

数値流体計算によるスロッシング現象 と減衰ネット効果の再現性に関する研究

REPRODUCTION OF SLOSHING PHENOMENA
AND SLOSHING DAMPER DEVICE BY CFD

野田博¹・中山昭彦²・立見栄司³・中南滋樹⁴

Hiroshi NODA, Akihiko NAKAYAMA, Eiji TATSUMI and Shigeki NAKAMINAMI

¹非正会員 博(工) 三井住友建設株式会社 流山研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

²正会員 Ph.D 神戸大学教授 大学院自然科学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

³非正会員 工修 三井住友建設株式会社 流山研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

⁴非正会員 工修 三井住友建設株式会社 小山研究所 (〒329-0432 栃木県下野市仁良川1726)

Sloshing phenomena of liquid in rectangular and circular tanks with and without sloshing damper have been simulated using a CFD method, namely a large eddy simulation method with standard Smagorinsky model. The decay of the wave amplitude in free oscillation, the resonance frequency and the amplitude response characteristics to a single-mode excitation are found to agree well with the experiment in the basic case of rectangular tank. The effects of the damper net have been modeled by introducing resistance in the flow and have been found to reproduce experimental results. The response characteristics to a real seismic oscillation of fluid in a realistic cylindrical petroleum tank have also been calculated with favorable results.

Key Words : CFD, LES, Sloshing, Rectangular tank, Cylindrical tank, Free surface

1. はじめに

振動する貯蔵槽内液体のスロッシング現象の把握とその予測は、液体燃料貯蔵タンクの安全性の検証・確認に重要であり、また安全性確保のためのスロッシング低減対策の開発にも有用で、数値計算も試みられている¹⁾。貯蔵槽内液体の運動は、水路流れなどとは異なり、閉じた狭い領域内で大きな水面変形を伴う非定常な往復運動を繰り返す。数値流体計算でこの現象を再現する場合にはこの特性を十分考慮する必要がある。自由液面のある流れの計算法には水深関数法やLevel set法のように液面位置の移動方程式を解いて液面を追跡する方法²⁾と、VOFや密度関数法などのように液体の空間分布を解く方法³⁾がある。移流方程式を用いる方法では液面が崩れ液滴や気泡が発生する分散系の場合でも界面の位置を精度良く追跡できるが液体体積の保存性に問題がある。VOF法では数値不安定を起こさないよう注意する必要がある。

本研究では筆者らにより提案された自由境界面のない流れの解法であるHSMAC法の圧力と速度の反復修正段階で液面位置を算出する方法⁴⁾を適用し、スロッシング

現象と減衰装置を設置した場合の液体運動の再現予測計算を行なう。この方法は流れと水面運動を同時に安定的に解けかつ体積保存を容易に制御できるため、閉じた貯蔵槽内の振動運動の計算に適している。また計算格子では解像出来ない小スケール乱流運動のモデルを組み込むことにより実スケールタンク内の高レイノルズ数流れにも対応できる。本研究では、まず矩形水槽内スロッシングの実験を行いスロッシング現象の基礎的特性を把握すると共に上記計算手法の妥当性検証のためのデータを得た。次にスロッシング低減対策として液体同調ダンパーのスロッシング低減⁵⁾に有効であった減衰ネットを設置した場合のモデリングと再現性についても検討した。さらに本研究の最終的な適用対象である地震時の円筒形石油タンクを想定した液体スロッシング応答の計算例を示す。

2. 計算方法

(1)数値流体計算方法

数値流体計算方法は、直交座標でスタッガー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

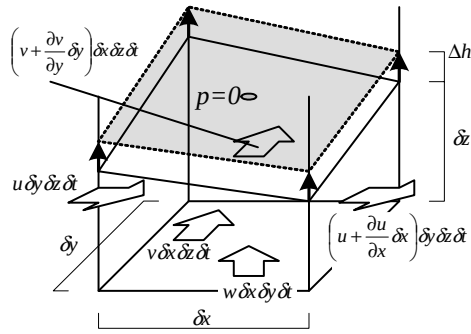


図-1 自由液面変位と速度Fluxの関係

算を組み込んだ方法⁴⁾である。この方法は表-1にまとめてあるように非圧縮性流れの運動方程式をAdams-Bashforth法にて陽的時間進行させ、圧力および流速は非圧縮連続式を満たすよう修正する。乱流によるサブグリッド応力には等方性渦粘性モデル(標準Smagorinskyモデル、 $C_s=0.1$)を用い、底面近傍ではVan Driest のダンプングを適用している。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)を用いている。

(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セル内で連続式を満たすよう移動させる。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。図-1に示すような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

$$\Delta h = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x \Delta t + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \Delta t + w \Delta t \quad (1)$$

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(1)式にて 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。

(3)減衰ネットの再現方法

スロッシング低減のための減衰ネットは、網を通過する流速により抵抗を及ぼす効果のみがあると仮定し、運動方程式に次のような外部抵抗力を付加することによりモデル化した。

$$F_i = K \cdot \left(\frac{A}{2L^3} \right) \cdot u_i \sqrt{u_j \cdot u_j} \quad (2)$$

ここで、 F_i : i 方向抵抗力、 K : 抵抗係数、 A : ネット面積、 L^3 : ネットの体積、 $u_i(u_j)$: $i(j)$ 方向流速 ($i(j)=1$: x 方向、 $i(j)=2$: y 方向、 $i(j)=3$: z 方向)

抵抗係数 K は減衰ネットの開口率とレイノルズ数に依存し次式で表される⁶⁾。

$$K = 6 \cdot (1 - \beta) \cdot \beta^{-2} \cdot \text{Re}^{-1/3}, \quad \text{Re} = \frac{ud}{\beta\nu} \quad (3)$$

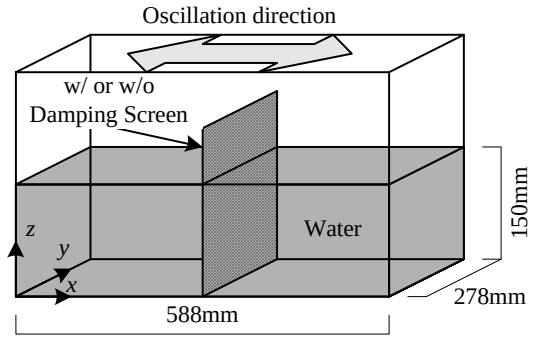


図-2 対象とした矩形水槽

表-1 計算方法ならびに検証計算の条件概要

空間差分	移流項 3次風上(UTOPIA) その他 2次中心
時間進行法	Adams-Bashforth法
計算アルゴリズム	HSMAC法
乱流モデル	標準Smagorinsky Model($C_s=0.10$)
計算領域 [mm]	$x \times y \times z = 588 \times 139 \times 200$
計算格子数	$N_x \times N_y \times N_z = 101 \times 21 \times 51$
格子幅 [mm]	$dx=5.88, dy=6.95, dz=4.00$
計算時間 [sec.]	$T=300$
時間間隔 [sec.]	$\Delta t=5.0 \times 10^{-4}$
壁面境界条件	Non slip
加振振幅 [mm]	0.2
加振振動数 [Hz]	$f_0=0.833, 0.928, 0.937, 0.943, 1.000$
ネット抵抗係数	$K=0.58$
計算ケース	Case1: without Net, Case2: with Net

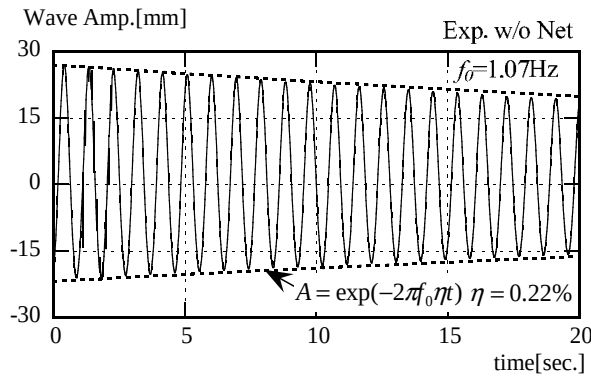
ここで、 β 開口率($= (1-d/l)^2$ 、 d : ワイヤの線径、 l : ワイヤの間隔)、 u : 流速、 ν : 動粘性係数であり、開口率 $\beta=0.683$ 、 $d=0.55\text{mm}$ 、 $l=3.17\text{mm}$ である。

3. 計算手法の検証

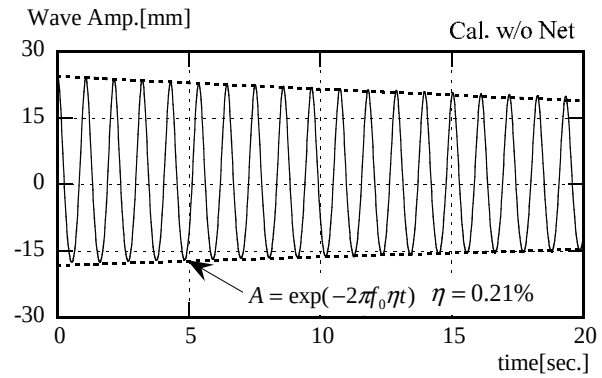
(1)検証水槽モデル

本研究で対象とする数値流体計算法の検証用水槽モデルは貯蔵槽内の液体スロッシングで最も単純な矩形水槽とした。この検証実験に用いた矩形水槽を図-2に示す。静止時水深は150mmとし、スロッシング減衰ネット効果の再現性確認のため、水槽中央部に線径0.55mm、8メッシュ、開口率68.3%のネットを設置した場合についても検討した。検証実験は、検証水槽モデルを振動台上に設置し自由振動実験によるスロッシング減衰を測定すると共に波高が定常状態になるまで単周期で加振し、加振振動数と波高の関係を調べた。

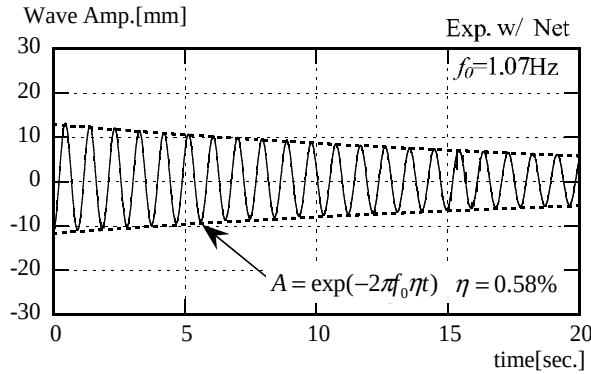
計算で再現した矩形水槽の加振直角方向幅は、計算の効率性ならびに現象の一様性を考慮して、実験に用いた矩形水槽の1/2とした。計算条件は表-1に示してある。計算の加振振動数は減衰ネット無しの場合、有りの場合とも5通りとした。計算での加振は、各加振振動数で振



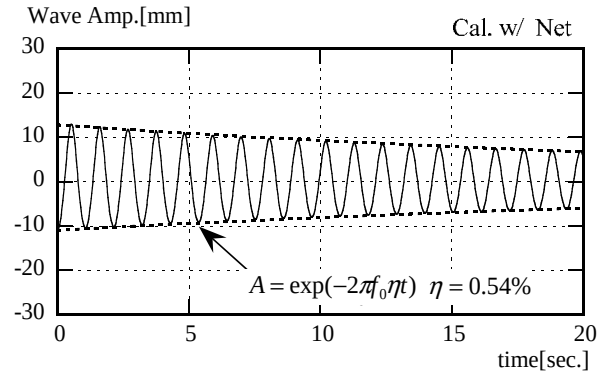
(a)実験値(水深250mm) 減衰ネットなし



(c)計算値(水深150mm) 減衰ネットなし



(b)実験値(水深250mm) 減衰ネットあり



(d)計算値(水深150mm) 減衰ネットあり

図-3 端部液高の自由振動波形

幅が0.2mmとなる加速度の慣性力を外力として運動方程式に付加することにより行った。

(2)計算結果

水槽端部の波高の自由振動波形を図-3に示す。実験値の自由振動波形は正側の振幅のほうが負側の振幅より若干大きくなり、その傾向は計算結果でも再現されている。実験と計算では水深が異なるが、減衰定数に着目すると、減衰ネットが無い場合には計算値($\eta=0.21\%$)は実験値($\eta=0.25\%$)をよく再現している。減衰ネットが有る場合実験では $\eta=0.67\%$ に対し計算では $\eta=0.54\%$ となり、減衰定数の差異は減衰ネットがない場合よりもやや大きくなっている。これは抵抗力を表す(3)式における流速を計算ではネット内の流速を用いているが、用いた抵抗係数 K の定義の流速とは異なるためと考えられる。

加振振動数と波高振幅の関係を図-4に示す。図中には検証実験の結果も付記する。また縦軸の波高振幅は加振振幅で除した値である。減衰ネットがない場合、計算で求めた共振時の波高振幅は実験結果とよい対応をしている。共振振動数に差異がみられるがその差は約1%(実験値 $f_0=0.934\text{Hz}$, 計算値 $f_0=0.928\text{Hz}$)と極めてわずかな違いである。減衰ネットがある場合には共振振動数付近で計算による波高振幅は実験結果より大きくなっている。この差異の原因は前述の抵抗定数 K の定義の違いと考えられる。

非粘性微小振幅波の波動理論によると水平方向流速(u 成分)ならびに鉛直方向流速(w 成分)の流速は下式で表さ

Max. wave Amp./ Excitation Amp.

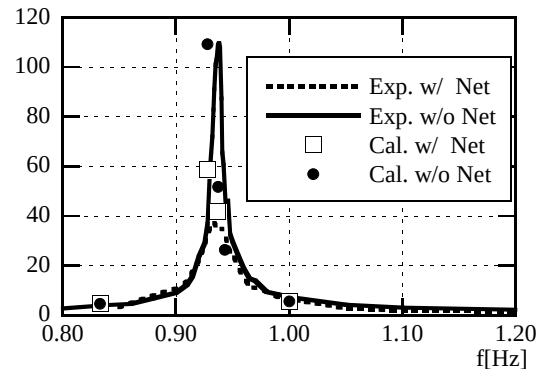


図-4 加振振動数と波高の関係

れる..

$$u = k \frac{ga}{\omega} \frac{\cosh\{k(z+h)\}}{\cosh(k \cdot h)} \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t + \varepsilon) \quad (4)$$

$$w = k \frac{ga}{\omega} \frac{\sinh\{k(z+h)\}}{\cosh(k \cdot h)} \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t + \varepsilon) \quad (5)$$

ここで、 k :波数($=2\pi/\lambda$, λ :波長), ε :位相差, t :時間, a :振幅, h :水深, ω :固有角振動数($=2\pi f_0$, f_0 :固有振動数)

u 成分の流速が最大となる時の水槽中央部における流速の高さ方向分布を図-5に示す。図-5(a)には式(4)で求めた流速もプロットされている。これは中央部で流速最大のときで、 $kx=\pi/2$, $\omega t+\varepsilon=0$ とし、振幅 a は計算値(正側の振幅とし、それぞれ減衰ネット無しの場合 $a=24.4\text{mm}$, 減衰ネット有りの場合 $a=13.2\text{mm}$)を用いている。計算による流速の u 成分の鉛直分布と(4)式の分布を

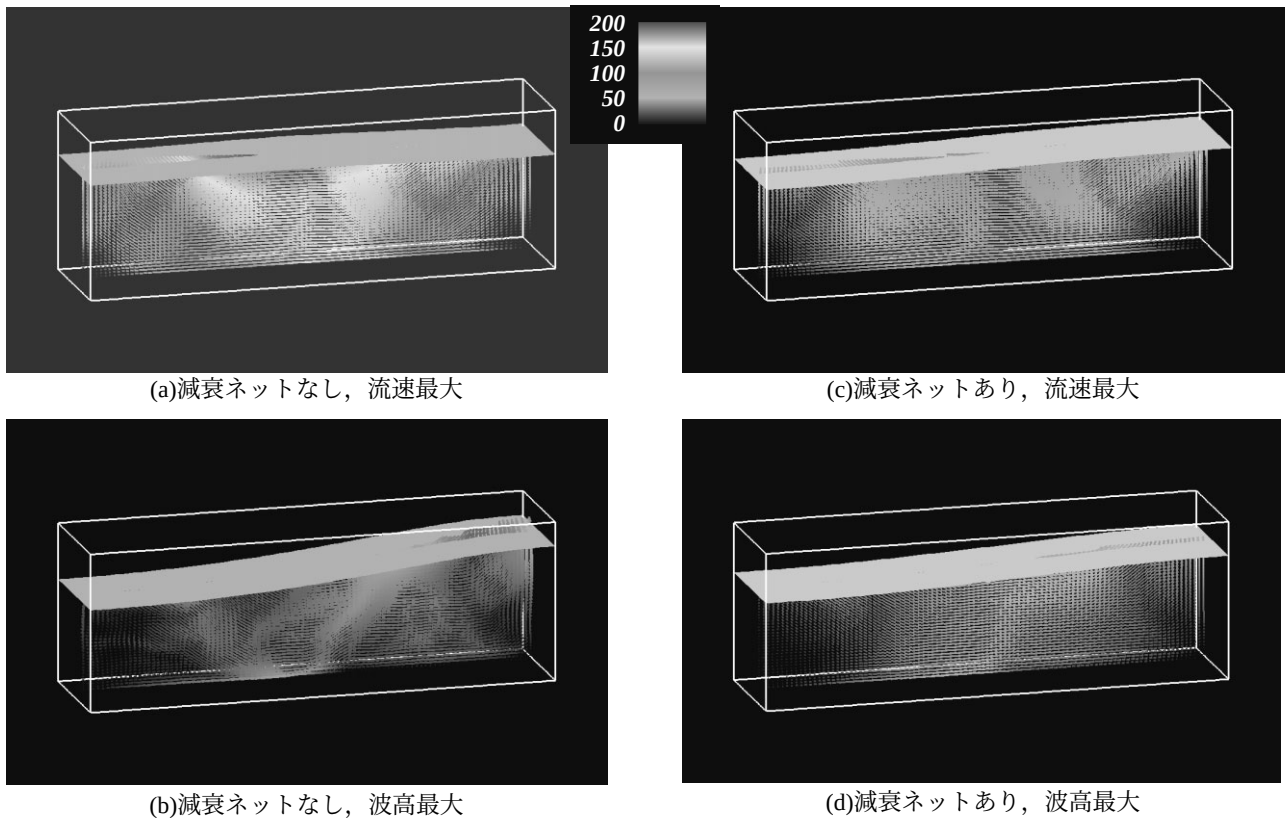


図-6 自由水面変位と流速ベクトル

比較すると定量的にも定性的にも概ね良い一致を示している。ただし、水槽底面付近は底面による粘性や乱れの影響によりポテンシャル流理論とは異なる値となっている。減衰ネットが有る場合でも、底面近傍以外では減衰ネットの有無に関わらず概ねポテンシャル理論流速に沿っていることが確認できる。

次に共振時における鉛直断面内流速ベクトル分布と自由液面形状を図-6に示す。水面がほぼ平坦になるとき（図-6(a)）に流速が大きくなり、最大となる位置は中央部液面近傍である。しかし、底面付近でも流速が大きくなっている部分もある。また波高振幅が最大となるときの（図-6(b)）には全体的に乱れが発生するなどポテンシャル流理論式では得られない現象が現れている。

4. 円筒形タンク内液体の地震応答計算

次に液体スロッシングの低減を目的とした減衰ネット開発の最終的な適用対象である石油タンクへの応用例として、円筒形タンク内液体の地震応答の計算を実施した。

(1)円筒形タンク概要ならびに計算条件

計算の対象としたタンクは直径3.28m、高さ1.2mの円筒形タンクである。この円筒形タンクに水深0.882mの水を入れた状態を設定した。減衰ネットは水面付近に放射状に8本設置した。減衰ネットの高さは0.2mであり、水

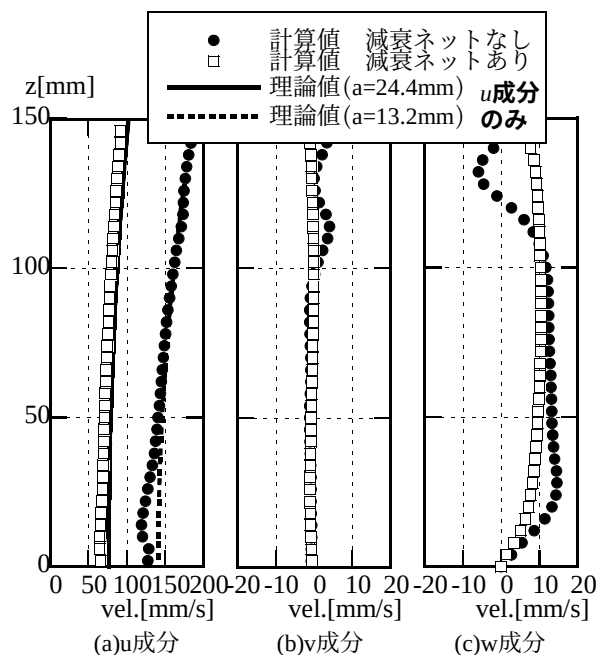


図-5 流速最大時の水槽中心位置での流速分布

面変動と共に上下に移動するものとした。対象とした円筒形タンクモデルを図-7に示す。

計算は減衰ネット無しの場合と有りの場合の2ケース実施し、減衰ネットの効果を検証した。計算条件を表-2に示す。入力地震動は2003年9月26に発生した十勝沖地震のK-net苫小牧で観測されたEW方向地震動の縮尺1/25

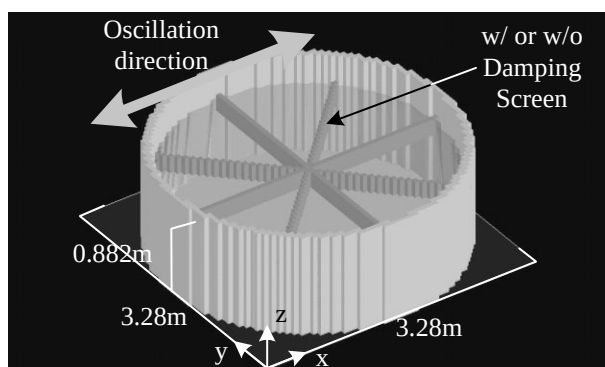


図-7 対象とした円筒形タンクの形状

表-2 円筒タンクの計算条件概要

計算領域 [m]	$x \times y \times z = 3.28 \times 3.28 \times 1.2$
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.]	$\Delta t = 2.0 \times 10^{-3}$
壁面境界条件	Non slip
ネット抵抗係数	$K = 0.58$
ネット高さ[m]	0.2
入力地震動	十勝沖地震(K-net 苫小牧) EW方向の1/25相似波形
計算ケース	Case1: without Net, Case2: with Net

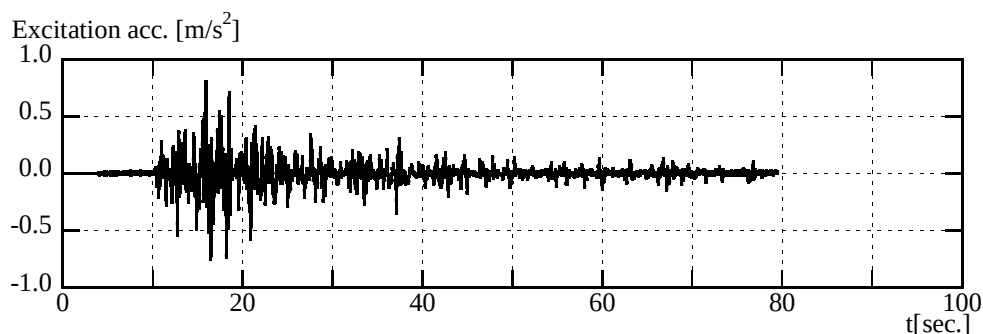


図-8 入力地震動

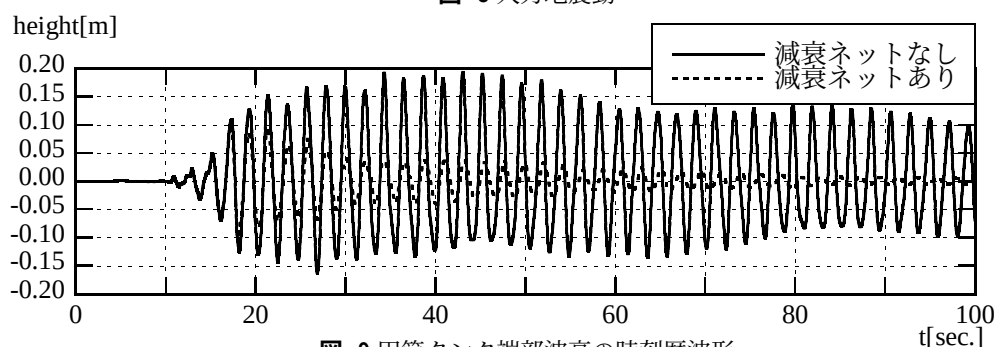


図-9 円筒タンク端部波高の時刻歴波形

相似波形を用いた。地震応答計算に用いた入力加速度波形を図-8に示す。加振は矩形水槽による検証計算と同様に図-8に示す加速度に対応する慣性力を加振方向の運動方程式に付加することで再現した。

(2)計算結果

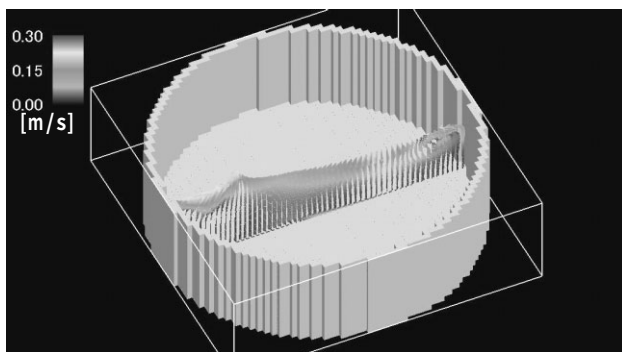
タンク端部の波高の時刻歴を図-9に示す。減衰ネット無しの場合、入力地震動が最大となる $t=16$ 秒付近から波高振幅が大きくなり、その後入力地震動が小さくなっても波高は徐々に大きくなり、共振による後揺れ現象が認められる。波高が最大となるのは、 $t=43$ 秒付近で最大振幅0.19mである。

減衰ネットが有る場合も入力地震動が最大となる16秒付近から波高振幅が大きくなり、振幅も減衰ネット無しの場合に比べ僅かに小さくなっているのみである。しかし、入力地震動が小さくなるに従い波高も小さくなり、後揺れ共振現象がなくなっているのが確認できる。波高が最大となるのは $t=17$ 秒付近で最大振幅0.9mである。以

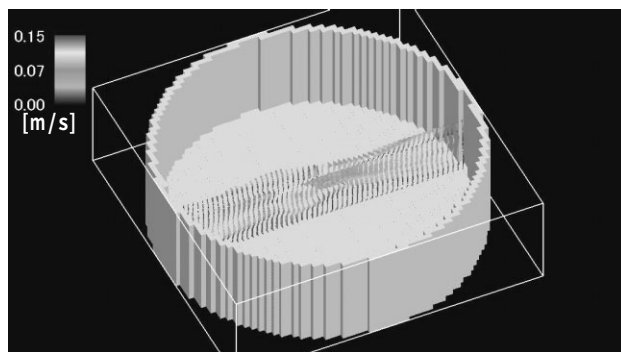
上のように、本研究で対象とした減衰ネットは地震発生直後付近の主要動による振幅低減には効果が小さいが、共振による後揺れ現象には大きな効果が認められる。本計算例の場合、最大振幅は約1/2に低減されている。

流速が最大となる(液面がほぼ水平となる) $t=30$ 秒時の x - y 断面中央部ならびに $z=0.86$ mの x - y 断面の流速ベクトルを図-10に示す。減衰ネット無しの場合、流速が大きくなる箇所は主に液面付近であり、矩形水槽による単周期加振のときのようにタンク底面の流速は大きくない。水平分布についても中央部付近ならびに加振方向壁面付近で流速が大きくなっている。これらの流速分布から、今回検討した減衰ネットの配置箇所は高速部と概ね一致し、効果的な配置であるといえる。

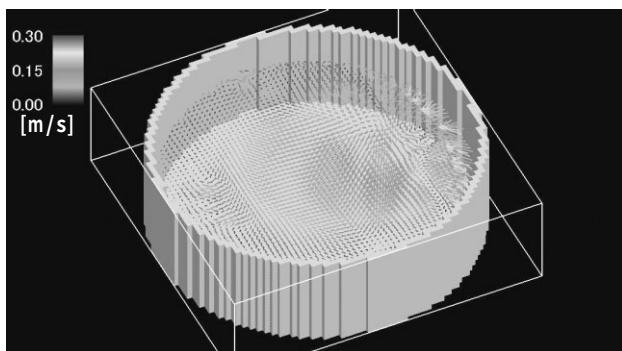
減衰ネットがある場合の流速分布は、無い場合と比べて様相が異なる。流速が最大となるのは、減衰ネットの影響により、液面付近ではなく減衰ネットより少し下の部分である。また流れ方向は加振方向ではなく、加振方向に対して斜めに配置された減衰ネットに沿った方向で



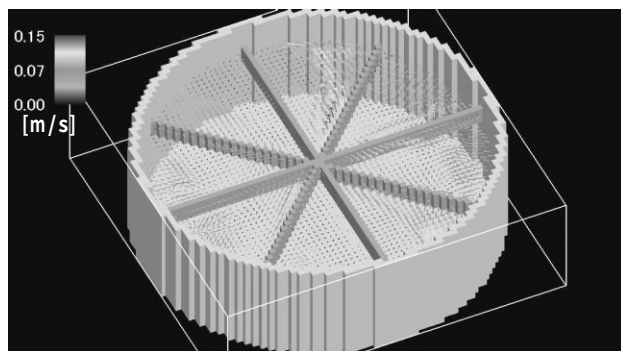
(a)x-z断面中央部(減衰ネット無し)



(b)x-z断面中央部(減衰ネット有り)



(c)x-y断面, z=0.86m(減衰ネット無し)



(d)x-y断面, z=0.86m(減衰ネット有り)

図-10 流速ベクトル(t=30sec.)

ある。

5. おわりに

スロッシング現象の解明と減衰装置の効果の評価を目的として、水面変動を考慮したLES法を貯蔵槽内液体のスロッシング現象の再現計算に適用した。本研究で採用した数値計算法の妥当性は、基本的矩形水槽の自由振動の減衰過程、単周期加振に対する応答特性、ならびにスロッシング減衰ネットの効果の再現性などを検証することにより確認された。減衰特性および共鳴振動数の正確な予測は粘性効果がどの程度捉えられているかに依存するが、本計算に用いられた計算格子数では模型スケール流れの壁面近傍流れを解像でき、粘性効果の影響も再現できることが分かった。

石油タンクの地震時スロッシング低減に対する減衰ネットの効果の確認を目的とし、検証された計算法を用いて円筒形タンク内液体の地震応答解析を実施した。減衰ネットを設置することにより、円筒形タンク内の地震時液体スロッシングは減衰ネットの無い場合に比べ最大振幅が約1/2に低減し、共振による後揺れ現象が抑制されることが確認された。また本数値流体計算によりタンク内の非定常3次元流れの詳細が観察でき、減衰ネットの効果的配置の検討などに役立てることができる

分かった。

謝辞

本研究で用いた K-NET 苫小牧の強震記録は防災科学技術研究所の K-NET より提供されたものです。記して感謝します。

参考文献

- 1) 米山望, 澤田純男, 高島大輔, 三浦正博: 数値解析を用いた円筒形タンク内スロッシング防止用ダンパーの開発, 日本流体力学学会年会2006講演論文集, CDROM, 2006.
- 2) Sussman, M., Smereka, E. and Osher, S.: A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow, *J. Comp. Phys.*, Vol.114, pp.146-159, 1994.
- 3) Hirt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of Afluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.* Vol. 39, pp.201-225, 1981.
- 4) 中山昭彦, 江田智行, 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.
- 5) 野路利幸, 吉田英敏, 立見栄司, 小坂英之, 萩生田弘: 水のスロッシングを利用した制振装置の研究(その1)装置の流体力特性と制振効果の特性, 日本建築学会構造系論文報告集第411号, pp.97-105, 1990.
- 6) 日本機械学会編: 機械工学便覧A5 流体工学, 丸善, p.86, 1986.

(2006.9.30受付)