

高潮解析における数値解析モデルおよびその境界条件の検討

Study of Numerical Simulation Model of Storm Surges and its boundary condition

武田 誠*・井上和也**・上塚哲彦***・松村貴義***

By Makoto TAKEDA, Kazuya INOUE, Tetsuhiko UETSUKA and Takayoshi MATSUMURA

Storm surges are the significant natural disasters in urban bay area. In devising the countermeasures of them, the phenomena should be estimated precisely. We have developed the numerical simulation model of storm surges and examined their various effects by the model. In this paper, the boundary conditions of the simulation model are studied. First, model values and observed ones of wind and open boundary are compared and their effects to computational results are examined. Second, treatments of open boundary condition are investigated. The new boundary condition considering Non-Reflection is presented and its validity is discussed.

Keywords: storm surges, numerical simulation model, boundary condition

1. はじめに

湾域部に隣接している都市では、高潮災害に対する防災対策の重要度はきわめて高い。実際、本研究で対象とする大阪湾域部でも、過去幾度となく高潮災害を被っており、高潮対策は都市防災の上で大きい位置を占めている。このような沿岸都市では、さまざまな高潮対策が講じられてはいるが、懸念される地球温暖化の影響把握や都市災害での危機管理という見方に立てば、ハード的な対策のみならず、高潮発生時のソフト的な対策もさらに検討しておくことが必要である。

著者らは、都市域に与える高潮の影響評価を研究のテーマとして定めている。上記の課題の水理的基礎は、高潮の定量的な評価をより高めることであり、そのためには高潮現象をより適切に解析しうる数値モデルの構築が欠かせない。現在までに、2次元あるいは3次元モデルの特性に関する検討や、開境界条件および外力の取り扱いについて研究を進めている¹⁾。そのうち本報では、高潮の数値解析モデルを検討し、とくに開境界条件の取り扱いと、今後解決すべき問題点を考察する。

2. 支配方程式及び離散化手法

解析に用いる支配方程式には、以下に示す連続式と運動方程式を考える。ただし、用いられた支配方程式は、水平方向の長さのスケールが水深方向のそれよりもはるかに大きい領域を対象としているので、長波近似を適用し浅水方程式に変換している。

* 学生員 工修 京都大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒606 京都市左京区吉田本町)
** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611 宇治市五ヶ庄)
*** 学生員 京都大学大学院 (〒606 京都市左京区吉田本町)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} + fN \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial P_0}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w} - fM \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 t : 時間、 x, y : 水平面内の直交座標、 u, v : x, y 方向の流速、 h : 水深、 M, N : x, y 方向の流量フラックス($M=uh, N=vh$)、 H : 水位、 g : 重力加速度、 P_0 : 気圧、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: x, y 方向の渦動粘性係数、 ρ_w : 海水の密度、 f : コリオリのパラメータである。また、 τ_{sx}, τ_{sy} : 自由水面上でのせん断応力の x, y 方向成分、 τ_{bx}, τ_{by} : 海底面でのせん断応力の x, y 方向成分であり、自由水面上でのせん断応力には、一般に用いられている次式を使用する。

$$\tau_{sx} = \rho_a \gamma^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad \tau_{sy} = \rho_a \gamma^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (4)$$

ここに、 ρ_a : 空気の密度、 γ^2 : 自由水面上での抵抗係数、 W_x, W_y : 自由水面上10mでの x, y 方向の風速である。また、海底面でのせん断応力は、高潮のように自由水面上に大きなせん断応力が作用する場合、次式²⁾が用いられる。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - k \tau_{sx}, \quad \tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} - k \tau_{sy} \quad (5)$$

ここに、 n : マニングの粗度係数、 k : 定数であって、 $k=0.25$ としている。

これらの方程式を離散化し、数値モデルを構成する。本報では、従属変数をstaggeredに配置し、差分法の陽的解法であるLeap-Frog法を適用した。時間項には前進差分、移流項には一次精度の風上差分、他の項には中央差分を用いている。

3. 高潮に与える境界条件の影響

ここでは、高潮解析に用いられる開境界条件と外力である風速場について検討を行った。計算領域は、図-1に示す大阪湾を囲む領域である。ここで、 x 軸正方向を東方、 y 軸正方向を北方とする。領域は、 $\Delta x=1145\text{m}$ 、 $\Delta y=922.5\text{m}$ の格子で分割し、 Δt は10秒である。海底地盤高には海上保安庁発行の海図から読みとった値を用いた。また、解析に用いた諸量は、 $f=8.34 \times 10^{-5}(\text{1/sec})$ 、 $\rho_w=1030(\text{kg/m}^3)$ 、 $\gamma^2=2.6 \times 10^{-3}$ 、 $\rho_a=1.293(\text{kg/m}^3)$ とする。さらに、海底面でのマニングの粗度係数を $n=0.02$ 、渦動粘性係数を $\varepsilon_x, \varepsilon_y=200(\text{m}^2/\text{sec})$ とし、平常時の気圧場として1010hPaを想定した。

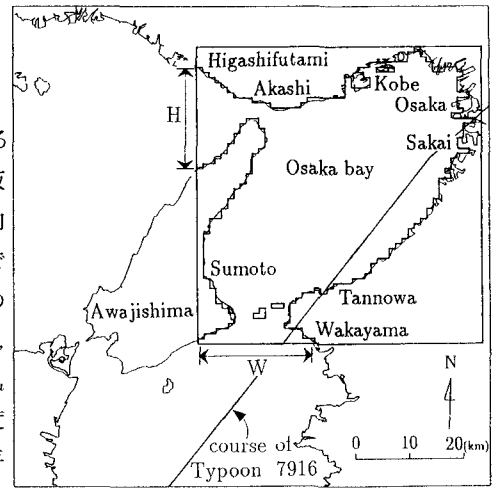


図-1 計算領域

3.1 計算条件

本報では、台風7916号を対象に研究を進めることとし、1979年9月27日0時から同年10月1日7時までを計算時間と設定した。なお、台風7916号は、過去に大阪湾域部に被害を与えた台風のうち比較的最近のもので、各種のデータも著者らの手元に揃っていることから、ここでの対象台風とした。

高潮解析に用いられる条件には、開境界で課せられる境界条件と風速場及び気圧場という外力条件が考えられる。本章では、境界条件である開境界での潮位及び外力条件である風速を取り上げることとし、それぞれにモデル値と実測値を適用することにより、境界・外力条件設定の問題点を考察する。なお、気圧場に関しては、気圧分布が同心円状であるとしたSchloemerの式を適用する。

(a) 開境界条件

モデル潮位 9分潮(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 , Q_1 , P_1 , S_n)より成る潮汐値に、次式で表される台風による水位上昇量を加えて、開境界潮位とする。

$$\Delta h_p = 0.991 \Delta p \quad \Delta h_w = \alpha \Delta h_p \quad (6)$$

ただし、 $\Delta p(\text{hPa})$: 気圧低下量、 $\Delta h_p(\text{cm})$: 気圧低下の吸い上げによる潮位上昇量、 $\Delta h_w(\text{cm})$: 吹き寄せによる上昇量で、 α は定数(Nakatsujiら³⁾と同様に1.0とする)である。

実測潮位 東二見及び和歌山の検潮所で得られた実測潮位を、図1のそれぞれH線及びW線上で与える。ただし、東二見の潮位値には、1979年9月29日の4時から9時まで欠測が含まれるので、この間は線形的な補間を行っている。

和歌山及び東二見におけるモデル潮位と実測潮位を比較したのが図-2である。モデル潮位は実測潮位を比較的好く表してはいるが、最大潮位はやや小さくなっている。これは、モデル潮位における吹き寄せ及び吸い上げ効果の見積りが不十分であり、たとえば開境界周辺における地形の影響などが十分に取入れられていないためと考えられる。

(b) 風速場の条件

モデル風 藤井・光田の台風モデル⁴⁾を用いる。

実測風 大阪湾を囲む13の観測地点より、山口ら⁵⁾の方法に従い実測風の補間を行った。ただし、紙面の都合上詳細^{5),1)}は省略する。

図-3は台風モデルによる風速分布と、実測風を補間して求められた風速分布とを比較したものである。本図より、大阪湾においては、台風の最接近時、実測風による風速の方が、台風モデルによる風速より小さく、台風モデルは風速を過大に評価する傾向にあることが分かる。また、台風が大阪湾を通過した直後からは、逆に、実測風による風速の方が台風モデルによる風速よりも大きくなっている。これは、実測風には、大阪湾の長軸方向に卓越する風や明石海峡を通過して湾内に至る方向に卓越する風など、地形の影響により発生する風が含まれているのに対し、台風モデルでは地形や局所的な気象擾乱の影響が表現できないからと考えられる。

3.2 解析結果及び考察

境界・外力条件に関する検討では、表-1に示す組み合わせのもとに解析を行った。図-4に潮位の時間変化を示す。まず、潮位の時間的変化をみると、明石や洲本といった開境界に近い箇所では、実測潮位を用いた場

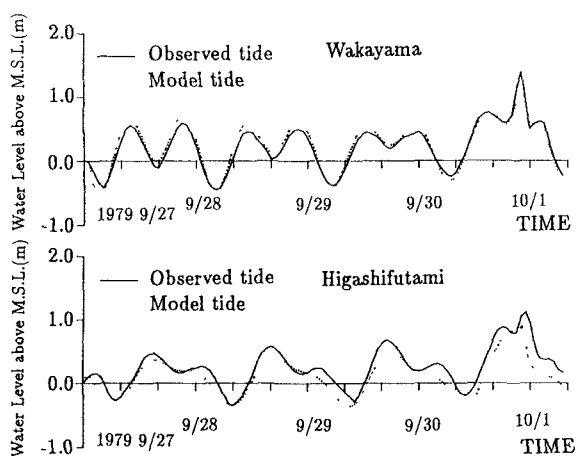


図-2 開境界における潮位図

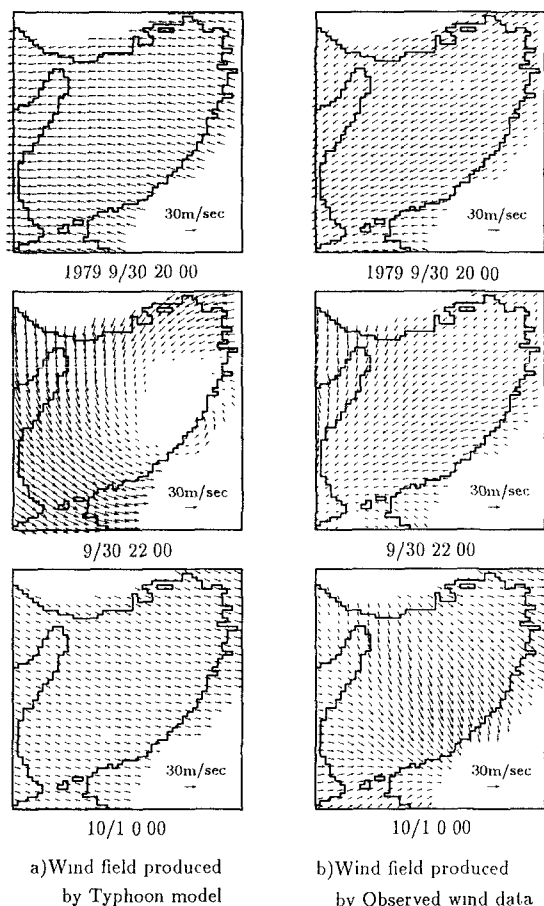


図-3 風速ベクトル図

合の方が、最高潮位、最低潮位とも観測値に比較的近い結果を示すのに対し、湾奥部の大阪では、開境界にモデル潮位を用いた場合の方が観測値に比較的近い結果を示している。その要因として、次の事柄が考えられる。まず、明石や洲本周辺の海域では、比較的湾口に近いため開境界条件の影響が支配的であり、これらの海域では地形からみて海水の収束や発散は生じていないと考えられる。一方、湾奥部に位置する大阪では、

地形的に海水の収束が発生し、潮位が高くなると考えられる。しかし、このような収束は、実際にも、また数値解析にも同様に現れるはずであり、図-4にみられる差異の要因とは必ずしも言えない。つまり、湾奥部の地形性の収束を考えるには、湾奥部の港湾や埋め立てなどの複雑な地形を的確に表現することが必要であり、この点からみると今回解析に用いられたメッシュ幅では地形が十分に表現できなかったと考えられる。また、別の要因として、開境界ではいずれの場合にも横断方向に一律な潮位を与えていることが挙げられる。すなわち、台風接近時には吹き寄せの効果に地形が影響するので、開境界線上に位置する港内の検潮所と港外とでは、潮位は同一とはならず、港内検潮所での潮位の方が高くなっていると考えられる。つまり、検潮所の潮位を開境界に一律に与えることは、開境界潮位を過大に与えることになると思われる。

風速場の影響については、全般的に実測風を用いた場合の方が、モデル風を用いた場合より小さな最大潮位をとり、比較的観測潮位に近い結果を与えることがうかがえる。また、モデル風を用いた場合には、潮位の時間的変動が激しく現れている。これは、図-3からも推察されるように、モデル風による風速場の時間的な変化は、実測風のそれに比べ激しいことから生じたものと考えられる。さらに、湾奥部（大阪）では、風速場を変化させたときの差異がかなり現れている。これは、海域の流動特性（収束の発生）に起因すると思われる、海域地形が高潮潮位の局所的な現れ方に大きな役割を担っていると考えられる。

4. 開境界条件設定に関する検討

4.1 開境界条件の取り扱い

高潮解析の目的は主に高潮予測にある。そのため、高潮予測に用いられる開境界での推算潮位や外力としての台風モデルは重要な役割を担う。しかし、上述したように、開境界条件や外力としての風速場の設定方法は、必ずしも確立されているとはいえず、未だ解決されていない問題が残されている。ここでは、その中で開境界条件の取り扱い法を考えることにし、日野・仲座⁶⁾の方法を応用して、開境界を数値解析的に検討する。平均海面を基準に、 η : 潮位、 η_t : 潮汐位、 η_s : 気圧減少に伴う吸い上げに相当する潮位、 η_w : 外洋からの吹き寄せによる潮位、 η_r : η_s と η_w の反射によって生ずる潮位、 η_{nr} : 数値解析上の開境界の取り扱いより生ずる反射に伴う疑似潮位と定義すると、高潮解析時の水位は次のように表される。

$$\eta = \eta_t + \eta_s + \eta_w + \eta_r + \eta_{nr} \quad (7)$$

数値解析的には、擬似的な η_{nr} が含まれないように開境界値を設定する必要がある。しかし、一般に高潮解析

表-1 ケース設定

CASE	TIDE	WIND
I	Observed tide	Observed wind
II	Observed tide	Model wind
III	Model tide	Model wind
IV	Model tide	Observed wind

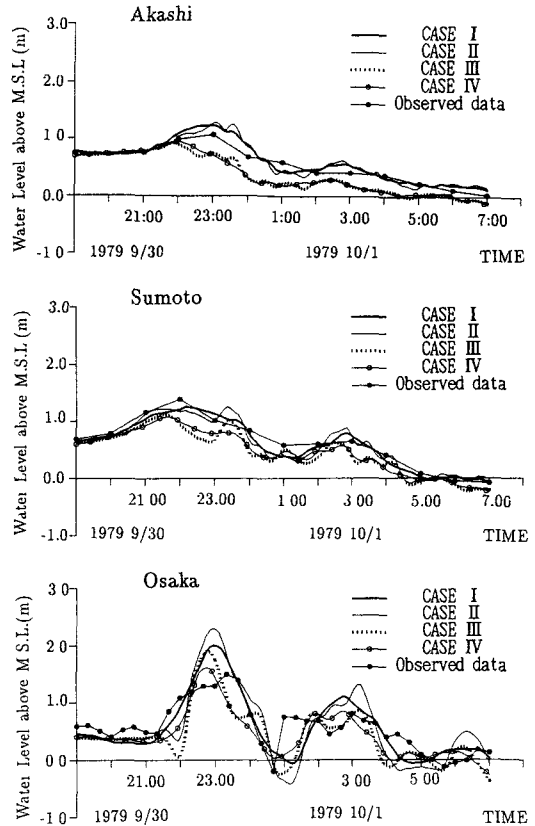


図-4 潮位図

で使用される開境界条件は、 $\eta = \eta_t + \eta_s$ もしくは $\eta = \eta_t + \eta_s + \eta_w$ であるから、前者の場合には $\eta_w + \eta_r + \eta_{nr} = 0$ が、後者の場合には $\eta_t + \eta_{nr} = 0$ が開境界で暗黙の条件として課せられていることになる。しかし、実際には領域内に進入した高潮が湾奥に到り、ここで反射して再び開境界に達したとき、この反射してきた高潮は領域外へ透過する。このような過程を数値解析的に表すには、上記の暗黙の条件を除去しなければならない。つまり、 $\eta_{nr}=0$ とするような開境界の取り扱いが望まれる。いま、 η_t 、 η_s などに用いられるデータの性質について考える。推算天文潮である η_t は過去の観測より推算される量であり、開境界でそのまま用いられる。 η_s や η_w は台風の影響により発生する潮位であり、領域内へ入射する潮位として取り扱われるべき量である。 η_r は、 η_s 及び η_w による潮位が陸で反射して開境界に到ったときの潮位である。このように η_t と η_s 、 η_w 、 η_r とは、物理的性質が異なるので、数値解析上異なる取り扱いが必要であろう。そこで、次のような高潮解析の手順を試みる。(図-5参照)

計算1：潮汐を考えず台風のみを対象に解析を進める。開境界条件には η_s のみを与え、 η_r を評価できるように、日野・仲座の無反射境界条件を適用する。風速及び気圧場は台風モデルより求める。これらから、開境界部における時間的な水位変動(η_1)を求める。

計算2：次に、解析に潮汐を含め、開境界条件には推算天文潮(η_t)と計算1の結果(η_1)との合算値($\eta_t + \eta_1$)を与える。風速及び気圧場は計算1と同様である。このようにして、最終的な高潮解析を行う。

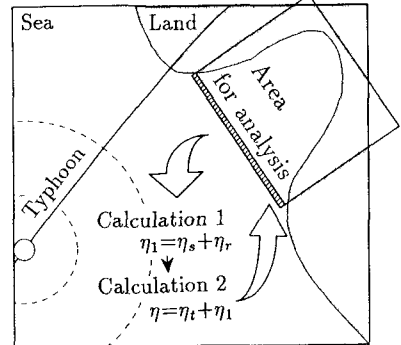


図-5 解析モデルの概念図

計算1では高潮偏差だけが対象とされている。しかし、都市における高潮氾濫までを考えるとときには、検潮所における偏差だけではなく沿岸部の潮位そのものの平面的な分布も必要とされる。このためには、計算2が必要となる。上記の手法では計算量の増加というデメリットはあるものの、 η_{nr} の影響が除去できているので、上記の意味で適切な境界条件のもとでの解析が可能となる。

4.2 従来モデルとの比較検討

上述した解析手法の妥当性を検証するため、大阪湾を対象に無反射境界条件を使わない従来の方法との比較を行う。用いた支配方程式は2章のとおりであり、台風の場合は藤井・光田のモデルを用いている。計算領域は図-6に示す領域で、 $\Delta x=1431.25\text{m}$ 、 $\Delta y=1153.125\text{m}$ 、 $\Delta t=6\text{秒}$ とし、対象とする台風には、台風7916を用いた。また、各諸量は前述のとおりであり、渦動粘性係数には $100\text{m}^2/\text{sec}$ を用いた。解析には以下の3ケースを設定した。上述した解析手法をCase A、従来の方法において、開境界条件に推算天文潮と台風の効果による水位上昇量(6式)を加えた潮位を与えるが、 $\alpha=0$ の場合をCase B、 $\alpha=1$ の場合をCase Cとした。

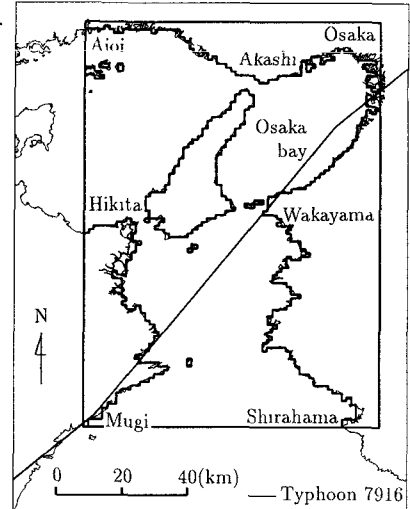


図-6 計算領域

4.3 解析結果及び考察

図-7に潮位の時間変化を示す。本図より前駆部(forerunner)及び主要部(storm surge)では、Case Bとその他のケースとの差が顕著に現れている。すなわち、前駆部についてはCase A, Cが観測値に近い値を示しているのに対し、主要部については湾奥部ではCase Bが、湾口部ではCase A, Cが観測値に近い値を示している。これは、開境界において、Case Aでは反射波を考慮していることより、また、Case Cでは強制的に吹き寄せの効果を与えたため、潮位が高めに与えられたからであろう。そのため、開境界条件が外力である風速より支配的である前駆部では、Case A, Cの方が観測値をよりよく表せている。また、風速の影響が大きくな

る主要部においてでさえも、開境界条件が支配的である湾口部ではCase A, Cの方が観測値をよく表す。一方、湾奥部（大阪）ではいずれのCaseでも潮位は過大評価されている。これは、3章で述べたように、台風モデルによる影響が強く現れているからであろう。このように、前駆部や主要部については、吹き寄せを考えても、反射を考えても潮位の再現性には大差はない。しかし、揺戻し部（resurgence）では、それぞれのケースにおいて特徴的な差異が現れている。とくに湾口部では、Case Aと、Case BやCとの差が明瞭にみられ、波形では、Case Aの方が観測値をよく表しているといえる。これは、Case BやCでは、開境界条件の設定法により数値的な反射が生じているのに対し、Case Aでは反射してきた高潮を透過させることにより数値的な反射が抑えられているからであろう。これらのことから、高潮の全過程を考えると、物理的にみてより自然な境界条件が与えられる本研究での解析手順が有効なことが知られる。

5. おわりに

これまでの検討を要約すると以下のようなものである。

(1) 実測値との比較によりモデル潮位及びモデル風の特徴を明らかにした。そして、本解析においては、湾口部ではモデル潮位の影響により潮位を過小評価し、湾奥部ではモデル風の影響により潮位変動が大きくなることを示した。

(2) 開境界条件について反射を考慮した取り扱い方を考察し、無反射境界条件を用いて物理的意義が明瞭な高潮の解析法を導き、その有用性を検証した。

本報4章で提示した高潮解析法では、設定された開境界条件に計算領域内の流体運動がフィードバックされる。このことは、開境界条件の設定にも気圧場及び風速場が影響を及ぼすことを示している。これから、適切な台風モデルの構築なくしては、開境界条件の設定も難しいといえる。つまり、2あるいは3次元的なモデル化や数値解析上の精度向上などのより詳細な問題を除くと、本解析手法を用いることにより、高潮解析の主要な課題は、外力となる台風を適切に取り扱うことであろう。

今後は、様々な台風を用いて検討を進め、本解析モデルの普遍性を検討するとともに、高潮が都市域

に侵入した場合を考え、氾濫水の挙動を含めた解析により、その影響や氾濫防御策について考察を進めたい。

参 考 文 献

- 1) 武田誠・井上和也・中川一・松村貴義：レベルモデルを用いた高潮解析－2次元モデルとの比較－，京都大学防災研究所年報，第38号B-2，1995（印刷中）
- 2) 岩垣雄一・榎本亨：海岸工学，共立出版，p.224，1982.
- 3) Nakatsuji K., S.Watanabe, H.Kurita and N.Yamane: Greenhouse effects on storm surges: A case study at Osaka bay, Japan, Proceedings of XXV Congress of International Association for Hydraulic Research, Vol. IV, pp 56-63, 1993
- 4) 藤井健・光田寧：台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション，京都大学防災研究所年報，第29号B-1，pp 229-239，1986.
- 5) 山口正隆・渡辺健・畑田佳男：大阪湾における海上風の平面分布特性について，第28回海岸工学論文集，pp 168-172，1981.
- 6) 日野幹雄・仲座栄三：水理境界における新しい“無反射境界”の数値的検討，東京工業大学土木工学科研究報告，No.38，1987.

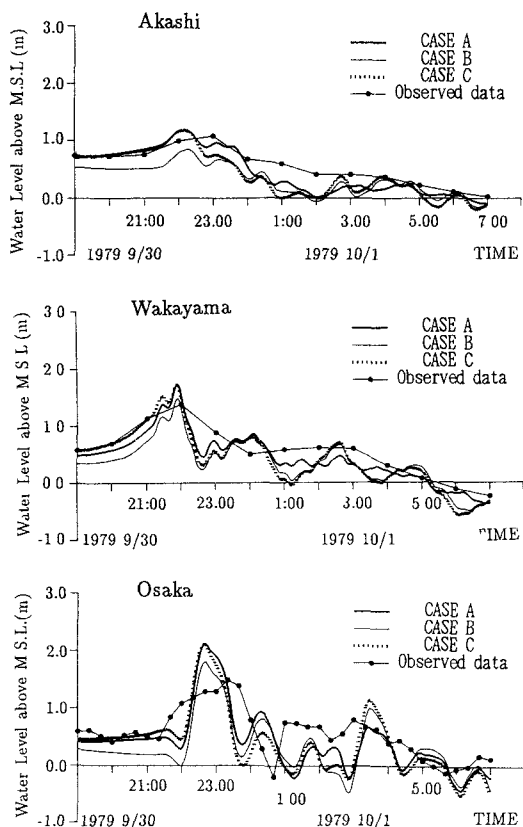


図-7 潮位図