

|         |    |    |    |
|---------|----|----|----|
| 日本鋼管(株) | 正員 | 榊  | 信昭 |
| 同上      | 同上 | 岡本 | 隆  |
| 同上      |    | 岡本 | 晴仁 |

## 1. まえがき

日本海中部地震時に円筒形貯槽にスロッシングが生じ、溢流した貯槽もあった。スロッシング波高（以下波高と称する等スロッシングという表現は省略する）の速度ポテンシャル理論による線形解析（以下線形解析と称する）結果は既に報告した<sup>1)</sup>が、最大波高等線形解では十分説明のつかない現象もあった。ここでは数値計算により、実機の石油貯槽に実地震波を入力して、波高の非線形な応答を検討した。

## 2. 数値計算法

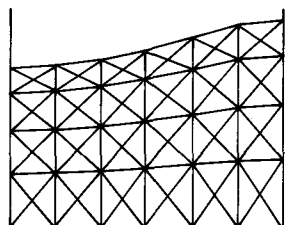
数値計算では二次元領域の流体に関する Navier-Stokes の運動方程式を、非圧縮性流体の連続の式を満たしながら差分法で解く方法を用いた<sup>2)</sup>。自由表面の取扱いは文献2)の“Volume of Fluid Method”によった。計算プログラムは、文献3)に示されたもの(SOLA-VOF)を、外部入力として時刻歴加速度を流体に作用させることができる様に修正して用いた。以下この方法による解を非線形解と称する。

数値計算法の検証のため文献4)の有限要素法と境界要素法による非線形解と比較した。貯槽諸元と入力条件を表1に、有限要素分割、境界要素分割と差分メッシュを図1に示す。壁面での波高の時刻歴波形を図2に示すが、同図から差分法による波高は有限要素法および境界要素法と同精度の値が得られることが確かめられた。

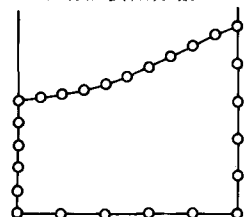
円筒形貯槽の波高は二次元モデルを用いて、つぎのように近似的に求めた。矩形と円筒形貯槽の壁面における最大波高  $\eta_r$ ,  $\eta_c$  の線形解は、1次モードのみを考慮し、1次固有周期に対する加速度応答スペクトル  $S_A$  を用いると、それぞれ(1), (2)式で表わされる。 $\eta_r = 2\ell/(\pi/2)^2 \times S_{Ar}/g$  (1)  $\eta_c = D/(\epsilon_1^2 - 1) \times S_{Ac}/g$  (2) ここでサフィックス  $r$  は矩形を、 $c$  は円筒形を表わす。 $2\ell$  = 矩形貯槽の幅、 $g$  = 重力加速度、 $D$  = 円筒形貯槽の径、 $\epsilon_1 = 1.841$  である。液深  $H$  を  $H_r = H_c$ 、 $2\ell = D$  としたときの1次固有周期を  $T_r$ ,  $T_c$  とする。 $\alpha = T_r/T_c$  として、矩形貯槽の入力地震動の時間軸を  $\alpha$  だけひきのばしたとき、 $T_r$ ,  $T_c$  に対する応答スペクトルは  $S_{Ar} = S_{Ac}$  となる。これは理論的<sup>5)</sup>および数値実験よって(表2参照)証明される。このとき(1), (2)式より円筒形貯槽の波高は矩形貯槽の波高を用いて次式で求めることができる。 $\eta_c = (\pi/2)^2/(\epsilon_1^2 - 1) \times \eta_r \div 1.033\eta_r$  (3) (3)式は1次モードのみを考慮した線形解で成立する。非線形応答に対する(3)式の近似誤差は今後の検討が必要であるが、ここでは1次モードが卓越する場合には、(3)式が非線形応答にも適用できると仮定して用いている。

## 3. 計算結果と考察

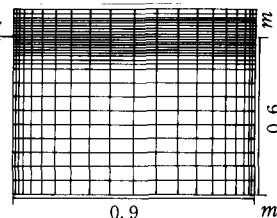
計算対象とした貯槽は  $D = 78.46\text{ m}$ ,  $H_c = 20.342\text{ m}$ ,  $T_c = 10.76$  秒である。液体の動粘性係数  $\nu$  は、原油として  $\nu = 8\text{ cst}$  ( $8 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ) を用いた。入力地震動は日本海中部地震の新潟地方気象台の1倍強震計で記録され



(a) 有限要素分割



(b) 境界要素分割



(c) 差分メッシュ

図1 要素分割図

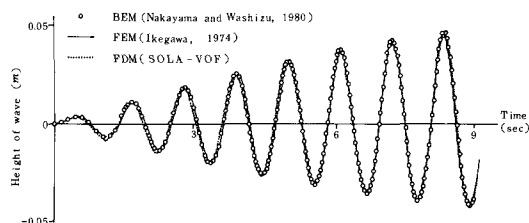


図2 時刻歴波高

た波形を用いた。入力方向は水平1方向のみである。

差分メッシュを図3に示す。実際の、痕跡の上端から求めた波高と線形解および非線形解による波高を比較して図4に示す。同図は壁面の波高の最大値の分布を全周に亘って展開したもので、横軸は壁面の位置を貯槽中心からの方位で表わしている。図4の太実線は実際の波高、細実線と点線は減衰定数がそれぞれ $\xi = 0.0$ 、 $\xi = 0.001$ の10次モードまで考慮した線形時刻歴応答波高である。記号●( $\xi = 0.0$ )、○( $\xi = 0.001$ )は1次モードのみを考慮し、応答加速度スペクトルを用いた円筒形貯槽の線形解によるものである。記号■( $\xi = 0.0$ )、□( $\xi = 0.001$ )は矩形貯槽の線形解から前述の近似方法により求めた波高である。図4に示される様に、線形解では1次モードのみを考慮した波高が高次モードを考慮した波高とほぼ一致したことから1次モードが卓越したと思われる。図4の記号□は非線形解による波高であるが、波高が大きくなるほど線形解より大きくなる傾向が強いことが認められる。波高の時刻歴応答を図5に示す。同図の非線形解では、波高が大きくなると、液面の上昇量が下降量より大きくなる応答が顕著に現われており、これが線形解より波高が大きくなった理由と考えられる。自由液面形状の例を図6に示す。図5より、非線形解が線形解より実際の波高をより良く説明できることが明らかとなった。しかし、波高の大きい位置では、痕跡の上端は、非線形解よりかなり大きな値となっている。その理由は、痕跡が高い位置にあるところでは、ポンツーンを越えて浮屋根のデッキ上に原油が達していたことから、図7に示す様に、痕跡が実際の自由液面より60~65cmほど高くなっていたと考えられる。

〔参考文献〕 1)岡本・榊(1984):日本海中部地震の石油タンクのスロッシング波高,土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, I-350, pp.699-700.

2)C.W.Hirt and B.D.Nichols(1981):"Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol.39, No.1, pp.201-225.

3) B.D.Nichols, C.W.Hirt, R.S.Hotchikiss(1980): " SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries", Losalamos Scientific Laboratory, LA-8355, VC-32 and VC-34.

4) T.Nakayama and K.Washizu(1981): " The Boundary Element Method Applied to the Analysis of Two-Dimensional Nonlinear Sloshing Problems", I. J. for .N.M. in Engi. Vol.17, pp.1631-1646.

5)小坪清真(1973):土木振動学, pp.282-297.

表1 貯槽諸元と入力条件

|          |                        |
|----------|------------------------|
| 長さ       | 0.9 m                  |
| 液 深      | 0.6 m                  |
| 正弦波入力片振幅 | $2.0 \times 10^{-5} m$ |
| 円振動数     | 5.5 rad/s              |
| 粘性係数     | 0.0 m <sup>2</sup> /s  |

表2 加速度応答スペクトル

| タンク形状 | 1次固有周期     | 波形の時刻間隔 $\Delta t$ | 加速度応答スペクトル $S_a$ gal |                |
|-------|------------|--------------------|----------------------|----------------|
| 円 筒   | 10.757 sec | 0.2 sec            | $\xi = 0 \%$         | $\xi = 0.1 \%$ |
|       |            |                    | 83.1(N150°E)         | 80.3(N150°E)   |
|       |            |                    | 34.3(N 60°E)         | 30.0(N 60°E)   |
|       |            |                    | $\xi = 0 \%$         | $\xi = 0.1 \%$ |
| 矩 形   | 12.235 sec | 0.22748 sec        | 83.1(N150°E)         | 80.3(N150°E)   |
|       |            |                    | 34.3(N 60°E)         | 29.6(N 60°E)   |
|       |            |                    | $\xi = 0 \%$         | $\xi = 0.1 \%$ |
|       |            |                    | 83.1(N150°E)         | 80.3(N150°E)   |

( )内は入力地震動の水平成分の方向を表す。入力地震動は日本海中部地震の新潟地方気象台の1倍強震計の記録を用いた。(  $\alpha = 1.1374$  )

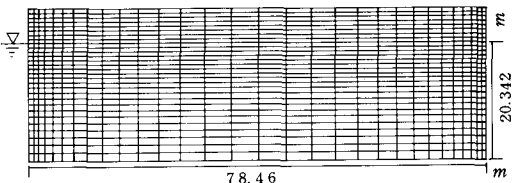


図3 差分メッシュ (石油貯槽)

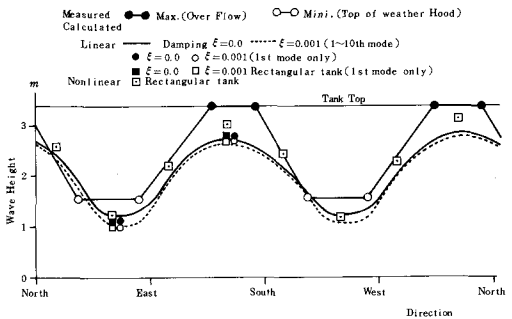


図4 最大波高分布

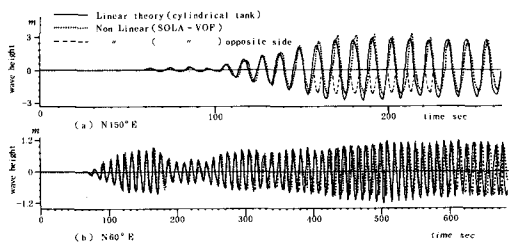


図5 時刻歴波高 (石油貯槽)

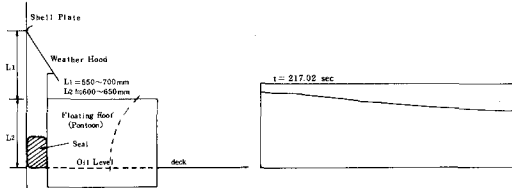


図7 側板・浮屋根部 図6 自由液面形状