

B-7

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

On the nonlinearity in sloshing phenomena of a cylindrical tank

○遠藤優太¹, 近藤典夫²

Yuta Endo¹, Norio Kondo²

Abstract: The sloshing phenomena is that the internal liquid vibrates up and down when an external force such as an earthquake is applied to the tank. It is not impossible to use for the problems of large sloshing by this theory. In this study, nonlinear sloshing analysis by Navier-Stokes equation is performed and the influence on the wave height by nonlinear effect is captured.

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、内部液体が上下に振動することである。スロッシング解析は主に線形ポテンシャル理論をベースに行われているが、大きいスロッシングが発生した際に線形ポテンシャル理論では厳密な解析が行えないという問題点がある。本研究ではナビエ・ストークス方程式による非線形スロッシング解析を行い、非線形効果による波高への影響を捉える。

2. 計算モデルと計算式

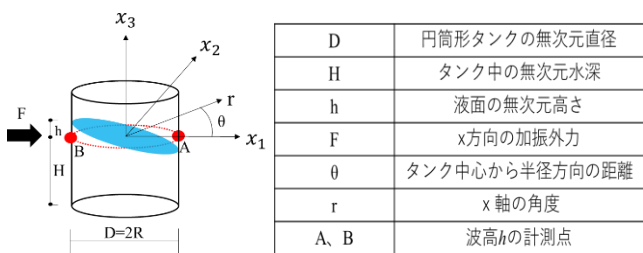


Figure1.タンクのモデル

本研究では、外力の振幅 X を変化させた場合を研究対象とするため、円筒形タンクは剛性とみなした。計算モデルの直径 D=1.0(m)と水深 H=0.6(m)及び直径 D=80.0(m)と水深 20(m)の二つのケースを想定する。本研究では、x₁軸方向に強制的な加振外力 F を与え、外力の振幅 X を X~15X に変化させてスロッシングの計算を行い、液面動揺の変化を捉えた。線形解析では、線形ポテンシャル理論。液面動揺、圧力の計算では、ナビエ・ストークス方程式。波高の計算では高さ関数法により与えた計算式を用いた。詳しい方程式は文献 [1]、[3]を参照。

3. 計算結果

本論文では、レイノルズ数を 3000 と 1000、液面動揺に対する減衰定数ζ_iを0.1%に設定した。加振加速度 α_g(=加振外力 F)は、以下で与えた。

$$F = \alpha_g = X \sin(\omega t) \sim 15X \sin(\omega t)$$

表 1 に本研究で使用したパラメータを示す。

	記号	ケース1	ケース2
静水面高さ[m]	H	0.6	20.0
直径[m]	D	1.0	80.0
レイノルズ数	Re	3 × 10 ³	1 × 10 ³
減衰定数[%]	ζ	0.1	0.1
角振動数[rad/s]	ω	2π × 0.875	2π × 0.1
加速度の大きさ[m/s ²]	X	-0.00154g	-0.00154g

Table1.計算パラメータ

図 2、3、4 は、ケース 1 に対しての計算結果を示している。特に図 2 は加振振幅が X、図 3 は 8X、図 4 は 15X で与えた結果である。また、赤色の線は N-S 式による数値解、青色の線は速度ポテンシャル理論による線形解を示している。図 2 から、波高 h の振幅は両結果共に同じであるが、周期に差が表れている。これは N-S 式は非線形であり、理論解は線形式である事、更に N-S 式では粘性が考慮されているが、理論解は非粘性である事が要因と考えられる。図 3 を見ると非線形解の振幅と線形解の振幅に差が生じ始めた。次に図 4 を見ると非線形効果が顕著に表れている事が分かる。つまり、波高 h の大きさに相当の差が生じており、さらに、周期にも相違が見られる。図 5、6、7 はケース 2 に対しての結果である。図 4 は加振振幅が X、図 6 は 8X、図 5 は 15X で与えたものである。これらはタンクの大きさが相当に大きいタイプのため、非線形効果は図 3 のようにはならないが、しかし、わずかに非線形効果が表れている事がわかる。図 8~11 は図 2~7 に対して、最大波高と最小波高の位置で、タンク壁面に作用する動圧力 P の分布を示している。図 7 から N-S 式の解と理論解の振幅はほぼ同じのため、動圧分布はほぼ同一である。しかし、非線形効果が大きくなる図 4 と 7 に対して動圧分布を示している図 9 と 11 では、圧力の差が大きくなっている事が分かる。

1 : 日大理工・院(前)・海建 2 : 日大理工・教員・海建

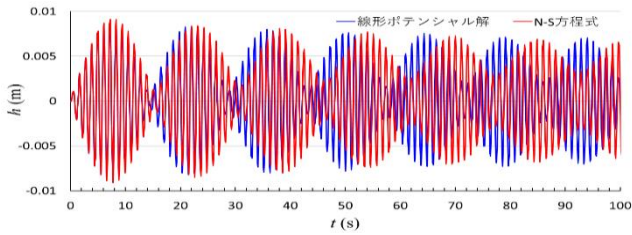


Figure2. ケース 1, 加振外力 X 液面動揺の時刻歴曲線

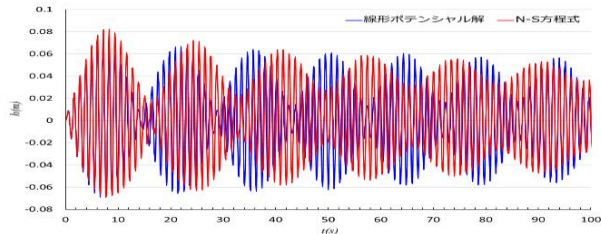


Figure3. ケース 1, 加振外力 8X 液面動揺の時刻歴曲線

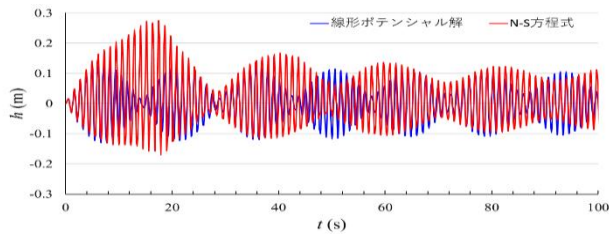


Figure4. ケース 1, 加振外力 15X 液面動揺の時刻歴曲線

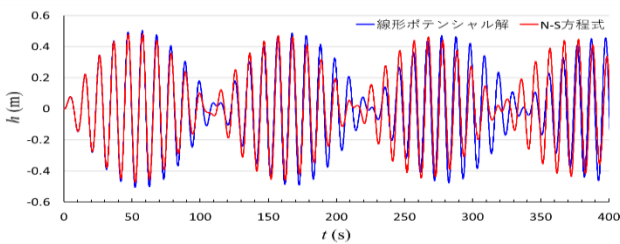


Figure5. ケース 2, 加振外力 X 液面動揺の時刻歴曲線

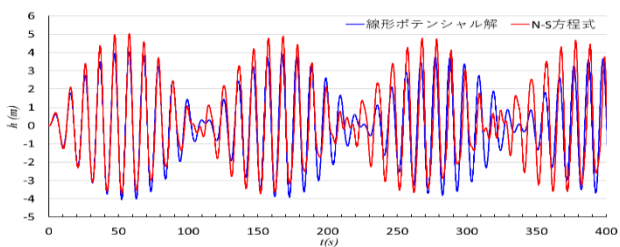


Figure6. ケース 2, 加振外力 8X 液面動揺の時刻歴曲線

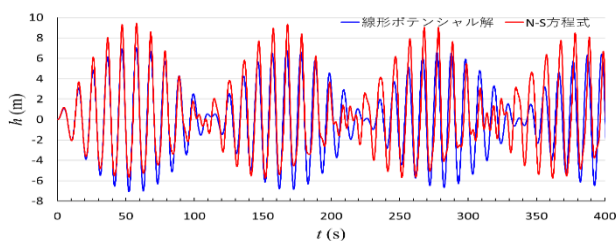


Figure7. ケース 2, 加振外力 15X 液面動揺の時刻歴曲線

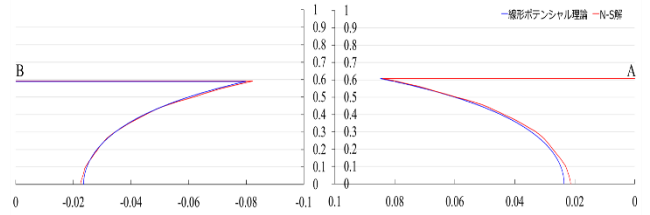


Figure8. ケース 1, 加振外力 X 壁面への圧力分布図

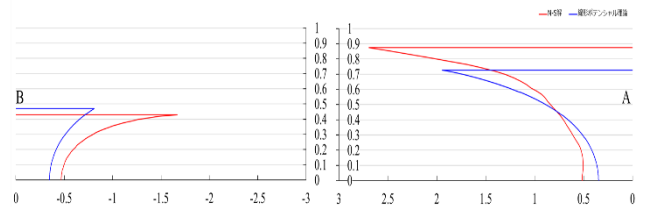


Figure9. ケース 1, 加振外力 15X 壁面への圧力分布図

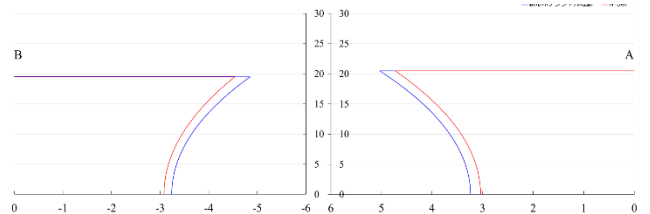


Figure10. ケース 2, 加振外力 X 壁面への圧力分布図

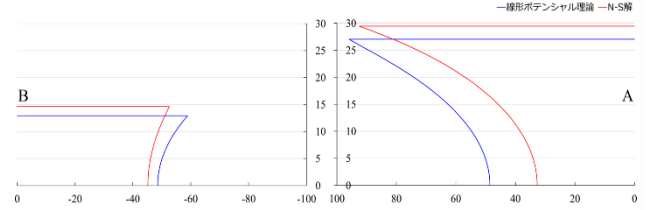


Figure11. ケース 2 加振外力 15X 壁面への圧力分布図

4. 考察

本研究では、振幅の大きさを変えることで非線形による効果を捉えることができた。波高 h の振幅、圧力分布図共にナビエ・ストークス方程式による解では非線形効果を考慮した結果が出た。本計算手法では非線形による波高への影響を十分に捉えることが可能である。

5. 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] 遠藤優太、近藤典夫：「加振外力の変化による円筒形タンク内のスロッシング解析」, 機械学会, 2019 年 9 月