

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

Numerical simulation of liquid sloshing in a petroleum storage tank equipped with floating damping nets due to a real earthquake

鈴木亨*・野田博**・中山昭彦***

Toru SUZUKI, Hiroshi NODA and Akihiko NAKAYAMA

* 非会員 三井住友建設株式会社 技術開発センター (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

** 非会員 博 (工) 三井住友建設株式会社 技術開発センター (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

*** 正会員 ph.D 神戸大学教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

A large-eddy simulation (LES) method of calculating the motion of liquid in a petroleum storage tank has been developed and applied to a real-scale tank during a real earthquake. The tank is equipped with damping nets attached to a floating roof. The net is modeled by a resistance to the flow and the roof is modeled by an elastic plate moving and deforming with the liquid surface. The earthquake is simulated by applying external forces in two directions observed during the Off-Tokachi Earthquake of 2003. The complex motion of the liquid surface with higher-order oscillations has been reproduced satisfactorily with the damping effects correctly reflected. The damping nets installed in the radial directions, some of which were found redundant in the case of sloshing in one fixed direction, appear to be very effective in dissipating sloshing of compound modes in arbitrary directions in a real earthquake. The presently developed numerical simulation method can be a useful tool in the design of the sloshing-control mechanisms for real-scale storage tanks.

Key Words: *Sloshing, Damper, Oil storage tank, Real earthquake, CFD, LES*

キーワード: スロッシング, 減衰, 石油タンク, 実地震動, 数値流体解析

1. はじめに

近年, 数秒から数十秒の長周期地震動による地震被害が懸念されている. このうち, 石油タンクのスロッシング被害は 1964 年に発生した新潟地震の際にも見られ, 石油タンクの損傷対策は同種事例の再発防止の観点から重要な課題となっている¹⁾²⁾.

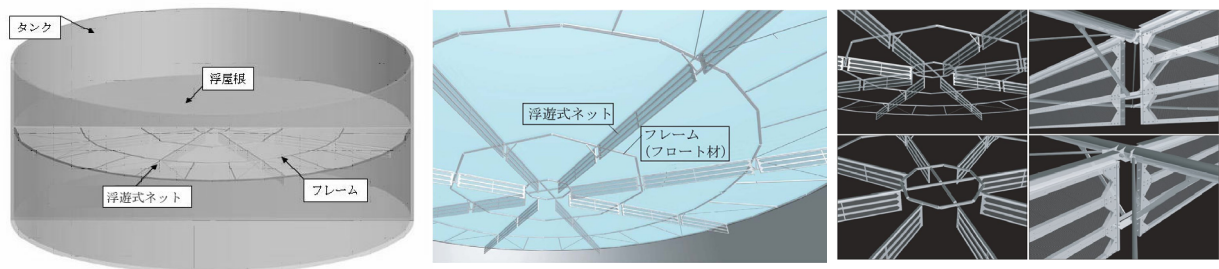
このような中, 筆者らは石油タンクの浮き屋根下面に浮遊設置されたネット (浮遊式減衰ネット) により, タンク内容液に減衰を付加し, スロッシング波高を抑制するスロッシング抑制装置を開発し, その効果について 1 方向入力による実験および解析によって検証を行ってきた. その結果, 減衰ネットの設置はスロッシング波高抑制に有効な手段であり, 内容液に付加される減衰定数はスロッシング波高と密接な関係があるとともに, 減衰ネットに発生する抵抗力は数値流体解析により再現可能であることを示した³⁾⁴⁾⁵⁾.

しかしながら, 実際の地震時には, タンク液面は 2 方向からの地震動により非常に複雑な挙動を示すと考えら

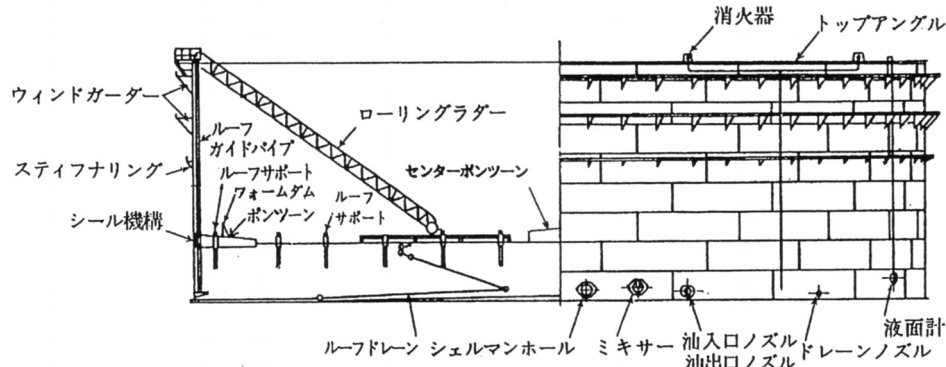
れる. 本報では, 実大タンクを対象とした 2 方向地震動同時入力による数値流体解析を実施することによって, 地震時スロッシング現象の再現と浮遊式減衰ネットによるスロッシング抑制効果の検証を行った結果について報告する.

2. 浮遊式ネットの概要

浮遊式ネットの概要を図-1 に示す. 浮遊式ネットは, フロート材と減衰材で構成されており, 石油タンクの内部 (浮き屋根の下) に設置される. フロート材はアルミニウム合金製のパイプを組み合わせたものであり, 内容液からの浮力によって浮遊する. 浮遊式ネットは浮き屋根とは接続されておらず, それ自体で自立して浮遊する構造となっている. 減衰材はフロート材に吊られた枠材にネットを取り付けたもので, 内容液が網の目を通過するときの抵抗を減衰要素として利用するものである.



図ー1 浮遊式ネットを用いた液面揺動制御装置



図ー2 実大タンクの概要

3. 実大対象タンクの概要と浮遊式減衰ネットの設計

3.1 対象タンク

本解析で対象とした実大タンクの概要を図ー2、表ー1に示す。対象としたタンクは直径 80m 級の浮き屋根式（シングルデッキ型）円筒縦型タンクである。内容液は原油、液面高さは 22.05m である。また、浮き屋根は厚さ 6mm の鋼板とした。これは、北海道内にある実在の 80m 級石油備蓄タンクの設計図によるものである。

表ー1 実大タンクの緒元

仕様	記号	数値	単位
公称容量	V	113,000	kl
タンク内径	D	82,000	mm
タンク高さ	Ht	24,500	mm
最高液面高さ	Hl	22,050	mm

上記スロッシング時の最大流速はポテンシャル理論⁷⁾から式(3)で求められ、 $u_{max}=2.630\text{m/s}$ となる。

3.2 浮遊式減衰ネットの設計

対象タンクのスロッシング周期(T_{sn})は式(1)により求めることができる⁶⁾。

$$T_{sn} = 2\pi \sqrt{\frac{D}{\varepsilon_n \cdot g} \cdot \coth\left(\frac{\varepsilon_n \cdot H_l}{D}\right)} \quad (1)$$

ここで、 D : タンク内径、 g : 重力加速度、 H_l : 液面高さ、 ε_n : 定数 (1次 3.68, 2次 10.66) である。

式(1)より求められる本タンクのスロッシング周期は1次: 10.88秒, 2次: 5.58秒となる。

また、速度応答スペクトル(S_v)から求められる1次スロッシング最大波高(η_{max})は式(2)で求めることができる⁶⁾。 $S_v=2\text{m/s}$ における地震時スロッシング最大波高は約 4m になると予測される。

$$\eta_{max} = \frac{D}{2 \cdot g} \cdot 0.837 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_s}\right) \cdot S_v = 4.04 \quad (\text{m}) \quad (2)$$

$$u_{max} = k \frac{ga}{\omega} \quad (3)$$

浮遊式減衰ネットの抵抗係数は式(4)で表される⁸⁾。

$$C_D = 6 \cdot (1 - \beta) \cdot \beta^{-2} \cdot R_{ed}^{-1/3}, R_{ed} = \frac{u \cdot d}{\beta \cdot \nu} \quad (4)$$

ここで、 β : 開口率、 R_{ed} : メッシュ径を考慮したレイノルズ数、 u : 流速(式(3)による)、 d : メッシュ径、 ν : 動粘性係数である。

本解析では減衰ネットとして開口率(β)=0.299 (ネット径(d)=0.23mm)のネットを使用することとした。また、原油の動粘性係数(ν)は $7.16 \times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ である。

上記より、本解析で使用する浮遊式減衰ネットの抵抗係数(C_D)は 3.328 となる。また、ネット高さは、実タンクにおける開放点検時における浮き屋根高さ、タンク内での浮遊式減衰ネットの組み立て時作業性を考慮して 2.0m とした。

表-2 解析モデルの概要

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	HAMAC法
乱流モデル	標準Smagorinsky Model($C_s=0.10$)
計算領域(m)	$x \times y \times z=82 \times 82 \times 30$
計算格子数	$N_x \times N_y \times N_z=63 \times 63 \times 63$
時間間隔	$\Delta t=2.0 \times 10^{-3}$
ネット抵抗係数	$C_D=3.328$, ネット高さ=2.0m
入力地震波	HKD129:十勝沖地震(K-net 苫小牧) H16:十勝沖地震(某製油所観測波)

なお、石油貯蔵タンクにおける地震時スロッシング波高は、地域係数等を考慮した計算式より導き出される「必要空間高さ (Hc)」によって規定されている。また、容量が2万キロリットル未満のタンクにおいては、Hc が2メートル以上となるものに関しては浮き屋根の損傷について検討が必要となる（総務省告示）。

4 解析概要

4.1 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算を組み込んだ方法⁹⁾である。この方法は表-2 にまとめられてい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 のダンピ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。

なお、スロッシング等の小さな減衰を扱う場合、N-S 方程式の移流項の差分近似において数値粘性が生じるため、物理的な粘性が微小な現象を扱う際には十分に注意が必要である。本解析では、文献4)において、矩形の水槽および円筒水槽で行った浮き屋根やネットがない状態での水のみ自由振動による模型実験の結果と解析結果を比較することによって解析の妥当性を検証し、その影響が小さいことを確認し解析を進めた。また、本計算の移流項の差分化は3次風上差分を用いており、数値粘性を小さくしている。

解析モデルの形状を図-3、表-2に示す。

また、流体の運動方程式を以下に示す。

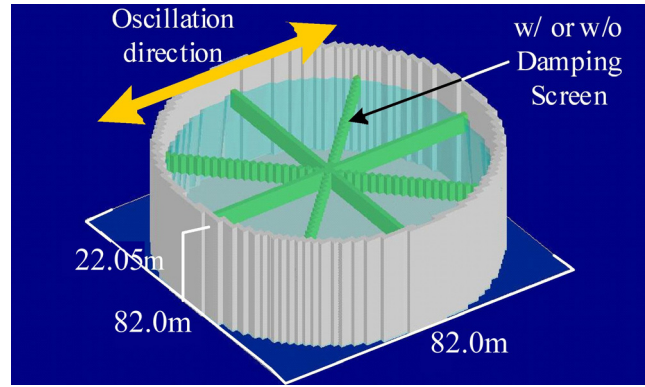


図-3 解析モデル

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i'' u_j''}) - g \delta_{i3} + f_{di} + e_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6) \text{ 連続の式}$$

$$\overline{u_i'' u_j''} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k_{sgs} \delta_{ij} \quad (7) \text{ SGS 応力}$$

$$k_{sgs} = \frac{\nu_t^2}{(C_k \Delta)^2} \quad (8) \text{ 乱流エネルギーの SGS 成分}$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]^{1/2} \quad (9) \text{ 標準スマゴリンスキーモデル}$$

$$\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3} \quad (10) \text{ 粗視化スケール}$$

$$f_{di} = C_D \cdot \left(\frac{A}{2L^3} \right) \cdot \bar{u}_i \sqrt{\bar{u}_j^2} \quad (11) \text{ メッシュ抵抗力}$$

$\bar{u}_i$: i 方向流速, x_i : i 方向長さ, p : 圧力, ρ : 流体密度,

ν : 動粘性係数, g : 重力加速度,

f_{di} : i 方向のメッシュ抵抗力, C_D : メッシュ抵抗係数,

A : メッシュ面積, L^3 : メッシュ体積

e_i : i 方向地震動加速度

である。

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 (式(11))。

4.2 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-4 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、

$$\Delta h = \frac{\partial u}{\partial x} \partial z \partial t + \frac{\partial v}{\partial y} \partial z \partial t + w \partial t \quad (12)$$

が得られる。ここで、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、

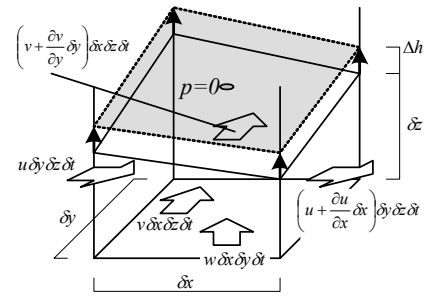
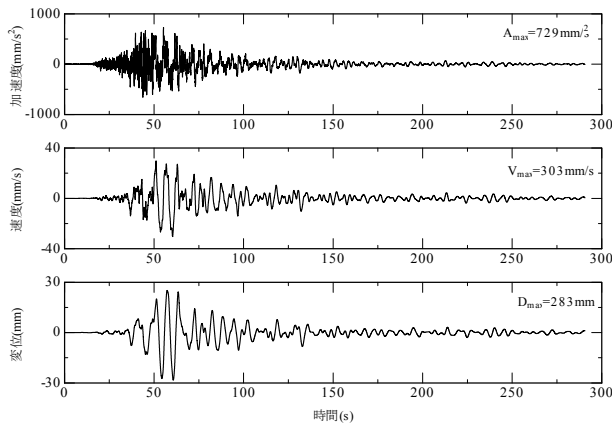
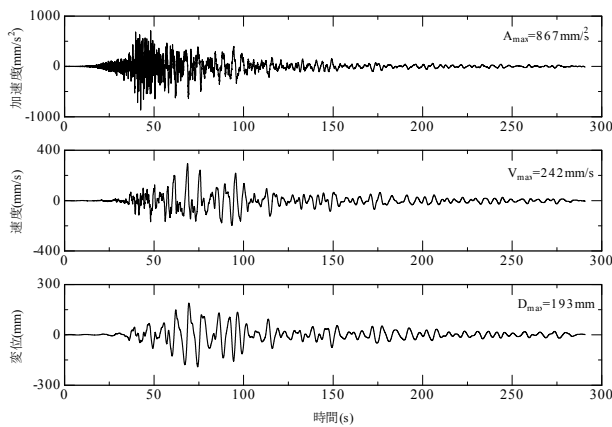


図-4 自由液面位置と速度 Flux の関係

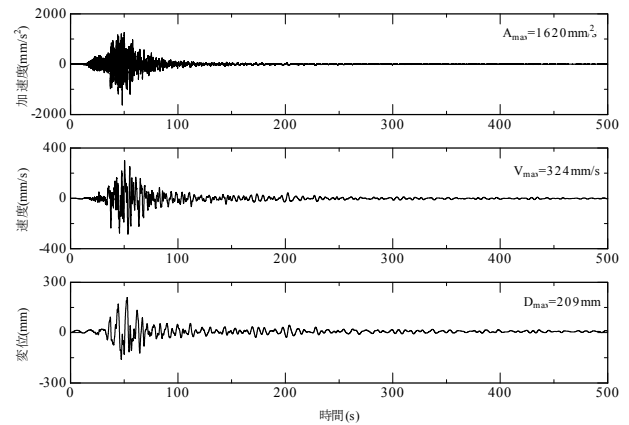


(a) HKD129(EW)

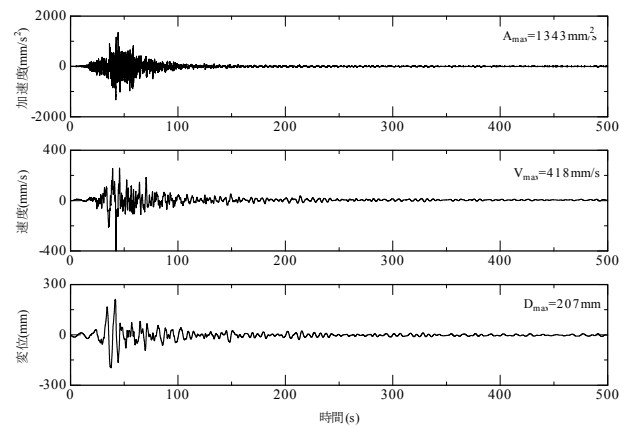


(b) HKD129(NS)

図-5 入力地震波の時刻歴 (HKD129)



(a) H16(EW)



(b) H16(NS)

図-6 入力地震波の時刻歴 (H16)

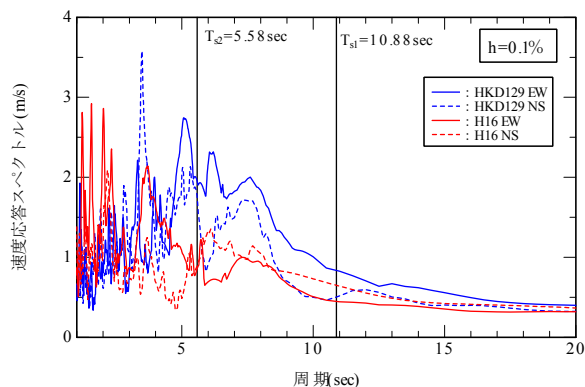


図-7 入力地震波の速度応答スペクトル

表-4 解析パラメータ

	入力地震波	
	HKD129	H16
内容液のみ	○	—
浮き屋根のみ	○	○
浮き屋根+減衰ネット	○	○

δ_z は計算セル内の水面高さ、 δ_t 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(12)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。

4.3 浮き屋根の再現方法

水面上に設置されている浮き屋根の効果は、浮き屋根を薄板曲げ要素と仮定し、液面と同じ形状の曲げ変形を生じさせる力の反力を水面に加えることにより再現した。ここで流体解析により求めた自由水面変位は局所的に微小な変位を伴っており、この微小変形を考慮するとそこに局所的に大きな反力が生じる。そこで、反力を算出するときの水面変位はスロッシングの1次モードと2次モードのみ考慮することとし、水面変位を式(7)により最小2乗近似を行い、近似した変形形の反力を求めた。

$$h'(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 \sin(\lambda_1 x) + a_5 \cos(\lambda_1 x) + a_6 \sin(\lambda_2 x) + a_7 \cos(\lambda_2 x) + a_8 \sin(\lambda_1 y) + a_9 \cos(\lambda_1 y) + a_{10} \sin(\lambda_2 y) + a_{11} \cos(\lambda_2 y) \quad (13)$$

ここで、 h' : 近似された自由水面、 $a_1 \sim a_{11}$: 近似係数、 λ_1, λ_2 : それぞれスロッシング1次モード、2次モードの波長である。

反力は水両を押す力（下方への力）のみ考慮し、薄板が水両を引っ張る力（上方への力）は加えていない。薄板の曲げ変形に伴う反力はACM要素によるFEM計算により求めた。

4.4 入力地震波と解析パラメータ

入力地震動は、2003年9月26日に発生した十勝沖地震で2か所にて観測された実地震波（HKD129（K-net 苫小牧））、（H16（苫小牧市内某製油所））である。観測された地震波の時刻歴波形を図-5、6に示す。また、 $h=0.1\%$ の速度応答スペクトルを図-7に示す。

解析パラメータの一覧を表-4に示す。解析は2種類の地震波に対して内容液のみ（HKD129のみ実施）、浮き屋根設置時、浮き屋根+浮遊式減衰ネット設置の計5ケースについて、地震動をEW・NS方向同時に入力して行った。

5 解析結果

5.1 減衰ネットなしによる解析結果

HKD129入力による、浮き屋根有無の比較を図-8に示す。また、H16入力における浮き屋根あり（減衰ネットなし）の応答を図-9に示す。図はタンク端部の波高時刻歴である。図-8,9には各時刻歴波形のFFT結果をあ

わせて示す。

図-8において、浮き屋根の設置による応答の変化はほとんどなかった。過去に実施した模型実験³⁾では浮き屋根を設置することによって減衰効果が発揮されたが、実タンクにおいては、浮き屋根がスロッシング性状に与える影響は非常に小さいと考えられる。ただし、今回の解析においては浮き屋根を単一板の弾性として扱っていること、および、実際の浮き屋根では周辺部にポンツーン（浮き材）があること等を考慮しなければならず、実際にはスロッシングによる液面変化に伴う浮き屋根の塑性化（破損）を含めた更なる検討が必要と考える。

減衰ネットが設置されていない場合、最大波高は地震主要動後の後揺れの段階で発生する傾向にあり、一度発生したスロッシングは減衰することなく地震動終了まで継続している。

また、図-8,9に示す応答波形のFFT解析結果より、スロッシングは2～4次の高次モードを含んだものとなっている。特に、浮き屋根なしによるHKD129入力においては2次モードの影響が顕著であり、これは、これは図-7に示す入力地震動の速度応答スペクトルに見られるように、2次モードによる共振を起こしているためと考えられる。この2次モードは浮き屋根を設置することによって抑えられている。

なお、参考文献10)では、浮き屋根がない場合の自由液面での減衰は一次モードで0.4%、二次モードでは0.5～0.8%、三次モードでは1%程度、これに対して浮き屋根のある場合の一次モードの応答は浮き屋根がないときとほとんど同様であり減衰定数は0.5%、また、浮き屋根がある場合のスロッシング二次モード以上では、見かけの減衰作用が極めて大きくなり、5～10%相当になったと報告されている。

一般に地震時のスロッシング高さは2次モードまでを考慮して速度応答スペクトル($h=0.1\%$)を用いて式(14)、(15)で表すことができる¹¹⁾。(式(2)は式(14)の1次モードを表したものである。)

$$\eta_{\max}^{(n)} = \frac{D}{2 \cdot g} \cdot \frac{2}{\alpha_n^2 - 1} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_s} \right) \cdot S_v \quad (14)$$

$$\eta_{\max} = \sqrt{(\eta_{\max}^{(1)})^2 + (\eta_{\max}^{(2)})^2} \quad (15)$$

ここで、 $\eta_{\max}^{(n)}$: n 次モードの最大波高、 α_n : 定数（1次1.841、2次5.331）

図-7の速度応答スペクトルから式(14)、(15)を用いて算出される各入力波の最大波高計算値一覧と解析値の比較を表-5に示す。表-5より、一部計算値が解析値より大きくなっているところがあるが、これは浮き屋根による影響および2方向入力による影響と考えられ、全体的に両者は良い対応を示している。

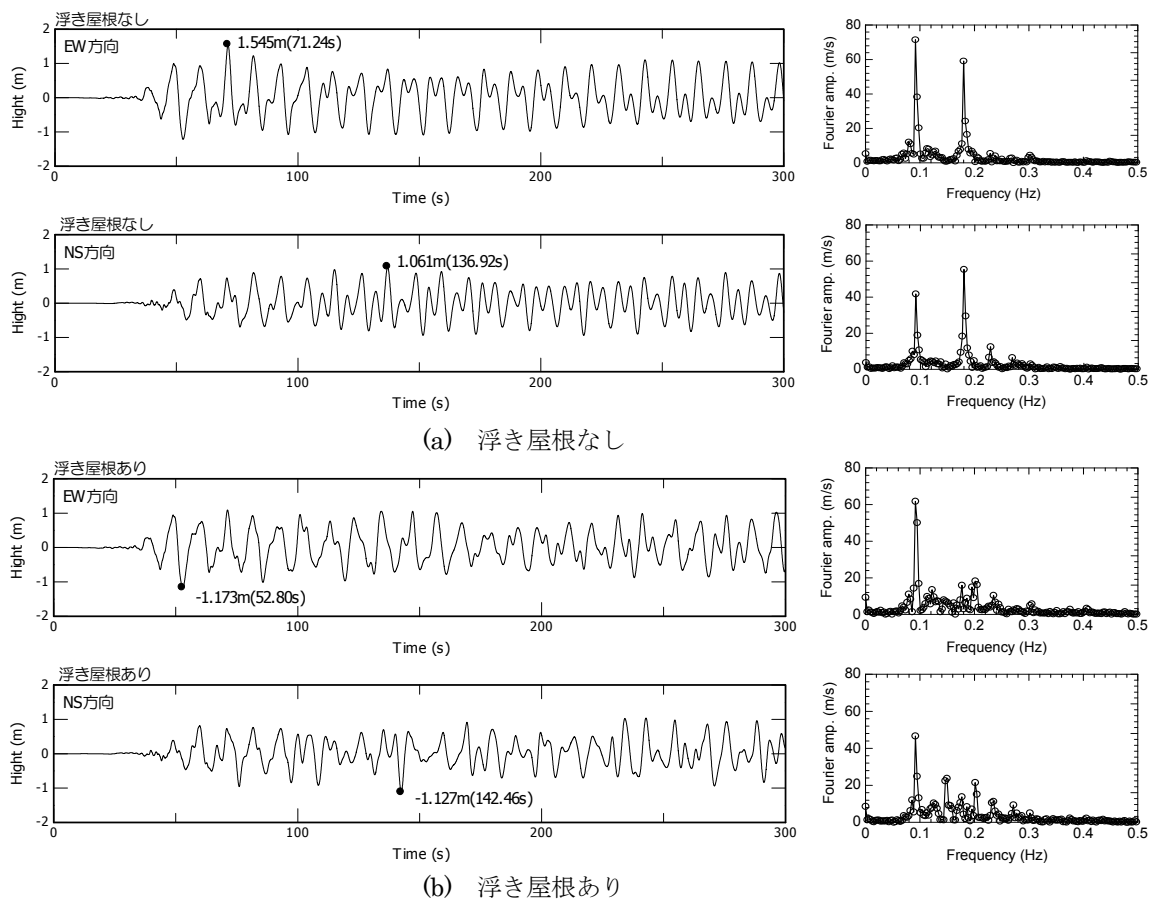


図-8 浮き屋根の有無による応答比較(HKD129)

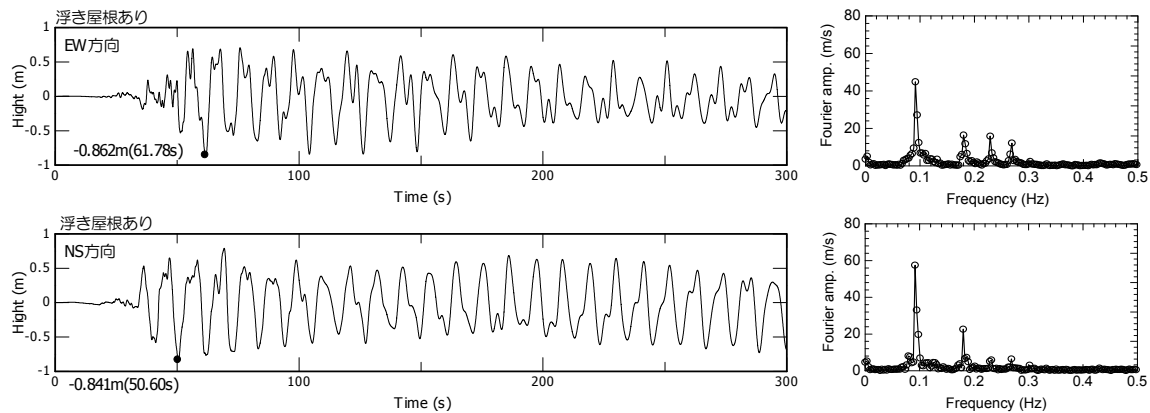
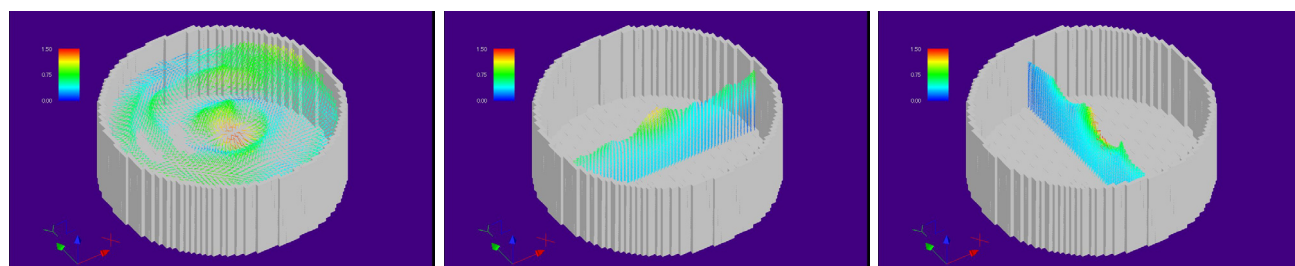


図-9 浮き屋根あり（減衰ネットなし）による応答

表-5 最大波高の比較

		HKD129		H16	
		EW	NS	EW	NS
解析による最大値 (m)	浮き屋根なし	1.545	1.061	—	—
	浮き屋根あり	-1.173	-1.127	-0.862	-0.841
式(14),(15)による計算値(m)		1.795	1.191	0.895	1.289



(a) X-Y 断面 (水面)

(b) X-Z 断面

(c) Y-Z 断面

図-10 流速ベクトル (HKD129 Time=84 秒)

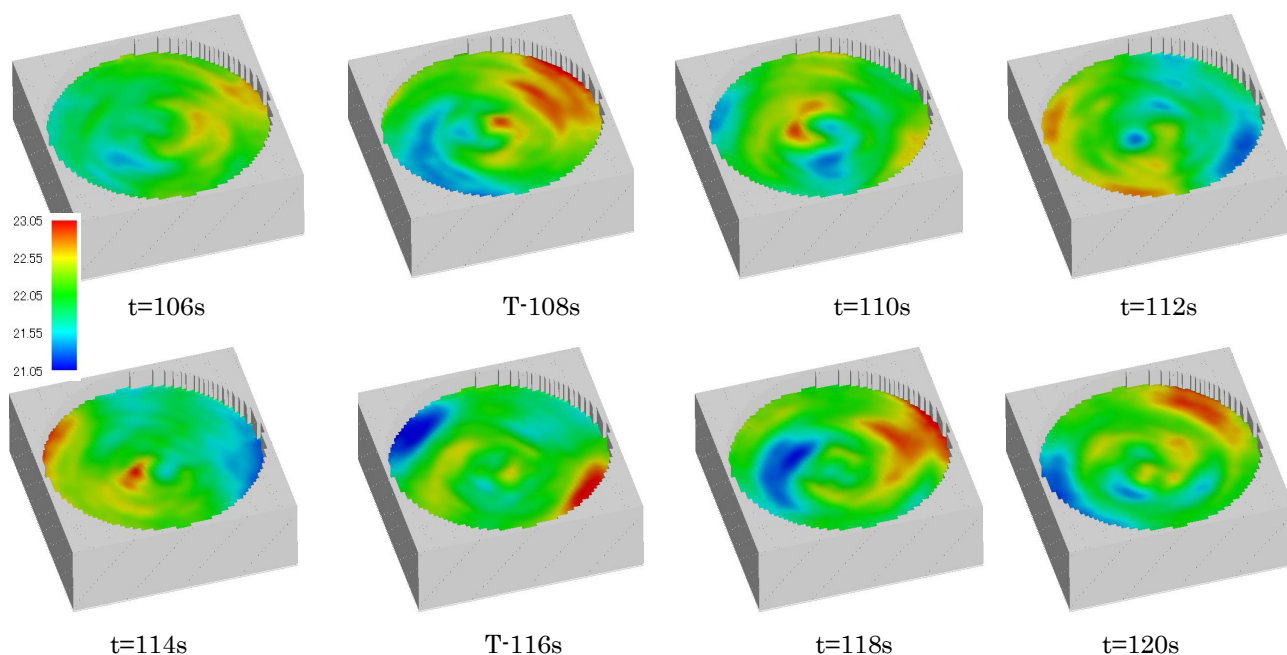


図-11 液面高さの変化 (HKD129)

図-8(b) (HKD129 入力) における Time=84 秒 (タンク端部における波高が EW, NS 方向ともにほぼ 0 となる) における液面付近の流速ベクトルを図-10 に示す。図-10 より、流速が大きくなるのは液面付近であり、今回提案する浮遊式減衰ネットの配置が液面の流速を抑制する上で有効であることがわかる。

また、波高が大きくなる Time=108 秒前後における液面高さを図-11 に示す。高次モードが現れ複雑な液面形状になるとともに、2 方向入力の影響により渦を巻くような複雑な流れとなっている。この現象は 1 方向入力時には見られない現象であるとともに、タンク端部の波高

時刻歴では表現できない現象であり、本数値流体解析によって 2 方向入力による複雑な流れを再現できている。

5.2 浮遊式減衰ネットの効果

浮遊式減衰ネットを設置したときのタンク端部波高応答時刻歴および FFT 結果を図-12, 13 に示す。波高の最大値は地震の主要動直後に発生しており、最大波高発生後は地震の後揺れによる増幅は見られない。最大波高は

減衰ネット無しに比べて最大 24%減少している。

HKD129 入力時における、浮き屋根のみ、および減衰ネットを設置した場合の Time=52,78,142 秒における液面高さを図-14 に示す。減衰ネットの効果によってスロッシングが抑制されている状態を確認することができる。また、HKD129 入力時における、EW 方向・NS 方向ともにタンク端部の波高がほぼ 0 となる Time=90 秒における浮遊式減衰ネット設置時の流速ベクトルを図-15 に示す。水面は非常に複雑な動きをしており局所的に流速が速くなっている部分が観察できる。また、減衰ネット設置時にも液面は渦を巻くような複雑な挙動を示しており、放射状に配置した浮遊式減衰ネットが有効に作用していると考えられる。

5.3 減衰定数の評価

解析で得られた波高時刻歴をもとに、一次スロッシング周期に関して RD 法により減衰定数を算出した。

フィルタは FFT で得られた一次スロッシング振動数 ($f_c=0.095\text{Hz}$) を中心周波数とする band 幅 (α) = 0.04Hz の cosine 波とし、切り出す波形は 50 秒間とした。

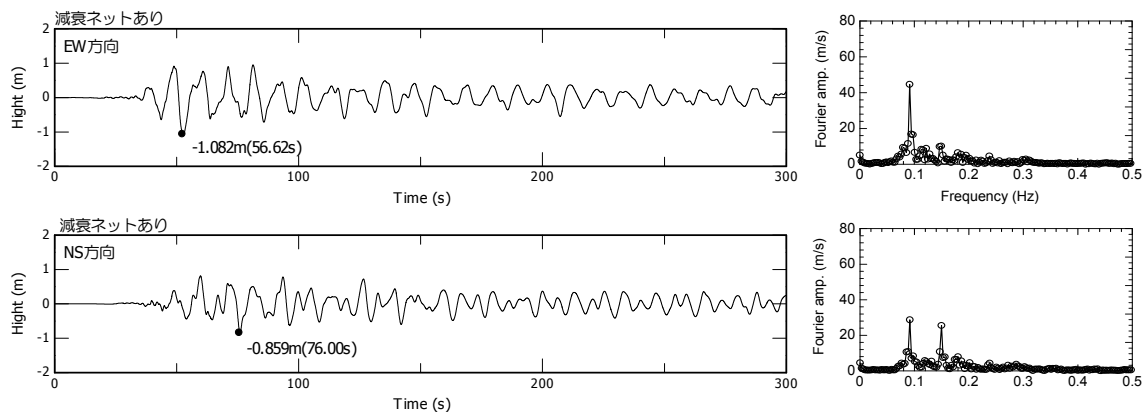


図-12 減衰ネットありの応答波形 (HKD129)

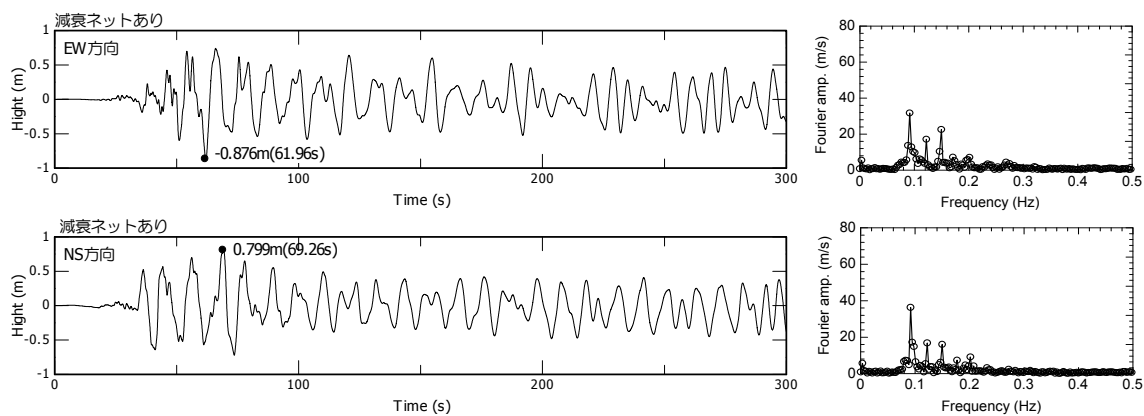


図-13 減衰ネットありの応答波形 (H16)

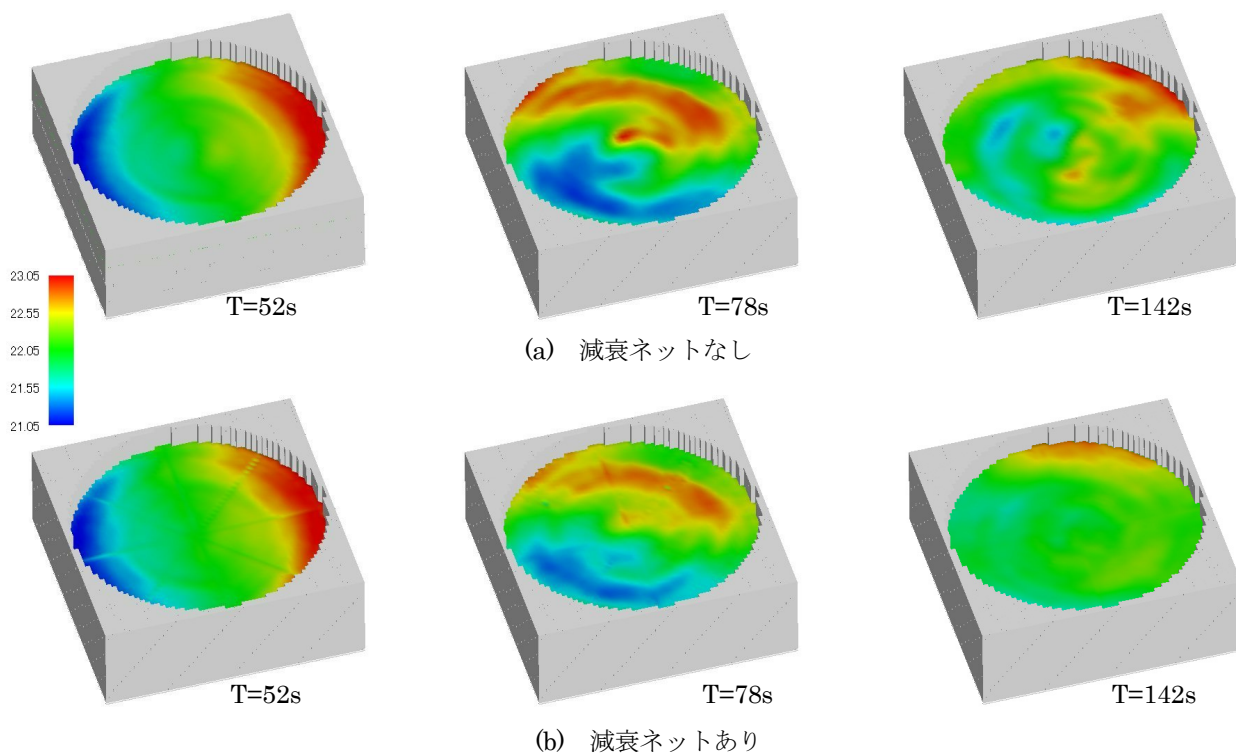


図-14 液面高さ (HKD129)

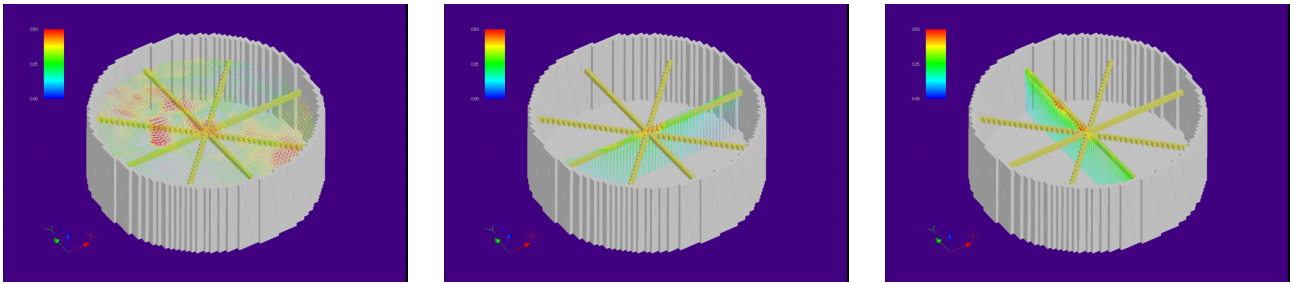


図-15 流速ベクトル (HKD129 ネットあり T=90 秒)

表-6 RD 法による減衰定数 (%)

入力地震波	HKD129		H16	
	EW方向	NS方向	EW方向	NS方向
水のみ	0.30	0.66	—	—
浮き屋根あり	0.38	0.34	0.73	0.06
浮き屋根+減衰ネット	0.89	1.06	1.32	0.37
減衰ネットによって付加された減衰	0.51	0.72	0.59	0.31

また、入力による過渡応答の影響を除去するため、80 秒以前の波形は無視することとした。減衰定数は、得られた振動波形を減衰自由振動とみなして次式によりフィッティングすることにより求めた。

$$D(t) = a \cdot \exp^{-h\omega_0 t} \cdot \cos \sqrt{1-h^2} \omega_0 \cdot t \quad (16)$$

ここで、 a ：初期変位、 ω_0 ：固有角振動数、 h ：減衰定数

RD 法の適用にあたっては、フィルタのバンド幅のとり方によって得られる減衰定数が変わってくる（バンド幅が広すぎる場合に減衰定数が過大に評価される）。また、RD 法は常時微動等のランダムな応答に適用されるものであり、本質的に非定常である地震応答波形に適用する場合は、得られた減衰定数の評価には十分注意する必要がある。本評価では、得られた時刻歴波高に対して、同一の条件により RD 法を適用することによって浮遊式減衰ネットの効果について評価を行うものである。

各解析時刻歴波高に対して RD 法を適用して求められた一次スロッシング周期に対する減衰定数の一覧を表-6 に、HKD129 入力時における減衰自由振動波形を図-16 に示す。

「水のみ」および「浮き屋根あり」の場合の減衰定数はばらついており、一部、浮き屋根をつけることによって「水のみ」に比べて減衰が小さくなっているものもある。この原因としては、RD 法におけるフィルタ band 幅の設定のしかたや、直行方向の加振の影響（EW 方向の加振によっても NS 方向端部の波高が変化する）等が考えられるが、今後、さらなる検討が必要である。

減衰ネットを設置した場合、「浮き屋根あり」に比べて減衰定数が大きくなっており、その差は 0.31%～0.72%であった。この数値が減衰ネットによって付加さ

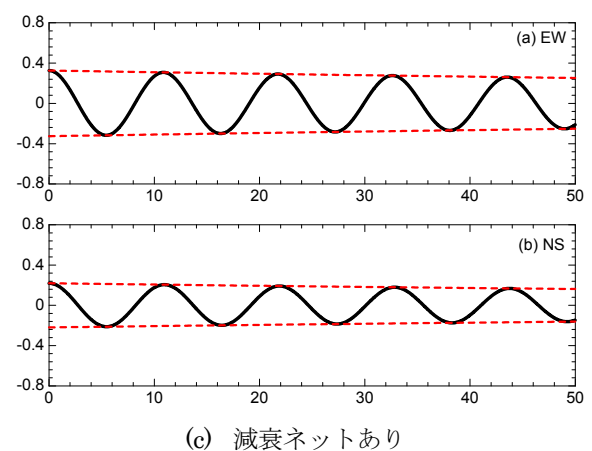
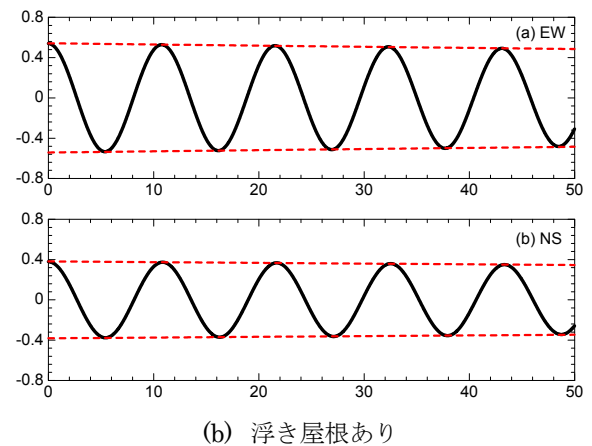
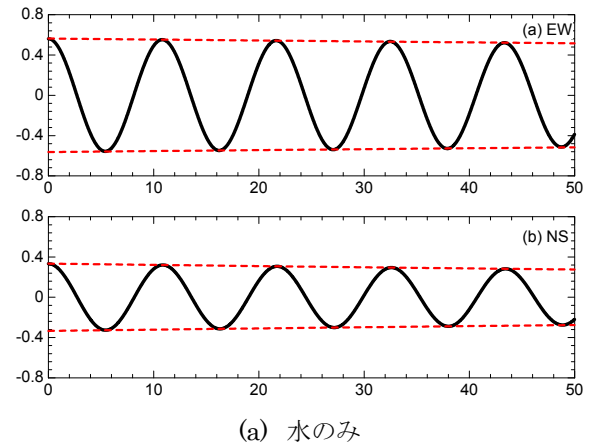


図-15 RD 法による減衰自由振動波形(HKD129)

れた減衰定数と判断できる。

6 まとめ

浮遊式減衰ネット実タンクに適用する場合、あらゆる方向から来る地震動に対してどのような挙動をするかの確に把握することが重要である。本報は、80m 級実大タンクを対象として地震動 2 方向同時入力による数値流体解析を実施し、スロッシング現象の把握と浮遊式減衰ネットの効果の検証を行った。

本報で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ・今回提案した数値流体解析手法は 2 方向入力に対しても適用可能であり、浮遊式減衰ネットの設計を行う有効なツールとして活用が可能である。
- ・本解析においては浮き屋根の設置によるスロッシング一次モードに与える影響は少なかった。
- ・地震波応答において石油タンクの液面は高次モードを含んだ非常に複雑な挙動を示すが、数値流体解析による最大波高は速度応答スペクトル法を用いた既往の推定式と概ね一致した。
- ・浮遊式減衰ネットを設置しない場合のスロッシングの最大波高は地震の主要動が終わったあとの後揺れ段階で発生する傾向にある。
- ・浮遊式減衰ネットを設置することによって、スロッシング現象は最大波高が地震の主要動直後に発生した後減少する傾向を示し、2 方向入力においても浮遊式減衰ネットの有効性を確認できた。また、液面が渦を巻くような複雑な流れとなることから、放射状に配置したネットが有効に作用していると考えられる。
- ・波高時刻歴波形 RD 法を適用し浮遊式減衰ネットによって付加される減衰定数を算出した。その結果、減衰ネットによって付加される減衰定数は 0.31%~0.72% となった。

今後、浮き屋根が塑性化した場合、あるいはダブルデッキの場合の浮き屋根に与える影響を明確にし、実設計に反映させる必要がある。

また、今回の解析では、入力地震動の卓越周期とスロッシング一次周期は一致していない。参考文献 3)では、浮遊式減衰ネットは共振現象を起こした際に大きな効果が

が得られることを実験で確認しているが、今後、さまざまな地震動による検証と、最適な減衰ネット量の算定方法の確立が必要である。

さらに、本報で検証された解析手法を用いることによって、浮遊式減衰ネット全体の設計法の確立とタンク本体に与える影響についてさらなる検討を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) 危険物保安技術協会：屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書，2004.9
- 2) 畑山健，座間信作，西晴樹，山田實，廣川幹浩：2003 年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害，地震，第 57 巻，第 2 号，2004.12
- 3) 鈴木亨，谷垣正治，中南滋樹，野田博：浮遊式ネットを用いた石油タンクの液面揺動制御装置の開発，日本建築学会技術報告集 第 26 号，pp.469~474 2007.12
- 4) 野田博，谷垣正治，鈴木亨，中南滋樹：CFD による石油タンク内のスロッシング現象と浮遊式ネットの減衰効果の再現，三井住友建設技術研究所報告 第 5 号，pp.185~191，2007.9
- 5) 鈴木亨，中山昭彦，野田博：浮遊式ネットを用いた石油タンク液面揺動制御装置の減衰機構，応用力学論文集 Vol.12，pp.563~570，土木学会，2009.8
- 6) 容器構造設計指針・同解説，日本建築学会，1996.12
- 7) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，1992
- 8) 日本機械学会編：機械工学便覧 A5 流体力学，丸善，pp.86，1986
- 9) 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
- 10) 危険物保安技術協会「屋外タンクの貯蔵所浮屋根審査基準検討会 報告書」，2004.9
- 11) 坂井藤一：円筒形液体タンクの耐震設計法に関する 2,3 の提案，圧力技術，18，pp.16~23，1980

(2010 年 3 月 9 日 受付)