

巨大津波発生時における フラップゲート式可動防波堤の挙動予測手法の開発

Development of a Numerical Analysis Method for the Flapgate Breakwater during a Huge Tsunami

米山 望¹・中島健輔²・永島弘士³

Nozomu YONEYAMA, Kensuke NAKAJIMA and Hiroshi NAGASHIMA

The main purpose of this study is to develop a numerical analysis code for the prediction of a flapgate breakwater behavior during a huge tsunami. The features of this code are that the FAVOR method and the VOF method are applied. The code is applied to a hydraulic experiment of flapgate breakwater. As a result, the obtained numerical solutions agree well with the result of the experiment. Furthermore, through applying the code to a prediction of the flapgate breakwater behavior during the 1993 Hokkaido-Nanseioki tsunami, the applicability of the code to a real-scale simulation and the effectiveness of the breakwater to a huge tsunami are discussed.

1. はじめに

津波がひとたび発生すると甚大な被害を引き起こす。しかし大被害をもたらす津波が頻繁に発生することはまれである。そのため、津波を防ぐ巨大な構造物を海岸に建設しても、それが役割を果たす機会はあまり多くない反面、付近での生活者にとっては、景観問題を含め、様々な不便を継続的に強いることになる。このような背景から、必要ときに防波堤としての役割を果たす可動防波堤が検討されている。そのうちのひとつであるフラップゲート式可動防波堤は、平常時はフラップゲートが海底に沈められ、津波や高潮が予測されると、フラップゲート先端を水面近傍まで浮上させた状態で待機し、津波等の作用を受けて直立状態まで立ち上がるものである。この防波堤は、津波が来襲しない平常時の利便性は明らかであるが、実際に津波が来襲した場合に適切に直立し、津波から受ける力について耐えうるのかについては、慎重に検討しておく必要がある。

フラップゲート式可動防波堤（以下、フラップゲート防波堤）については、川崎ら（2003）が、水理実験および鉛直二次元数値解析でフラップゲート防波堤の回転部（以下、扉体）を静的に固定した条件で評価を行い、越波や波圧、波力などについて検討を行っている。また、木村ら（2010）が、水理実験および鉛直二次元数値解析により扉体が回転する状態での評価を行っており、木村らが開発した重合格子法およびレベルセット法を用いた流体-構造連成モデルが、水理実験を適切に再現すること

を示している。

この扉体は、津波来襲から収束までにさまざまな方向の力を波および流れから受けることが予想されるため、この性能や安全性を検討するためには、鉛直二次元に加えて三次元場での挙動予測が必要である。

そこで著者らは、三次元場におけるフラップゲート防波堤挙動を適切に予測できる解析手法を構築するとともに、実地形での挙動解析を試みた。

2. 数値解析手法の概要

著者らはこれまでに、剛体が三次元流動場において相互に影響を及ぼしながら移動・回転する現象を予測評価できる三次元流体・剛体連成解析手法を開発し、津波漂流物の挙動に適用した結果、水理実験結果と良好に一致することを確認している（米山ら、2009）。本研究では、この解析手法を漂流物よりも動きの自由度が小さいが実験再現性の高いフラップゲート防波堤の挙動に適用し、再現精度を検証する。以下に解析手法の概要を示す。

本解析法は、可動物体（本研究では、扉体）を剛体として扱い、流体解析で用いる計算格子内に可動物体を存在させたいので、各計算セル内に含まれる可動物体の断片形状を計算する（図-1参照）。これにより、計算セルの空隙率、開口率の計算が可能となり、それらが流体解

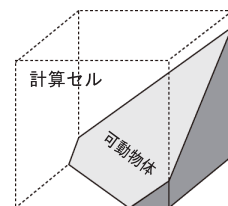


図-1 セル内の可動物体断片形状の例

1 正会員 博(工) 京都大学防災研究所准教授
2 正会員 修(工) 清水建設(株)
3 正会員 修(工) (株)ニュージェック

析に反映される。また、可動物体の表面（の一部）を含むセルについて、流体解析から求めた流速値および圧力値を用いて、その表面に作用する力（水圧、粘性力）を算定し、それらをすべての表面について、積分して剛体運動の外力とする。

扉体の一軸回転は、次式の回転運動方程式を用いる。

$$I\phi = N \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϕ は回転軸まわりの角加速度、 I は回転軸周りの慣性モーメント、 N は扉体を受ける回転軸まわりのモーメントである。

流体挙動の解析は、水面挙動の予測にVOF法（Hirtら、1981）、境界形状の取り扱いにFAVOR法（Hirtら、1985）を用いた非圧縮流体解析手法を用いている。流体挙動の基礎方程式は、以下のようなものである。

・連続方程式

$$\frac{\partial \gamma^v}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^q \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

・運動方程式 ($i = 1, 2, 3$)

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

・流体体積の移流方程式

$$\frac{\partial \gamma^v F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j^q F \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

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^q :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、 ν' :レイノルズ平均量からの変動量である。また、

式(3)中のレイノルズ応力 $-\overline{u'_i u'_j}$ を求めるため、以下の乱流評価式を用いた。

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

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

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots (7)$$

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

ここで、 $k(\equiv \overline{u'_i u'_i} / 2)$:乱流エネルギー、 $\varepsilon(\equiv \nu \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j})$:乱流エネルギー散逸率、 ν_t :渦動粘性係数であり、式(5)~式(7)中の定数は $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ 、 $C_{\varepsilon 1}=1.45$ 、

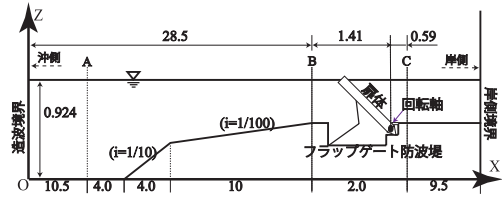
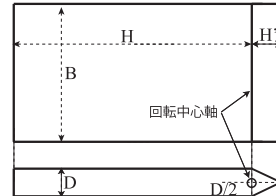


図-2 解析地形の概要（奥行き1m）[単位m]



$H=0.68\text{m}$, $H'=0.02\text{m}$, $B=0.98\text{m}$, $D=0.06\text{m}$

図-3 解析に用いた扉体形状

$C_{\varepsilon 2}=1.92$, $C_u=0.09$ 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(4)はドナアクセプタ法を用いて計算した。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ている（米山、1998）。

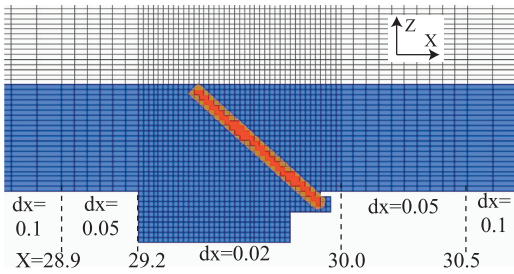
3. 解析手法の検証

(1) 水理模型実験の概要

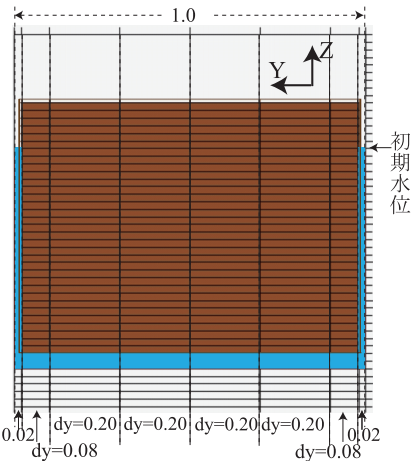
本研究では、木村ら（2009、2010）が行ったフラップゲート防波堤の挙動に関する水理模型実験を検証対象とした。この実験は、模型縮尺は1/30で、水路長さ50.0m、幅1.0m、高さ1.5mの造波水槽が用いられ、底面勾配を1/10、1/100と変化させ勾配0の底面上に防波堤を設置している。木村らは、周期波や孤立波を与えて、水位変化や防波堤の扉体角度を計測し、フラップゲート防波堤の挙動や防波堤としての有効性を確認するとともに、木村らが開発した解析コードの検証を行っている。

(2) 解析手法の適用

本研究では、実験で用いられた水路および防波堤形状をほぼそのまま再現した。実験と同様に、扉体の下部を通して水が流れないように止水板を設置した。水路形状の概略を図-2に示す。扉体は実験と同じ寸法に設定し（図-3参照）、水平を基準として、最大で90°、最小で38.6°の角度の間を回転できる。また、実験模型を参考に、扉体密度を $0.99 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とした。



(a) 扉体側面 (水位, 扉体とも初期状態)



(b) 扉体正面 (水位は初期状態, 扉体は直立時)

図-4 解析メッシュ概要 (扉体近傍, 単位[m])

計算格子は波の進行方向には, 0.1m, 0.05m, 0.02mの三段階にメッシュ幅を変化させ, 防波堤設置位置付近を細かくした (図-4 (a)). 幅方向も0.20m, 0.08m, 0.02mの三段階に変化させ, 両側を0.02m幅, 中心部では0.20m幅とした (図-4 (b)). 高さ方向のメッシュ幅は0.02mで一定の刻み幅とした. 計算時間間隔は0.001秒とした.

解析手法を適用する入力波は周期波とし, 木村らが実施したケースのうち, 押波初動 (Case 1とする; 周期30秒, 波高10.4cm), 引波初動 (Case 2とする; 周期40秒, 波高7.2cm) を対象とした. また, 初期状態の扉体角度を実験に合わせ, 42.2° に設定した. なお, 流速の壁面境界条件はBlasiusの7分の1乗法則を適用した.

図-5にCase 1の解析例を示す. 同図 (a) は津波到達前, (b) は立ち上がり途中, (c) は直立直後, (d) は再び倒れた直後である. (c) では直立したことにより, 前面に反射波が発生している. また, (d) では, 岸から戻る流れが扉体を越流している.

(3) 実験結果との比較

造波境界から10.5m位置の点A, 防波堤の前後の点BおよびC (図-2参照, 各点とも水路中央断面上) における水位および, 扉体回転角度の時間変化を比較した.

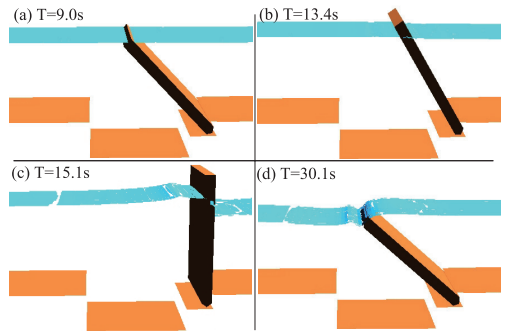


図-5 押波初動 (Case 1) 時の解析例

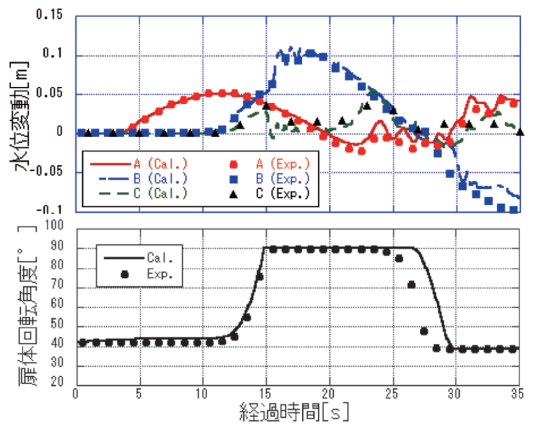


図-6 実験と解析の比較 (Case 1)

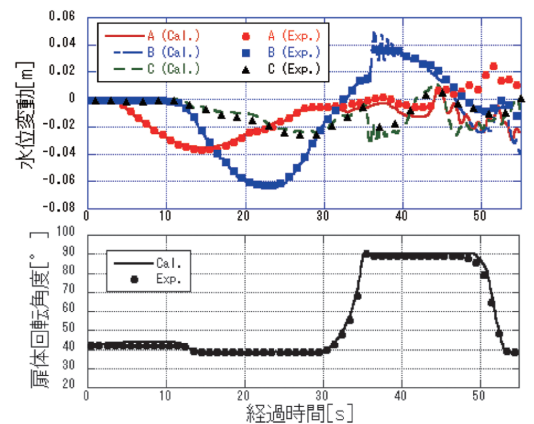


図-7 実験と解析の比較 (Case 2)

Case 1およびCase 2における実験結果との比較結果を, 図-6, 図-7に示す. これらの図から, 水位変化の解析結果は実験結果とほぼ一致していることがわかる. 扉体回転角度についても, Case 1において, 実験に比べ約3秒ほど倒れ始めるのが遅くなっている点を除けば, 起立の仕方や倒れる速度などがほぼ一致していることがわかる. 以上から, 本解析手法はフラップゲート式防波堤の挙動解析に適用可能と判断できる.

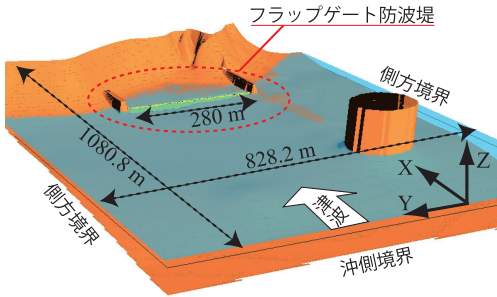
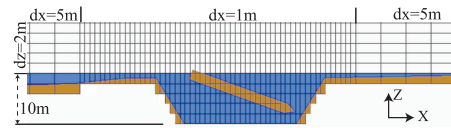
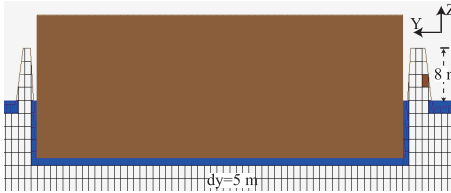


図-8 解析領域 (フラップゲート防波堤設置時の初期状態)



(a) 側面図 (水位, 扉体とも初期状態)



(b) 正面図 (水位は初期状態, 扉体は直立時)

図-9 フラップゲート設置時の地形およびメッシュイメージ

4. 実地形への適用

本解析手法を北海道奥尻島の藻内地区を対象に仮想的にフラップゲート防波堤をした場合の津波挙動予測に適用する。

(1) 解析領域および条件

解析領域は、米山ら (2002) が同地点の三次元津波挙動解析を実施した計算地形を参考に、X軸方向に1080.8m, Y軸方向に828.8m, Z軸方向には、解析時の初期水面高さ (標高0m) を基準として、水深28mから水面上34mの62mの領域とした (図-8)。各方向の計算メッシュ刻みは水平方向に5m, 鉛直方向に2mとした。ただし、フラップゲート防波堤設置位置近傍では、X軸方向の刻みを1mとした (図-9 (a))。

扉体の高さHは20m, 幅Bは288m, 厚さDを2m, 回転軸から下端まで (H') を2mとする (H, B等は図-3参照)。解析用フラップゲートの設置状況および解析メッシュのイメージを図-9に示す。設置位置の地形を初期水深位置から10.0m位置まで掘り下げた。また本来フラップゲート防波堤を開かれた地形に設置しても扉体の左右を迂回しての流入は防げない。そこで左右に海底から標高8.0m (初期水位は標高0m) までの側壁地形を岸側に向かって造った。

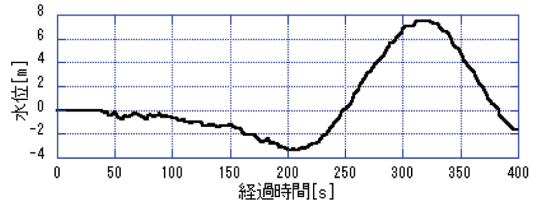


図-10 沖側境界に与える入力波

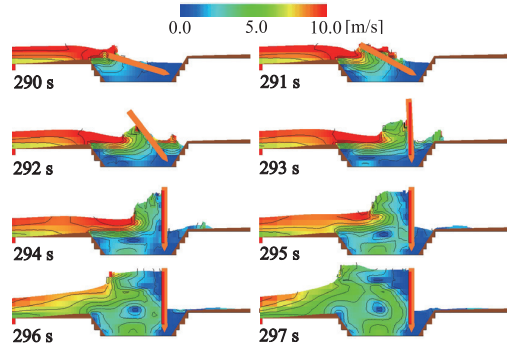


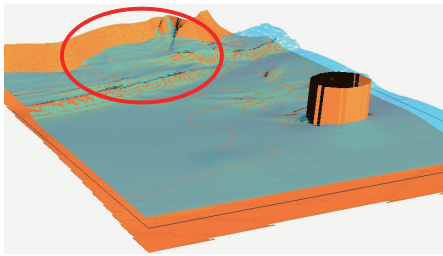
図-11 フラップゲート起立時の様子 (コンターは流速絶対値)

なお、扉体密度を $0.99 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とし、 15° から 90° の範囲内で回転できるようにした。入力波は、1993年北海道南西沖地震津波の奥尻島藻内地区での挙動をよく説明する図-10に示す波 (米山ら, 2002) とし、図-8に示す沖側境界から入射した。また、側方境界に鉛直壁の存在を仮定した。流速の壁面境界条件はフリースリップを適用した。なお、比較のために、フラップゲート防波堤がない形状の解析も併せて行った。

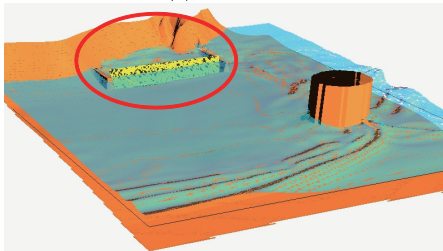
(2) 解析結果の考察

扉体起立時の扉体中心を含むXZ縦断面図を図-11に示す。同図から扉体が約3秒で立ち上がり、防波堤の役割を果たしている様子が解析されている。図-12は、フラップゲートの設置の有無による最大遡上高の違いを示す。同図より遡上高が低減していることが定性的に確認できる。

次に、津波が陸地に到達する前後 (280秒から315秒) における水位変動を比較する。扉体直立時の位置から40m沖側の3点と20m岸側の3点の水位を計測した (図-13)。フラップゲート防波堤設置の有無による水位の比較を図-14に示す。防波堤設置無しでの水位変動 (点線) は岸側、沖側のグラフとも津波来襲時には水位が徐々に上昇し、315秒においてはL点で10mを越す水位上昇が見られる。一方で、防波堤を設置すると、その遮蔽効果によって衝突時には沖側の水位は急激に上昇し、300秒付近では15mを越す水位上昇が見られるが、岸側では大きな水位変動は見られない。これより、フラップゲート防波堤が津波対策に一定の効果がある可能性が高いことが示された。



(a) 設置なし



(b) 設置あり

図-12 最大遡上時のスナップショット

5. 結論

本研究の成果は以下のようにまとめられる。

- ・フラップゲート式可動防波堤の津波来襲時の挙動に、著者らの開発した三次元流体・剛体連成解析手法を適用したところ、水理実験で計測された水位変動及び回転の様子を適切に再現することが分かった。
- ・奥尻島藻内地区に同防波堤を仮想的に設置し、1993年北海道南西沖地震津波を入力したところ、本手法がフラップゲート扉体の挙動を定性的に解析できることを確認するとともに、同防波堤が津波被害軽減に一定の効果を発揮する可能性があることを示した。

今回の計算では現地スケール解析が適切に実施できることを確認するため、これまでに解析実績のある地点での解析を行ったが、この地点での設置は検討されていない。今後は、実際に設置が検討される地点を対象に詳細な検討解析を行い、フラップゲート防波堤の有効性と限界について評価していく予定である。

謝辞：最後に、本研究を進めるにあたり、フラップゲート式防波堤に関する貴重な水理実験結果を快く提供してくださいました日造造船株式会社 木村雄一郎氏に深く感謝します。また、本研究は科学研究費補助金の助成を受け実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

川崎浩司・富田孝司・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波堤の越波と作用波力、

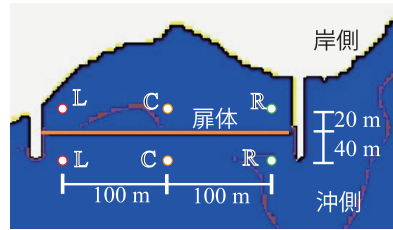
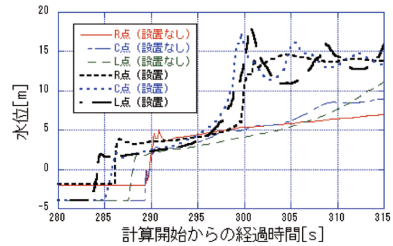
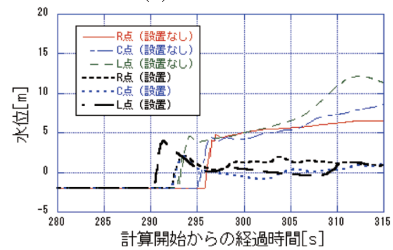


図-13 水位計測地点



(a) 沖側水位



(b) 岸側水位

図-14 フラップゲート防波堤設置の有無による水位の比較

海岸工学論文集, 第50巻, pp.791-795.
 木村雄一郎・新里英幸・仲保京一・安田誠宏・間瀬 肇 (2009)：フラップゲート式可動防波堤の波圧応答特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.806-81.
 木村雄一郎・柳 浩敏・森西晃嗣・森 信人・安田誠宏・間瀬 肇 (2010)：フラップゲート型構造物の流体連成解析モデルの構築とその検証, 海洋開発論文集, Vol.1.26, pp.237-242.
 米山 望 (1998)：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。
 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遡上の数値解析, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.139-150。
 米山 望・永島弘士 (2009)：複雑な移動・回転を考慮した津波漂流物の三次元数値解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.266-270。
 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.
 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.