

正方形断面容器のスロッシング現象に関する数値流体解析

八戸高専 正会員 丸岡 晃 八戸高専(研究当時) 小山内 功宇太
八戸高専(研究当時) 橘 亜紀穂 中央大学 正会員 平野 廣和

1. はじめに

東日本大震災では、東北電力女川原子力発電所内の使用済み核燃料プールにおいて溢流事故が発生した。また、水道水用の大型ステンレス製またはFRP製パネルタンクの破損被害も報告されている。これらの事例から貯水槽内の流体の挙動を把握し、スロッシング現象の対策をすることが求められている。これに対し、遠田ら¹⁾は、正方形断面容器の加振方向角を変えて加振させた場合の液面揺動の変化を観察する実験を行っている。さらにその実験をもとに曾根ら²⁾はスロッシング制振対策の検討を行い、容器内に十字型に配置した制振装置を導入することによって、加振方向角の変化に関わらず制振効果が得られることを確認している。一方、数値流体解析によって様々な流体現象を解明する研究が注目されている。数値流体解析は実験と比較して迅速かつ安全であり、コスト面でも有利である。さらに実験では観測することが難しい詳細な動きを再現し可視化することができる。本研究では遠田らの実験データをもとに正方形断面容器におけるスロッシング現象を非圧縮性粘性流れによる数値流体解析を行い、本問題における数値流体解析の有効性を検討する。

2. 解析手法

流れ場は非圧縮性粘性流れを仮定し、基礎方程式には、ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 記述³⁾に基づく3次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いる。空間方向の離散化には、四面体1次要素による安定化有限要素法⁴⁾、時間方向の離散化には、一般化 α 法⁵⁾を用いる。境界条件は、壁面上でスリップ条件を与え、自由表面上では、力学的条件として表面張力の影響を微小であると仮定したトラクションフリー条件を与える。また、自由表面位置の決定は、運動学的条件に従うように節点を鉛直方向のみに移動させる⁶⁾。ALE 法における解析領域内の節点位置の移動は、節点変位量を未知関数とする Laplace 方程式を解くことにより求める。

3. 解析条件

図-1 示すような遠田らの実験と同スケールの解析領域を用い、有限要素メッシュを作成した。メッシュの総節点数は 8560、総要素数は 37311 である。

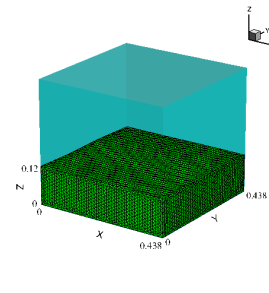


図-1 解析領域および有限要素メッシュ

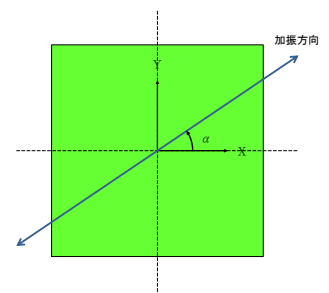


図-2 加振方向角の設定方法

正方形断面容器では、各辺のスロッシング固有振動数が等しくなる。このため、正方形断面容器の加振方向角を変えて強制振動させた場合も液面揺動がどのように変化するか評価する必要がある。本研究では正方形断面容器を強制振動する方向を図-2のように定義し、 $\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$ の間に 5° 間隔で強制振動させる。なお、遠田らの実験では正方形断面容器を角度を変えて振動台に載せて強制変位振動させているが、本研究では容器を固定し等価の加速度を角度を変えて解析を行っている。

強制振動の条件も遠田らの実験と同様であり、表-1のように設定している。ここで、変位振幅は遠田らによる実験の値であり、本研究では等価の加速度振幅を与えている。また、微小時間増分量は $\Delta t = 1/300\text{s}$ とし、 $t=50\text{s}$ (15000 ステップ) まで計算している。 $t \leq 5\text{s}$ (1500 ステップ) は強制振動であり、 $5\text{s} < t \leq 50\text{s}$ は加速度を与えない自由振動である。

表-1 振動の設定条件

	1次モード	2次モード
振動数 [Hz]	1.1	2.3
変位振幅 [mm]	3	3
加速度振幅 [mm/s ²]	143.307	626.522
加振時間 [s]	5	5

4. 解析結果

(1) 最大波高時のメッシュ変形

最大波高時のメッシュ変形を図-3 に示す。1次モードの場合、角度が変わるに伴い、波の進行距離が長くなるため $\alpha = 0^\circ$ より $\alpha = 45^\circ$ の方が波高が大きくなる。また、2次モードの場合、角度がつくと、不規則な波面形状を示す。

キーワード: スロッシング, 貯水槽, 数値流体解析, 有限要素法, Navier-Stokes

連絡先: 〒 039-1192 青森県八戸市大字田面木字上野平 16-1, TEL:0178-27-7304, FAX:0178-27-7316

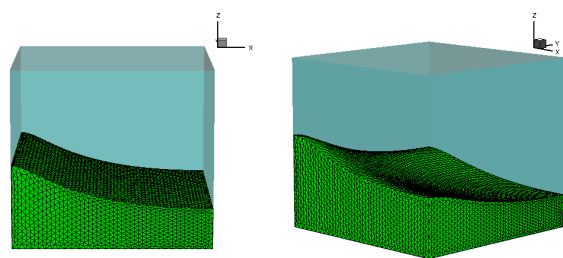
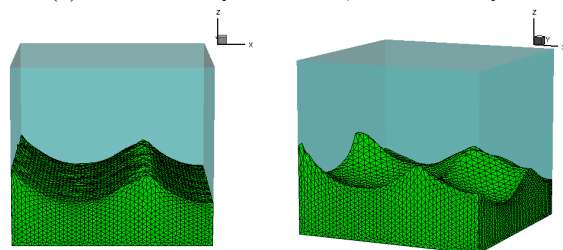
(a) 1次モード (左: $\alpha = 0^\circ$, 右: $\alpha = 45^\circ$)(b) 2次モード (左: $\alpha = 0^\circ$, 右: $\alpha = 25^\circ$)

図-3 最大波高時のメッシュ変形

(2) 加振方向角と最大波高の関係

加振方向角と最大波高の関係を図-4に示す．実験では $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$ まで実験を行っていたが，数値流体解析では正方形断面のため値が $\alpha = 45^\circ$ で対称になると考え， 45° までの解析を行った．加振方向角を変化にともなって最大波高は大きくなっていき， $\alpha = 45^\circ$ で最大となることが確認できる．数値流体解析によって，ほぼ同様の傾向を捉えられたといえる．

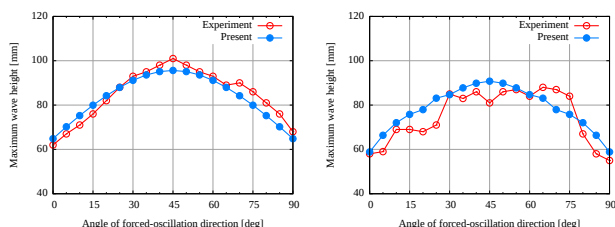
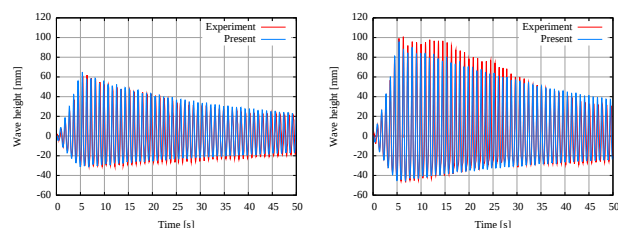
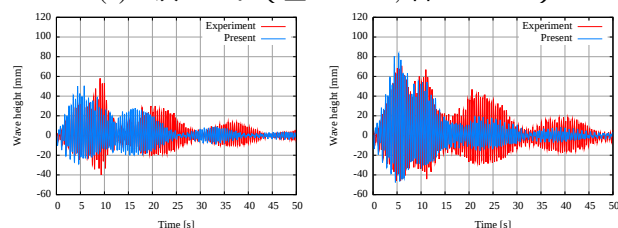


図-4 加振方向角と最大波高の関係 (左: 1次, 右: 2次)

(3) 波高の時刻歴

1次モードと2次モードそれぞれの波高の時刻歴を図-5に示す．1次モードは実験では自由振動で最大波高を示し，その後ほぼ一様な減衰をしており，数値流体解析では多少減衰量が小さいが，同様の減衰の仕方がみられる．このことから1次モードの計算の精度が良好であったといえる．2次モードは実験では自由振動に移行してしばらくしてから最大波高となる場合がみられたが，数値流体解析では強制振動終了直前後に最大波高となっている．自由振動時には一定の減衰を示さず，うなりを生じていることが確認できる．2次モードの場合に $\alpha = 0^\circ$ でもうなりを生じているのは固

有振動数の理論値と自由振動の固有振動数に微妙なずれがあるためと考えられる．

(a) 1次モード (左: $\alpha = 0^\circ$, 右: $\alpha = 45^\circ$)(b) 2次モード (左: $\alpha = 0^\circ$, 右: $\alpha = 25^\circ$)図-5 波高の時刻歴 ($t \leq 5$ s: 強制振動, $t > 5$ s: 自由振動)

5. おわりに

本研究ではスロッシング現象による流体の挙動を把握する一環として，遠田らの実験をもとに正方形断面容器の数値流体解析を行った．その結果，1次モードでは実験との最大波高，強制振動から自由振動の波高の時刻歴を比較するとほぼ同じ動きを得ることができ，精度として良好な結果といえる．また，2次モードの強制加振後は一定の減衰を示さず，うなりを生じていることが確認できる．以上により，本問題における数値流体解析の有用性を示すことができたといえる．

謝辞: 本研究はJSPS 科研費 15K06200, 25289140 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 遠田 豊, 井田 剛史, 平野 廣和, 佐藤 尚次, 矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 68(2), pp. I.637-I.644, 2012.
- 2) 曾根 龍太, 小野 泰介, 井田 剛史, 平野 廣和, 佐藤 尚次, 矩形断面貯水槽におけるスロッシング制振対策の検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol. 69(2), pp. I.833-I.843, 2013.
- 3) C.W. Hirt, A.A. Amsden, and J.L. Cook, An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds, Journal of Computational Physics, Vol. 14, pp. 227-253, 1974.
- 4) T.E. Tezduyar, Stabilized Finite Element Formulations for Incompressible Flow Computations, Advances in Applied Mechanics, Vol. 28, pp. 1-44, 1991.
- 5) K.E. Jansen, C.H. Whiting, and G.M. Hulbert, A generalized- α method for integrating the filtered Navier-Stokes equations with a stabilized finite element method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 190, pp. 305-319, 2000.
- 6) 桜庭 雅明, 田中 聖三, 玉城 宏幸, 櫻山 和男, 大規模自由表面流れ解析のための ALE 並列有限要素法, 応用力学論文集, Vol. 2, pp. 233-240, 1999.