島根原子力発電所第２号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-17 改 02
提出年月日	2023 年 3 月 20 日

容器のスロッシングによる屋根への影響評価について

2023 年 3 月

中国電力株式会社

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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
4. 影響評価 ····· 5
4.1 屋根への波面の到達について（評価フロー①） ····· 5
4.2 水平面に対する屋根角度の有無について（評価フロー②） ····· 7
5. 影響評価結果 ····· 8

参考資料

（１）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 2010.7.15 予稿集）
（２）容器構造設計指針・同解説　抜粋（日本建築学会（2010））
（３）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）
（４）設計用床応答スペクトル（原子炉補機冷却系サージタンク）
（５）スロッシング評価用床応答スペクトル（ガスタービン発電機用軽油タンク）

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，内包流体が容器の屋根に到達する場合には，スロッシングによる荷重が屋根に作用する。本資料では，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説明する。

本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

・「Ⅵ-2-5-7-1-4　原子炉補機冷却系サージタンクの耐震性についての計算書」
・「Ⅵ-2-5-7-2-4　高圧炉心スプレイ補機冷却系サージタンクの耐震性についての計算書」
・「Ⅵ-2-6-4-1-2　ほう酸水貯蔵タンクの耐震性についての計算書」
・「Ⅵ-2-10-1-2-3-4　ガスタービン発電機用軽油タンクの耐震性についての計算書」
・「Ⅵ-2-別添 2-2　溢水源としない耐震Ｂ，Ｃクラス機器の耐震性についての計算書」

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，Ｓクラス機器，溢水源としないＢ，Ｃクラス機器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，添付書類「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Ｓｓ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）
原子炉補機冷却系サージタンク	スカート支持たて置円筒形容器	S	常設／防止（ＤＢ拡張）	2500	3500	2800	2060
高圧炉心スプレイ補機冷却系サージタンク	スカート支持たて置円筒形容器	S	常設／防止（ＤＢ拡張）	1500	3100	1800	1339
ほう酸水貯蔵タンク	平底たて置円筒形容器	S	常設耐震／防止 常設／緩和	3000	3858	3840	3316
ガスタービン発電機用軽油タンク	平底たて置円筒形容器	—	常設耐震／防止 常設／緩和	9800	11503	10500	7438
３号復水貯蔵タンク	平底たて置円筒形容器	B	－	15500	13757	12180	8500
３号補助復水貯蔵タンク	平底たて置円筒形容器	B	－	15500	13757	12180	8500
１号復水貯蔵タンク	平底たて置円筒形容器	B	－	15200	15684	13000	2770

3.　評価方法

3.1　評価方針

容器のスロッシングについては，地震動の増加により波高が大きくなり，波面が屋根に衝突することで屋根に荷重が作用するが，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。この波面衝突による荷重は，内包流体の上部（自由質量）が屋根に沿って上昇することによるものである。

一方，スロッシングによる波は，衝突により砕けること及び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参考資料（１）（電力共同研究「円筒形タンクのスロッシング評価」）に示されている。

また，参考資料（２）（容器構造設計指針・同解説）より水平面に対する屋根の角度が□より小さい場合，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流体が上昇できず腰掛圧が生じないことが示されているとともに，参考資料（３）（固定屋根を有する円筒液体タンクの耐震設計（第２報））においても，腰掛圧は受圧点における最高液位からの静水圧におおよそ等しいので，平板及び平板に近い屋根の場合は無視してもよいと示されている。

上記を踏まえ，下記の手順により容器のスロッシングによる影響について確認する。評価フローを図１に示す。

①屋根に波面が到達するか*1。
②水平面に対する屋根角度があるか*2。
③波面が屋根に到達する場合は，解析等による評価を実施。

なお，①における屋根への波面到達の有無は，評価に用いる応答加速度を考慮し，以下に示す速度ポテンシャル理論に基づき評価を実施する。

【速度ポテンシャル理論に基づく１次固有周期（Ｔ）及び波高（ζ_s）の算出方法】

・円筒形容器の場合

Ｔ　：スロッシングの１次固有周期［s］

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{1.841 \cdot g}{R} \tanh\left(1.841\frac{H}{R}\right)$$

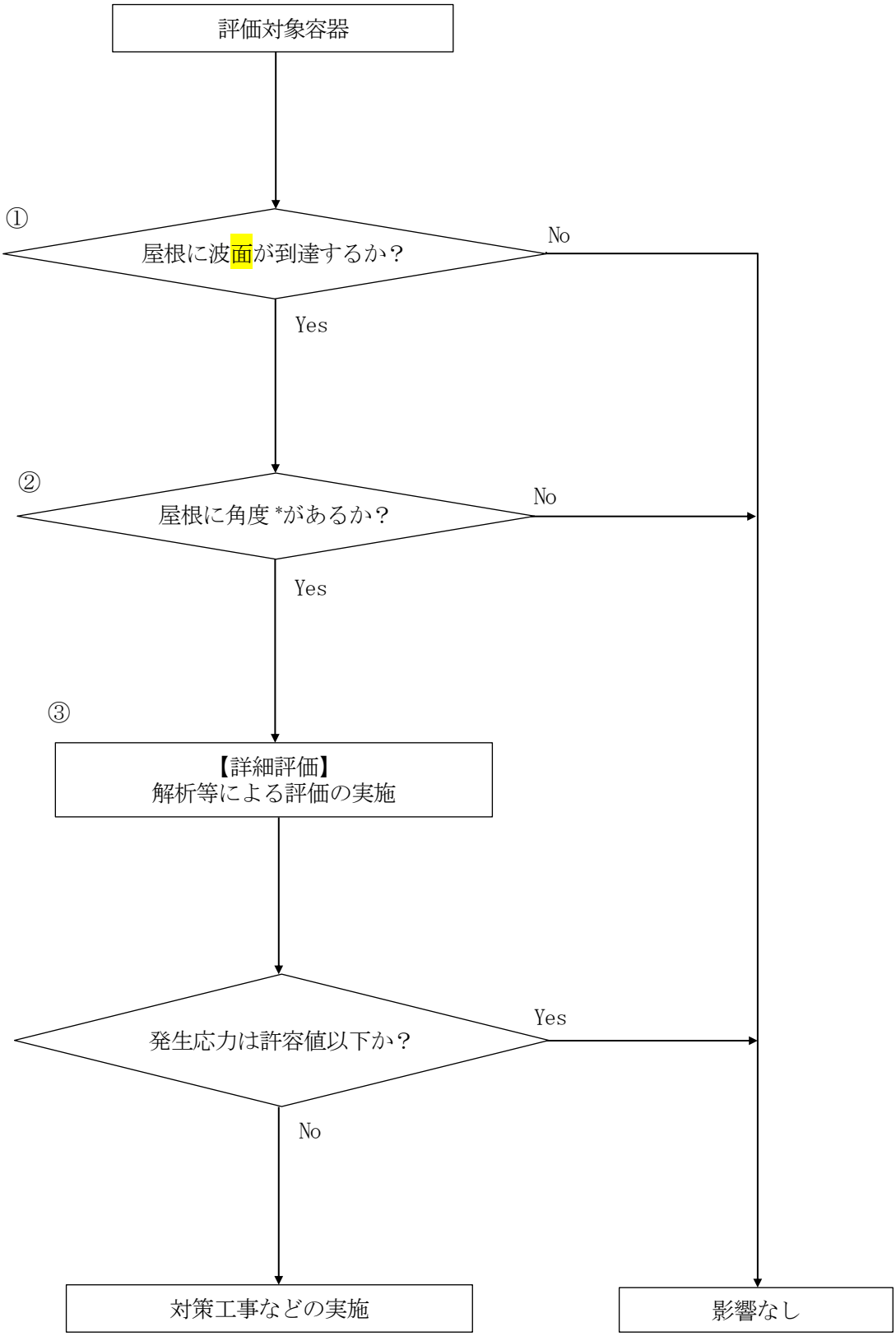
ζ_s　：スロッシングの波高［m］

$$\zeta_s = 0.837R \cdot Sa$$

ここで，

ｇ　：重力加速度［m/s^2］
Ｒ　：円筒形容器内半径［m］
Ｈ　：液位［m］
Ｓａ　：応答加速度［G］

注記＊1：屋根に波面が到達しない場合は，②以降の評価を対象外とする。
＊2：水平面に対する屋根角度がない場合には，③以降の評価の対象外とする。



注記＊：水平面に対する屋根の角度

図１　容器のスロッシングによる影響評価フロー

4. 影響評価

図１に示す評価フローに基づく各評価の結果を以下に示す。

4.1 屋根への波面の到達について（評価フロー①）

屋根への波面の到達の有無に係る評価結果を表２に示す。表２に示すとおり，ガスタービン発電機用軽油タンク，３号復水貯蔵タンク，３号補助復水貯蔵タンク及び１号復水貯蔵タンクについては屋根へ波面が到達しない。よって，ガスタービン発電機用軽油タンク，３号復水貯蔵タンク，３号補助復水貯蔵タンク及び１号復水貯蔵タンクについてはスロッシングによる影響はないと判断し，その他の容器について評価フローに基づき容器の屋根角度の有無について評価を実施する。

表２　屋根への波面の到達の有無に係る評価結果

	容器内半径 R［m］	液位 H［m］	応答加速度 Ｓａ［G］	スロッシングの １次固有周期 T［s］	液位から屋根 までの高さ ζ［m］	スロッシング の波高 ζ_s［m］	屋根への波面 到達の有無 （有：$\zeta \leqq \zeta_s$） （無：$\zeta > \zeta_s$）
原子炉補機冷却系 サージタンク	1.250	2.060	2.07*1	1.657	0.740	2.166	有
高圧炉心スプレイ補機冷却系 サージタンク	0.750	1.339	1.93*1	1.282	0.461	1.212	有
ほう酸水貯蔵タンク	1.500	3.316	2.04*1	1.812	0.524	2.562	有
ガスタービン発電機用 軽油タンク	4.900	7.438	0.53*2	3.286	3.062	2.174	無
３号復水貯蔵タンク	7.750	8.500	0.41*2	4.190	3.680	2.660	無
３号補助復水貯蔵タンク	7.750	8.500	0.41*2	4.190	3.680	2.660	無
１号復水貯蔵タンク	7.600	2.770	0.42*2	5.327	10.23	2.672	無

注記＊1：１次固有周期が 1s 以上の容器について，周期 1s 以上の応答加速度は単純減少であるため，保守的に周期 1s の応答加速度を適用する。代表として，原子炉補機冷却系サージタンクの評価に用いた設計用床応答スペクトルを参考資料（４）に示す（設計用床応答スペクトルは，添付書類「Ⅵ-2-1-7　設計用床応答スペクトルの作成方針」の基準地震動Ｓｓにおける原子炉建屋 EL 42.800m（減衰定数 0.5％）の地震応答解析による）。

＊2：１次固有周期に対応した地震応答解析から得られる応答加速度を適用する。代表して，ガスタービン発電機用軽油タンクの評価に用いたスロッシング評価用床応答スペクトルを参考資料（５）に示す。

4.2　水平面に対する屋根角度の有無について（評価フロー②）

水平面に対する屋根角度の有無に係る評価結果を表 3 に示す。表 3 に示すとおり，評価対象とした全容器については，水平面に対する屋根角度がないことを確認した。よって，評価対象とした全容器については，スロッシングによる影響はないと判断する。

表 3　水平面に対する屋根角度の有無に係る評価結果

名称	形状	屋根形状	水平面に対する屋根角度の有無
原子炉補機冷却系サージタンク	スカート支持たて置円筒形容器（図 2）	平板	無
高圧炉心スプレイ補機冷却系サージタンク	スカート支持たて置円筒形容器（図 2）	平板	無
ほう酸水貯蔵タンク	平底たて置円筒形容器（図 3）	平板	無

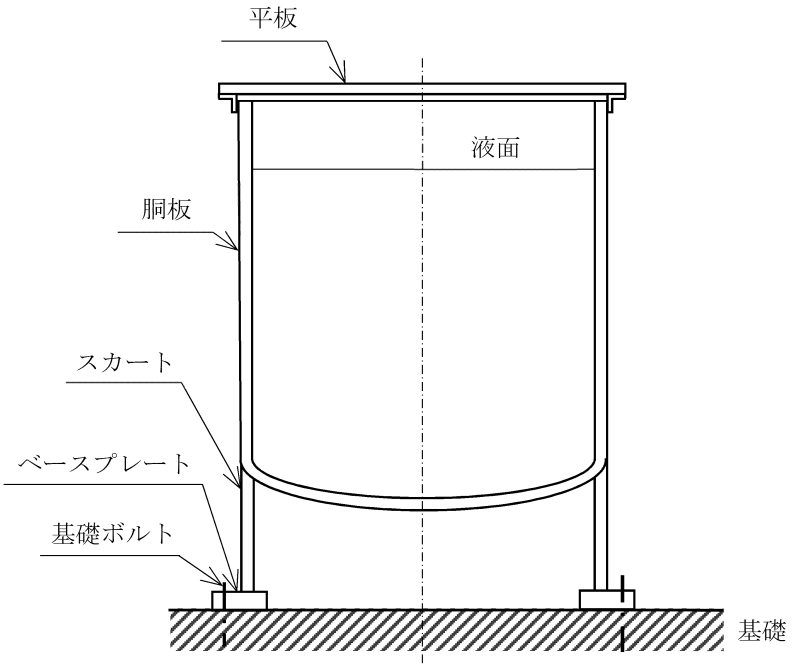


図 2　構造概要図（スカート支持たて置円筒形容器）

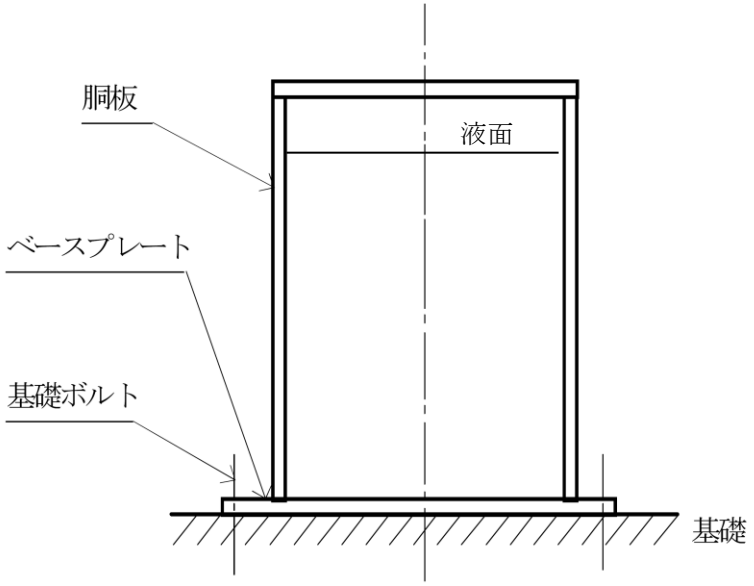


図 3　構造概要図（平底たて置円筒形容器）

5.　影響評価結果

以上の結果から，評価の対象となる全容器についてスロッシングによる影響がないことを確認した。

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 2010.7.15 予稿集）

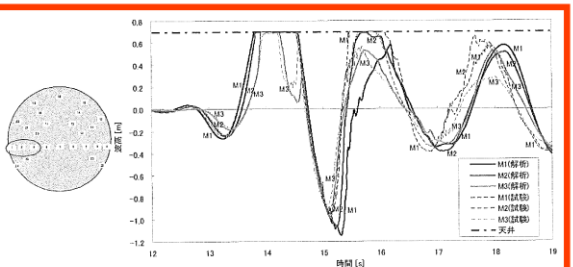


Fig.5　Comparison of wave height between shaking test and analysis

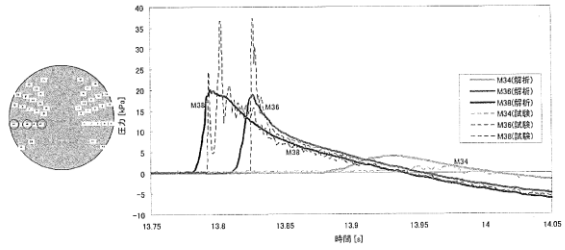


Fig.6　Comparison of pressure between shaking test and analysis

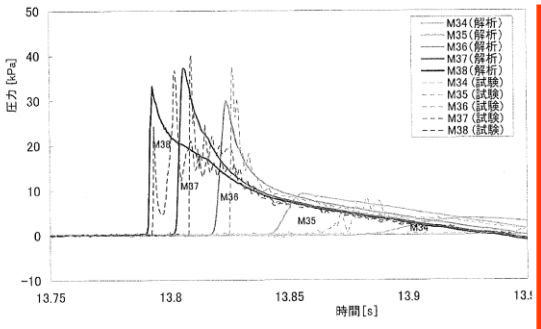


Fig.7　Analysis with segmentalized model

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。

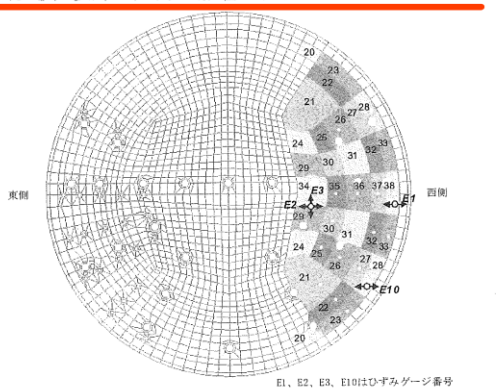


Fig.8　Analysis model to calculate strain on top board

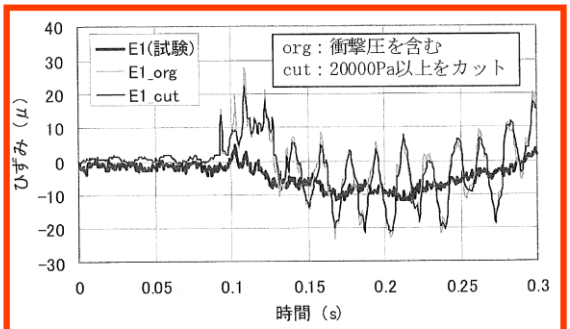


Fig.9　Measured strain and that calculated with measured pressure

3.3 天板の健全性評価

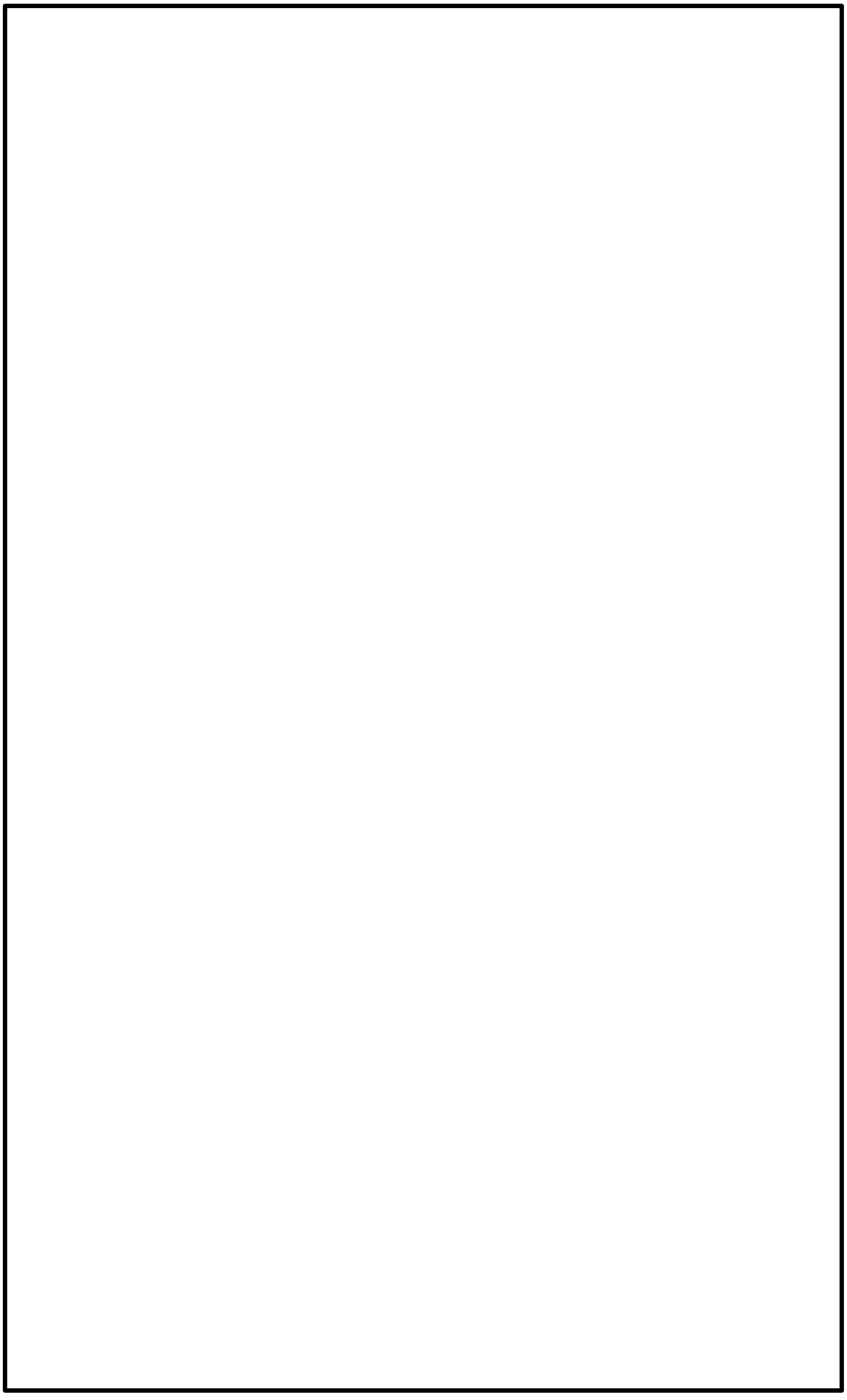
スロッシングによる波面衝突が天板強度へ与える影響を確認することにより、天板健全性の合理的な評価手法を検討した。

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 Fig10 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。

容器構造設計指針・同解説　抜粋（日本建築学会（2010））



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）

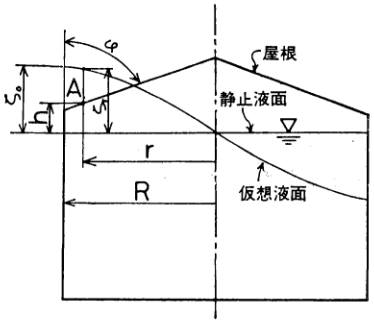


図 1　衝撃圧力

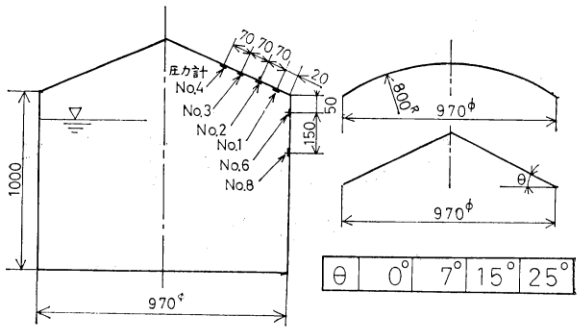


図 2　円筒タンク，圧力計配置図

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。

腰掛圧 P_h 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。

$$P_h=\rho g(\zeta_0-h) \quad (\mathrm{kgf/cm^2}) \qquad (2)$$

平板及び平板に近い屋根の場合 P_h は無視してよいと考えられる。

又，ζ_0 及び ζ_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

$$\zeta_r(n)=\frac{\alpha}{g}RA_{(n)}\beta_p\frac{J_1\left(1.841\frac{r}{R}\right)}{J_1(1.841)} \quad (\mathrm{cm}) \qquad (3)$$

となる。ここで

α ：加振加速度（cm/sec²）

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

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

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

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。

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

(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。

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

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

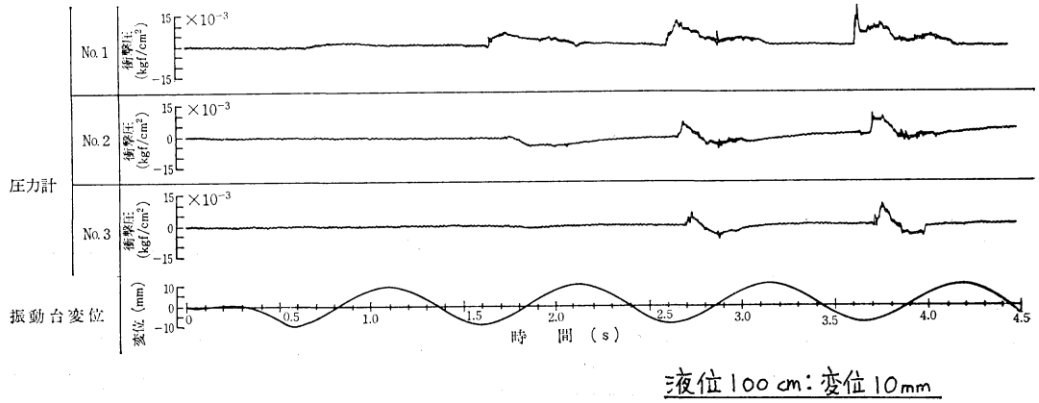


図 3　ドーム屋根圧力波形

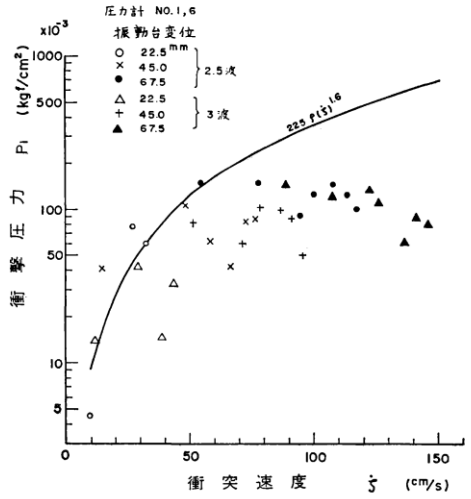


図 11　衝撃圧力と衝突速度（3波までの最大値）

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，作用時間が長いため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が，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。

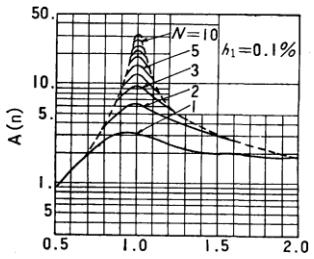


図 12　応答倍率

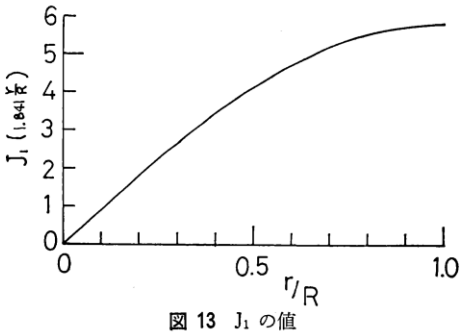


図 13　J_1 の値

実際のタンクにおいて水と異なる貯蔵液の場合，空気の捲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)　例えば　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” Navel Ship Research and Development Center AD 702 727 (1970)

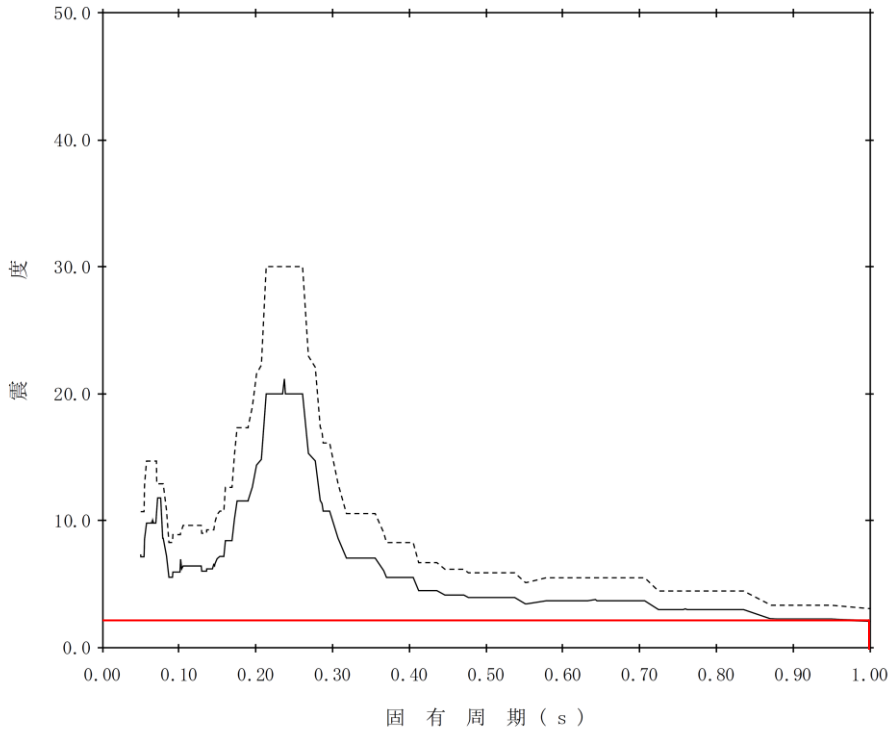
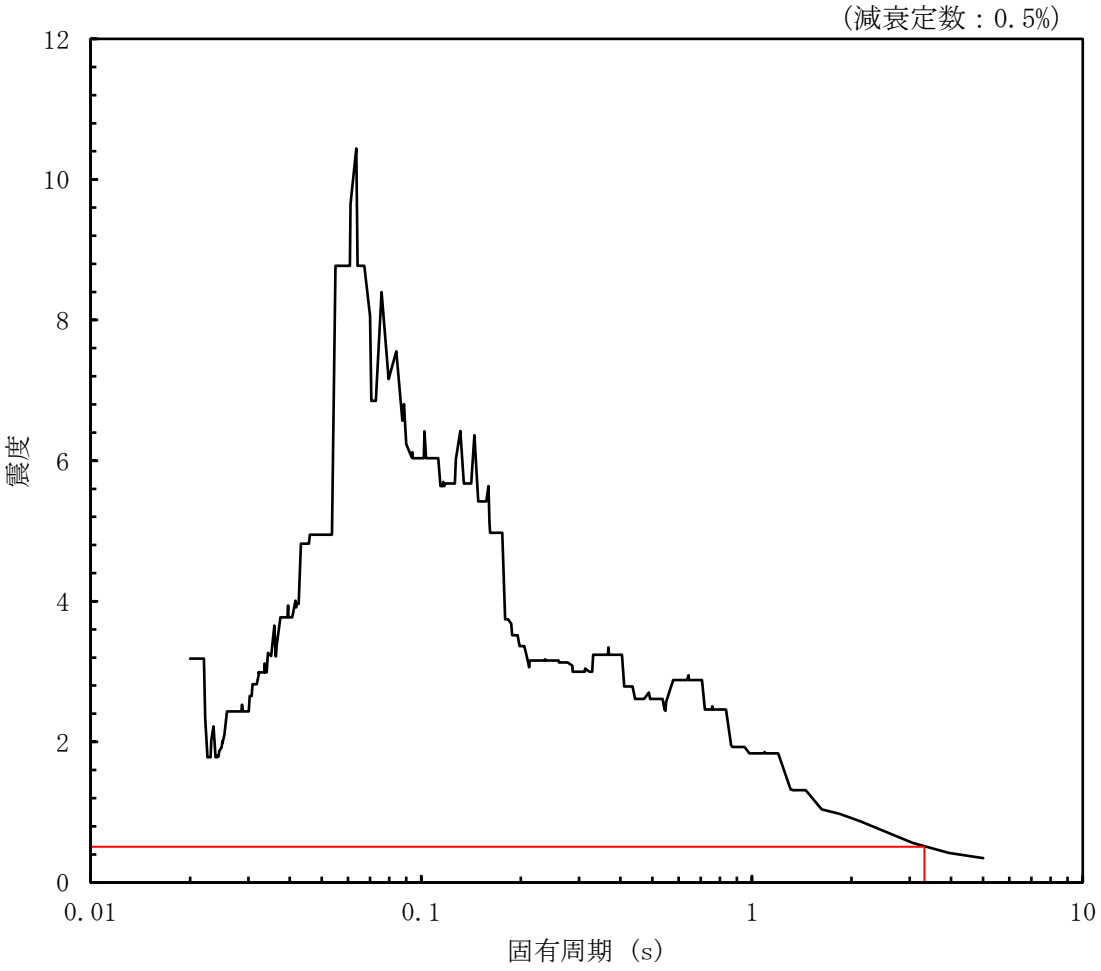
(9)　安藤良夫，藤田譲，山口勇男，“平板の水面衝撃について”，造船協会論文集，90号 (1956) pp 69～75

参考資料（４）

設計用床応答スペクトル（原子炉補機冷却系サージタンク）

構造物名：原子炉建物　　標高：EL42.800m　　——— 設計用床応答スペクトルⅠ(NS方向)

減衰定数：0.5%　　波形名：基準地震動Ｓｓ　　-------- 設計用床応答スペクトルⅡ(NS方向)



スロッシング評価用床応答スペクトル（ガスタービン発電機用軽油タンク）