

海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値解析手法の開発

独立行政法人港湾空港技術研究所 正会員 柿沼太郎

独立行政法人港湾空港技術研究所 正会員 富田孝史

株式会社富士総合研究所 荒木和博

株式会社富士総合研究所 島田昭男

株式会社富士総合研究所 秋山 実

1. 序 論：高潮や津波が人間を脅かすのは、主として、それらの効果が沿岸部に接近・到達したときであり、その際、海底地形や平面地形の変化によって、複雑な海水流動場が形成される。その結果、防潮堤や津波防波堤には、複雑な空間分布を有する流体力が働く。しかし、現在、通常用いられている非線形長波理論（浅水理論）では、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を算定することができない。また、鉛直方向の流量交換が考慮されていなければ、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し難い。そこで、本研究では、海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値解析モデルを開発する。

2. 数値解析モデルの構成：本モデルを STOC (Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas) と呼ぶ。STOC は、(1) 3次元海洋モデル、(2) 多層海洋モデル及び (3) これらを接続するモデルの三つのモデルからなる。広領域に多層モデルを適用し、それが囲む一部の狭領域に3次元モデルを局所的に適用し、両者を組み合わせて用いることにより、台風の接近進路や津波発生地点を含む領域を扱いながら、地形急変部や構造物周辺の複雑な流速分布や外力を効率的・経済的に算定する。

(1) は、非静力学モデルであり、Navier-Stokes 方程式を基礎方程式とする。基礎方程式は、差分法によって解く。粘性項は、2次精度中心差分で離散化し、移流項には、1次精度風上差分及び2次精度中心差分をパラメタで結合した hybrid scheme を用いる。空間的に staggered メッシュを採用し、時間的に流速と、圧力及び水面変動とを $\Delta t/2$ ずらして配置した leapfrog 法を用いる。

一方、(2) は、静力学モデルであり、各 level 層で水平方向の運動方程式を解く。台風に対して Myers モデルを導入し、気圧低下及び風応力と海底摩擦の効果とを流速の鉛直分布に反映する。他方、地震津波に対して断層モデルを組み込み、層数を比較的多くとる領域では、金山ら (2000) と同様に、津波伝播における波の分散性を考慮できる。水面変動は、(1)、(2) の両者において、水面から底面まで積分した連続方程式より求める。また、porous モデルを採用し、地形変化を滑らかに捉える。

そして、これら二つの領域を (3) によって繋ぐ。メッシュ間隔の異なる両領域間で物理量を連続的に接続するために、接続部を (1) 及び (2) の overlap 領域とし、この領域に接続モデルを適用する。

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：two-way 及び one-way の各方法である。STOC では、両者を選択的に用いる。前者では、多層海洋モデルと3次元海洋モデルを各領域と overlap 領域を併せた領域において同タイム・ステップで解き、各領域の現象の相互干渉を考慮する。接続部の overlap 領域内で補間や平均の操作を行ない、それぞれの領域のメッシュに適合するように境界条件を処理する。更に、この接続領域内で遷移する運動量補正係数 (正村, 2001) を導入し、運動量輸送を含めた物理量を合理的に連続的に変化させる。構造物の設計時のように、計算の効率よりも精度が重要である場合、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によって全領域を解き、得られた値を境界条件として与えて、狭領域を3次元海洋モデルで解く。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。その際、接続領域内で、多層領域から3次元領域へと徐々に重みを変化させて、両モデルによる水位の計算値の重み付き平均を求め、この平均値をその後のタイム・ステップの計算で用いる。この方法を用いれば、メッシュ幅が大きな広領域を解く際に、 Δt を狭領域に対するよりも大きくとることが可能で、計算速度が要求される予測計算に対応できる。本稿では、one-way の方法を用いた結果を示す。

4. 3次元海洋モデルの検証：検証計算のうち、3次元海洋モデルの検証例を示す。図1は、上面を右方向に一定速度で動かして得られる2次元正方 cavity 流れの計算結果である。側面と底面は、no-slip としている。図2に、 $x/d=0.5$ に沿った x 方向流速 u の計算結果を示す。他モデル (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、移流項と粘性項がバランスした状態で精度よく再現されていることが確認できる。また、図3に、立方体の水槽内において、上方から見て半時計回りの方向に各側面を一定速度で動かしたときの水面形状を示す。コーナ付近の流体運動も、破綻なく計算されている。

キーワード → 3次元流れ, 数値計算, 津波波力, 高潮

連絡先 → 〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1, Phone: 046(844)5052, Facsimile: 046(844)1274

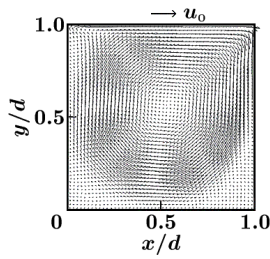


図1：2次元正方 cavity 流れ

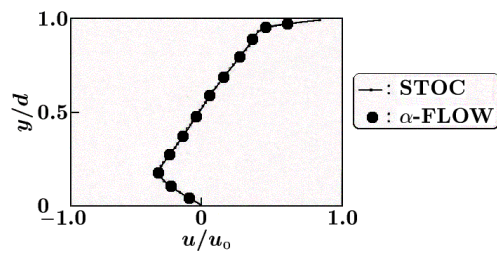
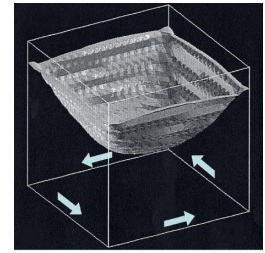
図2： $x/d=0.5$ における u の計算結果

図3：3次元回転渦の水面形の計算結果

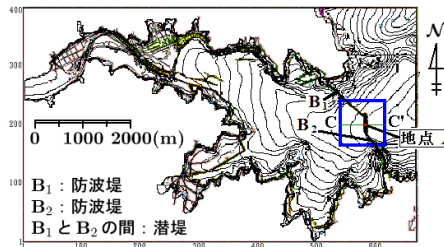


図4：釜石港の湾口防波堤

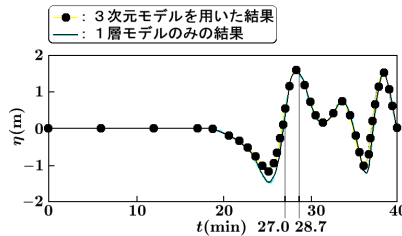
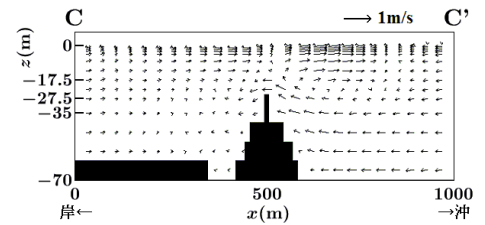
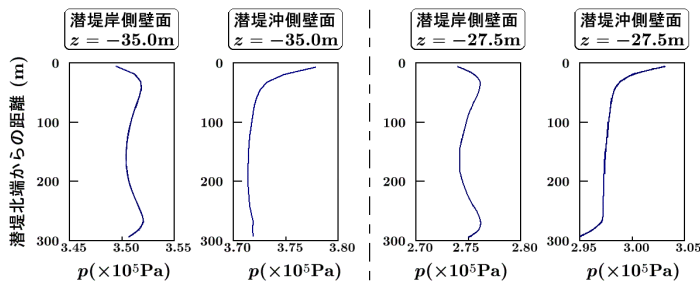
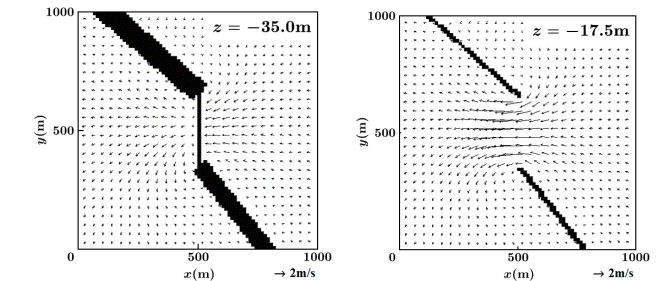


図5：地点 A における水面変動

図6：C-C' 断面の流速ベクトル ($t=27.0\text{min}$)図7：潜堤直立部に働く圧力の計算結果 ($t=28.7\text{min}$; $z=-35.0\text{m}$, -27.5m)図8：流速ベクトルの計算結果 ($t=28.7\text{min}$; $z=-35.0\text{m}$, -17.5m)

5. 津波来襲時の湾口防波堤周辺における海水流動の数値計算：次に、本モデルを実海域の現象に適用する。ここでは、明治三陸地震津波を想定したときの、図4に示す釜石港における湾口防波堤開口部周辺に発生する流動の数値計算を行なう。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° 及び走向角 156° を与え(佐藤編, 1997)、すべり量の補正係数を 0.75 とする。接続部に one-way の方法を用いて、湾口防波堤開口部周辺(図4の1辺 1km の正方形枠内)に3次元海洋モデルを適用する。3次元海洋モデルの領域におけるメッシュ・サイズは、水平方向に x , y 軸方向とも 12.5m とし、鉛直方向に 1~10m の不等間隔としている。また、多層海洋モデルの層数は、簡単のために1層とする。

潜堤中央部(図4の地点 A)での第1波における水面変動の計算結果を図5に示す。時刻 $t=27.0\text{分}$ における C-C' 断面内の流速ベクトルの計算結果を図6に示す。第1波の引き波による流れが潜堤に堰き止められて上層に集中し、押し波による岸向きの流れと干渉して循環が生じている。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 $t=28.7\text{分}$ における潜堤直立部壁面上の圧力分布を図7に示す(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。)。本解析手法を用いれば、動圧の効果を考慮して、圧力を空間分布も含めて算定できる。同時刻の流速ベクトルの計算結果の平面図を図8に示す。双方の防波堤背後に海水が流れ込み、水平断面内に大規模渦が形成されている。

6. 結 論：3次元海洋モデル、多層海洋モデル及び接続モデルから構成される数値解析モデルを開発した。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、防波堤基礎や潜堤に作用する流速や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、防波堤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。

本研究を遂行するにあたり貴重な御助言を頂いた防衛大学校建設環境工学科藤間功司助教授、そして、釜石港の地形データを御提供頂い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謝意を表します。

参考文献：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.; 佐藤良輔編 (1997): 日本の地震断層パラメタ・ハンドブック, 鹿島出版会, p. 52.; 正村憲史 (2001): 流れの鉛直構造を考慮した津波解析法に関する研究, 東海大学大学院博士論文, 129p.