

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*・中山昭彦**・野田博***

Toru SUZUKI, Akihiko NAKAYAMA and Hiroshi NODA

* 非正会員 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)

** 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)

*** 非正会員 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)

A method of reducing the strength sloshing of petroleum storage tanks using a wire net attached to the floating roof is proposed and its effects have been examined by scale-model experiments and a computational fluid dynamics (CFD) method. It has been found that the sloshing amplitude is reduced by wire meshes. The effects depend on the amplitude of the wave motion and the resistance of the net including that of the floating roof and the angles of the orientation of the nets relative to the expected direction of sloshing must be determined carefully. While model experiments can be influenced by the scale effects and the numerical analysis, which does simulate much of the effects, is free from scale effects, the latter must also be performed with correct modeling of the net's resistance and the effects of the floating roof.

Key Words: Sloshing, Damper, Oil storage tank, CFD, LES

キーワード: スロッシング, 減衰, 石油タンク, 数値流体解析

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⁾。

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（浮遊式ネット）により、タンク

内容物に減衰を付加し、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た。上記浮遊式ネットを設計する際には、浮遊式ネットに発生する流体抵抗によってスロッシング時に付加される減衰力を適切に評価する必要がある。

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。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杵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。

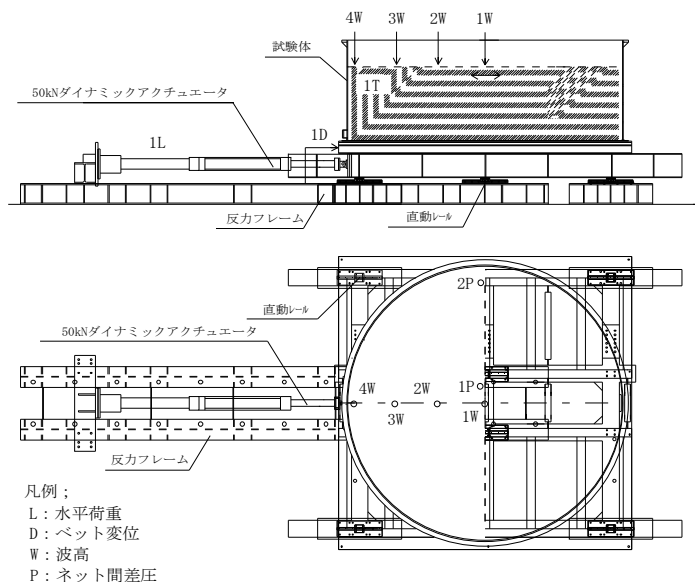


図-3 振動台の概要

表-2 模型浮遊式ネットの諸元

ネット 種類	ネット 高さ	ネット材 の径	ネット材の メッシュ間隔	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
フレームのみ	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

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($\phi=18\text{mm}$)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)=CASE-2,3, 67.4%(大)=CASE-4,5)とした。また、開口率が異なる2種類のネットに対して、ネットの配置を放射状に8面配置したもの(CASE-2,4)、および加振方向に直交する2面としたもの(CASE-3,5)の計4種類とした。なお、今回の実験では、浮遊式ネットによる減衰効果を正確に把握するため、浮き屋根は使用していない。

3.3 実験方法

写真-2 に振動台の外観写真を、図-3 に概要を示す。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 $\pm 400\text{mm}$)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ることにより計測した。ピトー管の設置状況を写真-3 に示す。

表-3 に実験ケースを示す。実験ケースは、フロート

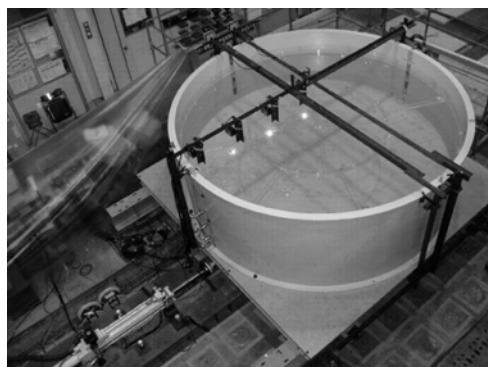


写真-2 実験状況

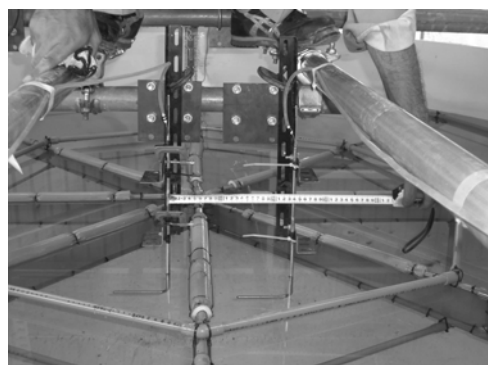


写真-3 ピトー管取付け状況

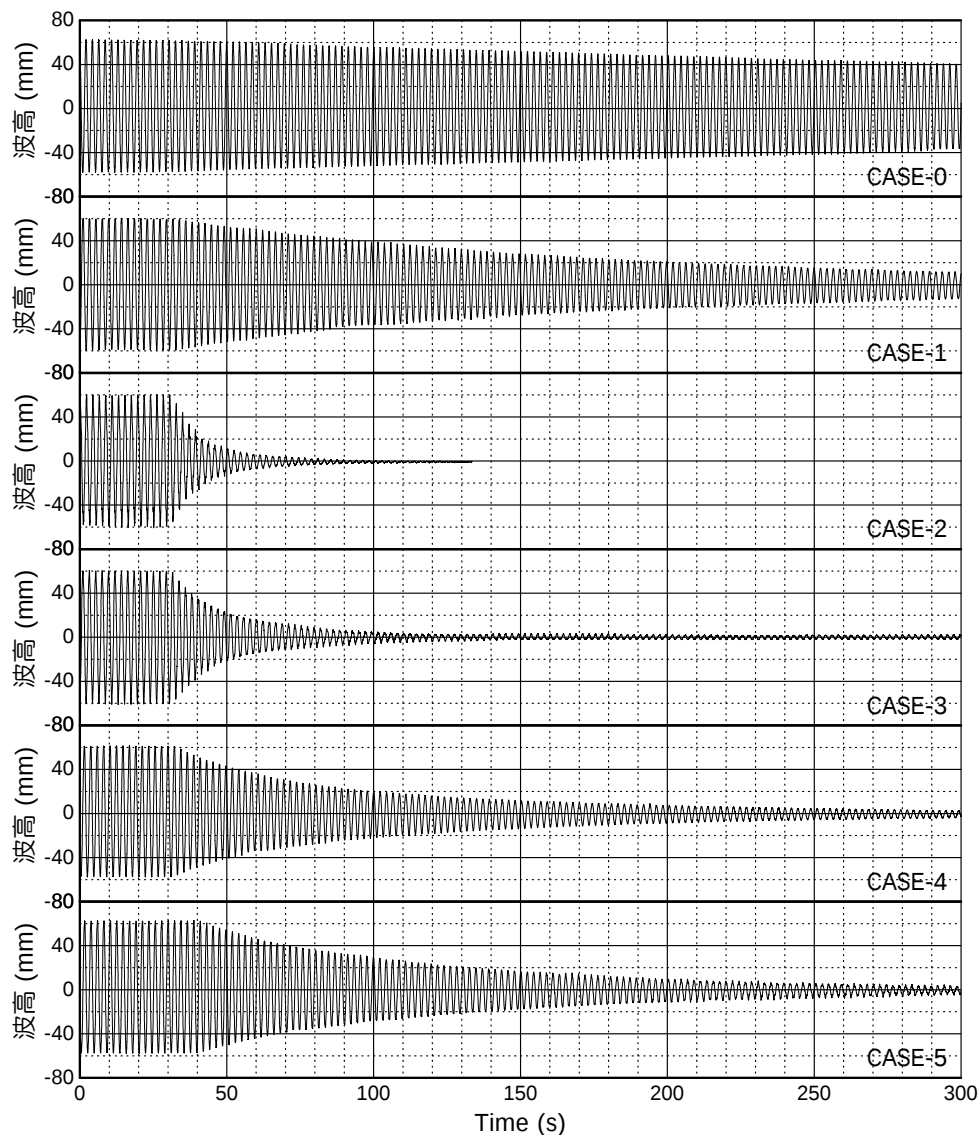


図-4 自由振動波形

材を配置しない水のみの場合(CASE-0)、フレームにネットを取り付けないフロート材のみの場合(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。

4.1 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。

60mm 加振時 CASE-0 (水のみ) の減衰定数は 0.041% と非常に小さい。

最も大きな減衰を得られたのは、開口率が小さいネットを放射状に配置した CASE-1 で波高 60mm 時の減衰

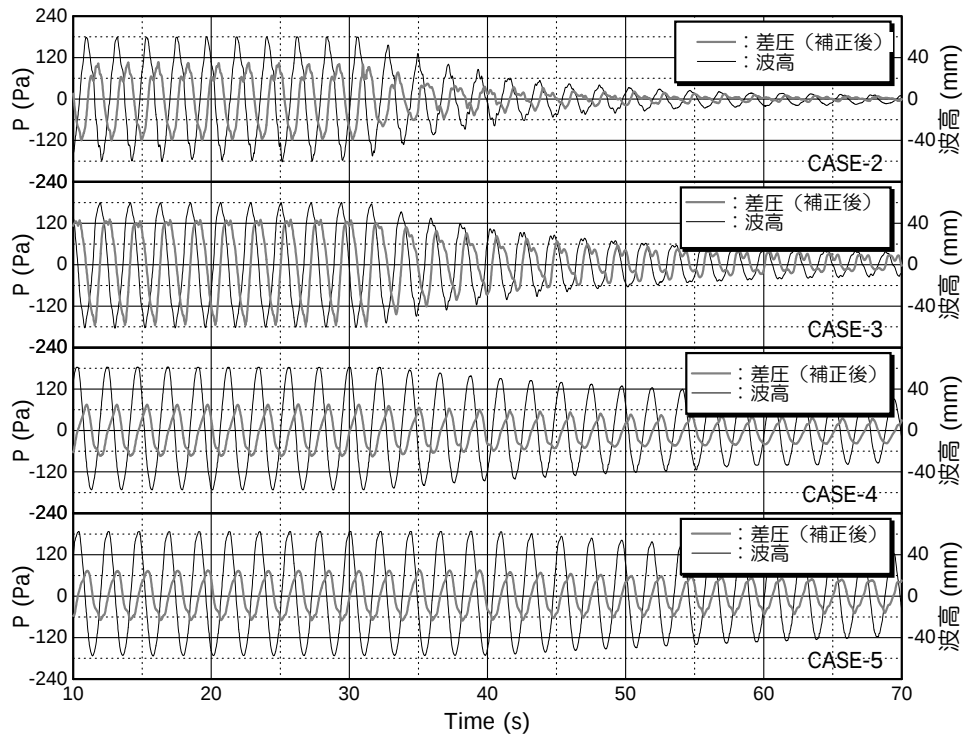


図-5 自由振動開始時の波高とネット差圧

図-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

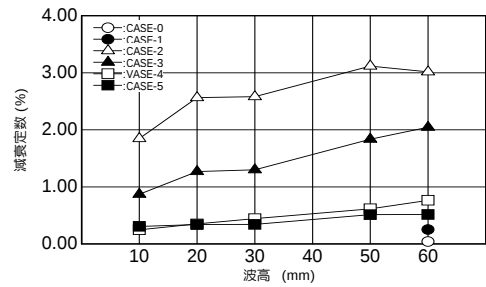


図-6 波高と減衰定数の関係

定数は 3.015%であった。一方、開口率が大きいネットを加振直交方向のみに配置した CASE-5 では 0.526%の減衰が得られた。なお、ネットを配置していないフレームのみ (CASE-1) においても 0.251%の減衰が得られている。

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原因として考えられる。

4.2 ネットの抵抗力

(1) 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)(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。

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

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

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。

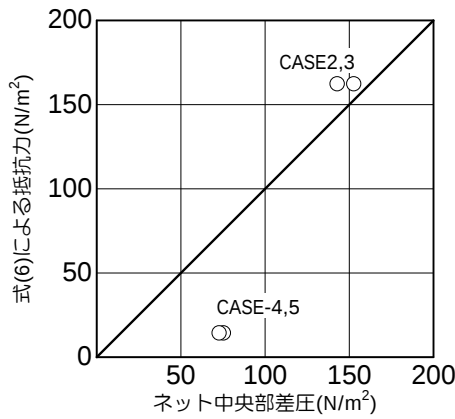


図-7 ネット抵抗力の比較

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

(2) ネット抵抗力の算出

単位面積あ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 : 密度である。

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 : 動粘性係数である。

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和図-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-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

5.1 数値流体計算方法

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

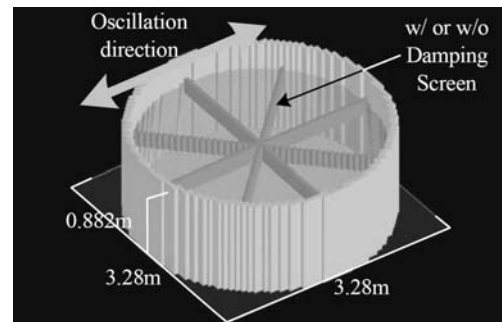


図-8 解析モデルの形状

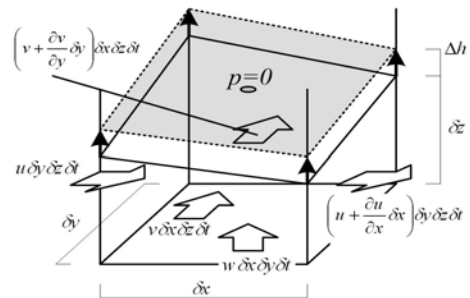
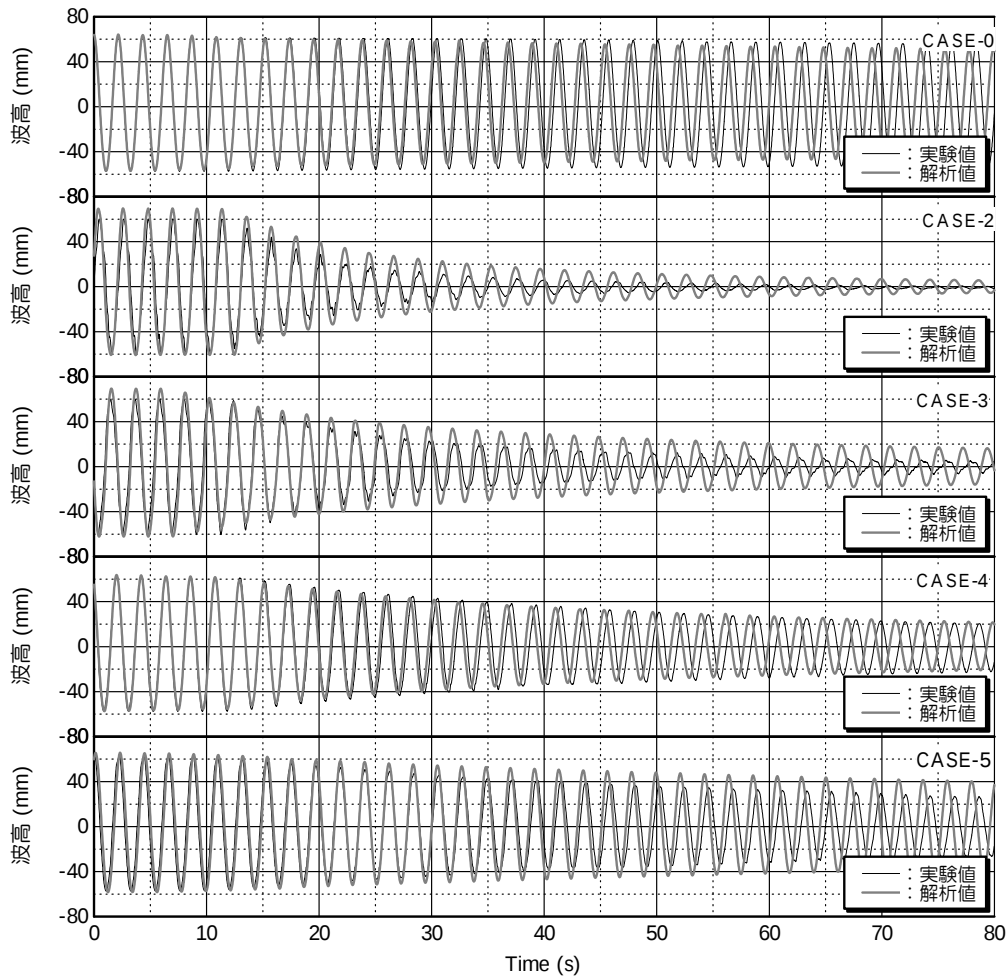


図-9 自由液面位置と速度 Flux の関係

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込んだ方法⁶⁾である。この方法は表-5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。

解析モデルの形状を図-8、表-5に示す。解析を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



図－10 自由振動波形の比較

動波形を計算することとした。

なお、今回の解析においては浮屋根のモデル化は行っており、ネットによる減衰力のみを評価することとした。

5.2 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、

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

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(9)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。

5.3 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。

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

ここで、 F_i ：i方向抵抗力、 C_D ：抵抗係数(式(8))、 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、 $u_i(u_j)$ ：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

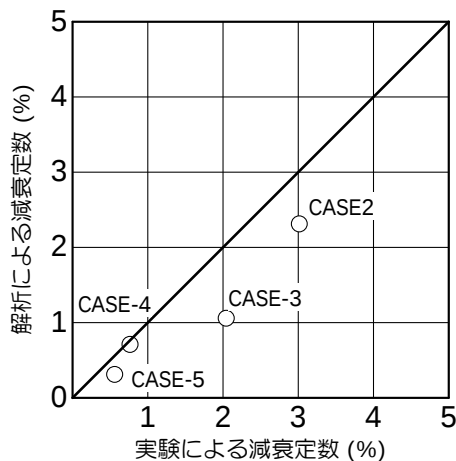


図-11 減衰定数の比較

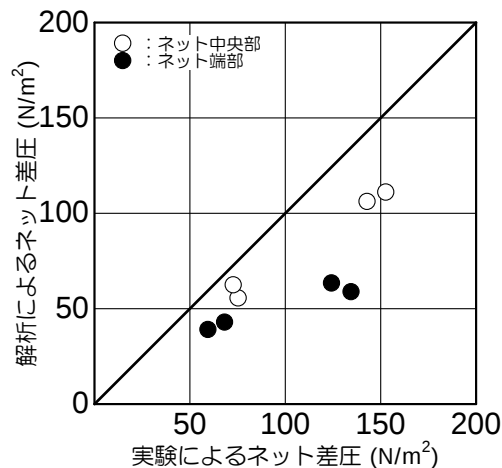


図-12 ネット間差圧の比較

ネ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。

- ・ 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。
- ・ 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。

ど減衰定数は大きくなる。

- ・ 解析プログラムの精度を向上させるためには、プログラムにおける、ネットによる抵抗の考え方（圧力損出による抵抗の組み込み方）、フレームを含めた抵抗要素全体の評価手法（フレームによる抵抗力をメッシュを含めた等価な抵抗要素として評価可能か）、ネットの配置角度による抵抗係数の評価方法等を適切に行うことが必要である。

今後、解析手法について精度を向上させるとともに、入力振幅（入力エネルギー）と波高（応答変位）の関係を適切に評価し、浮遊式ネットによる減衰機構を明確にする予定である。

また、浮屋根が減衰に与える効果等についての検討をすすめる予定である。

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

(2009年4月9日 受付)