

複雑地形に遡上する津波の3次元数値計算

3D NUMERICAL SIMULATION OF TSUNAMI RUNUP ONTO A COMPLEX BEACH

柿沼太郎・富田孝史
Taro KAKINUMA, Takashi TOMITA

正会員 博 (工) 独立行政法人港湾空港技術研究所 津波防災研究センター
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目 1-1)

This paper describes two 3D numerical models to simulate tsunami phenomena including runup onto a complex beach. The governing equations are the continuity and Reynolds equations for incompressible fluids in porous media. In the first model water surface displacement is determined by the vertically integrated equation of continuity, while in the second model by the 3D-VOF method. Topography of seabed can be smoothly expressed with the porous model. These two models were applied to reproduce the existing hydraulic-model experiment, which treated the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami in Okushiri Island. The highest runup calculated by the VOF method indicates the full-scale value of about 30.6 m.

Key Words: Tsunami runup, 3D numerical calculation, VOF method, the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami

1. 序論

津波伝播の数値解析では、一般に、浅水理論を基礎方程式とする平面2次元モデルが実用に供されている。ところが、津波によって引き起こされる海水流動は、遡上域や構造物近傍において、鉛直運動を含む3次元的な挙動を示す。2004年スマトラ沖地震津波は、海岸構造物を乗り越えて陸域に遡上し、構造物と相互に作用する津波の複雑な流動が撮影された。

本研究では、流体運動の3次元性を再現可能な高潮・津波数値シミュレータ STOC¹⁾を構成するモデルのうち、二つの3次元数値モデルを適用して、複雑地形に遡上する津波の挙動のシミュレーションを行なう。これら二つのモデルは、ともに非静水圧モデルであり、動圧の効果も考慮する。その違いは、自由水面位置の決定方法にあり、一つは、鉛直方向に積分した連続方程式によって、他方は、3次元VOF法によって、自由水面の位置を算出する。

計算対象は、1993年北海道南西沖地震津波の最高遡上高（これは、奥尻島において、痕跡として確認された。）の再現を試みた水理模型実験²⁾とし、これら二つの3次元数値モデルを適用して、津波の伝播、そして、遡上の数値計算を行なった。

2. 基礎方程式と数値計算法

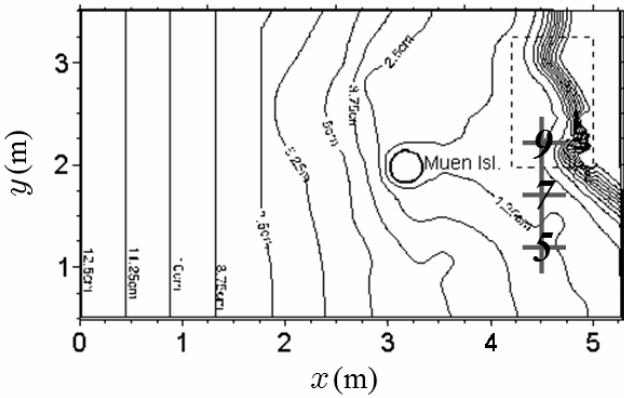
数値モデル STOC は、高潮・津波シミュレーションのための hybrid モデルであり、3次元モデル、多層 level モデル、そして、この両者を繋ぐ接続モデルから構成される。本論文では、これらのうち、自由水面の位置決定の手法が異なる二つの3次元モデルを適用して、複雑地形に遡上する津波の数値計算を行なう。

STOC の基礎方程式系は、非圧縮性流体を対象とし、空隙率を考慮した、次式のような連続方程式及び Reynolds 方程式である。

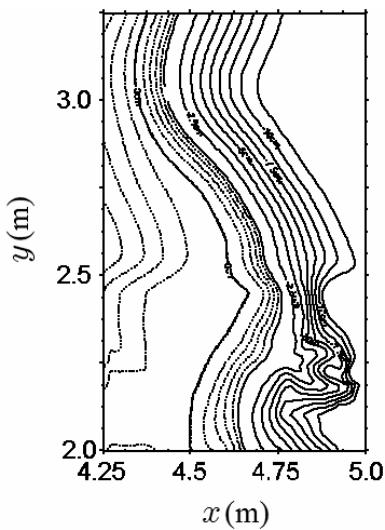
$$\frac{\partial(\gamma_i u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_j u_i u_j)}{\partial x_j} + C_i \\ = - \frac{\varepsilon}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \varepsilon \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \gamma_j V_T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 x_i は、直交座標系 (x, y, z)、 t は、時間、 u_i 及び p は、それぞれ、流速 (u, v, w) 及



(a) 計算対象領域の地形



(b) 最高浸上高が確認された谷付近の地形

図-1 計算対象領域

び圧力であり、 ρ 及び ρ_0 は、それぞれ、流体の密度及びその基準値である。また、 g_i は、重力加速度 $(0, 0, g)$ であり、 ν_T は、実効動粘性係数（動粘性係数と渦動粘性係数の和）である。 C_i は、Coriolis 項である。空隙率 ε 及び有効面透過率 γ_i ($\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$; x_i 軸に垂直な断面を占める液相の面積率) を導入している。

これらの基礎方程式を 3 次元直交格子上の差分方程式に変換した。その際、空間に関する離散化のために staggered mesh を採用した。そして、拡散項に対して 2 次中央差分を用い、移流項に対しては、1 次風上差分と 2 次中央差分を加重平均した hybrid scheme を用いて計算の安定を図る。他方、時間発展に関して、後述する STOC-IC では、流速の計算時刻と水面変動及び圧力の計算時刻とをずらして計算を進める leapfrog 法を適用し、また、STOC-VF では、SMAC 法を用いることとした。

表-1 水理模型実験における波高計の設置位置

Channel	x(m)	y(m)
1	4.521	0.196
2	4.521	0.446
3	4.521	0.696
4	4.521	0.946
5	4.521	1.196
6	4.521	1.446
7	4.521	1.696
8	4.521	1.946
9	4.521	2.196
10	4.521	2.446
11	4.521	2.969
12	4.521	2.946
13	4.521	3.196

3. 水面位置の決定手法

(1) STOC-IC

STOC は、STOC-IC 及び STOC-VF という二つの 3 次元解析部を有する。このうち、STOC-IC では、自由水面の位置決定の際に、次式のような鉛直方向に積分した連続方程式 (vertically Integrated equation of Continuity) を用いる。

$$\gamma_z \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \gamma_x u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} \gamma_y v dz = 0 \quad (3)$$

ここで、 η 及び h は、それぞれ、水面変動及び静水深である。

(2) STOC-VF

他方、STOC-VF では、CADMAS-SURF³⁾ と同様に、自由水面の位置決定の際に、VOF 法を用いる。すなわち、次式のような VOF 関数 F に関する移流方程式を解く。

$$\varepsilon \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma_i u_i F)}{\partial x_i} = (\text{source}) \quad (4)$$

4. 計算条件

(1) 計算対象領域

STOC-IC 及び STOC-VF の二つのモデルを適用して、水理模型実験²⁾を再現する。この実験は、1993 年北海道南西沖地震津波の奥尻島藻内地区に

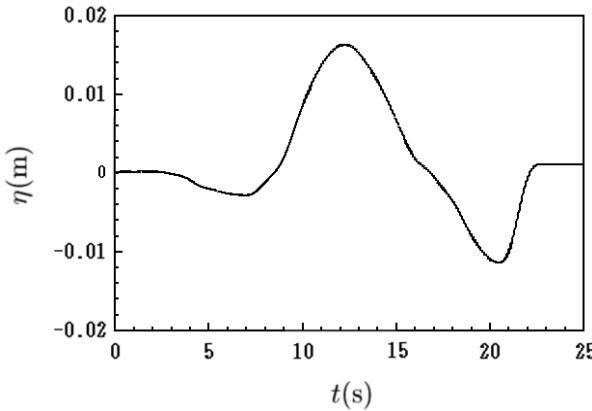


図-2 入射波の時間波形

おける遡上を対象として、長さ 205 m、幅 3.4 m 及び深さ 6 m の水槽を用いて行なわれた長さの縮尺が 1/400 の水理実験であった。

計算対象領域を図-1 に示す。ここで、 $y = 0$ m 及び $y = 3.5$ m の直線境界上に、完全反射の鉛直壁がある。水理模型実験において、波高計が表-1 に記した各地点に設置された。図-1(a) には、このうち Channels 5, 7 及び 9 の 3 点を示している。

(2) 計算条件

入射波は、図-2 に示した津波の第 1 波であり、図-1(a) の $x = 0$ m の直線上にある沖側境界から、入射波の時間変動をこの境界に沿って一様に入射させる。沖側境界における静水深は、0.125 m である。

計算条件を表-2 に記す。ここで、STOC-IC と STOC-VF を適用したそれぞれの数値計算において、計算時間間隔 Δt が Courant 数に依存して変化し、かつ、各格子点数が異なっていることに注意する必要がある。

5. 津波遡上の計算結果

(1) 底面が slip 条件である場合の STOC-IC 及び STOC-VF による水位の計算結果

図-1(a) の Channels 5, 7 及び 9 の各地点における水位の時間変化をそれぞれ図-3(a), (b) 及び (c) に示す。ここで、STOC-IC と STOC-VF の各モデルを適用した数値計算の結果が、水理模型実験の結果と比較されている。乱れに関して、STOC-IC を用いた計算では、LES 乱流モデルを導入しており、他方、STOC-VF を用いた計算では、LES 乱流モデルを数値モデルに組み込んでおらず、渦動粘性係数を含めた実効動粘性係数を $\nu_T = 0$ としている。

表-2 計算条件

Machine condition	
Computer	2.5GHz, desktop-type machine
Used memory	930~940MB
Coding	FORTRAN 90 on LINUX
STOC-IC	
Δt	0.005~0.01s (according to Courant number)
Δx & Δy	0.014m
Δz	0.014m for $z = -0.14$ ~0.126m
Number of grid points	$393 \times 244 \times 20 = 1,917,840$
CPU time	17hrs on slip bottom for $t = 0$ ~25.0s, 12hrs on non-slip bottom for $t = 0$ ~25.0s
STOC-VF	
Δt	0.001~0.005s (according to Courant number)
Δx & Δy	0.014m
Δz	0.017~0.008m for $z = -0.15$ ~0.024m, 0.008m for $z = -0.024$ ~0.12m
Number of grid points	$393 \times 244 \times 28 = 2,684,976$
CPU time	46hrs for $t = 0$ ~24.0s

乱れの評価方法にこうした違いがあるが、STOC-IC と STOC-VF による計算結果は、Channel 9 における $15 \text{ s} \leq t \leq 16.5 \text{ s}$ の期間の結果を除いて類似している。STOC-VF の計算結果より、Channel 9 付近でこの間に碎波が発生したことが確認されるため、この水位の計算値の差異が、STOC-IC が碎波モデルを有していないことによると考えられる。

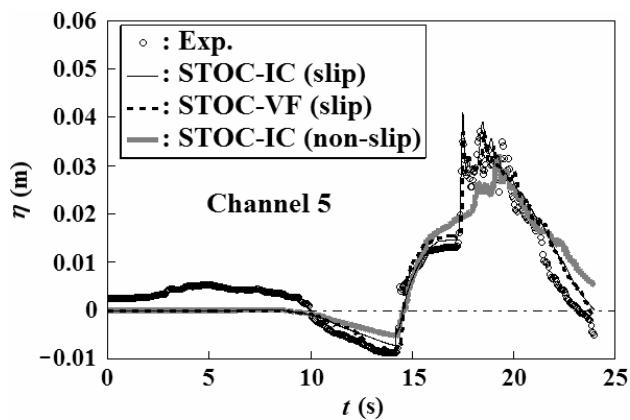
(2) 底面が non-slip 条件である場合の STOC-IC による水位の計算結果

図-3 より、底面が slip であると仮定した条件のもとでの水位の計算結果が、水理実験結果と比較して、第 1 ピークの値（水理実験で $t \geq 15$ s に最初に現れた極大値）を過大に評価していることがわかる。そこで、底面が non-slip であると仮定した条件のもとで STOC-IC を適用して数値計算を行なった。その結果を図-3 に描くが、底面が non-slip であるとした場合の計算結果は、水理実験結果と比較して低過ぎる水位値を示している。これは、底面境界層を鉛直方向に分割するような細かい格子を用いていないためであろう。この点に関しては、査読においても示唆を受けた。正村ら⁴⁾ のように経験的な摩擦則を適用する手法を含めて、海底摩擦を数値計算において適切に考慮する方法について検討し、それを STOC に導入して考察を進める必要がある。

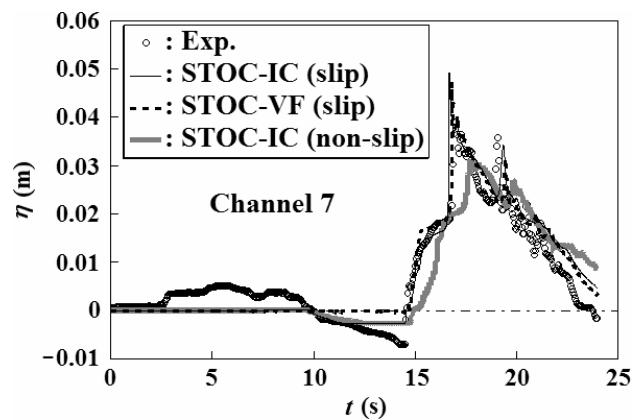
(3) 津波の陸上遡上の STOC-VF による計算結果

底面が slip 条件であると仮定する。STOC-IC 及び STOC-VF の両者とも、波の遡上問題を扱うことが可能である。ここでは、STOC-VF による津波遡上の計算結果を示す。

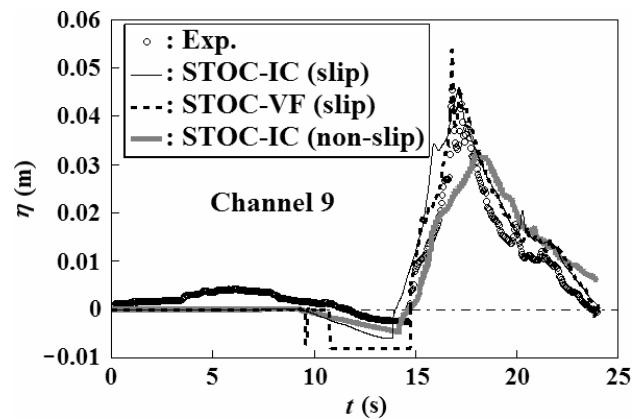
図-4 は、 $x - z$ 平面 ($y = 0$) に平行で、奥尻津波の最高遡上点を含む鉛直断面内の、最高遡上時における流速ベクトル及び等圧線の計算結果である。STOC-VF は、STOC-IC と同様に、圧力の Poisson



(a) Channel 5 における水位の時間変化



(b) Channel 7 における水位の時間変化



(c) Channel 9 における水位の時間変化

図-3 水位の時間変化の STOC-IC 及び STOC-VF による計算結果

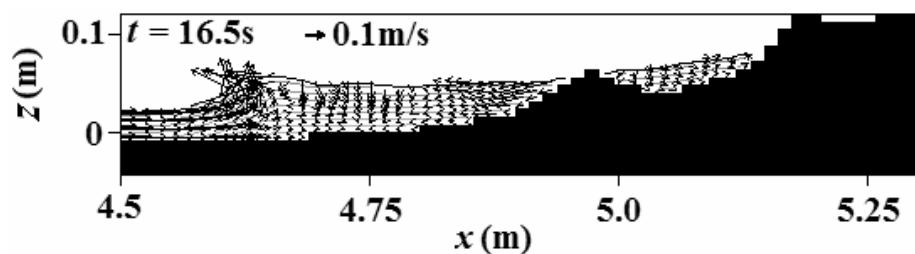


図-4 平面 $y = 0$ に平行で最高遡上点を含む鉛直断面内の最高遡上時における流速ベクトル及び等圧線の STOC-VF による計算結果 ($t = 16.5$ s)

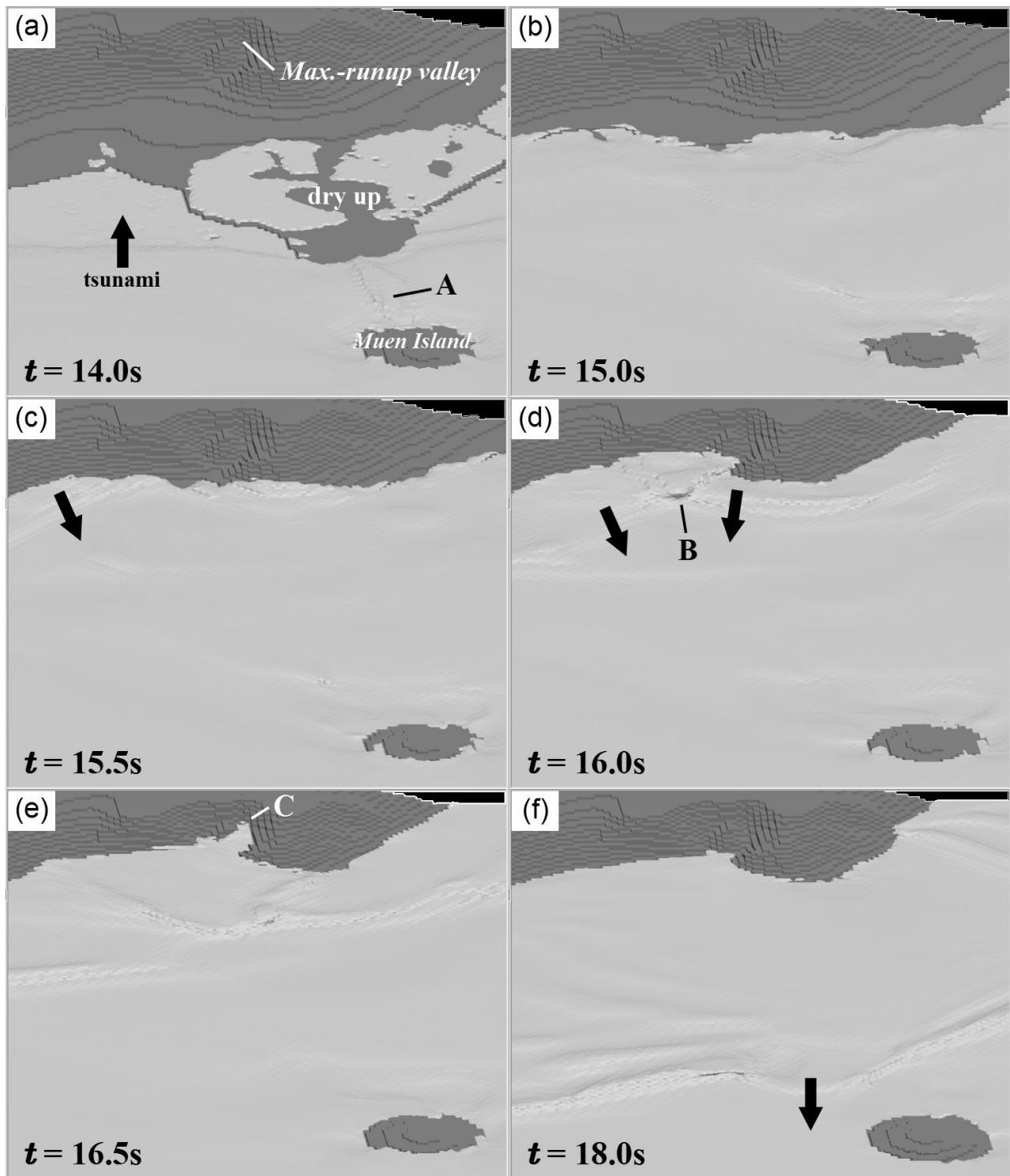


図-5 津波波形の STOC-VF による計算結果

方程式を解く非静水圧モデルであるため、静水圧のみならず動圧の効果も考慮して、3次元的な流動の計算を行なうことが可能である。複雑地形上の津波遡上において、こうした動圧がどのような効果を有するのかについては、本数値モデルによる計算結果を非線形長波モデルのように静水圧分布を近似した数値モデルによる計算結果と比較することによって検討できるであろう。特に、正確な圧力の算定は、津波と構造物、または、津波と漂流物の相互作用の問題を考える際に重要となる。これらの点に関しては、今後の課題としたい。

また、図-5に、津波波形の計算結果を示す。

図-5(a)では、引き波によって海底の一部が露出した後に、押し波が伝播し、陸へと向かっている。点Aの付近で、無縁島を通過した回折波が出会っている。同図の中央上部に、津波が最高遡上高の痕跡を残した谷が見られる。

図-5(b)において、津波が陸域に到達している。

図-5(c)では、陸域からの反射波が発生している。

図-5(d)の点Bでは、岸から反射して来た波が集中して重合し、碎波が生じている。この点Bにおいて、計算対象時間($0\text{s} \leq t \leq 25\text{s}$)にわたっての海域内での最高水位が現れた。

図-5(e)の点Cにおいて、最高遡上高が記録された。STOC-VFによるその計算値は、静水位上7.65cmである。この値は、VOF関数を考慮して求めた $t = 16.5\text{s}$ における水面と、底面の形状を表現するために空隙率を導入した格子の沖側の鉛直面とが交わる高さである。すなわち、この計算結果は、実スケールで約30.6mの高さまで津波が遡上したということを表わしている。

なお、津波遡上の数値計算結果の視覚化に関して、MARSによる解析結果を図化した研究例⁵⁾がある。津波によって複雑地形上や建物周辺に引き起こされる流れの詳細な計算結果が、図-5で示した各図を繋げて作成されるような動画を用いて視覚的かつ動的に示されることは、津波現象の理解を深め、住民の迅速かつ的確な避難に役立つものと期待される。

6. 結論

非圧縮性流体の運動を対象とする3次元数値流体解析モデルであるSTOC-IC及びSTOC-VFを適用して、複雑地形上に遡上する津波の数値計算を行なった。自由水面の位置は、前者において、鉛直積分された連続方程式により決定し、後者において、3D-VOF法によって算出する。本数値モデルを用いた解析では、長波近似や、非回転運動の仮定及び

静水圧分布の仮定を行なわないため、渦度を含む流速の鉛直方向成分及び動圧の効果が考慮される。両者のモデルを用いて、1993年北海道南西沖地震津波の奥尻島における遡上を対象とした水理模型実験の再現計算を行ない、各数値計算結果と水理実験結果とを比較した。そして、次のような結果を得た。

- (1) 底面がslip条件であると仮定したとき、碎波が生じていない場合に、STOC-ICとSTOC-VFによる水位の計算結果が類似した。
- (2) この計算結果は、水理実験結果と比較して、津波第1波の波形における第1ピークの水位を過大に評価した。
- (3) そこで、STOC-ICによる数値計算において底面がnon-slip条件であると仮定したところ、水位の計算結果が水理実験結果よりも低くなつた。今後、海底摩擦について適切に考慮する方法をSTOCに導入して、検討を加える必要がある。
- (4) STOC-VFによる数値計算において底面がslip条件であると仮定したとき、計算結果は、実スケールで約30.6mという最高遡上高を示した。

謝辞: 数値解析プログラムの開発に際し、みずほ情報総研株式会社サイエンスソリューション研究部の秋山実氏並びに島田昭男氏の協力を得た。

また、The 3rd International Workshop on Long-Wave Runup Models (於: University of Southern California, 2004年6月) 及び津波数値計算シンポジウム (於: 東北大学, 2005年2月) における議論が参考になった。

参考文献

- 1) 富田孝史・柿沼太郎: 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用、港湾空港技術研究所報告, 2005. (印刷中)
- 2) Matsuyama, M. and Tanaka, H.: An experimental study of the highest run-up in the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake tsunami, Proc. Int. Tsunami Symposium 2001, pp. 879-889, 2001.
- 3) 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF), 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12, 296p., 2001.
- 4) 正村憲史・藤間功司・後藤智明・飯田邦彦・重村利幸: 2次元・3次元ハイブリッドモデルを用いた津波の数値解析、土木学会論文集, No. 670/II-54, pp. 49-61, 2001.
- 5) 安田誠宏・平石哲也・永瀬恭一・島田昌也: 流体直接解析法による臨海部の浸水リスク解析、海岸工学論文集, 第50巻, pp. 301-305, 2003.