

## 小型アクリル製円筒形タンクにおける振動実験と数値流体解析の比較

○中央大学 学生員 藤井 智大 中央大学 正会員 平野 廣和  
 中央大学 学生員 後藤 大輔 中央大学 正会員 佐藤 尚次

### 1. はじめに

我国では、やや長周期地震動により励起されるスロッシング現象などの液面揺動により、石油タンクから内容液が溢流し火災などの大きな被害が発生しており、これらの原因の究明が希求されている。この方法として振動実験が挙げられるが、コストと時間、相似則等の問題を有している。一方、数値流体解析は前述の問題を解決できる有効な一つの手段である。そこで、本研究では、小型モデルで同一条件の基、振動実験と数値流体解析の結果の比較を行うことで大型構造物の挙動解明での信頼性向上の検討を行う。

具体的には、小型アクリル製円筒形タンクを用いて線形ポテンシャル理論式から算出した入力振動数で振動実験を行う。これより応答波高、液面挙動の観測から円筒形タンク内容液におけるスロッシングやタンク中心で発生する鉛直軸回りの回転運動<sup>1)</sup>(以下、スワーリング)等を確認する。次に、数値流体解析から液面挙動の把握を行い、実験結果と比較して、非線形性を有している液面挙動の再現性の確認を行う。

### 2. 振動実験

#### (1) 実験概要

振動実験は、中央大学所有の小型振動台を用い、この振動台に写真-1に示す内径 600mm×高さ 500mm の小型アクリル製円筒形タンク(以下、タンク)を設置し、水深 300mm まで注水する。ここで、1次、2次モードの正弦波で振動実験を行い、応答波高を計測する。

応答波高の計測は、(株)KEYENCE社製のIL-600レーザー変位計(以下、変位計)を使用する。この変位計は、図-1のように加振方向(以下、地点1)と加振方向に対して直交方向(以下、地点2)に2つ設置する。また、変位計を2つ使用することで、計測された応答波高のビート挙動の位相差から、タンク内容液でスワーリングの発生を確認する。さらに、タンク内容液の挙動を確認するため、図-1に示すように、ビデオカメラを加振方向に対して直交方向に設置して撮影を行う。

ところで、入力振動数と円筒形タンクのスロッシング固有振動数が一致して共振した場合、応答波高が最も大きくなる。円筒形タンクのn次モード振動数は以下の線形ポテンシャル理論式であるHousnerの式(1)を用いる。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1)g}{R} \cdot 1.814 \cdot \tanh\left(\frac{1.814 \cdot H}{R}\right)} \quad (1)$$

ここで、Rは円筒形タンク内の半径、Hは円筒形タンクの水深を表している。表-1に、タンクの諸条件を示す。

本研究において、水深は300mmという同一条件のもと振動実験、数値流体解析を行うので、式(1)より円筒形タンクのスロッシング固有振動数の理論値は、1次モードで1.2Hz、2次モードで2.1Hzと算出され、これを入力振動数とする。また、加振振幅は±3mmとし、入力



写真-1 実験タンク

表-1 円筒形タンク諸条件

材質	アクリル
高さ[mm]	500
直径[mm]	600
水位[mm]	300
板厚[mm]	10
ヤング率[N/m <sup>2</sup> ]	3.14E+09
ポアソン比	0.3

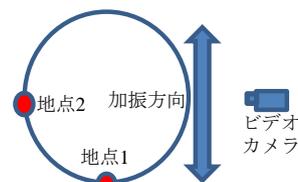
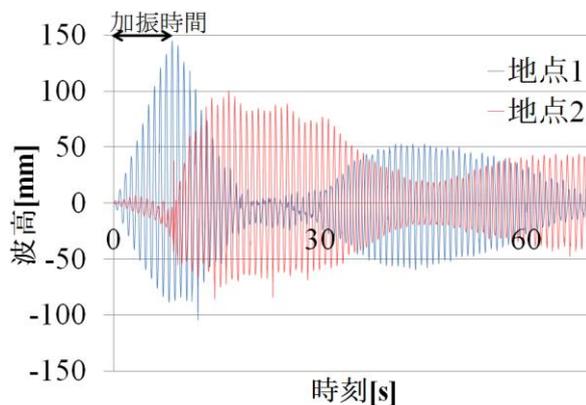


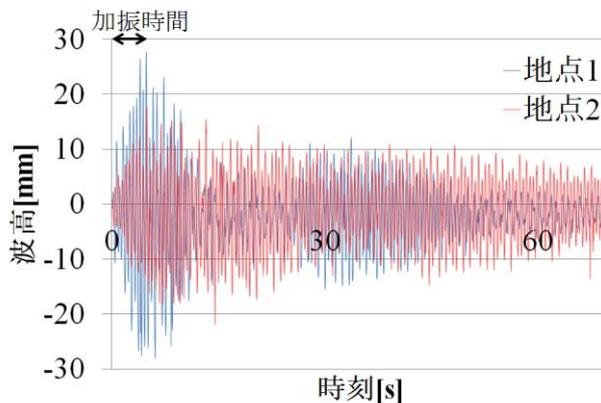
図-1 計測機器設置位置

表-2 加振条件

	1次	2次
入力振動数[Hz]	1.2	2.1
水深[mm]	300	
振幅[mm]	3	
入力波数	10	



(a)1 次モード



(b)2 次モード

図-2 実験時の応答波高

波数は1次モード、2次モードともに10波の正弦波加振を行う。以上の加振条件を表-2に示す。

#### (2) 実験結果

実験タンクにおいて、1次、2次モードで振動実験を行った場合の地点1、地点2でのそれぞれの応答波高を図-2に示す。また、最大波高は表-3に示すように、1

キーワード: 円筒形タンク, 実験, 数値解析, スロッシング, スワーリング

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-1803

次モードで振動実験を行った場合、地点1で145mm、地点2で100mmであり、2次モードで振動実験を行った場合、地点1では28mm、地点2では18mmである。

1次モードの図-2(a)に着目すると、加振開始から徐々に波高が増大し、加振終了後には波高が徐々に減衰していることから、タンク内容液の共振によりスロッシングが増大していることがわかる。さらに、地点1と地点2はそれぞれビート挙動が発生し、地点1から地点2、地点2から地点1と順にビート挙動が移動していることがわかる。このことから地点1と地点2間でのビート挙動の位相差を確認することができる。この位相差と実験映像から、タンクに1次モードで振動実験を行った場合、タンク中心軸の反時計回りにスワーリングが顕著に発生していることが確認できる。地点1の応答波高から算出した減衰定数は0.0025である。

一方、2次モードの図-2(b)に着目すると、1次モード同様にスロッシングの発生は確認できる。また、地点1ではビート挙動の発生が確認できるが、地点2では確認できないことから、スワーリングがほとんど発生していない。これは、タンクに2次モードで振動実験を行うと1次モードと比べて液面が碎波しやすくなり、応答波高の増幅率が低いことが原因であると考えられる。1次モードと同様に算出した減衰定数は0.0018である。

### 3. 数値流体解析

#### (1) 解析概要

数値流体解析は、有限要素法による非線形汎用解析ソフトADINAを用い、実験と同様の円筒形タンクモデルとし、諸条件は表-1と同様である。また、図-3は解析に用いる円筒形タンクモデルである。

本解析では、水をポテンシャルベース流体要素<sup>2)</sup>とすることで、計算時間を短縮し、かつ解析の過程で生じる人工粘性の影響を避けている。境界条件は、タンク下部を固定し、流体の水面は自由水面とする。また、メッシュを作成する際はタンクと流体との接点結合を行わないことにより、滑らかにスロッシングが発生するようにする。入力振動数は、振動実験に用いたものと同様の値で行う。タンクのメッシュ分割はタンクを要素数5000、1要素あたりの接点数20の放射状メッシュ分割したものをを用いる。

以上の条件で、固有振動数解析を行う。ここで、振動実験と液面モード及び液面の挙動を比較することで数値流体解析の再現性の確認を行う。

#### (2) 固有振動数解析

固有振動数解析の結果、1次、2次固有振動数はそれぞれ1.20Hz、2.12Hzである。また、固有振動数の理論値は、1次、2次固有振動数はそれぞれ1.20Hz、2.10Hzである。これより、本解析結果は理論値と一致をみることができた。これは、実験で使用したタンクがアクリル製で十分な剛性を有していたことで、タンク側壁等の非線形性の影響を受けにくかったと考えられる。

#### (3) 液面挙動

図-4に数値流体解析より得られた、1次、2次モードでの液面挙動を示す。また写真-2には、振動実験で得られた、1次、2次の液面挙動を示す。これらの結果から両者ともに液面の挙動はほぼ一致し、さらに、各モードともに数値流体解析による再現性が確認できた。

表-3 最大波高[mm]

	地点1	地点2
1次モード	145	100
2次モード	28	18

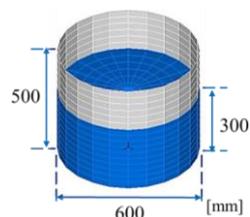
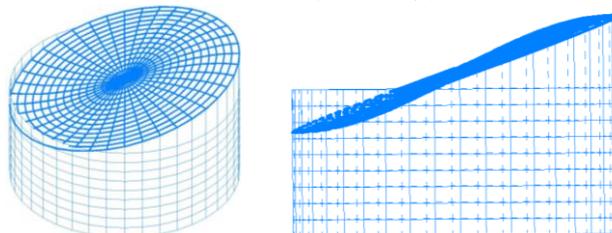
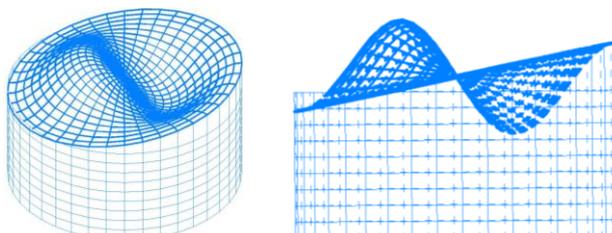


図-3 円筒形タンクモデル



(a) 1次モード



(b) 2次モード

図-4 数値流体解析での液面挙動



(a) 1次モード

(b) 2次モード

写真-2 振動実験での液面揺動

なお、数値流体解析では静止時の波高の値の算出のみならず3次元アニメーションで結果を表現することができ、液面挙動の状況がわかりやすい。

### 4. おわりに

本研究では、スロッシング現象を初めとするやや長周期地震動で励起される液面揺動の解明の一つの方法として、振動実験と数値流体解析の両面から同一モデルでの検討を実施してきた。まず、振動実験では応答波高、液面挙動の観測から1次モードではスロッシング現象および同減衰時に生じるスワーリングの発生が確認できた。一方、数値流体解析では、線形ポテンシャル式で求めた固有振動数の理論値とほぼ一致した。また、振動実験の写真と数値流体解析結果の画像比較すると、1次、2次モードともに水面付近で液面揺動が発生しており、液面モード及び液面の挙動で同様な液面挙動を確認することができ、スロッシングを確認できたが、スワーリングはみられなかった。

今後は、非線形性再現性の向上を行っていく。

#### 参考文献

- 1) 荒井 他:立方体および円筒タンクのスロッシングとスワーリングの数値解析, 関西造船協会誌 第219号, 1993.
- 2) 平野 他:浮屋根式タンクのスロッシング時の挙動把握のための流れと構造の連成解析, 構造工学論文集, 2007.