

# 円筒タンク用スロッシング防止ダンパーの有効性に関する 実験・数値解析的検討

Experimental and Numerical study on the effect of Damper to Reduce Sloshing  
of a Cylindrical Tank

米山望\*・高畠大輔\*\*・澤田純男\*\*\*・三浦正博\*\*\*\*

Nozomu YONEYAMA, Daisuke TAKABATAKE, Sumio SAWADA and Masahiro MIURA

\*正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

\*\*学生会員 京都大学工学研究科 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

\*\*\*正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

\*\*\*\*工修 出光エンジニアリング (〒 261-8501 千葉県千葉市美浜区 1丁目3番地)

The liquid sloshing in petroleum tanks is one of severe problem against huge earthquakes such as the Tokai Tonankai and Nankai earthquakes. In this study, we are developing a damper to reduce sloshing. The damper consists of partitions with slits which gives resistance to liquid moving in the tank. Model experiment and numerical simulation are performed to study the effect of the damper. As a result, the experimental results show that the present damper is effective to reduce sloshing of cylindrical tank. And the numerical results show that our numerical simulation method can accurately simulate the sloshing behaviors of the cylindrical tank in which the damper is installed.

**Key Words** : Sloshing, damper, 3D numerical simulation, VOF method

## 1. はじめに

直接地面を基礎とするタンク、輸送車内の石油コンテナ、原子力発電所におけるクーリングシステムなど自由液面もつ様々な施設で生じる可能性があるスロッシング現象は多大な人的被害、経済被害を引き起こすことがある。2003年9月26日に発生した「2003年十勝沖地震」では、地震により生じたスロッシングによって、製油所の原油屋外タンク1基とナフサ屋外貯蔵タンク1基で火災が発生した。両タンクとも貯蔵量により屋根が上下し、常に自由液面が屋根と接していることにより内容物の揮発を防ぐ「浮き屋根式タンク」であり、前者は原油のスロッシングにより浮き屋根とタンク側壁の間にあるリング状の隙間で着火し、後者はスロッシングによりポンツーン(空気の入った浮き)のいくつかが破損したため、浮き屋根が浮力を失い、沈んだことが火災の原因となった。今後起こることが予期されている東海、東南海、南海地震のような巨大地震では、「やや長周期地震動」が卓越することが予測されており、2003年十勝沖地震で起こったようなスロッシング被害が数多く発生することが懸念されている。従って、スロッシング被害を防ぐための対策法を開発することが急務となっている。

このような背景のもと、スロッシングそのものを軽減するための様々な研究が近年実施されている。その軽減方法は主にタンク外部に対策を行なうものとタンク内部に対策を行なうものの2つに分類できる。

タンク外部に対策を行なうものとして、張ら<sup>1)</sup>はタンク上部の外側に、空気の出入りが可能なタンク内径の10%の空気ダンパーを設けたスロッシングの模型実験による研究を行ない、対策タンクのスロッシング軽減の効果を示している。また、井田ら<sup>2)</sup>は、浮き屋根外周部にバッファを設け、動揺する浮き屋根がタンクと衝突するときのエネルギーをバッファで吸収、減衰させ、同時にスロッシングを抑える制振方法を検討し、その結果、適度な剛性を有したバッファを浮き屋根に設置することで、地震時に発生するスロッシングを減衰させる効果が期待できるとしている。

一方、タンク内部に対策を行なう研究として、川口ら<sup>3)</sup>は支柱と平板で構成されている構造物をタンク底面と平行に設置することによって、スロッシングの波と平板構造物の振動の位相差を利用した、スロッシングの軽減効果について検討している。また、小林<sup>4)</sup>はタンク下部が連通するように隔壁を鉛直方向に挿入しU字管モードと隔壁内スロッシングモードの2つのモードに分けた制振構造を提案し、渦と減衰の関係や隔壁の挿入と減衰との関係などについて述べている。

本研究はタンク内に遮閉板を設置することでスロッシングを抑制する方法を提案し、その効果を模型実験および数値解析により検証するものである。本研究で提案する抑制構造は、タンク底部から直立させた遮閉板によりタンク内の流れを変化させることによってスロッシングの軽減を目指す。この方法は、反力をタンク

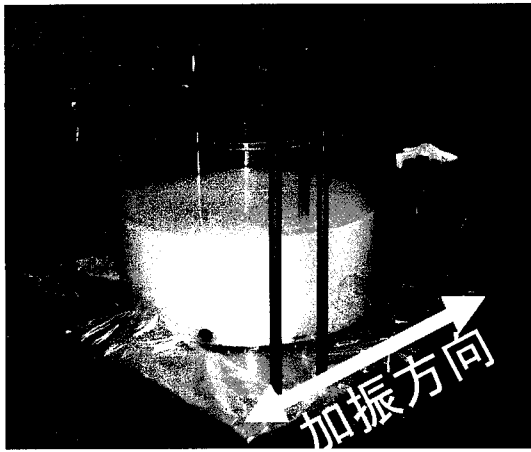


写真-1 実験装置外観

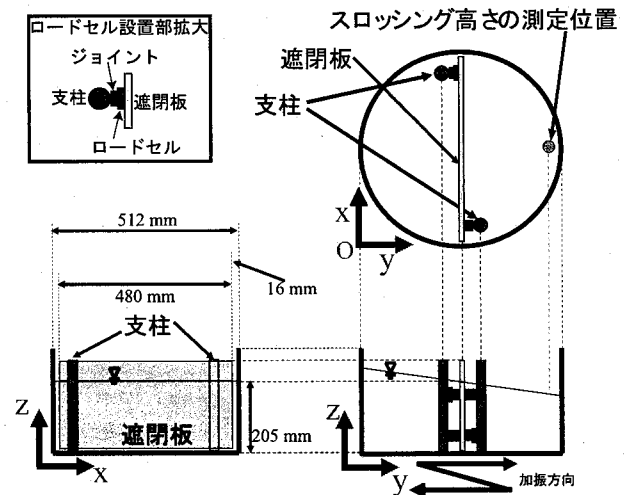


図-1 実験装置概要

ク底部に持たせるため側壁に負担をかけないこと、遮閉板に適当な間隔で隙間を設けることにより、タンク内の流れを効果的に制御してスロッシングを軽減できる可能性があることなどが主な特徴である。著者らが調べたところ、本研究で提案する形式のスロッシング抑制機構を検討した既発表の論文は見あたらなかった。

以下では、まず、模型実験を行って本研究で提案するスロッシング防止構造を用いた際のスロッシング挙動の特徴を把握するとともに、スロッシングを最もよく抑制できる遮閉板配置を選定する。次に、数値解析を模型実験結果に適用してスロッシング現象への適用性を検証する。そのうえで、実地震波を入力したスロッシング解析を行い、本研究で提案するスロッシング防止構造の実地震波に対する妥当性を検証する。

## 2. 模型実験によるスロッシング挙動の把握と最適遮閉板配置の選定

### 2.1 実験装置の概要

本実験で用いた実験装置の外観を写真-1に、概要を図-1に示す。実験装置は、実際の円筒タンクの100分の1スケールを想定した内径512 mm、高さ310 mmの亚克力製タンク模型を用いている。実際のタンクではタンク内の液体荷重により側壁の変形が起きるが、模型は比較的固いためその変形は模擬できない。模型タンク内中央に直径20 mmの2本の支柱によって支持された遮閉板を設置する。実際のタンクでは支柱の設置を想定していないが、本実験では遮閉板を固定するために設けた。遮閉板は幅480 mmのT型ステンレスアングルで組んだ遮閉板枠と取り外し可能な複数の真鍮板とで構成した。これにより、真鍮板の幅や数、固定位置を変化させ、様々な開口率（開口面積/[遮閉板断面積]で定義する）や開口位置の遮閉板が実現できる。遮閉板枠は左右上下の4隅を2本の支柱に固定した。4隅のうち、点対称となる2隅はロードセルを一体化さ

せた金具を用い、他の2隅はロードセルなしの金具で固定した。金具およびロードセルがせん断力を受けるのを避けるため、金具部分をゴム製のジョイントでカバーした。（図-1参照）

また、遮閉板枠とタンク側壁には約16 mmの隙間を存在させた。これは遮閉板の動きが側壁に影響を与えないようにするためであり、実際のタンクに適用する場合でもある程度の隙間を確保する必要がある。タンク内の液体は水道水を使用し、レーザ変位計による水位測定を行うため白色絵具を混ぜた。また初期水位（振動していない状態での水位）は205 mmとした。

### 2.2 実験方法

本実験では図-2に示すように、遮閉板を全く用いない場合を含め計21の遮閉板レイアウトを対象に実験を行った。同図では遮閉板設置部分を黒、隙間部分を白として表示し、遮閉板レイアウトaの開口率がbの場合、#a (b%)とレイアウトの左下に記した。

本実験の測定項目は、遮閉板全体にかかる荷重、タンクの外周部分での水位と振動台の水平変位とした。水位は振動台上の架台に設置したレーザ変位計によりタンク外周から10 mmの位置の水位を測定した。振動台の変位は床上の三脚に設置したレーザ変位計により加振方向の変位を測定した。

実験での加振は正弦波入力とし、基本的に各々のレイアウトに対して1.0 Hzから3.0 Hzまで0.1 Hz間隔の周波数を入力した。ただし水位変化が大きい周波数帯では0.01 Hz間隔とし、3.0 Hzがその領域に含まれる場合には最高3.2 Hzまで加振した。また振動台位置の振幅が1 mm程度となるよう手動で調整し、液面の振動が安定するのを待って、15秒間200 Hzのサンプリングで測定した。得られた水位の時刻歴データから、安定した部分の最大値と最小値の差を求め、その2分の1

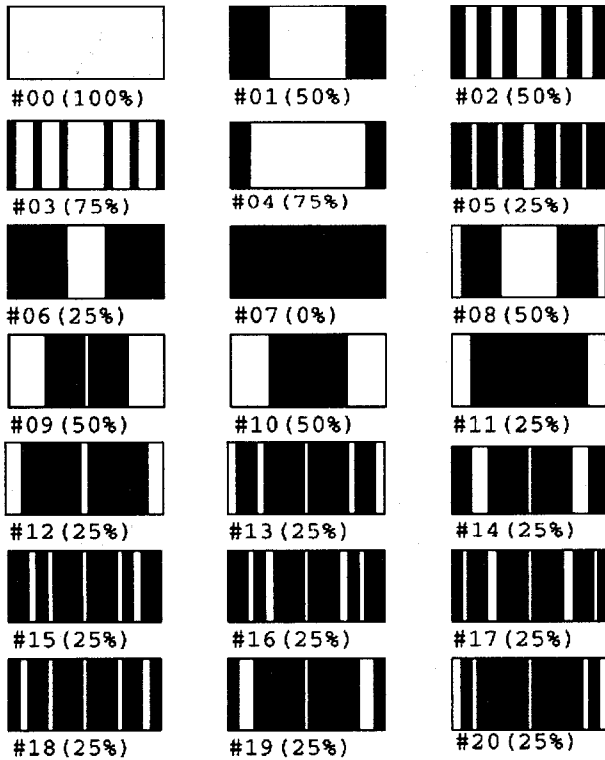


図-2 実験を行った遮閉板レイアウト

をスロッシングの振幅とする。これを振動台の振幅で除して無次元化した値を縦軸に、横軸に周波数を取り、無次元スロッシング高さの応答関数を作成した。

荷重は、点对称となる2隅にかかる荷重を測定し、遮閉板の残りの2隅で生じた荷重が測定した2隅の荷重と等しいとみなして、測定した2隅の荷重の和の2倍を遮閉板全体に生じる荷重とした。この際、測定した2隅の荷重の位相は完全に一致していることを確認している。無次元スロッシング高さと同様に、計算された荷重を縦軸に応答関数を作成した。

### 2.3 実験結果と考察

まず、遮閉板を全く入れていないレイアウト#00(開口率=100%)と、遮閉板により完全に閉鎖したレイアウト#07(開口率=0%)のスロッシング高さの応答関数の比較を図-3に示す。遮閉板のないレイアウトの応答関数は、1.2Hz付近と、2.2Hz付近に明らかな2つのピークを有している。これらの周波数は小さいほうから1次固有周波数、2次固有周波数を示していると考えられる。遮閉板がない場合の固有周波数の理論値は次式で求めることができる<sup>5)</sup>。

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{R}{\epsilon_n g} \coth \frac{\epsilon_n H}{R}}} \quad (1)$$

ここに、 $f_n$ :  $n$ 次モード固有周波数 [Hz],  $T_n$ :  $n$ 次モード固有周期 [s],  $R$ : 円筒タンクの半径 [m],  $H$ : 液面高さ [m],  $\epsilon_n$ : ベッセル関数  $J_0(\epsilon) = 0$  の第  $n$  番目の正根、

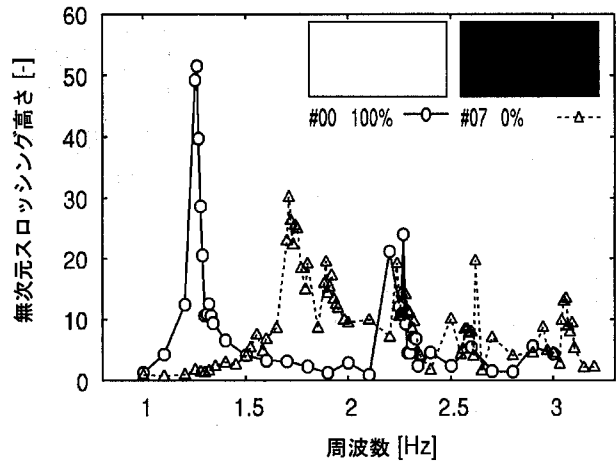


図-3 スロッシング高さの比較 (#00 と #07)

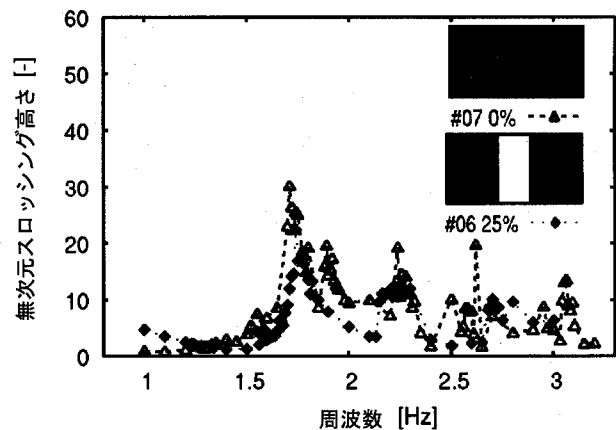


図-4 スロッシング高さの比較 (#07 と #06)

$g$ : 重力加速度である。式(1)から求まる理論値は、1次固有周波数=1.26[Hz]、2次固有周波数=2.20[Hz]となり、実験結果と調和的である。このことから、実験の妥当性が確認できる。

次に、図-3において#00と#07の応答関数を比較すると、完全に遮閉した#07では1次モードの応答が#00にくらべて小さくなるが、新たに2つのモードが現れていることがわかる。これは、遮閉板によりスロッシングの振動系が変わり、タンク半分でそれぞれ固有周波数を持ったことによると考えられ、遮閉板を設置したレイアウト全てで見られる。本研究では便宜上新しい2つのモードを固有周波数の小さい方から「1.5次モード」、「2.5次モード」と呼ぶ。以下では、遮閉板の開口率や開口位置を変えることによる応答関数の変化を調べた。

まず、完全に遮閉した#07と遮閉板を分割し中央部を開けたレイアウト#06(開口率=25%)との比較を行った結果を図-4に示す。同図から、開口にもかかわらず各周波数ともスロッシング高さに大きな違いが見られないことが分かる。

次に、開口率を25%に固定し、開口部を中央部から両端部へ変えたレイアウト#11を#06と比較した結果

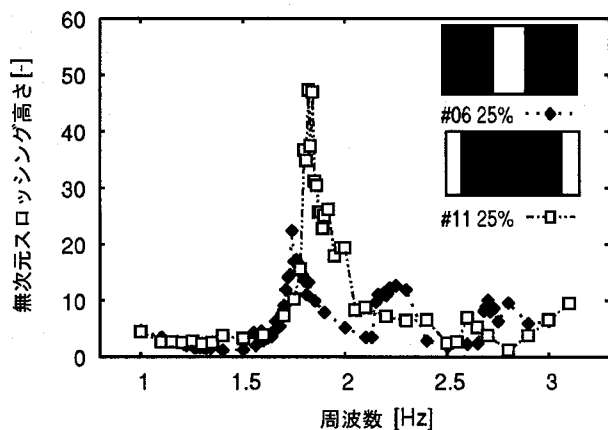


図-5 スロッシング高さの比較 (#06 と #11)

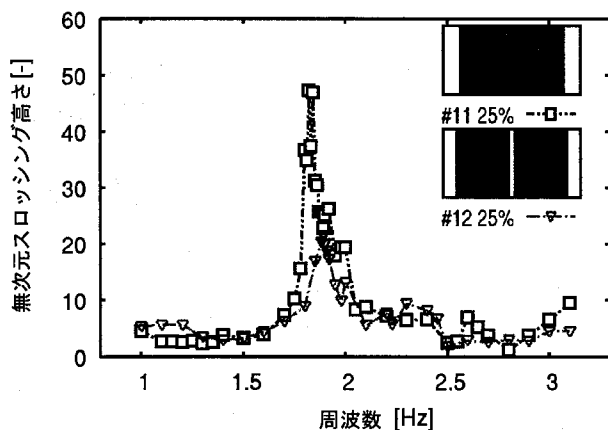
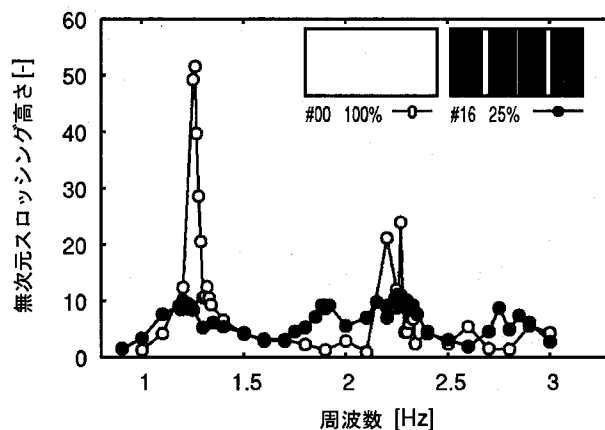


図-6 スロッシング高さの比較 (#11 と #12)

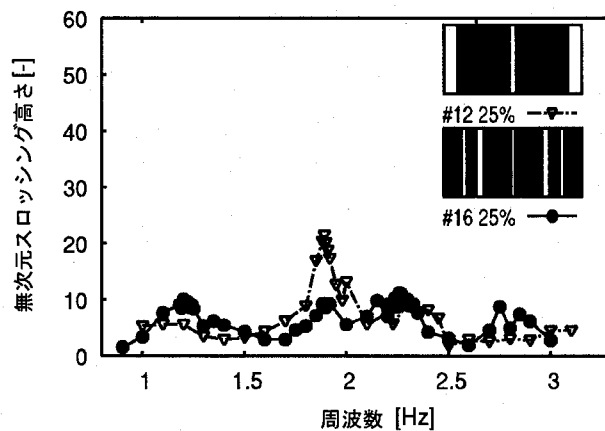
を図-5に示す。同図より、「1.5次モード」では#11(□印)は#06(菱形印)に比べ、約2倍の応答を示し、2次モード、「2.5次モード」の応答については、おおむね同程度となっていることがわかる。このことから、中央部を閉じ両端部を開口するとスロッシング波高のピークが逆に高くなることが分かった。

さらに、開口率は25%に固定しかつ両端部を開口したまま、中央部を少し開口した#12と、#11のスロッシング高さの応答関数を比較した結果を図-6に示す。同図から、#12の「1.5次モード」の応答が#11に比べて半分になっていることがわかる。またその他のモードでは#11と#12の応答の間には差異は見られなかった。さらに、図-5との比較から、#12と#06の波高応答が同程度であることが分かる。このことから、スロッシング抑制のためには中央部の開口が必要であること、#11で逆に高くなったのは両端部を空けたことが原因ではなく、中央部を閉じたことによることが推察された。

以上の結果を踏まえ、中央部を少し開口するとともに、開口率を25%に固定したまま遮閉板の分割位置を変化させた実験を行い、スロッシング高さが全体的に小さくなるレイアウトを探した結果、#16のレイアウトが得られた。図-7(a)に遮閉板を用いていないレイ



(a) #00 と #16 の比較



(b) #12 と #16 の比較

図-7 最適な遮閉板レイアウトのスロッシング高さ

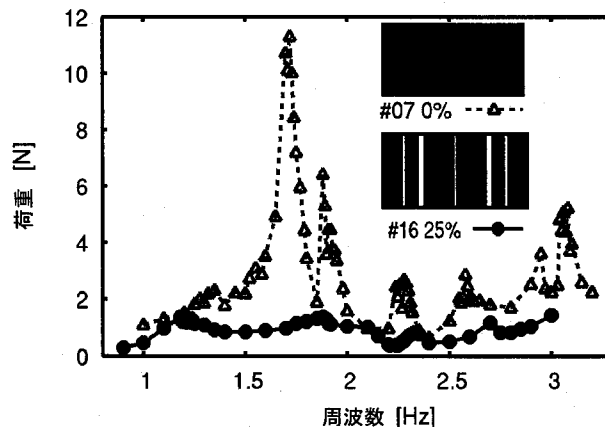


図-8 最適な遮閉板レイアウトの荷重 (#07 と #16 の比較)

アウト#00と比較した結果、図-7(b)に#12と比較した結果を示す。図-7(a)から、#16は#00に比べて、1次モードの応答が約5分の1に、2次モードが約2分の1になっており、また、図-7(b)から、「1.5次モード」の応答も小さくなっていることがわかる。

また、遮閉板にかかる荷重について、最適な遮閉板レイアウトである#16と、遮閉板によって完全に閉鎖したレイアウト#07を図-8で比較する。#07では特に「1.5次モード」近傍で大きな荷重がかかっており、

その他のモードでも荷重が大きくなっているが、#16ではスロッシング高さと同様に、全てのモードに対し遮閉板にかかる荷重が小さくなっていることがわかる。

以上より、タンク内に設置した遮閉板の配置を工夫することにより、スロッシング抑制できる可能性があることが分かった。特に、遮閉板の中央部を開口すること、および複数の開口部を設置することがスロッシング抑制に効果的であることが分かった。

### 3. 数値解析による実験結果の再現

次に、実験で得られたスロッシング抑制効果を数値解析により再現できるかどうかについて検討する。

#### 3.1 数値解析手法の概要

ここでは、数値解析に用いた解析手法の概要について説明する。本研究の数値解析<sup>6)</sup>は、三次元非圧縮流体解析手法に基づいており、水面挙動をVOF法<sup>7)</sup>で評価するとともに、乱流挙動を標準的な $k-\epsilon$ モデルで評価している。

##### (1) 基礎方程式と離散化法

本研究の数値解析で用いる基礎方程式は以下のようである。

・連続方程式

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

・運動方程式 (Reynolds 方程式)( $i = 1, 2, 3$ )

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_j}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3)$$

・流体体積の移流方程式

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $u_i$ : 流速の各方向成分、 $G_i = (0, -\alpha, -g)$ : 単位体積あたりの外力であり、 $g$ : 重力加速度 (= 9.8 m/s<sup>2</sup>)、 $\alpha$ : 振動台加速度である。また、 $p$ : 圧力、 $\rho$ : 流体密度 (= 1000 kg/m<sup>3</sup>)、 $\nu$ : 動粘性係数 (= 1.0 × 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s)、 $F$ : 各計算セルの流体存在割合、 $\bar{\cdot}$ : レイノルズ平均量、 $\overline{\cdot}$ : レイノルズ平均量からの変動量であり、式(3)中のレイノルズ応力  $-\overline{u'_i u'_j}$  を求めるため、以下の標準的な乱流評価式を用いる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{i,j} \quad (8)$$

ここで、 $k(\equiv \overline{u'_i u'_i}/2)$ : 乱流エネルギー、 $\epsilon(\equiv \nu \overline{u'_{i,j} u'_{i,j}})$ : 乱流エネルギー散逸率、 $\nu_t$ : 渦動粘性係数であり、式(5)～式(6)中の定数は  $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 、 $C_{\epsilon 1} = 1.45$ 、 $C_{\epsilon 2} = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$  とした。

以上の基礎方程式を直交座標系上で離散化し、SIMPLE法<sup>8)</sup>に基づいて解析する。本研究では直交直線座標系のもとで円筒タンクを対象としたシミュレーションを行なうため、メッシュ内にタンク外壁が存在する場合がある。このため、離散化の際には神山らの方法<sup>9)</sup>に従いセル境界の開口率とセルの空隙率を考慮した。各物理量の定義点は、流速のみを計算セルの境界面中央、その他の物理量を計算セルの中央で定義するスタッガード配置とし、離散化は時間について前進差分、移流項は三次精度風上差分、その他は中央差分とした。式(4)はVOF法の手順に従って解析した。

##### (2) 解析の流れ

本研究で用いているSIMPLE法に基づいた解析の流れを以下に示す。

1. ある時点においてすべての物理量の値が既知とする。
2. 水面形状を変形させ、流速・圧力の境界条件を設定する。
3. 運動方程式の離散化式から  $\Delta t$  秒後の流速の推定値  $\tilde{u}_i$  を求める。
4. 各計算セルの連続方程式の誤差  $D$  を求める。
5. 誤差  $D$  の最大値が許容範囲以下の場合、流速の推定値  $\tilde{u}_i$  を真値  $u_i$  として2.に戻り、そうでない場合、圧力誤差方程式を解いて圧力誤差を求め、流速推定値・圧力を修正し3.に戻る。

##### (3) 解析条件

解析の座標系は図-1に示すものとし、時間刻み  $\Delta t = 0.005$  s、誤差  $D$  の最大値許容値を  $D = 1.0 \times 10^{-5}$  とした。水面境界条件のうち、流速は米山らの方法<sup>6)</sup>に従って質量保存を満足するように設定し、乱流エネルギーは水面を含むセルの値を直下に位置する流体内部セルの計算値の8割に設定、乱流エネルギー散逸率は流体内部セルの計算値と同じに設定した。また、底面やタンク外壁の境界条件は流速、乱流量ともフリースリップとした。

加振は実験で測定した振動台の振幅と周波数から算定した水平方向加速度の時間変化を式(3)の外力項  $G_i$  に含まれる振動台加速度  $\alpha$  に与えることで表現した。

計算メッシュは、 $x$ 軸方向、 $y$ 軸方向は共に格子間隔を8mmに、 $z$ 軸方向に関しては格子間隔の5mmとした後で、円弧をできるだけ適切に模擬することを目

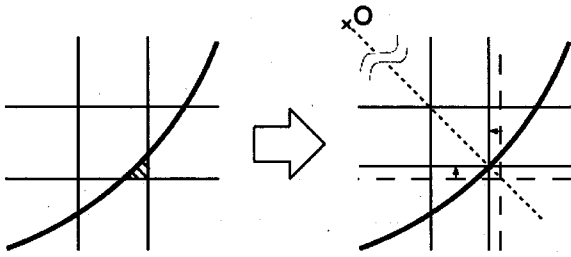


図-9 格子間隔の調整例

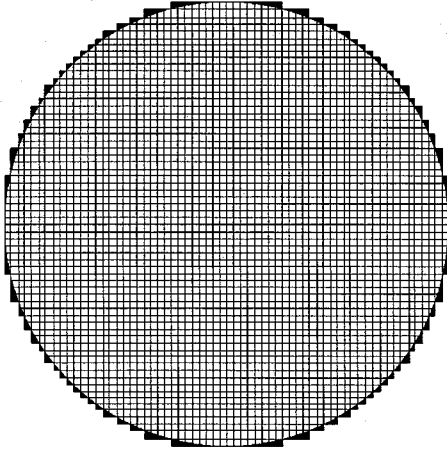


図-10 計算メッシュ分割 (水平断面)

的として計算セルの頂点と円弧が一致するように  $x$  軸方向,  $y$  軸方向の格子間隔を微調整した。図-9 に調整例を示す。このような修正を施して作成した計算メッシュ分割の水平断面を図-10 に示す。メッシュ数は  $x$  軸方向および  $y$  軸方向が 64 メッシュ,  $z$  軸方向 60 メッシュであり, 流体 (液体+気体) 領域のメッシュ数は 194,228 メッシュとなった。なお, 解析では遮閉板を厚さ 0 の壁として取り扱い, 遮閉板が存在する位置におけるメッシュ境界の開口率を 0 として表現した。解析された水面形状の一例を図-11 に示す。これは, レイアウト #12 の「1.5 次モード」近傍における水面形のスナップショットである。同図には遮閉板を表示していないが, 中央の開口部に流れがあることがわかる。

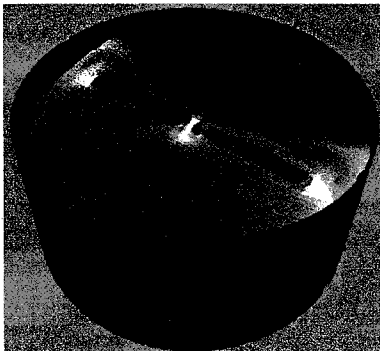


図-11 水面形状の一例

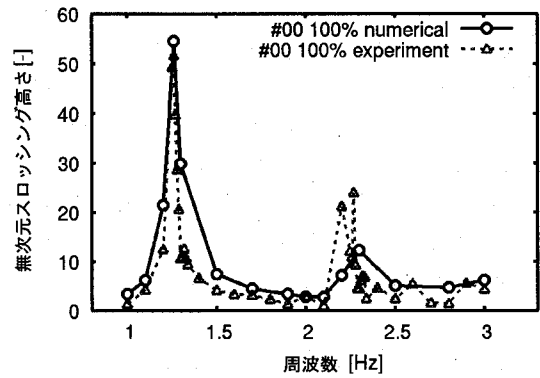


図-12 実験と数値解析の比較 (#00・波高)

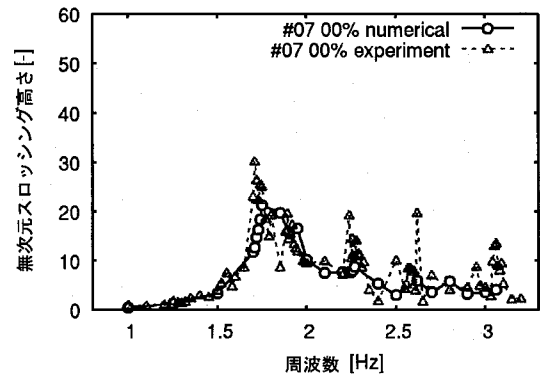


図-13 実験と数値解析の比較 (#07・波高)

### 3.2 実験結果と数値解析結果の比較

図-12~図-17 に, それぞれ #00, #07, #06, #11, #12, #16 の実験結果 ( $\Delta$ 印, 破線) と解析結果 ( $\circ$ 印, 実線) のスロッシング高さの応答関数の比較を示す。

図-12 は開口率 100% であるレイアウト #00 の比較結果である。実験結果, 解析結果共に, 1 次モード, 2 次モードのスロッシング高さにピークが表れ, 解析結果は遮閉板がない場合のスロッシング挙動を精度よく再現しているといえる。図-13~図-16 に示した #07, #06, #11, #12 の場合では, 「1.5 次モード」でスロッシング高さのピーク出現周波数を精度良く再現している。ピーク値については実験結果が解析結果を上回っている点も一部見られるが多くの点では一致していると言える。また, 1.0Hz から 3.0Hz における応答関数の形がほぼ一致している。このことから実験結果で確認された, 遮閉板配置によるスロッシング挙動の変化を適切に再現できていると言える。

実験で最もスロッシング防止効果が高かった #16 の比較 (図-17) では, 数値解析でも高いスロッシング防止効果を示している。また #07 の結果と同様に, 1.0Hz から 3.0Hz の周波数で応答関数の形, 変化の傾向がほぼ一致している。ただ, 全体的に解析の結果は実験結果に比べて若干小さくなっていることがわかる。

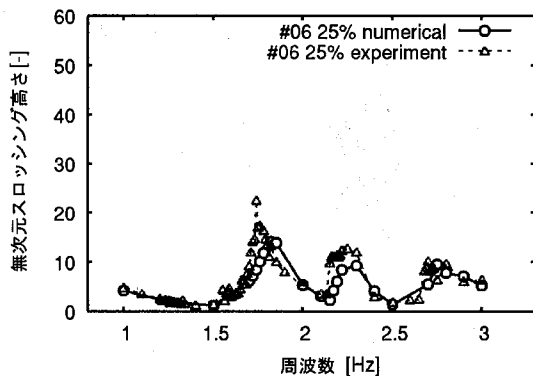


図-14 実験と数値解析の比較 (#06・波高)

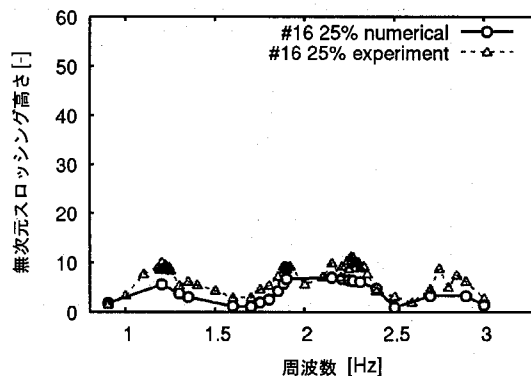


図-17 実験と解析の比較 (#16・波高)

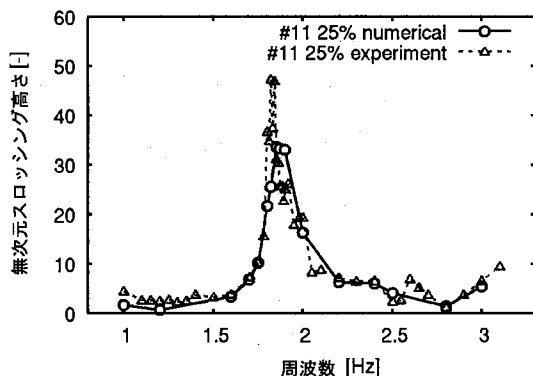


図-15 実験と数値解析の比較 (#11・波高)

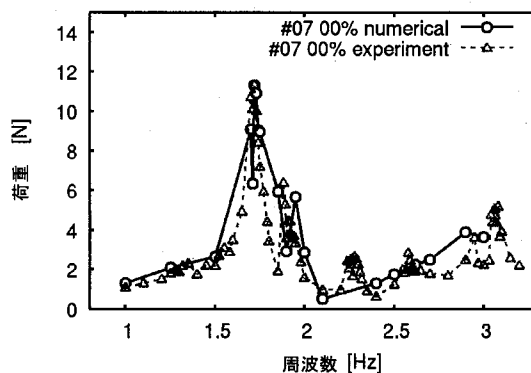


図-18 実験と解析の比較 (#07・荷重)

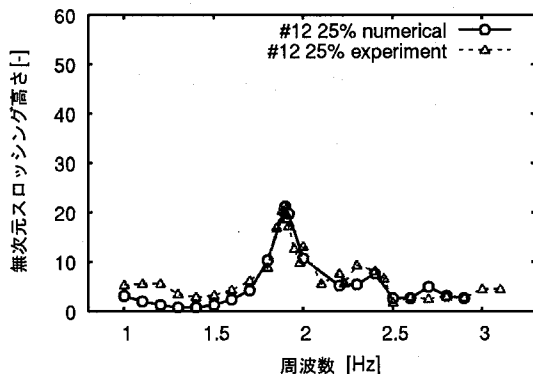


図-16 実験と解析の比較 (#12・波高)

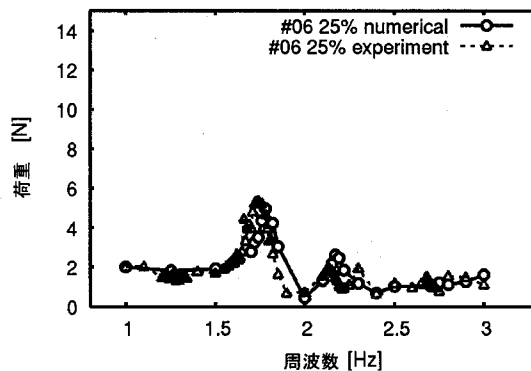


図-19 実験と解析の比較 (#06・荷重)

さらに遮閉板にかかる荷重の応答関数について、図-18～図-22に、それぞれ#07、#06、#11、#12、#16の実験結果(△印、破線)と数値解析結果(○印、実線)を比較して示す。解析結果では遮閉板を境界とする全てのセルの圧力に境界面の面積を掛けあわせて、遮閉板にかかる荷重としている。これらの図から、解析により荷重のピークを再現することができ、全体的に応答関数が一致していることがわかる。スロッシング高さの比較ではピークを再現できていないレイアウトも見られたが、荷重の比較ではピークについてもおお

むね一致した。

以上、スロッシング高さおよび荷重の応答関数の比較から、本研究の数値解析法は、実験で測定されたスロッシング挙動を高い精度で再現できることが分かった。

### 3.3 実地震波を用いた解析

以上から、本研究の数値解析が本研究で提案しているスロッシング抑制機構を再現できることが確認されたため、2003年十勝沖地震のEW成分の実地震波を用いて解析を行った。解析は前節までと同様に模型スケールとした。地震波は図-23に示すような防災科学研究所のK-NET 苫小牧観測点(HKD129)で得られた

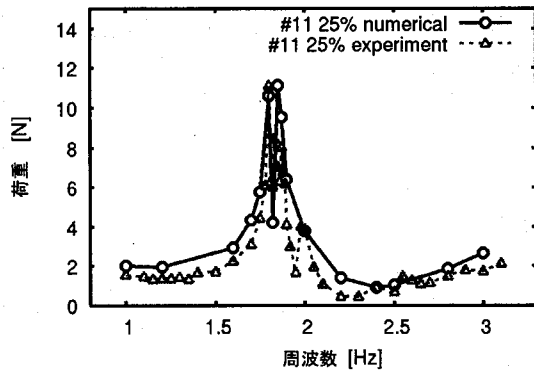


図-20 実験と解析の比較 (#11・荷重)

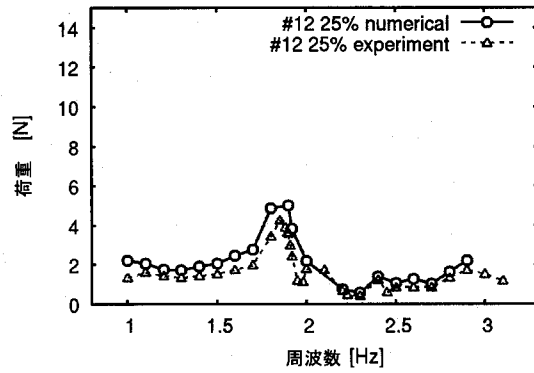


図-21 実験と解析の比較 (#12・荷重)

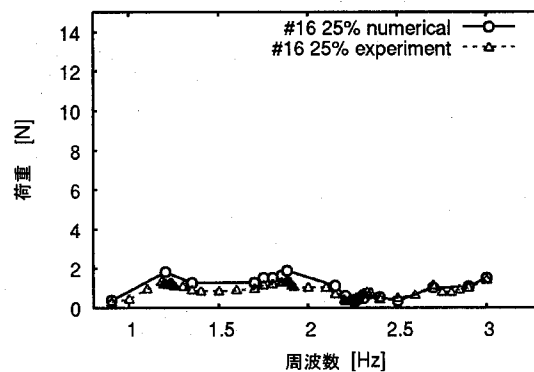


図-22 実験と解析の比較 (#16・荷重)

地震波のデータを用い、同図では、Froude 相似則に基づいて、時間スケールを 1/10 にして表示している。

図-24 に遮閉板を設置していないレイアウト #00 のスロッシング高さの時間変化を示す。同図からスロッシング高さの最大値が 10 秒付近で約 24mm に達することや、スロッシングが発達した後の減衰も小さいことがわかる。これに対し、図-25 に示すように、遮閉板で 100%閉鎖したレイアウト #07 ではスロッシング高さの最大値は小さくなり、その値をとる時間も少し遅くなっていることがわかる。またスロッシングの発達後の減衰が遮閉板がない場合より大きくなっていることもわかる。さらに、図-26 から、模型実験で最適と

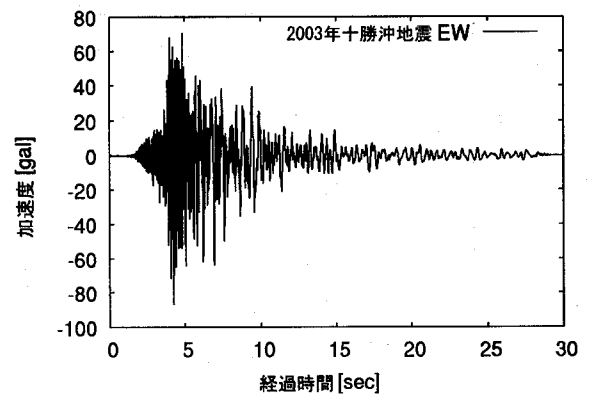


図-23 入力地震波

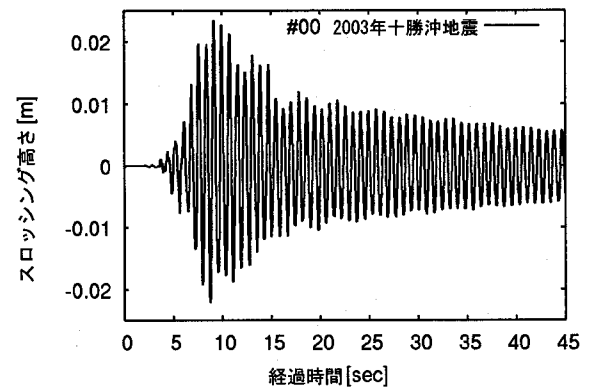


図-24 実地震波を入力した場合のスロッシング高さ (#00)

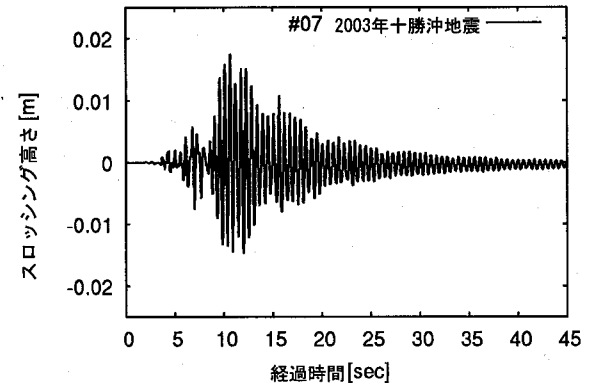


図-25 実地震波を入力した場合のスロッシング高さ (#07)

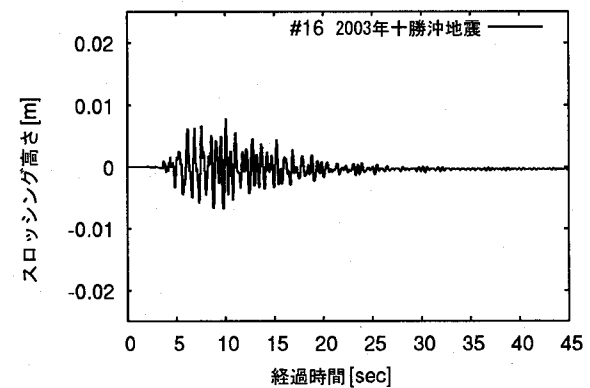


図-26 実地震波を入力した場合のスロッシング高さ (#16)

された遮閉板配置であるレイアウト #16 は、スロッシング高さの最大値が約 8 mm であることから、実地震



波に対してもスロッシングの抑制効果を発揮していることがわかる。ただし、正弦波を入力した場合には、スロッシング波高を5分の1に抑制できたが(図-7(a)参照)、この地震波では3分の1に抑制する結果となった。

#### 4. おわりに

本研究では、タンク内に遮閉板を設置することによるスロッシング防止の効果について、実験と数値解析によって検証した。以下に本研究で得られた成果を示す。

- タンク内に遮閉板を設置することによって、スロッシング高さを小さくすることができた。特に1次モードのスロッシング高さに効果が大きかった。
  - 本実験で得た最適な遮閉板(#16)を設置することにより、新たに現れたモードを含め、全てのモードに対しスロッシング高さを小さくすることができた。また最適な遮閉板では、スロッシング時に遮閉板にかかる荷重も小さくできることがわかった。
  - 本研究で用いた数値解析法は、実験で確認されたスロッシング挙動をスロッシング高さと同程度について精度良く再現できることがわかり、数値解析によりスロッシング挙動が予測可能であることが示唆された。
  - 本研究の数値解析法を、実地震波を入力したスロッシング挙動に適用した結果、実験で得た最適な遮閉板レイアウトが、実地震波入力時においてもスロッシング挙動抑制に有効であることがわかった。
- 本研究の最終的な目標は実スケールのタンクに、提案した遮閉板を設置することである。そのための今後の課題を以下に示す。
- 本実験で最適とされた遮閉板レイアウト(#16)は、実験をした21のレイアウトの中で最適とされたものである。したがって、スロッシング減衰メカニズムをさらに詳しく解明すると共に、遮閉板のレイアウトを再考案することが必要である。
  - 本論文では入力が遮閉板に対して垂直方向の1方向のみであるので、他方向からの入力に対する工夫・解析が必要である。

- 3次元の実地震波を用いての解析を行い、遮閉板のスロッシングに対する抑制効果を検証する必要がある。
- 中スケール(直径2,000mm)の模型実験と数値解析を行い、相似則について検証する。
- 相似則を考慮した上、実物大スケールでの数値解析を行い、実物大スケールでの挙動を解析し、実際に建設する為の設計に資する。

#### 謝辞

貴重な観測記録を提供していただいた防災科学技術研究所 K-NET に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 張至鎬, 濱田政則, 山田敏夫, 今野隆雄: 空気ダンパーによる液面揺動防止効果に関する実験的検討, 大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免振等技術のミニシンポジウム講演概要集, 土木学会, 2005.
- 2) 井田剛史, 坂東謙, 連思俊, 平野広和: 浮屋根式タンクのスロッシング減衰方法の検討, 大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免振等技術のミニシンポジウム講演概要集, 土木学会, 2005.
- 3) 川口周作, 水田洋司, 高西照彦: 円筒タンクのスロッシング軽減に関する実験的研究, 大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免振等技術のミニシンポジウム講演概要集, 土木学会, 2005.
- 4) 小林信之: 隔壁を用いたスロッシング防止法~渦を利用した減衰付加~, 大型タンクのスロッシングに関する耐震・制振・免振等技術のミニシンポジウム講演概要集, 土木学会, 2005.
- 5) 山田鎮男: コンビナート保安・防災技術指針, pp.249-260, 1974.
- 6) 米山望: 自由水面をもつ多次元流れの数値水理学研究, 京都大学博士論文, 2001.
- 7) Hirt, C. W., Nichols, B. D: Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 8) Patankar, S.V, Spalding, D.B: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimension Parabolic, Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 15, 1787pp, 1972.
- 9) 榊山勉, 鹿島遼一, 阿部宣之: 傾斜堤周辺の波動場解析へのポラスモデルの適用性, 海岸工学論文集, vol.38, pp.546-550, 1991.

(2007年4月12日 受付)