

海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波の数値計算

柿沼太郎*・富田孝史**・秋山 実***

高潮・津波によって沿岸部に形成される海水流動場を解析するための数値解析モデルを開発した。モデルは、3 次元海洋モデル、多層海洋モデル及びこれらを滑らかに繋ぎ合わせる接続モデルから構成される。地形急変部や構造物周辺の狭領域に 3 次元モデルを局所的に適用することによって、複雑な流速分布や流体力を正確に、かつ、効率的・経済的に算定する。また、この領域を囲む広領域に多層モデルを適用して、高潮の場合は、風応力と海底摩擦がもたらす表面付近と海底付近の流速特性の違いを再現し、一方、津波においては、その分散性を考慮する。本モデルを用いて津波の数値解析を行ない、防波堤開口部周辺の流速分布及び潜堤に働く圧力について検討した。

1. 序 論

高潮や津波が人間を脅かすのは、主として、それらの影響が沿岸部に接近・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、防潮堤や防波堤には、複雑な時間空間分布を有する流体力が働く。しかし、現在、高潮や津波の予測等に通常用いられている非線形長波理論（浅水理論）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。また、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。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。

モデルは、3 次元海洋モデル、多層海洋モデル及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。この考えのもとに、正村ら（2001）は、3 次元モデルと 1 層モデルを組み合わせ、断層上の津波発生域から、防波堤周辺の 3 次元的な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開発する。

なお、高潮時の海水流動の 3 次元構造に関して、柴木

ら（2001）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、濃度及び温度も未知変数として解けるよう配慮する。

本論文では、数値解析手法開発の第 1 報として、潜堤が設置された防波堤開口部周辺の実地形にモデルを適用し、水平面・鉛直面の両者において地形が急変する領域に津波が進行したときの数値解析を行ない、流速分布及び潜堤に働く流体力を再現する。

2. 数値解析モデルの構成

本研究で開発を進めている統合的な数値解析モデルを STOC (Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas) と呼ぶ。これは、防災において、情報や知識、施設、食料、物資、そして、心構えといった様々な項目について、組織的、または、個人的に蓄え (stock) を確保しておくことが重要であるという考えに基づく。STOC を構成する、① 3 次元海洋モデル、② 多層海洋モデル及び③ これらを繋ぐ接続モデルは、以下のようである。

① は、非静力学モデルであり、連続方程式、Navier-Stokes 方程式及び濃度や温度の移流・拡散方程式を基礎方程式とする。これらの方程式は、差分法によって解く。その際に、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。また、空間的には、staggered メッシュを採用し、時間的には、水面変動及び圧力と、流速とを $\Delta t/2$ ずらして配置した leap-frog 法を用いる。

一方、② は、静力学モデルであり、鉛直方向を多層化し、各 level 層で水平方向の運動方程式及び移流・拡散方程式を解く。圧力を解かないということ以外は、① のモデルと同様の計算手法を用いる。

①、② の両者において、水面変動は、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、地形変化や構造物の形状を滑らかに捉えられるようにする。

* 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部

** 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
高潮津波研究室長

*** 理 修 (株)富士総合研究所 産業安全解析研究室
主事研究員

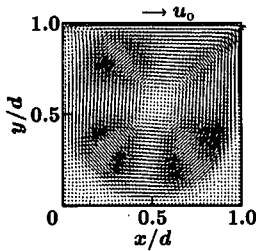
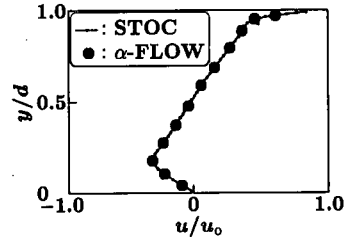


図-1 2次元正方 cavity 流れの流速ベクトル

図-2 $x/d=0.5$ における u の計算結果の比較

高潮計算における外力としては、台風による気圧低下及び強風を考慮し、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・Smylie (1971) による断層モデルを組み込んでいる。

そして、これら二つの領域を③によって繋ぐ。①の領域では、②の領域と比較して、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。メッシュ・サイズが異なる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、①と②の領域の overlap 領域を設け、この領域に接続モデルを適用する。①及び②の各領域の計算時に、③の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。

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 及び 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、多層領域及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。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、両モデルによる物理量や状態量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・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。

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、濃度及び温度であり、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。

本論文では、one-way の方法を用い、水位のみに補正係数を導入した結果について示す。具体的には、接続領域の各地点における、前の時間ステップの水位 η を次式によって補正する。

$$\eta = k\eta_{3D} + (1-k)\eta_{\text{level}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 η_{3D} 及び η_{level} は、それぞれ、3次元海洋モデル及び多層海洋モデルを用いて算出した水位である。接続領域内で補正係数 k を 0 から 1 まで遷移させて水位の重み付き平均をとることにより、メッシュ幅の異なる2領域の接続に起因する水位の発散を押さえ込み、流速や圧力等の計算を安定させる。

4. 3次元海洋モデルの検証

3次元海洋モデル及び多層海洋モデルについて、ベンチ・マーク・テスト等によって検証を行ない、水面形や流速分布の再現性を検討し、本モデルの妥当性を確かめた。ここでは、濃度及び温度は、全領域で一定値であると仮定し、変数として扱わない。図-1~4に、3次元海洋モデルの検証例を示す。図-1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。壁面及び底面において、no-slip としている。図-2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。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。

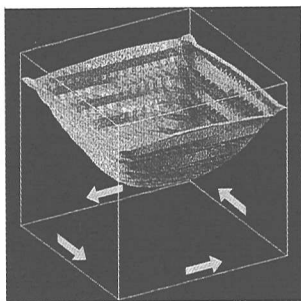


図-3 3次元回転渦の水面形の計算結果

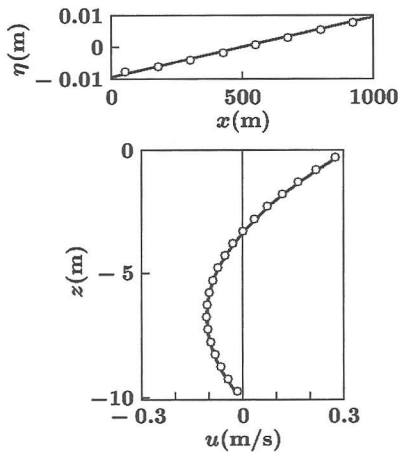


図-4 前後を鉛直壁で挟まれた領域における吹送流(○: 3次元海洋モデルによる計算値, —: 式(2), (3)による理論値)

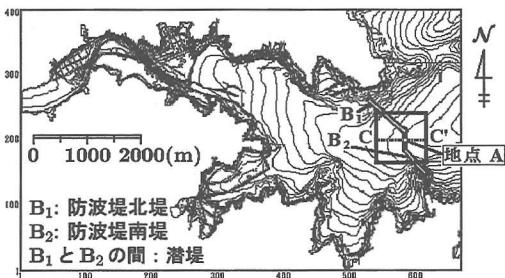


図-5 釜石港の湾口防波堤

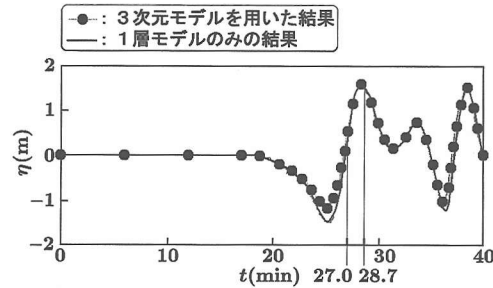


図-6 地点Aにおける水面変動

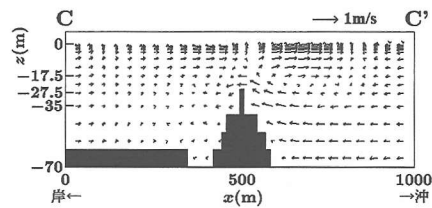


図-7 C-C'断面の流速ベクトル (t=27.0 min)

図-3に、直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。

また、図-4に、前後を鉛直壁で挟まれた、長さが1 km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 及び u は、それぞれ、水面変動及び $x=500$ 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 $U=20$ m/s、海面摩擦係数 $f_a=0.0026$ 、大気と海水の密度比 $\rho=1.2 \times 10^{-3}$ 及び鉛直方向の渦動粘性係数 $K_z=0.01$ m²/sを与えた。静水深は、 $h=10.1$ 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)。

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

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

図-4より、3次元海洋モデルは、水面勾配及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。

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、明治三陸津波を想定し、湾口防波堤を有する釜石港(図-5)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 及び B_2 が湾口防波堤であり、その間に潜堤がある。この湾口防波堤開口部周辺、すなわち、図-5の1辺1 kmの正方形枠内に3次元海洋モデルを適用する。そして、この各辺から10メッシュ内側までの領域を3次元海洋モデルと多層海洋モデルのoverlap領域とする。また、多層海洋モデルの層数は、簡単のために1層とする。

断層パラメタとして、断層長210 km、断層幅50 km、断層深さ1 km、すべり量12.5 m、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

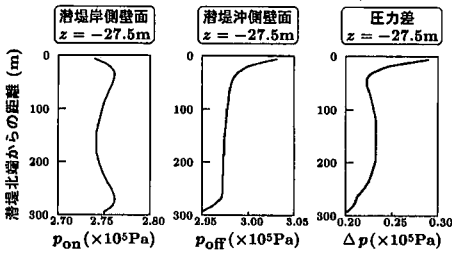


図-8 潜堤直立部の各壁面に働く圧力及び圧力差
($t=28.7$ min, $z=-27.5$ m; $\Delta p=p_{\text{off}}-p_{\text{on}}$)

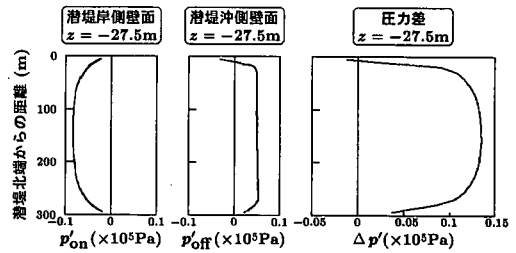


図-11 潜堤直立部の各壁面に働く動圧及び圧力差
($t=28.7$ min, $z=-27.5$ m; $\Delta p'=p'_{\text{off}}-p'_{\text{on}}$)

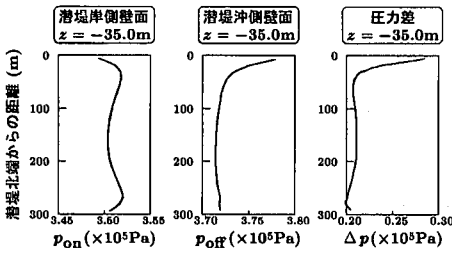


図-9 潜堤直立部の各壁面に働く圧力及び圧力差
($t=28.7$ min, $z=-35.0$ m; $\Delta p=p_{\text{off}}-p_{\text{on}}$)

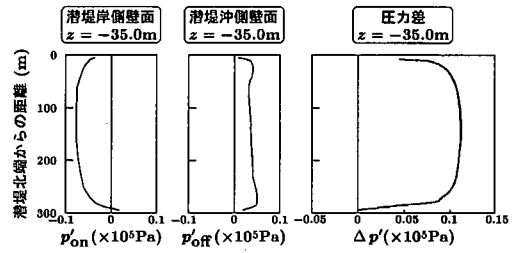


図-12 潜堤直立部の各壁面に働く動圧及び圧力差
($t=28.7$ min, $z=-35.0$ m; $\Delta p'=p'_{\text{off}}-p'_{\text{on}}$)

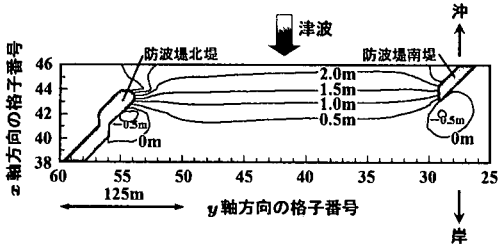


図-10 防波堤開口部周辺の水位分布 ($t=28.7$ min)

正係数を0.75とする。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12.5 mとし、鉛直方向に1~10 mの不等間隔とする。

海底及び構造物壁面でno-slipの条件を与えて計算を行なった。このときの潜堤中央部(図-5の地点A)での第1波における水面変動の計算結果を図-6に示す。

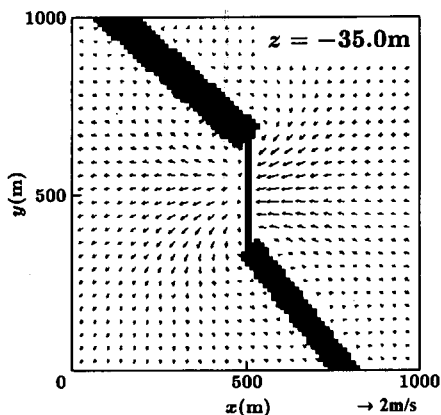
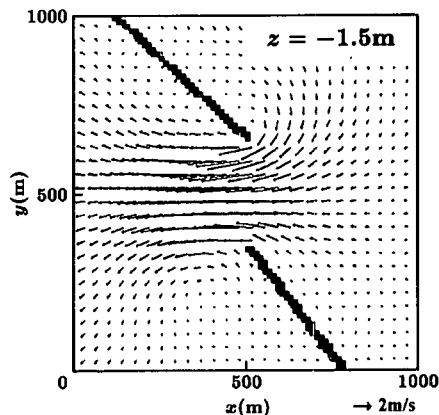
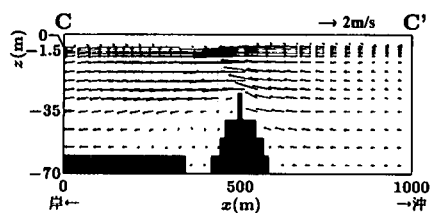
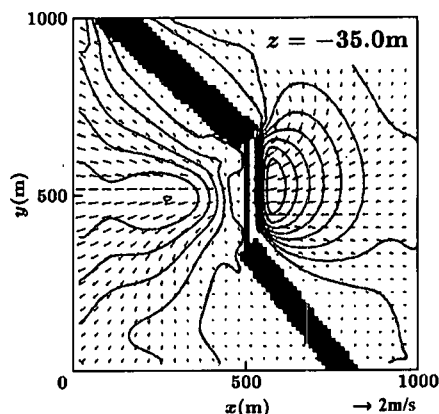
時刻 $t=27.0$ 分における図-5のC-C'断面内の流速ベクトルの計算結果を図-7に示す。第1波の引き波による流れが潜堤を乗り越えて上層に集中し、押し波による岸向きの流れがその下方に潜り込んでいる。このように、1層モデルで得られない流速の鉛直分布を再現することができる。

第1波の峰が潜堤上を通過する時刻は、 $t=28.4$ 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、 $t=28.7$ 分であった。この時刻 $t=28.7$ 分において潜堤直立部壁面に働く圧力を図-8及び9に示す。前者が $z=-27.5$ m、後者が $z=-35.0$ mにおける潜

堤壁面に沿った総圧の分布である。潜堤の岸側壁面及び沖側壁面のそれぞれに働く圧力 p_{on} 及び 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。同時刻の潜堤上の水位分布を図-10に示す。図-10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、これを図-8及び9の総圧から差し引くことにより、各位置における動圧の分布が図-11及び12のように得られる。潜堤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、潜堤岸側壁面に働く正の動圧は、 $z=-27.5$ mで潜堤端部付近を除いてほぼ一定であり、 $z=-35.0$ 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 $z=-27.5$ mの位置で 1.35×10^4 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。同時刻における流速ベクトルの計算結果の平面図を図-13に示す。双方の防波堤背後に海水が流れ込み、水平面内に大規模渦が形成されている。

また、時刻 $t=30$ 分における流速ベクトルを図-14~16に示す。ここで、図-16に示したコンター・ラインは、流速の大きさを表す。潜堤背後において鉛直面内の、また、防波堤背後において水平面内の海水循環が生じている。

なお、今回の計算では、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

図-13 流速ベクトル ($t=28.7$ min, $z=-35.0$ m)図-15 流速ベクトル ($t=30$ min, $z=-1.5$ m)図-14 C-C' 断面の流速ベクトル ($t=30$ min)図-16 流速ベクトル ($t=30$ min, $z=-35.0$ m)

り込む方法に関しては、今後の課題としたい。

6. 結 論

3次元海洋モデル、多層海洋モデル及びそれらを繋ぎ合わせる接続モデルから構成される、高潮・津波の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、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。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。なお、基礎方程式とし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流動モデルに拡張することも可能であろう。

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。また、株式会社富士総合研究所の島田昭男氏並びに荒木和博氏には、プログラム開発にあたり御協力を得ました。ここ

に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp. 244-246.
- 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ータ・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.
- 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.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440.