

津波来襲時の漂流物挙動解析手法の開発

Development of a Numerical Analysis Method for the Drift Behavior in Tsunami

米山 望¹・永島弘士²・戸田圭一³

Nozomu YONEYAMA, Hiroshi NAGASHIMA and Keiichi TODA

The main purpose of this study is to develop a numerical analysis code for the prediction of drift behavior in a tsunami inundation. The features of this code are that the FAVOR method is applied to set the boundary between a fluid and an obstacle, and that the VOF method is applied for a flow involving a free surface. The code was applied to a hydraulic experiment on an object drifted by a tsunami inundation. As a result, the code simulated the drift motion, and the obtained numerical solution of the drift velocity agreed well with the result of the experiment.

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(2006)、川崎ら(2006)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、鉛直二・三次元場を対象に、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、水理実験と三次元固気液多相乱流数値モデル(DOLPHIN-2D, DOLPHIN-3D)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。著者ら(2002)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って、現地痕跡高とよく一致した結果を得ている。本研究では、この三次元解析手法に新しい機能を盛り込むことにより、漂流物の回転運動を含め、計算格子に沿わない漂流物の複雑な挙動が安定的に解析可能な手法を開発した。

開発した手法では、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(Hirt ら, 1985)を用いるとともに、水面挙動の精度よい解析を行うために VOF (Volume of Fluid) 法(Hirt ら, 1981)を用いた。この手法は、精度の面で上記の既往研究と比べて劣るものの、防災上十分に実用可能であると考えている。

類似の研究例としては、水谷ら(2004)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(2003)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。

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

$$\frac{\partial \gamma^v}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_i^a \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

1 正 会 員 博(工) 京都大学防災研究所准教授
2 学生会員 京都大学大学院工学研究科
3 正 会 員 Ph.D 京都大学防災研究所教授

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

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

- ・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), $\overline{\quad}$: レイノルズ平均量, $\overline{\quad}'$: 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た.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{\gamma^v} \frac{\partial \gamma_j^a k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{\gamma^v} \frac{\partial \gamma_j^a \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (7)$$

ここで, k ($\equiv \overline{u'_i u'_i} / 2$): 乱流エネルギー, ε ($\equiv \nu \overline{u'_i u'_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$): 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 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.45$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$ とした.

以上の基礎方程式を直交座標系上で離散化して SIMPLE 法 (Patankar ら, 1972) 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 (米山, 1998).

(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った (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.

漂流物の移動は, まず漂流物重心の移動速度と回転速度をそれぞれ計算し, その値に基づいて漂流物の位置と回転角を計算することにより行った. 重心の移動速度は, 運動方程式

$$m \frac{d}{dt} v_{gi} = f_i \quad (8)$$

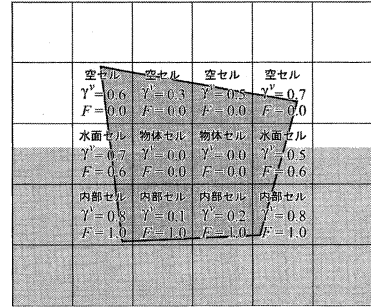


図-1 漂流物の取り扱い

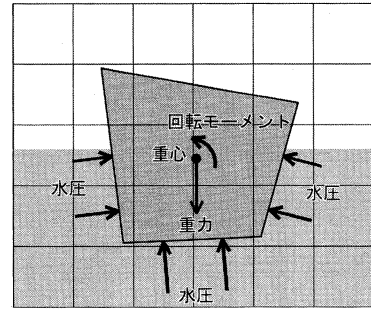


図-2 漂流物の移動方法

に基づいて計算した. ここで, m : 漂流物の質量, v_{gi} : 漂流物重心の速度の各方向成分, f_i : 漂流物に作用する力の合力の各方向成分である. また, 重心の回転速度については, 図-2のような場合には, 漂流物の重心を通る紙面鉛直方向の軸まわりの角運動量に関する運動方程式

$$I_g \frac{d}{dt} \omega_g = N \quad (9)$$

に基づいて計算した. ここで, I_g : 漂流物の重心を通る紙面鉛直方向の軸まわりの慣性モーメント, ω_g : 漂流物の重心を通る紙面鉛直方向の軸まわりの角速度, N : 漂流物の重心を通る紙面鉛直方向の軸まわりの外力のモーメントである. なお, 漂流物に作用する水圧は流体セルの圧力値を用いて算定した.

(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_i^n と圧力 p^n 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 $t + \Delta t$ での流速の推定値 $\bar{u}^{n+1}$ を計算する.
- ⑤ 式(8), 式(9)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, 回転速度の推定値 $\bar{v}_{gi}^{n+1}$,

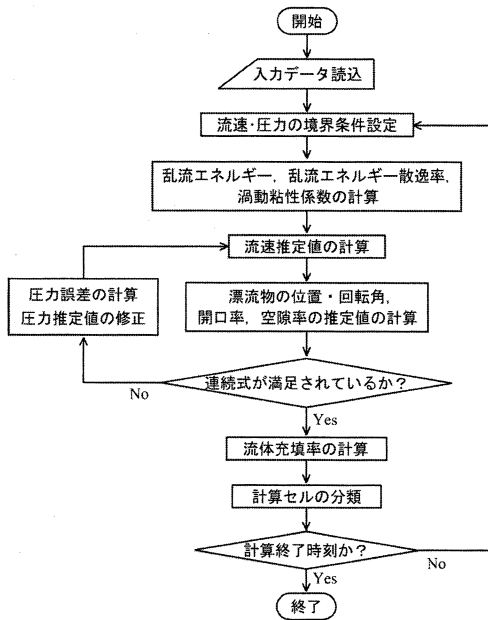
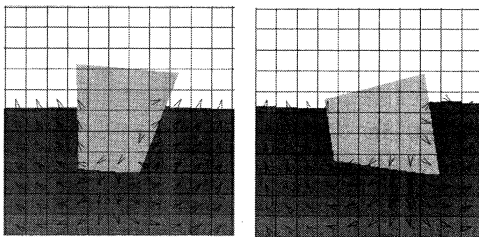
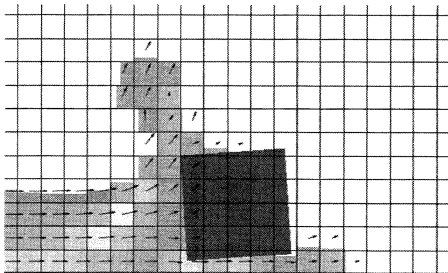


図-3 計算の流れ



(a) 水面上で回転する様子 (0.1 秒後 (左), 0.7 秒後)



(b) 津波に矩形物体が運ばれる様子

図-4 漂流物挙動解析の例

$\bar{\omega}_g^{n+1}$ を計算し、漂流物の位置、回転角の推定値 $\bar{X}_{g_i}^{n+1}$, $\bar{\theta}_g^{n+1}$ を計算する。

- ⑥ $\bar{X}_{g_i}^{n+1}$, $\bar{\theta}_g^{n+1}$ に基づき、開口率、空隙率の推定値 $\bar{\gamma}_i^{n+1}$, $\bar{\gamma}_v^{n+1}$ を計算する。

- ⑦ 式(1)の離散化式を用いて、連続式誤差 D 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 $\bar{p}^{n+1}$ 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 $t + \Delta t$ の流体充填率 F^{n+1} を計算する。

- ⑨ 計算セルを分類する。

- ⑩ 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。

本解析手法では、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^d の時間変化として流体に反映される。解析例として、水面上を回転する様子および津波に矩形物体がすくい上げられて運ばれる様子を図-4 に示す。

3. 解析手法の適用と検証

(1) 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-5に示す領域で行った。漂流物は高さ0.05m、幅0.05m、密度400 kg/m³で、初期重心位置を中央の水面位置(Y,Z)=(0.075m, 0.410 m)とした。漂流物はつりあいの位置よりも下方にある(図-5参照)。計算は、格子間隔を0.01m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 $D_{max} = 1.0 \times 10^{-5}$, 水の動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ m²/sとして計算を行った。図-6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。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。

図-7に漂流物重心の鉛直方向の変位を、自重と静水圧近似に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

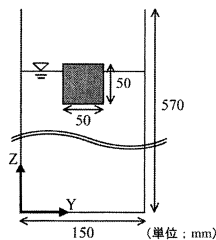


図-5 鉛直方向自由振動の解析初期状態

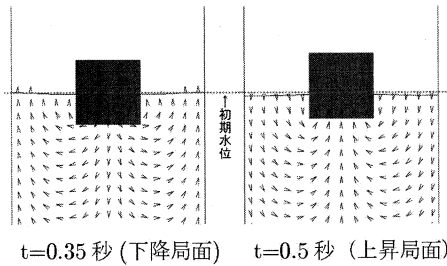


図-6 解析結果の一例

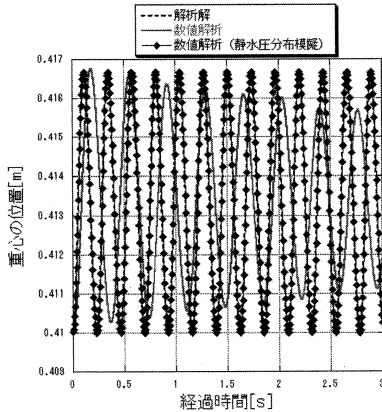


図-7 重心位置の時間変化の考察

致せず、時間とともに振幅が減衰する(日本造船学会海洋工学委員会性能部会, 2003)。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(日本造船学会海洋工学委員会性能部会, 2003)。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)に用いる圧力を、各時点の平均水位と漂流物下端位置の差に基づく静水圧とした場合、図-7のように解析解とほぼ一致した。このことから、漂流物下の圧力が静水圧分布とはなっていないこと、および静水圧近似できる場合の本計算の漂流物移動手法の妥当性が確認された。

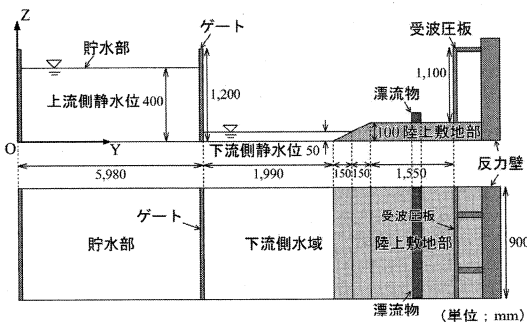


図-8 実験模型

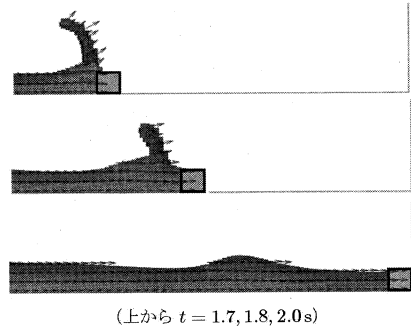


図-9 実験との比較解析結果の例

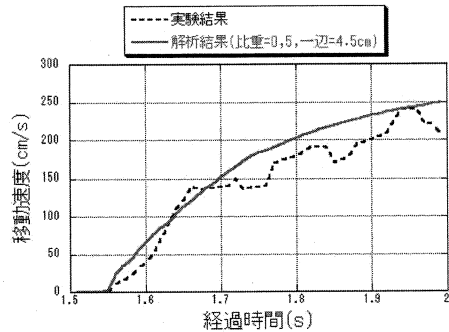


図-10 実験結果との比較

(2) 漂流物の水平方向の移動

池野ら(2003)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-8に示す。模型縮尺は1/100である。

この実験に本研究の解析手法を適用した。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0.89m、密度600kg/m³の木材の角柱とし、漂流物重心の初期位置 $Y=9.0\text{m}$ 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、鉛直二次元解析を適用した。

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-10より、解析では漂流物の移動速度は単調に増加し、一定値に近づいているが、実験では漂流物の移動速度は単調には増加していないことがわかる。この違いは、鉛直二次元解析を行ったため、解析では流体が漂流物の前面に回りこむことなく、漂流物が津波先端部に押されて移動したのに対し、実験では漂流物の前面に流体が回りこんで漂流物の挙動が複雑になった

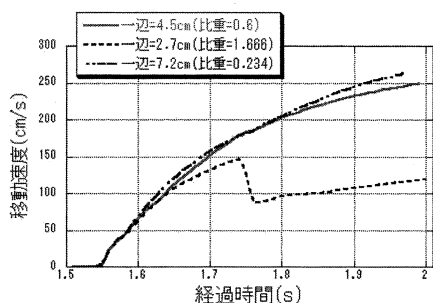


図-11 漂流物の体積(質量一定)と移動速度変化の関係

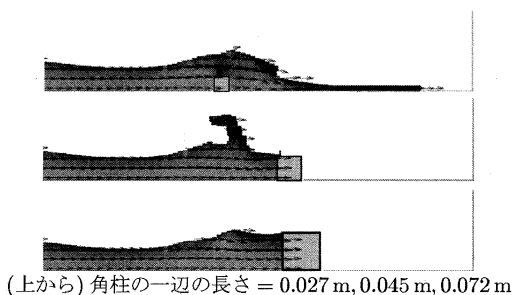


図-12 漂流物の体積(質量一定)と移動速度変化の関係($t=1.85$ s)

ことに起因すると考えられる。今回は、このような漂流物の細かな速度変動は再現できなかったが、鉛直二次元解析で求められた漂流物の速度変化や最大移動速度は、本研究の目的と照らし合わせて十分な精度で再現できたと考えている。

(3) 本解析手法を用いた漂流物挙動の検討例

上記のことから本研究の解析手法により、津波襲上時の漂流物の水平移動挙動をおおむね再現できると判断し、試みに、漂流物の違いによる挙動変化について検討する。

池野らの実験で用いられた漂流物(角柱の一辺の長さを0.045m)を基準とし、質量を一定にしたまま、角柱の一辺の長さを0.072mおよび0.027m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0.072m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、0.027m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、0.027mのケースでは津波が漂流物を追い越している。このため、移動速度が急減したことがわかった。このケースは密度が $1,000\text{kg/m}^3$ 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。

4. おわりに

本研究では、津波漂流物の挙動予測手法を構築し、津波氾濫時の漂流物挙動に適用した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- VOF法に基づいた三次元流動解析コードに適用可能な漂流物挙動解析手法として、漂流物の位置および姿勢をベクトル解析を用いて厳密に把握し、FAVOR法に基づいて基礎方程式に反映させることで、計算格子に沿わない漂流物の複雑な挙動が解析できる手法を開発した。
- 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模型実験に本研究の解析手法を適用したところ、細かな速度変動は再現できなかったが、漂流物の大まかな速度変化や最大移動速度は十分な精度で再現できた。

今回検証したケースでは回転の効果を検証できていない。このため今後は、本解析手法を回転挙動を検証できる漂流物挙動にも適用し、実験結果との比較、検証を積み重ねるとともに、漂流物の三次元的挙動が解析できるように、解析手法を改良していく予定である。

参考文献

- 池野正明, 田中寛好(2003): 陸上週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.
- 牛島省, 山田修三, 藤岡奨, 瀬津家久(2006): 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.
- 川崎浩司, 富田孝史, 下迫健一郎, 高野忠史, 熱田浩史(2003): 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.
- 川崎浩司, 山口聡, 袴田充哉, 水谷法美, 宮島正悟(2006): 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.
- 日本造船学会海洋工学委員会性能部会(2003): 実践 浮体の流体力学<後編>実験と解析, 成山堂書店, pp.10-25.
- 水谷法美, 許東秀, 島袋洋行(2004): 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.
- 米山望: 自由液面解析コード(FRESH)の開発(1998), 日本流体力学会誌「ながれ」第17巻第3号(CD).
- 米山望, 松山昌史, 田中寛好(2002): 1993年北海道南西沖地震津波における局所週上の数値解析, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.139-150.
- Hirt, C.W. and B.D. Nichols (1981): Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics, Vol.39, pp.201-225.
- Hirt, C.W. and J.M. Sicilian (1985): A porosity technique for the definition obstacles in rectangular cell meshes, Proc. 4th Int. Conf. Ship Hydro, 18p.
- Patankar, S.V. and D.B. Spalding (1972): A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flow, Journal of Heat Mass Transfer, Vol.15, pp.1787.