II-160　高潮の数値計算法に関する一考察

京都大学防災研究所　正員　○山下隆男
〃　〃　土屋義人
北海道開発局　〃　石井一生

1. 緒言　高潮・津波に関する数値計算は，大型計算機の普及に伴って，活発に研究が行われるようになり，種々の数値モデルや計算手法が開発されてきた。計算手法ではNavier-Stokesの方程式に基づいた基礎式を差分法あるいは有限要素法を直接適用する方法がほとんどであり，これらによってかなりの再現性が期待されることがわかってきた。著者らは数年来，高潮の数値予知法について，従来行われてきた単層モデル（1レベルモデル）を基準として，それを発展させた2レベルモデルおよび差分法と有限要素法とを結合させた有限要素-差分モデル（以下，FE-FDモデルとよぶ）を開発して予知精度の向上を模索してきた。ここでは，高潮の数値計算において解決されなければならない点および前述の3モデルによる伊勢湾および土佐湾における高潮の追算結果について考察する。

2. 高潮数値モデル　本研究で用いた数値モデルの基礎式は，以下のように要約される。

1) 1レベルモデル　鉛直方向に積分平均化した流速成分(U, V)および流量(M, N)を用いて，次のように表わされる。

$$\left.\begin{aligned}
&\partial M/\partial t+\partial(UM)/\partial x+\partial(VM)/\partial y=-g(h+\eta)(\partial\eta/\partial x+\partial p/\partial x)+fN+(\tau_{sx}-\tau_{bx})/\rho_w+\nu_H(\partial^2M/\partial x^2+\partial^2M/\partial y^2)\\
&\partial N/\partial t+\partial(UN)/\partial x+\partial(VN)/\partial y=-g(h+\eta)(\partial\eta/\partial y+\partial p/\partial y)-fM+(\tau_{sy}-\tau_{by})/\rho_w+\nu_H(\partial^2N/\partial x^2+\partial^2N/\partial y^2)\\
&\partial\eta/\partial t+\partial M/\partial x+\partial N/\partial y=0
\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

2) 2レベルモデル　レベル分割水深をh_iとして，境界面での流速成分を(u_i, v_i, w_i)とすると，上，下位層については，x方向の表示のみを示すと，以下のようである。

$$\left.\begin{aligned}
&\partial M_1/\partial t+\partial(U_1M_1)/\partial x+\partial(V_1M_1)/\partial y+u_iw_i=-g(\eta+h_i)(\partial\eta/\partial x+\partial p/\partial x)+fN_1+(\tau_{sx}-\tau_{ix})/\rho_w+\nu_H(\partial^2M_1/\partial x^2+\partial^2M_1/\partial y^2)\quad\text{上位層}\\
&\partial M_2/\partial t+\partial(U_2M_2)/\partial x+\partial(V_2M_2)/\partial y-u_iw_i=-g(h-h_i)(\partial\eta/\partial x+\partial p/\partial x)+fN_2+(\tau_{ix}-\tau_{bx})/\rho_w+\nu_H(\partial^2M_2/\partial x^2+\partial^2M_2/\partial y^2)\quad\text{下位層}\\
&\partial\eta/\partial t+\partial(M_1+M_2)/\partial x+\partial(N_1+N_2)/\partial y=0
\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

ここに，$M_1=(\eta+h_i)U_1=\int_{-\eta}^{h_i}u\,dz$，$M_2=(h-h_i)U_2=\int_{h_i}^{h}u\,dz$，$f$：Coriolis係数，$\tau_s$，$\tau_i$および$\tau_b$はそれぞれ，海面，境界面および海底におけるせん断応力，ν_H：水平渦動粘性係数であり，各せん断応力は，$\tau_s=\rho_aC_D\vec{W}|\vec{W}|$，$\tau_i=\rho_wf_i\vec{u}_i|\vec{u}_i|$，$\tau_b=\rho_wf_b\vec{U}|\vec{U}|$で表わされる。

3) FE-FDモデル　鉛直方向全水深$h+\eta$を3：4：3に比例分割し，各節点における流速成分$(\hat{u}_k, \hat{v}_k)$が残差がゼロとなるようにNavier-Stokes方程式を満足する解(u_k, v_k)を求め，次に鉛直方向に積分平均化した連続式（式(1)の第3式）によって水位変動ηを差分法で求める方法で，基礎方程式としては以下のような表示である。

$$\left.\begin{aligned}
&\mathcal{L}_x(\hat{u}_k,\hat{v}_k)=\partial\hat{u}_k/\partial t+\hat{u}_k\partial\hat{u}_k/\partial x+\hat{v}_k\partial\hat{u}_k/\partial y-f\hat{v}_k+g\partial\eta/\partial x-\nu_v\partial^2\hat{u}_k/\partial z^2,\quad \mathcal{L}_x(u_k,v_k)=0\\
&\partial\eta/\partial t+\partial M/\partial x+\partial N/\partial y=0
\end{aligned}\right\}\quad(3)$$

ここに，$M=\sum u_kl_k$，$N=\sum v_kl_k$，l_k：分割水深であり，各節点においてせん断応力は流速の勾配に比例するとして，$\tau_k=\nu_v(u_{k+1}-u_k)/l_k$で与えられ，特に海面においては，$\tau_0=\rho_aC_D\vec{W}|\vec{W}|$とする。

以上，3モデルにおいて決定すべき未知定数を整理すると，次のようである。

1レベルモデル：摩擦係数(C_D, f_b)，2レベルモデル：(C_D, f_i, f_b)，h_i/h，FE-FDモデル：(C_D, ν_v)

これらの未知定数の決定は，モデルの特性を左右する重要な要因ではあるが，それ以外にも検討しなければならない点として，高潮の外力である風域場の評価法と計算対象領域（海底地形，境界線）の的確な再現性が挙げられる。

3. 高潮の追算　以上のようなモデルの検討事項を考慮して，台風7010号による土佐湾の高潮および伊勢湾台風による伊勢湾・三河湾の高潮の追算を試みた。前者の高潮は，気象庁で行われた追算結果が，当時実測偏差の1/2程度であったことから高潮数値計算法への新たな問題を提起したと思われる。その要因としては，黒潮の影響が介入

したためか，あるいは波浪によるwave set-upが影響したものかが考えられる。一方，伊勢湾台風については，未曾有の災害をもたらし，わが国で初めて高潮の数値シミュレーションが適用された高潮であったにもかかわらず，その後の研究には進展がみられない。以下では，前述した未知定数を従来用いられているものと同様に与えた場合の両高潮の追算結果を示し，高潮数値計算法について若干の考察を行う。

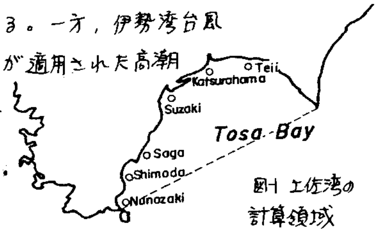
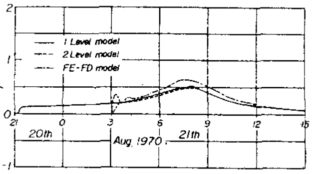
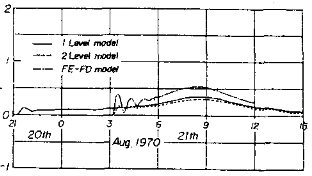


図-1 土佐湾の計算領域

1) 土佐湾の高潮計算　図-1に計算領域および図-2に布崎，桂浜における追算結果を示す。図から明らかなように，3モデルの結果ともに，従来と同様，佐賀町で観測された偏差235cmと比べるとかなり小さく，ほぼ1/4になっている。このように小さな偏差となった最大の要因としては，ΔX=3kmのあらいきざみ幅を用いたため，土佐湾の地形特性（水深1000m～数mまで）をモデルに十分再現されていない点が考えられる。すなわち，沿岸の水位点（観測点に対応）での平均水深が20～50mとなるため，数値計算においては吹き寄せ効果が過小評価されていると考えられる。このために，このような領域における高潮の正確な追算には，沿岸付近の地形特性をさらに細く再現する狭領域の設定と，広領域との結合計算が必要であろう。



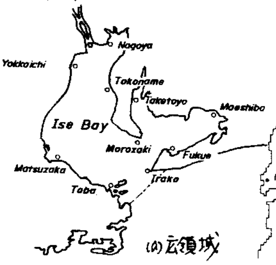
(a) 布崎



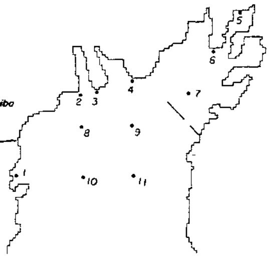
(b) 桂浜

図2 土佐湾での追算結果

2) 伊勢湾の高潮追算　伊勢湾においては，図-3および4に示すように，空間きざみΔX=1kmおよびΔX=250mの広領域と狭領域との分割を行った。狭領域は常滑以北を対象として，河口および名古屋湾の地形特性が十分に再現されるよう考慮してある。なお，地形は昭和39年当時のものを用いてあり，高潮防波堤および南2，3区の埋立てが行われている点で，伊勢湾台風時のものとは若干異っている。計算は計算時間の都合上，1レベルモデルだけを対象とし，広領域で18hr，狭領域では4hr分の計算を行った。図-4，5および6に計算結果の一例を示す。これらの図から明らかなように，狭領域における計算結果は，広領域のそれ（図-4に常滑と四日市の結果が示されている）よりはかなり大きくなっており，名古屋港（図-3(b)のポイント5）では，○-○-○で示した実測偏差にほぼ対応している。また，流況からみた特長のひとつとしては，高潮時に伊勢湾と三河湾との海水交流がほとんど無い点が挙げられる。

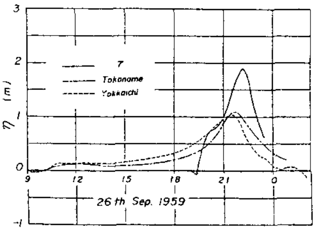


(a) 広領域

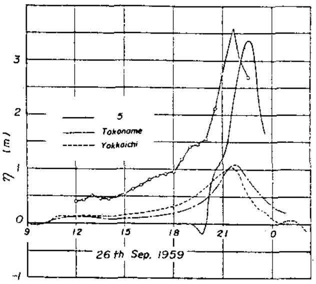


(b) 狭領域

図-3 伊勢湾の計算領域



(a) ポイント7



(b) ポイント5（名古屋港）

○-○-○ 実測値

図-4 伊勢湾での追算結果

4. 結語　伊勢湾における追算結果にみられるように，領域の細分化によって1レベルモデルにおいても，高潮の数値計算精度を向上させることができることが明らかになった。今後はこの方法を土佐湾における7010号に適用していくとともに，各数値モデルにおける未知定数の決定を行うことにより，モデルの特性を明確にして，より高精度の高潮数値シミュレーションモデルを確立することが可能であると考えられる。

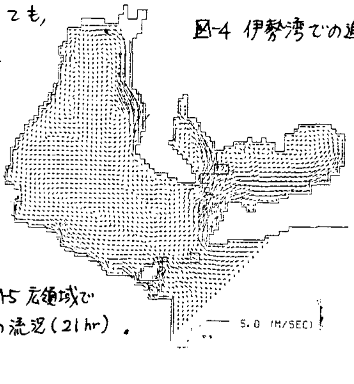


図-5 広領域での流況（21hr）

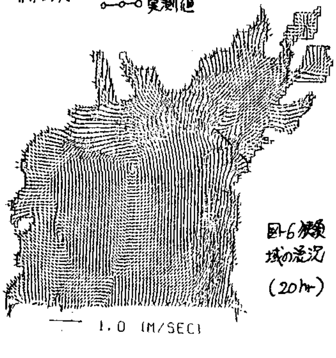


図-6 狭領域の流況（20hr）