

# 浮遊式減衰ネット付石油貯蔵タンク液面の地震応答解析

## Earthquake Response Analysis of Liquid Sloshing in a Petroleum Storage Tank with Floating Nets

鈴木 亨 TORU SUZUKI  
野田 博 HIROSHI NODA

浮遊式減衰ネットを用いた石油タンクの地震時液面運動制御手法について、実大タンクモデルによる2方向地震波同時入力数値流体解析を実施し、その効果の検証を行った。2方向地震波入力時、石油タンク液面は高次モード・回転運動を含んだ複雑な挙動を示す。特に渦を巻くような回転運動は1方向入力時には見られない応答であり、今回提案した解析手法は、2方向地震波入力時の複雑な挙動を再現することができ、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。

**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

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 with floating nets during a real earthquake. The complex motion of the liquid surface with higher-order oscillations has been reproduced satisfactorily with the damping effects correctly reflected. 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)

### 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<sup>1),2)</sup>。

このようななか、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<sup>3),4),5)</sup>。

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. 浮遊式減衰ネットの概要

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。

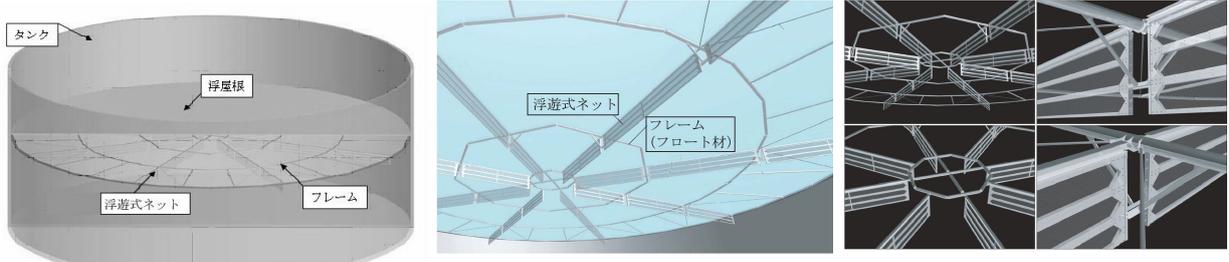


図-1 浮遊式ネットを用いた液面揺動制御装置

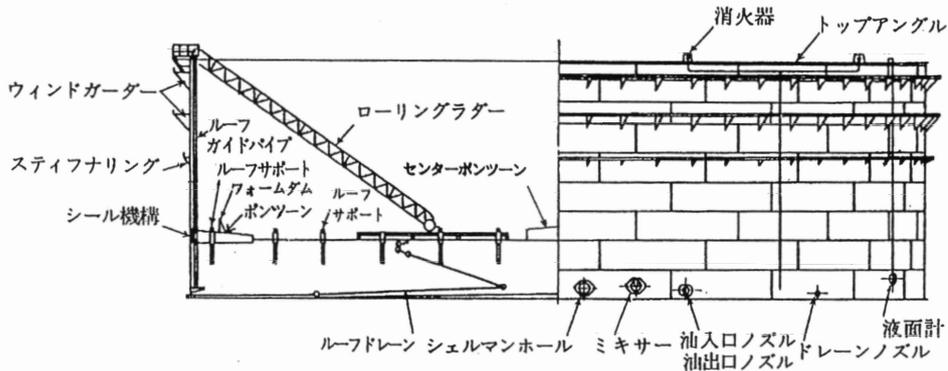


図-2 実大タンクの概要

### 3. 実大対象タンクの概要と浮遊式減衰ネットの設計

#### (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-2、表-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、浮き屋根は厚さ 6mm の鋼板とした。

#### (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<sup>6)</sup>。

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

ここで、 $D$ ：タンク内径、 $g$ ：重力加速度、 $H_l$ ：液面高さ、 $\varepsilon_n$ ：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 ( $\eta_{max}$ ) は式(2)で求めることができる<sup>6)</sup>。 $S_v=2\text{m/s}$  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。

表-1 実大タンクの諸元

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

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

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

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

浮遊式減衰ネットの抵抗係数は式(4)で表される<sup>8)</sup>。

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

ここで、 $\beta$ ：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、 $\nu$ ：動粘性係数である。

本解析では減衰ネットとして開口率 ( $\beta$ ) = 0.299（ネット径 ( $d$ ) = 2.3mm）のネットを使用することとした。原油の動粘性係数 ( $\nu$ ) 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への適用を考慮して 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苦小牧) H16: 十勝沖地震 (某製油所観測波)

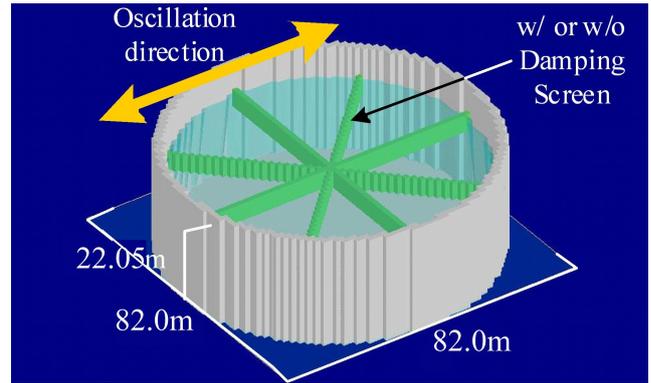


図-3 解析モデル

#### 4. 解析概要

##### (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<sup>9)</sup>である。この方法は表-2 に示すように、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。乱流応力および粘性応力項とも 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。解析モデルの概要を図-3、表-2 に示す。

##### (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、

$$\Delta h = \frac{\partial u}{\partial x} \partial z \partial t + \frac{\partial v}{\partial y} \partial z \partial t + w \partial t \quad (5)$$

が得られる。ここで、u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速、 $\delta_z$  は計算セル内の液面高さ、 $\delta_t$  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(5)にて  $\Delta h$  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。

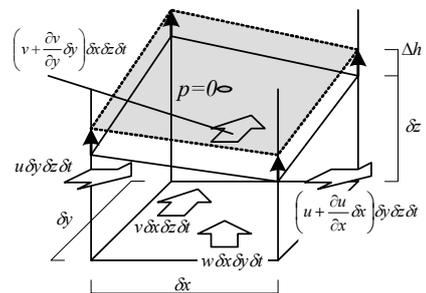


図-4 自由液面位置と速度 Flux の関係

##### (3) 減衰ネットの再現方法

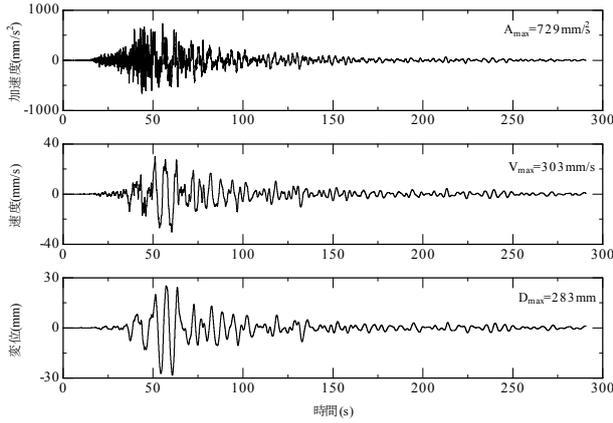
スロッシング低減のための減衰ネットは、網を通過する流速により抵抗を及ぼす効果のみがあると仮定し、運動方程式に次のような外部抵抗力を付加することによりモデル化した。

$$F_i = C_D \cdot \left( \frac{A}{2L^3} \right) \cdot u_i \sqrt{u_j \cdot u_j} \quad (6)$$

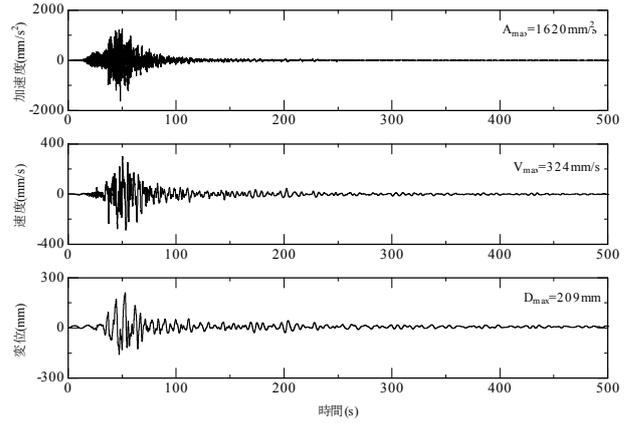
ここで、 $F_i$ : i 方向抵抗力,  $C_D$ : 抵抗係数,  $A$ : ネット面積,  $L^3$ : 解析におけるネット部分のメッシュ体積,  $u_i(u_j)$ : 方向流速 (x 方向:  $i(j)=1$ , y 方向:  $i(j)=2$ , z 方向:  $i(j)=3$ ) である。

##### (4) 浮き屋根の再現方法

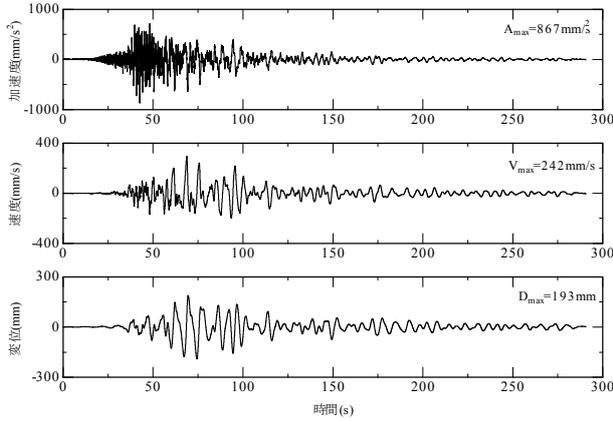
液面上に設置されている浮き屋根の効果は、浮き屋根を薄板曲げ要素と仮定し、液面と同じ形状の曲げ変形を生じさせる力の反力を液面に加えることにより再現した。ここで、流体解析により求めた自由液面変位は局所的に微小な変位を伴っており、この微小変形を考慮するとそこに局所的に大きな反力が生じる。そこで、反力を算出するときの液面変位はスロッシングの 1 次モードと 2 次モードのみ考慮することとし、液面変位を式(7)により最小 2 乗近似を行い、近似した変形形の反力を求めた。



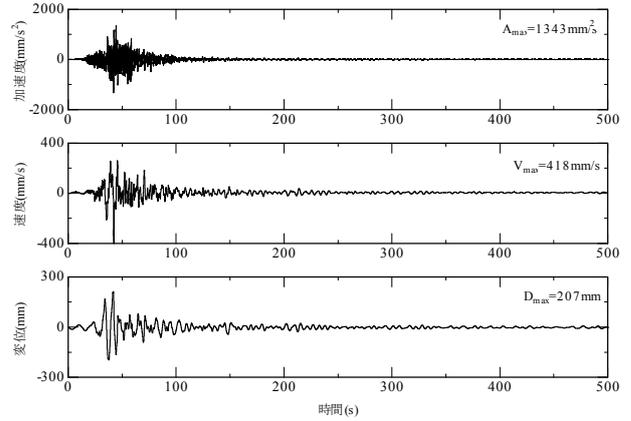
(a) HKD129(EW)



(a) H16(EW)



(b) HKD129(NS)



(b) H16(NS)

図-5 入力地震波の時刻歴 (HKD129)

図-6 入力地震波の時刻歴 (H16)

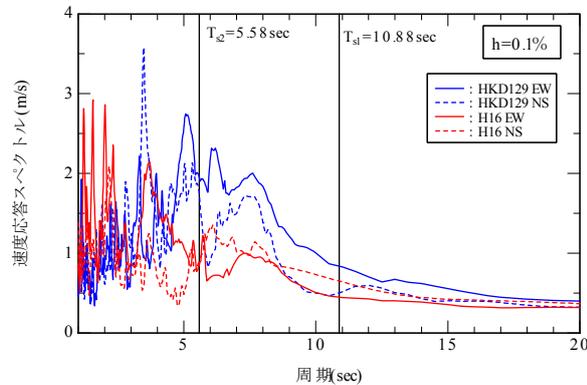


図-7 入力地震波の速度応答スペクトル

$$\begin{aligned}
 h'(x,y) = & a_1 + a_2x + a_3y \\
 & + a_4 \sin(\lambda_1x) + a_5 \cos(\lambda_1x) + a_6 \sin(\lambda_2x) + a_7 \cos(\lambda_2x) \\
 & + a_8 \sin(\lambda_1y) + a_9 \cos(\lambda_1y) + a_{10} \sin(\lambda_2y) + a_{11} \cos(\lambda_2y)
 \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $h'$ ：近似された自由液面， $a_1 \sim a_{11}$ ：近似係数， $\lambda_1, \lambda_2$ ：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。

反力は液面を押す力（下方への力）のみ考慮し，薄板が液面を引っ張る力（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

表-3 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	○	○

により求めた。

(5) 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箇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，図-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-3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

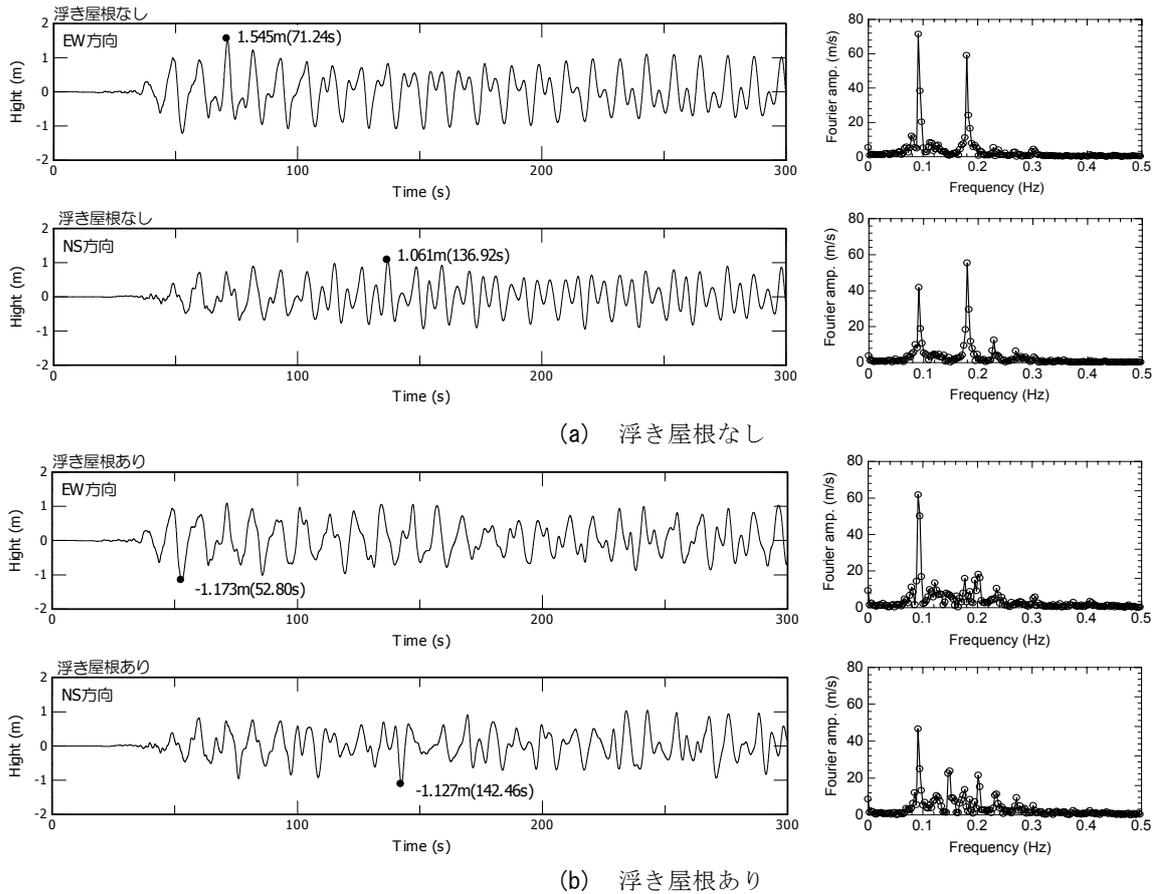


図-8 浮き屋根の有無による応答比較(HKD129)

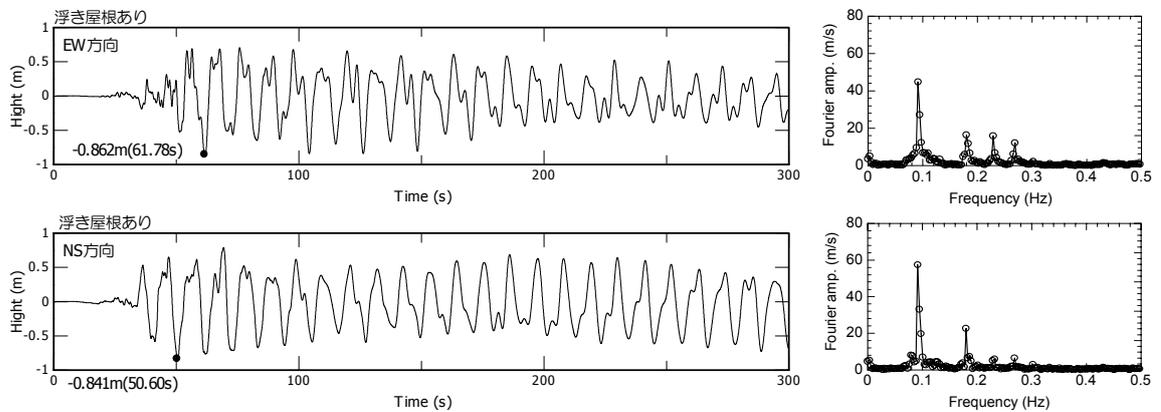


図-9 浮き屋根あり（減衰ネットなし）による応答(H16)

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

### (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、図-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<sup>3)</sup>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）があることなどを考慮しなければならず、実

表-4 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(8), 式(9)による計算値(m)		1.795	1.191	0.895	1.289

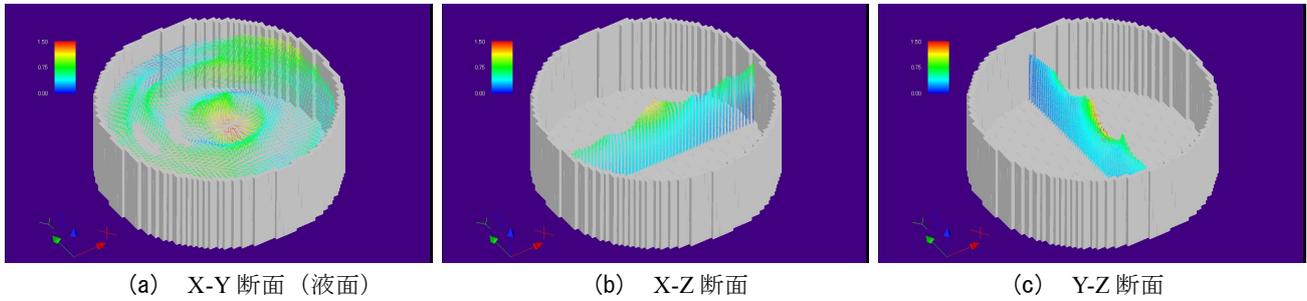


図-10 流速ベクトル (HKD129 Time=84秒)

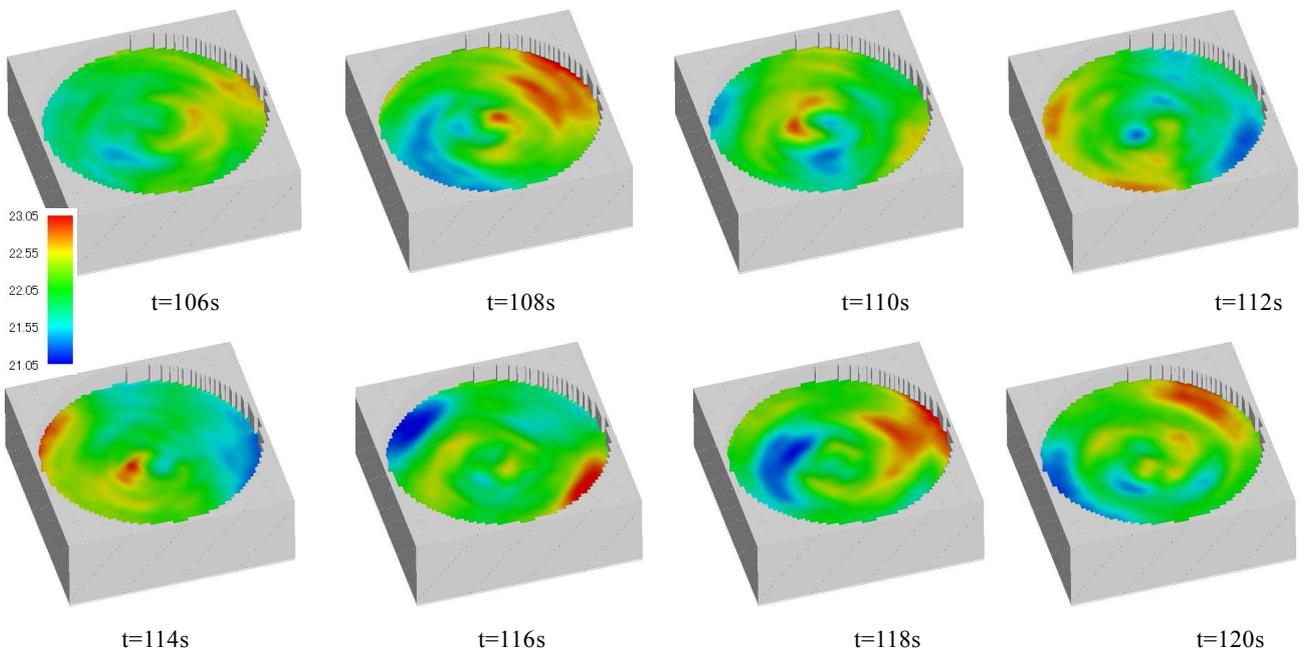


図-11 液面高さの変化 (HKD129)

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）を含めたさら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後まで継続している。

また、図-8、図-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1)では、浮き屋根がない場合の自由液面での減衰は1次モードで0.4%、2次モードでは0.5～0.8%、3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1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2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(8)、

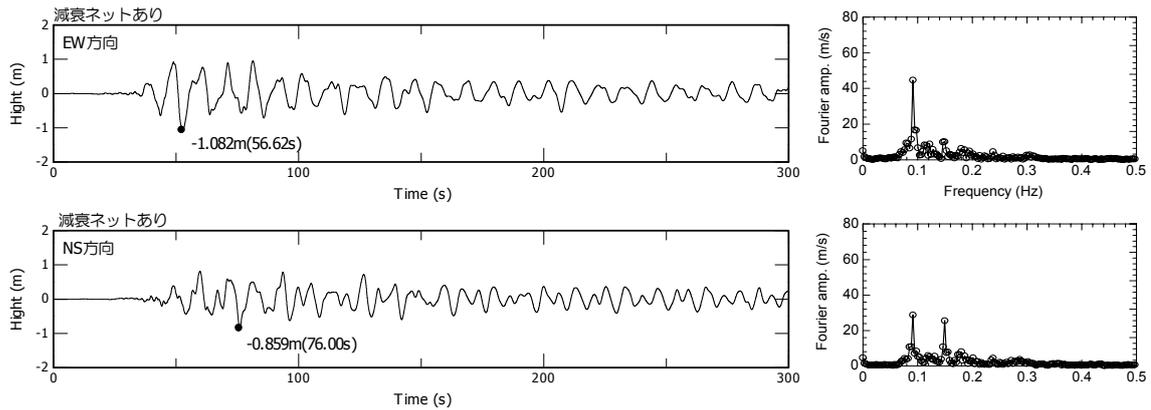


図-12 減衰ネットありの応答波形 (HKD129)

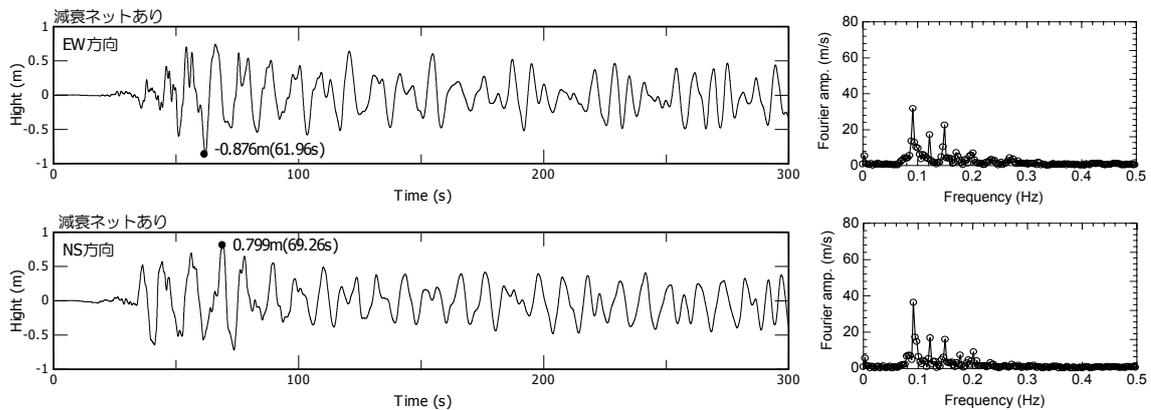


図-13 減衰ネットありの応答波形 (H16)

式(9)で表すことができる<sup>10)</sup>。(式(2)は式(8)の1次モードを表したものである。)

$$\eta^{(n)}_{\max} = \frac{D}{2 \cdot g} \cdot \frac{2}{\alpha_n^2 - 1} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi}{T_s} \right) \cdot S_v \quad (8)$$

$$\eta_{\max} = \sqrt{(\eta^{(1)}_{\max})^2 + (\eta^{(2)}_{\max})^2} \quad (9)$$

ここで、 $\eta^{(n)}_{\max}$  :  $n$  次モードの最大波高、 $\alpha_n$  : 定数 (1次 1.841, 2次 5.331) である。

図-7 の速度応答スペクトルから式(8)、式(9)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-4 に示す。表-4 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(b) (HKD129 入力) における Time=84 秒 (タンク端部における波高が EW 方向・NS 方向ともほぼ 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

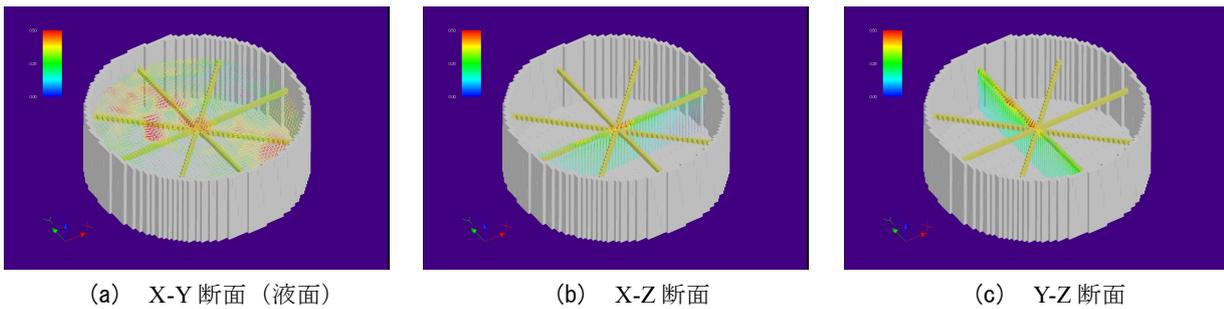
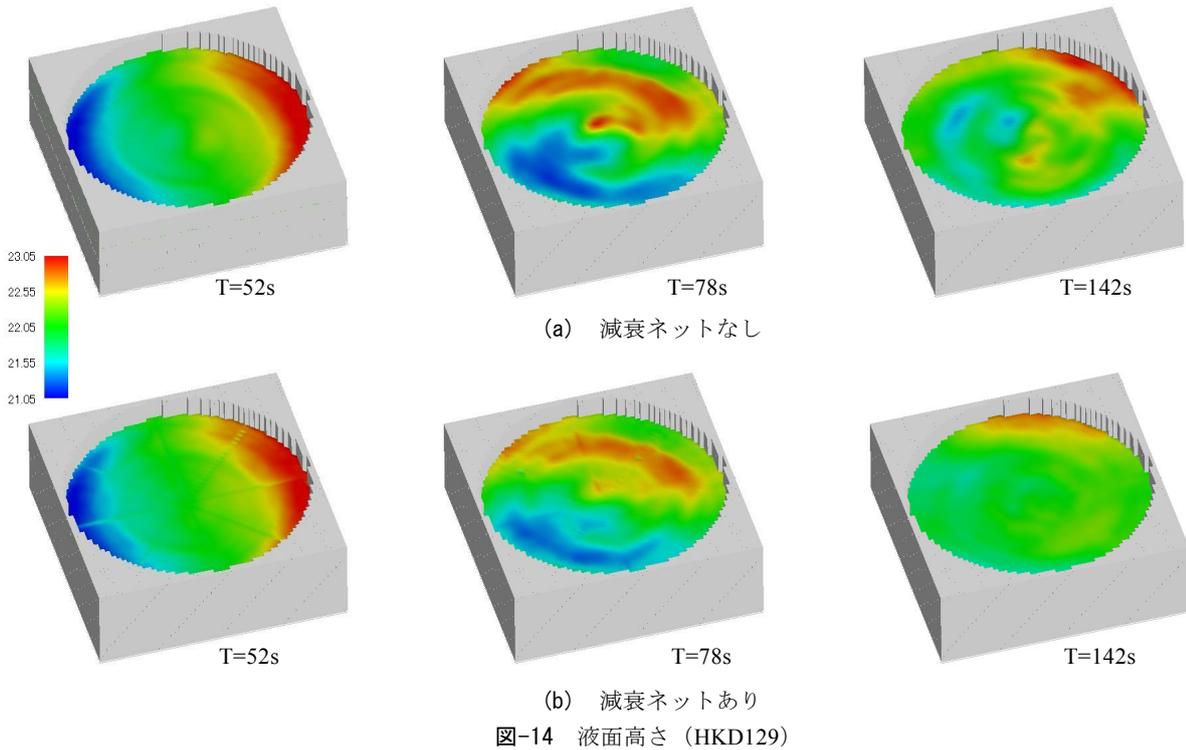
あり、今回提案する浮遊式減衰ネットの配置が液面の流速を抑制するうえで有効であることがわかる。

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。

## (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、図-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なしに比べて最大 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。液面は非常に複雑な動きをしており局部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。

### (3) 減衰定数の評価

解析で得られた波高時刻歴をもとに、1 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 1 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 ( $\alpha$ ) = 0.04Hz の cosine 波とし、切り出す波形は 50 秒間とした。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式(10)によりフィッティングすることにより求めた。

$$D(t) = a \cdot \exp^{-h\omega_0 t} \cdot \cos\sqrt{1-h^2} \cdot \omega_0 \cdot t \quad (10)$$

ここで、 $a$  : 初期変位、 $\omega_0$  : 固有角振動数、 $h$  : 減衰定数である。

RD 法の適用に当たっては、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 法は常時微動など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 1 次スロッシング周期に対する減衰定数の一覧を表-5 に、HKD129 入力時における減衰自由振動波形を図-16 に示す。

表-5 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
内容液のみ	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

「内容液のみ」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「内容液のみ」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）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れた減衰定数と判断できる。

## 6. まとめ

浮遊式減衰ネットを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を的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。

本研究で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ① 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。
- ② 本解析においては浮き屋根の設置によるスロッシング1次モードに与える影響は少なかった。
- ③ 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おおむね一致した。
- ④ 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。
- ⑤ 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

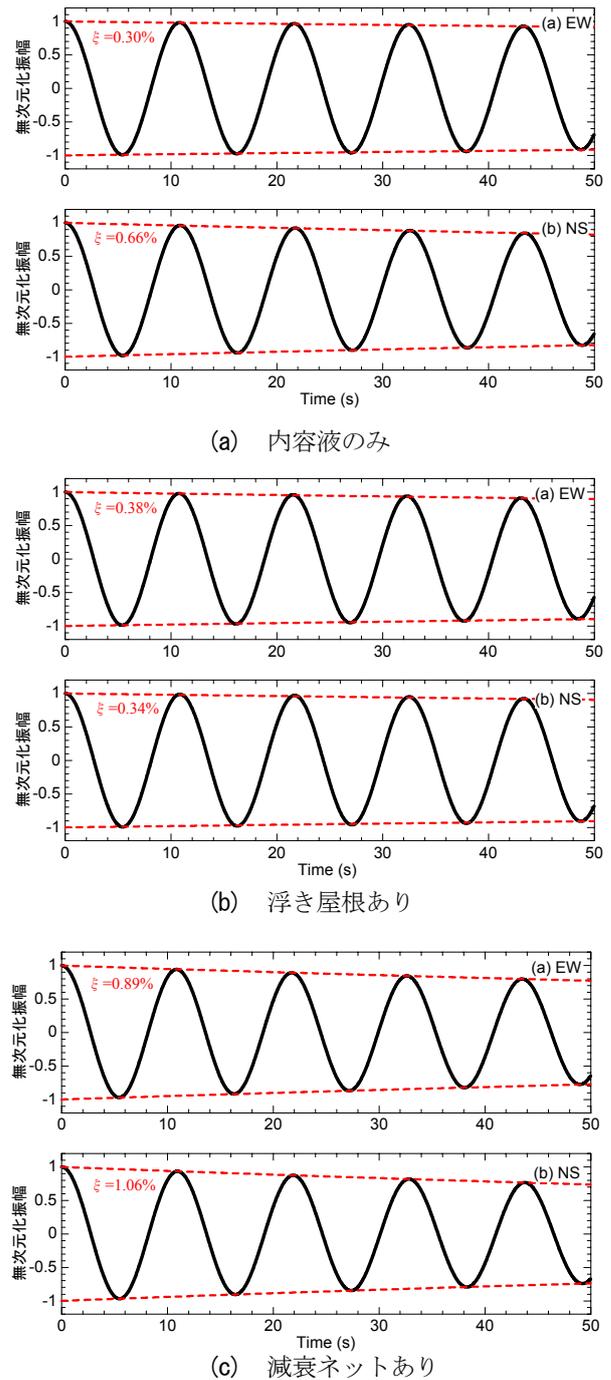


図-16 RD法による減衰自由振動波形

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。

- ⑥ 波高時刻歴波形に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、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予定である。

**謝辞：**本研究を行うにあたり神戸大学大学院中山昭彦教授からご指導，ご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

#### 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，p.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) 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