

1. 緒言

石油タンクのスロッシングに関する従来の研究はポテンシャル流近似を行う方法が主流で、3次元粘性流を再現できない、円筒形や任意形状、更には揺動の制御装置に対応できないなどの問題があった。そこで、これらに対処するため3次元風上差分を用いたILES(Implicit Large Eddy Simulation)法により、高次スロッシングを含む液面の揺動運動の特性を把握することを本研究の目的とする。

2. 計算方法

(1)数値流体計算方法

計算方法は直交スタaggerド格子を用いた差分法であるHSMAC法に変動する自由液面の計算を組み込んだ方法¹⁾である。非圧縮流れの運動方程式をAdams-Bashforth法にて陽的に時間進行させ、圧力及び流速は非圧縮連続式を満たすように修正する。乱流によるSGS応力には等方渦粘性モデル(標準Smagorinskyモデル)を適用する。乱流応力及び粘性応力項とも2次中心差分を用い、移流項には3次精度風上差分法(UTOPIA)を用いる。

(2)液面位置の計算方法

液面の位置は、圧力と速度を反復修正する段階で、自由液面を含む計算セル内で連続式を満たすように移動させる。水平方向(x,y)の速度成分を(u,v)、(x,y)での液面の鉛直位置をhとする。静止直交座標系の液面を含む計算セルに連続式を適用すると

$$\Delta h = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x \delta t + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y \delta t + w \delta t \tag{1}$$

が得られる。ここで、 δz は計算セル内の水面高さ、 δt は時間刻みである。液面を含む計算セルでは圧力と流速を修正せずに式(1)にて Δh を算出する。このとき圧力は液面でゼロと設定することで液面での運動学的条件及び圧力条件が満たされる。せん断応力ゼロの条件は運動方程式の時間進行時に設定する。

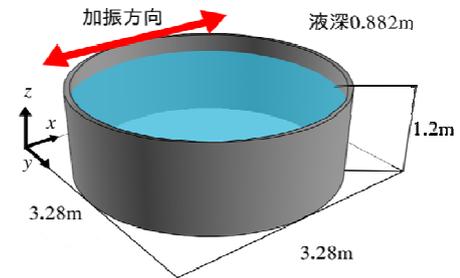


図-1 対象とした円筒形タンク

表-1 円筒形タンクの計算条件

計算領域[mm]	$x \times y \times z = 3.28 \times 3.28 \times 1.2$
計算格子数	$N_x \times N_y \times N_z = 63 \times 63 \times 63$
格子幅[m]	$dx=0.055, dy=0.055, dz=0.02$
時間間隔[sec.]	$\Delta t = 2.0 \times 10^{-3}$

3. 円筒形タンク内液体の振動応答解析

円筒形タンクを用いて数値解析を実施する。計算対象タンクは鈴木らにより実施された実験模型タンクを模した。円筒形タンクモデルを図-1に、計算条件を表-1に示す。

計算ケースとして強制振動を行う。加振振幅が0.005mとなる加速度に応じた外力を運動方程式に付加する。加振振動数を0.1Hzおきに挿入し、必要に応じて加振振動数の値を細かく変化させることで、加振振動数と波高の関係を調べることを目的とする。

(1)強制振動計算結果

加振振動数と波高振幅比の関係を図-2に示す。縦軸の波高振幅比は応答波高振幅を加振振幅で除した値である。1次モードは0.463Hz、2次モードは0.90Hz、3次モードは1.145Hzで最大波高となった。

また、図-3鈴木ら²⁾によるスweep試験結果を示す。1次、2次、3次モードの共振領域をよく捉えることができたが、1次モードと2次モードでのピーク差が大きくなる結果となった。

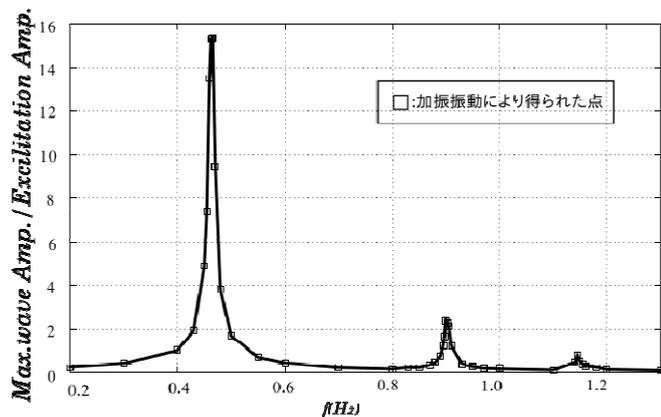


図-2 加振振動数と波高の関係

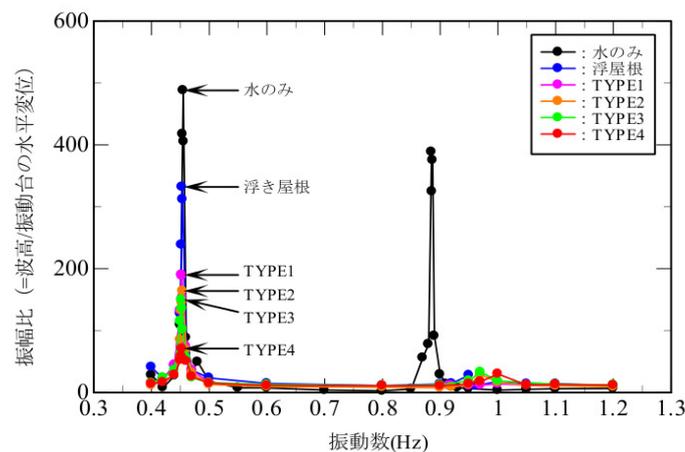


図-3 鈴木らによる²⁾スイープ試験結果

(2)液面形状と流速分布

加振振動より得られた共振域で波高が最大となる際の液面の形状および断面の流速分布を示す。図-6はその断面の位置を表す。

高次モード(2次, 3次モード)ではタンク中央部での波高振幅が, タンク壁面部に比べて大きいことが分かる。全体として液面付近で流速が大きく, 1方向の単純な振幅運動となっている。

4. 結論

本研究では3次元風上差分を用いたILES法により円筒形貯蔵タンク内液体のスロッシング現象の3次元再現計算を行い, 高次モードを含む液面揺動特性の把握及び, 本手法の有用性を検討することを目的とした。

強制振動を入力することで加振振幅比と波高の関係を示した。しかし, 実験に比べ計算でのピーク差が大きくなる結果となった。これは数値解法の差分

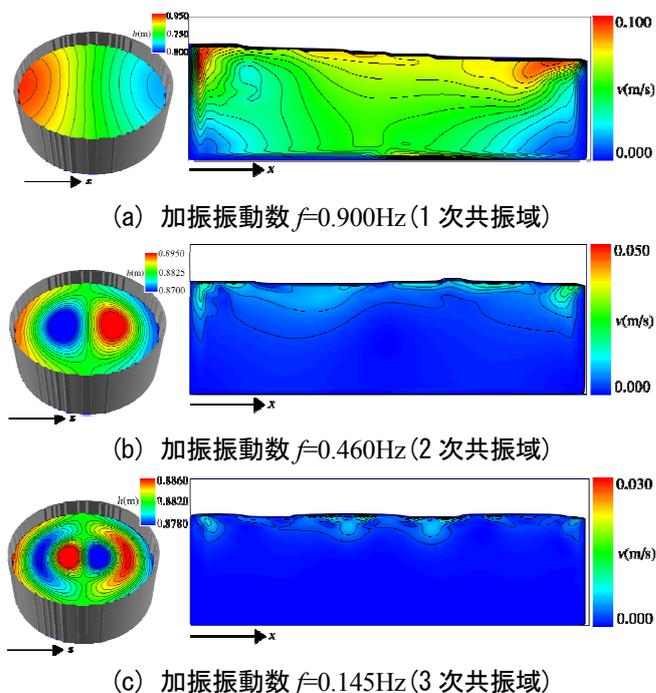


図-3 液面形状と流速分布

法に依存している可能性がある。

また, タンク内液体の揺動運動は1方向に加振した際, 加振方向に波形が移動する単純なものであることを示した。また, 1次モードでは壁面で波高が最大となる。一方, 高次モード(2次, 3次モード)ではタンク中央部で波高が最大となることが分かった。

以上から本研究では高次モードを含むスロッシングの液面変動特性を3次元解析することができたが, 高次モードに関してはある程度の改善が必要である。また, 実際の地震動では水平方向の変化に加え, 鉛直方向, 地震波の時間変化を伴うため, これらを考慮した液面揺動を把握することが重要であると考えられる。

5. 参考文献

- 1) 中山昭彦, 江田智之, 松村友宏: 修正 HSMAC 法による開水路乱流の LES, 水工学論文集 Vol.49, pp.661-666, 2005.
- 2) 鈴木亨: 石油貯蔵タンクの地震時液面揺動制御に関する研究, 博士論文, pp28, 2010.1.