

## SPH法を用いた円筒タンクにおけるスロッシング解析

### Sloshing analysis in a cylindrical tank using the SPH method

○横川健悠<sup>1</sup>, 寺田拓海<sup>2</sup>, 恵藤浩朗<sup>3</sup>

\* Kenyu Yokokawa<sup>1</sup>, Takumi Terada<sup>2</sup>, Hiroaki Eto<sup>3</sup>

Abstract: Sloshing and swirling occur in the fluid inside a cylindrical tank, and clarifying the effects of the viscosity coefficient on liquid surface oscillations has been identified as a future challenge. Therefore, in this study, an analysis considering the viscosity coefficient of the fluid was conducted. As a result, while the model was subjected to external excitation, the present analysis generally agreed with existing results, and it was further shown that the viscosity coefficient has a significant impact on the analysis outcomes.

#### 1. はじめに

大型円筒タンクにおいては、地震等の外力が加わることによって、タンク内の流体が揺れるスロッシング現象が生じる。また、スロッシング現象に加えてオバリング現象と呼ばれる外壁の弾性振動が液面挙動に影響を及ぼすことが指摘されている。既存研究として、Khaら<sup>[1]</sup>は粘性定数による液面動揺への影響に関する解析が今後の課題とされている。そこで本研究では、オバリング現象や構造部材への動的負荷を扱うことを見据え、円筒タンク（以下、タンク）を剛体と仮定し、タンク内における粘性定数を考慮した液体の振動特性を把握する目的として研究を行った。

#### 2. 研究手法

本研究では、液面動揺の数値解析手法として、粒子法の一つであるSPH法に基づくDualSPHysics ver5.2を採用した。SPH法は、大変形や飛沫の発生を伴う非線形現象に対して高い解析精度を有しており、これらの特性から、液面挙動を高精度かつ時間的効率的に良く再現する手法として適していると判断し、解析に用いた。

##### 2.1. 解析モデルおよび解析条件

Figure 1は、タンク内流体のスロッシング現象およびスワリング現象の液面動揺解析に用いた計算モデルであり、タンクの外壁を剛体とし、Table 1に示すモデルの規模が異なるCase 1および2の解析条件で、液面動揺量を評価した。

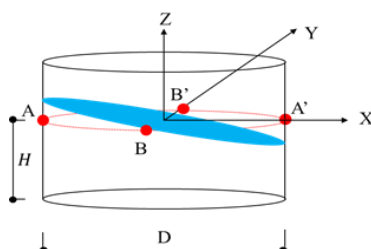


Figure 1 Cylindrical tank model

Table 1 Calculation conditions

	Symbol	Case 1	Case 2
Still water level [m]	$H$	20	0.4
Diameter [m]	$D$	80	0.4
Interparticle distance [m]	$d_p$	0.15	0.005
Excitation frequency [Hz]	$f$	0.1	0.940
Angular frequency [rad/s]	$\omega$	$0.2\pi$	$1.880\pi$
Acceleration [ $\text{cm/s}^2$ ]	$A$	$-0.154g$	$-0.178g$

ただし、 $g$  : 重力加速度 ( $9.8\text{m/s}^2$ )

加振条件に関して、Case 1ではタンクに対してX軸方向の加振を(1)式に示す式で行い、Case 2ではX軸方向の加振である(1)式に示す式に加え、Y軸方向に(2)式に示す式を入力し解析を行った。

$$a(t) = A\sin(\omega t) \quad (1)$$

$$b(t) = \begin{cases} A\sin(\pi t/6)\cos(\omega t) & 0 \leq t \leq 3 \\ 0 & 3 < t \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $t$  : 加振時間、 $a(t)$ 、 $b(t)$  : 加速度

ここで、Case 1では遠藤ら<sup>[2]</sup>の研究との比較を行った。遠藤らの解析条件と同様の条件を用い、A地点における液面動揺を本解析結果と遠藤らが出した線形ポテンシャル解、N-S方程式に基づく解析結果と比較し確認する。Case 2では中山ら<sup>[3]</sup>の研究のモデルと同様の条件を採用し、A地点およびB地点における液面動揺の比較を通じて、解析の妥当性を検証する。

また、DualSPHysicsにおける2種類の粘性処理モデルを適用し、その解析結果を比較・検討をする。1つ目は、Monaghan<sup>[4]</sup>の人口粘性モデルであり、粒子間に数値的な摩擦を付与して計算の安定化を図るものである。2つ目はラミナー粘性モデル<sup>[5]</sup>で、水の動粘性係数 $\nu=1.0 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ に基づき流体内部のせん断抵抗を再現するものである。また、Altomaraら<sup>[6]</sup>は人口粘性 $\alpha$ を0.01とすることを提案しているが、解析例の多くは $\alpha=0.05$ を用いている。

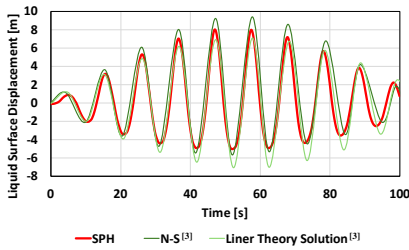


Figure 2 Liquid surface displacement (Case 1)

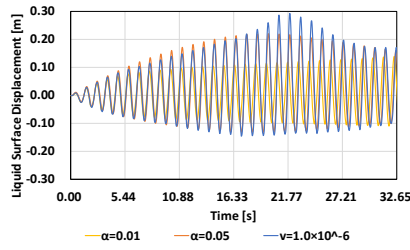


Figure 3 Liquid surface displacement at Point A (Case 2)

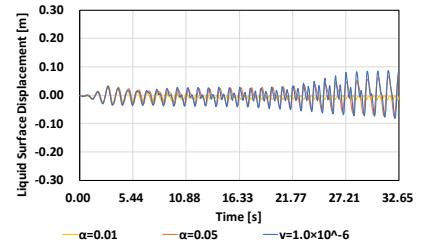


Figure 4 Liquid surface displacement at Point B (Case 2)

### 3. 解析結果および考察

#### 3.1. スロッシング現象における解析

Figure 2 に人工粘性係数 $\alpha=0.05$ で行った SPH 法による解析と線形解と N-S 方程式での 100 秒間の液面動揺量の比較の結果を示す。線形ポテンシャル解（線形解）と N-S 方程式の比較においては、周期および振幅に差異が見られ、これは、線形解が非粘性かつ線形式に基づいて仮定しているのに対し、本解析および N-S 方程式では非線形性および、流体の粘性も考慮されているためである。また、26 秒以降の各波における液面動揺量には、本解析と線形ポテンシャル解との間で顕著に差が表れている。この要因は、本解析において線形ポテンシャル解より粘性定数を大きいことから、エネルギー保持の影響が現れ、加振力が液面上昇に影響を及ぼした結果と考える。したがって、本解析における粘性定数の設定について再評価の必要があると考える。

#### 3.2. スワリング現象における解析

Figure 3 に人工粘性係数 $\alpha=0.01, 0.05$  と動粘性係数 $\nu=1.0 \times 10^{-6}$  の 3 条件における A 地点での液面動揺量の比較を示す。加振を加えている初期の 3 秒間において概ね一致した挙動が確認されたが、Y 軸方向の加振終了後より液面動揺量に差異が生じた。特に $\alpha$ を 0.01 から 0.05 と大きく設定した場合、液面動揺量の最大値が増加することを確認した。これは、Figure 1 の解析結果と同様に、粘性定数がタンク内流体のエネルギー保持を抑制し、加振力による液面動揺量が増大したためと考えられる。また、22 秒時点では、 $\alpha=0.01$  と $\nu=1.0 \times 10^{-6}$  の条件間で最大 0.18m の差異が確認された。さらに、両条件とも最大液面動揺量を示した後、時間経過とともに一波の最大液面動揺量が徐々に減少していくことが確認された。この結果から、 $\nu=1.0 \times 10^{-6}$  の条件の方が加振を加えた際に液面動揺量が増加しやすいと考えられる。

Figure 4 の結果から、人工粘性係数 $\alpha=0.01, \alpha=0.05, \nu=1.0 \times 10^{-6}$  の B 地点での液面動揺量の比較を示す。B 地点では、初期の 9 秒間において液面動揺量は概ね一致した挙動を示したが、9 秒以降から粘性係数の条件による液面動

揺量に顕著な差が現れ始めた。 $\alpha=0.01$  の場合には、9 秒以降に液面動揺量が徐々に収束する傾向が見られたのに対し、 $\alpha=0.05$  および $\nu=1.0 \times 10^{-6}$  を用いた場合は、増加傾向が強まり、特に 19 秒以降では、液面動揺量が増加していることが確認された。これらの結果は、スワリング現象により yaw 方向へ液面が回転し、液面動揺量の増加の可能性を示していると考えられる。

### 4. おわりに

本研究に使用している DualSPPhysics の解析では、モデルに振動を与えている間は本解析結果と既存の解析結果が概ね一致していることが確認された。また、粘性定数の式や値を変えることによる差が顕著に見られ、粘性定数による設定がスロッシング現象やスワリング現象の解析結果に大きく影響することを確認した。そのため、適切な手法を検討する必要があることが確認できた。今後、本研究で得られた液面動揺量の解析データをもとに液面の自由振動時での粘性定数によるタンク内流体の液面動揺量の影響を評価および検討を通じて解明していき、タンク外壁への圧力を既往の実験解析結果との比較を通じて解析の妥当性を評価する。

### 参考文献

- [1] Kha, K.Q.N., Benaoui, M., Guillou, S.S., Seghir, A.: "Numerical study of liquid sloshing in three-dimensional flexible cylindrical tank under multi-directional seismic excitation," *Physics of Fluids*, Vol.36, No.11, pp.113362-1-113362-15, 2024.
- [2] 遠藤優太, 近藤典夫:『円筒形タンク内のスロッシング現象に関する非線形性について』, 学術講演会, 2019.
- [3] 田中宏明, 中山司:『三次元貯槽内の非線形スロッシングに対する境界要素解法』, 日本機械学会論文集(B 編), Vol.57, No.538, pp.8-14, 1991.
- [4] Monaghan, J.J.: "Shock simulation by the particle method SPH," *Journal of Computational Physics*, Vol.52, No.2, pp.374-389, 1983.
- [5] Lo, E.Y.M., Shao, S.: "Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method," *Applied Ocean Research*, Vol.24, No.5, pp.275-286, 2002.
- [6] Altomare, C., Domínguez, J., Crespo, A., Suzuki, T., Caceres, I., Gómez-Gesteira, M.: "Hybridization of the wave propagation model SWASH and the meshfree particle method SPH for real coastal applications," *Coastal Engineering Journal*, Vol.57, No.4, pp.1550024, 2015.