

台風モデルを用いた高潮予測に関する基礎的研究

武田 誠*, 松尾 直規*, 松田 悦郎**

Study on Prediction of Storm Surge by Use of Typhoon Model

Makoto TAKEDA*, Naoki MATSUO* and Etsuro MATSUDA**

(Received June 30, 2001)

In this study, the characteristics of the parameters used in a typhoon model for storm surge analysis are investigated, and the parameters obtained are applied to the prediction of storm surge.

First, the parameters of a typhoon model are calculated to match computed values for atmospheric pressure and wind to the observed values. Through the estimation of their characteristics, it is found that the temporal change of r_m for the atmospheric pressure distribution has three patterns and C_2 for the wind distribution decreases when the typhoon approaches.

Next, several storm surges are predicted by use of the forecasting parameters of the typhoon model. The course of the typhoon was not predicted, values of r_m , C_1 , C_2 and the center atmospheric pressure are predicted, and the tide level is analyzed by use of the typhoon model with these parameters. The predicted values of tide level realized the observed values with enough accuracy. The validity of the storm surge prediction method examined in this study was successfully discussed.

Keywords : storm surge analysis, characteristics of parameter for typhoon model, numerical analysis

1. はじめに

室戸台風や伊勢湾台風などの過去の高潮災害では、地盤沈下のため海面より低くなった地域（ゼロメートル地帯）が被災の中心であった。このため、高潮防災対策は、海水の陸地への侵入を防止することを第一とし防潮堤・水門の建設、排水ポンプの整備、さらに港

湾内の流木などの防止対策がとられた。しかし、このようなハード対策のみでは、計画以上の高潮が来襲した場合治水効果は期待できず、さらに高い防潮堤を整備するとしても、その周辺住民に圧迫感を与えるなど生活質および財政面からの問題も多い。そこでこれからは、ハード対策と合わせて避難などのソフト対策の整備が望まれる。例えば、ハザードマップを作成し、高潮被害を受けると思われる地域の住民に配布し危険意識を促すことや、大きな高潮が予想された場合、低

*土木工学科 (Department of Civil Engineering)

**建設工学専攻大学院生 (Graduate Student, Constructional Engineering)

地住民の避難、防潮堤に付属する水門の閉鎖、排水ポンプの運転待機、湾内船舶の沖合への避難などの対策がとられる。ソフト対策において一番重要なのは、住民の避難である。避難を行う場合において、その発令時刻の設定が重要であり、そのためには、高潮潮位の予測が不可欠である。したがって、高潮解析法の構築およびその予測手法の構築は極めて重要な課題である。

著者らは予測という観点から、多大な計算時間を要しない台風モデルを用いた高潮解析法の精度向上を目指し、そのパラメータの設定法について検討してきた。具体的には観測された気圧、風速データを用いて台風モデルのパラメータを逆算する方法である。これまでの検討により、台風を表現するのではなく、計算領域の気圧、風速を精度良く再現する立場からのモデル化により、最大旋衡風速半径 r_m は台風の接近とともに増加することや、傾度風の減衰係数 C_2 は台風の接近とともに減少するなど、それぞれのパラメータの時間的変化特性が示された。本研究では過去 10 年間で名古屋港に大きな高潮を引き起こした 11 個の台風を対象に、台風モデルのパラメータを算出することで、台風によるそれらパラメータの変化傾向を検討し、このような台風モデルを用いた高潮解析の精度について検証する。また、台風モデルのパラメータを予測して高潮解析を行うことで、高潮の実時間予測についての検討を行う。

2. 数値解析モデル

高潮解析の支配方程式には以下の浅水方程式を用いる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = & -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{xx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = & -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \frac{\tau_{yy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、変数は慣例に従うものとし、詳細は武田ら¹⁾²⁾を参照されたい。また、水表面における風のせん断応力を τ_{xx} , τ_{yy} で表し、水表面にかかる気圧は P である。風と気圧が水表面の境界条件となり、それらの計算には台風モデルを用いた。気圧分布は式(4)により求め、風速は台風の移動に伴って発生する風(V_p)と傾度風(V_{gr})から換算される海上 10m の風(V_s)とのベクトル和として決定する。

$$P = P_c + \Delta P \exp(-r_m/r) \quad (4)$$

$$V_p = C_1 V_i \exp(-\beta r) \quad (5)$$

$$\frac{V_{gr}^2}{r} + f V_{gr} = \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (6)$$

$$V_s = C_2 V_{gr} \quad (7)$$

ここで、 r は台風中心からの距離、 P は距離 r における気圧、 P_c は中心気圧、 ΔP は中心気圧低下量 ($\Delta P = P_\infty - P_c$ で P_∞ は初期気圧)、 r_m は最大風速半径、 V_i は台風の移動速度、 C_1 は台風の移動に伴う風の減衰係数、 C_2 は傾度風の減衰係数、 V_s は V_{gr} に比べて 30° 内側に傾くものとする。また、 ρ_a は空気の密度 (1.293 kg/m^3)、 f はコリオリの係数 $f = 8.31 \times 10^{-5} \beta = \pi / (500 \times 1000)$ ³⁾ である。

本研究では実際の風速場と気圧場を再現するように台風モデルのパラメータ r_m 、 C_1 、 C_2 を算出し、得られた結果からパラメータの特性を検討する。なお、本研究の場合、 β は上記の一定値を用いた。

3. 計算領域と観測地点

解析には、名古屋港において 1989~1999 年の 10 年間で最大潮位偏差 50cm 以上を引き起こした表 1 に示す 11 個の台風を対象とした。

計算期間は、表 1 に示す台風 11 個それぞれの台風が名古屋港に最接近した時刻を基準に設定した。この計算期間の設定に基づき、11 個の台風の中心気圧と位置(緯度、経度)データを収集した。また、本研究にお

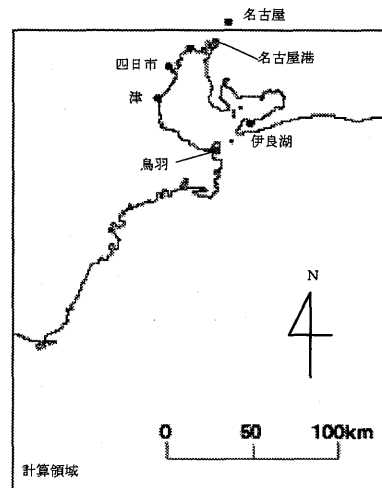


図 2 計算領域

表 1 対象台風

台風名	計算開始時間		最接近時間		計算終了時間		潮位偏差
	日付	時刻	日付	時刻	日付	時刻	cm
9019	9月19日	0:00	9月20日	1:00	9月20日	8:00	167
9021	10月7日	0:00	10月8日	14:00	10月8日	21:00	71
9028	11月29日	0:00	11月30日	19:00	12月1日	3:00	97
9119	9月26日	0:00	9月28日	0:00	9月28日	8:00	76
9313	9月3日	0:00	9月4日	6:00	9月4日	14:00	54
9314	9月8日	0:00	9月9日	11:00	9月9日	19:00	59
9426	9月28日	0:00	9月30日	0:00	9月30日	8:00	152
9612	8月13日	0:00	8月15日	0:00	8月15日	7:00	55
9707	6月19日	0:00	6月20日	12:00	6月20日	18:00	110
9709	7月25日	0:00	7月26日	19:00	7月27日	0:00	72
9810	10月17日	0:00	10月18日	2:00	10月18日	10:00	89

ける計算領域を図1のような伊勢湾を囲む領域とした。計算領域内の観測所（四日市、津、名古屋、伊良湖）から海面気圧、風速、風向のデータを、また鳥羽、四日市、名古屋の観測所から潮位のデータを得た。

4. 台風モデルを用いた高潮解析の精度評価

4.1 気圧場に関する r_m の算出

気圧場を表す式(4)を次のように展開し、パラメータ r_m を求めた。

$$r_m = r(\log(\Delta P) - \log(P - P_c)) \quad (8)$$

なお、初期気圧は表2のように、計算開始時刻における4つの各観測所の海面気圧の平均値とした。

得られた r_m の変化特性は大きく分けて図2の2つのケースに分けることができた。

CASE I：徐々に増加をつづけるが、台風が観測所に最接近した時、急激に r_m が低下し、その後増加傾向にあるもの（台風9019号、台風9021号、台風9028号、台風9707号、台風9709号、台風9810号）。

CASE II：最接近時に r_m の急激な減少がなく、増加をつづけるもの。ただし、CASE IIは来襲前後で r_m の増加勾配が大きく変化しないもの（(a)、台風9119号、台風9612号）と、来襲後の r_m の増加勾配が来襲前よりも大きくなるもの（(b)、台風9313号、台風9426号）に分けられそうである。

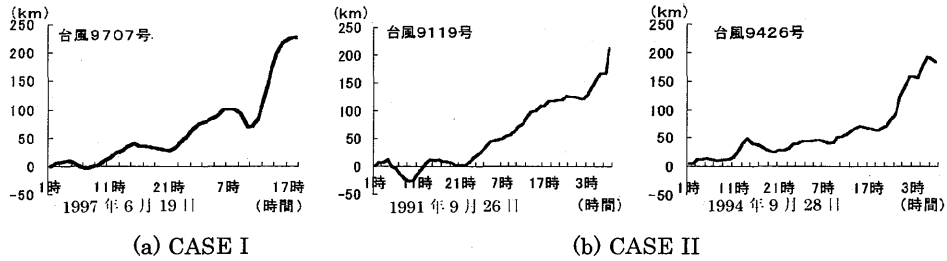
これらの要因として、本研究で用いた台風モデルは初期において r_m がゼロとなり、はるか遠方に存在する台風を表現していないが、台風が接近するにつれて観測された海面気圧が台風の影響を受け、それを表現す

表 2 台風の初期気圧

台風名	初期気圧 (hPa)
9019	1007.5
9021	1013.5
9028	1018.5
9119	1019.0
9313	1010.4
9314	1010.0
9426	1011.7
9612	1008.8
9707	1016.0
9709	1011.9
9810	1010.6

るために r_m が増加する。さらに台風が北上すると海域の水温低下や陸域の影響を受けて台風は減衰するため、中心気圧が上昇し、最大旋衡風速半径 r_m が大きくなる。それゆえ、台風の接近とともに全てのケースで r_m が増加したものと考えられる。台風通過後は陸域の影響を受けて、台風がさらに減衰するため r_m は増大する。これにより全ケースで台風通過後も r_m が増大したものと思われる。

また、CASE I、II (b)は台風の影響で気圧場が乱され、それを表現するために r_m が急激に変化したとも考えられる。さらに、CASE Iについて「紀伊半島付近から伊勢湾に向かって台風が移動してくる」といった、台風コースの共通点が見受けられた。このこと

図2 r_m の時間変化

からCASE Iでの急激な r_m の減少は、台風が伊勢湾に進入し勢力が回復したためとも考えられる。これについては、まだ推察の域を脱していないため、今後の検討が必要である。

4.2 風速分布式に関するパラメータの評価

4.2.1 C_1 、 C_2 の変化傾向

台風モデルのパラメータ C_1 、 C_2 を観測された風速から求める。ただし、各観測地で得られた風速データは地上風であり、この値を海上風に変換する必要がある。今回の解析では、まず、それぞれ観測された標高が異なるため、次式の対数則を用いて、標高10mの風に変換する。

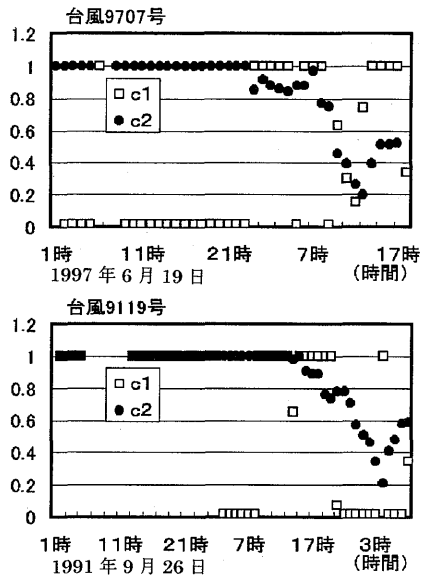
$$u_{10} = u_{ob} \log \frac{y_{10}}{y_0} / \log \frac{y_{ob}}{y_0} \quad (9)$$

ここに、 u_{10} は標高10mの風に変換された地上風、 u_{ob} は観測された地上風、 y_{10} は標高10m、 y_0 は粗度係数、 y_{ob} は観測地点の標高である。

次に、地上風を海上風に変換する。ここでは、武田ら⁴⁾に習い関西国際空港で観測された海上風と地上風の比をもとに地上風に変換係数1.6を乗じて海上風を算出する。

C_1 、 C_2 は解析的に解くのが困難であるため、 C_1 を1/70~70/70まで、 C_2 を0.01~1.00まで変化させて風速の解析を行い、鳥羽、四日市、伊良湖における計算された絶対風速と観測値から換算された海上風のそれとが最も一致する場合の C_1 と C_2 を抽出した。

図3に得られた C_1 、 C_2 の時間変化の一例を示す。 C_2 の一般的傾向として、台風が遠い所に存在しているとき1.0に安定し、台風が伊勢湾に近づくにつれ低下することがわかる。これは、台風が遠い位置にある場合、台風の移動に伴う風と傾度風ともに小さいが、実際には気圧勾配が存在しそれに伴う風が発生したり、地形に起因する局所的な風が発生するなど台風に関連しない風が生じているため、台風モデルがその風を表現しようとしてパラメータが最大値をとっている。また、台風が接近すると傾度風が大きくなるため、実際の風速を表現しようとして C_2 が低下したのと考えられ

図3 C_1 と C_2 の時間変化

る。このような C_2 の低下現象はほとんどの台風でみられた。しかし、その低下勾配は様ではなく、最接近時の C_2 の値も最大値0.95、最小値0.39、平均値0.57とばらついていた。

一方台風の移動に伴った風のパラメータである C_1 については特徴的な傾向がつかめなかった。

4.2.2 風速の計算値と観測値との比較

図4に台風9119号における伊良湖および台風9707号における津で観測された東西方向、南北方向の風速成分と、解析されたそれらとの比較を示した。

本計算領域のなかで、海上気圧に関して4箇所、風向風速に関して3箇所の少ない観測データを用いた解析であるにも関わらず、図4の計算値は観測値をある程度表現しているといえる。台風の位置別に比較してみると、台風が遠く離れている場合、計算値と観測値は、一致していないものがあつた。この原因として、台風が観測所より遠くに存在する場合、台風の影響が小さく、計算領域における季節的な風が卓越していた

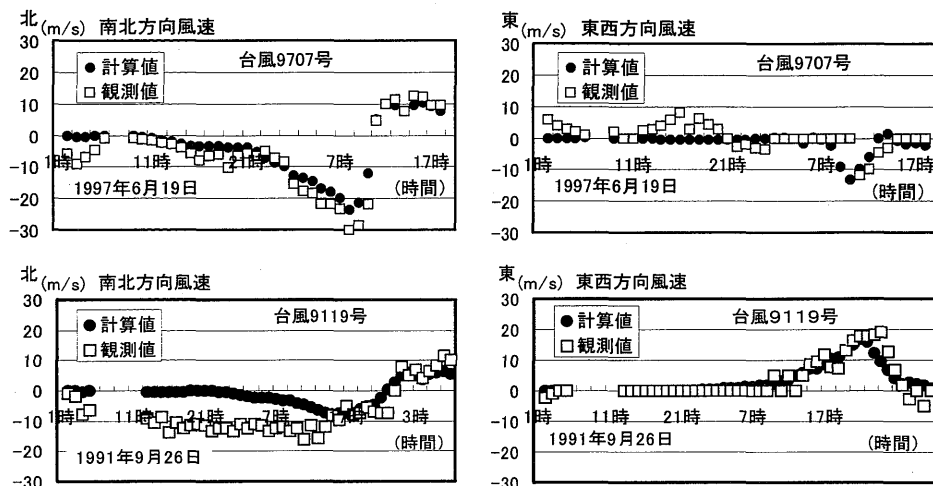


図4 風速の再現結果

ため、本モデルでは表現できなかったものと思われる。台風の影響が現れてきたと思われる時間帯（最接近時から前後約 10 時間程度）を見てみると、大小の差が多少なりともあるものの、東西方向における風速の変動傾向が全般に一致していることが見受けられた。それに対して南北方向においては一致していないものがある。これは、伊勢湾に進行する台風の経路は大半が南もしくは南西からによるものであるという台風のコースに起因するものと考えられる。

4.3 潮位偏差から見た台風モデルの適用性

算出したパラメータを用いた高潮追算の精度を評価するため、潮位偏差の時間変化を解析し観測値との比較を行う。図5に名古屋港における潮位偏差の時間変化を示す。本図から、計算値は観測値を十分に再現できていることが分かる。ただし、計算の初期に潮位偏差の振動が見られる。計算の初期は、台風によらない風を台風モデルで表現していることより、その誤差が生じたものとも考えられる。また台風 9709 号は他の台風の場合と異なり、解析結果と観測値とに大きな差が生じている。この原因として、台風 9709 号は、伊勢湾から遠く離れた場所を進行していることより、伊勢湾の気圧分布、風速分布を台風モデルが十分に表現しきれなかった可能性はある。さらに、台風 9019 号と台風 9810 号は解析値と観測値が大きくずれている。この一つの原因として考えられるのが、風速分布の評価法のあいまいさであろう。風速分布式の C_1 、 C_2 は伊勢湾周辺の海に近い観測所で計測された風速を用いて、それらを平均的に表現するように求められている。ここで、もし観測された風速が地形の影響を受けて、変化しているのであれば、その誤差が高潮解析に影響

を与えると考えられる。この局所的な地形による風速値のひずみの除去はかなり困難と考えられるが、これについては用いる観測地（観測データ）を増やすことでいくらかは抑えられると考えられる。また、風速分布式の C_1 、 C_2 の評価には、観測された海上風を用いているが、それは前述したように観測された地上風を高度 10m の風に変換し、海上風と陸上風の換算係数を用いて海上風に変換している。この手法に用いた粗度係数や換算係数について検討する必要があるだろう。

さらに、ピークを過ぎてからの潮位偏差の変化が観測値を表していないものもある。これは湾形状の再現性に問題があると考えられる。本研究の場合の格子スケールは一辺 1250m であり、このようなスケールで例えば名古屋港を表現するとかなり粗くなってしまうため解析結果に振動が加わってしまうことが推察される。

これらの検討から、詳細にみればまだ多くの検討課題はあるものの、本研究で示したように気圧、風速などの観測値を用いて台風モデルのパラメータを決定し、それを高潮解析に用いれば、十分な精度で高潮解析が行えることが分かった。しかし、格子スケールの検討や、初期の振動発生の原因解明などまだ多くの課題も残されている。

5 高潮予測法に関する試み

5.1 台風モデルによる高潮予測

これまでの検討から、台風モデルの係数を気圧および風速の観測値を用いて設定すれば、解析結果は台風来襲時の気圧場と風速場を十分に再現することが可能となり、解析される潮位偏差も十分な精度となることが示された。前述したように、高潮時の避難対策を策

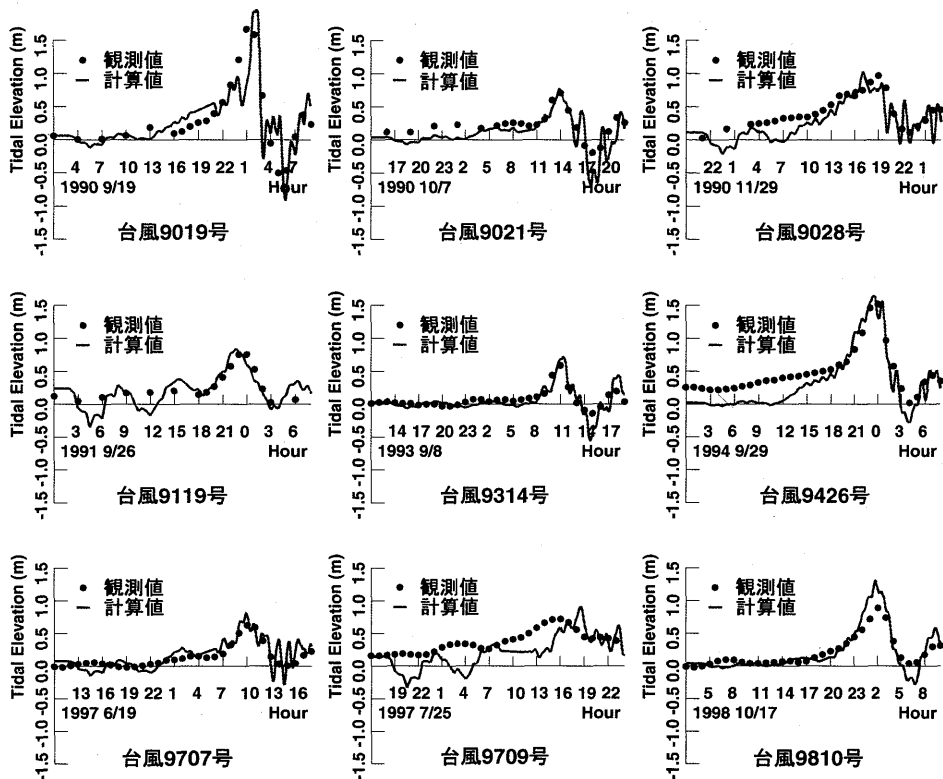


図5 名古屋港における潮位偏差の再現結果

定するには避難情報発令時刻が重要であり、その設定のためには高潮の予測が不可欠であろう。ここで、高潮解析においてその精度の良否を決めるパラメータ r_m 、 C_1 、 C_2 の変化傾向をみると、それらは概ね滑らかに推移しているようであることから、何らかの関数を用いて変化を予測できそうだと考えた。

過去のデータより、名古屋港における台風の最接近時と最大潮位偏差の発生する時刻が近く、台風が名古屋港に何時ごろ最接近するかは気象庁の天気予報などからあらかじめ知ることができる。ここで、予測される台風最接近時から4時間前を予測期間とし、この予測期間のパラメータの値を予測し、その値を用い潮位偏差の予測を試みる。なお、本来ならば台風のコースについての予測も必要であるが、ここでは、これについては言及せず、検討段階として過去の台風のコースを用いている。

予測期間内のパラメータを求めるために、予測開始時刻前のどこまで(ここではその期間を解析期間とする)のデータを用いる必要があるのかを詳細に検討す

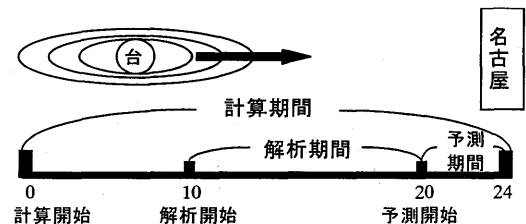


図6 計算に関する期間の設定

べきであるが、それは予測に用いられる関数によっても異なるため一義的に決定できない。したがって、本研究では1つの目安として、予測期間のパラメータの算出には予測開始時刻前の10個のデータを用いることとする。

したがって、本研究では、図6に示すように全体の高潮解析に用いる計算期間は、台風最接近時刻の24時間前(予測開始時刻の20時間前)とし、予測期間のパラメータは、図中の解析期間のパラメータを用いて求めるものとする。

5.2 台風の中心気圧 P_c の予測法

台風の中心気圧の時間的変動を見ると、すべて時間の経過と共に P_c が増加していた。したがって解析期間内のデータを図 7 のように最小二乗法による直線近似で求めた。

計算された P_c の値をみると、解析期間内で P_c が一定勾配で増加するものは十分表現できているが、停滞するものや、急に増加するものは表現できていないとは言えない。しかし、観測値と予測値の差が小さいものが多く、高潮解析に用いても大きな影響は出ないと考え、この予測手法を使うことにした。

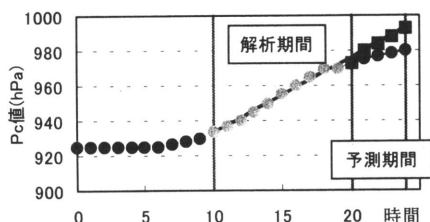


図 7 中心気圧の予測手法

5.3 気圧場に関する r_m の予測法

まず、予測期間の r_m の変動を直線近似で求めてみた。CASE II の台風 9313 号、台風 9612 号の r_m の変化は、直線近似で十分表現できていたが、その他の台風の場合、直線近似では観測値を十分表現できていなかった。したがって本研究では、予測期間内の r_m の予測値を算出するために直線近似を含めた 6 通り（一次直線近似法、二次曲線近似法、移動二次曲線近似法、指数関数曲線近似法、上限値直線変化法、潮岬値代入法）

の方法を用いた。

5.3.1 一次直線近似法（一次）

図 8 ①のように解析期間のデータを最小二乗法により直線近似し、その直線を予測期間まで伸ばし、予測期間内の値とする。

5.3.2 二次曲線近似法（二次）

図 8 ②のように解析期間のデータを最小二乗法により二次曲線近似し、その曲線を予測期間まで伸ばし、予測期間内の値とする。

5.3.3 移動二次曲線近似法（移動二次）

図 8 ③のように予測開始時刻の r_m の値を、上に凸の放物線の頂点とし、解析期間のデータを最小二乗法により二次曲線近似し、その曲線を予測期間まで伸ばし、予測期間内の値とする。

5.3.4 指数関数曲線近似法（指数）

図 8 ④のように予測開始時刻の前 5 時間のデータを最小二乗法により指数関数近似し、その曲線を予測期間まで伸ばし、予測期間内の値とする。

5.3.5 上限値直線変化法（上限値）

図 8 ⑤のようにすべての台風のピーク時刻での r_m 値の上限値を 120 と定め、予測開始時刻の値から上限値まで直線変化させ、予測期間の値とする。

5.3.6 潮岬値代入法（潮岬）

図 8 ⑥のように潮岬に台風が最接近する時刻の 4 時間前の潮岬で観測された r_m の値をそのまま予測期間内の値とする。

これらの方法を用いれば、台風 9019 号は一次、台風 9021 号は移動二次、台風 9028 号は潮岬、台風 9119 号は二次、台風 9313 号は一次、台風 9314 号は一次、

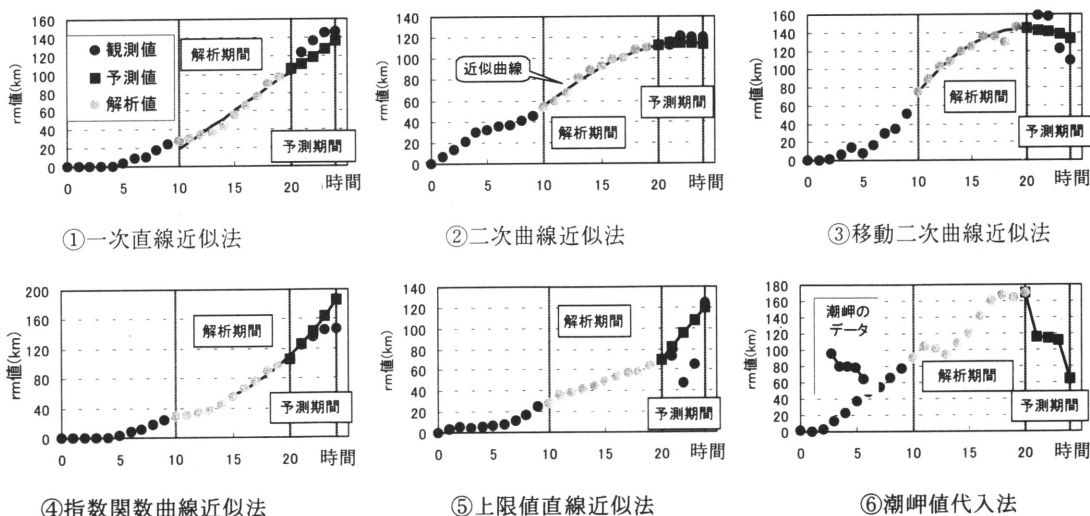


図 8 r_m の予測手法

台風 9426 号は上限値、台風 9612 号は一次、台風 9707 号は潮岬、台風 9709 号は潮岬、台風 9810 号は二次で表現できる。このように 6 通りの手法を用いて r_m の予測値を算出したが、唯一の手法ですべてを表現できるわけではなく、台風によって r_m を表現できる手法は異なることが分かった。これらの方法で台風毎に最適な手法を用いれば、観測値に近い予測値が得られると考え、すべての手法を用いて高潮解析を行うことにした。

5.4 風速分布に関する C_1 、 C_2 の予測手法

C_1 と C_2 の予測法は、予測開始時刻に得られた C_1 、 C_2 の観測値から、ピーク時刻に C_1 には一般値(4/7)、 C_2 には 11 個の台風のピーク時刻の平均値 (0.713) に直線変化させ、予測期間内の値とする。

この手法を用いた解析結果を図 9 に示す。本図より、 C_1 、 C_2 の予測手法は簡単なものであるが、それでも C_2 の変化傾向をある程度表現しているようである。ただし、 C_1 については、十分表現しているとは言えないが、 C_1 は風速に大きく影響しないため、とりあえず現段階ではこの手法を用いる。

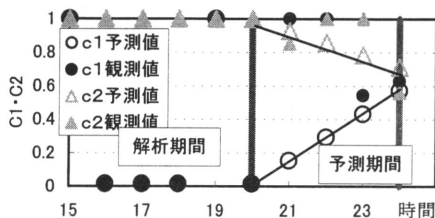


図 9 C_1 と C_2 の予測法

5.4 潮位偏差の予測結果

これまでの予測手法により求めた P_c 、 r_m 、 C_1 、 C_2 を用いて高潮（潮位偏差）の解析を行った。その結果を図 10 に示す。

本図は、5.3 に述べた r_m に関する 6 つの算定法を用いた潮位予測のうち最良のものを示しているが、いずれも観測値を十分に表現しており、本予測手法の妥当性が見て取れる。しかし、比較的潮位偏差が小さいものは精度良く予測できているが、台風 9019 号のような大きいものは若干精度が悪かった。これは、本研究で用いた格子スケールが 1250m であり、この荒さが影響を与えた可能性がある。

本研究の予測は、ピーク時刻までしか行っていないため、その後の揺れ戻しと呼ばれる第 2 波の変動は予測されていない。第 2 波による被害も考えられるため、この予測は今後の検討課題として残っている。また、 r_m の予測手法に関しては、6 通りの中から最適な手法を用いなければならないため、実用化のためのシステムを構築しなければならないことがさらなる課題である。

6 おわりに

本研究では、過去 10 年間の台風来襲期間の気圧と風速データを用いて台風モデルのパラメータを逆算しその時間変化の特性を考察した。その結果、 r_m は三つのケースに分類でき、台風接近に伴い値が増加するが、最接近時には急激に低下するものと、最接近時前後で

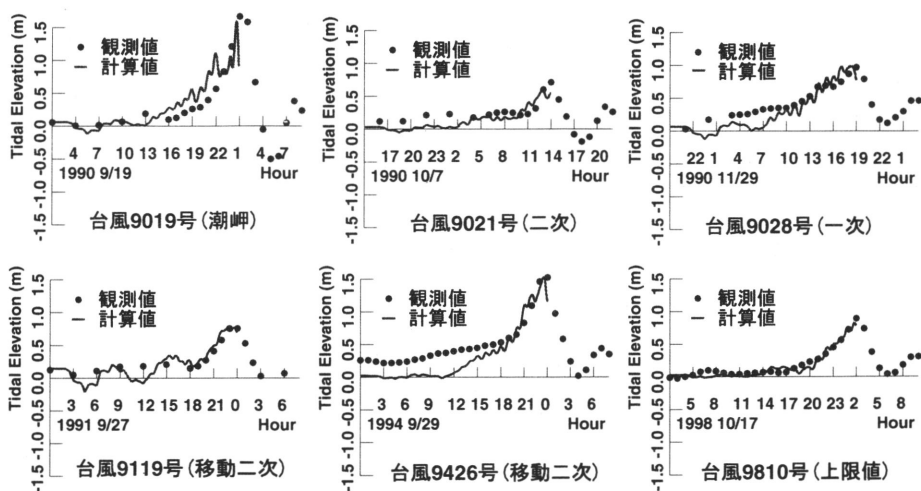


図 10 高潮（潮位偏差）の予測結果

時間的な r_m の増加勾配が変わらないもの、さらに、再接近後急激にその増加勾配が大きくなるものがあることが示された。また、 C_2 は台風が遠方に位置する場合は1.0であるが、台風が近づくにつれて1.0よりも低下することが分かった。ただし、最接近時の値は最大値0.95、最小値0.39、平均値0.57とばらついていた。

さらに、台風モデルのパラメータが概ね時間と共に滑らかに推移しているようであることから、最大潮位偏差生起時刻までの高潮の予測に関する基礎的検討を行った。解析では、台風の位置は既知であるとし、台風の中心気圧と台風モデルのパラメータ r_m と C_1 、 C_2 を時間のみの関数として予測し、高潮（潮位偏差）の予測を行った。本研究により、 r_m は唯一の方法で予測できるわけではなく、本研究では6種類の方法を用い、 C_1 、 C_2 の予測も前述した単純な方法を用いた。これら得られた値を用いて潮位偏差の予測を行ったところ、

予測値はある程度の精度で観測値を表現しており、本予測法の有用性、発展性が確かめられた。

参 考 文 献

- 1) 武田 誠・松尾直規：高潮解析における台風モデルのパラメータの評価，中部大学工学部紀要 第35巻，p.25-31，1999
- 2) 武田 誠・松尾直規・松田悦郎・安井悠一郎：過去10年間のデータを用いた台風モデルの係数評価と高潮追算，総合工学 第13巻，pp.123-132，2001.
- 3) 宇多高明・前原隆生・牧野一正：伊勢湾高潮の実用的予測モデル，第41回海岸工学論文集，pp.261-265，1994.
- 4) 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—，京大防災研究所年報第38巻 B-2, pp.501-515, 1995.