

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

Damping Control System for Sloshing of Petroleum Storage Tanks using Floating Nets

鈴木 亨 TORU SUZUKI
野田 博 HIROSHI NODA

石油タンクの地震時スロッシングを抑制するために減衰ネットを用いた液面揺動制御装置を開発し、その効果を縮尺模型実験により検証した。また、数値流体計算（CFD）によるスロッシング現象の再現を行った。

その結果、浮遊式ネットを付加することによって確実に減衰を付加することが可能であり、効果的に石油タンクのスロッシングを抑制することが確認できた。また、減衰効果を適切に評価するためには、フレームを含めた抵抗係数の評価、ネットの配置角度による抵抗係数の評価等を適切に行うことが必要であることがわかった。

キーワード：スロッシング、減衰、石油タンク、数値流体解析

A method of reducing the sloshing of petroleum storage tanks during earthquake using wire nets attached to the floating frame is proposed and its effects have been examined by scale-model experiments and a computational fluid dynamics (CFD) method. It was demonstrated that the sloshing amplitude is reduced by wire meshes effectively. And it was also concluded that correct modeling of fluid resistance of the nets and the effects of installing angle of the nets are necessarily for precise evaluation of damping effect.

Key Words: Sloshing, Damper, Oil Storage Tank, CFD

1. はじめに

2003年9月26日に発生した十勝沖地震では、苫小牧を中心に数多くの石油タンクの浮き屋根が大きな損傷を受け、結果として全面火災となった事例が見られた¹⁾²⁾。これらの被害要因としては、地震の揺れに伴う内容液の液面揺動（スロッシング）やスロッシングを引き起こす数秒から数十秒の長周期の地震動が関係していると考えられている²⁾。長周期地震動による石油タンクのスロッシング現象は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。

スロッシングによる火災被害を防止する方法としては「屋根補強」・「液高制限」・「波高抑制」が考えられるが、これらの対策のうち「屋根補強」と「液高制限」に関してはすでに告示等で法的な位置付けが与えられている。一方「波高抑制」については、特許や実用新案も含めて今日までさまざまな研究・提案がなされてき

ているが、有効かつ実用的な方法が望まれている状況である³⁾。

本報では、石油タンクの浮き屋根下面に浮遊設置されたネット（浮遊式ネット）によるスロッシング抑制効果について、実験的に検証を行いその有効性を確認するとともに、スロッシング抑制効果を数値流体解析によって検討し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。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。

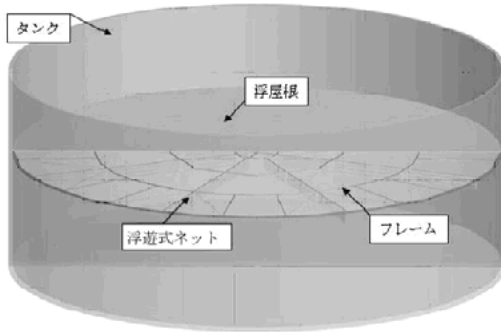


図-1 浮遊式ネットを用いた液面揺動制御装置

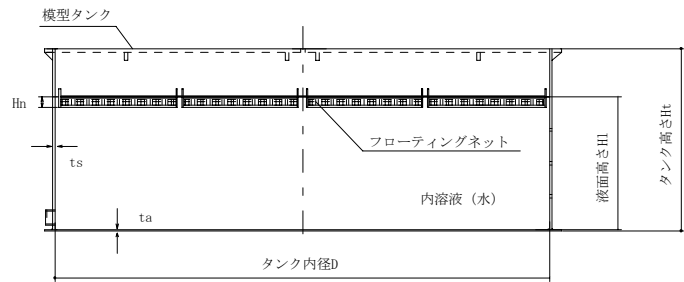


図-2 模型タンクの概要

表-1 模型タンクの諸元

諸元	記号	単位	対象タンク		模型タンク	
			80m級	40m級		
タンク内径	D	mm	82,000	42,640	3,280	
タンク高さ	Ht	mm	30,000	15,600	1,200	
液面高さ	Hl	mm	22,050	11,466	882	
内容液	—	—	原油		水	
液比重	ρ	—	0.828~0.887		1.00	
粘性係数	μ	m/sec ²	0.00000716		0.000001	
側板・底板の厚さ	ts,ta	mm	12.0~37.0, 12.0		12.0, 9.0	
スロッシング周期	1次	Ts1	sec	10.88	7.85	2.18
	2次	Ts2	sec	5.58	4.03	1.12
縮尺比	H/D	—	1/25	1/13	—	

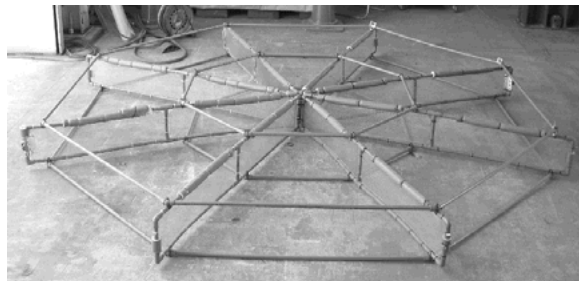


写真-1 浮遊式ネット

浮遊式ネットの構成材料は軽量であり、小さく分割可能な構造としているため、石油タンク側壁の点検口から容易に搬入可能であり、新設の石油タンク以外にも既設タンクへの設置も可能な構造となっている。

の1次または2次スロッシング周期は式(1)⁴⁾による。

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

3. 模型実験概要

(1) 模型タンク

表-1 に模型タンクの諸元を、図-2 に概要を示す。タンクは剛体、基礎固定モデルとして扱う。タンク内径 D は 3.28m、液面深さ Hl は 0.882m、内容液は水とした。対象タンクを 80m 級と 40m 級とした場合の模型タンクの縮尺はタンク内径の比で 1/25, 1/13 である。表-1 中

ここで、D：タンク内径、g：重力加速度、Hl：液面高さ（水深）、 ε_n ：1次 3.68, 2次 10.66

式(1)は円筒形の剛体容器内の液体を非圧縮性完全流体とし渦なしの場合を考えた場合の式で、浮屋根と内容液の粘性は考慮していない⁴⁾。

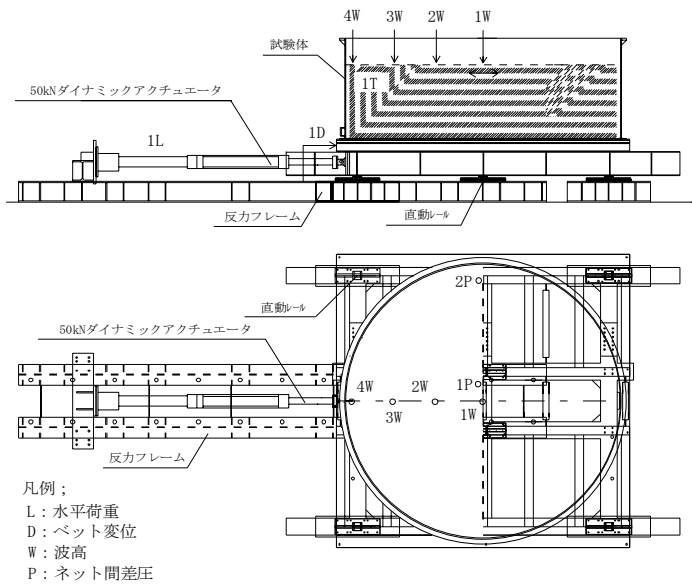


図-3 振動台の概要

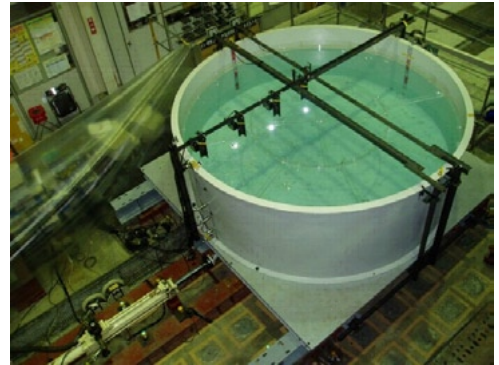


写真-2 実験状況

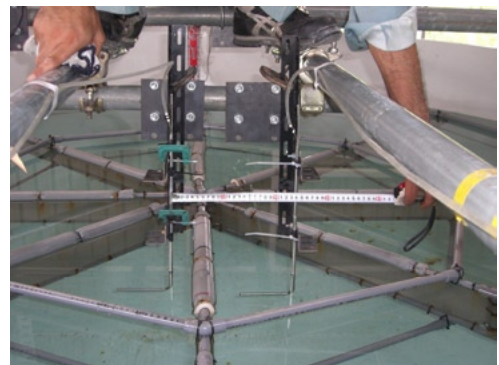


写真-3 ピトー管取付け状況

表-2 模型浮遊式ネットの諸元

ネット種類	ネット高さ	ネット径	ネット間隔	開口率	見付面積(半径分)	設置数
	Hn	d	l	β	A	
	mm	mm	mm	—	m ²	
CASE-2	208	0.23	0.508	0.299	0.328	8
CASE-3	208	0.23	0.508	0.299	0.328	2
CASE-4	208	0.57	3.175	0.674	0.328	8
CASE-5	208	0.57	3.175	0.674	0.328	2

表-3 実験ケースの一覧

実験条件		振動数	目標波高
		Hz	mm
水のみ	CASE-0	0.455	60
浮屋根のみ	CASE-1		60
浮遊式ネット	CASE-2		10,20,30,50,60
	CASE-3		10,20,30,50,60
	CASE-4		10,20,30,50,60
	CASE-5		10,20,30,50,60

(2) 浮遊式ネット

写真-1 に浮遊式ネットの概要を示す。浮遊式ネットは円周方向と放射状に配置されたフロート材からなる独立したフレームと減衰要素であるネット、フレーム外周部に取り付けられるタンク壁面への衝撃緩和材で構成されている。表-2 に模型浮遊式ネットの諸元を示す。模型は塩ビパイプ(φ=18mm)で作成したフレーム(フロート材)にネットを取り付けたモデルとした。ネットは実開口率が異なる2種類(開口率(β): 29.9%(小), 67.4%(大))とした。

(3) 実験方法

写真-2 に実験状況を、図-3 に振動台の概要を示す。実験は、直動レール上にセットされた振動台を50kNダイナミックアクチュエータ(最大荷重50kN, 最大速度650mm/s, 振幅±400mm)を用いて加振することとした。計測項目は振動台の水平荷重(F), 入力変位(B), 水槽端部における波高(W), 加振方向と直交する向きに配置された浮遊式ネット前後の差圧(P1-4)とした。差圧はネット前後に設置したピトー管に差圧計を取り付けて計測した。ピトー管の設置状況を写真-3 に示す。

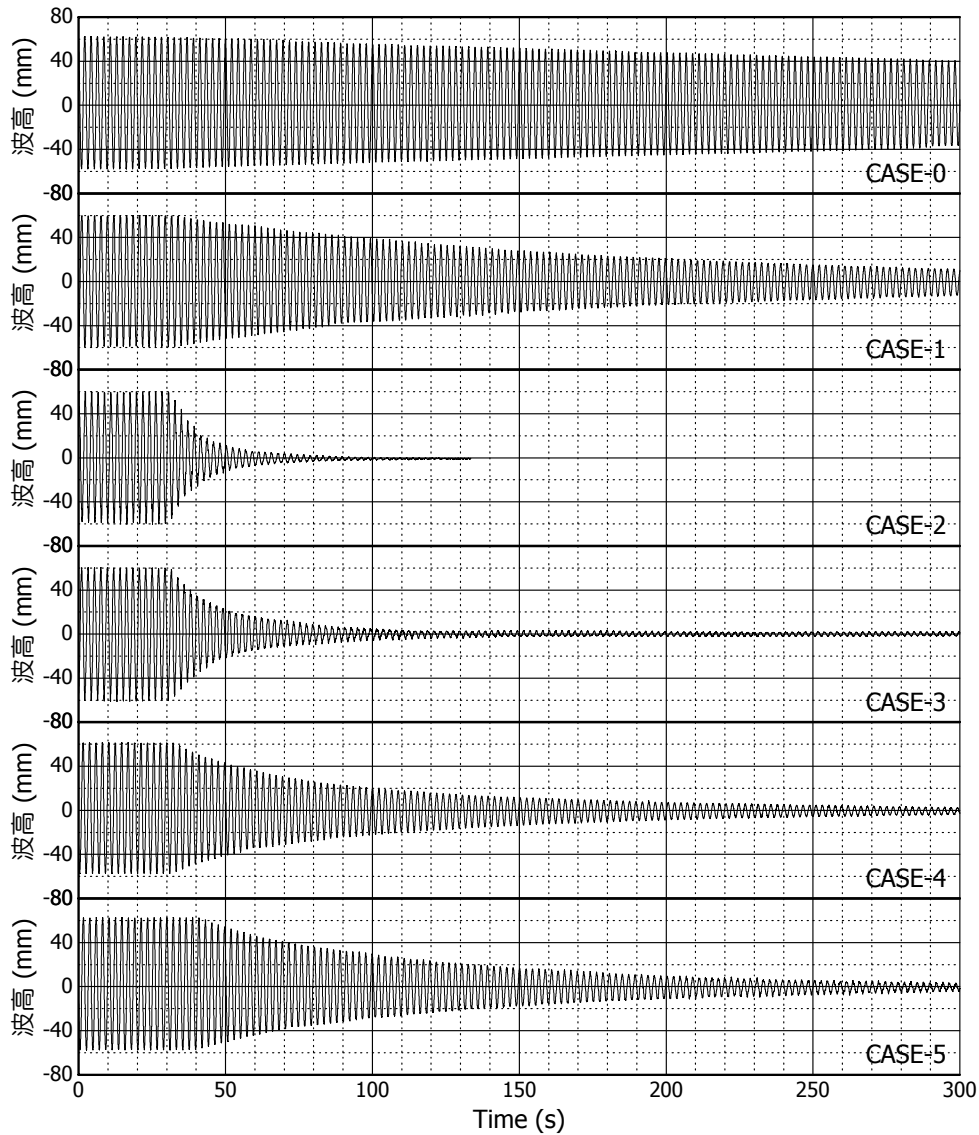


図-4 自由振動波形

表-3 に実験ケースを示す。実験ケースは、フロート材を配置しない水の場合(CASE-0)、フレームにネットを取り付けないフロート材の場合(CASE-1)、開口率が異なる2種類のネットについて、各々全方向にネットを配置したものおよび加振方向と直交方向のみにネットを配置した場合(CASE-2~5)の計6ケースである。

実験は別途実施したスイープ試験で得られた1次スロッシング周期にてタンク端部の波高が目標波高(10,20,30,50,60mm)に到達後加振を停止し、その後の自由振動波形を記録することとした。

4. 実験結果

目標波高 60mm 自由振動波形を図-4 に示す。また、自由振動開始時の波高および中心部ネット前後の差圧

(P-1)の時刻歴を図-5 に示す。なお、ネット前後の差圧は、スロッシング時の液面形状が波長 1/2 の正弦波形状であると仮定し、計測された波高からピトー管位置における圧力検出部の水深の変化を算出することによって計測値の補正を行ったものである。

ネット前後の差圧は波高に対して $\pi/2$ の位相差を持っており、波高=0 (速度最大) 時に最大差圧となる。

実験で得られた1次スロッシング周期は 2.198 秒であった。一方、式(1)より算出される1次スロッシング周期は 2.177 秒となり、両者の差は極めて小さかった。

(1) 減衰定数

自由振動波形から得られた減衰定数の一覧を表-4 および図-6 に示す。減衰定数は加振停止後の4サイクルから求めた対数減衰率である。

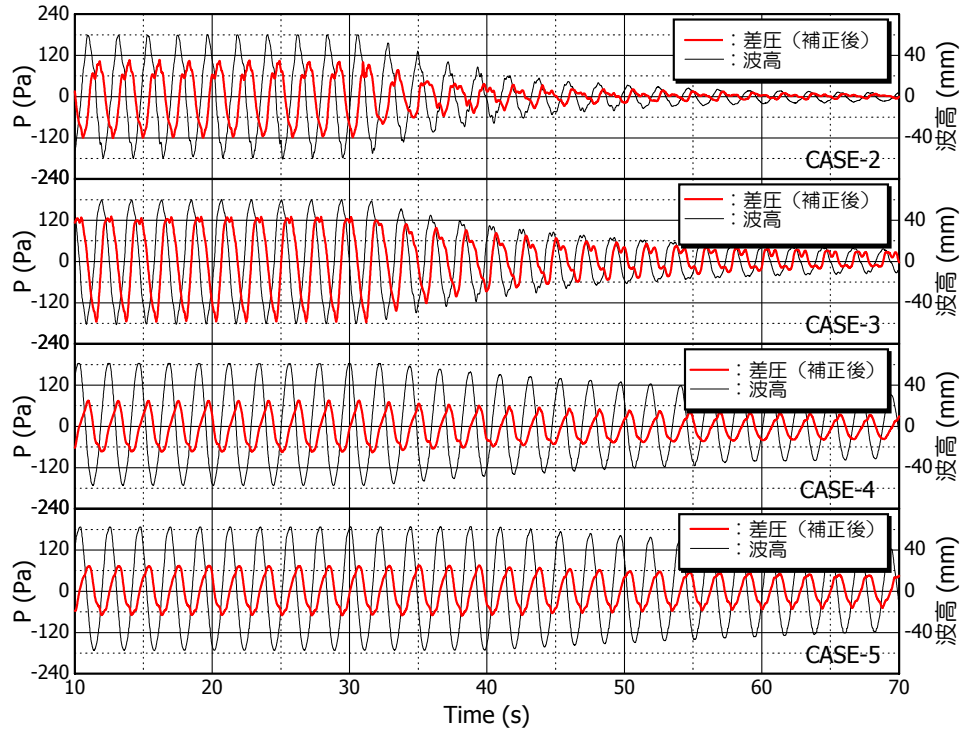


図-5 自由振動開始時の波高とネット差圧

表-4 減衰定数の一覧

波高	CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5
10mm	-	-	1.845	0.871	0.248	0.307
20mm	-	-	2.563	1.269	0.350	0.339
30mm	-	-	2.580	1.299	0.442	0.341
50mm	-	-	3.116	1.836	0.615	0.513
60mm	0.041	0.251	3.015	2.044	0.764	0.516

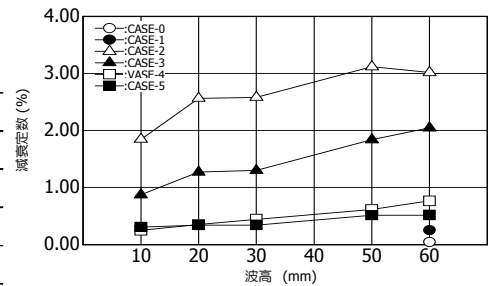


図-6 波高と減衰定数の関係

60mm加振時 CASE-0 (水のみ) の減衰定数は 0.041% と非常に小さいのに対して、ネットを取り付けることによって最大で約 3%の減衰を付加することが可能となる。

また、減衰定数は波高依存性を持っており、ネットの抵抗係数が大きいほど影響が大きくなっている。これは、後述する加振方向の最大流速が波高に比例するのに対して、ネットの抵抗力は流速の二乗に比例することが一因として考えられる。

(2) ネットの抵抗力

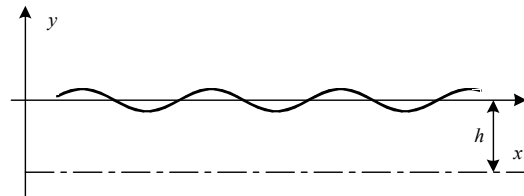
a) 加振方向最大流速の算出

一般に微小振幅波を仮定した場合の速度ポテンシャル ϕ と流れ関数 ψ は式(2)、式(3)で表すことができる。

$$\phi = -\frac{ga}{\omega} \frac{\cosh\{k(y+h)\}}{\cosh kh} \cos kx \cdot \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (2)$$

$$\psi = \frac{ga}{\omega} \frac{\sinh\{k(y+h)\}}{\cosh kh} \sin kx \cdot \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (3)$$

ここで、 k : 波数($=2\pi/\lambda$, λ : 波長), ε : 位相差, a : 波の振幅, ω : 固有角振動数($=2\pi/Ts$)



x 方向速度成分 u ならびに y 方向速度成分 v はそれぞれ速度ポテンシャル ϕ と流れ関数 ψ を x で微分すれば求まる。

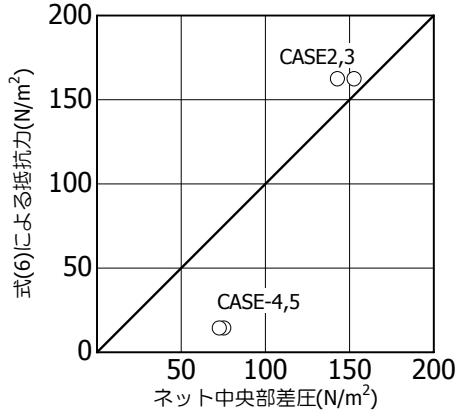


図-7 ネット抵抗力の比較

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = k \frac{ga}{\omega} \frac{\cosh\{k(y+h)\}}{\cosh kh} \sin kx \cdot \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (4)$$

$$v = \frac{\partial \psi}{\partial x} = k \frac{ga}{\omega} \frac{\sinh\{k(y+h)\}}{\cosh kh} \cos kx \cdot \cos(\omega t + \varepsilon) \quad (5)$$

ここで、 u が最大となるのは $kx = \pi/2$, $\omega t + \varepsilon = 0$ のときであり、式(6)で表すことができる。

$$u_{\max} = k \frac{ga}{\omega} \quad (6)$$

b) ネット抵抗力の算出

単位面積当たりのネットの抵抗力は式(6)によって求められた流速(u)とネットの抵抗係数(C_D)から、式(7)⁵⁾によって求められる。

$$P = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (7)$$

ここで、 ρ : 密度

抵抗係数 C_D 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⁵⁾。

$$C_D = 6 \cdot (1 - \beta) \cdot \beta^{-2} \cdot \text{Re}^{-1/3} \quad , \text{Re} = \frac{ud}{\beta\nu} \quad (8)$$

ここで、 β : 開口率($= (1-d/l)^2$), d :ワイヤーの線径, l :ワイヤーの間隔), u : 流速, ν : 動粘性係数

式(7)によって求められた単位面積当たりのネット抵抗力と図-5 に示す定常加振時の中央部ネット差圧の比較を図-7 に示す。CASE-2 および CASE-3 では比較的良好な対応を示しているのに対して、CASE-4 および CASE-

表-5 計算方法の条件概要

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	HAMAC 法
乱流モデル	標準 Smagorinsky Model ($C_s=0.10$)
計算領域(m)	$x \times y \times z = 3.28 \times 3.28 \times 1.2$
計算格子数	$N_x \times N_y \times N_z = 63 \times 63 \times 63$
時間間隔	$\Delta t = 2.0 \times 10^{-3}$
ネット抵抗係数	CASE-2,3: 6.25 CASE-4,5: 0.87
入力振幅(mm)	CASE-2 : 3.6mm CASE-3 : 2.2mm CASE-4 : 1.5mm CASE-5 : 1.1mm

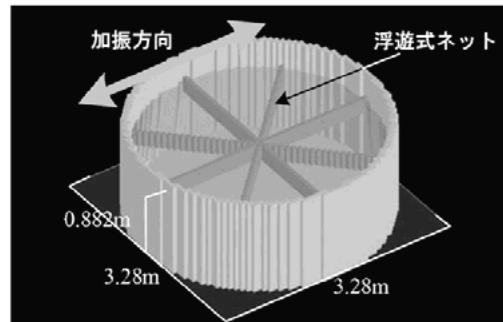


図-8 解析モデルの形状

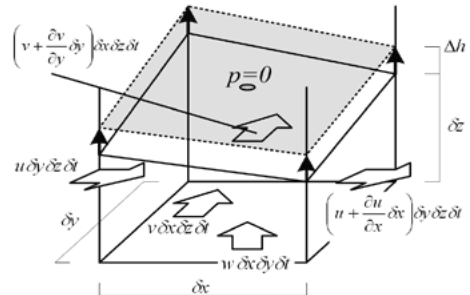


図-9 自由液面位置と速度 Flux の関係

5 では実験値が計算値を大きく上回っている。これは、フロート材による抵抗が大きく作用しているためと考えられ、抵抗係数を算出する際にはフロート材の抵抗を適切に評価する必要がある。

実験値から逆算によって求められる抵抗係数は、CASE-2 : 7.496, CASE-3 : 8.013, CASE-4 : 3.952, CASE-5 : 3.818 となる。

5. 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-5 にまとめてあるように非圧縮性流れの運動方程式を Adams-

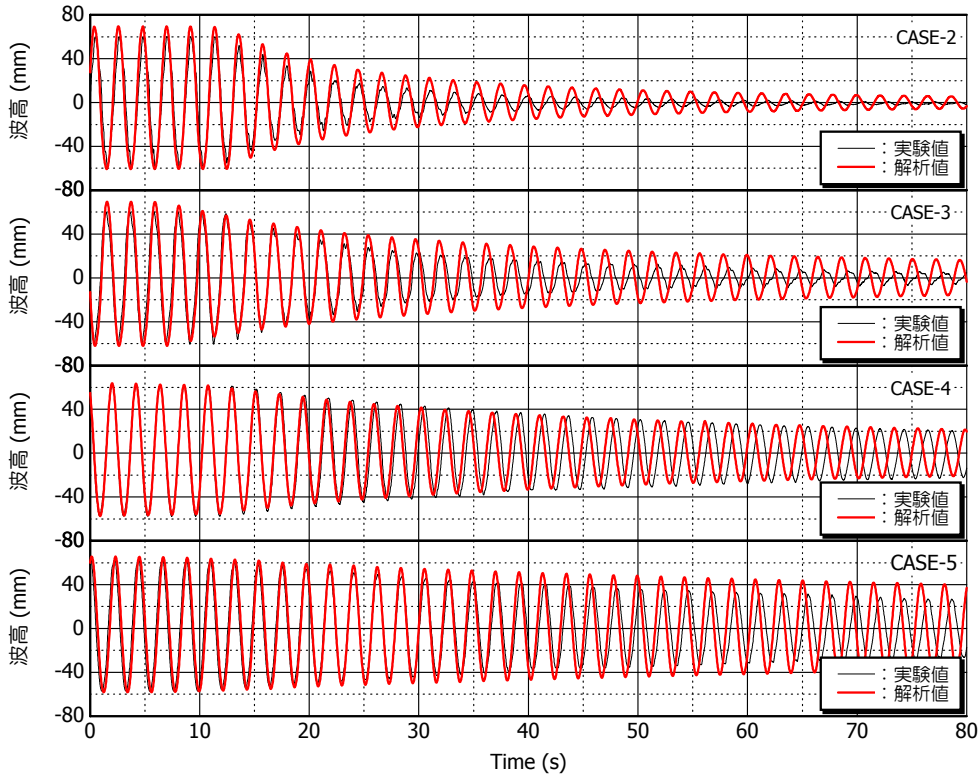


図-10 自由振動波形の比較

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 Smagrinisky 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。

解析モデルの形状を図-8 に、計算条件を表-5 に示す。解析の対象としたモデルは実験で使用したタンクと同じもので、実験におけるネットを取り付けた CASE-2~5 について解析による検証を行った。

解析は、目標波高が 60mm となる外力を正弦波にて入力し、波高が 60mm で安定した後、加振を停止し自由振動波形を計算することとした。

(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-9 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、

$$\Delta h = \frac{\partial u}{\partial x} \partial z \partial t + \frac{\partial v}{\partial y} \partial z \partial t + w \partial t \quad (9)$$

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式(9)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およ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、網を通して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。

$$F_i = C_D \cdot \left(\frac{A}{2L^3} \right) \cdot u_i \sqrt{u_j \cdot u_j} \quad (10)$$

ここで、 F_i : i 方向抵抗力、 C_D : 抵抗係数(式(7))、 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)

6. 解析結果

解析結果の自由振動波形を実験結果とあわせて図-10 に、解析および実験で得られた減衰定数と定常加振時ネ

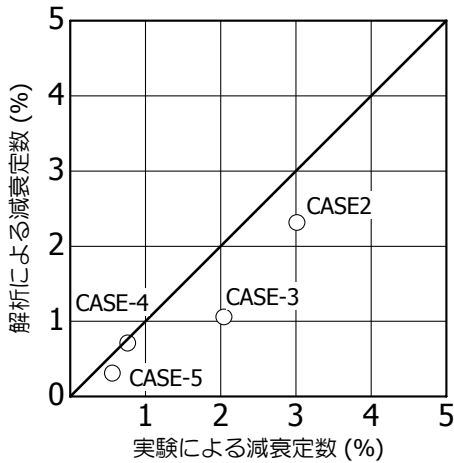


図-11 減衰定数の比較

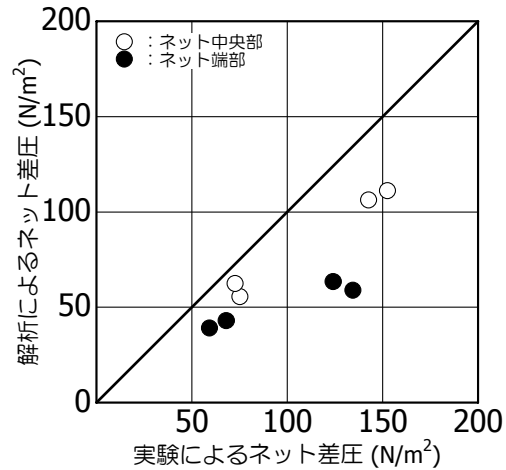


図-12 ネット間差圧の比較

ット間差圧の比較を図-11, 12 に示す。

解析で得られた1次スロッシング周期は2.168秒であり、実験におけるスロッシング周期(2.198秒)より若干小さな値となったが、その差は約1.4%と小さな値であり、解析値と実験値はよく対応していることを確認した。

減衰定数について、CASE-4において実験値と解析値はよい対応を示したが、他のCASEにおいては解析値が実験値を下回る結果となった。また、実験では加振直交方向のみにネットを配置したCASE-2,4に対して、全方向にネットを配置したCASE-3,5では減衰定数に約1.5倍の増加が見られたが、解析では増大率が約2.2倍となっている。

定常加振時のネット間差圧は実験値に対して計算値が0.45~0.86と小さな値を示した。

上記より、フレームを含めた適切な抵抗係数の評価、加振方向に対して斜めに配置されたネットの評価方法等について今後の検討が必要である。

7. まとめ

浮遊式ネットを用いた石油タンクのスロッシング抑制装置において、浮遊式ネットの設計を行う際は、ネットによって付加される減衰力を適切に評価することが重要であり、そのためには、ネットに発生する抵抗力を正確に把握することが必要となる。筆者らは、縮尺模型実験においてネットの前後にピトー管を配置し、ネット前後の差圧を求めることにより、ネットに発生する抵抗力を検証した。また、数値流体計算によりスロッシング現象の再現を行うことから求められるネット抵抗力を算出し、実験結果と比較することから、以下の知見が得られた。

- ①浮遊式ネットを付加することによって確実に減衰を付加することが可能であり、効果的に石油タンクのスロッシングを抑制することが確認できた。
- ②減衰定数は波高依存性を持っており、波高が高いほど減衰定数は大きくなる。
- ③減衰効果を適切に評価するためには、フレームを含めた抵抗係数の評価、ネットの配置角度による抵抗係数の評価等を適切に行うことが必要である。

今後、上記評価手法について精度を向上させるとともに、浮屋根の効果等についての検討を進める予定である。

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)畑山健ほか：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)坂井藤一ほか：大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免震等技術のミニシンポジウム資料，土木学会，2005.7
- 4)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
- 5)日本機械学会編：機械工学便覧 A5 流体力学，丸善，p.86,1986.
- 6)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