

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1085

September 2004

台風による内湾の高潮のリアルタイム予測に関する基礎的検討

河合 弘泰

富田 孝史

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan



## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	4
2. 高潮のリアルタイム予測の必要性と検討課題 .....	4
2.1 高潮のリアルタイム予測の必要性 .....	4
2.2 高潮のリアルタイム予測の試行 .....	5
2.3 高潮のリアルタイム予測における検討課題 .....	6
3. 高潮予測の方法 .....	6
3.1 観測値に基づく経験式 .....	6
3.2 台風モデルによる気圧・風の推算方法 .....	6
3.3 長波方程式を差分化した流れの数値計算モデル .....	7
4. 大阪湾周辺における高潮の予測精度の検討 .....	8
4.1 対象とする台風と高潮の計算方法 .....	8
4.2 経験式と数値計算モデルによる予測値の精度 .....	9
4.3 数値計算モデルで必要とされる計算条件 .....	11
5. 東京湾における高潮の予測精度の検討 .....	15
5.1 対象とする台風と高潮の計算方法 .....	15
5.2 経験式と数値計算モデルによる予測値の精度 .....	16
5.3 数値計算モデルで必要とされる計算条件 .....	19
6. 今後の検討課題 .....	20
6.1 台風の最大風速半径 .....	20
6.2 演算時間の短縮 .....	22
6.3 リアルタイム浸水予測システムへの発展 .....	23
7. 結論 .....	23
8. あとがき .....	23
謝辞 .....	23
参考文献 .....	23
付録 .....	24

# **Fundamental Study on Real-time Prediction of Typhoon-caused Storm Surges in Nearly Closed Bays**

**Hiroyasu KAWAI\***  
**Takashi TOMITA\*\***

## **Synopsis**

Real-time prediction of the storm surge at each port and coast is essential to mitigate coastal disasters. The storm surge can be computed in a few hours or less with a numerical model based on long wave approximation using an ordinary personal computer, while the maximum storm surge can be quickly calculated with a simple empirical equation based on past storm records. In this paper, the storm surges at major points in the east Seto Inner Sea, including Osaka Bay, and Tokyo Bay are predicted using both methods, and their results are compared with measured values. The results show that the magnitude of the storm surge predicted by the empirical equation is sometimes larger than the measured value and the time of the peak is sometimes earlier by a few hours. For more precise computation of the storm surge, the spatial grid interval for the numerical model should be around 1.8km for the major points on the coast of Osaka Bay, 0.6km or less for the central Seto Inner Sea, and around 0.6km for Tokyo Bay. For these bays, the run of a typhoon should be started from the south from the north latitude of 31 deg for more accurate storm surge prediction.

**Key Words:** storm surge, numerical model, empirical equation, real-time prediction

---

\* Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department

\*\* Head, Storm Surge and Tsunami Division, Marine Environment and Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5052 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:kawai@pari.go.jp

# 台風による内湾の高潮のリアルタイム予測に関する 基礎的検討

河合 弘泰\*  
富田 孝史\*\*

## 要 旨

個々の港湾・海岸に発生する高潮をリアルタイムに予測することは海岸災害の低減に必要である。高潮予測にはまず、既往の台風の記録に基づく簡単な経験式で最大潮位偏差を求める方法がある。その一方で、数値計算モデルを計算する方法もあり、普及型のパソコンで1～2時間以内に計算できるようになりつつある。本研究では、大阪湾など瀬戸内海東部と東京湾の代表的な地点について、両方の方法で高潮を推算し、その結果を観測値と比較した。その結果、台風モデルによる気圧や風を用いた経験式では、高潮偏差の最大値を大きく、その起時を早く評価する場合のあることが分かった。また、正確な計算をするためには、計算格子間隔を大阪湾でおおむね 1.8km 以下、東京湾ではおおむね 0.6km 以下、瀬戸内海の中央部では 0.6km かそれ以下にする必要がある。また、高潮計算の最初の段階では、気圧低下や風のない初期状態から徐々に実際の値に近づけていく操作をするが、この立ち上げの操作は台風がおおむね北緯 31deg に達するまでに終える。

キーワード：高潮，数値計算モデル，経験式，リアルタイム予測

---

\* 海洋・水工部主任研究官（防災評価担当）

\*\* 海洋・水工部高潮津波研究室長

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬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:kawai@pari.go.jp

## 1. まえがき

護岸や堤防など港湾・海岸にある防護施設は、設計潮位や設計波浪に対して、施設自体が破壊せず、背後地への越波量が許容値以下となるように設計されている。ところが、設計潮位を上回る潮位が発生することも稀にあり、これら防護施設だけでその背後地を高潮から完全に守ることは不可能である。また、特に港湾域においては、防潮堤などで構成される防護ラインの外側(海側)にも、物流施設などが展開されつつある。したがって、台風接近時に各港湾・海岸においてこれから発生する高潮の最大偏差やその起時を、リアルタイムにかつ正確に予測できれば、その情報は浸水対策や避難の実施において非常に有益なものになる。気象庁ではこれまでも、全国視野で高潮予測を実施し、東京湾、大阪湾といった海域単位で高潮予報を出してきたが、地域に密着したきめ細かな防災に生かすためには、各港湾・海岸といったさらに小単位の高潮予測が必要となる。

高潮予測の方法にはまず、既往の観測値に基づいた経験式(例えば、気象庁, 2003)を用いる方法がある。気象庁の台風進路予想情報とこの経験式を結合させた、高潮予測システムを既に導入しているところもある(額田ら, 2003)。その一方で、流れの運動方程式を数値計算モデルによって解く方法もあり、気象庁の現業にも導入されている(楢垣, 2001)。パソコンで数値計算モデルを解くシステムもいくつか提案されており(山口ら, 1995; 中平ら, 2003)、数値計算モデルの種類や計算の対象範囲などにもよるが、現在の普及型パソコンであっても1~2時間で予測が可能になりつつある。コンピュータの演算速度の向上によって今後数年のうちに、数値計算モデルによる高潮予測が主流になると思われる。しかしながら、経験式と数値計算モデルによる予測値の比較や、数値計算モデルの計算条件が予測値に及ぼす影響については、必ずしも十分に整理がなされていない。

以上の背景を踏まえ、本研究ではまず、台風接近時にパソコンで数値計算モデルによる高潮予測を試み、解決すべき課題を整理した(2章)。次に、これらの課題に応えるべく、経験式や数値計算モデルによる高潮の予測精度を明らかにした(4~5章)。具体的には、大阪湾と東京湾の周辺に来襲したいくつかの台風を例として両方法により高潮を計算し、その結果を観測値と比較した。また、数値計算モデルでは、空間的な格子間隔や計算開始時の台風の緯度によっても計算結果に差が出ることもあるため、これら計算条件の影響も検討した。そして最後に、高潮予測に残された検討課題をまとめた(6章)。

なお、実際の高潮予測では、まず台風の進路予想に誤差があり、これに高潮計算の誤差が積み重なって、高潮予測値の誤差になるが、本研究では高潮計算の誤差に絞って議論することにした。そのため、4~5章における高潮計算の入力条件には、既往台風の確定した経路や中心気圧を用いた。ただし、台風の進路予想の誤差が高潮の予測値に及ぼす影響についても若干検討を加えた。

## 2. 高潮のリアルタイム予測の必要性と検討課題

### 2.1 高潮のリアルタイム予測の必要性

護岸や堤防などの防御施設は、設計潮位と設計波浪に対して十分な安全性があるように設計されている。この設計潮位は一般に、

- ①過去数十年間に観測された最高潮位、
- ②伊勢湾台風またはその地方に被害を及ぼした代表的な台風による高潮偏差、

をもとに定めたものであるため、確率的には稀であるが、この潮位を上回る潮位が発生することもある。例えば最近では、1999年に台風9918号が八代海(不知火海)や周防灘に顕著な高潮を満潮と重なる時間帯に発生させ、潮位が設計潮位を超えたところもある。写真-2.1は堤防を越流した高潮による被害の例であり、この周辺では12名が溺死した(河合ら, 2000)。この災害は「護岸や堤防などハードの対策だけでは高潮災害を完全に防ぐことはできない」という教訓を示している。また、港湾域では沖合に埋立地が造成され、防潮堤などで構成される既往の防護ラインの外側にも、物流施設などが展開されつつある。これらの施設は、防護施設の設計潮位より低い潮位でも、浸水する可能性がある。



写真-2.1 設計潮位を超える潮位による浸水

このような浸水で少なくとも人命は失われぬように、また資産の損失も最小限に食い止めるためには、水門の閉鎖、土嚢の積み上げ、避難など事前に対策を講じる必要がある。それを適切な判断とタイミングで実施するには、各港湾・海岸で発生する高潮偏差の最大値やその起時のリアルタイムかつ正確な予測が必須である。

気象庁ではこれまでも全国を視野に入れて高潮予測を実施してきた。具体的には、高潮偏差を数値計算モデル(平面的な格子間隔は約1.8km)、天文潮位を潮汐調和定数から計算し、これらを足し合わせた潮位があらかじめ定めた基準潮位を上回り、災害に至ると予想される場合には、高潮警報・注意報が発表される。例えば、東京湾ではTP.+3.0m、TP.+2.0mがそれぞれ高潮警報、注意報の基準潮位になっている(東京湾のH.W.L.はTP.+0.9m)。また、気象庁以外に経験式によって高潮予測を実施している機関もあるが、その予測地点は限られている。ところが、高潮偏差の最大値やその起時は、湾内の場所によって異なり、湾内のごく限られた地点の値だけをもって湾全体を代表させることは困難である。高潮予測を沿岸の各地域に密着した防災に活用するためには、各港湾・海岸といったさらに小単位の高潮予測が不可欠である。

## 2.2 高潮のリアルタイム予測の試行

本研究では高潮のリアルタイム予測に関する基本技術の確立を目指し、2001年以来、台風の予報円が九州～関東地方にかかり、顕著な高潮が発生する可能性がある場合に、以下の要領で高潮予測を試みてきた。

①高潮予測に用いる台風の進路は、図-2.1に示すような、気象庁から発表される3時、9時、15時、21時(日本標準時)を基準とした予報において、予報円の西寄り、中心、東寄りを通る3つのコースを基本とした。ただし、なるべく危険と思われるコースを設定するために、概ね予報円の範囲でこれら3つとは異なるコースを設定した場合もある。

②高潮の計算には、これまで追算で実績のある数値計算モデルの一つを用いた。その詳細については3章で述べるが、台風の気圧分布には同心円のMyersのモデル(Myers and Malkin, 1961)を仮定し、経験的な風速低減係数で海上風を推定し、さらに単層の線形長波方程式で流れを計算するものである。

③その演算には市販の普及型パソコン(OS: Windows MeまたはXp, CPU: Pentium III-1.0GHz~IV-2.53GHz)を用いた。複数の台風コースに対して計算する場合には、台風コースごとに1台のパソコンを割り当て、互いに独立で計算を行った。

④天文潮位の経時変化も60分潮の調和定数を用いて計算し、高潮偏差の経時変化と合わせて整理した。

以上の要領で、台風0111号の接近時には伊勢湾周辺、0115号では伊勢湾と東京湾の周辺、0117号では東京湾周辺、0209号では鹿児島湾周辺、0310号では九州沿岸から伊勢湾周辺、0314号では九州沿岸から瀬戸内海西部、0315号では九州から関東の沿岸に対して、それぞれ高潮のリアルタイム予測を行った。図-2.2の実線はこれらの台風が実際に通ったコースを示したものであり、そのうち0117号、0209号、0314号、0315号は結果として日本列島には上陸しなかった。なお、0221号が東京湾を通過した際には都合により高潮予測をすることができなかった。追算を行った。

その一例として、台風0310号が図-2.2の●印に位置

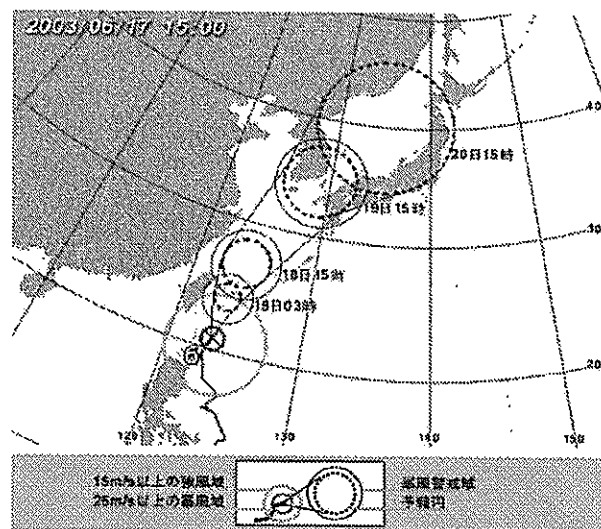


図-2.1 気象庁の台風予報円の例(気象庁ホームページ)

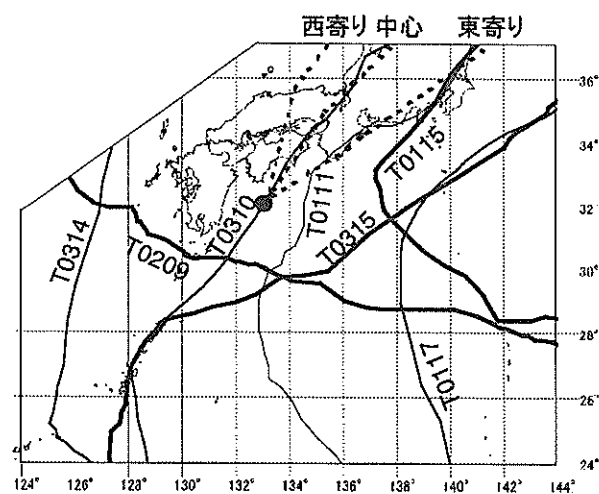


図-2.2 高潮予測を試行した台風の実際の経路(実線)

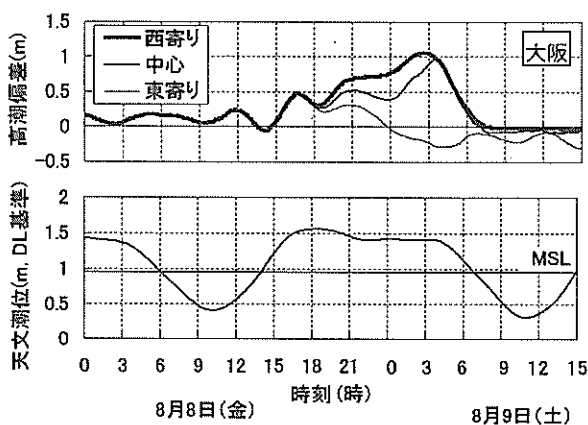


図-2.3 高潮の予測結果の例

していた時（2003年8月8日15時）の予報円に基づいて、図の破線で示すような西寄り、中心、東寄りのコースを仮定し、高潮予測を行った結果を、図-2.3に示す。天文潮位も併せて整理した。なお、この台風は結果として予報円のほぼ中心を貫くコースをとった。

### 2.3 高潮のリアルタイム予測における検討課題

前節で述べた高潮予測の試行を通じて、様々な課題が明らかになった。

- ①これまで高潮追算には最小格子間隔が0.2~0.6kmの水深データを用いてきたが、現在のパソコンの性能では計算に数時間を要した。そのため、対象海域の広さにもよるが、0.6~5.4kmとなるように水深データを間引き、高潮の計算プログラムもそれに応じた修正をする必要があった。また、台風条件の入力ファイルの作成や計算結果の図化も手作業で行った。これらが原因で「高潮予測の結果が出た時には、台風は通過した後だった」という失敗もあった。
- ②同じパソコン環境で計算時間を短縮するには、計算格子間隔を粗く（計算格子数を少なく）、台風がなるべく接近してから計算を開始（高潮計算の対象とする時間を短く）せざるを得ない。ところが、どれくらい格子間隔を粗くし、台風が接近してから計算を開始しても結果に大きな影響が及ばないのか、よく分かっていない。
- ③経験式を用いれば瞬時に予測値が得られる。その精度は数値計算モデルに比べてどれくらい劣るものなのか。また、どのような場合に数値計算モデルでないと正確な高潮予測ができないのか。これらの点についても十分に整理されていない。

以上の課題のうち、①は作業を円滑にするための支援

ツールを構築すれば解決されることであり、高潮予測の本質的な問題ではない。そこで以下では、②と③について検討を行うことにした。

## 3. 高潮予測の方法

### 3.1 観測値に基づく経験式

台風時の高潮偏差の最大値を簡易に求める経験式（気象庁の実験式）として次式がよく知られており、係数  $a$  を含む右辺第一項が気圧寄与分、係数  $b$  を含む第二項が風寄与分に相当する。

$$H = a(1010 - P) + bW^2 \cos \theta + c \quad (3.1)$$

ここに、 $H$  は高潮偏差の最大値(cm)、 $P$  は気圧の最低値(hPa)、 $W$  は平均風速の最大値(m/s)、 $\theta$  は主風向（概ね湾軸の方向）と最大風速  $W$  とがなす角度、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  は各地点で既往の観測値から求めた回帰係数である。

例えば気象庁では、主に1950~1960年代の観測値から全国44地点における係数を求めており、 $c$ の値は3地点を除いて0である（気象庁、2003）。そのうち本研究で対象とする大阪湾周辺と東京湾の値を表-3.1に示す。ただし、これらの係数は、主として湾の西側を通過した台風のときの観測値から求められたものである。

この経験式はもともと高潮偏差の最大値を推定するためのものであるが、本研究では各時刻の気圧・風の諸元を代入し、得られた高潮偏差をその時刻の高潮偏差とみなすことにした。また、その気圧・風の諸元としては、気象官署で実際に観測された値と、次節3.2に記す台風モデルから推定した値の両方について検討した。

なお、経験式を用いた高潮予測では複雑な計算を必要としないため、パソコンを用いれば一瞬で予測を終えることができる。

### 3.2 台風モデルによる気圧・風の推算方法

本研究では、台風の気圧分布を表すモデル（以下では単に「台風モデル」として、次式に示すMyersの式(Myers and Malkin, 1961)を用いた。

表-3.1 経験式の係数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  の値

地点	$a$	$b$	$c$	主風向
高松	3.184	0.000	0	SE
神戸	3.370	0.087	0	S24°E
大阪	2.167	0.181	0	S6.3°E
洲本	2.281	0.026	0	SSE
和歌山	2.608	0.003	0	SSW
東京	2.332	0.112	0	S29°W

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (3.2)$$

ここに、 $p$  は台風の中心から距離  $r$  だけ離れた点の気圧、 $p_c$  は中心気圧、 $\Delta p$  は気圧深度である。また、 $r_0$  は最大風速半径であり、本研究ではこの値を天気図の 1000hPa 等圧線の半径からではなく、沖縄地方～南東北地方の気象官署で観測された海面換算気圧から推定した。

台風の風は気圧傾度風と場の風がベクトル合成されたものとし、海上における傾度風の成分  $U_1$  は次式で与えた。

$$U_1 = C_1 U_{gr} \quad (3.3a)$$

$$U_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (3.3b)$$

ここに、 $C_1$  は経験的な低減係数（一般的には 0.6～0.7 の値が使われており、本研究では 0.66）、 $U_{gr}$  は自由大気における風速、 $f$  はコリオリの係数（ $=2\omega \sin \phi$ 、 $\omega$ ：地球自転の角速度 $=7.29 \times 10^{-5}$  rad/s、 $\phi$ ：緯度）、 $\rho_a$  は大気の密度（ $=1.22 \text{kg/m}^3$ ）である。また、その風向は、自由大気に比べ台風の中心側に 30deg 偏向しているとした。

一方、場の風成分  $U_2$  は次式で与えた。

$$U_2 = C_2 \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V_T \quad (3.4)$$

ここに、 $C_2$  は経験的な低減係数（本研究では 0.66）、 $V_T$  は台風の進行速度である。この成分の向きは台風の進行方向と同じである。

### 3.3 長波方程式を差分化した流れの数値計算モデル

高潮の数値計算モデルは、前節 3.2 で述べたような方法で推定した気圧・風の場合を入力条件とし、気圧低下による海面の吸い上げ、風による海面のせん断応力、海底の摩擦応力、海水の渦動粘性などを考慮して、流れの連続の式や運動方程式を解くものである。最も一般に使われている数値計算モデルは、単層の線形長波方程式に基づくものであり、気象庁の高潮予測モデルもその一つである(檜垣, 2001)。

本研究でも単層の線形長波方程式に基づく数値計算モデルを用いた。その基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{d\eta}{dt} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.6a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.6b)$$

ここに、 $t$  は時刻、 $M, N$  はそれぞれ  $x, y$  方向の流量フラックス、 $D$  は全水深（=静水深  $h$  + 高潮偏差  $\eta$ ）、 $\rho_w$  は海水の密度、 $p_0$  は海面気圧、 $A_h$  は水平渦動粘性係数である。また、 $\tau_{sx}$ 、 $\tau_{sy}$  は  $x, y$  方向の海面せん断応力、 $\tau_{bx}$ 、 $\tau_{by}$  は  $x, y$  方向の底面せん断応力であり、それぞれ以下のように与えた。

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3.7a)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (3.7b)$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_a g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3.8a)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_a g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3.8b)$$

ここに、 $W_x$ 、 $W_y$  は海上風速  $W$  の  $x, y$  成分、 $n$  は Manning の粗度係数である。また、 $C_D$  は海面抵抗係数であり、本多・光易(1980)による式を用いた。

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024W)/10^3 & (W < 8) \\ (0.581 + 0.063W)/10^3 & (W \geq 8) \end{cases} \quad (3.9)$$

本研究ではさらに、次式のように運動方程式に非線形項を付加した、単層の非線形長波方程式に基づく数値計算モデルについても検討した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) \\ = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.10a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) \\ = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} \\ + A_h \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.10b)$$

高潮の数値計算では一般に、天文潮による水位変化や流れを無視し、高潮偏差の分だけを計算する方法がとられている。本研究でもこの方法に従った。

なお、海水の密度変化、河川からの流入水、高潮・天文潮・波浪の相互作用などを考慮した高精度な数値計算モデルも開発されつつあるが(柴木・渡辺, 2002; 山下・中川, 2002; 河合ら, 2003)、これらは現在のパソコンの



性能では高潮予測に向いておらず、むしろ港湾計画や施設設計、災害復旧を目的とした高精度な計算に有用あると思われる。

#### 4. 大阪湾周辺における高潮の予測精度の検討

##### 4.1 対象とする台風と高潮の計算方法

本研究では、大阪湾とその周辺の海域で比較的最近に高潮を発生させた台風として、台風0310号(ETAU)と9810号(ZEB)をとりあげた。これらのコースを図-4.1に、高潮計算に用いた各時刻の台風諸元を付録-Aに示す。台風0310号は、中心気圧955~970hPaの強い勢力を保ったまま、20~30km/hの比較的ゆっくりとした速度で、室戸岬に上陸し大阪湾を縦断した。一方、台風9810号は、中心気圧は約980hPaであるが、進行速度は70~90km/hと比較的速く、大阪湾の約70km西方を通過した。

図-4.2は数値計算モデルに用いた計算領域を示したものである。(a)は格子間隔が32.4kmの領域①から0.6km

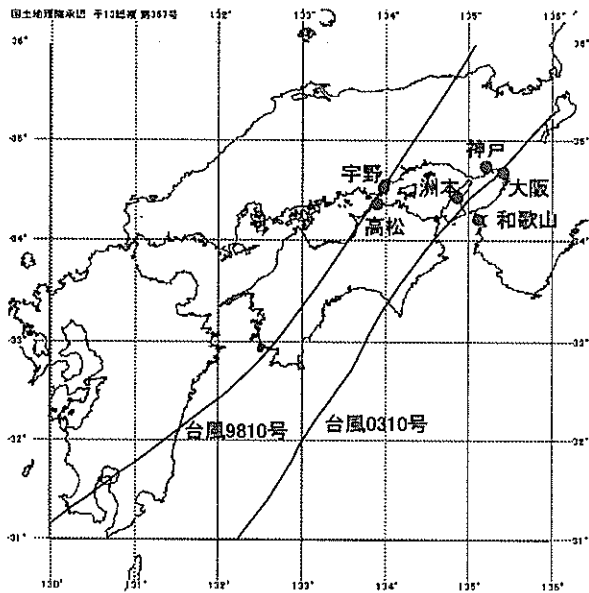
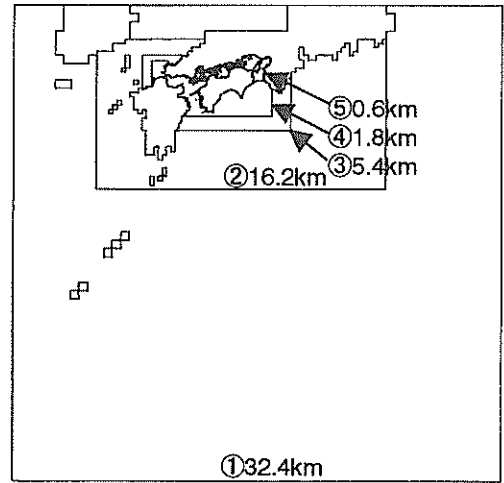


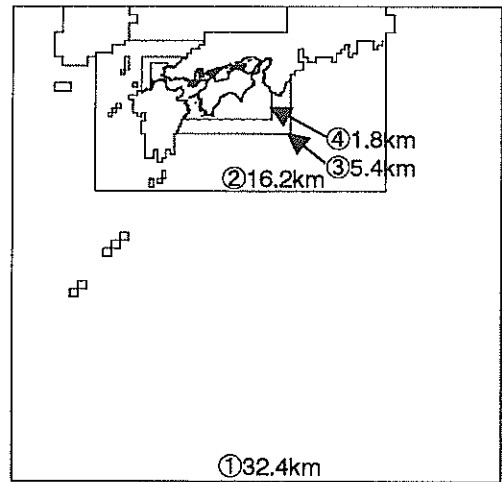
図-4.1 台風0310号と9810号のコース

表-4.1 大阪湾周辺の計算に用いた格子数

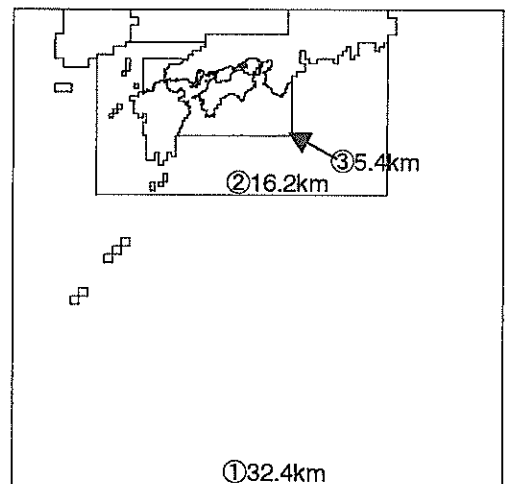
領域番号	格子配列		格子数		格子間隔(km)
	東西	南北	全て	海	
①	58	57	3,306	2,562	32.4
②	74	40	2,960	1,635	16.2
③	117	65	7,605	1,370	5.4
④	270	145	39,150	12,649	1.8
⑤	525	192	100,800	35,135	0.6
合計			153,821	53,351	



(a) 最小格子間隔を0.6kmとした場合



(b) 最小格子間隔を1.8kmとした場合



(c) 最小格子間隔を5.4kmとした場合

図-4.2 大阪湾周辺を対象とした計算領域と格子間隔

の領域⑤（安芸灘～紀伊水道の範囲）を相互に接続させたもので、その計算格子数は表-4.1の通りである。また、(b)は、(a)の領域⑤に領域④と同じ1.8km間隔の計算格子を適用し、最小格子間隔を1.8kmとしたもので、本研究ではこれを主として用いた。さらに、(c)は、(b)の領域④に領域③と同じ5.4km間隔の計算格子を適用し、最小格子間隔を5.4kmとしたものである。計算のタイムステッ

プは(a)～(c)の何れの場合も3sとした。

#### 4.2 経験式と数値計算モデルによる予測値の精度

##### (1) 高潮偏差の最大値とその起時の予測精度

図-4.3は、経験式と数値計算モデル（最小格子間隔は1.8km）によって求めた高潮偏差の経時変化を示す。台風モデルで推定した気圧・風をそのまま経験式に代入す

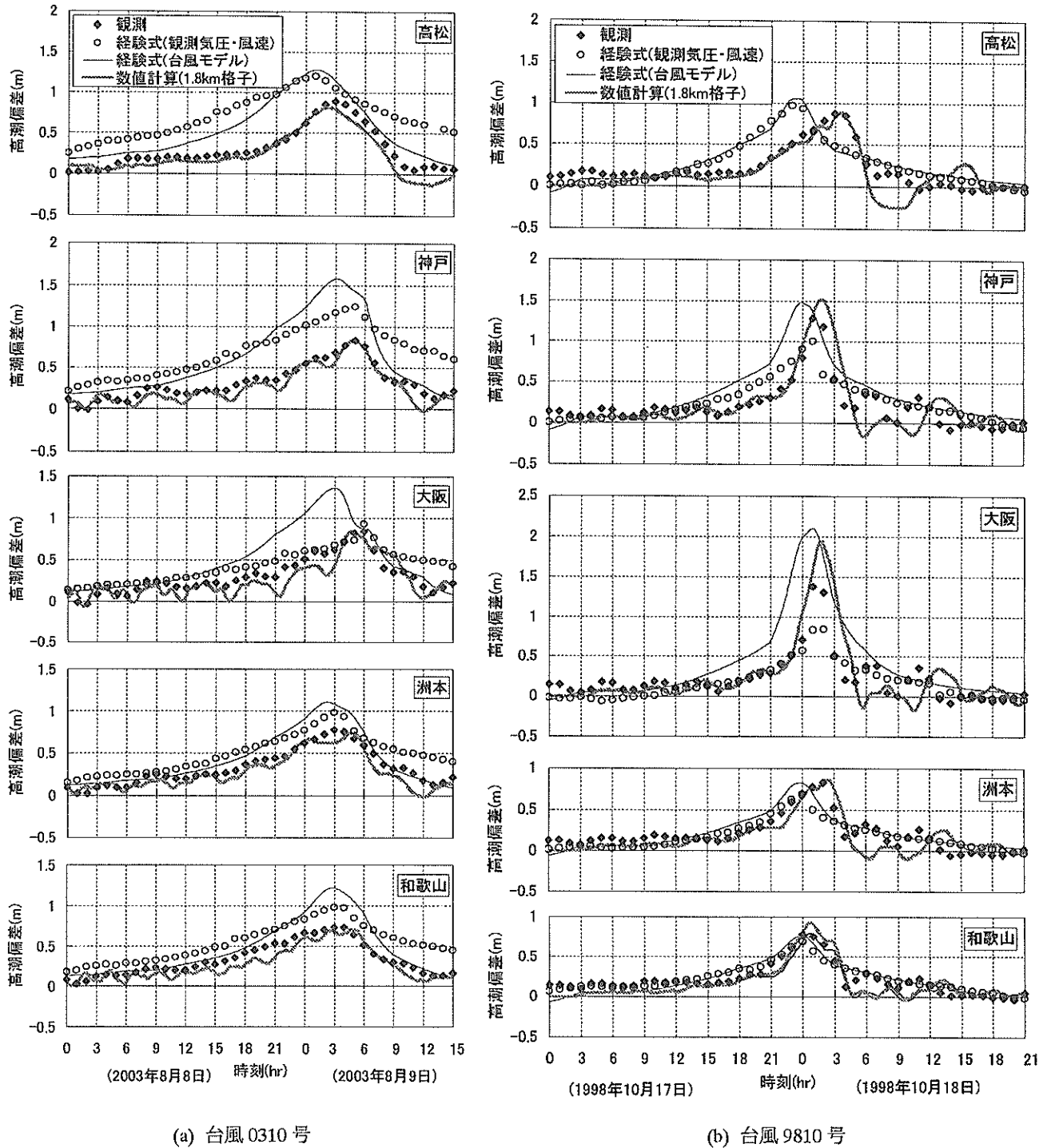


図-4.3 経験式と数値計算モデルの比較

ると、ほとんどの地点で観測値よりも大きな高潮偏差が得られた。その一因は「経験式を作る際に使われた気象官署等の観測風は周辺の陸上地形の影響を受けたものであり、台風モデルで推定した海上風の風速はこれよりも全体的に大きい」ということにある。そこで、気象官署で実際に観測された気圧・風を経験式に代入すると、台風 0310 号時の高松や神戸では依然として過大な高潮偏差が得られたが、大阪や洲本では観測値に近い高潮偏差になった。また、経験式で得られた最大高潮偏差の起時についてみると、神戸、大阪、和歌山では両台風とも観測値とほぼ一致したが、高松では経験式の方が台風 0310 号で 2 時間、台風 9810 号では 4 時間も早くなった。

一方、数値計算モデルは、9810 号時の大阪でやや過大な高潮偏差になっている他は、経験式よりも正確に高潮偏差の経時変化を再現している。

(2) 高潮偏差の気圧寄与分と風寄与分

高潮は主として、気圧低下による吸い上げと強風による吹き寄せによって生じる。そこで、経験式（台風モデルによる気圧・風を代入）と数値計算モデルによる高潮偏差を、それぞれ気圧寄与分と風寄与分に分けて、比較してみた。数値計算モデルでは、式(3.6)の運動方程式において海面せん断応力を 0 とすれば気圧寄与分だけ、海

面気圧の低下を 0 とすれば風寄与分だけを計算できる。

図-4.4~4.5 は、台風 0310 号と 9810 号の両方について、気圧と風の寄与分の最大値を数値計算モデルによって求めた結果である。これらの図から、台風 0310 号では気圧、台風 9810 号では風の寄与が卓越する高潮が発生していたことが分かる。気圧寄与分は、台風の経路付近で大きく、また、四国上陸後に台風の勢力が減衰傾向であったにもかかわらず、紀伊水道付近と比べ大阪湾の奥部で大きな値になっている。一方、風寄与分も、大阪湾の奥部で大きな値になっている。なお、気圧寄与分あるいは風寄与分が 0 という地点は見あたらない。

図-4.6 は、台風 9810 号時の高松、神戸、和歌山を例に、経験式と数値計算モデルによって求めた気圧寄与分と風寄与分の経時変化を示す。まず高松についてみると、経験式の気圧寄与分は気圧低下量の  $a=3.184$  倍を与えているが、その値は数値計算モデルの約 2 倍であることが分かる。また、その気圧寄与分が最大となる時刻は数値計算モデルと比べて約 4 時間早い。数値計算モデルの結果が実現象をほぼ正確に再現したものであると考えると、実現象において「気圧が最低のときに高潮偏差が最大になるとは限らない」ということが分かる。また、表-4.1 で示したように風寄与分の係数  $b$  が 0 であるため、経験式では風寄与分を 0 と見積もるが、数値計算モデル

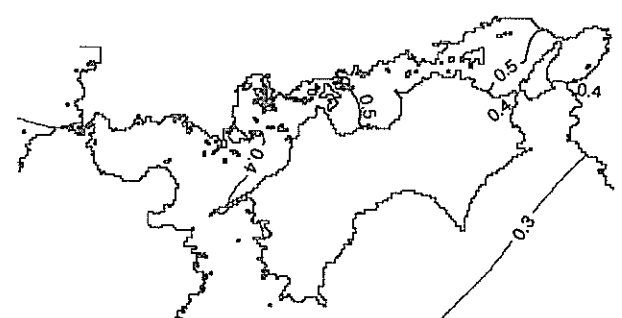


(a) 気圧寄与分

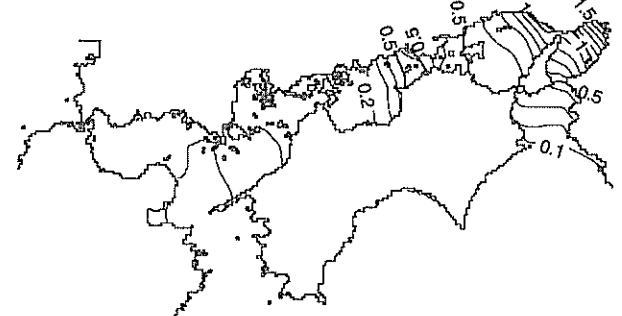


(b) 風寄与分

図-4.4 台風 0310 号の気圧と風の寄与分の最大値



(a) 気圧寄与分



(b) 風寄与分

図-4.5 台風 9810 号の気圧と風の寄与分の最大値

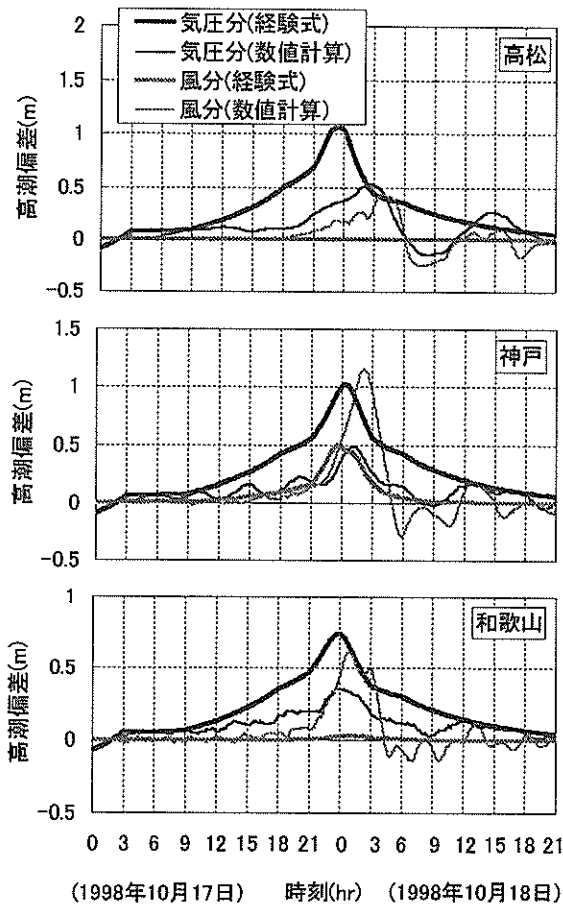


図-4.6 台風 9810 号による高潮偏差の気圧寄与分と風寄与分

の結果が示すように実現象では風も高潮の発生にいくらか寄与しているはずである。

神戸と和歌山では、実験式と数値計算モデルにおける気圧寄与分がほぼ同時に最大となっているが、その値は高松と同様に経験式の方が大きい。神戸では風寄与分が最大となる時刻にも、経験式と数値計算モデルとで2時間の差がある。

図-4.7 は、他の地点や台風 0310 号時も含め、気圧や風の寄与分の最大値とその起時を示したものである。経験式は、台風 0310 号では、気圧寄与分を過大に評価することで、高潮偏差全体も過大に評価したことが分かる。一方、9810 号では気圧寄与分を過大に、風寄与分を過小に評価することで、高潮偏差全体としては数値計算モデルに近い値を得ていた。このような過大・過小評価の原因としては「経験式の説明変数である最低気圧と最大風速にもともと弱い相関関係があり、重回帰係数に偏りが生じた」ということが考えられる。これを避けるためには、気圧寄与分と風寄与分に分けて回帰係数を求めれば

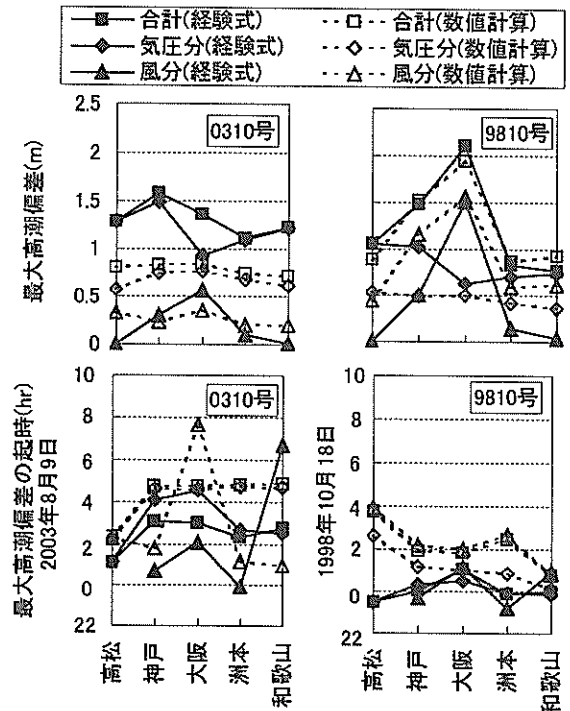


図-4.7 高潮偏差の気圧寄与分と風寄与分の最大値とその起時

良いと思われる。高潮の観測値を気圧寄与分と風寄与分に分けることはできないが、数値計算モデルでは気圧寄与分または風寄与分だけの計算もできる。

また、気圧や風の寄与分が最大となる時刻は、全体的に経験式より数値計算モデルの方が遅くなっている。これは「最低気圧や最大風速の時刻より少し遅れて高潮偏差が最大になる」という物理現象によるものである。台風 9918 号による八代海の高潮でも、台風の進行に遅れて高潮偏差が最大になっている(河合ら, 2000)。経験式はもともと最大高潮偏差の起時の推定を前提としたものではないため、経験式で高潮偏差の経時変化を予測する場合にはこのような時間差に留意が必要である。逆に言えば、もしこの時間差が台風の種類によって系統的に整理できれば、経験式が最大高潮偏差の起時の予測にも有用なものになると思われる。

#### 4.3 数値計算モデルで必要とされる計算条件

数値計算モデルを用いた高潮計算は、その目的によって2つに大別できる。港湾計画の策定、施設の設計、被災原因の究明などを目的とした一般的な用途では、様々な物理過程を取り入れ、地形もできるだけ精密に再現することが求められる。これに対し、本研究で議論している予測を目的とした高潮計算では、表-4.2にも示すように、計算精度をあまり落とさない範囲でできるだけ計算

を効率化し、計算時間を短縮する必要がある。

そこで、計算格子間隔、非線形項の有無、計算を開始する台風の緯度といった計算条件によって、計算結果がどれくらい変化するか検討した。

(1) 最小格子間隔

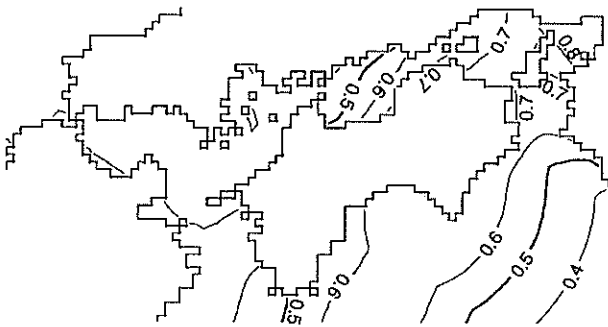
瀬戸内海には島が多く、狭い海峡もあるため、数値計算モデルによる高潮の計算精度を高めるためには、計算格子間隔をなるべく狭くする必要がある。しかしながら、高潮予測には台風の来襲前に計算を終了しなければならないという制約もあるため、計算精度と計算時間のバラ

ンスが重要になる。

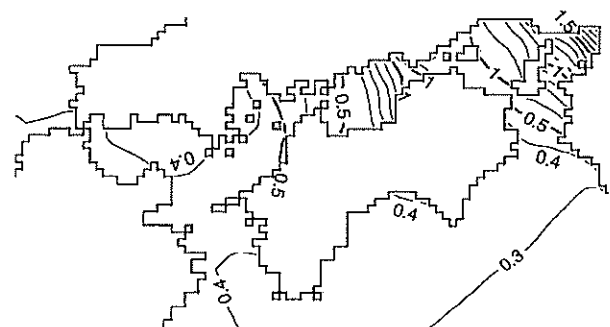
図-4.8~4.9は、最小格子間隔によって最大高潮偏差

表-4.2 高潮計算の目的とそれに応じた方法

	一般的な高潮計算	高潮予測
基本的な考え方	正確に計算する	短時間でほぼ正確に計算する
計算時間	特に制約なし	台風接近までの短時間
格子間隔	細かく	できるだけ粗く
非線形項	省かない	支障がなければ省く
台風の立ち上げ位置	台風発生位置、または日本列島から十分に離れた位置	できるだけ日本列島に接近した位置



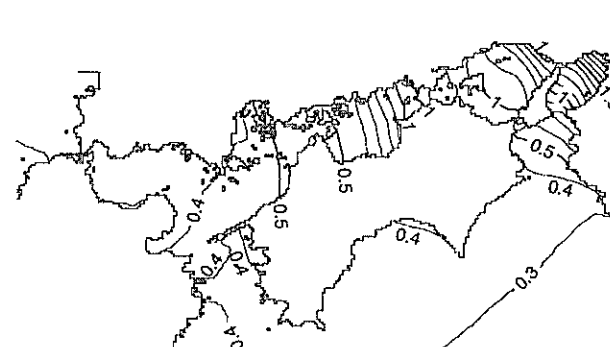
(a) 最小格子間隔 5.4km



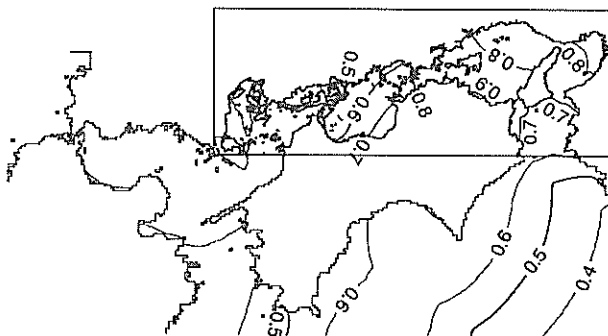
(a) 最小格子間隔 5.4km



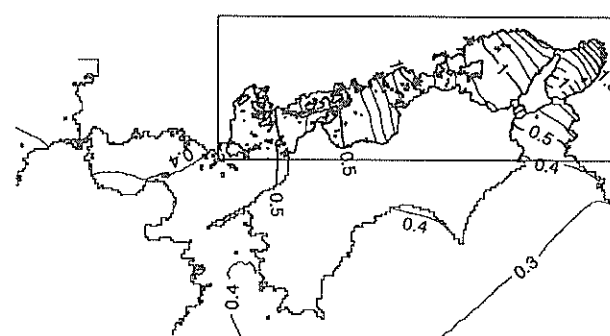
(b) 最小格子間隔 1.8km



(b) 最小格子間隔 1.8km



(c) 最小格子間隔 0.6km (枠内のみ 0.6km, 枠外は 1.8km)



(c) 最小格子間隔 0.6km (枠内のみ 0.6km, 枠外は 1.8km)

図-4.8 台風 0310 号による最大高潮偏差

図-4.9 台風 9810 号による最大高潮偏差

の分布を比較したものである。最小格子間隔を変えても、紀伊水道から大阪湾の奥部に向かって最大高潮偏差が大きくなるという傾向に変わりはないが、最大高潮偏差の値には違いが見られる。

図-4.10(a)は、代表的な地点について最大高潮偏差を比較したものである。台風0310号時の大阪や神戸では、最小格子間隔を5.4kmとしても0.6kmとした場合と大差のない高潮偏差が得られている。

ただし、宇野と高松については、少なくともこの図に示した範囲(5.4~0.6km)で見ると、最小格子間隔を小さくするほど高潮偏差は大きくなり、その差は約0.2mに及んでいる。最小格子間隔が0.6kmで本当に十分であるかを結論づけるためには、もっと小さな格子間隔でも比較をする必要がある。また、本研究で高潮計算に用いた風には、3.2節で述べたように、風速低減係数や偏向角によって海面抵抗の影響を考慮しているが、瀬戸内海を取り囲む陸上の局所地形の影響については考慮していない。すなわち、この図に現れている高潮偏差の差は、海底地形(特に海岸線近く、海峡、小島)の再現性の違いを反映したものである。より小さな格子間隔に対して高潮の計算精度を議論する場合には、陸上の局所地形による風の変化が高潮に及ぼす影響についても併せて検討する必要があると考えられる。

一方、台風9810号では、神戸で最小格子間隔が5.4kmと1.8kmとの間に約0.2mの差があるが、その他の地点では概ね0.1m程度の差である。また、最小格子間隔が1.8kmと0.6kmとの差は何れの地点でも比べて小さい。

図-4.10(b)は最大高潮偏差の起時を示す。宇野と高松では最小格子間隔を細かくするほど起時が早くなる傾向があり、台風9810号では最小格子間隔が5.4kmと0.6kmとで1時間以上の差が現れている。それ以外の地点では、1時間未満である。

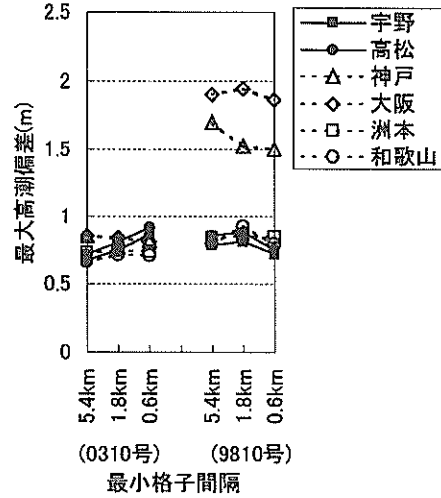
以上のことから、大阪湾の高潮予測を0.1m単位の精度で行うためには、計算格子間隔を概ね1.8km以下にする必要があると考えられる。

なお、本研究ではこれらの高潮計算を普及型パソコンの一環境(OS: Windows Xp, CPU: Pentium4 - 2.53 GHz, コンパイラ: Compaq Visual Fortran / local optimize switch)で行っており、それに要した時間は表-4.3に示す通りである。最小格子間隔を5.4km, 1.8km, 0.6kmとした場合、24時間分の計算にそれぞれ約0.3時間、約1.0時間、約2.8時間が必要であり、台風0310号(2003年8月6日18時~9日15時の69時間)の計算にはそれぞれ約0.8時間、約2.9時間、約8.1時間が必要であった。今後2~3年に期待されるパソコンの演算速度では1.8km間隔の計算

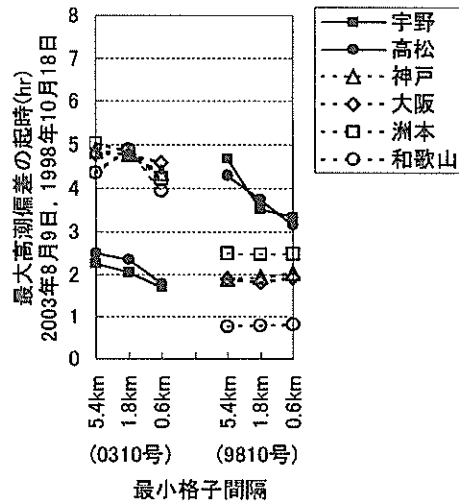
格子が、数値計算モデルによる高潮のリアルタイム予測の限界であると考えられる。

(2) 非線形項の有無

図-4.11は、数値計算モデルの非線形項の有無によって、最大高潮偏差とその起時を比較したものである。大



(a) 最大高潮偏差



(b) 最大高潮偏差の起時

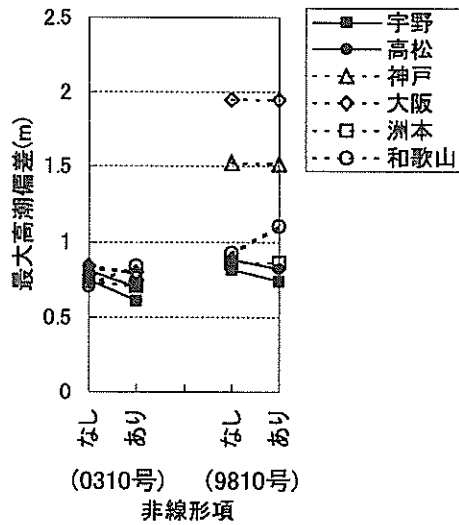
図-4.10 最小計算格子間隔による比較

表-4.3 最小格子間隔と計算時間の関係

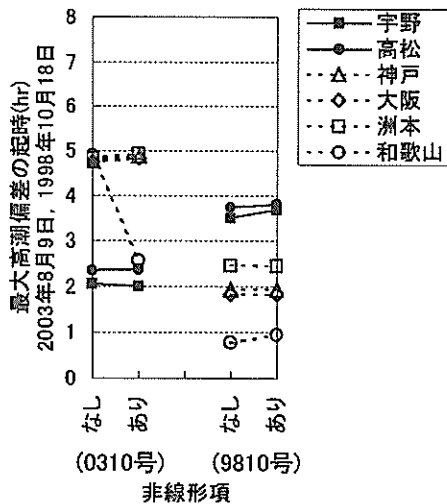
最小格子間隔	格子数		計算時間		
	海陸両方	海のみ	0310号 (/69hr)	9810号 (/45hr)	(/24hr)
5.4km	13,871	7,405	0.8hr	0.5hr	0.3hr
1.8km	53,021	22,202	2.9hr	1.9hr	1.0hr
0.6km	153,821	53,351	8.1hr	5.3hr	2.8hr

阪湾に面する神戸、大阪、洲本では、非線形項を加えても最大高潮偏差やその起時にほとんど変化がない。周辺地形が複雑となる宇野や高松でも、最大高潮偏差の変化は 0.1m 程度である。このように非線形項の効果が小さかった理由としては「高潮が気圧と風に拘束された強制運動であり、もともと非線形項の影響が出にくい現象である」ということが考えられる。なお、和歌山に限っては、非線形項を加えると、周期が約 30 分、振幅が約 0.1m の振動が加わり、その影響で最大潮位偏差が大きくなり、その起時も早くなった。ただし、この短周期の振動を平滑化した高潮偏差の経時変化では、非線形項を無視した場合とほとんど差がない。

なお、非線形項を考慮した計算では、無視した場合よ



(a) 最大高潮偏差



(b) 最大高潮偏差の起時

図-4.11 非線形項の有無による比較

り約 1 割長い計算時間が必要であった。

### (3) 立ち上げ

図-4.12 は台風の発生から消滅までの中心気圧の経時変化を模式的に示したものである。台風通過後に行う追算のように時間的な余裕があれば、台風の発生から消滅まで計算することもできる。しかし、台風接近時に高潮予測をする場合には、なるべく台風が日本列島に接近した時刻から計算を開始することで、計算時間を短縮することが望ましい。したがって、既に発達した台風による気圧や風の状態を初期値として計算を開始する必要がある。

ところが、各計算格子点における水位や流速は不明であり、初期値としては静水状態を与えざるを得ない。これに実際の気圧低下や強風を急に与えると、実際には存在しない水面変動や流れの生じることがある。それを避けるためには、図に示したように、気圧低下量が 0 (風速も 0) の状態から徐々に実際の気圧低下量や風速に近づけていく操作 (立ち上げ、あるいは緩衝) が必要である。本研究では、これまでの経験を踏まえて、この立ち上げの時間を 6hr とした。

図-4.13(a)は立ち上げ緯度によって最大高潮偏差を比較したものである。例えば、台風 0310 号の A は、台風の中心が北緯 24.6° に達するまでに立ち上げて高潮計算を行った場合である。台風 0310 号では、A (立ち上げ緯度: 北緯 24.6°) から D (31.5°) まで最大高潮偏差に差はほとんどなく、それより立ち上げが高緯度でも比較的小さい。台風 9810 号でも、A (28.8°) から C (31.0°) まで最大高潮偏差にほとんど差はないが、それより高緯度になると差が広がっている。

図-4.11(b)は立ち上げ緯度によって最大高潮偏差の起時を比較したものである。台風 0310 号では、D (31.5°) でも A (24.6°) と概ね 1 時間以内の差であり、それより高緯度では誤差が非常に大きくなる。一方、台風 9810 号では、立ち上げの緯度が高くても台風 0310 号ほど差は

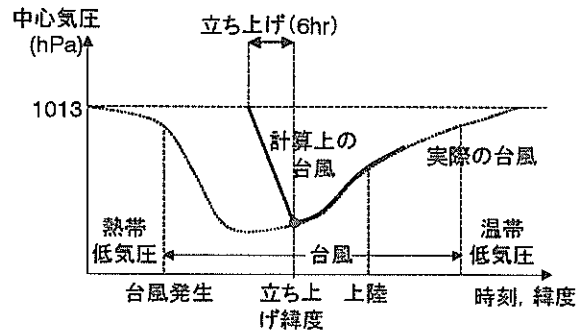
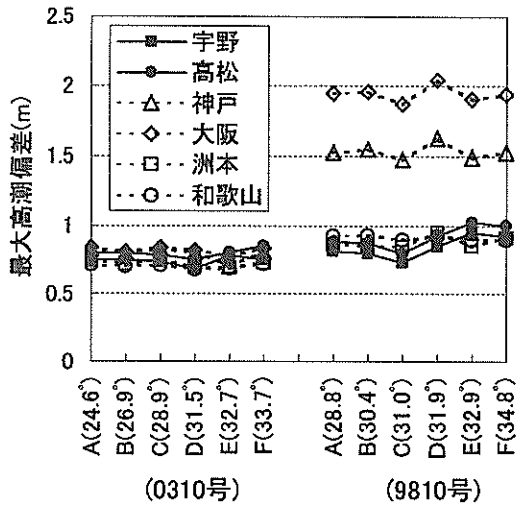
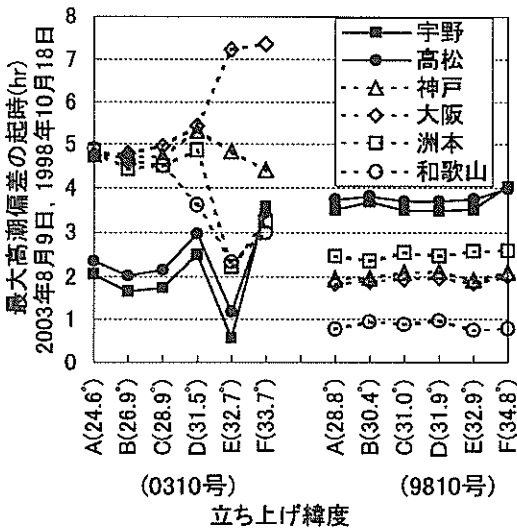


図-4.12 立ち上げのイメージ図



(a) 最大高潮偏差



(b) 最大高潮偏差の起時

図-4.13 立ち上げ緯度による比較

大きくない。

以上のことから、北緯 31° までを目安として台風を立ち上げれば良いと考えられる。表-4.4 はそれぞれの立ち上げ緯度に対する計算時間を示したものであり、台風 0310 号を D (31.5°) の立ち上げ方で計算すると、実時間で 33 時間分の計算をすれば良く、最小格子間隔が 1.8 km 格子でも演算時間は約 1.4 時間に短縮される。

## 5. 東京湾における高潮の予測精度の検討

### 5.1 対象とする台風と高潮の計算方法

東京湾については、台風 0221 号 (HIGOS), 0115 号

表-4.3 立ち上げ緯度と計算時間

台風0310号			台風9810号				
case	立ち上げ緯度 (deg)	実時間 (hr)	計算時間 (hr)	case	立ち上げ緯度 (deg)	実時間 (hr)	計算時間 (hr)
A	24.6	69	2.9	A	28.8	45	1.9
B	26.9	57	2.4	B	30.4	39	1.7
C	28.9	45	1.9	C	31.0	36	1.5
D	31.5	33	1.4	D	31.9	33	1.4
E	32.7	27	1.1	E	32.9	30	1.3
F	35.7	21	0.9	F	34.8	27	1.1

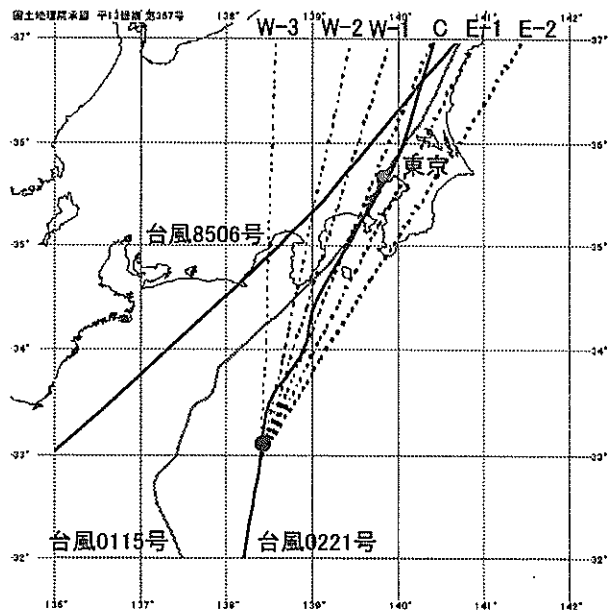


図-5.1 台風 0221 および 0115 号のコース

(DANAS), 8506 号 (IRMA) をとりあげた。これらの台風のコースを図-5.1 に、高潮計算に用いた各時刻の台風諸元を付録-A に示す。台風 0221 号は、中心気圧約 960hPa の勢力を保ったまま、50~60km/h で東京湾の西縁を通過した。台風 0115 号も東京湾の西縁を通過したが、中心気圧は約 975 hPa で、進行速度は約 20km/h と遅かった。一方、台風 8506 号は、静岡県に上陸した後に、東京湾の軸の約 40km 北西方を通過した。なお、台風 0221 号については、図に示すように、途中から分岐するコース W-3~C~E-2 についても検討を行った。

図-5.2 は数値計算モデルに用いた計算領域を示したものである。(a)は格子間隔が 32.4km の領域①から 0.2km の領域⑥までを相互に接続させたもので、その計算格子数は表-5.1 に示す通りである。また、(b)は、(a)の領域⑥を領域⑤と同じ 0.6km 間隔の計算格子で置き換え、最



小格子間隔を0.6kmとしたもので、本研究ではこれを主として用いた。さらに、(c)は、(b)の領域⑤を領域④と同じ1.8km間隔の計算格子で置き換え、最小格子間隔を1.8kmとしたものである。(d)は、(c)の領域④を領域③と同じ5.4km間隔の格子で置き換え、最小格子間隔を5.4kmとしたものである。計算の時間差分は(a)~(d)の何れも1sとした。大阪湾周辺の計算よりも時間差分が小さいのは、東京湾口や房総半島のすぐ東方の水深が比較的深いためである。

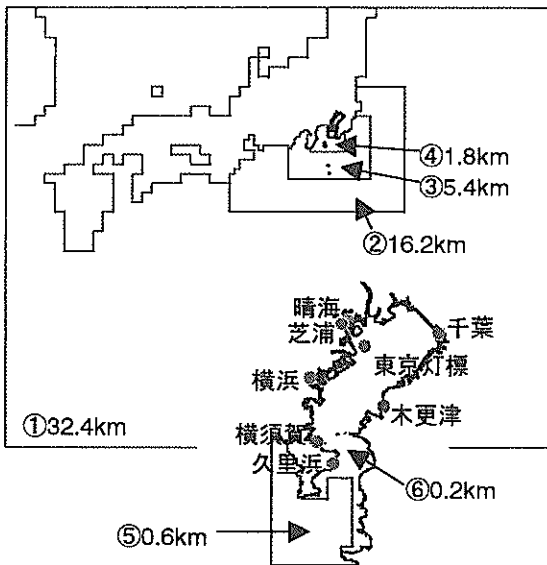
### 5.2 経験式と数値計算モデルによる予測値の精度

図-5.3(a)は、台風0221号が来襲したときの晴海における高潮偏差の経時変化を示す。台風モデルの気圧・風

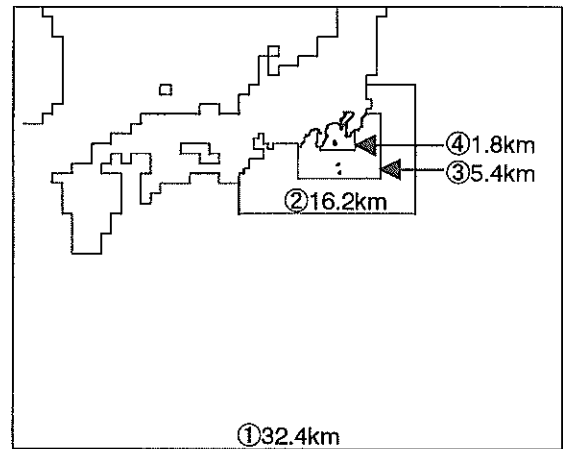
を用いた経験式の高潮偏差は過大な値になっている。観測気圧・風を用いた経験式では、最大高潮偏差は観測値とほぼ同じ値になっているが、その起時は観測よりも早い。一方、数値計算モデル(最小格子間隔は0.6km)は、経験式に比べ高潮偏差の経時変化をよく表している。た

表-5.1 東京湾周辺の高潮計算に用いる計算格子の構成

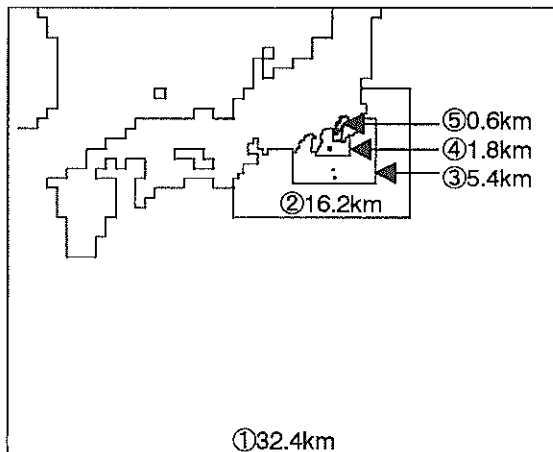
領域番号	格子配列		格子数		格子間隔(km)
	東西	南北	全て	海	
①	55	45	2,475	2,562	32.4
②	40	30	1,200	1,635	16.2
③	57	45	2,565	1,370	5.4
④	69	78	5,382	12,649	1.8
⑤	100	150	15,000	35,135	0.6
⑥	240	441	105,840	35,135	0.2
合計			132,462	88,486	



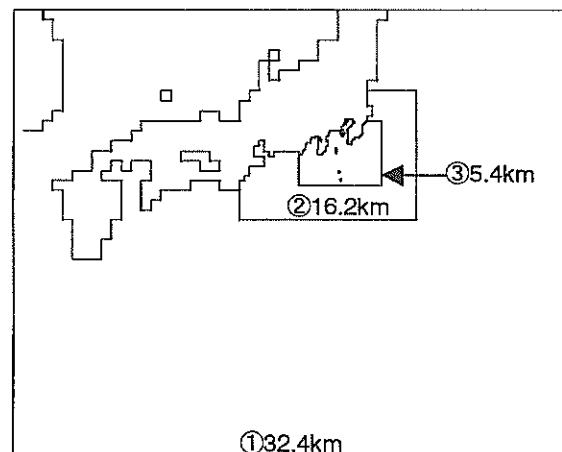
(a) 最小格子間隔を0.2kmとした場合



(c) 最小格子間隔を1.8kmとした場合



(b) 最小格子間隔を0.6kmとした場合



(d) 最小格子間隔を5.4kmとした場合

図-5.2 東京湾を対象とした計算領域と格子間隔

だし、この経時変化に見られる周期約80分の振動は、観測値に比べて振幅がやや大きく、位相のずれも見られる。台風が東京湾に接近するかなり前からこの振動が発生していることを考えると、数値計算モデルでこの位相まで正確に再現することは困難であると思われる。

図-5.3(b)は、同様に台風0115号について示したものである。ただし、この台風の前には太平洋沿岸で異常潮位が発生していたため、この図の観測値ではその分として0.35mを差し引いてある。台風モデルの気圧・風を用いた経験式は、高潮偏差のピーク前では観測値とよく合っているが、ピーク後は過大に評価している。数値計算モデルは、最大高潮偏差を過小に評価しているが、高潮偏差の経時変化を全体的によく表している。

図-5.4は、台風0221号について、内陸部に位置する晴海、沖合の東京灯標、これらの中間地点について、数値計算モデルで得られた高潮偏差の経時変化を示したものである。この図から、晴海で生じていた周期約80minの振動は、晴海側が腹となった振動であることが分かる。東京湾の固有振動が60~90minであることはよく知られており、この台風の気圧・風によって湾内の振動が強められたものと考えられる。なお、本研究で用いた数値計算モデルでは、海岸線を東西方向と南北方向の直線だけで表現しているため、晴海周辺のように込み入った地

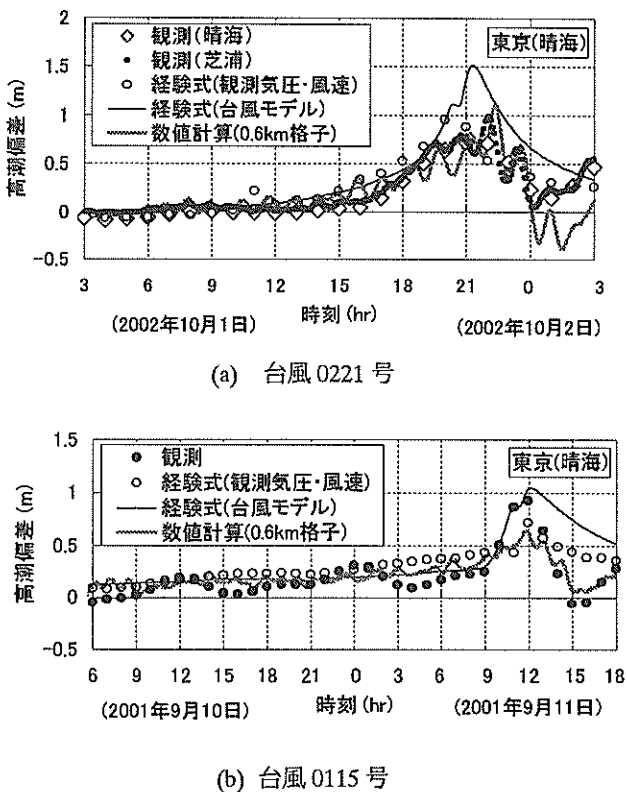


図-5.3 経験式と数値計算モデルの比較 (晴海)

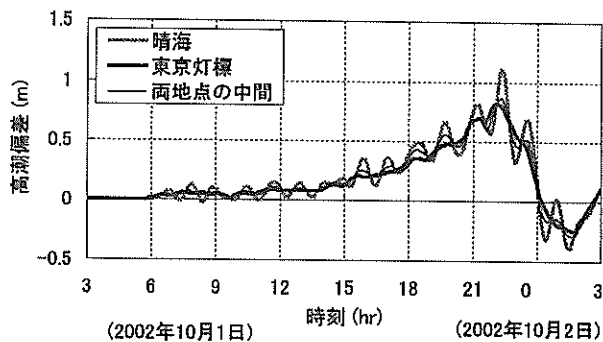


図-5.4 晴海周辺における副振動

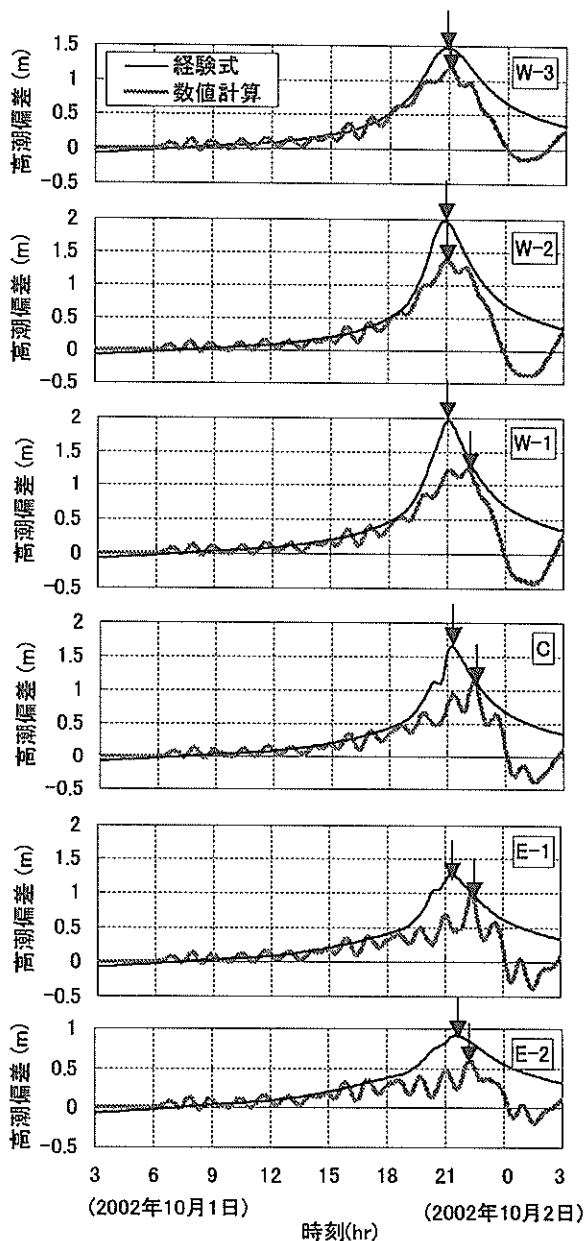


図-5.5 台風のコースによる高潮偏差の比較

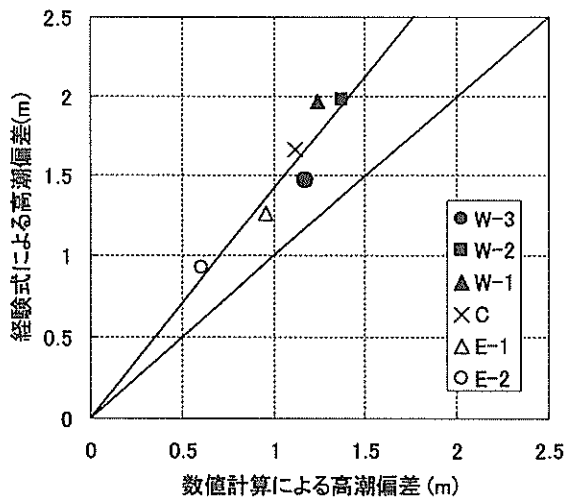


図-5.6 経験式と数値計算モデルによる比較

形では振動を実際より誇張してしまうこともあると思われる。

さて、台風 0221 号は図-5.1 に示したように東京湾の西縁付近を通過したが、東京湾の西側や東側を通った場合についても経験式と数値計算モデルによる高潮偏差を比較するために、コース W-3~E-2 を設定した。コース C は台風 0221 号をほぼ直線化したコースである。ただし、これらのコースに対する気圧・風や高潮偏差の観測値がないため、数値計算モデルが真値に近いという前提に立ち、台風モデルの気圧・風を用いた経験式と数値計算モデルを比較した。

その結果を図-5.5 に示す。図中の↓印は最大高潮偏差の起時である。経験式による高潮偏差は、何れのコースでも数値計算モデルより大きい。ただし、両者の最大高潮偏差には図-5.6 に示すような比較的強い相関があり、

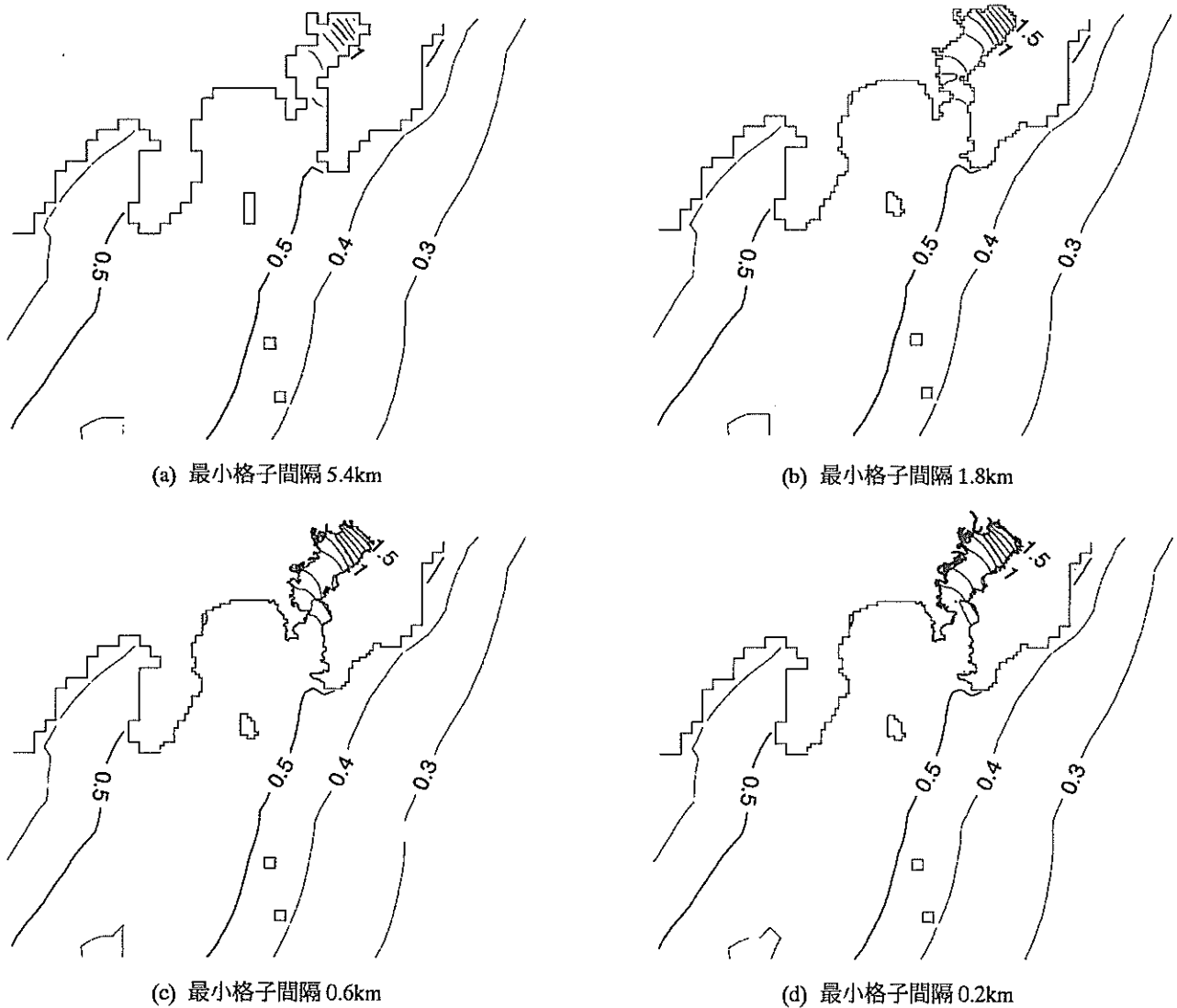
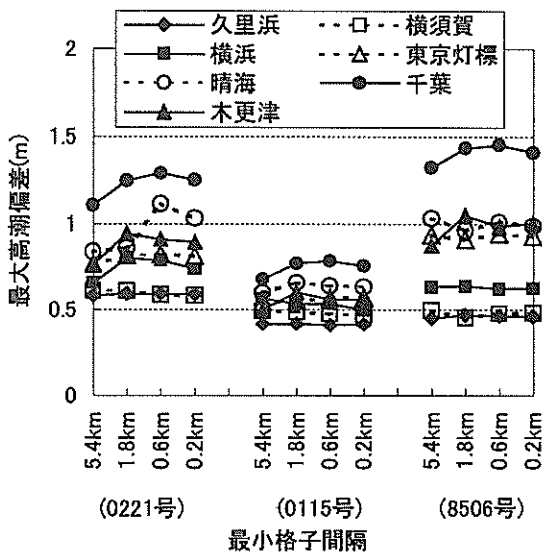
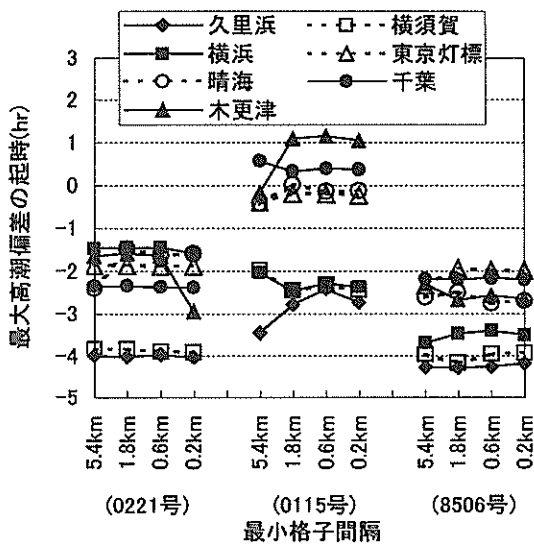


図-5.7 台風 0221 号による最大高潮偏差の分布

このような相関性を利用することで経験式の予測精度を容易に高めることができると思われる。また、最大高潮偏差の起時は、台風が東京湾の西方を通る W-3 と W-2 では数値計算モデルとほぼ一致したが、その他のコースでは数値計算モデルよりも1~2時間早くなった。このような時間差の一因としては、経験式が気圧低下量や風速に比例した高潮偏差を見積もるのに対し、実際の現象では気圧低下量や風速が最大となる時刻より後に高潮偏差が最大となる、ということが考えられる。



(a) 最大高潮偏差



(b) 最大高潮偏差の起時

図-5.8 最小格子間隔による比較

### 5.3 数値計算モデルで必要とされる計算条件

#### (1) 最小格子間隔

図-5.7は、台風0221号を例に、最小格子間隔によって最大高潮偏差の分布を比較したものである。最小格子間隔を変えても、東京湾の湾口から湾奥に向かって最大高潮偏差が大きくなるという傾向に変わりはないが、最大高潮偏差の値には違いが見られる。

図-5.8(a)は、台風0221号、0115号、8506号について、代表的な地点の最大高潮偏差を比較したものである。晴海以外の地点では、最小格子間隔を1.8kmとした計算で、0.2kmとした場合とほとんど差のない値が得られている。一方、東京湾の奥まった場所にある晴海では、最小格子間隔を0.6kmまで縮めない、0.2kmとした場合に近い値が得られない。

図-5.8(b)は最大高潮偏差の起時を示す。ただし、台風0221号は2002年10月2日0時、台風0115号は2001年9月11日12時、台風8506号は1985年7月1日8時を基準に(0時となるように)示した。台風0221号の木更津で最小格子間隔が0.6kmと0.2kmの場合に1hr以上の大きな差があるのは、高潮偏差の経時変化に二つのピークがあり、最小格子間隔によって最大高潮偏差が含まれるピークが変わるためである。このような特別な例を除けば、最大高潮偏差の起時という観点からは、最小格子間隔は概ね1.8km以下で良いことが分かる。

図-5.9は、台風0221号を例に、副振動の顕著な晴海

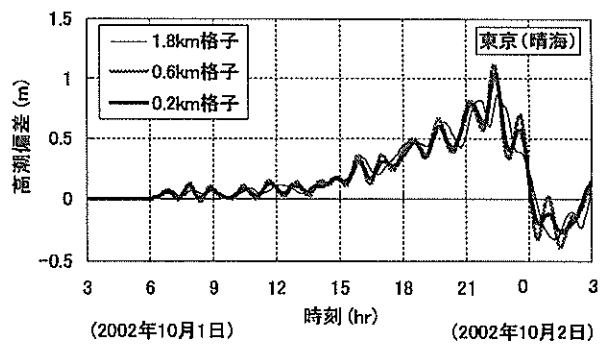
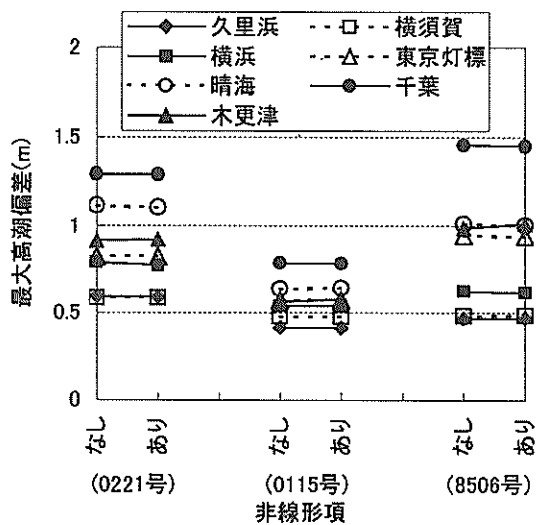


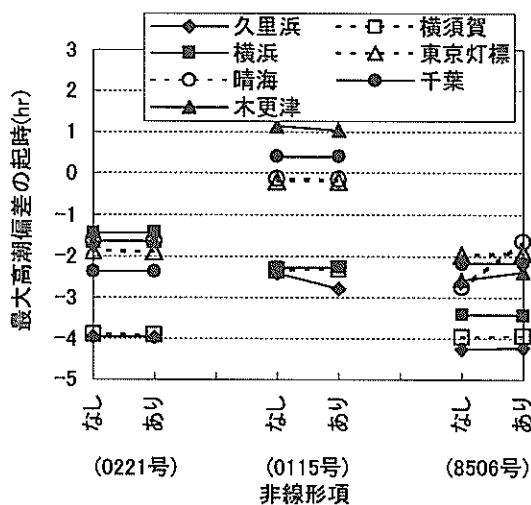
図-5.9 計算格子間隔による比較

表-5.2 最小格子間隔と計算時間の関係

最小格子間隔	格子数		計算時間		
	海陸両方	海のみ	0221号 (/24hr)	0115号 (/63hr)	8506号 (/48hr)
5.4km	7,873	4,058	0.5hr	1.4hr	1.0hr
1.8km	15,720	6,351	1.0hr	2.5hr	1.9hr
0.6km	36,578	10,976	2.2hr	5.7hr	4.3hr
0.2km	161,294	37,712	10.9hr	27.8hr	19.3hr



(a) 最大高潮偏差



(b) 最大高潮偏差の起時

図-5.10 非線形性の有無による比較

の高潮偏差の経時変化を最小格子間隔によって比較したものである。0.6kmでも0.2kmの場合とほとんど同じ経時変化が得られているが、1.8kmでは振動の位相がずれ、高潮偏差の最大値も小さくなっている。

以上のことから、東京湾の高潮計算が必要とされる最小格子間隔は、東京湾に直接面した地点で概ね1.8kmが良いと思われるが、晴海のように奥まった地点も対象とするためには概ね0.6km以下にする必要がある。

これらの計算に要した時間は表-5.2に示す通りである。最小格子間隔を5.4km、1.8km、0.6km、0.2kmとした場合に、24時間分の計算をするためにはそれぞれ約0.5時間、約1.0時間、約2.2時間、約10.9時間が必要であり、台風0221号(2002年10月1日3時~2日3時の24

時間)の計算にそれぞれこれらの時間が必要であった。計算精度という観点では最小格子間隔を0.6km以下にすることが望ましいが、現在のパソコンの性能を考えると、当面は1.8km程度にせざるを得ないと思われる。

### (2) 非線形項の有無

図-5.10は、数値計算モデルの非線形項の有無によって、最大高潮偏差とその起時を比較したものである。非線形項の有無による違いも小さく、高潮予測計算においては非線形項を省略できると考えられる。

### (3) 立ち上げ

図-5.11(a)は、立ち上げ緯度によって最大高潮偏差を示したものである。立ち上げ緯度によって最大高潮偏差が変化し始める緯度は大阪湾の例ほど明確ではないが、少なくとも大阪湾の場合と同じ北緯31°までに立ち上げれば良いことが分かる。ただし、東京湾は大阪湾よりも緯度が高いことを考えると、もう少し高い緯度でも良い可能性はある。

## 6. 今後の検討課題

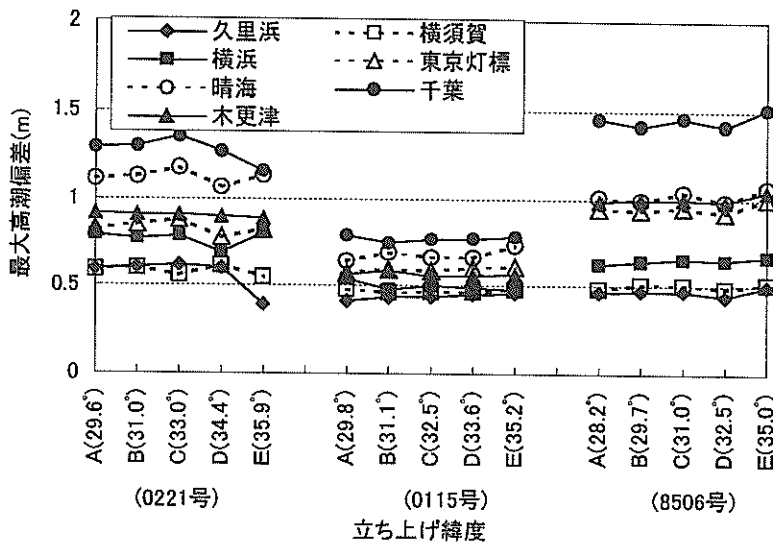
### 6.1 台風の最大風速半径

本研究では経験式や数値計算モデルの推算精度について検討してきたが、実際の高潮予測において高潮偏差の値を左右するのはむしろ台風の諸元である。気象庁から発表される台風諸元は、進路(予報円)、中心気圧、暴風域(平均風速25m/s以上の領域)の半径、強風域(同15m/s以上)の半径であり、Myersの気圧分布における最大風速半径 $r_0$ の値は含まれていない。

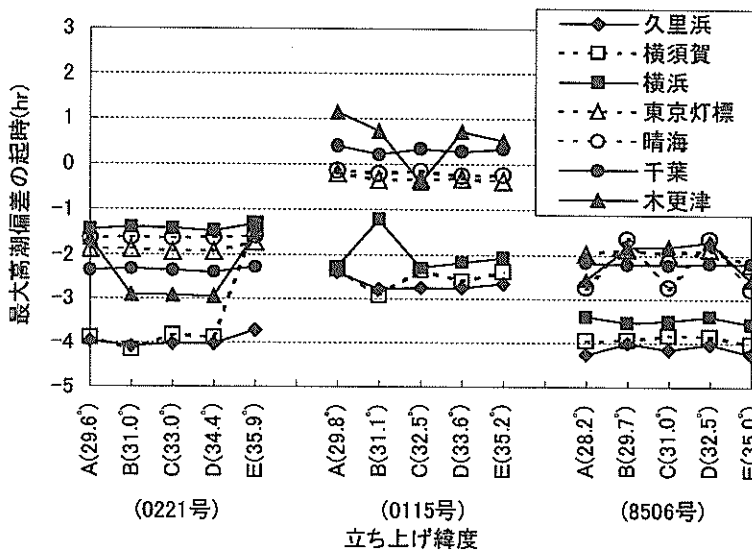
図-6.1は、台風0221号をモデルとして、台風のコース(W-3~E-2)の位置は図-5.1を参照)や最大風速半径 $r_0$ が高潮偏差に及ぼす影響を示したものである。同じ中心気圧と最大風速半径をもつ台風でも、台風の進路によって最大高潮偏差は異なり、湾奥では台風が東京湾から数十km西方のところを通過した場合に最も大きくなる。また、同じ中心気圧で同じコースW-1を通ったとしても、最大風速半径によって高潮偏差は異なる。このように、高潮予測における最大風速半径の推定は、進路予想とともに非常に重要である。

しかしながら、各地の観測気圧を収集して最大風速半径を推定することは、追算では容易であっても、台風来襲時には困難である。そこで、中心気圧や暴風・強風半径と最大風速半径との関係について調べてみた。

図-6.2は、本研究でとりあげた5つの台風について、



(a) 最大高潮偏差



(b) 最大高潮偏差の起時

図-5.11 立ち上げ緯度による比較

中心気圧と最大風速半径の関係を時系列的に示したものである。同じ中心気圧でも台風によって最大風速半径に違いがあるのは、台風の緯度や成長のしかたに違いがあるためと考えられる。しかしながら、少なくとも全体的な傾向として、台風の中心気圧が高いほど最大風速半径は大きくなっている。また、個々の台風を時系列的に見ると、図の左下から右上へ移動、すなわち、台風の中心気圧が上昇するほど最大風速半径は大きくなっている（小さく鋭い台風から大きくぼんやりとした台風に変化）。図の↑印は台風が日本列島に上陸した時刻であり、上陸後に最大風速半径が急増する傾向がある。

このような相関性を利用することで、台風来襲時に中心気圧から最大風速半径の概略値を推定することができると考えられる。そのためには、あらかじめ中心気圧と最大風速半径の関係やこれらの時間変化量を、季節、海域、台風の発達期と減衰期などに分けて、統計的に整理しておく必要があると思われる。例えば、確率台風モデルを構築する過程では、天気図の1000 hPa等圧線半径と中心気圧から推定した最大風速半径が統計的に整理されている（橋本ら、2002）。ただし、台風は上陸後に、中心気圧が急に上昇し始めたり、気圧分布が歪んだりすることもある（Veltcheva・河合、2000）。内湾の高潮推算では、

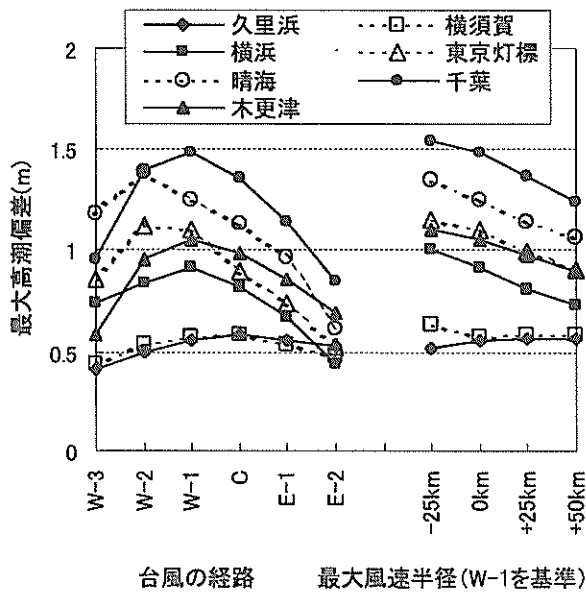


図-6.1 台風のコースおよび最大風速半径による最大高潮偏差の比較

台風が上陸してからの気圧・風場が重要になるので、上陸の前後に分けて中心気圧や気圧分布の変化特性を調べておく必要がある。

あるいは、気象庁が発表する暴風・強風半径に合うように台風モデルの最大風速半径を調整する方法も考えられる。図-6.3は、暴風・強風半径を気象庁発表の値と台風モデルの風場とで比較したものである。気象庁では、気象衛星の雲画像から台風周辺の風速分布を推定している。一方、本研究では、気象官署の観測気圧から最大風速半径を求め、その値をパラメタとして台風モデルによって風場を推算した。風速の推定方法にこのような違いがあるためか、高潮計算で用いた風場の暴風半径は気象庁による値の概ね1~3倍、強風半径でも概ね1~2倍になっている。ばらつきも大きいですが、相関性はあるので、中心気圧から最大風速半径を推定する際の参考になると思われる。

### 6.2 演算時間の短縮

演算時間の短縮のためには、まず極力少ない計算格子で正確な計算ができる領域の設定法を海域毎に検討する必要がある。本研究ではこれまで追算で用いてきた計算領域を用いたが、これよりも効率的で発散もしにくい計算領域の設定があるものと思われる。

また、1台のパソコン（あるいはCPU）で演算するのではなく、複数のパソコンで並列計算できるようにプログラムを書き換えることも考えられる。さらに、高潮計

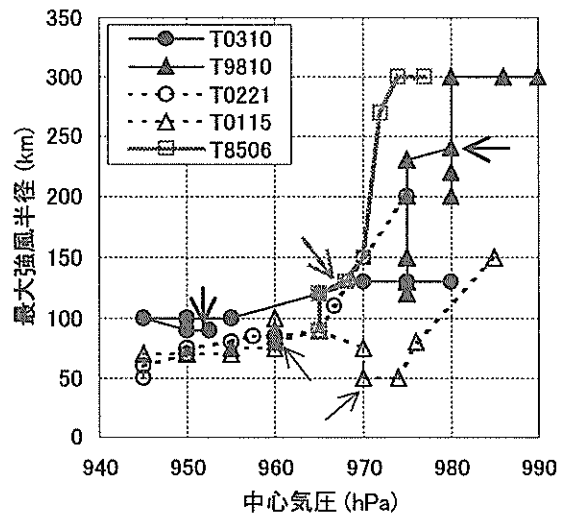


図-6.2 中心気圧と最大風速半径の関係

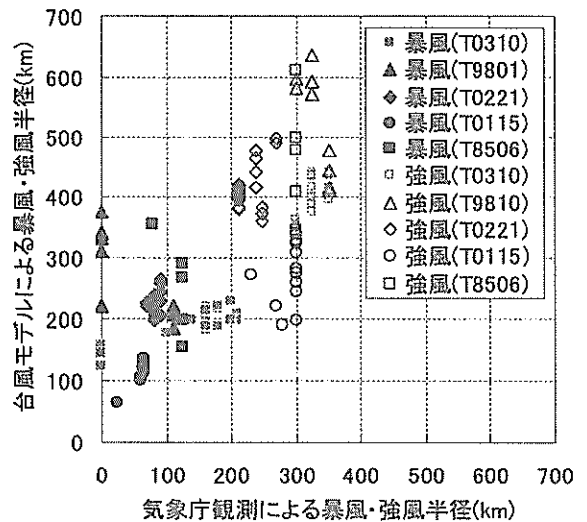


図-6.3 強風半径と暴風半径の関係

算プログラムの実行のタイミングという観点からも工夫の余地がある。例えば、気象庁から新しい台風進路情報が発表されるのを待って一から計算を開始するのではなく、台風が実際に通過して経路が確定したところまで逐次計算を進めておき、新しい進路情報の発表とともに続きの高潮計算を行えば、大幅な短縮につながる。予報円に基づいて複数の条件で高潮計算をする場合の時間短縮にも、この方法は非常に有効である。

あるいは、気象庁の津波予報のように、あらかじめ様々な台風の条件に対して高潮を計算してその結果のデータベースを構築しておき、台風来襲時に似た条件のものを検索する、という方法も考えられる（高橋ら，2003）。ただし、どのような基準で似た台風の条件を検索するのか、

また、どのくらいの精度が得られるかについては、検討が必要である。

### 6.3 リアルタイム浸水予測システムへの発展

防災の観点では、高潮予測そのものが最終目的ではなく、その台風によって起きる被害の予測に結びつけることが重要である。そこで、あらかじめ港湾や海岸の防護施設の天端高や背後地の地盤高をデータベース化しておき、高潮予測値と比較することで浸水の可能性を即時に判定できるシステムに発展させる必要がある。ところが、背後地の浸水を運動方程式に基づいてリアルタイムに予測することは、現在のコンピュータの演算速度では不可能に近い。しかし、あらかじめ高潮による潮位レベルについて幾つかのシナリオを設定しておき、これらに対する浸水計算を実行してその結果をデータベース化しておけば、高潮防災に非常に有用である(高橋ら, 2003)。

ところで、ここまで高潮だけを議論してきたが、顕著な高潮が発生したときには波浪も発達していると考えられる。台風9918号のときにも見受けられたように、高潮を含む潮位が堤防や護岸を超えなくても、断続的な越波によって背後地が浸水し(平石ら, 2000)、繰り返し作用する波力によって堤防や護岸のバラベツト、さらに本体までが破壊され、越波が促進されることがある(高橋ら, 2000)。したがって、高潮予測とともに波浪予測も必要である。ただし、ここでいう波浪予測とは、風による波浪の発達と伝播(例えば、第三世代波浪推算モデル; 橋本ら, 2002)の他に、地形性砕波など浅海域における波浪変形も含む。

次に、高潮を含む潮位と波浪から、堤防や護岸の越波流量や越流量を予測する。実際の台風では高潮偏差のピークと有義波高のピークが必ずしも同時ではないことも知られており(國富ら, 1999; 河合ら, 2002)、高潮偏差や有義波高のピーク値だけでなく、ピーク前後の経時変化まで正確に予測できるように、高潮推算と波浪推算の両方の精度を高めていかなければならない。堤防や護岸の背後地の浸水深は、越波流量と排水流量の差を時間積分したものになるので、高潮や高波の継続時間という概念が非常に重要になる。

## 7. 結論

本研究では、大阪湾や東京湾の周辺に来襲したいくつかの台風を例として、経験式と数値計算モデルによる高潮予測の精度を調べた。また、数値計算モデルを用いて高潮予測を行う場合に必要とされる最小格子間隔などの

計算条件についても検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・経験式に台風モデルによる気圧や風を用いると、高潮偏差の最大値が観測値よりも大きく、その起時を早めに推定する場合がある。
- ・副振動を含め、高潮偏差の経時変化を予測するためには数値計算モデルが必要である。
- ・数値計算モデルで大阪湾、東京湾の高潮予測を正確にするためには、格子間隔をそれぞれ1.8km, 0.6km程度にすることが望ましい。また、台風がおおむね北緯31度に達する前に立ち上げの操作を終える。また、高潮予測に関する今後の課題についてもまとめた。

## 8. あとがき

本研究では、大阪湾と東京湾の周辺に来襲したいくつかの台風を例として、経験式や数値計算モデルによる高潮予測の精度や、数値計算モデルに必要とされる計算条件を明らかにした。他の海域についても同様な検討を行う必要がある。その一方で、6.今後の検討課題に記したように、台風の最大風速半径の設定方法の検討、高潮計算プログラムの演算時間の短縮、リアルタイム浸水予測システムへの発展も必要であると考える。

(2004年5月14日受付)

## 謝辞

本研究のうち東京湾に関する検討の一部は国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所からの受託研究として実施したものであり、高潮計算に必要な水深データの作成では株式会社エコーの三原正裕氏他にご助力いただいた。また、台風経路の図化には鎌田輝男氏によるフリーソフト「白地図 MapMap34」で作成した地図画像を利用した。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 河合弘泰・平石哲也・丸山晴広・田中良男(2000): 台風9918号による高潮の現地調査と追算, 港湾技研資料, No.971, 43p.
- 河合弘泰・竹村慎治・原 信彦(2002): 東京湾における台風による高潮と高波の同時性と継続時間特性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.251-255.
- 河合弘泰・川口浩二・橋本典明(2003): 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築, 港湾



空港技術研究所報告, 第 42 巻, 第 3 号, pp.85-110.  
 気象庁(2003):平成 16 年潮位表, CD.  
 國富將嗣・高山知司・間瀬 肇・吉岡 洋(1999):観測データによる大阪湾における高潮と高波の同時生起性, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp.333-338.  
 柴木秀之・渡辺 晃(2002):密度成層と Wave Setup を考慮した多層高潮推算に関する研究, 土木学会論文集, No.719/II-61, pp.47-61.  
 高橋重雄・河合弘泰・高山知司(2000):1999 年の台風 18 号による災害と今後の高潮・高波対策について—高潮対策施設の性能照査と性能設計, 土木学会誌, Vol.85, pp.67-70.  
 高橋重雄・富田孝史・河合弘泰(2003):性能設計の高潮対策施設への適用に関する基本的な考え方, 港湾空港技術研究所資料, No.1042, 27p.  
 中平順一, 吉田武司, 高山知司, 間瀬 肇(2003):高潮・高波の簡易予測システムの構築とその運用, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.201-205.  
 額田恭史・山本忠治・福山博己(2003):第三世代ノウハウシステムに対応した NEW カムインズの構築, 沿岸センター研究論文集, 財団法人沿岸開発技術研究センター, No.3, pp.73-76.  
 橋本典明・川口浩二・河合弘泰・松浦邦明・市川雅史(2002):港湾・海岸構造物の合理的設計を目的とした確率台風モデルの構築と精度の検討, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.176-180.  
 橋本典明・杉本彰・川口浩二・宇都宮好博(2002):局地気象モデルと第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.201-205.  
 檜垣将和(2001):数値モデルによる高潮の予報, 海と空, 第 76 巻, 第 4 号, 海洋気象学会, pp.203-206.  
 平石哲也・平山克也・河合弘泰(2000):台風 9918 号による越波災害に関する一考察, 港湾技研資料, No.972, 19p.  
 本多忠夫・光易 恒(1980):水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp.90-93.  
 山口正隆, 畑田佳男, 花山格章, 曾我部健一(1995):台風時波浪および高潮のリアルタイム予測システムの適用性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.316-320.  
 山下隆男・中川勇樹(2001):白波砕波せん断応力を考慮した波浪・高潮結合モデルによる台風 9918 号による八代海の高潮の再現, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.291-295.  
 Myers, V. A. and Malkin, W. (1961): Some Properties of

Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories, U. S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49.

Veltcheva, A.D.・河合弘泰(2002):台風の気圧分布の歪みと超傾度風を考慮した高潮推算, 海岸工学論文集, pp.241-245.

付録-A

本研究で用いた台風の各時刻における諸元を表-A.1~A.5に示す。最初の時刻に中心気圧が1013hPaとなっているのは、高潮の数値計算の初期値として台風のない状態を与えたためである。計算開始から6hrをかけて徐々に実際の条件に近づけた。

表-A.1 台風 0310 号の諸元

月	日	時	経度 (deg)	緯度 (deg)	中心気圧 (hPa)	台風半径 (km)	移動速度 (km/h)
8	6	18	128.8	23.2	1013	80	20
8	6	21	128.8	23.9	984	90	20
8	7	0	128.6	24.6	953	90	23
8	7	3	128.4	25.3	950	90	25
8	7	6	128.3	26.0	950	90	25
8	7	9	128.2	26.6	950	90	25
8	7	12	128.2	26.9	950	90	15
8	7	15	128.5	27.5	945	100	15
8	7	18	129.1	27.9	945	100	20
8	7	21	129.4	28.4	945	100	20
8	8	3	130.8	29.4	950	100	30
8	8	6	131.6	30.1	950	100	35
8	8	9	132.0	30.7	955	100	30
8	8	12	132.7	31.5	955	100	30
8	8	15	133.1	32.1	955	100	30
8	8	18	133.6	32.7	955	100	25
8	8	21	133.9	33.2	950	100	20
8	9	0	134.3	33.7	955	100	20
8	9	4	135.0	34.4	965	120	20
8	9	6	135.4	34.7	970	130	25
8	9	9	136.4	35.7	975	130	35
8	9	12	136.9	36.6	980	130	40
8	9	15	139.1	37.6	980	130	50

表-A.2 台風 9810 号

月	日	時	経度 (deg)	緯度 (deg)	中心 気圧 (hPa)	台風 半径 (km)	移動 速度 (km/h)
10	17	0	124.9	27.2	1013	100	31.7
10	17	3	125.6	27.8	975	150	44.3
10	17	6	126.9	28.8	975	130	55.3
10	17	9	128.2	29.6	975	120	50.6
10	17	12	129.3	30.4	975	150	36.5
10	17	15	129.8	31.0	975	200	49.9
10	17	18	131.2	31.9	975	230	68.0
10	17	21	132.6	32.9	980	240	70.3
10	18	0	134.2	34.8	980	220	89.5
10	18	3	135.8	36.9	980	200	89.6
10	18	6	137.6	39.0	980	300	86.0
10	18	9	139.0	41.0	980	300	67.6
10	18	15	140.9	43.8	986	300	64.0
10	18	21	144.5	46.1	990	300	75.2

表-A.3 台風 0221 号の諸元

月	日	時	経度 (deg)	緯度 (deg)	中心 気圧 (hPa)	台風 半径 (km)	移動 速度 (km/h)
10	1	3	136.3	27.3	1013	50	65
10	1	9	137.5	29.6	945	50	65
10	1	12	138.0	31.0	945	60	65
10	1	14	138.3	32.5	950	70	65
10	1	15	138.4	33.0	950	75	65
10	1	16	138.5	33.5	950	75	65
10	1	17	138.9	34.0	955	80	65
10	1	18	139.0	34.4	955	80	65
10	1	19	139.3	34.9	958	85	50
10	1	20	139.6	35.3	960	85	55
10	1	21	140.0	35.9	965	90	60
10	1	22	140.3	36.7	967	110	60
10	1	23	140.6	37.5	968	130	60
10	2	0	140.9	38.3	970	150	60
10	2	3	141.3	40.4	975	200	60

表-A.4 台風 0115 号の諸元

月	日	時	経度 (deg)	緯度 (deg)	中心 気圧 (hPa)	台風 半径 (km)	移動 速度 (km/h)
9	9	3	141.6	28.7	1013	70	6.5
9	9	6	141.3	29.2	979	70	13.1
9	9	9	140.6	29.8	945	70	19.6
9	9	12	139.8	30.1	945	70	26.3
9	9	15	139.1	30.5	945	70	21.2
9	9	18	138.7	30.8	945	70	15.4
9	9	21	138.4	31.1	950	70	17.8
9	10	0	137.9	31.5	950	70	17.8
9	10	3	137.6	31.8	955	70	12.9
9	10	6	137.5	32.1	955	75	13.3
9	10	9	137.4	32.5	960	75	13.3
9	10	12	137.3	32.8	960	90	11.3
9	10	15	137.3	33.1	960	100	12.7
9	10	18	137.6	33.4	960	85	12.0
9	10	21	137.8	33.6	960	80	12.0
9	11	0	138.1	33.9	960	80	15.4
9	11	3	138.5	34.2	965	90	20.2
9	11	6	139.0	34.7	970	75	24.0
9	11	9	139.5	35.2	970	50	24.6
9	11	12	139.9	35.8	974	50	23.7
9	11	15	140.3	36.3	976	80	31.2
9	11	18	141.2	37.1	985	150	36.9

表-A.5 台風 8506 号の諸元

月	日	時	経度 (deg)	緯度 (deg)	中心 気圧 (hPa)	台風 半径 (km)	移動 速度 (km/h)
6	29	21	130.5	26.8	1013	90	25
6	30	3	131.0	28.2	965	90	30
6	30	9	132.0	29.7	965	90	30
6	30	15	133.3	31.0	965	120	40
6	30	21	135.3	32.5	965	120	70
7	1	3	138.6	35.0	968	130	80
7	1	6	140.3	36.7	970	150	80
7	1	9	142.0	38.3	972	270	70
7	1	15	144.9	41.5	974	300	40
7	1	21	147.0	43.0	977	300	40

港湾空港技術研究所資料 No.1085

2004.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 あんざい

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。