

燃料貯蔵槽内液体のスロッシング現象の再現

神戸大学大学院工学研究科 学生員 ○石井 翔大
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 中山 昭彦

1. はじめに

燃料貯蔵槽や大型水槽などの液体が強い地震動などの衝撃を受けると、共鳴現象であるスロッシングが起こり、火災などの発生が報告されている。そのため現象の詳細の解明と抑制法の開発は重要な課題となっている。従来、スロッシングはポテンシャル流理論に基づいた解析（例えば Housner¹⁾）が行われてきたが、水深の浅い場合や3次元形状の場合厳密解はなく近似的なもので、解の信頼性は低い。また、粘性による減衰特性を説明することができない。鈴木ら²⁾はこういった問題に対し、乱流シミュレーション法である Large Eddy Simulation (LES)法を適用し、円筒形貯蔵槽内の液面揺動のシミュレーションを行った。地震応答など良好に再現できているが、壁面の摩擦、数値粘性と乱れの影響など詳細の検証は十分でない²⁾。また、スロッシングが発生した直後や、減衰過程では、ポテンシャル流のような乱れの少ない流れで、必ずしも乱流シミュレーション法が適しているとも言えない。そこで本研究では、乱れが大きい場合や、ポテンシャル流に近い非回転性流れにも対応できる再現計算方法の確立を目的とする。

2. 計算方法

数値計算方法は鈴木ら²⁾同様の手法を用いる。静止直行座標でスタaggered格子を用いた部分段階法の一つである HSMAC 法に変動する自由液面の計算を組み込んだ方法³⁾である。3次精度 Adams-Bashforth 法で陽的に時間進行させ、速度成分は連続式を満たすよう圧力を修正し反復計算で求める。その他の詳細は参考文献³⁾の記述に準ずる。なお、壁面境界は Non-slip とする。

3. 円筒形タンクでの差分法及びSGS 応力モデルの検証

上記の手法を用い図-1に示す円筒形貯蔵槽内液体の振動計算を行う。移流項は3次風上差分、サブグリッドモデルは標準 Smagorinsky とした。異なる格子数での計算結果を図-2に示す。3.28m×3.28m×1.2m の計算領域に対し、CASE1 は 63×63×63 の格子(水平方向格子間隔 0.055m 鉛直方向 0.02m)で、CASE2 は 43×43×43 で CASE1 に比べ格子間隔が粗い。振動周期はいずれも同様の結果であるが減衰率が大きく異なる。図-3 はサブグリッド応力を除いたものと Smagorinsky 定数 $C_s=0.1$ を用いた計算を行い比較している。これによると、サブグリッド応力の影響が非常に小さいことが分かる。以上から本計算例では 3 次風上差分による数値粘性の影響が支配的になっていることが分かる。

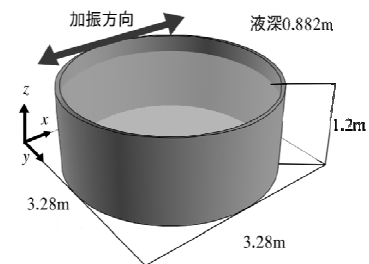


図-1 円筒水槽内自由振動実験

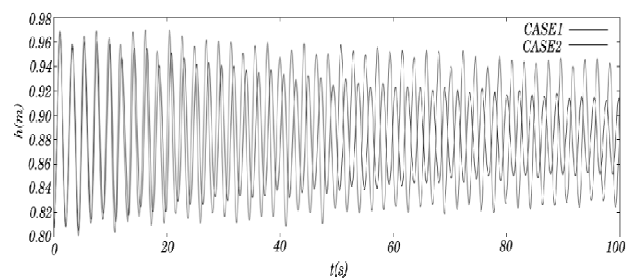


図-2 円筒形水槽端部の水深時間変化.

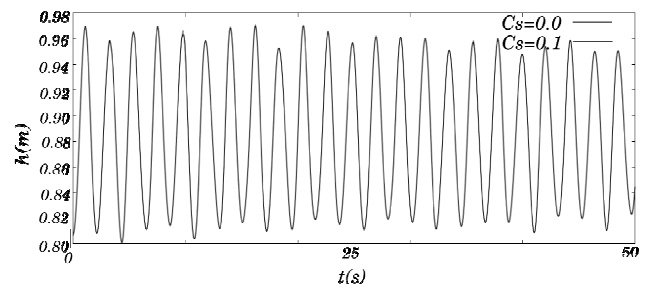


図-3 サブグリッドモデルの効果の検証.

キーワード LES, スロッシング現象, 乱流

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1 神戸大学工学研究科 TEL 078-803-6268

4. 非回転性流れに適用可能な SGS 応力モデルの提案

以上を踏まえ移流項の差分方法及び、乱流の SGS 応力モデルの再検討を行う。粘性項は 2 次中心差分を用い、移流項には拡散誤差のない保存形 2 次中心差分を用いる。

SGS 応力モデルについては、非回転性変形では乱れは発生しにくいことを考慮し、*Smagorinsky* の渦粘性モデルを次のように修正する。すなわち、ひずみ速度テンソルのひとつを回転テンソルで置き換え

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \{S_{ij} W_{ij}\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

とする修正法が有用と考えられる。この修正によりポテンシャル流中ではサブグリッド応力は発生せず、せん断層内では標準モデルと同様のサブグリッド応力を生成することになる。なお括弧内の $S_{ij} W_{ij}$ は負の値になる可能性があるがその時はゼロとする。

また、前報²⁾では壁面の条件を Non-slip としてきたが、本計算で用いる格子では壁面近傍の流れを十分に解像できないため、底面境界には笠井・中山ら⁴⁾の壁面応力モデルを適用する。

6. 円筒貯蔵槽内液体での計算手法の検証

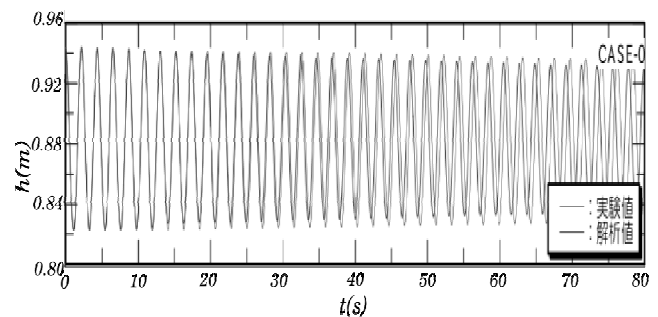
次に上記の手法による円筒形貯蔵槽の振動解析を行う。まず、実験では定常状態に達した後、加振を止めて自由振動させたものと、目標振幅に到達するまで加振を行い、その後自由振動させた計算結果を図-4 に比較してある。計算結果は、正側の振幅の方が負側の振幅より若干大きくなり、この傾向は実験結果にも見られる。振動周期及び減衰率はおおよそ良好に再現されている。

7. 結論

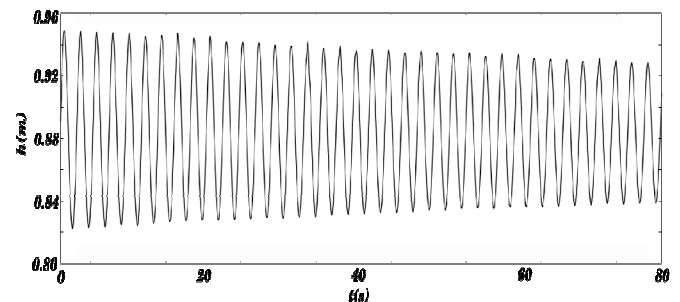
比較的滑らかなポテンシャル流にも適用可能なサブグリッドモデルを用いた LES 法を作成し、液槽内揺動の数値シミュレーションを行った。スロッシング周期のみならず振幅なども再現でき、燃料貯蔵槽の地震時安全対策に応用できることが分かった。

参考文献

- 1) Housner, G.W.: The dynamic behavior of water tanks, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.53, No.2, pp.381-387, 1963.
- 2) 鈴木亨, 中山昭彦, 野田博: 浮遊式減衰ネット付石油貯蔵タンクの実地震動による液面揺動の数値解析, 応用力学論文集 Vol.13, pp.649-658, 土木学会, 2010.
- 3) 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.
- 4) 笠井大彰, 中山昭彦: 複雑境界上乱流の LES 計算における壁面モデルの検証, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1051-1056, 2000



(a)実験及び解析値(鈴木ら²⁾)



(b)本計算結果

図-5 円筒水槽自由振動, 端部の水深時変化。