

津波漂流物挙動の三次元数値解析

Three Dimensional Numerical Analysis for Tsunami Drift Behavior

永島弘士¹, 米山望²

Hiroshi NAGASHIMA and Nozomu YONEYAMA

¹修(工)(株)ニュージェットク 河川グループ (〒 531-0074 大阪市北区本庄東二丁目 3 番 20 号)²博(工) 京都大学防災研究所准教授 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The main purpose of this study is to develop a three dimensional numerical analysis code for the prediction of tsunami drift behavior. First, we developed a method to calculate each figure of drift parted by the orthogonal grid accurately and stably by using the vector analyses. Then, we developed the new code by building this method into the three dimensional fluid analysis code which used the FAVOR method and the VOF method. We applied the new code to two hydraulic experiments on a drift in different initial positions. As a result, the code simulated each drift behavior qualitatively and quantitatively.

Key Words : tsunami drift, three dimensional numerical analysis, the 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。

現在、三次元解析を用いた津波漂流物の挙動予測が牛島ら¹⁾、川崎ら²⁾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。牛島らは、この解法を用いて Rayleigh-Taylor の安定問題および一様流中の球体の抗力係数を求める計算を行い、妥当な結果を得ている。さらに、造波水槽を用いた自由水面流れによる球体運動の実験を行い、この解法を適用した結果、現象の再現性は良好であるという結論を得ている。

川崎らは、3次元場を対象に、固相-気相-液相の相互干渉を高精度に解析できる数値モデルとして、不等間隔格子、複数剛体の運動解析手法、dynamic 二変数混合モデル DTM を導入した、CIP 法と拡張 SMAC 法に基づく 3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D を新たに開発している。川崎らは、このモデルを用いてピストン型造波による浮体の動揺運動を解析し、複数剛体-水-空気複雑な異相界面および流速場を安定して計算可能であることを示している。さらに、水柱崩壊に

伴う段波と矩形剛体の衝突・漂流に関する水理実験にこのモデルを適用し、現象の再現性は良好であ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、空気の流動も解析しているため、本研究の最終目的として想定してい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、漂流物を剛体として取り扱い、空気の解析を行わない手法を開発することを目的とする。米山ら³⁾⁴⁾および著者ら⁵⁾は、鉛直二次元解析においてこの解析手法の妥当性を既に検証している。本研究では、並進 3 自由度および回転 3 自由度を考慮した漂流物の複雑な挙動が解析可能な三次元数値解析手法を新たに開発した。

2. 数値解析手法の概要

(1) 流体の解析方法

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⁶⁾、境界形状の取り扱いに FAVOR 法⁷⁾を用いた非圧縮流体解析手法を用いた。本解析法で用いた基礎方程式は、以下のようなものである。

・連続方程式

$$\frac{\partial \gamma^v}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^v \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

・運動方程式 (Reynolds 方程式) ($i = 1, 2, 3$)

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

・流体体積の移流方程式

$$\frac{\partial \gamma^v F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^a F \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

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), $\bar{\cdot}$:レイノルズ平均量, $\dot{\cdot}$:レイノルズ平均量からの変動量である. また, 乱流量の評価には標準型 $k-\epsilon$ モデルを用いた.

以上の基礎方程式を直交座標系上で離散化してSIMPLE法⁸⁾に基づいて解析した. 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. また, 式(3)はVOF法に基づいて離散化し, 移流はドナクセプタ法により行った. 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た⁹⁾.

(2) 漂流物の解析方法

漂流物を剛体として取り扱い, 計算セル内の漂流物の存在を, 図-1のように計算セルの空隙率 γ^v およびセル境界の開口率 γ_i^a の値により認識させる. これらの値を正確に計算するためには, 図-2に示すような直交格子で区切られた漂流物の個々の部分(セグメントと呼ぶ)の体積および表面積を正確に計算する必要がある. そこで本研究では, 三次元直交格子内に存在する物体の形状および流体から物体に作用する力(圧力および粘性力)をベクトル解析を用いて厳密かつ安定的に計算できる方法を開発した. この方法を2.(1)の流体解析手法に組み込み, 漂流物に作用する全外力および全モーメントをセグメントの表面ごとにベクトル解析を用いて厳密に計算し, 漂流物の並進運動および回転運動をそれぞれの運動方程式に基づいて計算することにより, 並進3自由度および回転3自由度を考慮した漂流物の複雑な挙動が解析可能な数値解析手法を新たに開発した. 本解析法で用いた漂流物の運動方程式を以下に示す.

・漂流物重心の運動方程式

$$m \mathbf{a}_g = \mathbf{F}_g \quad (4)$$

・漂流物重心まわりの回転運動の運動方程式

$$\begin{cases} I_{11}\phi_1 - (I_{22} - I_{33})\omega_2\omega_3 = N_1 \\ I_{22}\phi_2 - (I_{33} - I_{11})\omega_3\omega_1 = N_2 \\ I_{33}\phi_3 - (I_{11} - I_{22})\omega_1\omega_2 = N_3 \end{cases} \quad (5)$$

ここで, m は漂流物の質量, \mathbf{a}_g は漂流物重心の加速度, \mathbf{F}_g は漂流物に作用する外力の合力であり, ω_i は*i*軸まわりの角速度, $\phi_i (= d\omega_i/dt)$ は*i*軸まわりの角加速度, I_{ii} は慣性モーメント I の ii 成分, N_i は*i*軸まわりのモーメントである.

	空セル	空セル	空セル	空セル
	$\gamma^v=0.0$	$\gamma^v=0.5$	$\gamma^v=0.4$	$\gamma^v=0.6$
	$F=0.0$	$F=0.0$	$F=0.0$	$F=0.0$
水面セル	物体セル	物体セル	水面セル	
$\gamma^v=0.5$	$\gamma^v=0.0$	$\gamma^v=0.0$	$\gamma^v=0.4$	
$F=0.6$	$F=0.0$	$F=0.0$	$F=0.6$	
内部セル	内部セル	内部セル	内部セル	
$\gamma^v=0.2$	$\gamma^v=0.1$	$\gamma^v=0.2$	$\gamma^v=0.5$	
$F=1.0$	$F=1.0$	$F=1.0$	$F=1.0$	

図-1 漂流物の取り扱い

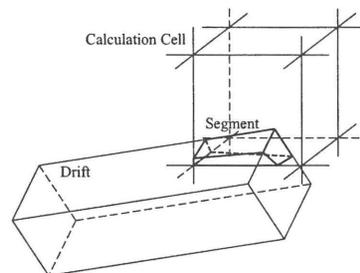


図-2 セグメント

開発した手法では, 流体の動きは流体解析で求めた圧力および粘性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 の時間変化として流体解析に反映される.

3. 解析手法の適用と検証

本章では, 漂流物挙動解析手法を漂流物の初期条件が異なる2種類の既往の水理模型実験に適用して, 漂流物挙動の実験結果と解析結果を比較, 考察する.

(1) ケース1 -水面に浮かぶ物体が流される場合-

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. その実験模型の概要を図-3に示す. 模型縮尺は1/100である.

本研究では $H_1 = 40$ cm, $H_2 = 5$ cm で, 漂流物の形状が直径8 cm, 長さ20 cmの円柱, 縦向き配置, 受波圧板と配置地点の距離が80 cm (重心初期位置 $Y = 8.95$ m) の場合について, 計算開始と同時に図-3のゲートが4.0 m/sで上がるとし, 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 $D_{max} = 1.0 \times 10^{-5}$, 流体の密度 $\rho_w = 1.0 \times 10^3$ kg/m³, 流体の動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ m²/s, 漂流物の密度 $\rho_d = 0.5 \times 10^3$ kg/m³, 漂流物の反発係数 $e = 0.001$, 物体境界内での流速を50%の値として解析を行った. ただし, 漂流物の形状は, 断面積および体積が円柱と等しい正八角柱とした. 実験と同様に, 漂流物の先端(受波圧板側の面の重心)と後端(貯水部側の面の重心)の位置の時間変化を計測した.

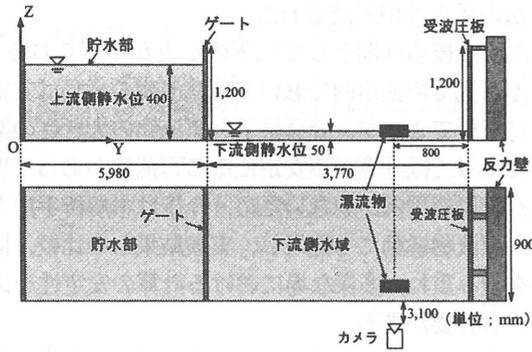


図-3 実験模型 (ケース 1)

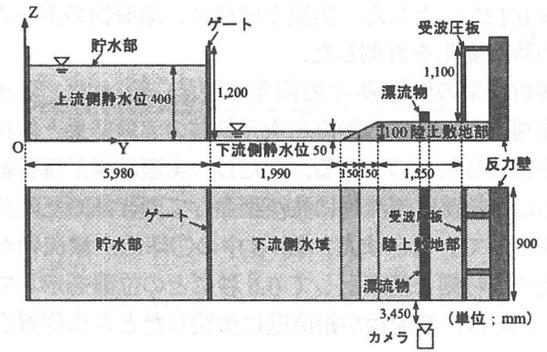


図-6 実験模型 (ケース 2)

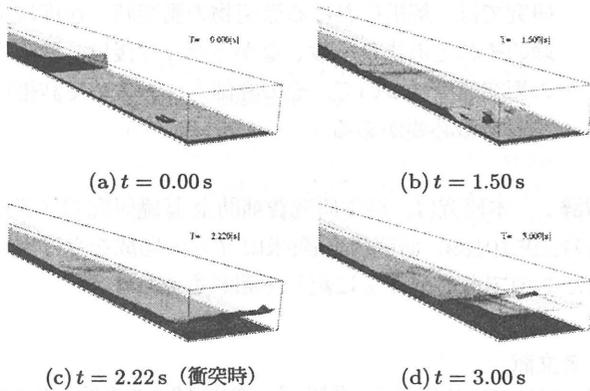


図-4 解析結果の例 (ケース 1)

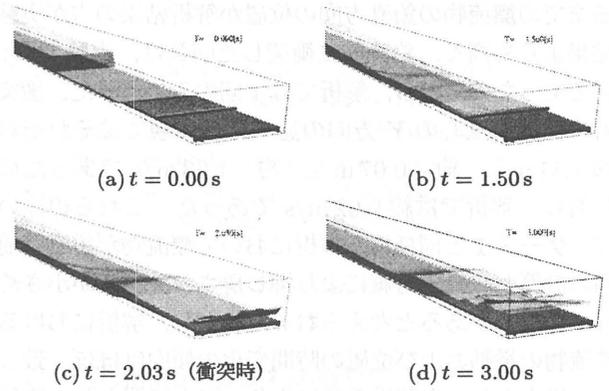


図-7 解析結果の例 (ケース 2)

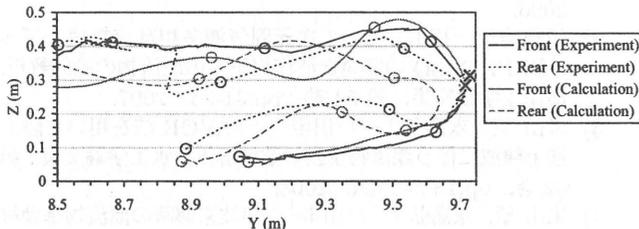


図-5 漂流物先端と後端の鉛直二次元移動軌跡の比較 (ケース 1)

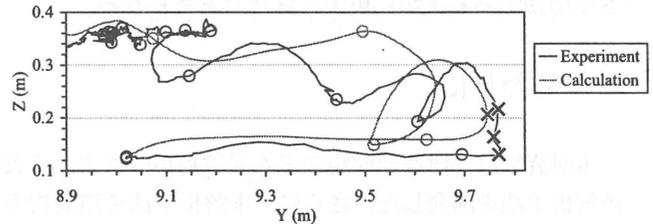


図-8 漂流物重心の鉛直二次元移動軌跡の比較 (ケース 2)

解析結果の例を図-4に示す。図-5は、漂流物の先端および後端の鉛直二次元軌跡の実験結果と解析結果を比較したものである。図-5中の○印は、漂流物の移動開始時刻を基準として0.5秒ごとの位置を示しており、×印は、鉛直壁に衝突した位置を示している。

図-5より、解析における漂流物の移動軌跡および位置の時間変化は、実験のそれらとほぼ一致していると言える。また、漂流物の鉛直壁への衝突位置はほぼ一致したが、衝突時の漂流物先端のY方向速度は、実験では約0.5 m/sであったのに対し、解析では約0.17 m/sであった。この違いは、解析において、漂流物が鉛直壁前面の計算セルの圧力値により押し戻され、速度が小さくなったためであると考えられる。しかしその一方で、漂流物の移動軌跡および位置の時間変化が実験と解析でほぼ一致したのは、漂流物が受けた鉛直壁前面の計算セルの圧力値および鉛直壁からの反力による力積が、実験と解析で同程度であったためであると考えられる。以上より、本解析手法により、水面に浮かぶ漂流物が津波によって流され、鉛直壁に衝突してはね返る挙動がおおむね再現

できたと考えられる。

(2) ケース 2 -陸上に置かれた物体が流される場合-

池野ら¹¹⁾が行った水理模型実験の実験模型の概要を図-6に示す。この模型は、受波圧板前面に高さ10 cmの陸上敷地部が設けられていること以外は、図-3とほぼ同様である。

本研究では $H_1 = 40$ cm, $H_2 = 5$ cmで、漂流物の形状が4.5 cm、長さ89 cmの角柱、横向き配置、受波圧板と配置地点の距離が80 cm (重心初期位置 $Y = 9.02$ m)の場合について、計算開始と同時に図-6のゲートが4.0 m/sで上がるとし、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 $D_{max} = 1.0 \times 10^{-5}$ 、流体の密度 $\rho_w = 1.0 \times 10^3$ kg/m³、流体の動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ m²/s、漂流物の密度 $\rho_d = 0.5 \times 10^3$ kg/m³、漂流物の反発係数 $e = 0.001$ 、物体境界内での流速を50%の値として解析を行った。ただし、漂流物と地面の間に流体が流れ込み、流体からの鉛直上向きの力が漂流物に作用するように、漂流物重心の鉛直方向の初期位置を

$Z = 0.123 \text{ m}$ とした。実験と同様に、漂流物の重心の位置の時間変化を計測した。

解析結果の例を図-7に示す。また、図-8は、漂流物の先端および後端の鉛直二次元軌跡の実験結果と解析結果を比較したものである。ただし、実験結果、解析結果ともに、軌跡は漂流物に波が到達して動き始めた時刻より表示している。また、図-8中の○印は、漂流物が動き始める時刻を基準として0.5秒ごとの位置を示しており、×印は、漂流物が鉛直壁に衝突したときの位置を示している。

図-8より、漂流物が動き始めてから鉛直壁に衝突するまでの漂流物の鉛直方向の位置が解析結果の方が実験結果よりも高く、鉛直壁に衝突した回数は、実験では3回であったのに対し、解析では1回のみであった。衝突時の漂流物重心のY方向の速度は、実験ではそれぞれ約1.11 m/s、約-0.07 m/s、約-1.08 m/sであったのに対し、解析では約0.02 m/sであった。これらの違いは、ケース1と同様に、解析において漂流物が鉛直壁前面の計算セルの圧力値により押し戻され、速度が小さくなったためであると考えられる。しかし、解析における漂流物の挙動および位置の時間変化の傾向はほぼ一致した。以上より、本解析手法により、陸上に置かれた物体が陸上遡上津波によって流され、鉛直壁に衝突してはね返る挙動がおおまかに再現できたと考えられる。

4. おわりに

本研究では、津波漂流物の三次元挙動が解析できる数値解析手法を開発した。さらに、本解析手法を漂流物の初期条件が異なる2種類の既往の水利模型実験に適用し、本解析手法の妥当性を検証した。

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 三次元直交格子内に存在する物体の形状および流体から物体に作用する力を、ベクトル解析を用いて厳密かつ安定的に計算できる方法を開発した。
- 上記の方法を、水面挙動の予測にVOF法、境界形状の取り扱いにFAVOR法を用いた三次元流体挙動解析手法に組み込むことにより、並進3自由度および回転3自由度を考慮した漂流物の複雑な挙動が解析できる数値解析手法を開発した。
- 本解析手法により、水面に浮かぶ漂流物が津波によって流され、鉛直壁に衝突してはね返る挙動がおおむね再現でき、漂流物位置の時間変化もほぼ一致した。また、陸上に置かれた物体が陸上遡上津波によって流され、鉛直壁に衝突してはね返る挙動がおおむね再現でき、漂流物位置の時間変化もほぼ一致した。以上より、本解析手法により漂流物の挙動が定性的かつ定量的に解析できたことから、本解析手

法の妥当性が確認された。

また、今後の課題として以下のことが挙げられる。

- 本研究での適用例においては漂流物の挙動は安定的に解析できたが、計算格子と漂流物の大きさの関係によっては計算が不安定になる可能性がある。現時点では適用例が少ないため、今後は本解析手法を他の漂流物挙動にも適用し、実験結果との比較、検証を積み重ね、多様な場における計算の安定性を確認する必要がある。
- 漂流物の衝突力を予測するためには、漂流物の衝突時の速度をある程度正確に予測する必要がある。本研究では、解析における漂流物の衝突時の速度は実験のそれとあまり一致しなかった。今後は、漂流物の衝突速度について、その評価方法も含めて詳細に検討する必要がある。

謝辞： 本研究は、科学研究費補助金 基礎研究 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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 牛島 省, 山田修三, 藤岡 奨, 瀬津家久: 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/II-74, pp.79-89, 2006.
- 2) 川崎浩司, 袴田充哉: 3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と波作用下での漂流物の動的解析, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.31-35, 2007.
- 3) 米山 望, 永島弘士, 戸田圭一: 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, 水工学論文集, 第52巻, pp.1399-1404, 2008.
- 4) 米山 望, 永島弘士, 戸田圭一: 津波来襲時の漂流物挙動解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.886-890, 2008.
- 5) 永島弘士, 米山 望, 戸田圭一, FAVOR法を応用した津波氾濫時の漂流物挙動解析, 計算工学講演会論文集, Vol.13, pp.777-780, 2008.
- 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) 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.
- 8) Patankar, S.V. and Spalding, D.B.: A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flow, *Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.15, pp.1787, 1972.
- 9) 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.
- 10) 池野正明, 森 信人, 田中寛好: 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.846-850, 2001.
- 11) 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.