

円筒形タンク内の加振振幅を変化させた場合のスロッシング解析

Analysis of sloshing of cylindrical tank by change excitation amplitude

○遠藤優太¹, 近藤典夫²

*Yuta Endo¹, Norio Kondo²

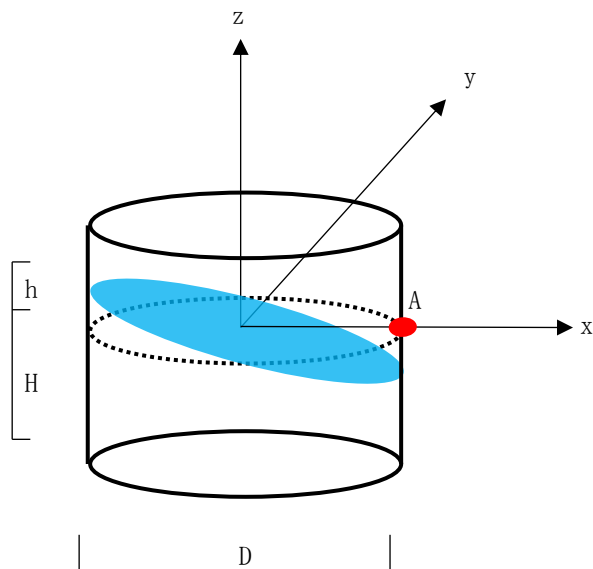
Abstract: The sloshing phenomenon is that fluctuation of the liquid inside occurs when an external force such as an earthquake is applied to the tank. In the Tokachi-oki earthquake and the Niigata earthquake, the floating roof was broken due to the sloshing phenomenon, and the spark that occurred led to a fire in the oil tank. Particularly in Niigata earthquake damage, one crude oil tank was sloshing, the adjacent flames of the tank were involved and it burned for about half a month. Therefore, the seismic design of the liquid storage tank is particularly important.

1. はじめに

スロッシング現象とは、タンクに地震などの外力が加えられることで、内部の液体の動揺が起こることである。十勝沖地震や新潟地震の際にはスロッシング現象により浮屋根が破損し、発生した火花により石油タンクの火災に繋がった。特に新潟地震の被害では、一つの原油タンクがスロッシングにより、炎上し隣接していたタンクも巻き込み、約半月間燃え続ける結果となった。そのため、液体貯槽の耐震設計は特に重要である。

本研究では、円筒形タンクに加える外力の大きさを変化させた時に理論解と数値解の波高の違いがどのように現れるかを捉える。

2. 計算モデル



本論文では、加振振幅を変えた場合を研究対象にするため、円筒形タンクは剛体とみなし、直径は $D=1.0$ (m) とし、タンクの静水面は $H=0.6$ (m) とする。本研究では、振幅を 1~10 倍まで変化させてスロッシングの計算を行い、液面動揺の変化を示す。

3. 計算式

本論文では、流体の運動を解析するため、ナビエ・ストークス方程式を採用した。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 x_i}{\partial x_j^2} + X_i \quad (1)$$

また、密度が一定である流体であるとし、運動中に体積変化がないという仮定から以下の連続方程式を使用する。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここで、 Re はレイノルズ数、 u_i は無次元流速成分、 p は無次元圧力、 X_i は無次元外力を示す。

液面の無次元高さ h を決める式ために以下の式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_i \frac{\partial h}{\partial x_i} = w \quad (3)$$

次にスロッシング解析の波高 h を比較するために曾我部ら[2]によって導出された以下の式を用いた。

$$h = \frac{R}{g} \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{\varepsilon_i^2 - 1} \frac{J_i(\varepsilon_i \frac{r}{R})}{J_i(\varepsilon_i)} \alpha_i - \frac{r}{R} \alpha_g \right\} \cos \theta \quad (4)$$

ここで、 R は円筒形タンクの半径、 r はタンク中心からの半径方向の距離、 θ は X 軸からの角度、 α_i は応答加速度、 α_g は加振加速度、 J_i は i 次の *bessel* 関数である。 ε_i については次の表に示す。

表 1. ε_i の数値

i	ε_i	i	ε_i
1	1.814	6	18.015
2	5.331	7	21.165
3	8.536	8	24.311
4	11.706	9	27.457
5	14.863	10	30.602

また、角振動数を求めるために以下の式を用いた。

$$\omega_i = \sqrt{\frac{g}{R} \varepsilon_i \tanh(\varepsilon_i \frac{H}{R})} \quad (5)$$

4. 計算結果

本論文では、レイノルズ数は 3000、減衰定数は 0.1% の時に、数値解と理論解の振幅が一致、タンクへの圧力も一致していたため、計算パラメータに採用した。

今回使った計算パラメータでは ζ_i は減衰定数、 ω_i は角振動数、 X は加振振幅を示す。加振加速度を $\alpha_g = X\omega_i^2 \sin(\omega t)$ とし田中ら[3]の値を参考に表 2 に示す数値を使った。

式(4)の中の液体応答加速度 α_i は以下の式の解 x_i を二階微分した値を用いた。

$$\ddot{x}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{x}_i + \omega_i^2 x_i = \alpha_g \quad (6)$$

表 2. 計算パラメータ

H	0.6(m)
Re	3000
ζ	0.001
ω	$2 * \pi * 0.875$
X	0.0154

ζ は(6)式で減衰を仮定した際に必要となる。以下に示す図は理論解と数値解の結果である。

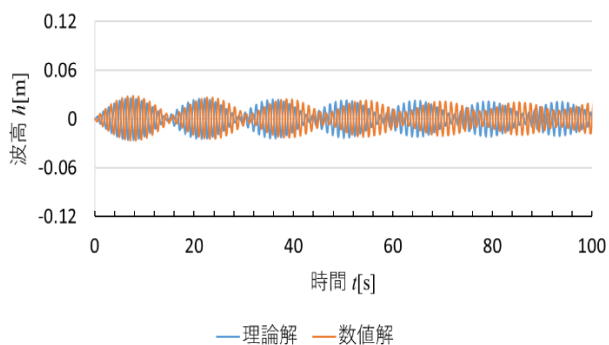


図 1. 加振振幅 3 倍時の A 点の波高

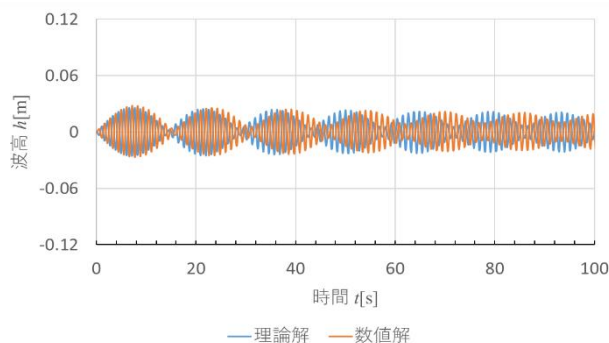


図 2. 加振振幅 3 倍時の A 点から 180° 離れた場所の波高

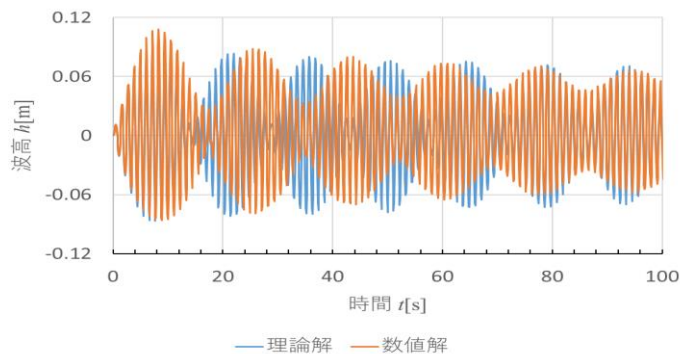


図 3. 加振振幅 10 倍時の A 点の波高

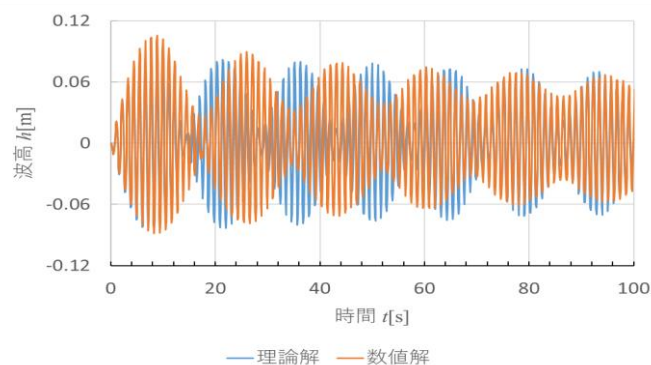


図 4. 加振振幅 10 倍時の A 点から 180° 離れた場所の波高

5. 終わりに

3 倍の加振振幅の時までは、理論解と数値解の波高 h はほぼ、同じ結果となったが、10 倍の加振振幅の場合は、波高 h の変化に差異が表れている。つまり、線形現象と非線形現象の違いが表れていることがわかる。

6. 参考文献

- [1]曾我部潔、重田達也、柴田碧 「液体貯槽の耐震設計に関する基礎的研究」 東京大学生産技術研究所報告、第 26 巻 第 7 号、昭和 52 年 3 月 pp14-16
- [2]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) 57 巻 538 号 1991 年 6 月
- [3]吉田聖一 「円筒形タンクのスロッシング応答の速度ポテンシャル理論」 圧力技術 第 52 巻 3 号 2014 年