

# メッシュ形状を改善したスロッシング解析の影響検討

解析技術部 下保亮太

## 1. はじめに

燃料タンクや貯水槽に地震動などの外力が働き、地震動の卓越周期と内容液の固有周期が共振することで液面に激しい揺れが生じ、内容液の漏出や浮き屋根など構造物の破壊が起きることをスロッシング現象という。日本での主な事例としては、1964年の新潟地震や、2003年の十勝沖地震において石油タンクの浮き屋根が損傷・沈没したことにより内容液に引火し、火災が発生した例などが挙げられる。本稿では、円筒形のタンクを3次元モデル化し標準加速度波形2波を適用した場合のスロッシング解析を行い、スロッシング検討の際に実務において一般的に用いられる固有周期・液面上昇量の算定式である速度ポテンシャル理論による計算結果との比較を行う。

## 2. 速度ポテンシャル理論による算定

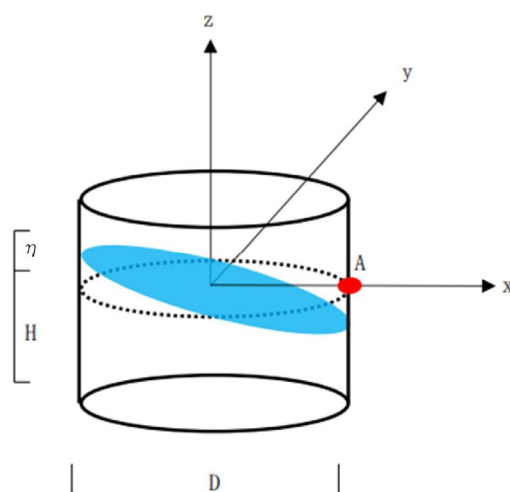
速度ポテンシャル理論の算定式を図1に示す。算定式は1次モード時のものとする。これは、スロッシング現象が主に長周期での共振において影響が大きいため、1次モードのみの応答で検討するのが一般だからである。

各寸法には、円筒タンクのモデルの例として十勝沖地震において最も被害の大きかった“30063ナフサタンク”の寸法を用いた。タンクの寸法図を図2に示す。

スロッシング固有周期の算定結果を表1に示す。スロッシング固有周期は7.21(sec)となった。

表1 速度ポテンシャル理論によるスロッシング固有周期算定結果

タンク直径 D(m)	43
タンク液高 H(m)	17.5
重力加速度 g(m/s <sup>2</sup> )	9.80665
スロッシング固有周期 Ts(s)	7.21



$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3.68g} \coth\left(\frac{3.68H}{D}\right)}$$

$$\eta = 0.837 \left(\frac{D}{2g}\right) \left(\frac{2\pi}{T_s}\right) S_v$$

- D : タンク直径 [m]
- H : タンク液高 [m]
- g : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]
- T<sub>s</sub> : スロッシング固有周期 [s]
- S<sub>v</sub> : 速度応答スペクトル [m/s]
- η : 液面上昇量 [m]

図1 速度ポテンシャル理論

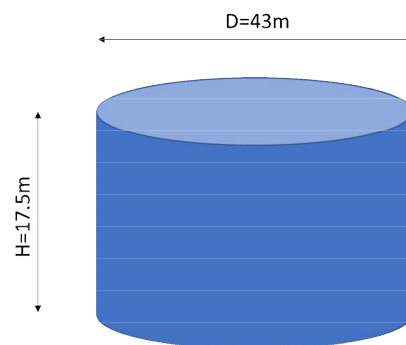


図2 タンク直径・タンク液高寸法図

速度応答スペクトルには、既往強震記録を代表する道路橋示方書V編に規定している標準加速度波形2波(神戸波, 十勝波)を適用した。使用した地震動の加速度波形を図3, 図4に示す。また, それぞれの加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトルを図5, 図6に示す。加速度のピークスペクトルでは神戸波が十勝波の2倍近くになっているが, スロッシング固有周期の7.21(sec)付近では速度スペクトルにおいて十勝波が神戸波の2倍以上となっていることがわかる。

液面上昇量の算定結果を表2に示す。短周期の神戸波より長周期の十勝波において液面上昇量が大きくなる結果となった。

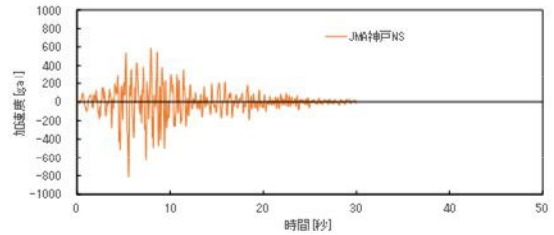


図3 道路橋示方書V編のⅡ-I-1 加速度波形(神戸波)

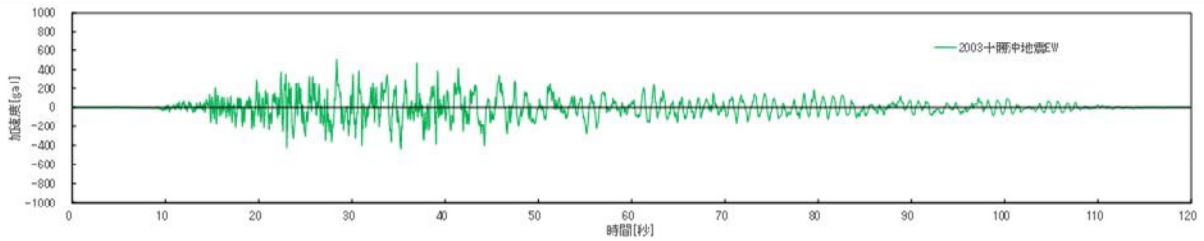


図4 道路橋示方書V編のⅠ-Ⅲ-1 加速度波形(十勝波)

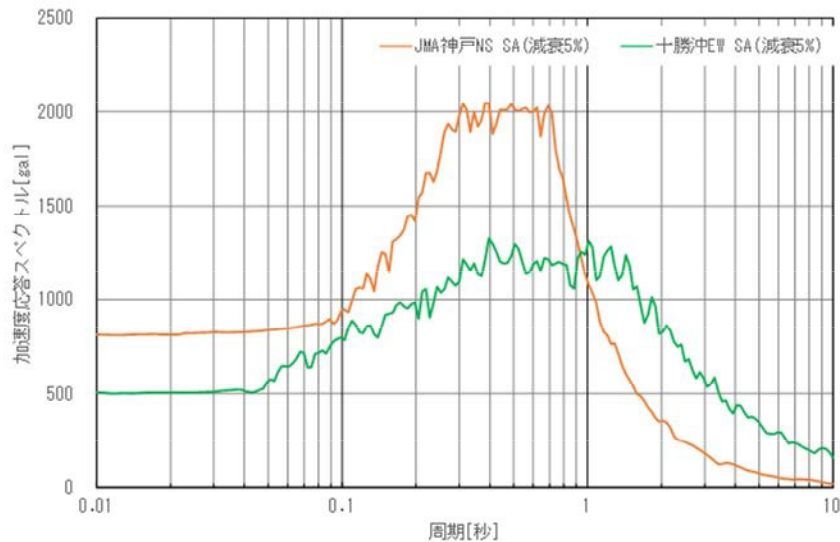


図5 加速度応答スペクトル(減衰5%)

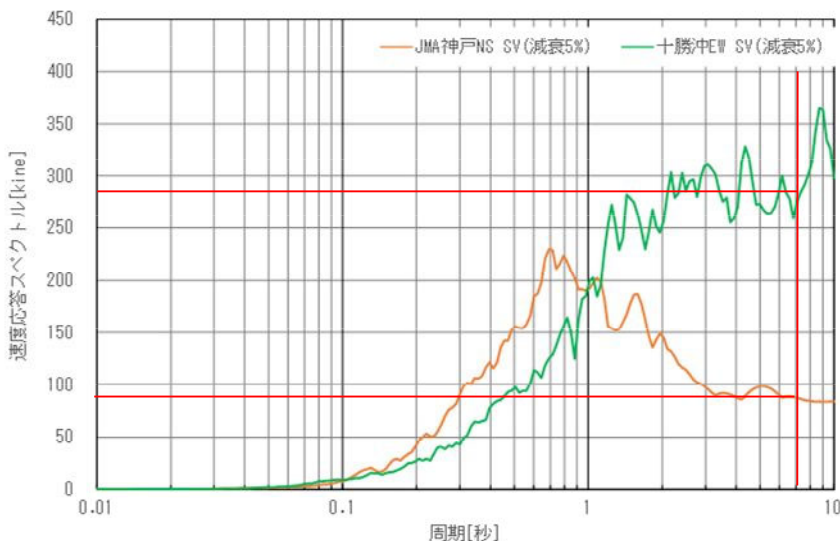


図6 速度応答スペクトル(減衰5%)

表 2 速度ポテンシャル理論による液面上昇量算定結果

地震動	Type II - I - 1 平成7年兵庫県南部地震 神戸海洋気象台地盤上 NS成分	Type I - III-1 平成15年十勝沖地震 大樹町生花観測点地盤上 EW成分
タンク直径 D(m)	43	
重力加速度 g(m/s <sup>2</sup> )	9.80665	
スロッシング固有周期 Ts(s)	7.21	
速度応答スペクトル Sv(m/s)	0.86	2.8
液面上昇量 η(m)	1.38	4.48

### 3.3 次元解析

計算プログラムには、非粘性・非圧縮液体を仮定した液体圧力を用いたオイラー法による運動方程式を用いることで液体・構造物連成問題を定式化した SoilPlus を使用する。

3次元モデルを図7に示す。各寸法・物性値は速度ポテンシャル理論による算定時と同じタンクのものを用いる。

代表的なスロッシング固有モードを図8に示す。3次元モデルでの連成解析ではスロッシング固有周期は7.06秒となり、速度ポテンシャル理論で算定した7.21秒と概ね同じ結果が得られた。

次に、解析モデル下端に速度ポテンシャル理論

算定時と同じ神戸波・十勝波をX方向に動的に入力する。解析はモード法応答解析を使用し、全てのモード次数で減衰5%を考慮した。

図9、図10に液面上昇量最大時の変形図を示す。それぞれ速度ポテンシャル理論での算定結果よりやや小さい結果となった。これは速度ポテンシャル理論がもっとも影響の大きい1次モードしか考慮していないこと、また SoilPlus ではタンクの剛性との液体連成を考慮していることが原因として考えられる。また、長周期地震動の変形図において液面中心部にアワグラス変形が見られた。これは中心部のメッシュ形状によるものと考えられる。

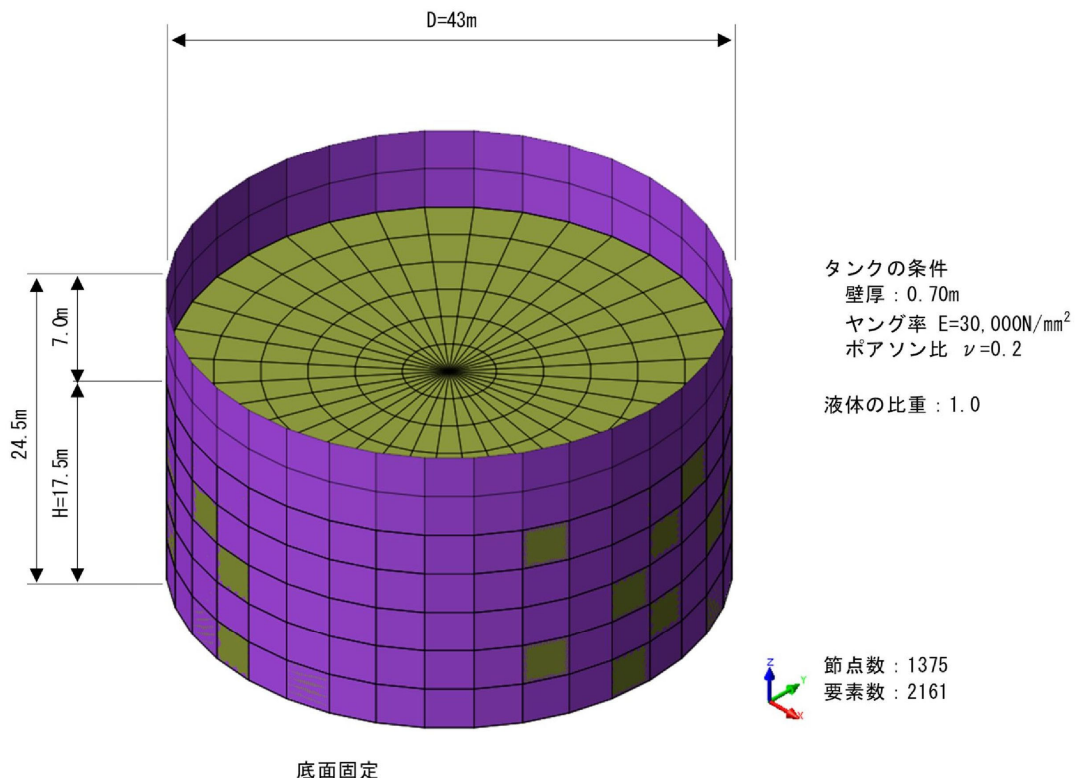


図 7 三次元解析モデル図

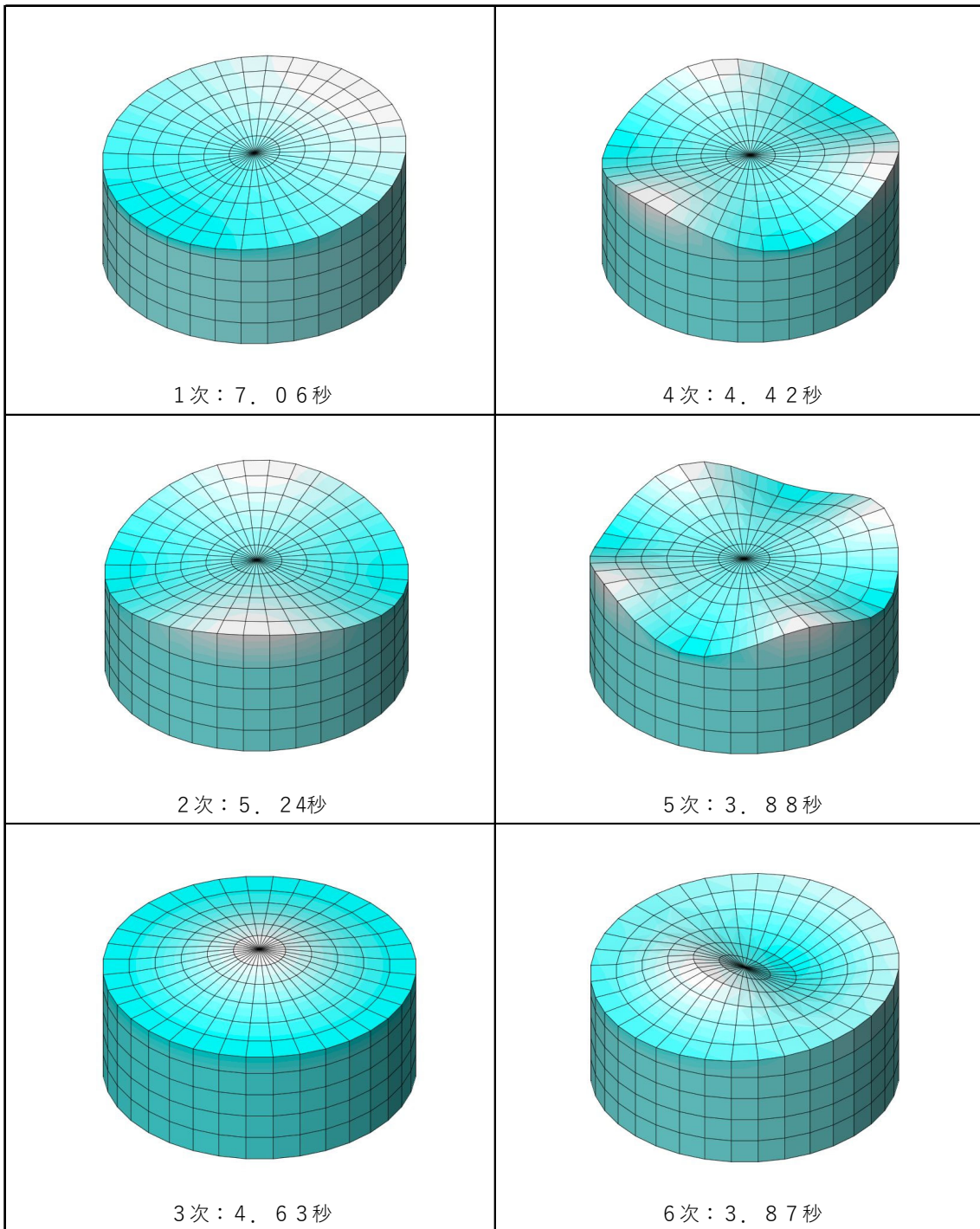


図 8 スロッシング固有モード図

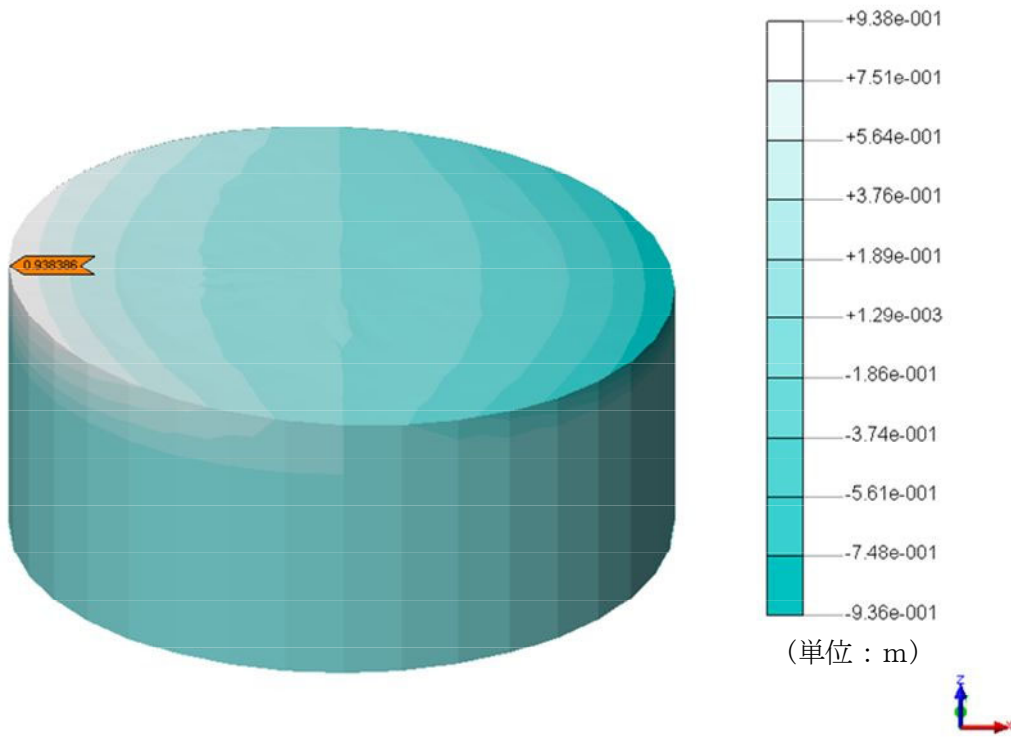


图 9 JMA 神戸 NS 波入力／液面上昇量最大時(6.40 秒) ※変形倍率:実寸×1.0

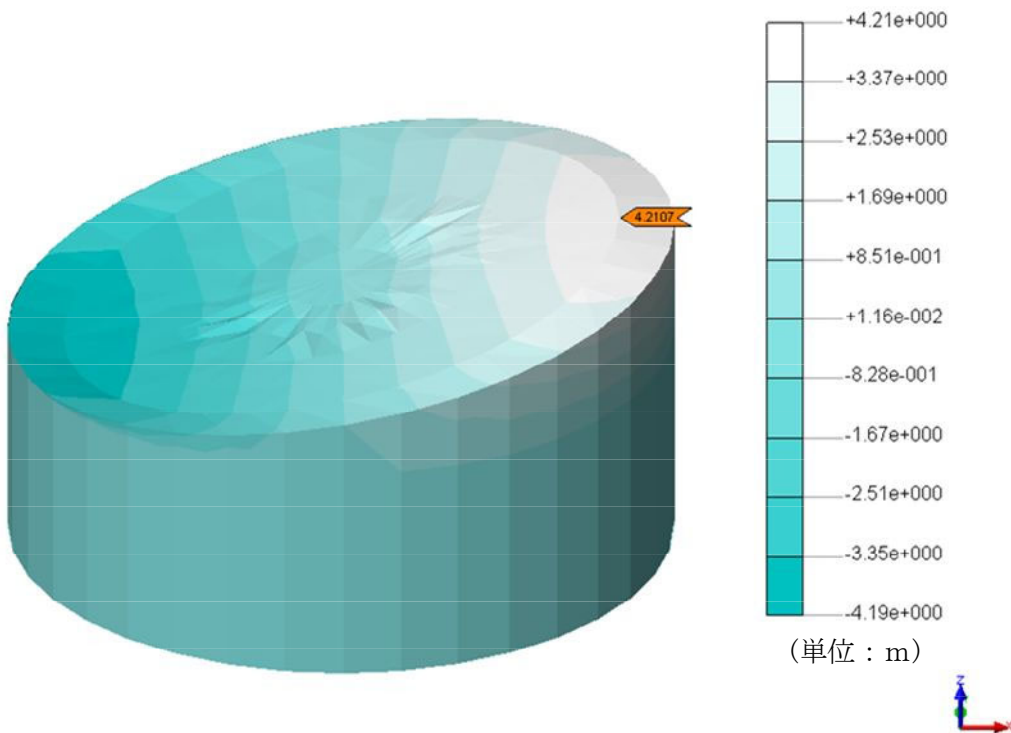


图 10 十勝沖 EW 波入力／液面上昇量最大時(45.63 秒) ※変形倍率:実寸×1.0

長周期地震動(十勝波)での時刻毎変形図を図11に示す. 液面が下がっている箇所が圧力が大きくなり壁を押し上げていることがわかる.

また, 図12に液面上昇量の時刻歴応答図を示す. 各地震動において, 加速度振幅が収束した後も数十秒にわたり液面が揺動していることがわかる.

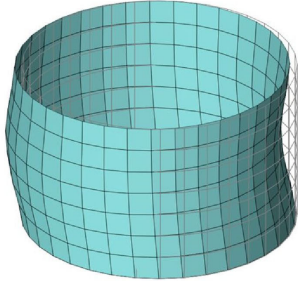
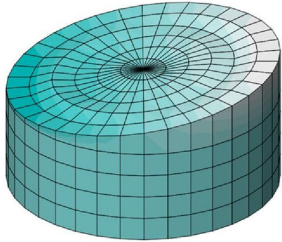
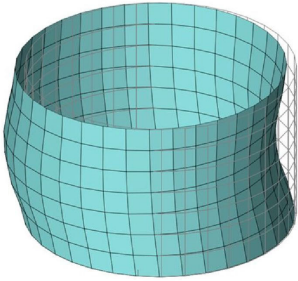
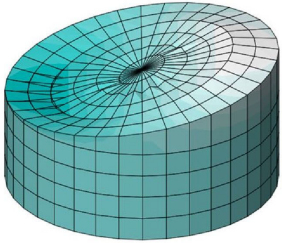
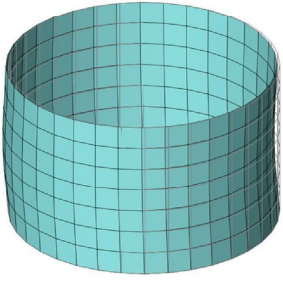
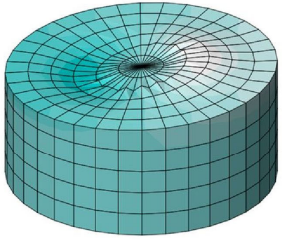
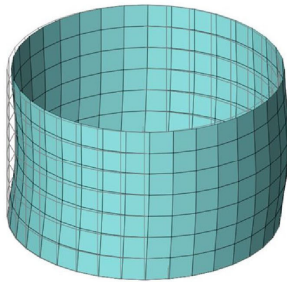
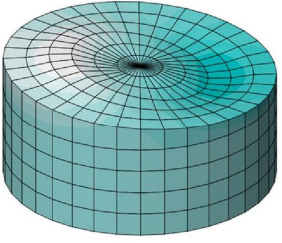
時刻	タンク変形 (倍率: 実寸×2000)	スロッシング (倍率: 実寸×1.0)
45.0 秒		
46.0 秒		
47.0 秒		
48.0 秒		

図 11 十勝沖 EW 波入力/時刻毎変形図(45 秒~48 秒)

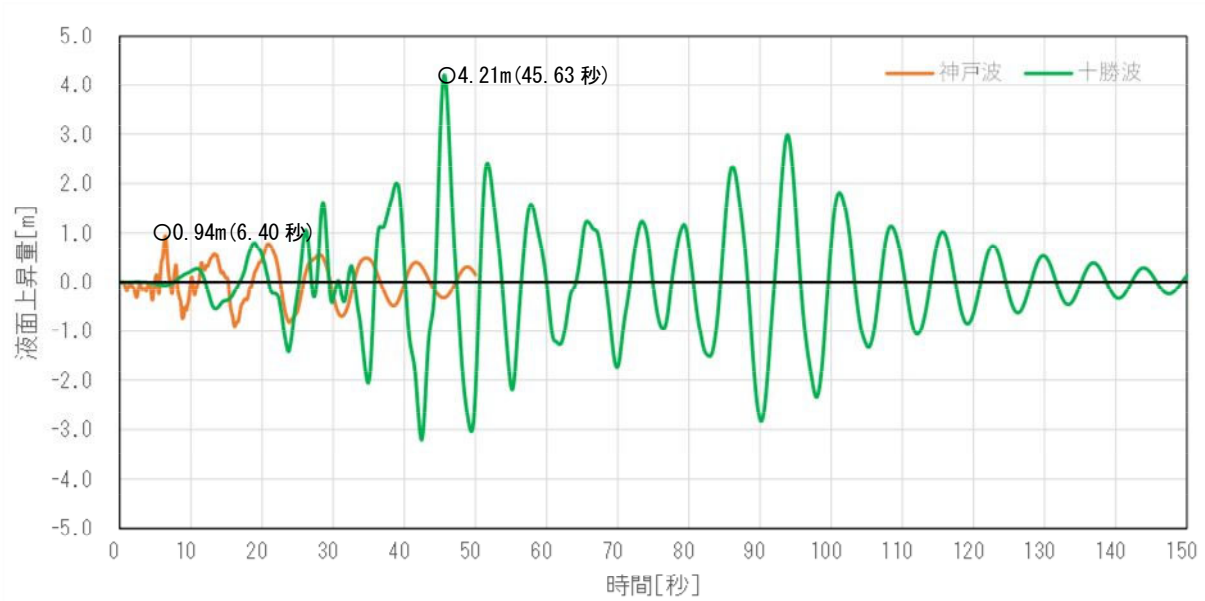


図 12 液面高時刻歴グラフ

#### 4.3 次元解析(メッシュ形状変更)

図 10 においてメッシュ形状が原因と考えられるアワグラス変形が見られたため、メッシュ形状を変更したモデルを用いて再度解析を行い結果を比較する。解析モデル図を図 13 に示す。メッシュ形状以外の諸条件は前モデルと同様に設定し解析を行う。また、地震動は比較対象である十勝波のみ入力する。

メッシュ形状変更後の固有モード図を図 14 に示す。図 8 の固有モード図と概ね一致するが、5 次モードと 6 次モードが入れ替わる結果となった。これは固有周期がわずかに 0.01 秒しか変わらないことが原因と考えられる。

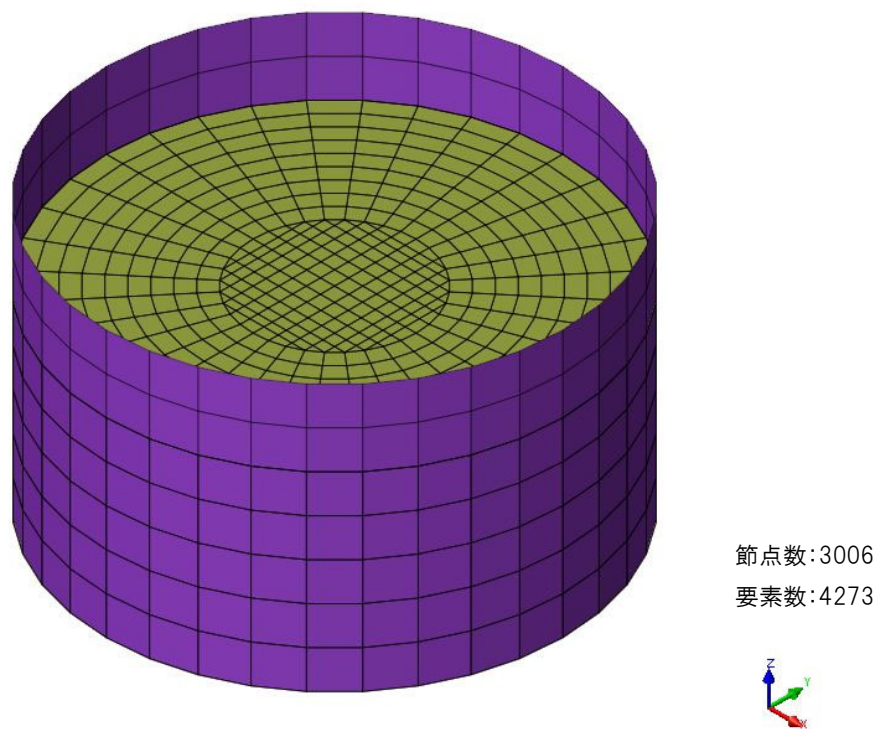


図 13 三次元解析モデル(メッシュ形状変更)

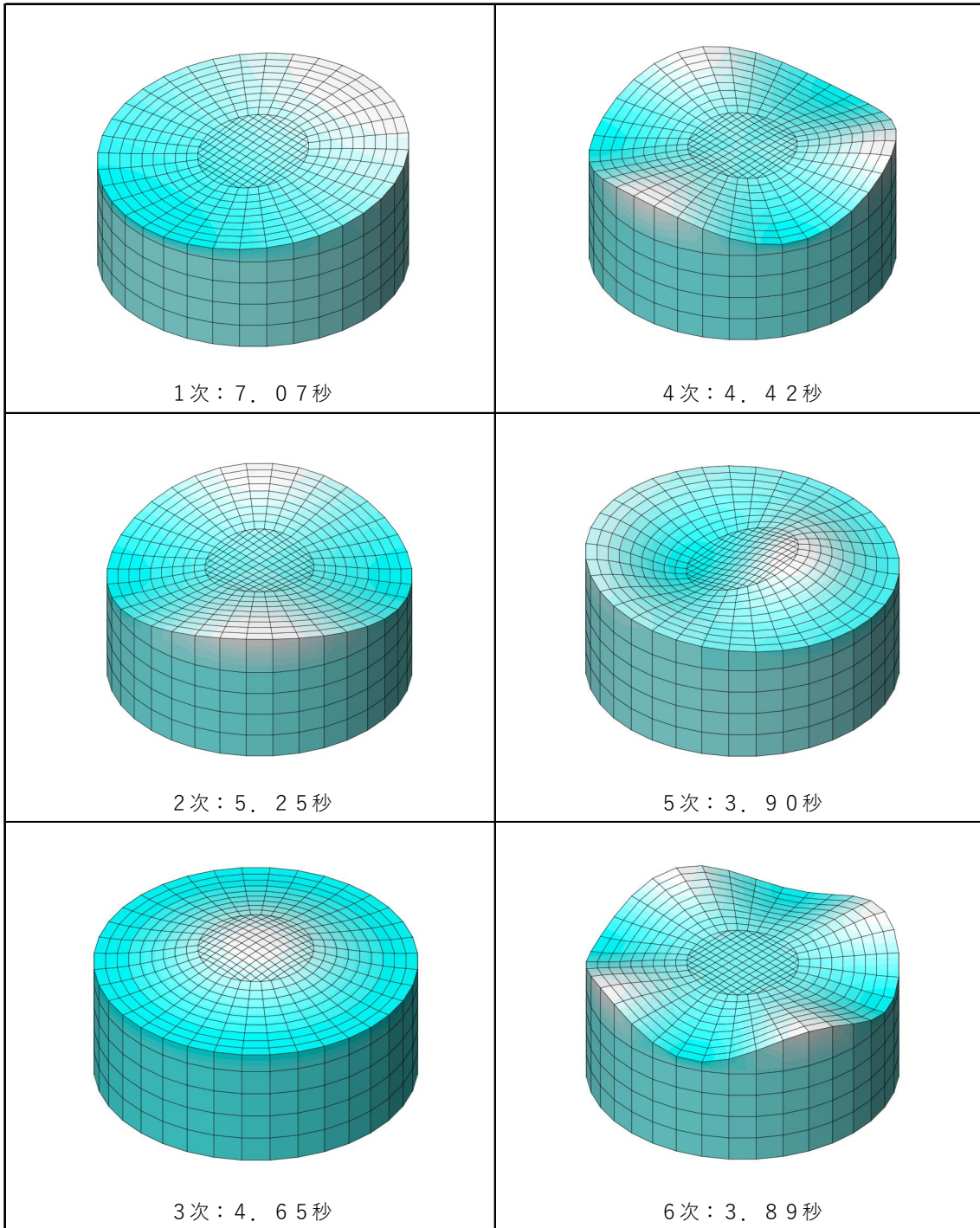


図 14 スロッシング固有モード図(メッシュ形状変更)



図 15 に液面上昇量最大時の変形図を示す。液面中心部でのアワグラス変形が抑制されたのが確認できる。また、図 16 に液面上昇量の時刻歴応答図について、メッシュ形状変更前と変更後で比較したものを示す。おおよそ一致しているが、地震動の加速度振幅が大きい 29 秒前後にて液面上昇値に差異が見られる。29 秒時点での変形図をそれぞ

れ図 17, 図 18 に示す。アワグラス変形が起きている中心部の液面上昇値を比較すると、正負が反転していることがわかる。今回は X 方向のみの加振であったが、3 方向に入力した場合などは結果が大きく異なることが予想される。

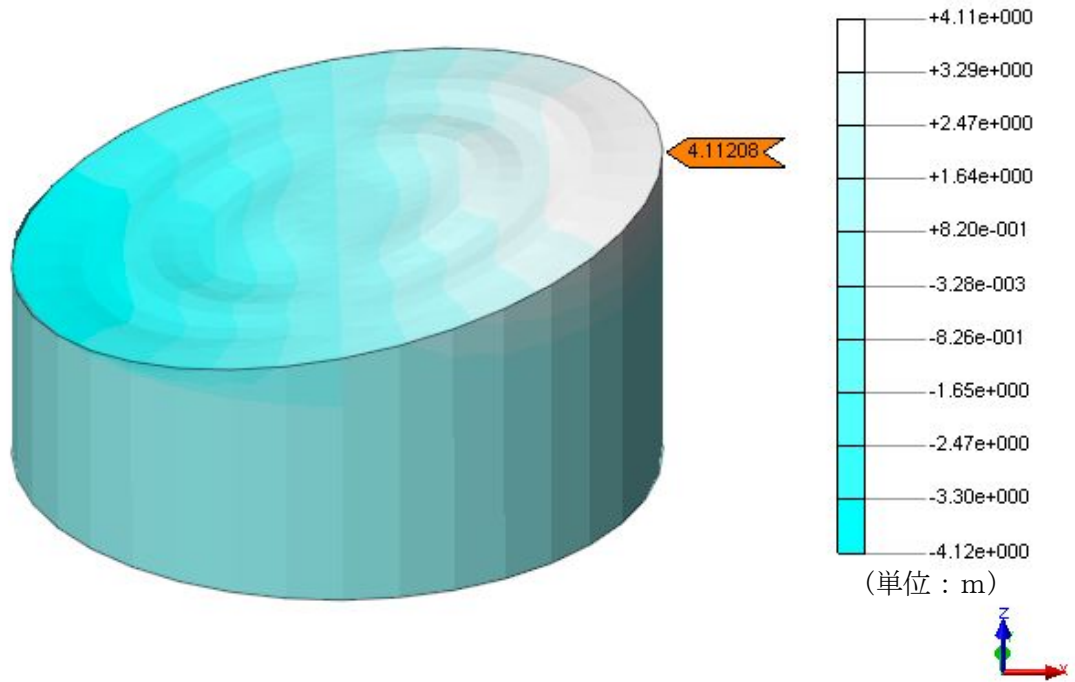


図 15 十勝沖 EW 波入力／液面上昇量最大時(45.60 秒)メッシュ形状変更  
※変形倍率:実寸×1.0

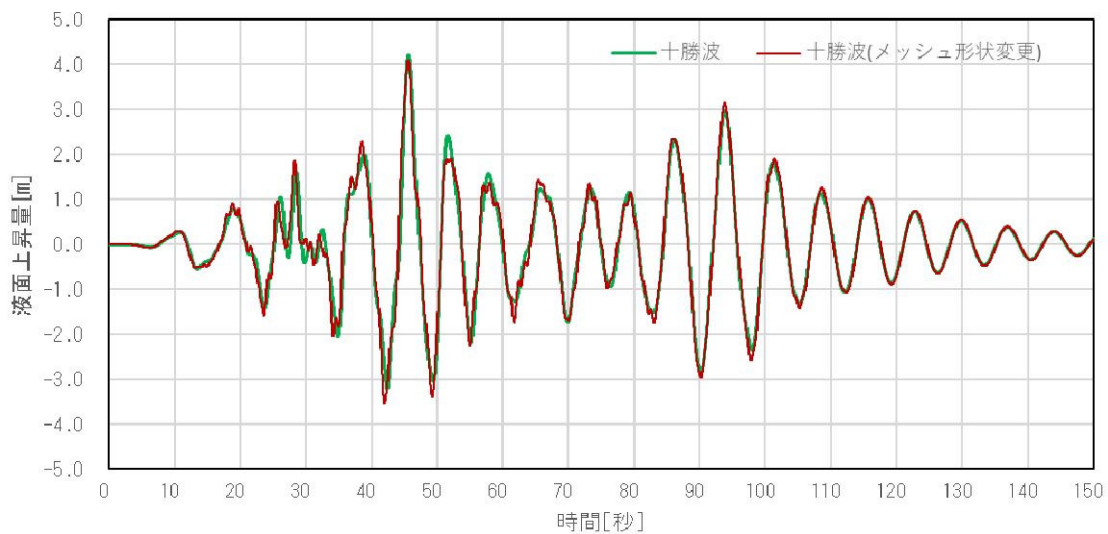


図 16 液面高時刻歴グラフ(メッシュ形状変更による比較)

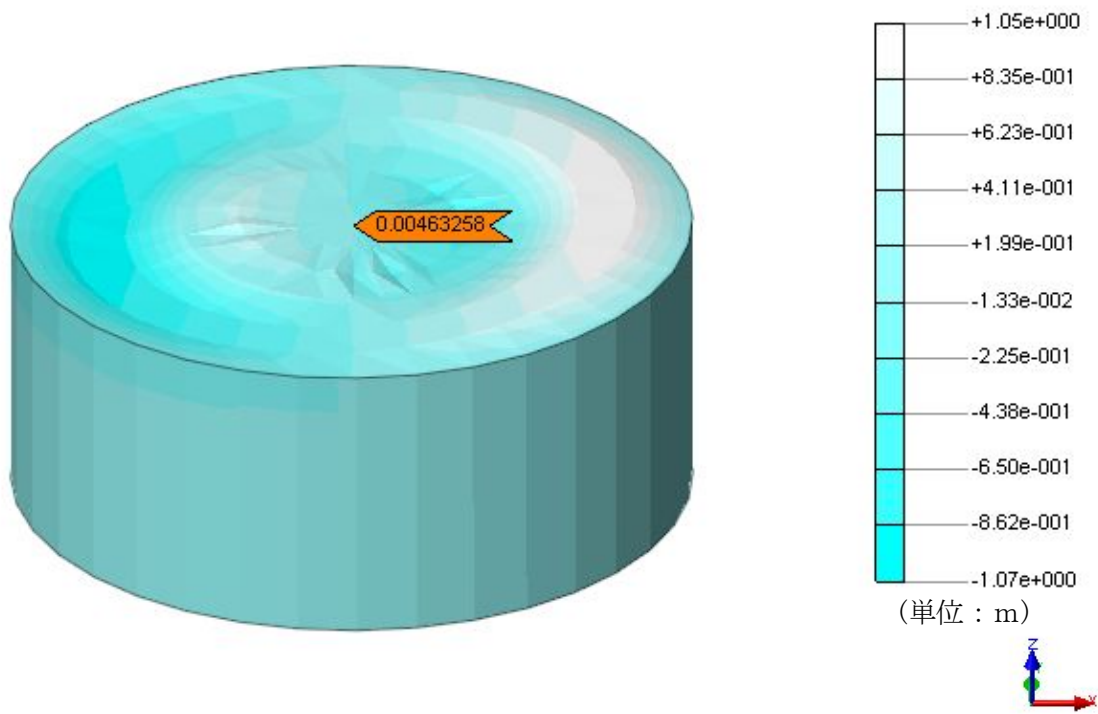


図 17 メッシュ形状変更前変形図(29.00 秒)

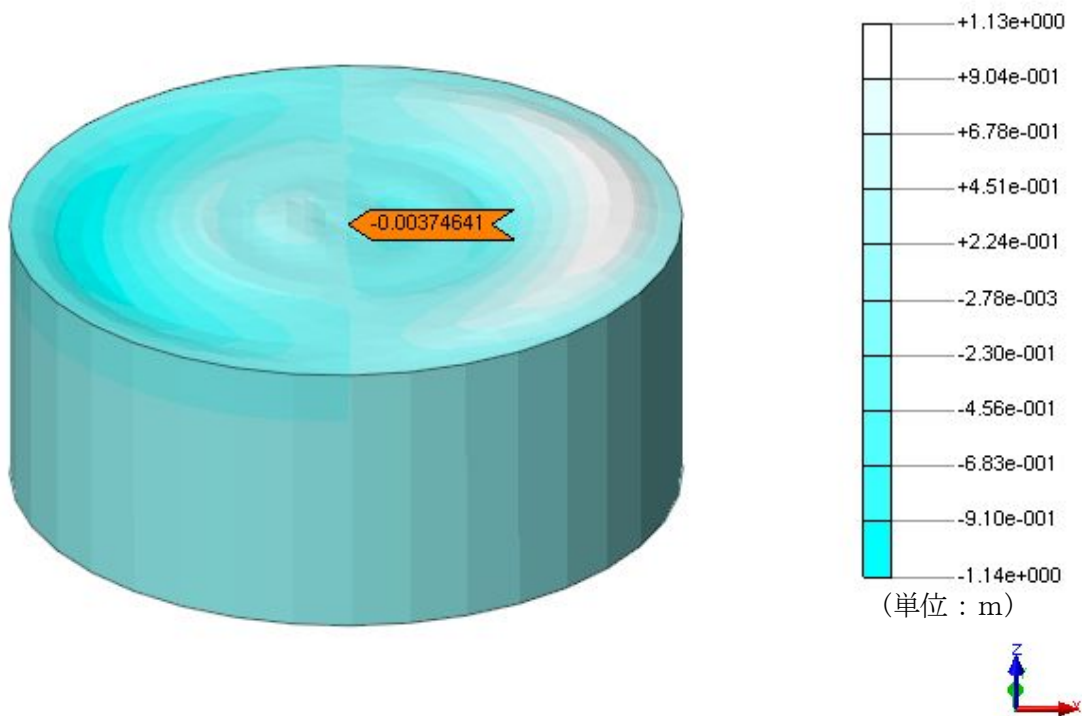


図 18 メッシュ形状変更後変形図(29.00 秒)

## 5. まとめ

各液面上昇量算出結果と実際の被害報告を表 3 に示す。1 方向での加振によるスロッシング解析について見てきたが、比較してみるとやや速度ポテンシャル理論が過大評価する傾向にあるが、おおよそ結果が一致することが確認された。また、メッシュ形状を改善したことにより変位の正負が逆転するような事例も見られたので、多方向入力により大きく影響が出るのか今後確認していきたい。

## 参考文献

- 1) 吉田聖一：円筒タンクのスロッシング応答の速度ポテンシャル理論, JHPI Vol. 52 No. 3 2014
- 2) 危険物保安技術協会：平成 15 年十勝沖地震危険物施設の被害記録 平成 16 年 12 月

表 3 各液面上昇量算定結果

地震動	十勝波 液面上昇量 $\eta$ (m)
速度ポテンシャル理論	4.48
3Dスロッシング解析	4.21
3Dスロッシング解析(メッシュ変更)	4.11
実際の被害報告	3.00