FAVOR法を用いた 陸上遡上津波に伴う漂流物挙動の数値解析 NUMERICAL ANALYSIS FOR THE BEHAVIOR OF THE DRIFTAGE WITH TSUNAMI RUN-UP USING FAVOR METHOD

米山 望¹・永島弘士²・戸田圭一³

Nozomu YONEYAMA, Hiroshi NAGASHIMA and Keiichi TODA

¹正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所(〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
 ²学生員 京都大学大学院工学研究科(〒 615-8530 京都市西京区京都大学桂)
 ³正会員 Ph.D 京都大学教授 防災研究所(〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

When tsunami hits a harbor, the destruction of the structures in the coastal area is caused not only by the wave force but also by driftage collision. If the structures are destroyed, the wrecks might be drifted and cause further destruction.

The main purpose of this paper is to develop the numerical analysis code for predicting the driftage behavior in tsunami run-up. The features of this method are (1) to be applied to the motion of driftage object with FAVOR method and (2) to be applied to a flow involving free surface with VOF method. The method is applied to the vertical oscillation of the driftage near the free surface and the horizontal motion of driftage with tsunami run-up. As the results, this method properly simulate the vertical oscillation and the horizontal movement of the driftage object. The obtained numerical solution of driftage horizontal velocity agrees well with the result of hydraulic experiment.

Key Words : tsunami run-up, driftage, numerical analysis, VOF method, FAVOR method

1. はじめに

津波来襲時には,船舶やコンテナ等が津波により漂流 し,港湾部の構造物に衝突して破壊する可能性がある. 2004年12月に発生したスマトラ沖地震津波では,多数 の瓦礫や乗用車などが漂流物となって津波とともに遡上 して構造物を破壊し,破壊された構造物が新たな漂流物 となって被害を増幅させたことは記憶に新しい.このよ うな被害を軽減するためには,漂流物の挙動や衝突力を 予測することが必要である.著者らは,北海道南西沖地 震津波の奥尻島における津波遡上現象の三次元解析を行 い,現地痕跡高とよく一致した結果を得ており¹⁾,この 三次元解析手法に新しい機能を盛り込んで,港湾などを 想定したできるだけ広い領域内での漂流物挙動を精度よ く予測することを最終的な研究の目的としている.

現在,三次元解析または鉛直二次元解析を用いた津波 に伴う漂流物の挙動の予測が牛島ら²⁾,川崎ら³⁾,後藤ら ⁴⁾によって行われている.牛島らは,多相場を物性の異 なる非圧縮性流体の混合体として扱うことにより,三次 元水面流れによる物体輸送現象を予測する数値解法(3D MICS)を提案している.この解法を自由水面流れによる球体運動にこの解法を適用した結果,良好な再現結果 を得ている.後藤らは,計算領域に多数の粒子(計算点) を配置し,個々の粒子の周囲に設定した影響域内での粒 子相互作用を評価することにより粒子を移動させる方法 (3D-MPS法)を用いて,浮体群を含む津波氾濫流の角柱 群との衝突過程に関する数値シミュレーションを実施し, 浮遊物の影響により角柱に作用する衝突力が流体力の平 衡値よりも大きくなるという結果を得ている.川崎らは, 鉛直二次元場を対象に,固定・非固定状態にある矩形物 体に段波が衝突した際の物体の作用波圧特性を,水理実 験と二次元固気液多相乱流数値モデル(DOLPHIN-2D) を用いた数値解析により検討し,漂流した物体が壁面に 衝突する際の衝撃波圧は物体に段波が作用する際の作用 波圧よりも大きくなるという結果を得ている.

これらの既往研究はそれぞれ高精度な予測が可能で あるが,本研究の最終目的である広い範囲での挙動予 測を行うには,計算時間などの面から困難と考えられ る.そこで本研究では,漂流物は剛体として取り扱い, 空気の解析を行わない手法として,漂流物を移動する 境界と見なした漂流物挙動予測手法の適用性を検討する.漂流物を含めた境界形状を適切に取り扱うために FAVOR(Fractional Area Volume Obstacle Representation)法⁵⁾を用いるとともに,水面挙動の精度よい解析 を行うため VOF 法⁶⁾を用いる.

類似の研究例としては,水谷ら⁷⁾の VOF 法を用いた潜 水浮体の波浪動揺に関する検討や川崎ら⁸⁾によるフラッ プゲート型高潮防潮堤の回転に伴う周囲の流体の挙動に 関する検討が行われている.本研究はこれらと比較し, 1.漂流物が大きく移動すること,2.構造物の動きが流体 を動かすのではなく,流体により物体が移動する現象を 取り扱っていることに特徴がある.なお,津波漂流物は 水面上で複雑な挙動をとるが,本研究では提案した手法 を比較的単純な陸上遡上津波に伴う漂流物の水平移動に 適用し計算手法の妥当性を検証する.

以下では,数値解析手法の概要を説明した後,漂流物 が存在しない陸上遡上津波に解析手法を適用して,水面 形状予測の妥当性を検証する.次に,漂流物が存在する 場合の陸上遡上津波に適用し,漂流物の水平移動を解析 しその妥当性を検証する.

2. 数値解析手法の概要

(1) 基礎方程式

本研究では,水面を有する流動現象を精度良く再現す るため,水面挙動の予測に VOF法,境界形状の取り扱 いに FAVOR 法を用いた非圧縮流体解析手法を用いた. 本解析法で用いる基礎方程式は,以下のようなものであ る.

・連続方程式

$$\frac{\partial \gamma^v}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_i^a \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

• 運動方程式 (Reynolds 方程式)
$$(i = 1,2)$$

 $\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\gamma_j^a \overline{u}_j}{\gamma^v} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = G_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right)$
(2)

・流体体積の移流方程式

$$\frac{\partial \gamma^v F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^a F \overline{u}_j}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

ここで, u_i : 流速の各方向成分, G_i :単位体積あたりの 外力,p: 圧力, ρ :流体密度, ν :動粘性係数, γ^v :計算セ ルの空隙率, γ_j^a :計算セル境界の開口率,F:計算セルの 流体充填率(=セル内の流体体積/セル内の空隙体積), : レイノルズ平均量,':レイノルズ平均量からの変 動量であり,式(2)中のレイノルズ応力 $-\overline{u'_i u'_j}$ を求める ため,以下の乱流評価式を用いる.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{\gamma^{v}} \frac{\partial \gamma_{j}^{a} k \overline{u}_{j}}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\left(\nu + \frac{\nu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right] \\ - \overline{u'_{i} u'_{j}} \frac{\partial \overline{u}_{i}}{\partial x_{j}} - \varepsilon$$
(4)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{\gamma^{v}} \frac{\partial \gamma_{j}^{a} \varepsilon \overline{u}_{j}}{\partial x_{j}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\left(\nu + \frac{\nu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{j}} \right] \\ - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_{i} u'_{j}} \frac{\partial \overline{u}_{i}}{\partial x_{j}} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^{2}}{k}$$
(5)

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6}$$

$$-\overline{u_i'u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}k\delta_{i,j} \tag{7}$$

ここで, $k(\equiv \overline{u'_i u'_i}/2)$: 乱流エネルギー, $\varepsilon (\equiv \nu \overline{u'_{i,j} u'_{i,j}})$: 乱流エネルギー散逸率, ν_t : 渦動粘性係数であり,式(4) ~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て SIM-PLE 法⁹⁾に基づいて解析する.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.また,式(3)は VOF 法に基づ いて離散化し,移流はドナアクセプタ法により行う.こ れに関して,流体体積を保存するためのいくつかの工夫 を行っている¹¹⁾.

(2) 漂流物の取り扱い

本研究では,漂流物を剛体の移動境界として取り扱う. (図-1参照) このため,計算セルの空隙率 γ^v および計 算セル境界の開口率 γ_j^a は時間によって変化する.漂流 物の水平方向の移動は重心位置の運動方程式

$$M\frac{d}{dt}U_g = P_i - \mu' Mg \tag{8}$$

に基づいて計算する.ここで, M:漂流物の質量, Ug:漂流物の重心移動速度の水平方向成分, Pi:漂流物が受ける全圧力の水平方向成分, μ':漂流物と地面の間の動摩擦
 (2) 係数, g:重力加速度である.漂流物の全圧力 Pi は流体セルの圧力値を用いて算定する(図-2参照).

このように本手法では,流体の動きは,流体解析で求めた全圧力として漂流物に反映され,漂流物の動きは,計算セルの空隙率 γ^v およびセル境界の開口率 γ_i^a の時

空セル Fa=0.3 F=0.0	物体セル Fa=0.0 F=0.0	物体セル Fa=0.0 F=0.0	空セル Fa=0.7 F=0.0	
水面セル <mark>Fa</mark> =0.3 F=0.6	物体セル Fa=0.0 F=0.0	物体セル Fa=0.0 F=0.0	水面セル Fa=0.7 F=0.6	
<mark>内部セル Fa=0.3 F</mark> =1.0	物体セル Fa=0.0 F=0.0	物体セル Fa=0.0 F=0.0	内部セル Fa=0.7 F=1.0	

図-1 漂流物の取り扱い



間変化として流体解析に反映される.なお,今回は津波 遡上時の水平移動の解析を対象としているため,回転運 動は考慮していない.

(3) 計算の流れ

本解析手法の計算処理手順は以下の通りである(図 -3参照).

- ① 初期データを読み込む.
- ② 時刻 t での流速 u_iⁿ と圧力 pⁿ の境界条件を設定
 する.
- ③ 時刻 $t + \Delta t$ での乱流エネルギー k^{n+1} , 乱流エネル ギー散逸率 ε^{n+1} , 渦動粘性係数 ν_t^{n+1} を計算する.
- ④ 式 (2) の離散化式を用いて,時刻 t + ∆t での流速の推定値 ũⁿ⁺¹ を計算する.
- ⑤ 式 (8) の離散化式等を用いて,時刻 $t + \Delta t$ での漂 流物重心の移動速度・位置の推定値 $\tilde{U_{g_i}}^{n+1}$, $\tilde{X_{g_i}}^{n+1}$ を計算する.
- ⑥ $\tilde{X_{g_i}}^{n+1}$ に基づき,開口率,空隙率の推定値 $\tilde{\gamma^a}_i^{n+1}$, $\tilde{\gamma^v}^{n+1}$ を計算する.
- ⑦ 連続式誤差 D(式(1) 左辺の離散化式の値)を計算



する.もし, D が許容最大値 D_{max} を超えていれ ば, 圧力誤差方程式を解いて圧力の推定値 \tilde{p}^{n+1} を 修正し, ④に戻る. D が D_{max} 以下であれば,推 定値を真値として⑧に進む.

- ⑧ 時刻 $t + \Delta t$ での流体充填率 F^{n+1} を計算する.
- ⑨ 計算セルを分類する.
- ① この時点で計算終了時刻であれば計算を終了し、そうでなければ時刻を更新して②に戻る.

3. 解析手法の適用と検証

(1) 漂流物が無い場合

まずはじめに,漂流物が無い状態での津波遡上水理模型実験の結果と解析結果を比較する.

a) 津波遡上水理模型実験の概要

池野ら¹⁰⁾は,単純形状の漂流物が津波により運ばれて 構造物に衝突する場合の衝突力を明らかにし,衝突力の 概略が把握できる算定式を提案するために水理模型実験 を行っている.その実験装置の概要を図-4に示す.模 型縮尺は1/100である.

b) 解析結果と実験結果の比較

池野らの論文に水位変動が掲載されている,上流側静 水位 $H_1 = 0.4 \text{ m}$,下流側静水位 $H_2 = 0.05 \text{ m}$ で漂流物 が無い実験ケースに流体挙動解析手法を適用した.津波 実験では水路壁の影響をほとんど受けないため鉛直二次 元解析とし,実験模型スケールで計算した.格子間隔は 0.01 m であり,ゲート開放速さ 4.0 m/s,計算時間刻み 幅 $\Delta t = 5.0 \times 10^{-4} \text{ s}$,連続式誤差許容最大値 $D_{max} =$ 1.0×10^{-5} ,水の動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,流 速の物体境界条件をハーフスリップとして計算した.乱 流量の境界条件は,物体境界,水面境界とも,乱流エネ ルギーについては流体内部の8割の値,乱流エネルギー 散逸率については,流体内部と同じ値とした.

四つの計測点 P_1 (Y = 7.07 m), P_2 (Y = 8.11 m), P_3 (Y = 9.02 m), P_4 (Y = 9.81 m) での水位変動の実験結果と解析結果を比較したのが図-5 である.ただし,解析結果の時刻を 0.13 s だけ早めて,点 P_4 での水位上昇開始時刻が実験結果と一致するようにして表示



図-5 漂流物がない場合の水位変化の比較

している · 図-5より,各地点の水位や,各地点に波が 到達する時間がほぼ一致していることがわかる.このこ とから,本研究の解析手法が漂流物のない場合の津波挙 動を適切に再現できることが確認された.

なお,津波衝突後の水位の計算結果は各地点とも実験 より若干高くなっている.解析中(0から6秒まで)の流 体ボリュームの変化を調べたところ,4.27×10⁻¹¹%の 減少であり解析における質量の保存は確認されている. このため,水位が高くなる原因は、津波が鉛直壁に衝突 した後の流況が隅角部などの影響で三次元性が強いもの となり,鉛直二次元解析である本解析結果と一致しない 部分が出ているのではないかと考えている.この点につ いては,今後行う予定の三次元解析において検証する予 定である.

(2) 漂流物がある場合

ここでは,漂流物の鉛直方向の移動と水平方向の移動 を解析する.



図-6 鉛直方向自由振動の解析初期状態



a) 漂流物の鉛直方向の移動

水よりも軽い物体を水面付近のつりあいの位置より低 い位置から手を離すと,物体は自重と周囲の流体の圧力 により水面付近を鉛直方向に振動する.ここでは,基本的 な挙動の確認として本解析手法をこの現象に適用し,そ の結果を考察する.解析は図-6に示す領域で行った.漂 流物は高さ 0.05 m, 幅 0.05 m, 密度 400 kg/m³ で, 初期 重心位置を中央の水面位置 $(Y, Z) = (0.075 \,\mathrm{m}, 0.410 \,\mathrm{m})$ とした.漂流物はつりあいの位置よりも下方にある(図 -6 参照).計算は,格子間隔を 0.01 m とし,計算時間刻 み幅 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-3}$ s , 連続式誤差許容最大値 $D_{max} =$ 1.0×10^{-5} ,水の動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \,\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$ とし て計算を行った.図-7に解析結果の一例を示す.同図 から,下降局面では漂流物が流体を押し下げている様子, 上昇局面では流体が漂流物を押し上げている様子がわか る.また,漂流物の移動に伴い水面が揺動していること がわかる.なお,本解析では,漂流物も物体境界の一部 と考えて,底面など静止している物体と同じ流速および 乱流の境界条件を課している.この是非については今後 の検討していく必要がある.

図-8 に漂流物重心の鉛直方向の変位を,自重と静水 圧近似基づく浮力のみを外力とした解析解と比較して示 す.船舶の分野で研究されているように,一般に漂流物 の鉛直振動は微小振幅の場合を除いて,理論曲線とは一 致せずに時間とともに振幅が減衰する¹²⁾.また,その挙 動は実験の体系に大きく依存するため,解析的に解くこ とは困難とされている¹²⁾.本研究でもその知見と矛盾の ない結果を得ることができた.また,試みに,漂流物の 運動方程式(8)の圧力項を,各時点の平均水位と漂流物 下端位置の差に基づく浮力を与えた場合,図-8のよう に解析解とほぼ一致した.このことから,漂流物下の圧



図-8 重心位置の時間変化の考察

力が静水圧分布とはなっていないことが確認された.ただし,今回の検討は定性的な検討であるため,定量的な減衰挙動について今後,実験により詳細に検討していく必要がある.

b) 漂流物の水平方向の移動

ここでは , 3.(1) で用いた津波遡上解析領域を対象と して漂流物挙動解析手法をこの現象に適用した.解析領 域,座標系,格子間隔,初期水位,計算時間刻み幅,連 続式誤差許容最大値,水の動粘性係数はすべて 3.(1) と 同じとした.漂流物は,池野らが実験で使用し,漂流物 挙動が詳細に示されている,高さ0.045m,幅0.045m, 奥行き 0.89 m,密度 600 kg/m³の木材の角柱とし,漂 流物重心の初期位置 Y = 9 m とした.なお,漂流物の奥 行きは水路幅0.90mとほぼ同等であることから,現象は 二次元的に変化するため , 漂流物がない場合と同様に鉛 直二次元解析を適用した.また,池野らの実験結果では, 漂流物はわずかに浮き上がりながら,最初の衝突までほ ぼ並進することが明らかになっている.このため,漂流 物と地面の間の摩擦係数は,静止摩擦係数を0.5,動摩 擦係数は漂流物が浮き上がることを想定して十分小さな 値(0.001)を設定した.

以上の条件の下で漂流物の挙動解析を行った.その結 果の一部を図-9に示す.また,図-10は移動開始から 衝突までの漂流物重心の移動速度の実験値と解析値を比 較したものである.図-9の1.7,1.8 s 時点では津波の一 部が後方に跳ね上がっている.これは,津波衝突直後, 漂流物の速度が津波に比べて遅いため,津波の一部が上 方に跳ね上げられ,漂流物の加速とともにそれが後方に 取り残されたためである.図-10からわかるように,本 研究の解析手法により津波漂流物の並進運動時における 漂流物の移動速度を適切に再現できていることがわかる. ただし,実験結果での細かい流速変動については本研究 の解析コードでは再現できていない.これには,僅かな 浮上や回転等の動きが関係していると考えられ,今後, 回転挙動などの解析機能を追加して詳細に検討していく 必要がある.



(エから)¹ = 1.1, 1.8, 2.08 図-9 漂流物の水平移動の様子





図-11 漂流物の体積(質量一定)と移動速度変化の関係

(3) 本解析手法を用いた漂流物挙動に関する考察

上記のことから水平移動のみを考慮した本研究の解析 手法により,津波遡上時の漂流物挙動をおおむね再現で きると判断し,以下では,パラメータを変化させた解析 を行い,漂流物挙動の特徴について考察を試みる.

a) 大きさの影響

池野らの実験で用いられた漂流物(角柱の一辺の長さを4.5 cm)を基準とし,質量を一定にしたまま,角柱の一辺の長さを7.2 cm および2.7 cm に変化させる解析を行った.重心位置の速度変化を図-11 に示す.その結果,体積を大きくした一辺7.2 cm のケースは,基準のケースとあまり変わらない挙動を示すが,2.7 cm のケースは1.75 秒付近で移動速度が大きく減少する.この原因を調べるため,1.85 秒での3ケースの水面挙動を図-12 に示す.同図からわかるように,2.7 cm のケースでは津波が漂流物を追い越している.このため,移動速度が急減し



- (上から)角柱の一辺の長さ=2.7cm,4.5cm,7.2cm
- 図-12 漂流物の体積(質量一定)と移動速度変化の関係 (t=1.85s)



図-13 漂流物の初期設置位置と移動速度変化の関係

たことがわかった.このケースは比重が1.666 であるが, 津波が追い越すまでは津波先端の力により,他のケース と同様の速度で移動していることがわかる.

b) 漂流物の設置位置の影響

池野らの実験では,Y = 9.0 m地点に漂流物を設置して実験が行われている.ここではこれを基準として沖合向きおよび陸向きにそれぞれ20 cm動かして計算を行った結果を図—13に示す.同図から本研究の条件範囲では設置位置により漂流物の加速度合いが異なるものの,衝突直前の速度については,250 cm/s前後の値になった.

4. おわりに

本研究で得られた結果を以下にまとめる.

- ・水面の解析手法に VOF 法,地形の表現に FAVOR 法 を用いた流体解析手法を津波遡上の水理模型実験に適 用したところ,陸上遡上津波の挙動をおおむね解析で きることがわかった.
- ・ 漂流物の形状も FAVOR 法に基づいて表現し,時間と ともに漂流物が移動する解析手法を構築した.
- ・自由表面近傍で鉛直振動する漂流物の挙動に適用した
 ところ,鉛直振動が減衰していく挙動を定性的に再現
 することができた.
- ・津波漂流物挙動の水理実験に本研究の解析手法を適用したところ,漂流物の最大移動属度や速度時間変化などを適切に再現できることがわかった.しかし,実験結果は無視できない程度の速度変動を伴っており,この点については本研究の解析手法では再現できな

かった.

 ・本研究の解析手法を用いて,並進する津波漂流物の 挙動を考察したところ,同じ質量で体積が小さく比重 が大きい場合には,津波が漂流物を追い越すことがわ かった。

本研究では,回転を考慮せずにある程度現象を再現したものの,実際は水平運動でも,小さな回転や浮上などの複雑な運動を繰り返すことが予想される.今後は,本 解析手法に回転の効果を取り込むことにより,より詳細な再現を試みるとともに,より多くの実験結果との検証 を積み重ねてさらに改良していく予定である.

謝辞

本研究は,科学研究費補助金 基盤研究 C(課題番号: 19510189,研究代表者:米山望)の助成を受け実施した ものである.また,(財)関西エネルギー・リサイクル科 学研究振興財団の研究助成を受けた.ここに記して謝意 を表します.

参考文献

- 米山望・松山昌史・田中寛好:1993年北海道南西沖地 震津波における局所遡上の数値解析,土木学会論文集, No.705/II-59,139-150,2002.
- 2) 牛島 省,山田修三,藤岡 奨,禰津家久:3次元自由水面 流れによる物体輸送の数値解析法(3D MICS)の提案と適 用性の検討,土木学会論文集,No.810/ -74,pp.79-89, 2006.
- 3) 川崎浩司,山口 聡,袴田充哉,水谷法美,宮島正悟:段 波と矩形物体の衝突・漂流過程における作用波圧特性,海 岸工学論文集,第53巻,pp.786-790,2006.
- 4)後藤仁志,五十里洋行,酒井哲郎,奥謙介:浮体群を伴う津波氾濫流の3Dシミュレーション,海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.196-200,2006.
- Hirt, C.W. and Sicilian, J.M., A Porosity Technique for the Definition Obstacles in Rectangular Cell Meshes, Proc. 4th Int. Conf. Ship Hydro., 1985.
- 6) Hirt, C. W. and Nichols, B. D. : Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol.39, pp.201-225, 1981.
- 7) 水谷法美,許東秀,島袋洋行:VOF法による潜水浮体の 波浪動揺と波変形に関する有限変位解析手法の開発,海 岸工学論文集,第51巻,pp.701-705,2004.
- 8) 川崎浩司,富田孝司,下迫健一郎,高野忠史,熱田浩史:
 フラップゲート型高潮防潮堤の越波と作用波力,海岸工学論文集,第50巻,pp.791-795,2003.
- 9) Patankar, S.V. and Spalding, D.B.: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentun Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flow, *Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.15, pp.1787, 1972.
- 10) 池野正明,田中寛好:陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関 する実験的研究,海岸工学論文集,第50巻,pp.721-725, 2003.
- 11) 米山望:自由液面解析コード (FRESH)の開発,日本流 体力学会誌「ながれ」第17巻第3号,1998.
- 12) 日本造船学会海洋工学委員会性能部会:実践 浮体の流体 力学 後編 実験と解析,成山堂書店,pp.10-25,2003. (2007.9.30 受付)