

OpenFOAM を用いた矩形タンク内のスロッシング特性に関する検討

名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 ○白井開斗
 名古屋大学大学院工学研究科 正会員 中村友昭, 趙 容桓
 名古屋大学大学院工学研究科 フェロー 水谷法美
 東亜建設工業株式会社 正会員 倉原義之介, 武田将英

1. はじめに： タンク内にある自由水面を有する水（以下、タンク水と呼ぶ）はタンクの振動によって激しく運動することがある。このスロッシングと呼ばれる現象の特性を検討することは、施工中の浮遊ケーソンなどの浮体の動揺低減を目的とした Flume 型減揺タンクの設計においても重要である。中村ら(2019)は、浮遊ケーソンの回転運動とスロッシングの連成運動方程式を提案し、水理模型実験の結果との比較によってその精度を検証するとともに、スロッシングがケーソンの回転運動に与える影響を考察した。しかし、同運動方程式に含まれるタンク水の慣性の係数を導出する際に線形理論に基づく固有周期を使用している点、タンク水の減衰係数の導出に水理模型実験の結果を必要としている点に課題を残していた。本研究では、中村ら(2019)の減揺タンクと同様の矩形タンク内に生じるスロッシングを対象とした水理模型実験と数値解析を実施し、両者の比較検討を通じて減衰固有周期や減衰比などのスロッシング特性を明らかにする。

2. 水理模型実験の概要： 図-1 に示す縮尺 1/50 の矩形タンク模型を用いて、スロッシングの減衰振動実験を実施した。タンク水深 h_t は表-1 に示す 3 通りを採用した。本実験は、タンクを水平面上で図-1 に示す x 軸正方向に数 100 ms で約 0.2 m 移動したのち急に静止させることでタンク水に x 軸負方向への片寄りを生じさせて行った。実験の様子を y 軸負方向から撮影し、その動画を解析することでタンク水重心の x 方向変位 ζ_{exp} を追跡した。さらに、 ζ_{exp} の時系列を分析し、スロッシングの減衰固有周期 T_{exp} と減衰比 γ_{exp} を算出した。

3. 数値計算モデルの概要： オープンソースの数値流体力学ソフトウェアである OpenFOAM を使用し、先述した模型実験のタンク諸元、タンク水深、加振方法を再現できる数値計算モデルを構築した。表-2 に本モデルの概要を示す。流体ソルバーとして VOF 法に基づく二相流ソルバーである interFoam を採用した。ここで、 c_α は気液界面の圧縮の程度を示すパラメータである。壁面境界条件として液体の接触角を考慮した。なお、タンクの y 方向の現象はタンク中央断面で対称であると仮定し、計算領域を半減させ中央断面の片側のみを解析対象とした。同モデルを使用してタンクを模型実験と同様に加振した再現計算を実施し、タンク水の重心の x 方向変位 ζ_{calc} の算出結果からスロッシングの減衰固有周期 T_{calc} と減衰比 γ_{calc} を算出した。

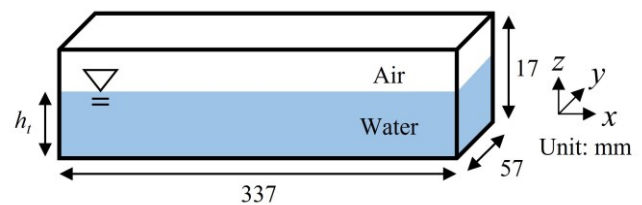


図-1 本研究で対象とするタンク模型の模式図

表-1 本研究で対象とするタンク水深

タンク水深 h_t [mm]	2.6	5.2	7.8
------------------	-----	-----	-----

表-2 OpenFOAM を用いた数値計算モデルの概要

流体ソルバー	interFoam ($c_\alpha = 0.1$)	
メッシュ間隔	$\Delta x = \Delta y = 3$ mm, $\Delta z = 0.8$ mm (壁近傍で細分化)	
時間間隔	自動調節 (最大クーラン数 0.5)	
圧力-速度連成	PISO	
乱流モデル	LES (Smagorinsky)	
壁面境界条件	流速	movingWallVelocity (移動壁面での noslip)
	動圧	fixedFluxPressure
	体積分率	constantAlphaContactAngle (接触角: 40.25°)
	渦粘性係数	nutUSpaldingWallFunction
物性値	密度	液相: 999.97 kg/m ³ , 気相: 1 kg/m ³
	動粘性係数	液相: 10 ⁻⁶ m ² /s, 気相: 1.48 × 10 ⁻⁵ m ² /s
	表面張力	気液界面: 0.07 N/m

4. 結果及び考察： 図-2 は、タンク水深 5.2 mm の条件で実施した数値計算により得られた x 方向流速を示している。同図には、液相の体積分率が 0.5 以上の格子のみを抽出して示し、タンク中心を原点とする x, y, z 座標を併記した。同図より、本数値計算モデルにより壁面へのタンク水の衝突と巻き込みなど複雑な水面形状が計算できていることが分かる。図-3 に、水理模型実験で撮影されたタンク水の水面形を示す。同図にはタンク水の輪郭の検出結果を青色の閉曲線で、タンク水重心位置の解析結果を矢印の先に示す赤点で併記した。同図より、タンク水の天板への接触やタンク

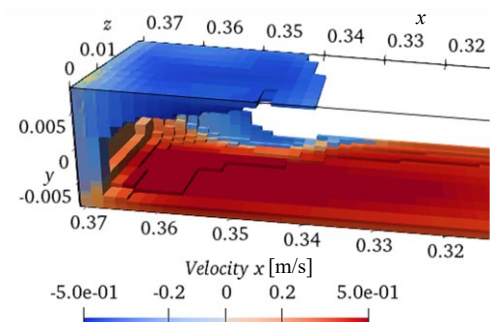


図-2 数値計算におけるタンク水の運動 ($h_t = 5.2$ mm) (タンク静止 0.22 秒後)

ク底面の露出などの非線形な現象の発生が確認できる。続いて、同水深で実施した数値計算より得られたタンク水の水面形を図-4 に示す。同図より、数値計算による水面形は模型実験とおおむね一致していること、天板への水滴の付着と落下などの複雑な現象も再現できていることが

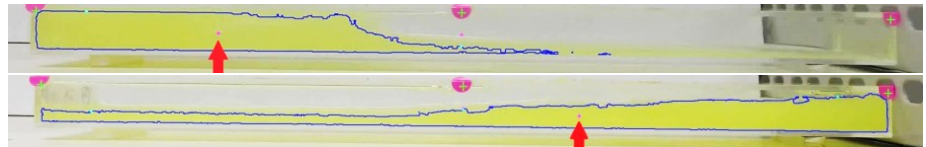


図-3 実験におけるタンク水の水面形 ($h_t = 5.2$ mm)
(上：タンク静止直後，下：同 1 秒後)



図-4 数値計算におけるタンク水の水面形 ($h_t = 5.2$ mm)
(上：タンク静止直後，下：同 1 秒後)

確認できる。しかし、気液界面の拡散が生じていること、段波の先端に不自然な水面形が生じていることも分かる。続いて、図-5 にタンク水重心の x 方向変位 ζ_{exp} と ζ_{calc} の時系列を示す。また、図-6 にスロッシングの減衰固有周期 T_{exp} と T_{calc} 、減衰比 γ_{exp} と γ_{calc} の算出結果を示す。両図より、タンク水深 h_t が増加するにつれて減衰固有周期と減衰比が減少する傾向が模型実験と数値計算から確認できる。また、本数値計算モデルは、タンク水深が浅くスロッシングの非線形性が顕著になるケースを除き、模型実験で得たスロッシングの減衰固有周期を良好に推定できている。一方、減衰比はタンク水深に関わりなく数値計算モデルでは全体的に過大評価している。その原因として、先述した気液界面の拡散の影響や不自然な水面形の影響が考えられる。

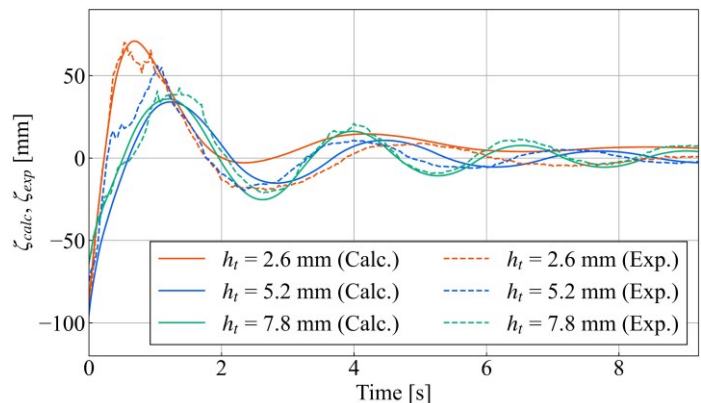


図-5 タンク水重心の x 方向変位

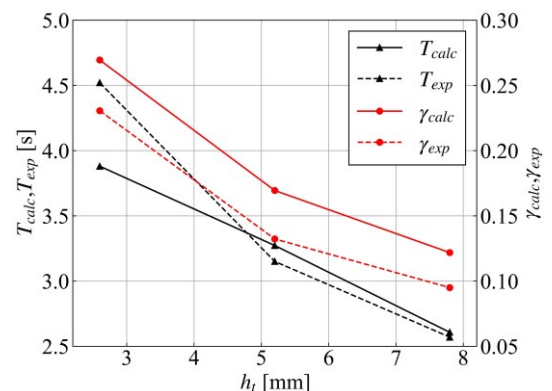


図-6 スロッシングの諸係数の算出結果

5. おわりに： 本研究では、Flume 型減揺タンクとしての応用が期待されている矩形タンクを対象に、模型実験と数値計算によってスロッシング特性の検討を行った。その結果、本研究で対象とした矩形タンクでは非線形なスロッシングが発生

すること、特に顕著な非線形性を有するケースを除き数値計算モデルによりスロッシングの減衰固有周期を再現できることが明らかになった。一方で、減衰比や水面形の再現性には課題が残された。今後、再現性の向上に向けてさらなる検討を行う所存である。

参考文献：中村ら (2019)，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 75, No. 2, pp. I_403-I_408.