にて, 変位振巾

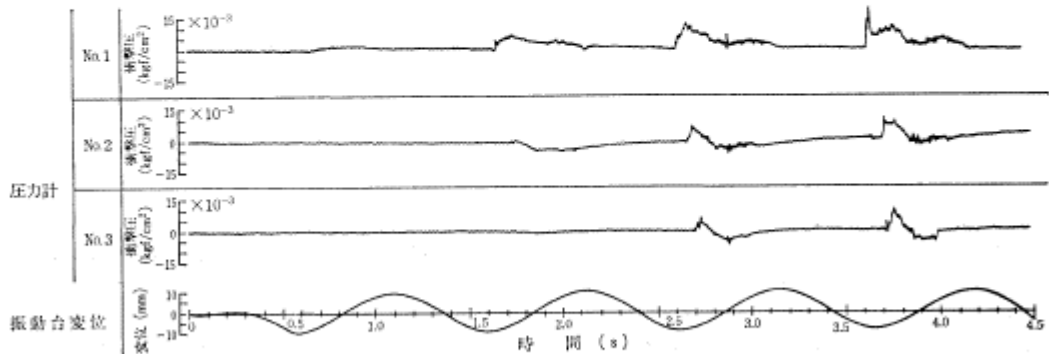


図3 ドーム屋根圧力波形

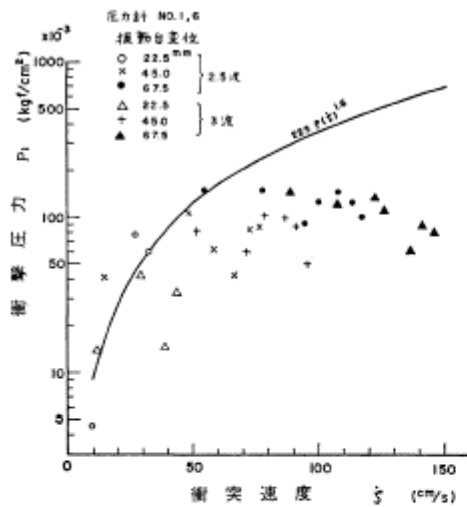


図 11 衝撃圧力と衝突速度 (3波までの最大値)

4. 応答計算

3章までの実験結果を用いて応力計算をする上での留意すべきことは衝撃圧力と腰掛圧力の作用時間の違いである。

腰掛圧は、その圧力値としては衝撃圧より小さいことも多いが、作用時間が長いので静的な力として取り扱って良い。他方、衝撃圧は、圧力値としては大きい、作用時間が短いため、力積としては小さい。そこで、この場合は動的な応答を考えてやる必要がある。

又、作用時間の特性から、腰掛圧はタンクの全体応力解析の荷重として用いるべきであり、衝撃圧は屋根の局部的な応力解析に用いるべきであろう。

5. 結言

地震時、円筒形液体タンクが受ける流体力のうち、スロッシング時に固定屋根に作用する力について実験を行い、次のことを明らかにした。

- 1) 固定屋根に作用する圧力には衝撃圧力と腰掛圧力がある。
- 2) 衝撃圧力は圧力値は大きいことが多いが、作用時間は短い。
- 3) 腰掛圧力は、ある程度角度がある屋根で発生し、平板又は平板に近い屋根では発生しない。
- 4) 腰掛圧は、圧力値は衝撃圧より小さいことが多いが作用時間が長い。
- 5) 衝撃圧および腰掛圧力の簡略計算式を提案した。なお、本報告の実験には、内容液として水を用いた。

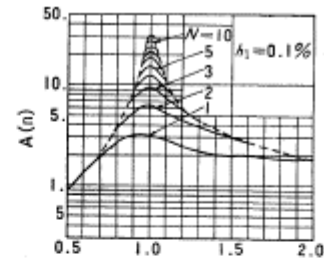


図 12 応答倍率

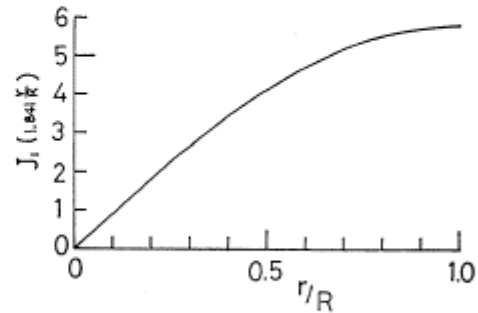


図 13 J₁の値

実際のタンクにおいて水と異なる貯蔵液の場合、空気の流れ込み等が水と異なれば(9)式は若干の修正を要することも考えられる。これについては機会を見つけて確認したい。

参考文献

- (1) 浅井修, 内藤潔, 石田和雄, 越智義夫, 小林信之, “固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計 (その1)” 圧力技術, Vol. 17, No3 (1979)
- (2) 例え 曾我部潔, 柴田碧, “円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第2報”, 生産研究, 第26巻4号, (1974.4) pp 22~25
- (3) K. Senda & K. Nakagawa, “On the Vibration of an Elevated Water Tank (I)” Tech. Rep. of Osaka Univ. Vol. 4 No 17 (1954)
- (4) 曾我部潔, 柴田碧, “円筒液体貯槽の液面動揺の応答 第3報” 生産研究, 第26巻8号, (1976.8) pp 1~4
- (5) 山本鎮男, “貯槽類 (円筒) の耐震設計”, コンビナート保安防災技術指針 (資料編) (1974)
- (6) 越智義夫, 小林信之, “円筒形タンクのスロッシング実験”, 石川島播磨技報, 17巻6号 (1977) pp 607~615
- (7) 山本善之, “地震による石油タンクの液面の動揺と衝撃圧力”, 高圧力, 3巻1号 (1965) pp 370~376
- (8) S. L. Chuang, “Investigation of Impact of Rigid and Elastic Bodies with Water” Naval Ship Research and Development Center AD 702 727 (1970)
- (9) 安藤良夫, 藤田鏡, 山口勇男, “平板の水面衝撃について”, 造船協会論文集, 90号 (1956) pp 69~75

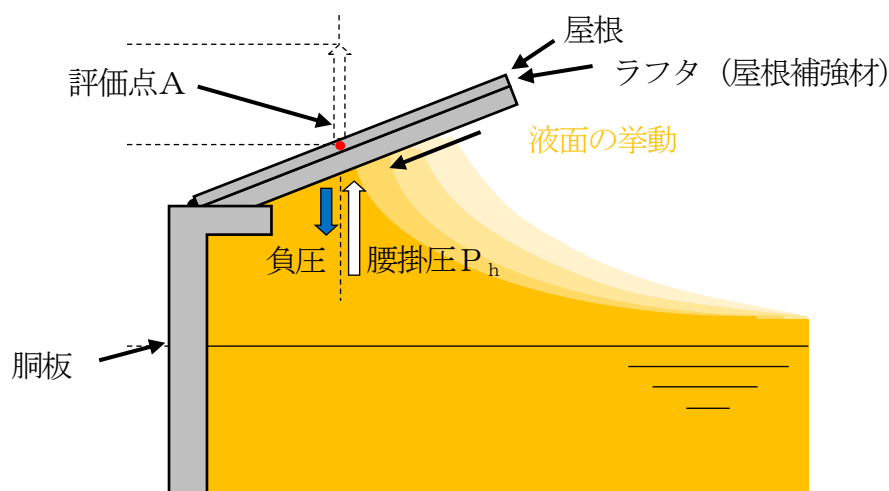
〈参考6〉スロッシングにより屋根に衝突する液体が屋根を離れる際の負圧の影響について

1. はじめに

地震時のタンクの内包流体のスロッシングによって発生する液面の変位によって、内包流体が屋根に衝突することを考慮した場合の屋根の健全性について評価を行っている。評価に用いる荷重は、「保守的な評価」として、内包流体の全質量に水平方向加速度が作用したものをを用いている。この過程で、内包流体が屋根から離れる際に、負圧が作用することが懸念されるため、屋根の評価に与える負圧の影響について検討する。

2. 屋根への荷重の作用形態

スロッシングによって発生する液面の変位（最大波高以降で内包流体が元に戻る状態）の挙動は図に示すとおりであり、内包流体と接している部分（評価点A）には、腰掛圧 P_h が作用している。ここで、液面が低下する際に、屋根と液面の間に負圧が発生することが懸念されるが、液面は屋根に沿って連続的に下がることから、速やかに負圧が解消され、大きな負圧が発生するまでに至らないと考えるため、影響は軽微である。また、負圧によって作用する荷重は、屋根とラフタで負担することになるため、屋根の強度評価上影響は軽微である。



3. 屋根の応力評価における負圧の取扱い

2. で示すように液面低下による負圧の影響は軽微であると考え。また、仮に負圧によって作用する荷重（鉛直下向き）を考慮すると、内包液体と屋根が接している部分には腰掛圧 P_h （鉛直上向き）も同時に作用することから、屋根に作用する荷重が減少することとなり、非保守的な評価と考える。

以上のことから、屋根の応力評価においては腰掛圧 P_h を包絡する「保守的な評価」を用いた評価を行うことが妥当であると考え。

〈参考7〉 速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期及び波高の算出方法

柏崎刈羽原子力発電所6/7号機の基準地震動S_sは長周期成分の大きい地震動であることからスロッシングの波高が大きくなる可能性があり、速度ポテンシャル理論が適用できる範囲の外であるが、参考として速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期及び波高を示す。

速度ポテンシャル理論におけるスロッシングの1次固有周期及び波高の算出方法及び算出結果を以下に示す。

$$T : \text{スロッシングの1次固有周期[s]} \quad ((2\pi/T)^2 = 1.841 \text{ g/R} \cdot \tanh(1.841H/R))$$

$$\zeta : \text{スロッシングの波高[m]} \quad (\zeta = 0.245T \cdot \tanh(1.841H/R) \cdot S_v)$$

記号	記号の説明	6号機		7号機		単位
		A	B	A	B	
R	タンク内半径	4.900	4.900	4.900	4.900	m
H	液位	7.495	7.495	7.495	7.495	m
g	重力加速度	9.80665	9.80665	9.80665	9.80665	m/s ²
T	スロッシングの1次固有周期					s
S _v	速度応答スペクトル					m/s
ζ	スロッシングの波高					m

〈参考8〉屋根板における地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳について

1. 概要

スロッシング評価において許容値に対して最も厳しい値となった7号機軽油タンクの部位Ⅱに関して地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳による軽油タンクの屋根板への影響について検討を行った。地震時の慣性力とスロッシングによる荷重の重畳により屋根板に作用する荷重は、屋根板の接続部に同時に作用するものとして評価する。

2. 評価条件

軽油タンクの屋根部に作用する地震動による荷重は、床面における地震動がタンク胴部を經由して屋根板に伝達する。屋根板は支持部であるラフタにより支えられている構造であり、上向きと下向きで振動挙動が異なるため、固有周期を算出することは難しい。一方、地震時慣性力のうち水平方向慣性力については、タンク胴部と屋根が溶接により固定されており、これらが一体で振動し屋根部は胴部との接続部でのみ固定されていることから、互いの変形による有意な荷重が生じない。したがって、屋根板の接続部には、本評価で想定している鉛直上向き一方向の荷重に対し、屋根の構造強度に影響を与えるような、重畳させるべき水平方向慣性力はない。このことから、水平方向慣性力を考慮する必要はない。そのため、地震時の慣性力は、鉛直方向のみ考慮し、屋根に作用する地震時の荷重は、軽油タンク基礎の設計用床応答曲線の最大震度から算出する。

軽油タンクの屋根板における地震時の慣性力の評価条件を表1に示す。図1に鉛直方向の設計用床応答曲線を示す。

表1 地震時慣性力の評価条件 (6号機 軽油タンクA, 部位Ⅱ)

記号	記号の説明	値	単位
m	屋根部質量		kg
C _v	鉛直方向震度	5.04	—
g	重力加速度	9.80665	m/s ²
F _v	地震荷重		N

C_v : 基準地震動S_sにおける設計用床応答 (減衰定数1.0%) における震度

$$F_v = m \times (C_v - 1) \times g$$

スロッシングによる荷重は、内包液の質量にスロッシングによる水平応答加速度を乗じた荷重が鉛直方向荷重として屋根板に作用するものとして算出する（「保守的な評価」）。なお、スロッシングによる水平応答加速度は、図2に示すスロッシング評価用速度応答スペクトルより固有周期が2秒以上の範囲で最大となる応答加速度を用いる。評価条件を表2に示す。

表2 スロッシングの評価条件（6号機 軽油タンクA, 部位II）

記号	記号の説明	値	単位
m	容器内包液の質量		kg
a	屋根の接続部ののど厚		mm
D _i	屋根の接続部の平均直径		mm
α _H	容器内包液の水平方向応答加速度 (固有周期2秒以上の範囲の最大) $\alpha_H = S_v \cdot 2\pi / T$		m/s ²
F _s	スロッシング荷重		N
T	卓越した固有周期*		s
S _v	速度応答スペクトル*		m/s

*：固有周期2秒以上の範囲で水平方向応答加速度が最大となるときの値。速度ポテンシャル理論によるスロッシングの1次固有周期とは異なる。

$$F_s = m \times \alpha_H$$

構造物名：軽油タンク基礎

標高：T.M.S.L. 12.000m

—— 設計用床応答曲線 I (鉛直方向)

減衰定数：1.0%

波形名：基準地震動 S s

----- 設計用床応答曲線 II (鉛直方向)

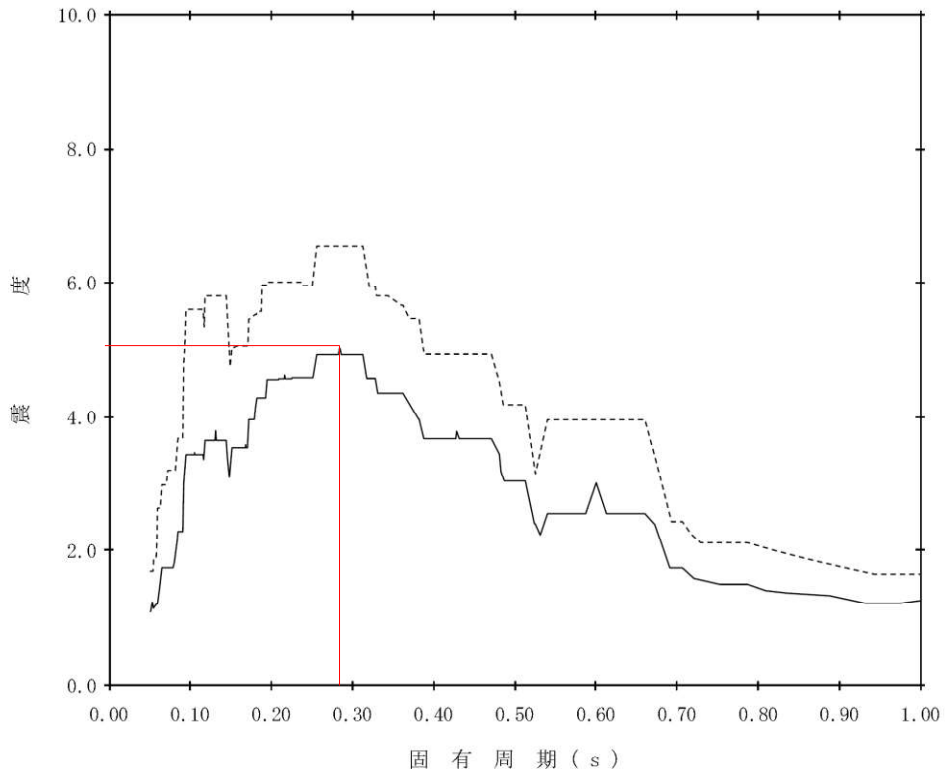


図1 基準地震動 S s 設計用床応答曲線 I (減衰定数 1.0%)

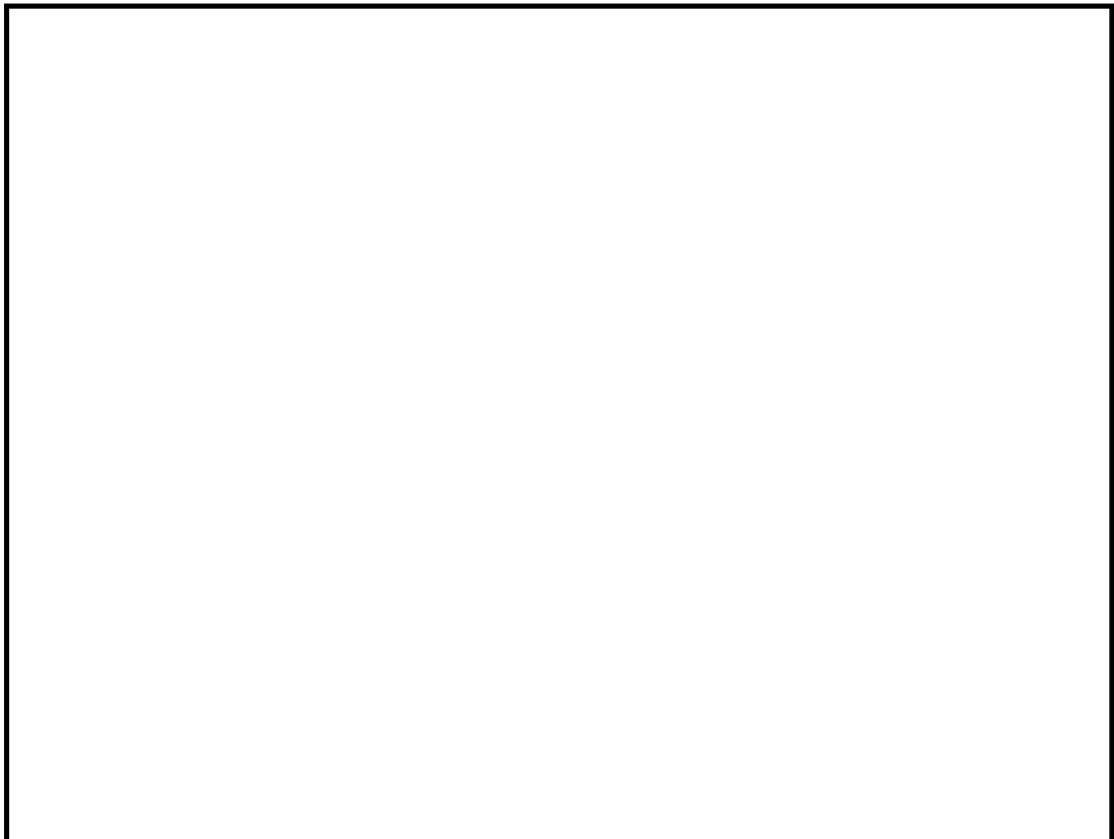


図2 基準振動 S s スロッシング評価用速度応答スペクトル

3. 評価結果

評価結果を表 3 に示す。屋根板の接続部に地震時の慣性力とスロッシングによる荷重が同時に作用した場合においても、発生応力は許容応力を大きく下回っており、問題ない。

表 3 評価結果 (6 号機 軽油タンク A, 部位 II)

記号	記号の説明	値	単位
F _v	地震荷重		N
F _s	スロッシング荷重		N
F	荷重		N
σ	発生応力	95	MPa
f	許容応力		MPa

$$F = F_v + F_s$$

$$\sigma = F / A$$

$$A = \pi \times a \times D_i$$

〈参考9〉 スロッシング影響評価における評価の保守性について

1. 概要

スロッシング影響評価では、保守的な評価として内包水の質量を屋根板に負荷し、発生する応力を評価している。柏崎刈羽原子力発電所6号機の軽油タンク基礎については、固有周期1.0秒以上の加速度が大きいことから、軽油タンクのスロッシングが非線形挙動を示す可能性がある。非線形挙動を示す場合、屋根板に当たる内包液量が線形挙動時と比較して増加する可能性があることから、流動解析により内包液の挙動を確認することで、保守的な評価における保守性を検討する。

2. スロッシング流動解析について

スロッシング流動解析により内包水のスロッシングによる挙動を確認すると共に、評価部位である屋根と胴板の溶接部（部位Ⅰ）及び、屋根の設計弱部（部位Ⅱ）（以下、部位Ⅰと部位Ⅱを合わせて「屋根の接続部」という。）に到達する内容液の容量を算出する。

2. 1 流動解析モデルについて

流動解析においてはスロッシングによる波が屋根板に当たることでスロッシングの様相が乱れることから、本検討では屋根部をモデル化せず、胴板を高さ方向に高いモデルとした。解析に用いる解析モデル図及び解析条件を図2-1に示す。

- ・解析コード：FLOW-3D
- ・解析に用いる流体：軽油（内部流体）と気体の二流体
- ・地震加振方向：水平1方向＋鉛直方向の同時加振

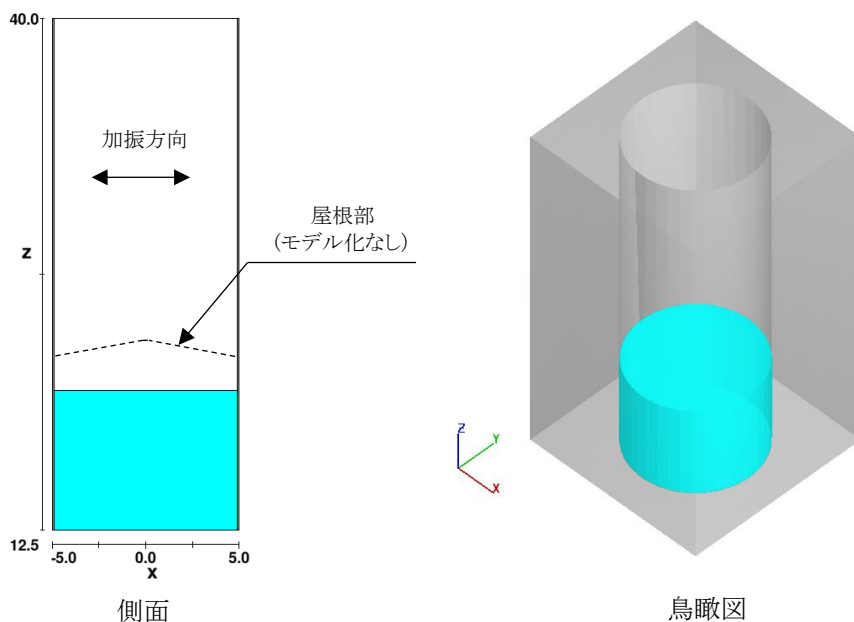


図2-1 解析モデル図及び解析条件

2. 2 地震条件

地震動は、柏崎刈羽原子力発電所 6 号機の軽油タンク設置場所である軽油タンク基礎における時刻歴応答加速度を用いる。検討に用いた地震動の加速度時刻歴波形を図 2-2 に、加速度スペクトルを図 2-3 に示す。なお、解析においては揺動が始まる 30 (s) から収束する 120 (s) までの加速度を用いた。

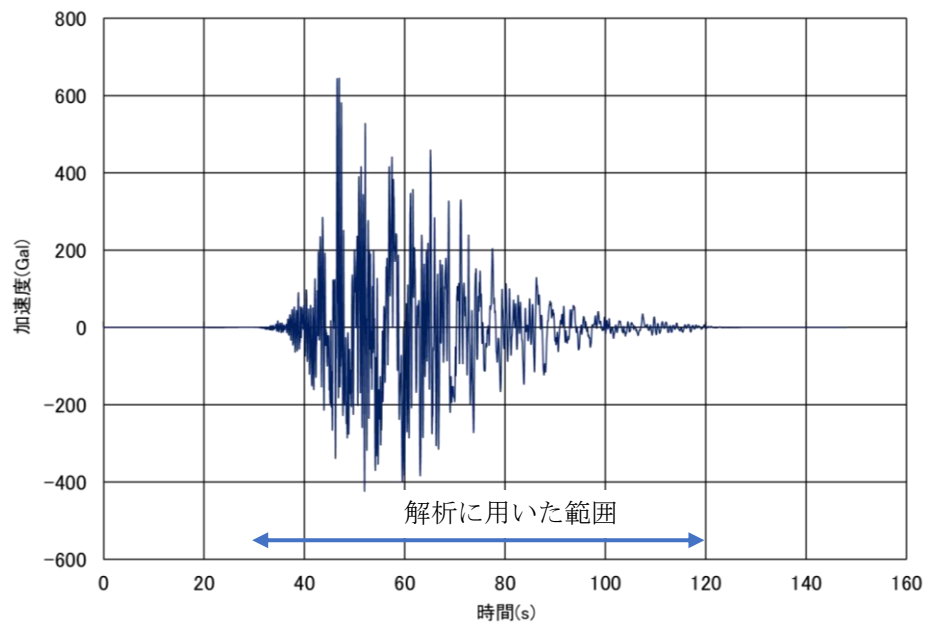


図 2-2 加速度時刻歴波形 (Ss-7)

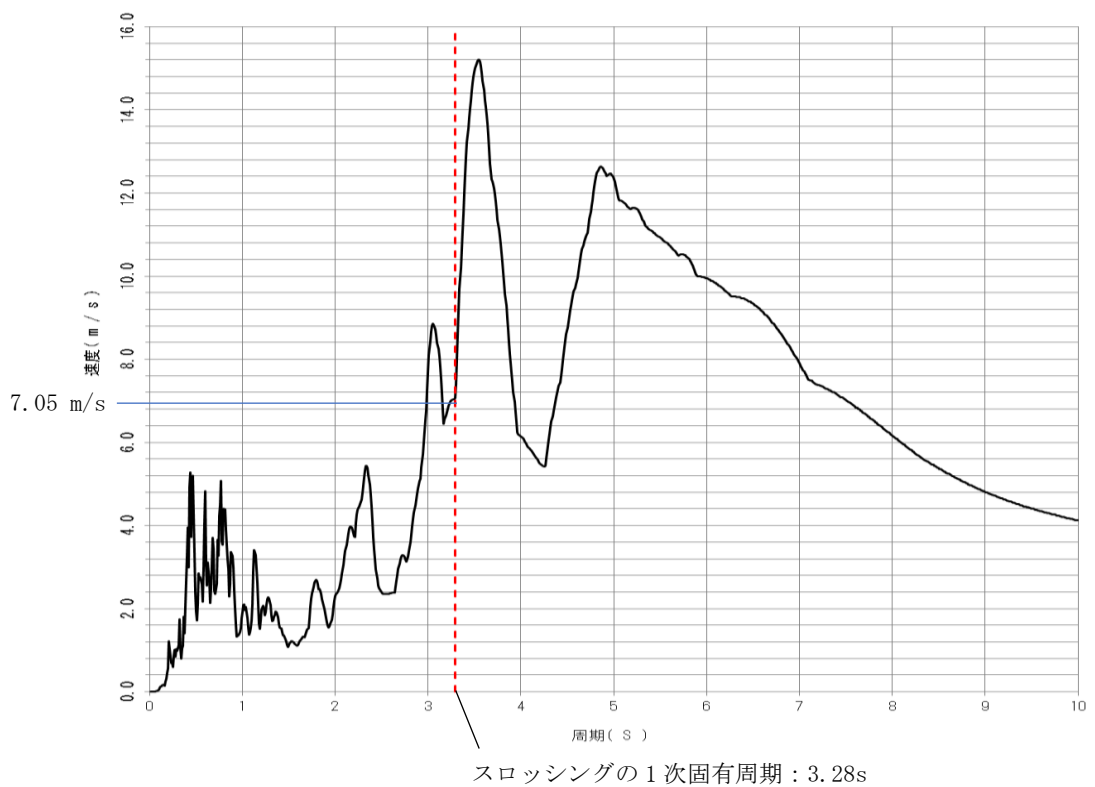


図 2-3 速度スペクトル (水平方向 減衰 0.5%)

3. 流動解析結果

3. 1 スロッシング波高

タンク壁面におけるスロッシング波高を図3-1に、タンク壁面での最大波高が生じた時刻近傍における側面図を図3-2に示す。

流動解析によるスロッシング波高は5.98mとなった。また、図3-2からスロッシング波形が非対称形になり先端がとがった形となっていることから、今回実施した流動解析においては非線形性が含まれているものと考えられる。

なお、速度ポテンシャル理論により算出したスロッシング波高は5.64 mであり、流動解析結果が5.98 mと理論式による波高より高い結果となっている。速度ポテンシャルによるスロッシング波高の算出に用いた諸元及び計算結果を表3-1に示す。

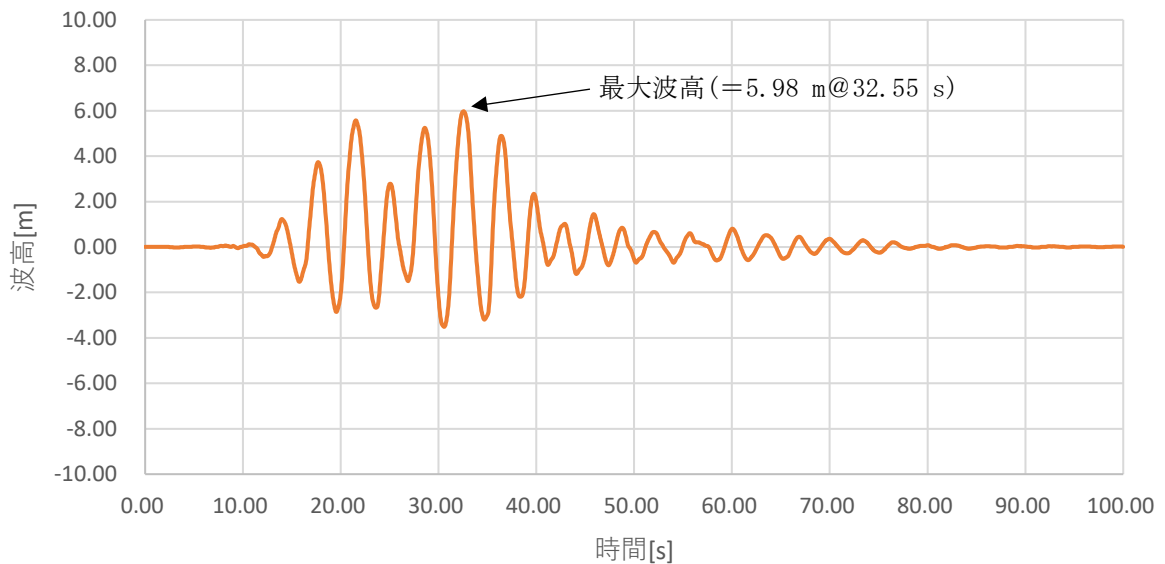


図3-1 タンク壁面におけるスロッシング波高

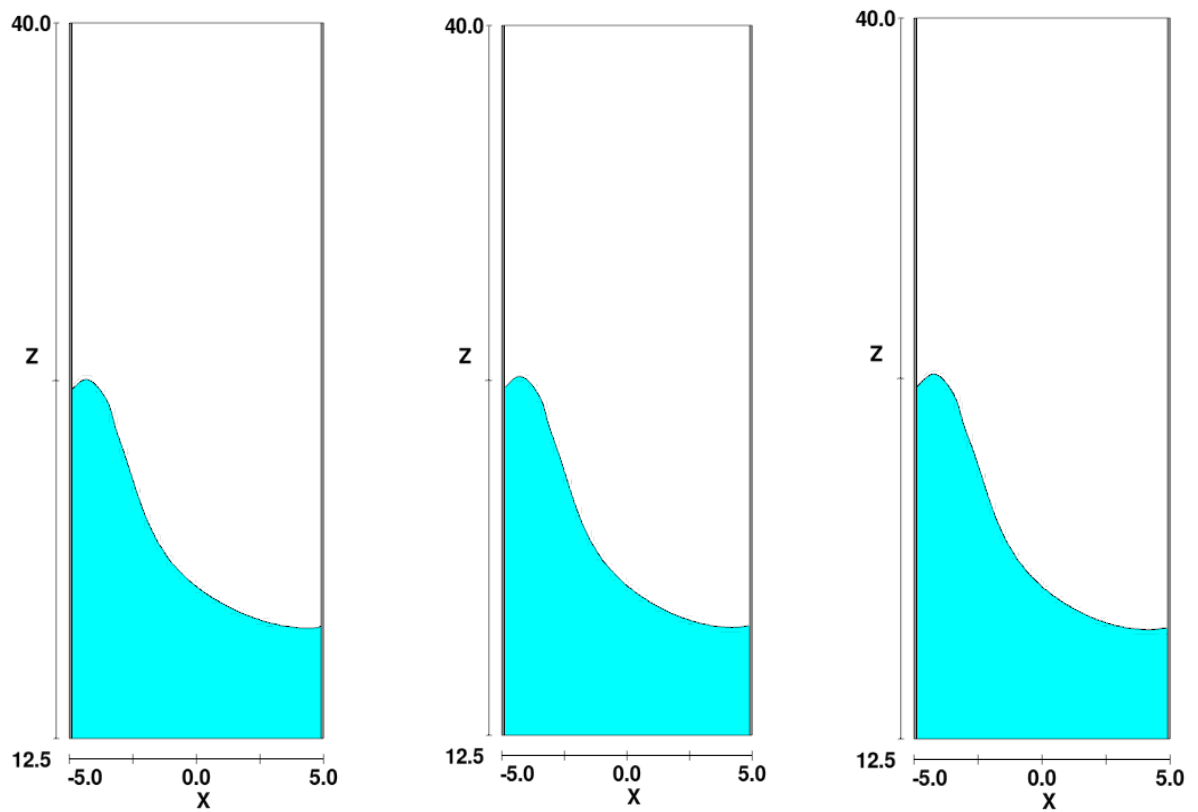


図 3-2 スロッシング側面図（最大波高発生時刻 32.55 s 前後）

表 3-1 速度ポテンシャルによるスロッシング波高の算出

記号	記号の説明	
R	タンク内半径	4.900 m
H	液位	7.495 m
g	重力加速度	9.80665 m/s ²
T	スロッシングの 1 次固有周期	3.285 s
S _v	速度応答スペクトル*	7.05 m/s
ζ	スロッシング波高	5.64 m

注記*：速度応答スペクトルはスロッシングの一次固有周期における値。

4. 屋根板に当たる内包水量の推定

保守的な評価で用いている内包液の質量の保守性を確認するため、スロッシングにより屋根板に当たる内包液量を確認する。

屋根板に当たる内包液量の確認は、2. に示す流動解析モデルによる解析結果より評価部位である屋根の接続部（部位Ⅰ及び部位Ⅱ）の高さを上向きに通過した容量（以下「流出容量」という。）とする。図4-1に流出容量の算出における解析イメージを示す。

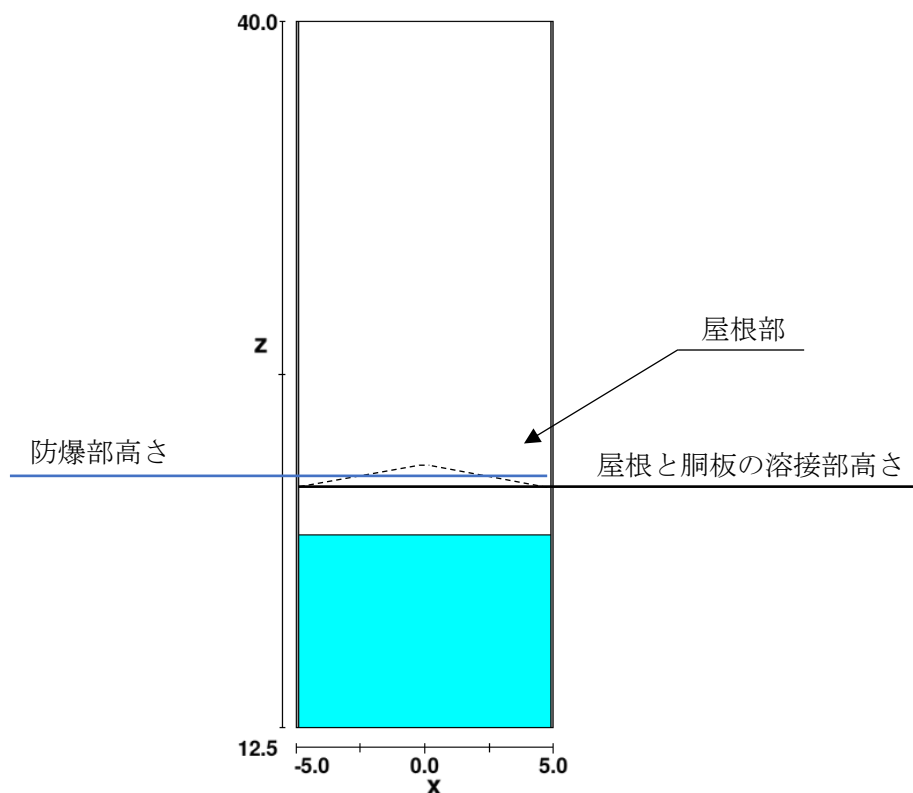


図4-1 流出容量算出モデルイメージ

4. 1 解析結果

屋根の接続部（部位Ⅰ及び部位Ⅱ）それぞれの高さを超える内包液の流出容量の履歴を図4-2に、内包液量を表4-1に示す。

表4-1より屋根と胴板の溶接部（部位Ⅰ）及び屋根の設計弱部（部位Ⅱ）のいずれにおいても流出容量は保守的な評価における内包流体の容量に比べ小さい結果となった。

よって、保守的な評価における容器内包液の質量は、保守的になっていることを確認した。

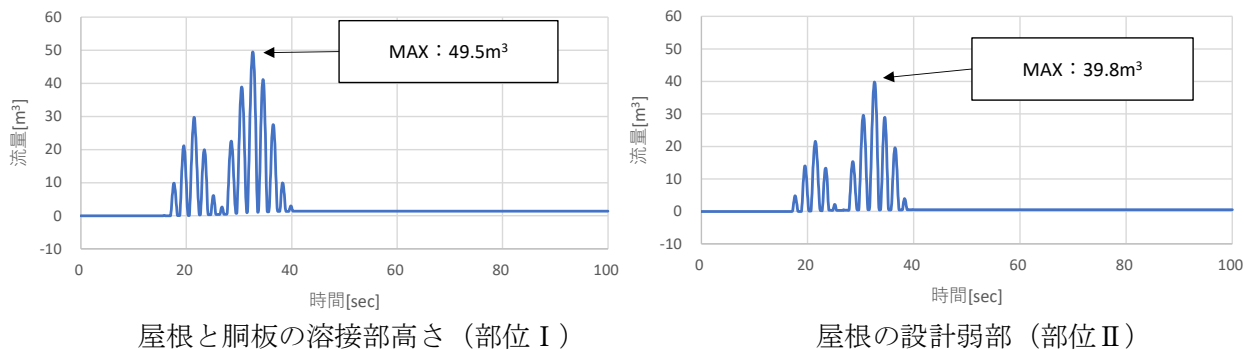


図4-2 内包液の流出容量の履歴

表4-1 地震時スロッシングによる揺動内容液容量

部位	保守的な評価 (m³)	流動解析結果 (m³)
屋根と胴板の溶接部	565.35	約 50
屋根の設計弱部	83.27	約 40

5. まとめ

流動解析の結果、KK6の軽油タンクにおけるスロッシングでは非線形となり、速度ポテンシャル理論で算出したスロッシング波高よりも大きな波高となることが確認された。

屋根板に当たる内包液量については、流動解析で求めた液量より、保守的な評価で適用している液量が多いことを確認した。

これより、軽油タンクのスロッシングでは非線形挙動を示す可能性があるが、屋根板に当たる内包液量を保守的に見積もっていることから、保守的な評価は保守的であることを確認した。

以上