

溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価

Nonlinear sloshing response evaluation method for rectangular tank with overflowing water

酒井理哉*, 東貞成**, 佐藤清隆***, 田中伸和***

Michiya Sakai, Sadanori Higashi, Kiyotaka Sato and Nobukazu Tanaka

* 工修 (財) 電力中央研究所, 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1 6 4 6)

** 理博 (財) 電力中央研究所, 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1 6 4 6)

*** 工博 (財) 電力中央研究所, 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1 6 4 6)

Shaking table tests were conducted for a rectangular water tank filled to its capacity in order to recognize the overflow behavior with sloshing. Fundamental sloshing phenomena during strong earthquake motion in 2003 off Tokachi were found out such as wave heights, dynamic water pressure, overflow of water and complex wave surface using an image-based measurement. Numerical analyses of free surface flow using volume of fluid method were carried out on these sloshing tests. The analyses results agreed well with the tests results in time histories of wave heights, overflow of water and wave shape. Realistic estimation methods for overflow of water during earthquake were proposed through these studies.

Key Words: Long Period Ground Motion, Sloshing, Overflow, Computational Fluid Dynamics

キーワード: 長周期地震動, スロッシング, 溢流, 計算流体力学

1. はじめに

1983 年日本海中部地震においては, 新潟県の大型石油タンクに溢流を伴うスロッシングによる被害の記録^{1,2)}が残されており, まだ記憶に新しい 2003 年十勝沖地震では, 震源から約 200km 離れた苫小牧の石油化学コンビナートの石油タンクに周期の長い地震動が作用し, スロッシングにより大きく液面が揺動したため, タンクの浮き屋根の損傷および火災事故による甚大な被害が生じた³⁾. このような地震によるタンクのスロッシングは震源より遠く離れた箇所でも発生し, 大きな被害が生じる可能性があるため適切な評価法の整備が急務となっている.

各種タンクの耐震設計基準に定められたスロッシングの応答評価法は, 入力地震動の応答スペクトルを用いて, 速度ポテンシャル理論に基づいて最大波高を算出する方法が用いられてきた. 前述の十勝沖地震における石油タンクの被害を受けて消防告示に関しては改訂^{4,5)}がなされ, 設計用長周期地震動スペクトルが地域毎に区分され 2 倍に引き上げられているが, 基本的なスロッシング評価方法は線形解と有限波高による非線形性の導入にとどまる内容であり, 共振による過大な波高応答時の液面形状や動水圧分布など非線形スロッシング挙動や, 溢流を伴う現象に対しては, 耐震設計基準として適切な評価方法は未だ見当たらないのが現状である.

このため本論では, これらの高精度なスロッシング評価法を整備する手始めとして矩形水槽を用いた振動試験を行い, 長周期地震動作用下での非線形スロッシングおよび溢流挙動に関する基本的データを取得する. また, 流体塊の分離合体が解析可能な VOF 法に基づく数値流体解析コードを開発し試験シミュレーション解析を行い, 試験結果との比較により溢水を伴うスロッシング評価に対する適用性を検証する.

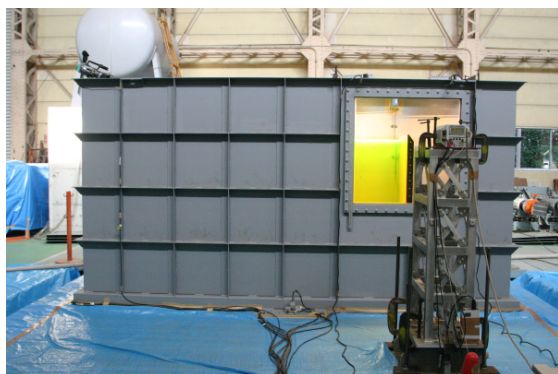
2. 矩形水槽の非線形スロッシング実験

2.1 スロッシング実験方法

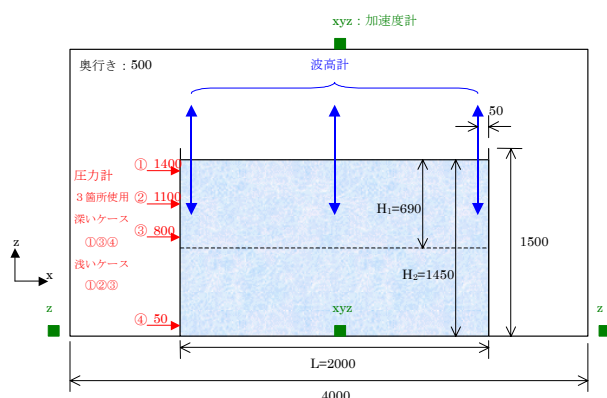
(1) 試験の概要

図-1 に示す 2 重構造の矩形水槽 (外側部: 4m×2m×0.5m, 内側部: 2m×1.5m×0.5m) を用いたスロッシング実験を行った. 内側水槽に上端から 50mm まで水を満たし, 水槽全体を水平方向に地震波加振することによりスロッシングを生じさせ, 外側水槽に溢れる状況を評価する. 水槽は電力中央研究所が所有する大型振動台上に設置して加振した. 計測項目は, スロッシング波高 (3 箇所), 隔壁に作用する動水圧 (3 箇所), 振動台および水槽の応答加速度について, 図-2 に示すようにセンサーを配置し, アンプを介しデジタル収録装置を用いて動的計測を行った. また, 右側隔壁上部側面にアクリル窓

を設け、高速ビデオカメラを用いてスロッシングによる波の溢流状況を撮影し、画像処理により波面形状の分析を行った。表－１にセンサー一覧をまとめて示す。内側水槽部には水深調整用の底板を用意し、水深は水槽満水状態とその約半分である 1.45m, 0.69m の２ケース設定した。



図－１ 矩形タンク模型の外観



図－２ センサー配置図

表－１ センサー一覧

計測項目	センサー種類	定格容量 (記録スペック)
波 高	ワイヤー式波高計	60 cm
動水圧	水圧計	50 kPa
加速度	サーボ加速度計	20 m/s ²
	ひずみ型加速度計	20 m/s ²
波面形状	高速ビデオカメラ	1/100fps, 1536frame, 572×434pixel

(2) 水槽のスロッシング基本挙動の評価

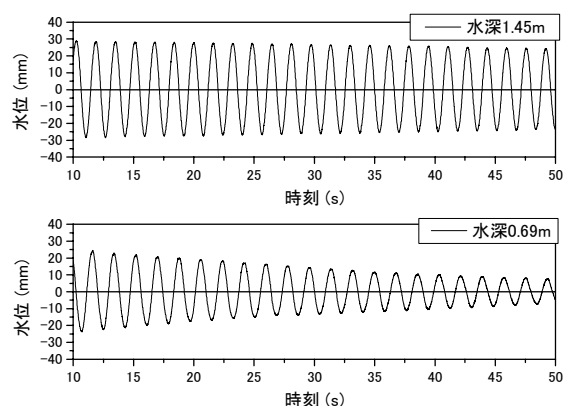
水槽の自由振動試験を行い、スロッシング周期および減衰などの基本的挙動を評価した。スロッシングの振動特性を得るにはスイープ加振試験により高次のモードまでの周波数応答特性を得ることが望ましいが、内側水槽内の液高がほぼ満水に近く、微小振幅の正弦波加振でも共振周波数付近ですぐに溢流してしまうため、１次モードの共振周波数付近で周期を微調整した微小正弦波加振を複数回繰り返す、応答波形を確認しながら自由振動波形を得た。水槽の形状諸元に基づき、速度ポテンシャル理論により式(2-1)により算出されるスロッシングの１

次固有周期についてまとめた結果を表－２に示す。自由振動試験による波高の時刻歴波形とそのフーリエスペクトルを図－３，４に示す。試験に用いた水槽の固有周期は理論値と一致した。また、自由振動波形から水位のピークの水位振幅を読みとり、図－５に示すように振幅の変動をプロットし、対数減衰率によりスロッシング時の減衰定数を求めた結果を表－３に示す。スロッシングの減衰は、流体の粘性によって水槽壁面に生じる渦によりエネルギーを消散することに起因し⁶⁾、実際の大型タンクの設計等では、0.1～0.5%が経験的に用いられている。本検討で用いた水槽の減衰定数は液面深さによって変化し、水深を 1.45m および 0.69m に変化させることによって、0.12%, 0.85% の値となった。この原因は、水深とスロッシング周期の関係より、水深が浅いほど水槽壁面での流速が大きくなり、粘性減衰が大きくなること、および、水槽壁面に配置された波高計の下端が水深浅いケースでは底面近くにまで届いており、流速の大きい底面周辺に生じる流れに乱れが生じた可能性などが考えられる。

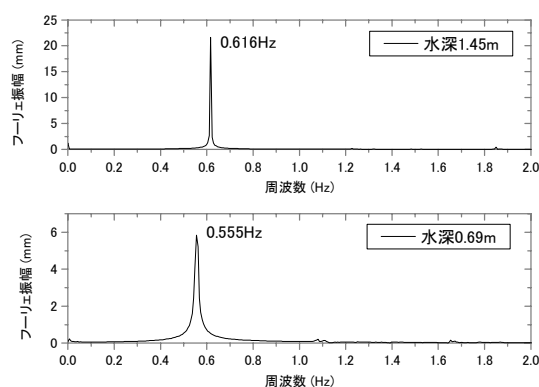
$$Ts = 2\pi \left(\frac{\pi \cdot g}{L} \tanh \left(\frac{\pi \cdot H}{L} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

表－２ 水槽のスロッシング周期

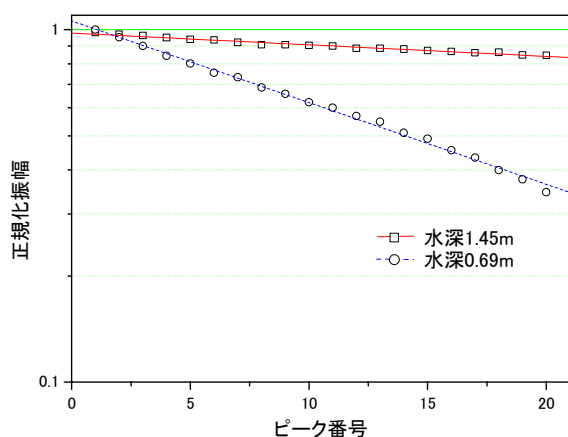
水深 H	幅 L	周期 Ts	振動数 Hz
0.69m	2.0m	1.796sec	0.556
1.45m	2.0m	1.618sec	0.618



図－３ 自由振動波形



図－４ 自由振動波形のフーリエスペクトル



図－5 水位振幅の低下状況

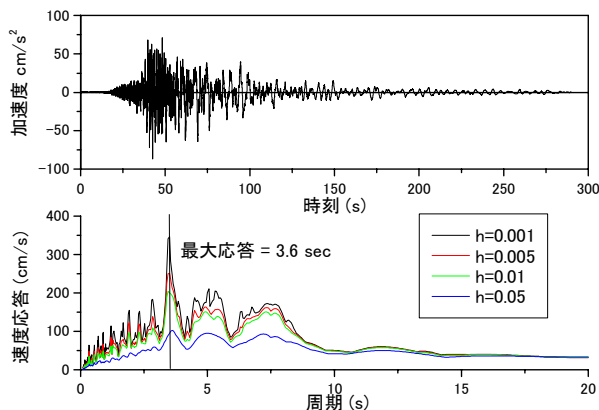
表－3 水深による減衰定数の違い

水深	減衰定数 h
1.45 m	0.0012
0.69 m	0.0085

2.2 地震波加振によるスロッシング応答

(1) 入力地震動

加振波は2003年十勝沖地震のk-net 苫小牧での観測記録を用い（図－6）、速度応答スペクトルのピーク周期 T_o が、水槽のスロッシング周期 T_m と一致するように時間軸を調整して入力した。実験相似則はフルード則の適用により、入力地震動の加速度振幅は等倍となり、時間軸の変化により式2-2が成立する。このフルード則によるスケール換算値を表－4にまとめた。



図－6 入力地震動（2003年十勝沖地震 k-net 苫小牧波）

$$T_m / T_0 = \sqrt{L_m / L_0} \quad (2-2)$$

表－4 フルード則によるスケール換算

水深	実験水槽幅 L_m	時間縮尺 T_m/T_0	スケール 換算値 L_0
1.45 m	2.0 m	0.45	9.2m
0.69 m	2.0 m	0.5	8.0m

(2) 地震波加振によるスロッシング応答結果

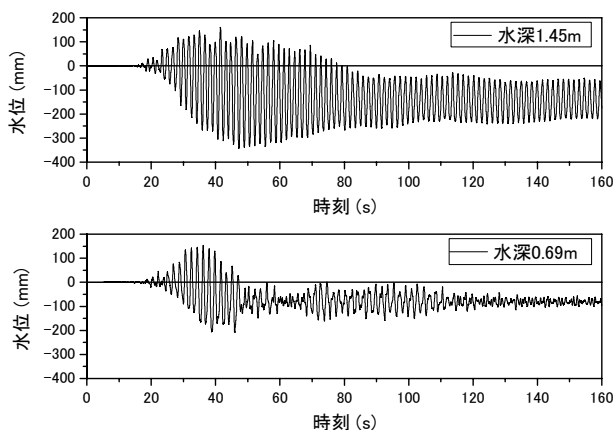
地震波加振によるスロッシングの応答水位について、時刻歴波形を図－7に示す。スロッシングによる水位は

最大150mmに達し、水槽両端から溢流を伴いながら徐々に水位低下し、加振終了後も液面揺動は続いている状況が確認できる。自由振動試験により明らかなように、水深による減衰の差に比例して水深の深いケースで、より長い間液面揺動が続いている。表－5に水深による最大最小水位と水位低下量の違いを示す。溢流を伴うため最大水位はそれほど大きく変化しないが、減衰の違いにより波の振幅の成長に差が生じ、引き波による最小水位の差は水深が深いケースで大きくなった。さらに、水深が深いケースで水位振幅の大きい液面揺動が長く続くため、水位低下量が大きい結果となった。

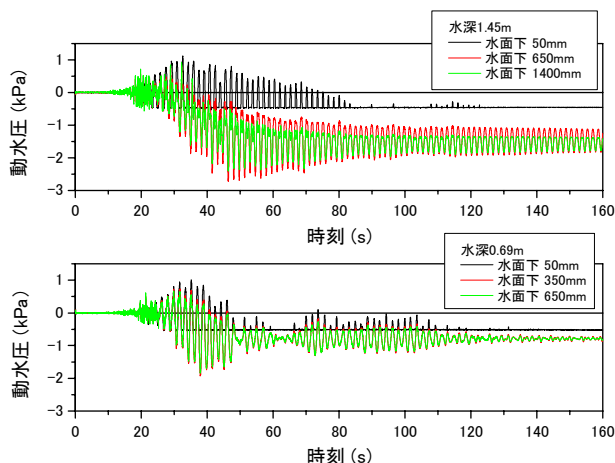
動水圧の時刻歴応答波形を図－8に示す。水面下50mmに取り付けた圧力計は加振途中で気中に出ているため、圧力値は一定になっている。水深による動水圧の応答は、波高の時刻歴と同様に、減衰の差が生じている傾向が確認できる。

表－5 水深による最大最小水位と水位低下

水深	最大水位	最小水位	加振後の 水位低下量
1.45 m	159.6 mm	-341.4 mm	149.5 mm
0.69 m	153.9 mm	-210.0 mm	81.0 mm



図－7 スロッシング水位の時刻歴波形



図－8 動水圧の時刻歴波形

2.3 スロッシング波面の画像計測

スロッシングによる溢流状況を詳細に把握するために、水槽に取り付けたアクリル窓部における液面変動を高速ビデオカメラで撮影し、画像処理により波面の形状計測を行った。計測範囲はアクリル面上の 1000mm×780mm の範囲で、1 ピクセル当たり約 1.8mm の解像度となっている。液面形状の画像処理は、撮影した画像の輝度情報からしきい値で 2 値化する方法などがよく使われるが、画像中の波高の移動量が大きく水面の明るさの変動が激しいため、単純な 2 値化では水領域の認識が難しい。このため、カラー画像を RGB に色分解して領域を演算して抽出する手法を用いた。G と R の差分画像 (G-R) と G と B の差分画像 (G-B) を生成し、これらの交差する成分と、水表面近くの輝度の強いハイライト成分を合成し、水領域とした。水面の輪郭抽出した結果を図-9 に示す。図中の赤い線が水面を認識した部分である。

波高計による水位計測位置と同じ箇所における画像計測値を求め、時刻歴波形で比較した結果を図-10 に示す。両者は非常によく一致しており、計測精度が検証できた。波高計による計測は測定点が限られるため、液面形状変動の激しいスロッシング応答を捉えることは難しいが、画像計測を用いることにより面的に形状を評価することができ、溢流を伴う非線形性の強い現象の把握に有効であると言える。

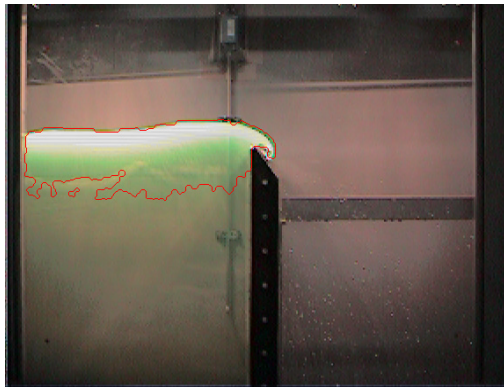


図-9 水面の輪郭抽出状況

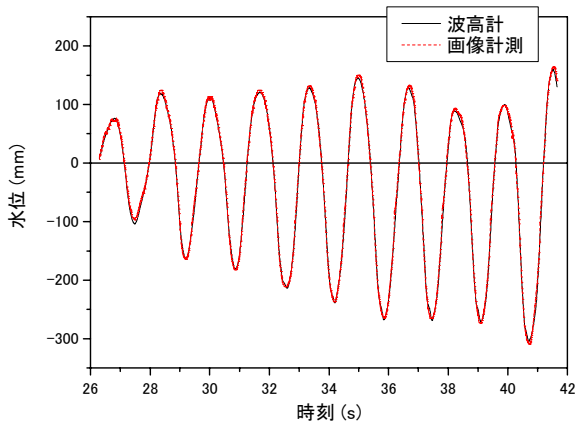


図-10 波高計と画像計測による水位の比較

3. VOF 法によるスロッシング解析方法

3.1 スロッシング解析法 (SLOSH-2D) の概要

SLOSH-2D は、著者らが開発した自由液面を考慮できる 2 次元断面直交格子差分法による非圧縮性流体の乱流数値解析コードであり、k-ε 乱流モデルによる乱流粘性の扱い、SIMPLE 法による質量保存の厳密化を行っている。本章では SLOSH-2D の定式化・プログラミングの概要を述べ、2 章で行ったスロッシング実験のシミュレーション解析を行い、適用性を評価する。

3.2 基礎方程式

VOF (Volume of Fluid) 法⁷⁾は Hirt らにより開発された自由液面の解析手法である。流体の計算格子 (セル) を空気、流体、固体 (壁) のそれぞれに分類し、さらに空気と流体の共存セルの概念を導入し、セル内の流体充填率 F 値で液面を認識する方法である。以下の 2 次元流体の基本方程式において、等温均質流体 (すなわち密度 $\rho = \text{const.}$) の条件を適用した。なお以下の式表現では同じ添え字については和を取るものとする。

(1) 連続方程式 (質量保存)

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3-1)$$

(2) 運動方程式 (運動量保存)

$$\frac{\partial (\bar{\rho} u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_i u_j)}{\partial x_j} = \bar{\rho} G_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho} u'_i u'_j) \quad (3-2)$$

(3) 乱流エネルギー輸送方程式 $k \equiv \frac{\bar{\rho} u'_i u'_j}{2\rho}$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_j k)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\bar{\rho} v_i + \frac{\bar{\rho} v_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} - \bar{\rho} u'_i u'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \bar{\rho} \varepsilon \quad (3-3)$$

(4) 乱流エネルギー散逸率輸送方程式 $\varepsilon \equiv \nu \rho \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_j}{\partial x_j}$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\bar{\rho} \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} u_j \varepsilon)}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\bar{\rho} v_i + \frac{\bar{\rho} v_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} - C_{\varepsilon 1} \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} u'_i u'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3-4)$$

(5) 粘性拡散項のモデル化式

$$\bar{\tau}_{ij} = \bar{\rho} \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (3-5)$$

(6) レイノルズ応力のモデル化式

$$-\bar{\rho} u'_i u'_j = \bar{\rho} \nu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \delta_{ij} \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \delta_{ij} \frac{2}{3} \bar{\rho} k \quad (3-6)$$

(7) 渦動粘性係数

$$v_t = \begin{cases} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} & \text{for } \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} \leq 0 \\ C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left(1 - 0.1 \frac{g}{\rho} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)^2 \right) & \text{for } \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} > 0 \end{cases} \quad (3-7)$$

(8) 計算セルの流体充填率 F の移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-8)$$

ただし、ここでの各記号の意味は下記のとおりである。

— ; レイノルズ平均

ˆ ; レイノルズ平均変動量

ρ [kg/m³] ; 流体密度 (水の密度)

u_i [m/s] ; 流速の各方向成分

G_i [m/s²] ; 単位体積あたり外力の各方向成分

ν [m²/s] ; 動粘性係数

k - ε 乱流モデルの定数は、以下の標準的な値を採用した。

$$\sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3,$$

$$C_{\varepsilon 1}=1.45, C_{\varepsilon 2}=1.92, C_\mu=0.09$$

3.3 離散化

2次元直交差分格子で空間を離散化し、格子セルの中心位置で密度、圧力、流体充填率 F を定義し、格子境界線上中央位置で流速ベクトル成分 u (X 方向)、 v (Y 方向) を定義するスタッガード格子を利用している。時間の離散化については式(2-1)の保存則 (連続式) を満足しない場合には、SIMPLE スキーム⁸⁾で陰的に圧力 (正確には圧力補正量) の反復修正を施して時間積分計算を進めている。このとき圧力補正量の Poisson 方程式を離散化した連立方程式で数値的に解いており、これが計算時間の大きな部分を占めている。SLOSH-2D ではこの部分の解法に SOR 法を用いている。式(3-8)を除く式の移流項の離散化は高次精度3次風上差分法で、拡散項は4次の中央差分法を用いている。なお、式(3-8)の F の計算では保存形式で離散化し、流体総体積が保存されるようにしている。水面の判定は図-11に示すように流体セル ($F=1$) と完全気体セル ($F=0$) の境界である共存セル ($0 < F < 1$) の格子セル位置を同定し、格子セルの上・下・左・右のどの面が空気側かを判別して決定している。

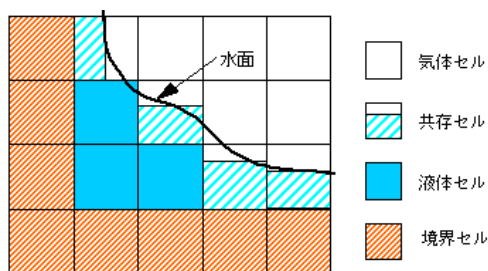


図-11 VOF法概念図

3.4 プログラムフロー

計算の手順としては、まず水面の形状を決定し、境界の流速を現在の流速で固定してから新時刻の乱流量を計算した後、新時刻の流速の推定値を求めて、これが連続式を満足するように圧力の修正を行って流速推定値の更新を行う。この修正・更新の反復修正の収束終了後に、推定流速の値を新時刻の流速値と定義する。さらにこの流速値を用いて各格子セルでの流速の発散 ($\text{div } V$) を計算してこの値が十分に小さな設定値を下回らない場合には反復修正のループに戻している。計算フローを図-12に示す。

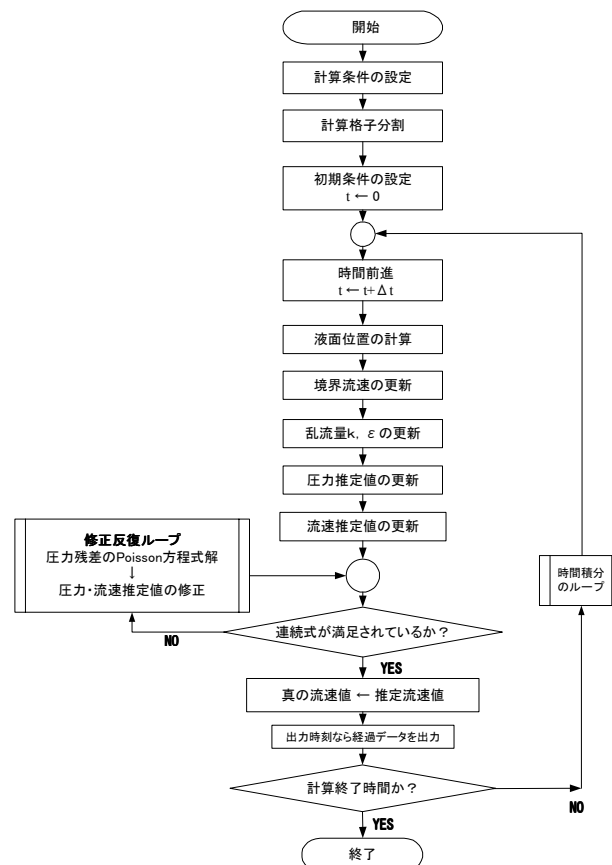


図-12 計算フロー

3.5 解析モデル

水槽とその外部の2次元計算領域を表-6に示す諸元で計算格子に分割した。計算格子の間隔はほぼ等間隔に近いものであるが、水平方向では水槽壁面近くで細かくしている。鉛直方向では初期水面と水槽壁上端の間に2メッシュ入るようになっており、この部分のみがやや粗くなっている。水槽内部の格子数は、深水深1.45mのケースで90×62、水深0.69mのケースでは90×28で、鉛直格子解像度は水深0.69mのケースの方が2%程度粗い。

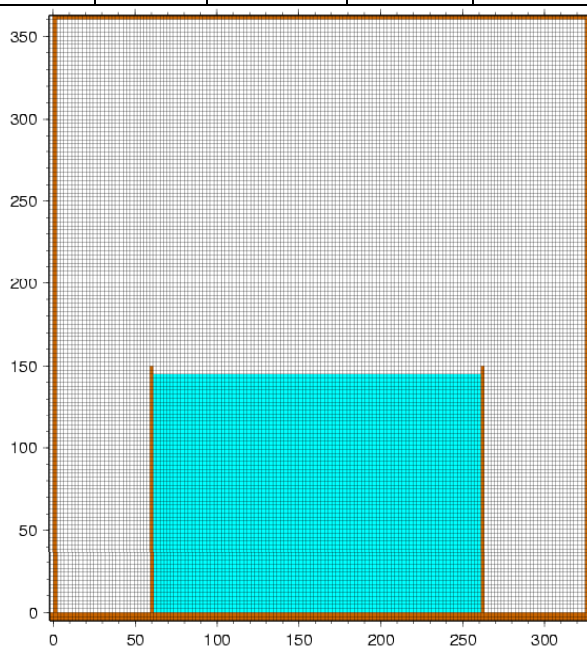
図-13に水深1.45mのケースの計算格子分割図を示す。

なお水槽の固体壁は格子境界線に設定するのではなく、1格子分の幅を取って固体壁とし、この格子を計算しないメッシュとしている。また計算領域の最外側格子は固体壁として計算領域から水は流出しないものとした。

時間積分の刻み幅 Δt については、水深 1.45m, 0.69m のケースともに同一の一定値 $\Delta t=0.002$ 秒で計算した。また積分時間は入力地震加速度の継続時間である 163.835 秒までとした。なお地震加速度の信号間隔は 0.005 秒であり、これを線形補間して時間積分の Δt 単位で加速度外力として与えている。

表－6 解析モデルの格子分割状況

水深	水平方向		鉛直方向	
	格子数	格子サイズ cm	格子数	格子サイズ cm
1.45 m	149	2.0～2.25	149	2.4～2.5
0.69 m	149	2.0～2.25	100	2.4～2.5



図－1 3 メッシュ分割（水深 1.45m）

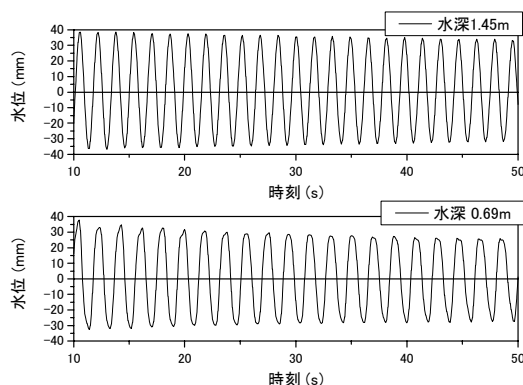
3.6 解析結果

(1) 自由振動解析による減衰評価

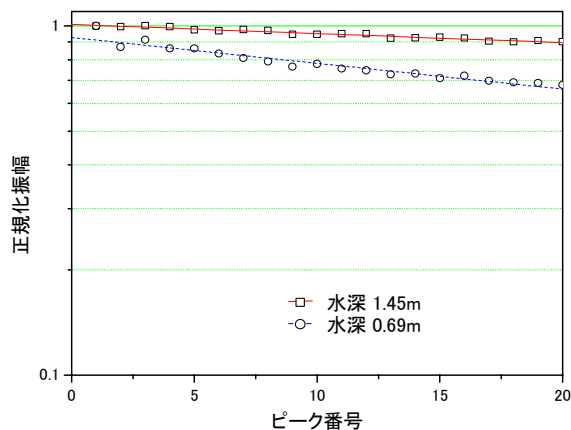
地震応答解析と同じ解析モデルを用い、共振周波数による振幅 $\pm 5\text{cm/s}^2$ の正弦波加速度を 3 波入力して得られた自由振動解析結果を図－1 4 に示す。また、自由振動波形から水位のピークの水位振幅を読みとり振幅の変動をプロットした結果を図－1 5 に示す。同図より対数減衰率によりスロッシング時の減衰定数を求めた結果を表－7 に示す。

水深の深い方が減衰定数は小さい値となっており、水深の違いによりスロッシングによる流れの乱れが異なっており、その影響により減衰の大きさが変わっているものと思われる。解析より求めた減衰定数はいずれも実験結果より小さい値となっている。実験では水槽壁面に波高計・圧力計などが取り付けられており、その周辺で乱れが生じている可能性がある。また、解析ではレイノルズ数が十分に大きいとして水の粘性の効果は無視しているものの、実験は水の粘性が存在する。これらの影響により、実験結果は減衰が大きめになっていると推察される。なお、今回実験に使用した水槽のサイズと想定すべ

き大型タンクなどとの寸法効果によるレイノルズ数の影響については、今後も検討が必要である。



図－1 4 自由振動波形（解析結果）



図－1 5 水位振幅の低下状況（解析結果）

表－7 減衰定数

水深	減衰定数 h	
	実験結果	解析結果
1.45 m	0.0012	0.00096
0.69 m	0.0085	0.00277

(2) 波高及び動水圧の時刻歴の比較

スロッシング応答による水位及び動水圧の時刻歴波形について、解析結果と試験結果の比較を図－1 6～1 9 に示す。

水位の時刻歴波形は初期の 50 秒間は良く一致した結果が得られている。80 秒以降では水深 1.45m のケースでは、振幅は同等の波形となっているものの、水深 0.69m のケースでは解析結果は振幅が大きめの応答となっている。この原因は、自由振動による評価で判明した実験と解析との減衰の違いが作用しているためと思われる。

動水圧の時刻歴波形は、水位の応答と同様で、水深 0.69m のケースで 80 秒以降に解析結果の振幅応答が大きめに振動している傾向が見られる。

しかしながら、初期の 50 秒間では溢流が多く生じ非線形性の強い挙動であるのに対し、試験結果と解析結果の比較では良く一致した結果が得られており、本解析手法による非線形スロッシング応答の評価精度が確認できた。

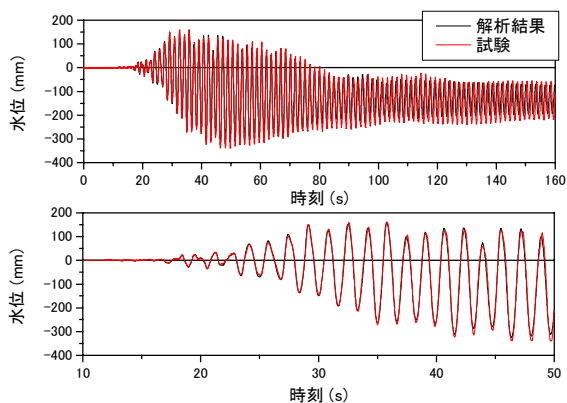


図-16 水位時刻歴の比較（水深 1.45m）

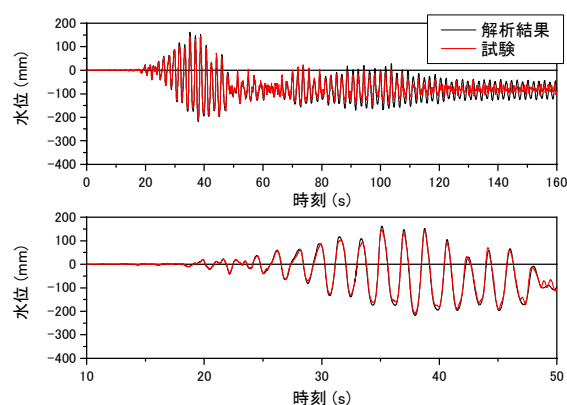


図-17 水位時刻歴の比較（水深 0.69m）

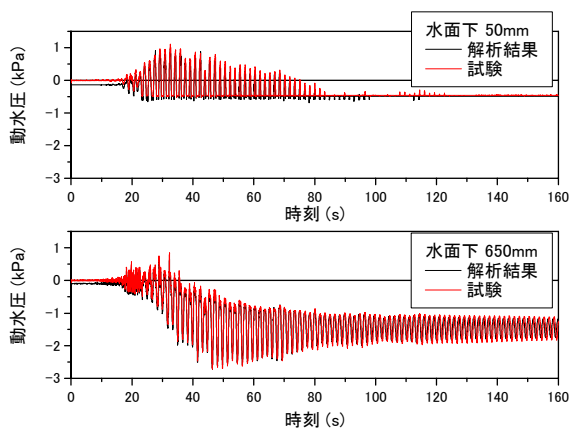


図-18 動水圧時刻歴の比較（水深 1.45m）

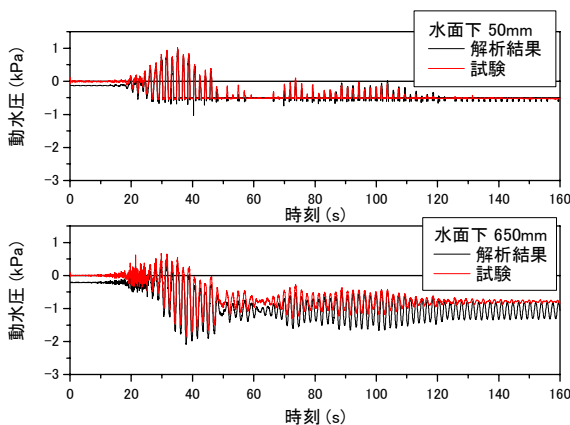


図-19 動水圧時刻歴の比較（水深 0.69m）

(3) 液面形状の比較

水深 1.45m のケースの時刻 33.30sec における水面形状のスナップショットについて、画像計測結果と解析結果を図-20、21に示す。流体解析のメッシュは画像計測の解像度より粗いため、詳細な形状の比較は難しいが、ほぼ同等の結果が得られていると言える。

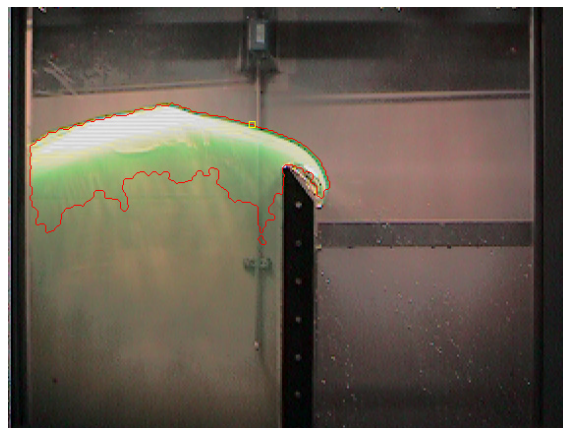


図-20 画像計測による水面形状のスナップショット（水深 1.45m, 時刻 33.30 sec）

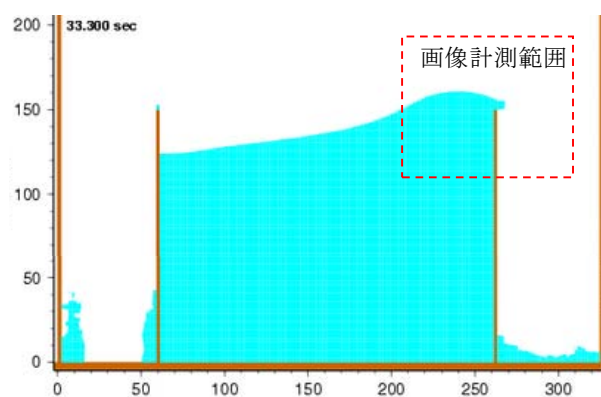
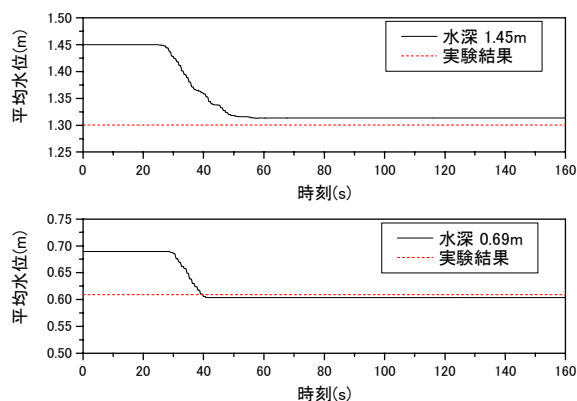


図-21 解析結果の水面形状のスナップショット（水深 1.45m, 時刻 33.30 sec）

(4) 溢水量評価

水槽内の流体体積を水槽幅で除した平均水位の時系列を図-22に示す。溢流は初期の 50 秒間で大部分が生じ、水位低下していく状況が把握できる。表-8に溢流による水位低下量について、試験結果と解析結果を合わせて示す。水深の違う 2 ケースで 1 割以内の精度で水位低下量の評価ができた。水位の時刻歴でも確認できたが、非線形性の強いスロッシング挙動下での複雑な流体现象を再現でき、定量的な評価が可能であることを示すことができた。



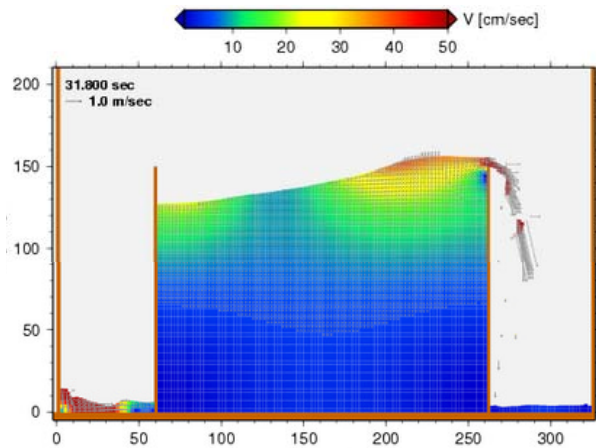
図－2 2 空間平均水位の時系列

表－8 水位低下量

水深	実験結果	解析結果	誤差
1.45 m	149.5 mm	136.75 mm	-8.5 %
0.69 m	81.0 mm	86.62 mm	6.9 %

(5) 流速分布

計算格子セル中心位置の流速 2 成分より求めた流速絶対値のカラーコンターと流速ベクトルの分布状況を、水深 1.45m のケースでの時刻 31.8sec における代表例として図－2 3 に示す。流体表面付近で流速が大きく分布している状況が把握できる。本検討では試験シミュレーション解析により、評価手法の適用性の確認を行ったが、今後実際の大型タンクをモデル化した解析などにより、タンク内部の渦による乱れの影響を評価して、スロッシングの減衰の定量評価への活用などが期待できる。



図－2 3 流速分布（水深 1.45m, 時刻 31.8sec）

4. 結論

本論では、非線形スロッシング挙動の評価法を提案するため、矩形水槽の地震波加振によるスロッシング実験を実施し、VOF 法に基づく流体解析コードを開発し、試験シミュレーション解析により適用性を明らかにした。概要をまとめると以下の通りである。

(1) 非線形スロッシングによる溢水挙動の把握

ほぼ満水状態に設定した矩形水槽の振動台加振試験により、十勝沖地震を模擬した地震動入力による溢流を伴

う非線形スロッシング応答時の、波高・動水圧応答などの基本的挙動の把握、溢流による水位低下状況などを把握した。

(2) スロッシング波形の画像計測

高速ビデオカメラを用いてスロッシング波形を 0.01 秒間隔で撮影し、画像処理により輪郭の形状計測を行った。波高計との比較により精度を確認し、複雑な自由液面形状を約 2mm の分解能で把握した。溢水挙動を詳細に解明するツールとして利用可能であることを確認した。

(3) 数値シミュレーション解析

著者らが開発した VOF 法に基づくスロッシング解析コードを用いて試験シミュレーション解析を実施した。波高および動水圧の時刻歴波形は試験結果と良く一致し、また、液面形状も画像計測結果と一致した。溢水による水位低下量に関しては 10%以内の精度で評価できた。この結果、非線形スロッシング評価にあたっては本解析コードを用いた数値シミュレーションが有効な手段となり得ることが示された。今後は浮き屋根付きタンクの流体構造連成解析について検討する予定である。

参考文献

- 1) 危険物保安技術協会：特集：日本海中部地震，KHK だより，第 2 号，1984
- 2) 工藤一嘉：深い地盤による長周期地震動の卓越－1983 年日本海中部地震による新潟での石油溢流，長周期地震動強さの地域性に関連して－，日本建築学会第 1 2 回地盤震動シンポジウム，pp.47～56，1984
- 3) 畑山健・座間信作・西春樹・山田實・廣川幹浩・井上涼介：2003 年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害，地震、第 57 巻、第 2 号、2004 年 12 月
- 4) 屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書、危険物保安技術協会、2005 年 1 月
- 5) 危険物の規制に関する規則の一部を改正する省令等の施行について、消防庁、消防危第 14 号、2005 年 1 月
- 6) Miles, J. W., Ring Damping of Free Surface Oscillations in Circular Tank, Journal of Applied Mechanics, Vol.25, No.2, pp.274-276, 1956
- 7) Hirt, C. and Nichols, B.D: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, Jour. of Computational Physics 39, 201-225, 1981
- 8) Patankar, S.V. : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Numerical Heat Transfer ,Vol.2 , McGraw-Hill, New York., 1979

(2006 年 9 月 11 日受付)