

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

富田孝史・柿沼太郎

要 旨

沿岸における海水流動の予測は、環境面のみならず、高潮や津波災害の防除・軽減という防災面からも欠かすことができない。高潮や津波は、一般的には海水を水平方向に大きく運動させるが、鉛直方向にはほとんど運動させない。このため、例えば、津波ハザードマップ作成等において沿岸に來襲する津波を推定する際には、平面 2 次元数値モデルが実用に供されている。ところが、沿岸域の構造物近傍では、海水が構造物等の表面に沿って水平方向だけでなく鉛直方向にも大きく運動する。2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ沖地震に伴ったインド洋大津波の際には、沿岸の構造物を乗り越え陸上を遡上する津波の様子がビデオ撮影され、構造物の影響を受けながら流動する津波の複雑さが明白になった。さらに、木造、レンガ造、そして、コンクリート造の建物が津波により破壊され、津波の破壊力のすさまじさをまざまざと見せつけられた。沿岸の構造物が受ける津波力の評価も、地域の防災力を図るために重要である。

本研究では、構造物近傍や地形急変部において 3 次元性を有する流体運動を評価するために、3 次元の流体運動が計算可能な高潮・津波数値シミュレータ STOC (Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas) を開発した。STOC は、Reynolds 方程式を支配方程式とする数値モデルである。3 次元数値モデルを用いた数値計算では、一般に、計算時間が長くなり大きな記憶容量を必要とし、計算負荷が極めて大きくなる。例えば津波計算の場合、震源域から 3 次元数値モデルを適用するのは、現在のコンピュータ能力では不経済である。そのため、STOC では、水深方向に領域を多層化し、各層において 3 次元 Reynolds 方程式を 2 次元化した準 3 次元の多層モデルと 3 次元モデルとを連成させることにより、計算負荷の軽減を図る。また、3 次元数値モデルでは、流体の圧力を直接的に計算するので、構造物に作用する津波力等を動圧の効果も考慮して評価することが可能である。

キーワード：高潮，津波，数値計算，3 次元流れ，動圧，接続モデル

* 海洋・水工部 高潮津波研究室長

** 海洋・水工部 高潮津波研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5052 FAX: 046-844-1274 E-mail: tomita@pari.go.jp, kakinuma@pari.go.jp

Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal Areas (STOC)

Takashi TOMITA*

Taro KAKINUMA**

Synopsis

The numerical simulator, STOC, which consists of 1) 3D models of STOC- IC and STOC-VF, 2) multilevel model named STOC-ML and 3) connection model, has been developed to provide seawater motion from offshore to coastal zones due to tsunamis or storm surges including inundation onto a complex beach. By adopting the 3D model locally, we can economically and accurately evaluate complicated flow around coastal structures or over various topographies, which are smoothly expressed with a porous model introduced into the continuity and Reynolds equations. Water surface displacement is determined by the vertically integrated equation of continuity in both STOC-IC and STOC-ML, while by the 3D-VOF method in STOC-VF. In comparison with experimental, theoretical and numerical data, the calculation results show accuracy of STOC in the various test cases. In the present paper STOC was applied to tsunami calculation to represent the 3D phenomena around the open mouth of tsunami breakwaters. We found net dynamic pressure making up more than half of the net total pressure on the superstructure of submerged breakwater. Thus we can calculate 3D distribution of fluid force on structures considering not only hydrostatic but also dynamic pressures by use of STOC.

Key Words: storm surge, tsunami, numerical calculation, 3D flow, dynamic pressure, connection model

* Head, Storm Surge and Tsunami Division, Marine Environment and Engineering Department

** Storm Surge and Tsunami Division, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1 Nagase Yokosuka 239-0826 JAPAN

Phone: +81-46-844-5052, Facsimile: +81-46-844-1274, E-mail: tomita@pari.go.jp, kakinuma@pari.go.jp

目 次

要 旨	83
1. ま え が き	87
2. 高潮・津波数値シミュレータ STOC の構成	87
2.1 STOC-IC	87
2.2 STOC-VF	88
2.3 STOC-ML	88
2.4 3次元海洋モデルと多層海洋モデルの接続	88
3. 接続モデルの選択	89
4. ベンチマーク・テストによるモデル検証	89
5. 津波模型実験結果との比較によるモデル検証	90
5.1 津波防波堤に関する模型実験との比較	90
5.2 斜面上の津波に関する模型実験との比較	91
6. 津波防波堤の周辺海域への適用	92
6.1 数値計算の概要	92
6.2 水面変動	92
6.3 流速ベクトル	92
6.4 潜堤直立部に働く圧力	93
6.5 防波堤堤幹部における検討	94
6.6 津波浸水の検討	95
7. 津波遡上の視覚化 (STOC-VF による津波遡上計算の一例)	96
8. 結 論	96
9. あとがき	97
謝 辞	97
参考文献	97
記 号 表	97

1. まえがき

東海、東南海、南海地震等による津波被害を防除・軽減する対策が緊急的に求められている。特に、巨大津波の場合には、防潮堤等の防護施設によるハード的な対策と防災情報や避難対策等のソフト的な対策を有効に連携させなければならない。防護施設を強化し、ソフト対策を構築するためには、防護施設による防護機能を評価した上で、防護施設の背後で津波遡上によってどのような水位、流速、流体力、浸水域が発生するのかを明らかにする必要がある。

現在、津波の数値計算では、線形長波理論と非線形長波理論（浅水理論）に基づいた数値モデルを結合させる手法（例えば、後藤・佐藤，1993）がよく用いられており、最近では、非線形分散波理論に基づいた数値モデル（岩瀬ら，2002）により津波の遡上をかなり精緻に計算できるようになってきた。ところで、人口や資産の集積した臨海都市部には、防潮堤等の防護施設を含む多くの構造物があり、海底地形や平面地形の変化も相俟って、沿岸部では複雑な海水流動場が形成される。その結果、防潮堤・防波堤といった海岸構造物や陸上構造物には、津波によって複雑な時空間分布を有する流体力が働くことになる。しかしながら、高潮や津波の予測等に通常用いられている長波理論では、構造物近傍で変化する流速や流体力の鉛直分布を評価することができず、転倒問題に対応するような構造物の設計外力の算定を行なうことができない。さらに、鉛直方向の流量交換が評価されなければ、潜堤や地形変化によって生じる大規模渦を含む流動を正確に再現できない。また、2004年12月26日に発生したスマトラ沖地震に伴ったインド洋大津波の際には、沿岸の構造物を乗り越え陸上を遡上する津波の様子がビデオ撮影され、構造物の影響を受けながら流動する津波現象の複雑さが明白になり、木造、レンガ造、そして、コンクリート造の建物が津波により破壊され、津波の破壊力のすさまじさをまざまざと見せつけられた。こうした沿岸の構造物が受ける津波力の評価は、地域の防災力を図るために重要である。

そこで、本研究では、海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値シミュレータを開発する。モデルは、3次元海洋モデル、多層海洋モデルおよびそれらの接続モデルから構成される。地形急変部や構造物周辺に局所的に3次元モデルを適用することにより、複雑な流速や圧力の分布を正確に、かつ、効率的・経済的に算定することができるようになる。この考えのもとに、正村ら(2001)

は、非静水圧3次元モデルと静水圧平面2次元モデルを結合したモデルを開発し、断層上の津波発生域から防波堤周辺の3次元流動領域までを計算対象とした。本研究では、この3次元領域を囲む広領域に多層モデルを適用する。これは、高潮の計算において、気圧低下や風応力と海底摩擦がもたらす表面付近と海底付近の流動特性の違いを再現し、一方、津波の計算において、層数を比較的多くとることににより、金山ら(2000)と同様に、伝播に伴う波の分散性を考慮するためである。そして、これら二つの領域を滑らかに繋ぎ合わせるために、物理量や状態量の連続性を考慮した接続モデルを適用する。

さらに本モデルは、陸上遡上域まで計算できるよう拡張されており、津波や高潮による遡上・浸水の水深、流速や流体力の動的な解析が可能であり、この結果を可視化することによって、流体運動を視覚的に把握することができる。

なお、本論文では、濃度および温度を全領域で一定値であると仮定し、これらを変数として扱わないが、高潮時の海水流動の3次元構造に関して、柴木ら(2000)は、密度分布の効果を指摘しており、プログラム開発にあたり、濃度および温度も未知変数として解けるよう配慮している。

本論文では、まず、新しく開発した統合的な高潮・津波数値シミュレータである STOC (Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas) の計算精度を幾つかのベンチマーク・テストによって確かめた後、既往の津波模型実験結果との比較により本数値モデルの検証を行なう。次に、実現象スケールを対象として、津波防波堤の開口部における津波の3次元流動や開口部潜堤に作用する津波波圧が計算できることを確認する。そして、これまで十分に検討されていない津波防波堤の堤幹部の安定性に及ぼす3次元流動の影響や、津波防波堤背後の陸上遡上について検討する。

2. 高潮・津波数値シミュレータ STOC の構成

2.1 STOC-IC

数値モデル STOC は、3次元海洋モデルと多層レベルモデルを含むハイブリッド・モデルである。このうち、3次元海洋モデルには、自由表面位置の計算方法が異なる二つのモデルがある。すなわち、自由表面の位置決定の際に、鉛直方向に積分した連続方程式 (vertically Integrated equation of Continuity) を用いる STOC-IC と、VOF 法を用いる STOC-VF である。他方、多層モデル

STOC-ML では、STOC-IC と同様に鉛直方向に積分した連続方程式を用いて自由表面の位置を定める。これらのモデル適用領域を接合させる際には、それぞれの領域の間に、接合モデルを適用する領域を設ける。

STOC-IC の基礎方程式は、porous モデル（榊山ら、1990）を適用した 3 次元の連続方程式（式(1)）と Reynolds 方程式（式(2)）である。なお、このモデルでは、水面位置を鉛直方向に積分した連続方程式（式(3)）から算出するため、砕波のように水面形が鉛直方向に多価になる場合には適用できない。

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

$$\gamma_v \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j u_i u_j}{\partial x_j} + C_i = -\frac{\gamma_v}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \gamma_v \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \gamma_j \nu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (2)$$

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

ここに、 x_i はデカルト座標系 (x, y, z) 、 u_i は x_i 方向の流速 (u, v, w) 、 η は水面変動、 h は基準水面からの水深、 ρ_0 は基準密度、 p は圧力、 γ_v は有効体積多孔率（メッシュ内を占める液相の体積率、 $0 \leq \gamma_v \leq 1$ ）、 γ_i は x_i 方向の有効面透過率（ $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ ：断面を占める液相の面積率、 $0 \leq \gamma_i \leq 1$ ）、 g_i は各方向の重力加速度 $(0, 0, g)$ 、 ν_e 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 項であり、 f_0 を Coriolis のパラメータとすると、 C_i は x および y 方向でそれぞれ $-f_0 v$ および $f_0 u$ となる。密度 ρ に関しては、温度および塩分に関する移流・拡散方程式を数値的に解き、得られた温度と塩分を経験式（例えば、松梨編、1993）に代入して求める。

乱流モデルには、SGS 渦動粘性係数のように計算メッシュの大きさに依存する係数を含むゼロ方程式モデルの他、高 Reynolds 数型 $k-\varepsilon$ 2 方程式モデルも採用できるようにした（数値流体力学編集委員会編、1995）。

また、高潮計算における外力としては、台風による気圧低下および強風を考慮し、台風モデルには、同心円状の気圧分布を仮定した Myers モデルを導入している。他方、津波計算に対しては、Mansinha and Smylie (1971) による断層モデルを組み込んでいる。

これらを基礎方程式として、staggered メッシュで空間を離散化し、leapfrog 法により時間発展させる。連立 1

次方程式の解法として、共役勾配法系の ILU/BiCGSTAB 法を採用している。初期条件は、層毎に一定値を設定することを可能としており、また、多層海洋モデルの結果からの内補も可能である。境界条件は、海岸線、水面、海底および外洋のそれぞれに応じて選択可能である。

2.2 STOC-VF

3 次元モデルとして、VOF 法（沿岸開発技術研究センター、2001）を拡張した 3 次元 VOF モデルである STOC-VF を用いることも可能である。このモデルでは、自由表面位置の計算をするために、式(3) の代わりに VOF 関数に関する移流方程式を解く。従って、STOC-VF は、砕波のように水面形が多価になる場合にも適用できる。

2.3 STOC-ML

STOC-ML は、鉛直方向を数層に分割し、各層に静水圧近似を適用したモデルである。圧力を解かないということ以外は STOC-IC と同様の計算手法を用いる。すなわち、鉛直方向流速 w の計算法と圧力の計算法が 3 次元海洋モデルと異なっており、差分のとり方および自由表面の処理法は、STOC-IC と同様である。また、STOC-ML は、1 層モデル（鉛直平均流モデル）として用いることも可能である。

2.4 3次元海洋モデルと多層海洋モデルの接続

STOC-IC および STOC-VF は、非静水圧モデルであり、他方、STOC-ML は、静水圧モデルである。これら非静水圧モデルと静水圧モデルを直接接続すると、その境界で計算が不安定になる可能性がある。また、3 次元海洋モデルで扱う狭領域では、多層海洋モデルで扱う広領域と比較して、水平・鉛直の両方向に対してより細かなメッシュを用いることになる。そこで、これらの領域間で物理量や状態量を連続的に接続するために、二つの領域の overlap 領域を設け、この領域に次のような接続モデルを適用する。すなわち、非静水圧モデルと静水圧モデルの overlap 領域として静水圧モデルの 1 メッシュ分の領域（図 1 の ○ の部分）を設け、この領域を非静水圧モデルのメッシュ幅でも分割する。そして、overlap 領域の外側を非静水圧モデルの境界、内側を静水圧モデルの境界とし、両者の境界条件をこの領域で接続する。この領域はあくまでも境界条件を接続するために設けた領域と考え、陸地境界線や水深も静水圧モデルの計算で使用する値を用いる。

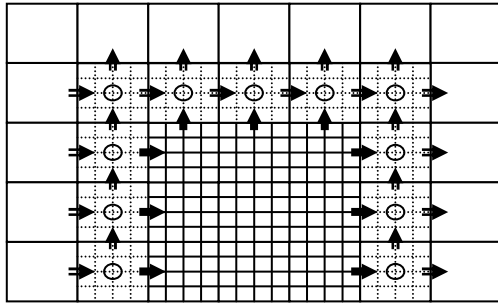


図-1 Overlap 領域

具体的には, overlap 領域と静水圧モデルとの境界で次のように境界条件を与える.

(1) 外側境界 (非静水圧モデル用の境界)

外側境界では, 法線方向の流速として, 非静水圧モデルで計算した境界より一つ内側の流速を与える. その際, 断面の流量が一致するように与えた流速分布に補正係数を乗じる. 他方, 接線方向の流速は, 勾配ゼロで外挿する. また, スカラ量は, 上流側の値で流入出するものとする.

(2) 内側境界 (静水圧モデル用の境界)

内側境界では, 法線方向の流速として, 非静水圧モデルで計算した値を平均した値を与える. 他方, 接線方向の流速は, 非静水圧モデルで計算した値を平均した値を与えるが, overlap 領域で流速を計算する. 従って, 図-1の○印の点では, 静水圧モデルによる水位計算を行なう.

なお, 補間の観点からは, 水平方向, 鉛直方向ともメッシュ分割数を奇数個にしておくのが望ましい.

また, 静水圧モデルと非静水圧モデルの計算メッシュ幅が大きく異なるので, 計算効率のために両者のタイムステップを変える必要がある. 非静水圧モデル計算のタイムステップを静水圧計算のタイムステップの整数分の1, すなわち, $1/n$ とし, n 回毎に同一時刻の計算を行なう.

3. 接続モデルの選択

広領域と狭領域の接続の方法は, 2種類に大別される. すなわち, two-way および one-way の方法である. STOC では, 両者を選択的に用いることができる.

前者では, 3次元領域, 多層領域および接続領域の全計算領域を同タイムステップで解くため, 各領域の現象の相互干渉が考慮可能である. 構造物の詳細な性能評価のように, 計算の効率よりも精度が重視される場合に, この two-way の方法を用いる.

他方, 後者では, 初めに多層海洋モデルを用いて全領域に対して計算を行ない, 接続領域内のデータを全計算時間にわたって保存しておく. 次に, 接続領域内で得られた時々刻々の結果を与えながら, 狭領域を 3次元海洋モデルで解く. すなわち, 多層海洋モデルによる計算値を 3次元海洋モデルに one-way で渡す. この方法を用いれば, メッシュサイズが大きな広領域を解く際に, 計算時間間隔 Δt を狭領域に対するよりも大きくとることが可能であり, 計算速度が要求される予測計算に対応できるであろう.

ところで, 接続の方法が two-way であるか one-way であるかに関わらず, 接続領域内において物理量や状態量が滑らかに連続していなければならない. 未知変数は, 水位, 流速, 圧力, 濃度および温度であり, これらの連続性が必要である. そのために, こうした変数に, 接続領域内で遷移する補正係数を乗じる方法がある. また, 基礎方程式系に補正係数を導入する方法もある. これは, 例えば, 運動量の補正係数 (正村ら, 2001) や, 渦動粘性項, または, 拡散項の補正係数を導入し, 運動量, 乱れや拡散の効果を滑らかに連続的に変化させる方法である. このように, 接続モデルは, 補正係数をどのように導入するかによっても分類される. 2.4 では, 流速に関する手法を述べたのであった. 本論文では, one-way の方法を用いることとする.

4. ベンチマーク・テストによるモデル検証

幾つかのベンチマーク・テスト等によって STOC の検証を行ない, 水面形や流速分布の再現性を検討し, 本数値モデルの妥当性を確かめた. ここでは, STOC-IC の検証結果について例示する.

図-2(a) は, $y/d=1.0$ にある壁面を x の正の方向に一定速度 u_0 で動かして得られる, 1辺の長さが d の2次元正方 cavity 流れの計算結果である. 壁面および底面において, no-slip としている. 図-2(b) に, このときの $x/d=0.5$ に沿った x 方向流速 u の計算結果を示す. 商用モデル (α -FLOW) による計算結果と比較して有意な差異が認められず, 移流項と粘性項の平衡状態が精度よく再現されていることが確認できる.

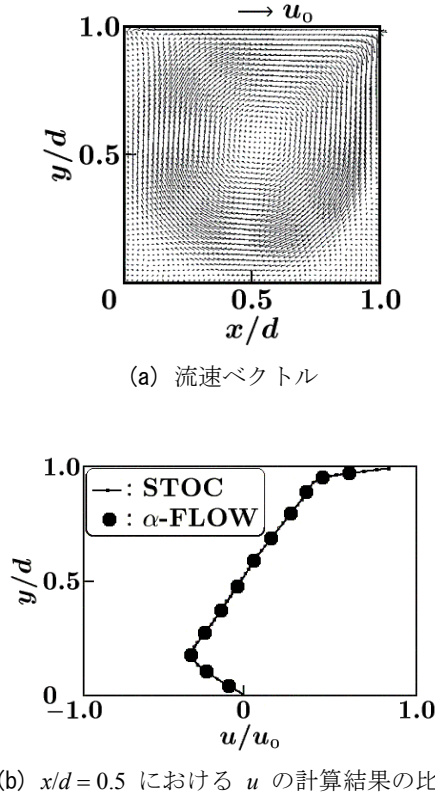


図-2 STOC-IC の 2 次元正方 cavity 流れへの適用

図-3 に、前後を鉛直壁で挟まれた、長さが 1km の水域に、 x の正の方向に風応力を与えたときに生じる吹送流の計算結果を示す。ここで、 η および u は、それぞれ、水面変動および $x = 500\text{m}$ における流速の水平方向成分である。計算条件として、海面における風速 $U = 20\text{m/s}$ 、海面摩擦係数 $f_a = 0.0026$ 、大気と海水の密度比 $r = 1.2 \times 10^{-3}$ および鉛直方向の渦動粘性係数 $K_z = 0.01\text{m}^2/\text{s}$ を与えた。静水深は、 $h = 10.1\text{m}$ である。この問題に対しては、次式のような理論解が得られている(宇野木, 1993)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{3rf_a}{2gh} U|U| \quad (4)$$

$$u = \frac{hrf_a}{4K_z} \left(1 + \frac{z}{h}\right) \left(1 + \frac{3z}{h}\right) U|U| \quad (5)$$

図-3 より、STOC-IC は、水面勾配および流速を精度よく再現していると言える。これより、高潮の計算時に、風応力を外力として与えた場合、モデルが適切に応答することがわかる。

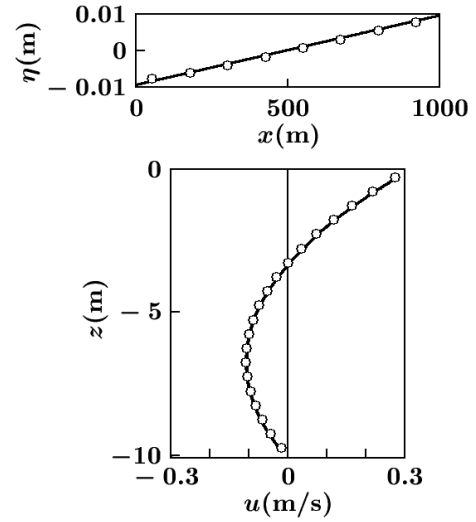


図-3 前後を鉛直壁で挟まれた領域における吹送流 (○: STOC-IC による計算値, —: 式(4), (5) による理論値)

5. 津波模型実験結果との比較によるモデル検証

5.1 津波防波堤に関する模型実験との比較

谷本ら(1988)が、釜石湾口防波堤を対象とした 3 次元模型実験(模型縮尺 1/50)を実施しているので、その結果と数値計算結果とを比較する。数値計算では、実験水槽の全体に STOC-IC を適用した。計算格子サイズは、流れ方向(全長 40m)では、開口部潜堤を中心とした前後 10m の範囲で 25cm、その両外側で 50cm とし、流れに直交する方向(全長 20m)では、全て 25cm とした。鉛直方向には、静水面を基準として、-120, -100, -80, -60, -50, -40, -30, -20, -10, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 10 および 20cm に計算格子を設定した。

図-4 は、防波堤開口部中央を通る流れ方向の水位の空間変化について、模型実験結果と数値計算結果を比較したものである。模型実験ケースは、開口部の平均流速が 0.98m/s および 1.05m/s のものであり、数値計算では、これらに対応させて 1.0m/s とした。

防波堤開口部では、エネルギー減衰が重要となる。そこで、渦動粘性係数を幾つか変えた数値計算を実施した。水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数としては、定数として $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ の範囲で変化させた場合および SGS 渦動粘性モデル(モデル定数 $C_s = 0.2$)を使用した場合について行なった。なお、定数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ は 20°C における水の動粘性係数である。図中の例えば (-2, -4) は、水平および鉛直方向の渦動粘性係数の 10 のべき数を示しており、水平および鉛直渦動粘性

係数がそれぞれ $1.0 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ および $1.0 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ であることを示している。また、(SGS) および (SGS,F) は、SGS 渦動粘性係数を適用したケースであり、このうち「F」の付くものは、 x 方向の計算格子サイズを 25cm から 12.5cm に細かくしたケースである。

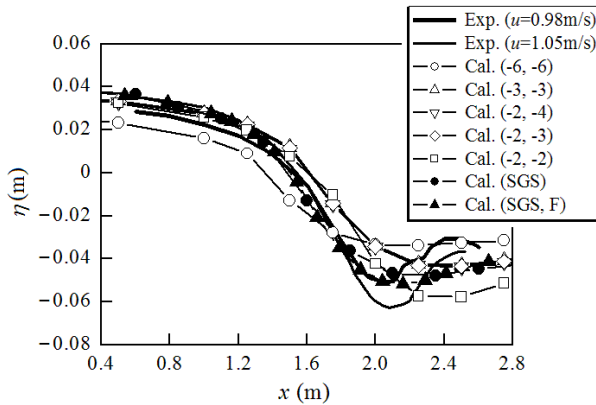


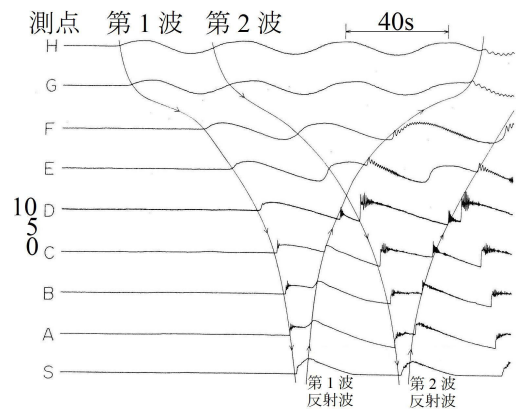
図-4 津波防波堤開口部潜堤周辺の水面波形の比較

同図によると、動粘性係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ を用いた計算では、渦による乱れを考慮できないため、計算結果が実験結果と一致しない。渦による乱れを考慮した定数の渦動粘性係数の場合、開口部沖側 (図中 $x < 1.6\text{m}$) の範囲では、渦動粘性係数の差異は水位の空間変化に大きな影響を及ぼさないが、開口部背後では大きな影響が現れている。鉛直方向渦動粘性係数が小さな (-3, -3), (-2, -4) および (-2, -3) の各ケースでは、開口部の渦によるエネルギーの低減が十分でなく、水位の低下量の計算値が実験値に比べて小さくなっている。一方、水平方向および鉛直方向渦動粘性係数を共に $1.0 \times 10^{-2} \text{m}^2/\text{s}$ としたケースでは、計算結果が実験結果と比較的によく一致する。数値モデルにおいて鉛直渦動粘性係数を大きくしないと実験結果をよく再現することができない理由としては、水深 1.2m の開口部に高さ 0.82m の潜堤があるために、渦による乱れの鉛直方向の運動への寄与が大きかったことが考えられる。

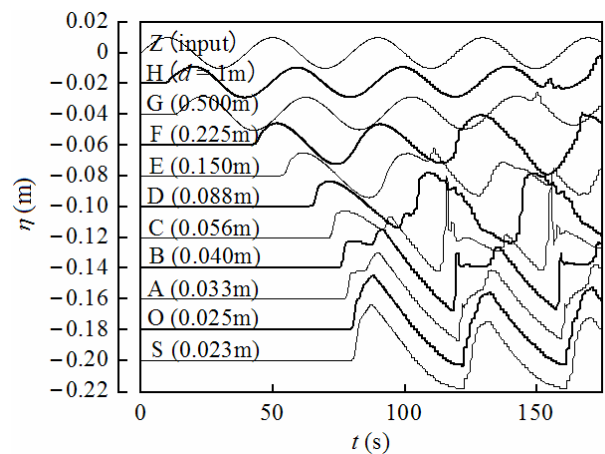
また、SGS 渦動粘性係数を用いた場合の計算結果は、渦動粘性係数に定数を用いた場合よりもさらに実験結果とよく一致するようになり、細かな計算格子を使うほど実験結果に一致する。ただし、実験では $x = 2.1\text{m}$ から 2.4m にかけて水位が -0.06m から -0.04m まで回復しているが、数値計算では水位の回復の程度が弱い。この水位の回復過程は、 y 方向や潜堤上部近傍の z 方向の計算格子サイズをさらに細かくすることにより、実験結果に合うようになると考えられる。

5.2 斜面上の津波に関する模型実験との比較

斜面上の津波について、鶴谷・中野による断面模型実験 (谷本ら, 1983) と比較する。図-5(a) は、鶴谷・中野による、勾配 1/200 の斜面上に周期 40s, 図中 H (斜面前端の一樣水深部, 静水深 1m) における波形勾配が 1.9×10^{-4} 程度の津波が来襲する場合の実験ケース (参考文献中の図-6.8) を示しており、同図 (b) は、これに対応する STOC-IC による数値計算結果である。図中に示した d はその地点における水深である。



(a) 模型実験結果 (谷本ら (1983) における図-6.8)



(b) STOC-IC による計算結果

図-5 斜面上の津波波形の比較

数値計算では、メッシュ・サイズを $\Delta x/L = 4 \times 10^{-3}$ および $\Delta z/H = 0.5$ とした。ここで、 L は造波境界における波長、 H は造波波高である。計算結果において、計算値の地点 C では、沖からの津波の第2波と岸からの反射波が重合するときに高い水位上昇量が現れ、この点は模型実験結果と一致していないが、その他の地点では、良好に模型実験結果が再現されている。このように、碎波を

考慮することができない STOC-IC であっても、模型実験で出現したような、ソリトン分裂しながら斜面上を遡上する津波を破綻せずに概ね良好に計算できる。

6. 津波防波堤の周辺海域への適用

6.1 数値計算の概要

本モデルを実海域の現象に適用する。ここでは、明治三陸津波を想定し、湾口防波堤を有する釜石港（図-6）に発生する海水流動を対象として数値計算を行なう。図中に斜めの直線で示された B_1 および B_2 がそれぞれ北防波堤および南防波堤であり、これらの間に潜堤がある。この湾口防波堤の開口部周辺、すなわち、図-6 の1辺1kmの正方形の範囲に3次元海洋モデルであるSTOC-ICを適用する。このSTOC-ICの適用領域の計算メッシュを図-7に示す。ここで、メッシュ・サイズは、 x 方向（東西方向）および y 方向（南北方向）ともに12.5mである。他方、鉛直方向の格子サイズは、1～10mの不等間隔とし、自由表面近傍で1mのメッシュ・サイズとした。STOC-ICの適用範囲の周囲に単層のSTOC-MLを配置した。これら二つの領域の接続領域は1辺1kmの正方形を外縁として10メッシュ内側までの範囲である。

全計算対象領域は、明治三陸地震の震源位置を含む領域とし、明治三陸地震による津波の初期波形を次のような断層パラメタから計算した。すなわち、断層パラメタとして、断層長210km、断層幅50km、断層深さ1km、すべり量12.5m、すべり角 58° 、傾斜角 20° および走向角 156° を与え（佐藤編, 1997）、すべり量の補正係数を0.75とした。

また、海底および構造物壁面において、no-slipの条件を与える。

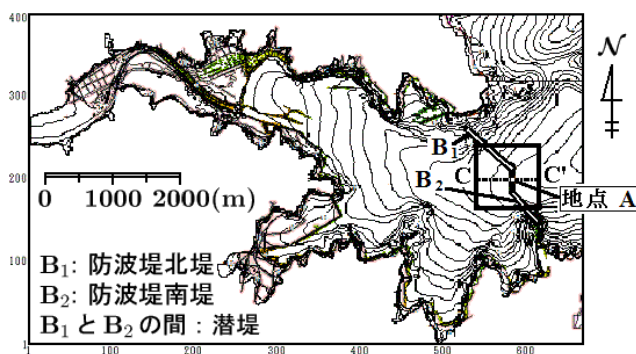


図-6 釜石港の湾口防波堤

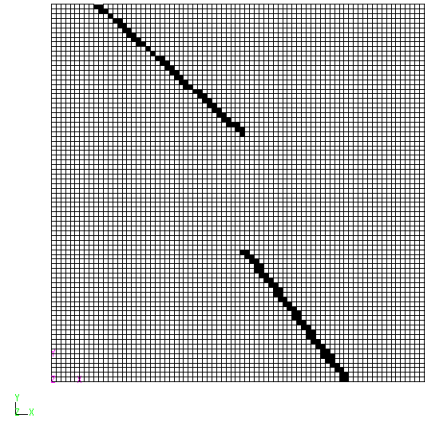


図-7 STOC-IC 適用領域における水平面内の差分格子

6.2 水面変動

潜堤中央部（図-6の地点A）での、第1波における水面変動の計算結果を図-8に示す。

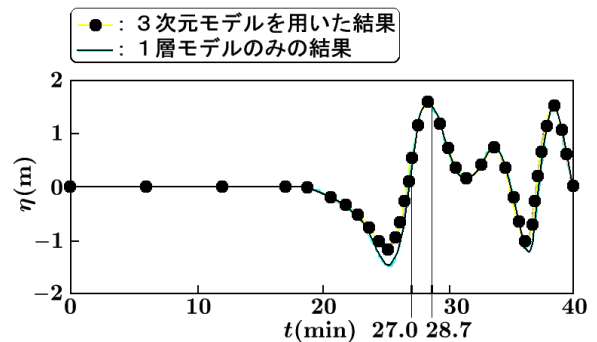


図-8 地点Aにおける水面変動

6.3 流速ベクトル

時刻 $t=27.0$ 分における図-6のC-C'断面内の流速ベクトルの計算結果を図-9に示す。第1波の引き波による流れが潜堤を乗り越えて上層に集中し、押し波による岸向きの流れがその下方に潜り込んでいる。このように、STOC-ICを適用することによって、1層モデルで得られない流速の鉛直分布を再現することができる。

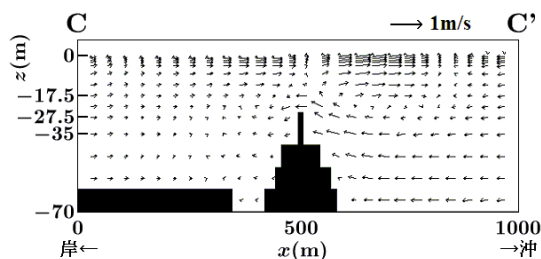


図-9 C-C' 断面の流速ベクトル ($t = 27.0\text{min}$)

また、時刻 $t = 28.7\text{分}$ における流速ベクトルの計算結果の平面図を図-10 および 11 に示す。防波堤背後において水平面内の水の循環が生じている。

なお、本論文における計算では、海底や壁面における摩擦を考慮していない。現地における摩擦の効果を各モデルに取り込む方法に関しては、今後の課題としたい。

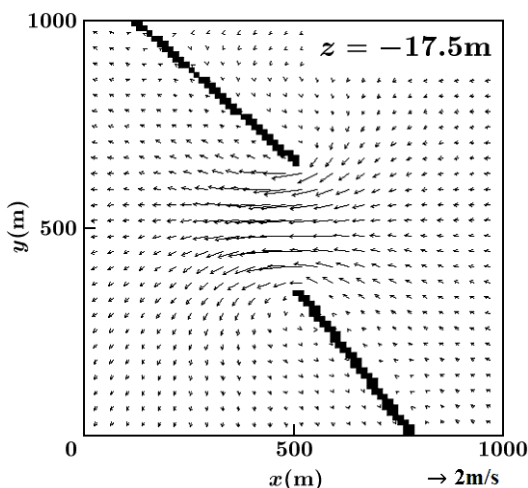


図-10 流速ベクトル ($t = 28.7\text{min}$, $z = -17.5\text{m}$)

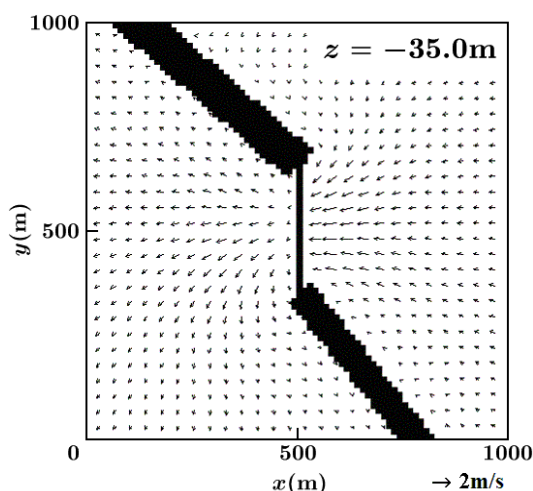


図-11 流速ベクトル ($t = 28.7\text{min}$, $z = -35.0\text{m}$)

6.4 潜堤直立部に働く圧力

第1波の峰が潜堤上を通過する時刻は、 $t = 28.4\text{分}$ であるが、潜堤直立部に働く津波波力が第1波の間で最大となる時刻は、 $t = 28.7\text{分}$ であった。この時刻 $t = 28.7\text{分}$ における潜堤直立部壁面に働く圧力を図-12 および 13 に示す。前者が $z = -27.5\text{m}$ 、後者が $z = -35.0\text{m}$ における、潜堤直立部壁面に沿った総圧の分布である。潜堤直立部の岸側壁面および沖側壁面のそれぞれに働く圧力 p_{on} および p_{off} の x 軸方向の差 $\Delta p = p_{\text{off}} - p_{\text{on}}$ が正味の圧力として構造物に働く。

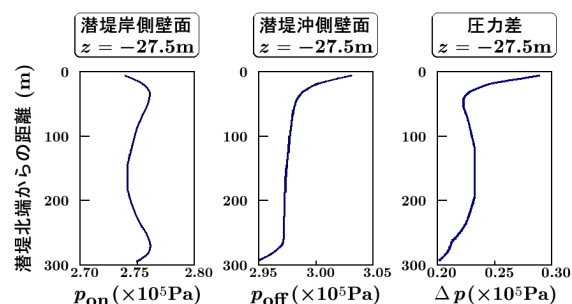


図-12 潜堤直立部の各壁面に働く圧力および圧力差 ($t = 28.7\text{min}$, $z = -27.5\text{m}$; $\Delta p = p_{\text{off}} - p_{\text{on}}$)

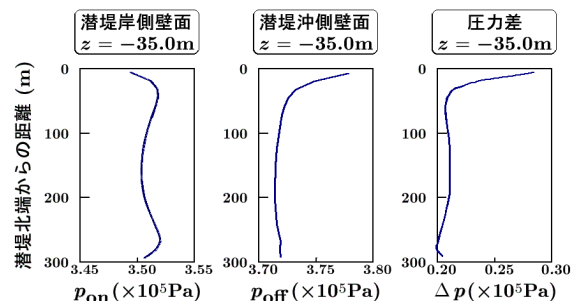


図-13 潜堤直立部の各壁面に働く圧力および圧力差 ($t = 28.7\text{min}$, $z = -35.0\text{m}$; $\Delta p = p_{\text{off}} - p_{\text{on}}$)

同時刻の潜堤上の水位分布を図-14 に示す。

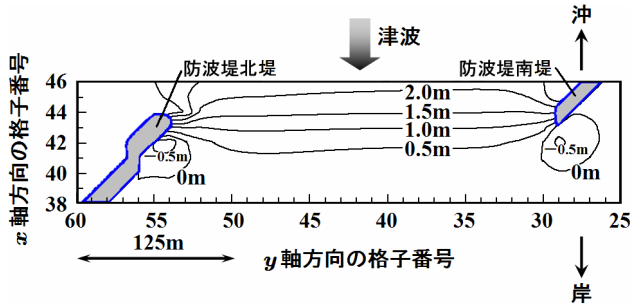


図-14 防波堤開口部周辺の水位分布 ($t = 28.7\text{min}$)

図-14 より、各地点における水位変動を考慮した静水圧が得られる。これを図-12 および 13 の総圧から差し引くことにより、各位置における動圧が得られる。潜堤直立部に働く動圧の分布を図-15 および 16 に示す。

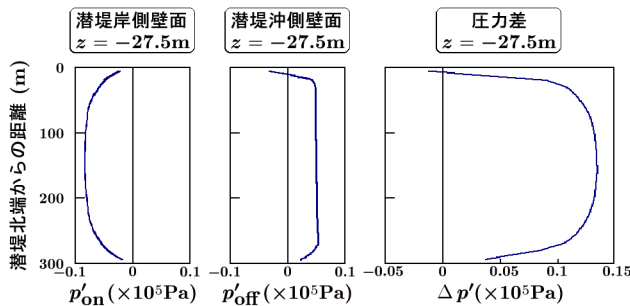


図-15 潜堤直立部の各壁面に働く動圧および圧力差
($t = 28.7\text{min}$, $z = -27.5\text{m}$; $\Delta p' = p'_{\text{off}} - p'_{\text{on}}$)

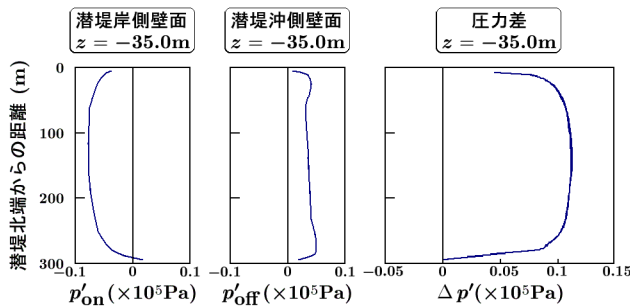


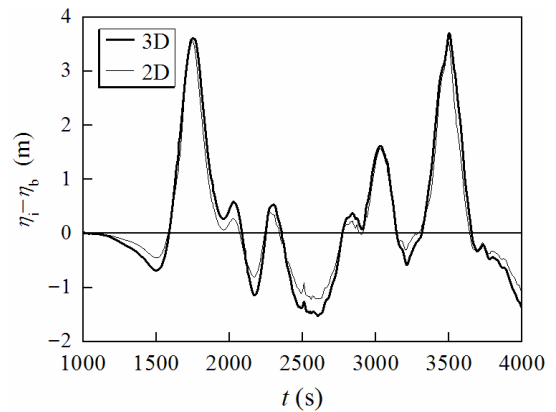
図-16 潜堤直立部の各壁面に働く動圧および圧力差
($t = 28.7\text{min}$, $z = -35.0\text{m}$; $\Delta p' = p'_{\text{off}} - p'_{\text{on}}$)

潜堤直立部岸側壁面に働く負の動圧は、潜堤中央部ほど絶対値が大きくなる。これに対して、潜堤直立部岸側壁面に働く正の動圧は、 $z = -27.5\text{m}$ で潜堤端部付近を除いてほぼ一定であり、 $z = -35.0\text{m}$ で潜堤端部付近において潜堤中央付近よりも大きくなっている。また、正味の

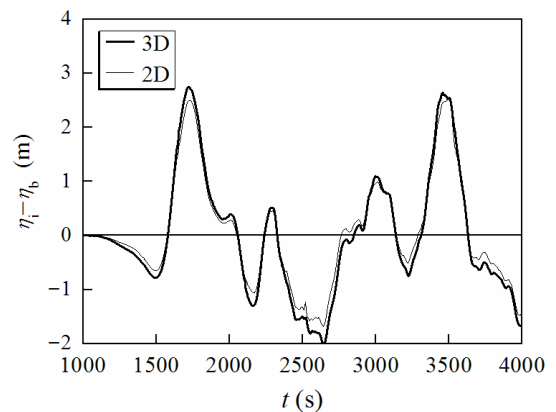
動圧 $\Delta p' = p'_{\text{off}} - p'_{\text{on}}$ の大きさは、潜堤中央部の $z = -27.5\text{m}$ の位置で $1.35 \times 10^4 \text{Pa}$ であり、これは、この点での正味の総圧の約 58% を占めている。このように、本解析手法を用いれば、従来の 1 層モデルのように静水圧分布を仮定するモデルと異なり、動圧の効果を考慮して圧力の空間分布を算定できる。

6.5 防波堤堤幹部における検討

図-17 は、北防波堤の堤幹部（堤頭部から 50m）および南防波堤の堤幹部（堤頭部から 80m）における防波堤の堤外側水位 η_i と堤内側水位 η_b の差を示したものである。



(a) 北防波堤の堤幹部（堤頭部から 50m）



(b) 南防波堤の堤幹部（堤頭部から 80m）

図-17 津波防波堤の堤幹部前後の津波による水位差

防波堤の堤幹部では、堤頭部と異なり、津波の水位による静水圧的な力が支配的となるので、この水位差の評価が堤体の安定性に重要な影響を及ぼすことになる。数値計算に使用した水平および鉛直方向の渦動粘性係数は、

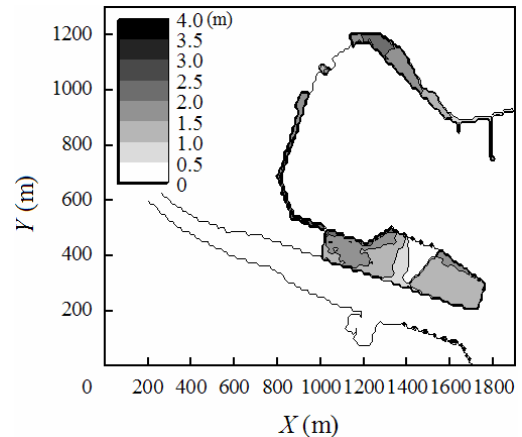
共に海水流動計算において一般的に用いられる $1.0 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$ および $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ である。なお、図には比較のために、平面 2 次元モデルによる結果を併記しており、使用した運動量補正係数は、後藤・佐藤 (1993) により釜石湾口防波堤に対して提案されている $f_D = 0.5$ である。

図によると、押し波時では、北防波堤においては 3 次元流動の効果はほとんど現れていないが、南防波堤では 3 次元流動の効果により平面 2 次元モデルに比べて 1.1 倍程度の水位差が発生している。一方、引き波時では、北防波堤と南防波堤共に、3 次元流動を考慮した場合において 1.25 倍程度水位差が大きくなっている。これらの差異は、開口部における 3 次元流動が、防波堤堤頭部だけでなく堤幹部にも影響を及ぼすことを示しているため、防波堤設計の際には、堤幹部における 3 次元流動の影響把握も今後の課題となるであろう。なお、乱流の評価をより精度高くなることにより計算結果の異なることが予想されるので、乱流モデルのさらなる検討も必要である。

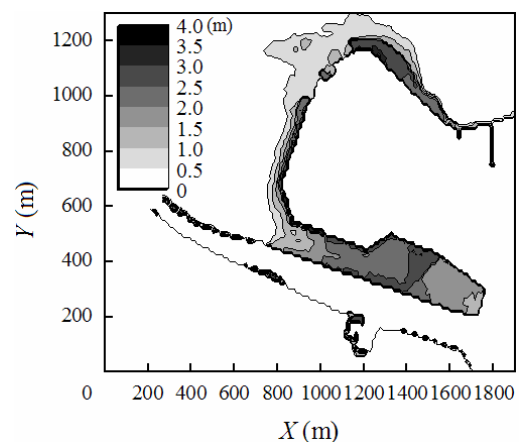
6.6 津波浸水の検討

図-18 は、津波防波堤で守られた北側湾奥部における陸上の津波浸水深を示したものである。この領域に襲撃する津波を (a) と (b) で同一にしているが、(a) の 3 次元計算により得られた浸水域は全体的に狭くなっている。とくに、埠頭中央部分に津波浸水が発生しない三角形の領域が認められるが、これは、この三角形の領域の沖側および港内側境界に位置する高さ 3m 程度の壁を津波が越えなかったためである。しかし、この領域は、平面 2 次元計算では浸水している。

海に突き出した埠頭先端付近の津波遡上水位の時間波形を比較した図-19 によると、平面 2 次元計算（図中 2D）よりも 3 次元計算（図中 3D）では津波高さが低くなる傾向にあり、この差異が浸水するか否かの差を発生させた。どちらが正しいかを判断するのは、現段階では困難であるが、このことは、3 次元モデルをどういった場所に適用すべきであるかについて今後検討しなければならないことを示唆している。



(a) 3次元計算結果



(b) 平面 2 次元計算結果

図-18 湾奥部の最大浸水深

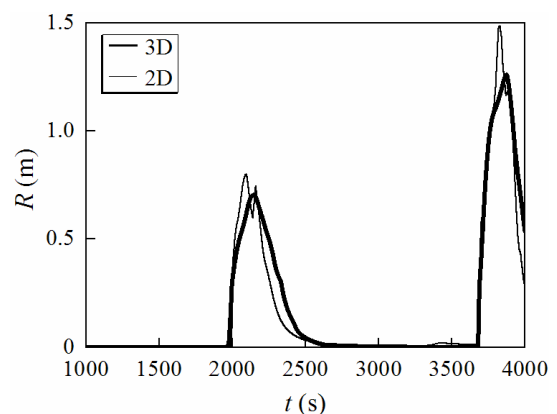


図-19 埠頭先端付近の遡上水位の比較

7. 津波遡上の視覚化（STOC-VF による津波遡上計算の一例）

防波堤および海岸線における防潮堤によって守られているモデル臨海部に STOC-VF を適用して、津波による浸水の計算を行なった。図-20 に、津波の浸水状況の時間変化を示す。なお、津波遡上の数値計算結果を視覚化した例に、MARS による計算結果を用いた安田ら（2003）がある。

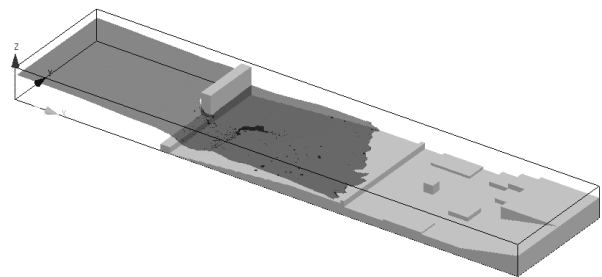
図-20(a) において、潜堤が存在する岸沖断面の地形は、同図 (d) に示すようであり、潜堤に隣接する防波堤の高さは堤沖側の海底から測って $Z = 7.0\text{m}$ である。津波は、防波堤沖側の海底から 0.5m/s の流速で鉛直上向きに流入する流れにより生成し、最高水位が約 6.6m の津波の防波堤への来襲を模擬的に再現した。同図 (a) や (b) に見られるように、防波堤の直背後地では、潜堤部分の直背後に比べて津波の到達時刻が若干遅れるが、浸水に至った際の浸水深の差異はほとんどない。このようにして 3 次元 VOF モデルを津波計算に適用することにより、建物周辺の流れの様子を詳細に再現することができるようになる。こういった視覚的かつ詳細な計算結果を示すことで、津波に対する住民等の理解がより深まり、迅速かつ的確な避難に役立つものと期待される。

8. 結 論

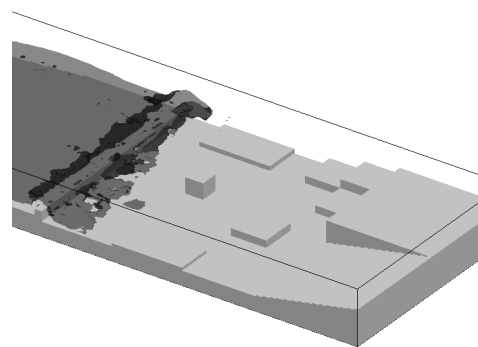
3 次元海洋モデルである STOC-IC および STOC-VF、多層レベルモデルである STOC-ML、そして、これらを繋ぎ合わせる接続モデルから構成される高潮・津波数値シミュレータ “STOC” を開発した。対象とする広領域内の一部の領域に 3 次元海洋モデルを局所的に適用して、地形急変部や構造物周辺の複雑な流動場を正確に、かつ、効率的・経済的に算定することがその特徴である。

まず、本数値モデルの妥当性を幾つかのベンチマーク・テストによって検証した。次に、STOC-IC の妥当性・精度について、津波防波堤開口部周辺や斜面上の津波に関する既存の模型実験結果との比較により検討した。そして、STOC-IC と STOC-ML を接続した数値モデルを適用することによって、津波防波堤周辺および背後地における津波の数値シミュレーションを行なった。その結果、本数値モデルが震源から遡上域まで含めた津波の現象を再現できること、その際に、構造物周辺に非静水圧モデルを用いることによって、3 次元な流動を動圧の効果も考慮して詳細に把握できること、また、構造物の安定性に対して重要な防波堤前後の水位差に、津波防波堤

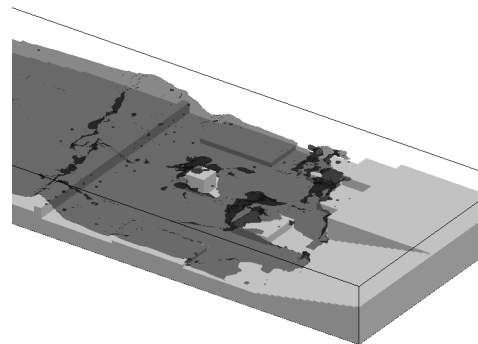
開口部に発生する 3 次元な海水流動が、堤頭部のみならず堤幹部においても影響を及ぼすことを明らかにし



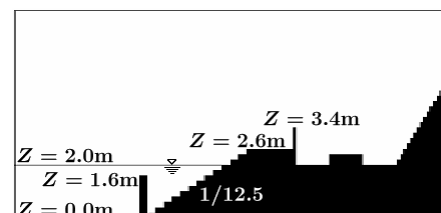
(a) $t = 14\text{s}$



(b) $t = 17\text{s}$



(c) $t = 22\text{s}$



(d) 断面図

図-20 モデル臨海部における STOC-VF の適用

た．防波堤基礎や潜堤に作用する流体力の空間分布を定量的に把握することが可能な本モデルは，構造物の転倒や破壊箇所の予測を可能とし，より合理的な沿岸構造物の設計に寄与するものである．

9. あとがき

3次元海洋モデルの有効性は，構造物周辺における津波の現象を動圧の効果も含めて精度高く推定することにある．この精度を上げるためには，乱流モデルの検討を今後十分に行なう必要があるが，この問題が解消されると，3次元海洋モデルと一般的に用いられる平面2次元モデルとの比較から，防波堤の形状等に依存する運動量損失係数を推定することが可能になり，この値を用いることで平面2次元計算の精度向上が期待できる．今後は，乱流モデルについてさらに検討を加えとともに，津波の3次元性を評価すべき箇所について検討していく所存である．なお，基礎方程式において濃度と温度の移流・拡散方程式も連立させており，本モデルを広範囲の環境問題に対する海洋モデルに拡張することも可能であろうことを付記する．

(2005年2月10日受付)

謝辞

本研究の遂行にあたり，京都大学防災研究所の特定共同研究(14P-2)「都市域における氾濫災害危険度評価法の研究開発」(代表：高山知司教授)において，貴重な意見交換ができた．そして，株式会社富士総合研究所の秋山実氏には，プログラム開発および数値計算の実施において多大な協力を頂いた．また，国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所には，釜石港の地形データを御提供頂いた．ここに感謝の意を表す．

参考文献

岩瀬浩之・藤間功司・見上敏文・柴木秀之・後藤智明 (2002): 波数分散効果を考慮した日本海中部地震津波の遡上計算，海岸工学論文集，第49巻，pp. 266-270.

宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，pp. 244-246.

沿岸開発技術研究センター (2001): 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.

金山進・田中仁・首藤伸夫 (2000): 非線形分散多層波動モデルの改良と準3次元波動場への適用，土木

学会論文集，No. 642/II-50, pp. 77-86.

後藤智明・佐藤一央 (1993): 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発，港湾技術研究所報告，第32巻，第2号，pp. 3-44.

榊山勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析，海岸工学論文集，第37巻，pp. 554-558.

佐藤良輔編 (1997): 日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，p. 52.

柴木秀之・加藤史訓・山田浩次 (2001): 密度成層と Wave Setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算，海岸工学論文集 第48巻，pp.286-290.

数値流体力学編集委員会編 (1995): 乱流解析，東京大学出版会，314p.

谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司 (1988): 津波防波堤開口部潜堤の安定性に関する実験的研究，港研報告，第27巻，第4号，pp. 93-121.

谷本勝利・高山知司・村上和男・村田繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野晋・平石哲也 (1983): 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港研資料，No. 470, 299p.

正村憲史・藤間功司・後藤智明・飯田邦彦・重村利幸 (2001): 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.

松梨順三郎編 (1993): 環境流体汚染，森北出版，407p.

安田誠宏・平石哲也・永瀬恭一・島田昌也 (2003): 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.

Mansinha, L., and D. E. Smylie. 1971. The Displacement Fields of Inclined Faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.

記号表

C_i : Coriolis 項

C_s : SGS 渦動粘性モデルのモデル定数

H : 造波波高.

K_z : 鉛直方向の渦動粘性係数

L : 造波境界における波長

R : 遡上水位

U : 風速

(X,Y) : 水平方向座標

Z : 基準面からの高さ

d : 水深

f_0 : Coriolis のパラメタ

f_a : 海面摩擦係数
 f_D : 運動量補正係数
 g_i : 重力加速度 (0,0,g)
 h : 基準水面からの水深
 n : 整数
 p : 圧力
 p_{on} : 潜堤直立部の岸側壁面に働く総圧
 p_{off} : 潜堤直立部の沖側壁面に働く総圧
 Δp : x 軸方向の正味の総圧 ($p_{off} - p_{on}$)
 p'_{on} : 潜堤直立部の岸側壁面に働く動圧
 p'_{off} : 潜堤直立部の沖側壁面に働く動圧
 $\Delta p'$: x 軸方向の正味の動圧 ($p'_{off} - p'_{on}$)
 r : 大気と海水の密度比
 t : 時間
 Δt : 計算時間間隔
 u_i : x_i 方向の流速 (u, v, w)
 x_i : デカルト座標系 (x, y, z)
 Δx_i : x_i 方向のメッシュ・サイズ ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)
 γ_i : x_i 方向の有効面透過率 ($\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$)
 γ_v : 有効体積多孔率
 η : 水面変動
 η_b : 堤内側水位
 η_i : 堤外側水位
 ν_e : 実効動粘性係数
 ρ : 密度
 ρ_0 : 基準密度