

台風来襲時における高潮即時予測の精度と課題

ACCURACY OF REAL-TIME PREDICTION OF TYPHOON-CAUSED STORM SURGES AND DISCUSSIONS ON ITS IMPROVEMENT

富田孝史¹・河合弘泰²

Takashi TOMITA and Hiroyasu KAWAI

¹正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

The real-time prediction of the storm surge at each port and coast is necessary to mitigate the coastal disaster. The storm surge can be computed in a few hours or less with a numerical model based on long wave approximation by an ordinary personal computer, while the maximum storm surge can be quickly calculated with a simple empirical equation based on the past storm records. In this paper, the storm surges at major points in east Seto Inner Sea, including Osaka Bay, and Tokyo Bay are predicted with the both methods and their results are compared with the measured. As the result, the magnitude of the storm surge by the empirical equation was sometimes larger than the measured and the time of the peak was sometimes earlier by a few hours. For the exact 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. The run of a typhoon should be started on south from the north latitude of 31 deg for the storm surge prediction of these bays.

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

1. はじめに

高潮災害を港湾や海岸の防護施設だけで完全に防ぐことは不可能である。特に、港湾域では防潮堤などにより構成される防護ラインの外側にも物流施設などが展開している。このため、台風接近時に各地点で発生する高潮の最大偏差やその起時を迅速かつ正確に予測できれば、避難活動や浸水防除活動に有益な情報になる。気象庁では、全国を視野に入れて東京湾のような空間スケールで高潮予測を実施しているが、地域に密着したきめ細かな防災のためには港湾や海岸といった小単位での予測が重要である。

港湾や海岸の高潮予測をする手法には、既往の観測値に基づいた実験式(経験式)¹⁾を使う方法がある。経験式と気象庁発表の台風情報とを結合させた高潮予測システムを導入しているところもある。一方、流れの運動方程式を直接計算する方法がある。コンピュータの演算速度の向上によって、現在の普及型パソコンを使用しても1~2時間以内で予測が可能になりつつあり^{2), 3)}、今後数年のうちにこの方法が主流になっていくものと思われる。

本研究では、このような状況を踏まえ、経験式や数値計算モデルによる高潮予測の精度を比較するとともに、その問題点を整理した。具体的には、大阪

湾や東京湾の周辺に来襲した台風を例として両方法により高潮を計算し、これらの結果を観測値と比較した。また、数値計算モデルで高潮予測をする際に必要とされる空間的な格子間隔や台風の立ち上げ位置についても検討した。そして最後に、今後の検討課題についてまとめた。

なお、本研究では経験式や数値計算モデルそのものの推定精度に絞って議論するため、高潮計算に用いた台風の条件は、既往の台風による確定した経路や中心気圧を使用した。台風の気圧分布はMyersの分布にあてはめ、その最大風速半径 r_0 は、沖縄地方~関東地方の気象官署で観測された気圧データから推定した。ただし、実際の高潮予測では、気象庁発表の台風情報に基づいて行うことになるため、台風進路の予測精度が高潮予測に大きな影響を及ぼすことが、これまでの台風来襲時に実施してきた試計算から明らかである。このため、進路の差異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. 高潮予測の方法

(1) 観測値に基づく経験式

日本の代表的な地点においては、台風による高潮偏差の最大値を簡易に求める経験式として、つぎの

ような式が求められている¹⁾。

$$H = a(1010 - P) + bW^2 \cos \theta + c \quad (1)$$

ここに、 H はその台風によって生じる高潮偏差の最大値(cm)、 P は気圧の最低値(hPa)、 W は平均風速の最大値(m/s)、 θ は主風向(湾の軸の方向)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。気象庁は主に1950～1960年代の観測値から全国44箇所の係数を求めており、 c の値は3地点を除いて0である。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、本研究においては各時刻の気圧や風速を入力することでそれに対応する高潮偏差を算出した。また、その気圧・風速の値については、気象官署で実際に観測された値と、Myersの台風モデルから推定した値の両方について検討した。後者について、自由大気の風から海上風に換算するための風速低減係数は0.66、偏向角は30degとした。台風の位置や半径からこの式の入力値となる気圧や風速を求めるのは簡単であり、パソコンを用いれば一瞬で高潮予測を終えることができる。

(2) 長波方程式を差分化した数値計算モデル

高潮の一般的な数値計算モデルは、台風の気圧分布と移動速度から風の場を推定し、その風による海面のせん断応力や海底の摩擦応力、海水の動渦粘性などを考慮して、流れの運動方程式を解くものである。一般的によく使われるモデルは、単層の長波方程式に基づいたものであり、気象庁の高潮予測モデルもその一つである⁴⁾。

また、高潮災害などの後で精度高い高潮追算を行う場合には、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ている^{5), 6)}。

本研究では、高潮の即時予測を行うことを目的としているので、計算負荷の少ない単層の長波方程式に基づく数値計算モデルを用いた。

3. 大阪湾周辺における高潮の予測精度の検討

(1) 対象とする台風と高潮の計算方法

本研究では、大阪湾周辺に影響を及ぼした台風として、図-1に示す台風0310号と9810号をとりあげた。台風0310号は、中心気圧955～970hPa、進行速度20～30km/hで、室戸岬に上陸し大阪湾を縦断するコースを通過した。また、台風9810号は中心気圧980hPa、進行速度70～90km/hで大阪湾の西方を通過した。

図-2は数値計算モデルに用いた領域の構成を示す。領域⑤(安芸灘～紀伊水道の範囲)が最も格子間隔の細かい領域である。このような計算領域の構成の他に、領域⑤に領域④と同じ1.8km格子を適用した場合や、領域④⑤に領域③と同じ5.4km格子を適用した場合についても計算を行った。計算のタイムステップは3sとした。

(2) 経験式と数値計算モデルによる予測値の比較

図-3は、経験式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。これは、気象官署等で観測される風が陸上地形の影響を受けて、台風モデルで推定される海上風よりも全体的に弱まっているためと考えられる。そこで、気象官署で観測された気圧・風を経験式に代入すると、台風0310号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値になった。

また、高潮偏差の最大値の起時については、両台風とも、神戸、大阪、和歌山では観測値とほぼ一致した。しかし、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。なお、高松の経験式では、吹き寄せの効果の係数が $b=0$ になっており、気圧低下に単純に比例した高潮偏差を与えている。

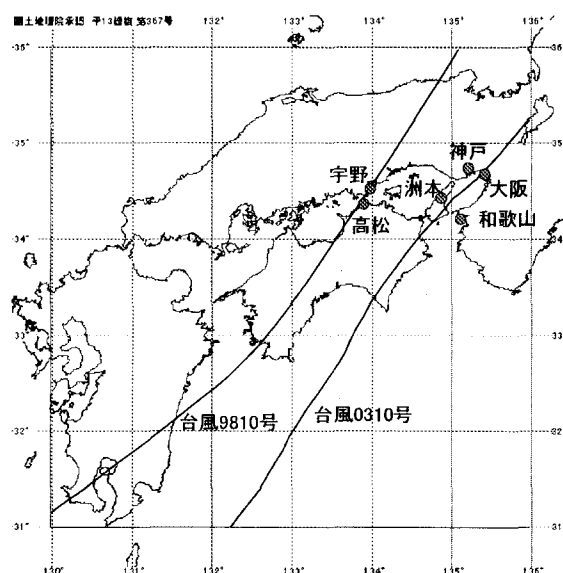


図-1 台風0310号と9810号のコース

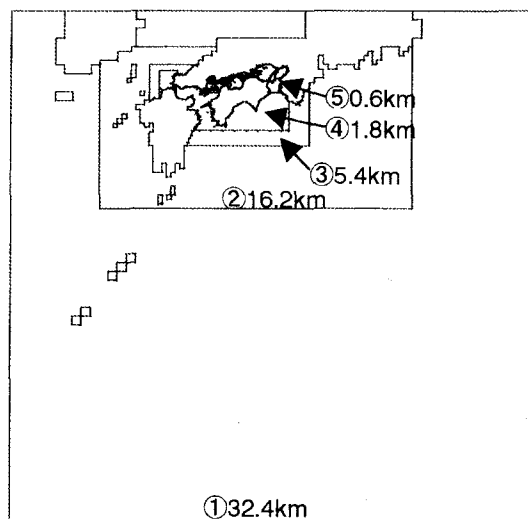
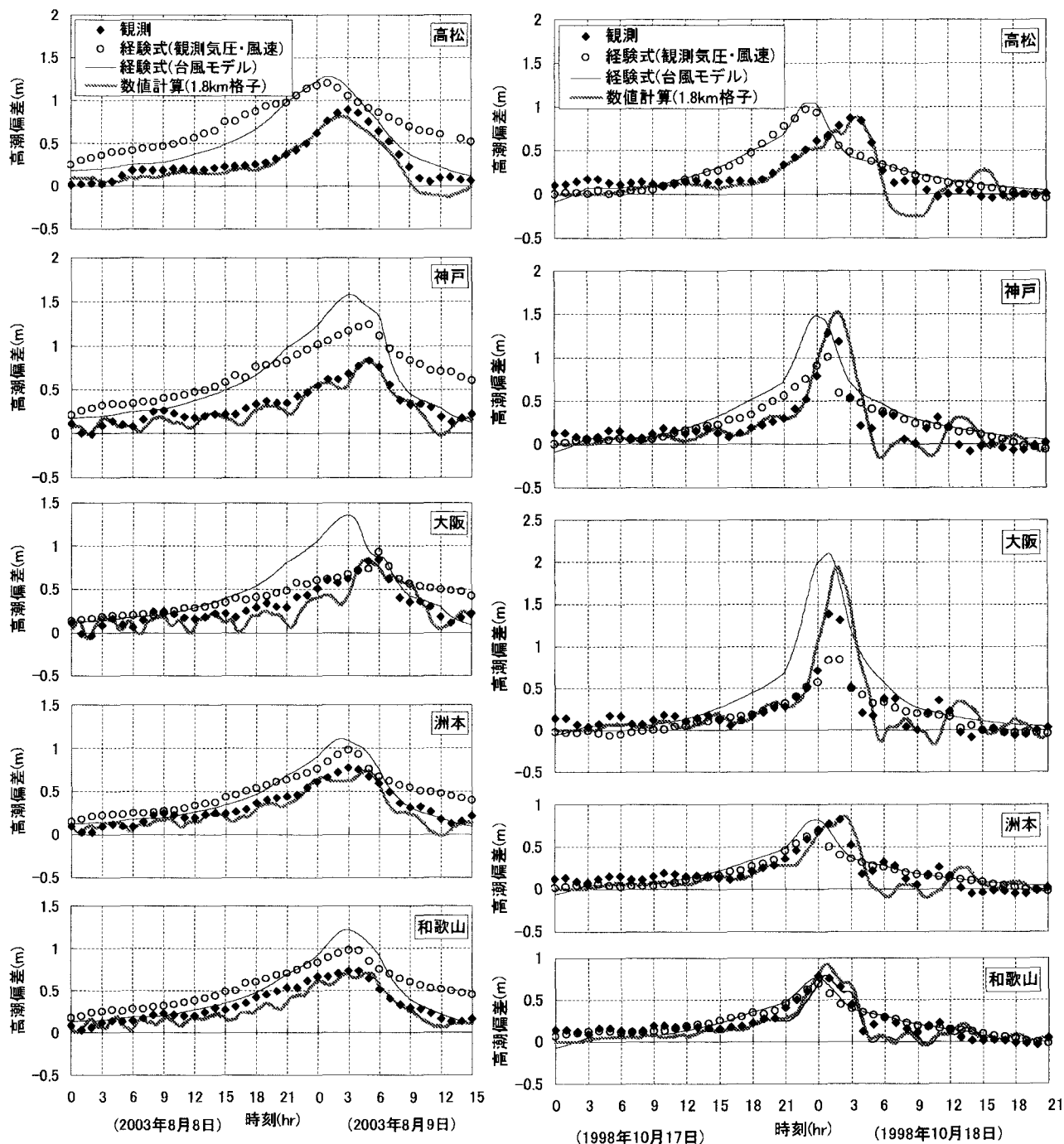


図-2 大阪湾周辺を対象とした計算領域と格子間隔



(a) 台風0310号

(b) 台風9810号

図-3 経験式と数値計算モデルの比較(大阪湾周辺)

一方、数値計算モデルは最小格子間隔が1.8kmであっても経験式より正確に高潮偏差の最大値やその起時を再現している。ただし、台風9810号時の大阪ではやや過大な値になっている。

(3) 数値計算の最小格子間隔

瀬戸内海の海底地形は複雑であり、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、高潮予測では、台風の来襲前に計算を終了しなければならず、計算時間に制約がある。このため、計算

精度と計算時間のバランスが重要である。

図-4は、最小格子間隔によって高潮偏差の最大値を比較したものである。台風0310号時の大阪や神戸では、5.4kmでも0.6kmと大差のない高潮偏差が得られている。しかし、宇野や高松については、少なくともここに示した5.4kmから0.6kmの範囲では、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。格子間隔が0.6kmで十分かどうかを判断するためには、もっと小さな格子間隔で計算を行う必要がある。なお、これらの高潮計算には、台風モデルによって求めた同一の気圧・風

場を用いており、この図に現れた差は海底地形の再現性の違いによって生じたものである。実際の高潮計算で精度を議論する際には、本研究では考慮しなかった、陸上の局所地形による風の変化も重要になると考えられる。

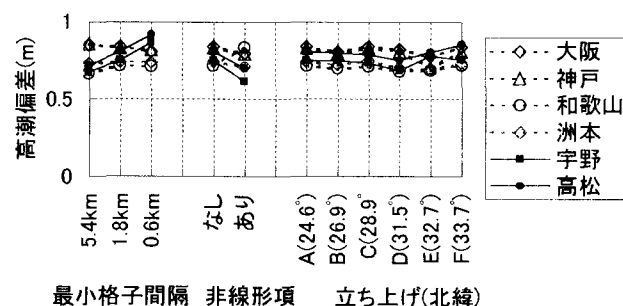
台風9810号時では、神戸で最小格子間隔が5.4kmと1.8kmの高潮偏差に約0.2mの差があり、その他の地点では概ね0.1m程度の差しか生じていない。

一方、本研究のパソコン環境(CPU:Pentium4 2.53 GHz)において、台風0310号(2003年8月6日18時~9日15時の69時間)の高潮計算に要した時間は、最小格子間隔を5.4km, 1.8km, 0.6kmとした場合に、それぞれ約0.8時間、約2.9時間、約8.1時間であった。

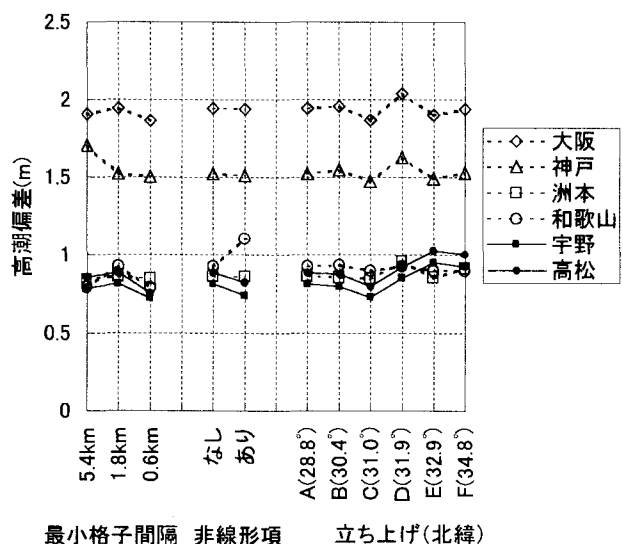
以上の計算格子および計算時間の検討から、今後2~3年に期待されるパソコンの演算速度では、1.8km格子が長波方程式に基づいた高潮の即時的予測における限界であると考えられる。

(4) 線形長波近似と非線形長波近似

図-4の中ほどには、数値計算モデルに非線形項の有無による高潮偏差の比較を示している。宇野、高松、和歌山を除くと、非線形項の影響は小さい。高潮は気圧と風に拘束された強制振動であり、もともと非線形項の影響は出にくいと考えられる。



(a) 台風0310号



(b) 台風9810号

図-4 数値計算の条件と高潮偏差 (大阪湾周辺)

(5) 立ち上げ

高潮予測では、演算時間を短縮させるために、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必要がある。したがって、既に発達した台風による気圧や風を初期値としなければならない。その際、計算開始からステップ関数的に気圧低下や強風を与えると数値的に不安定となるため、徐々に所定の気圧低下量や風速になるように徐々に変化させて実際の状態に近づけなければならない。このため、本研究では、初期の立ち上げ(緩衝)の時間を6hrとした。

図-4の右には台風を立ち上げ終える緯度による高潮偏差の比較を示している。例えば、台風0310号のAは、6hrの立ち上げを終えて北緯24.6から実際の台風の条件を与えた場合である。台風0310号ではAの24.6度からDの31.5度まで、台風9810号ではAの28.8度からCの31.0度まで、高潮偏差に大差はない。したがって、北緯31度までを目安に台風を立ち上げれば良いと考えられる。なお、台風0310号をD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1.8km格子でも演算時間は約1.4時間に短縮される。

4. 東京湾における高潮の予測精度の検討

(1) 対象とする台風および高潮の計算方法

東京湾では、図-5に示す、台風0221号(東京湾接近時の中心気圧は約960hPa, 進行速度は50~60 km/h)と0115号(約975hPa, 約20km/h)を例に検討した。台風0221号では、途中から分岐するコースw, c, eについても検討した。

図-6に数値計算モデルに用いる計算領域の構成を示す。最小計算格子間隔は0.2kmである。このため、計算のタイムステップは1sとした。

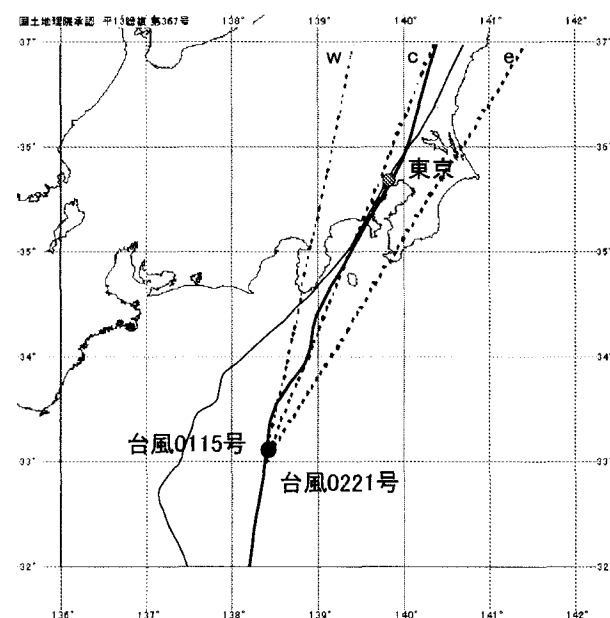


図-5 台風0221および0115号のコース

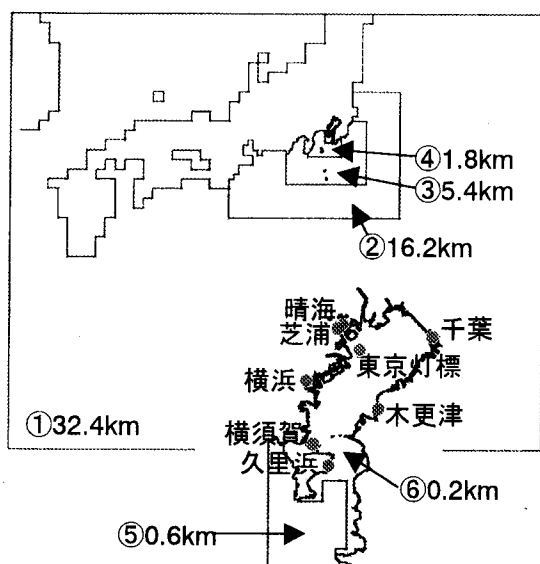
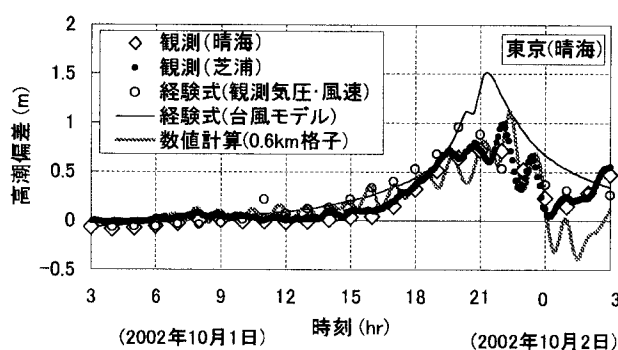
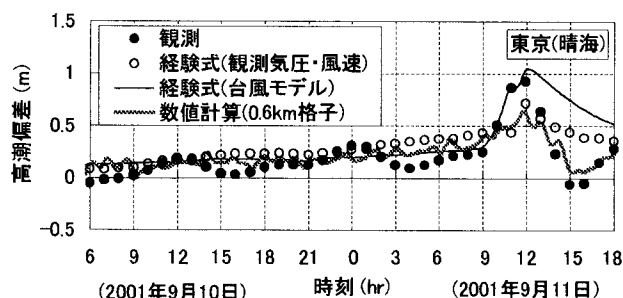


図-6 東京湾を対象とした計算領域と格子間隔



(a) 台風0221号



(b) 台風0115号

図-7 経験式と数値計算モデルの比較 (晴海)

(2) 経験式と数値計算モデルの比較

図-7は晴海(東京)における高潮偏差の経時変化を示す。ただし、台風0115号の前後には太平洋沿岸で異常潮位が生じたため、この図の観測値ではその分として0.35mを差し引いている。観測気圧・風を経験式に代入すると、高潮偏差の最大値は観測値に近い値となるが、0221号ではその起時が観測値よりも早い。一方、数値計算モデルでは、高潮偏差のピークやそれに続く副振動が比較的良好に再現されている。

図-8に、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おいて、数値計算モデルから得

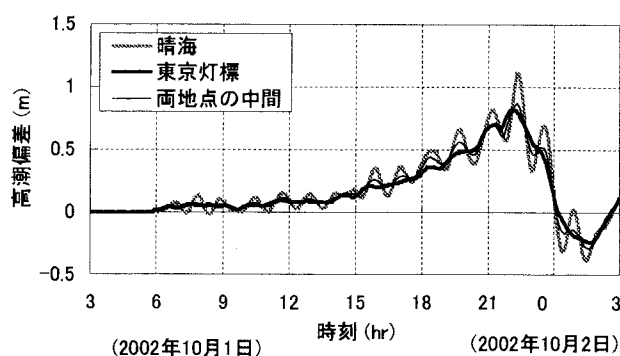


図-8 晴海周辺における副振動

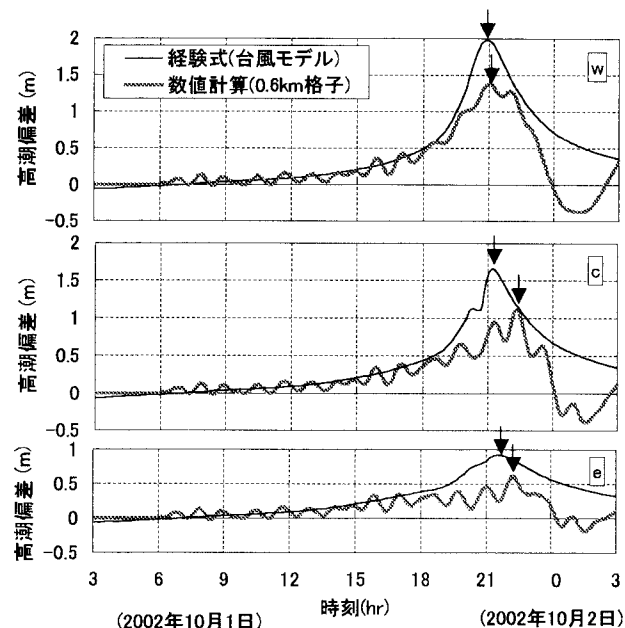


図-9 台風のコースによる高潮偏差の比較 (晴海)

られた高潮偏差の経時変化を示す。晴海側を腹とする周期約80minの振動が発生していることが分かる。東京湾の固有振動周期が60～90minであることはよく知られており、まず風場の変化がきっかけとなってこの固有振動が生じ、さらにこの振動が晴海周辺の込み入った海域では増幅されたと考えられる。

図-9は台風0221号が実際とは異なるコースw, c, eを通ったときの晴海における高潮偏差の経時変化を示す。数値計算モデルによる結果が真値に近いと考えると、台風モデルによる気圧・風を経験式に代入したものは、何れのコースでも過大な高潮偏差になった。また、高潮偏差の最大値の起時は、台風が東京湾の西側を通るwの場合によく一致したが、その他のコースでは1～2時間早くなった。数値計算モデルによると、図-7(a)の実際のコースに比べ、西寄りのwでは高潮偏差の最大値が約0.3m大きく、直線化したcではほぼ同じ、東寄りのeでは約0.5m小さく、コースが及ぼす影響も大きいことが分かる。

(3) 数値計算の最小格子間隔など

図-10は晴海の高潮偏差の経時変化を最小格子間

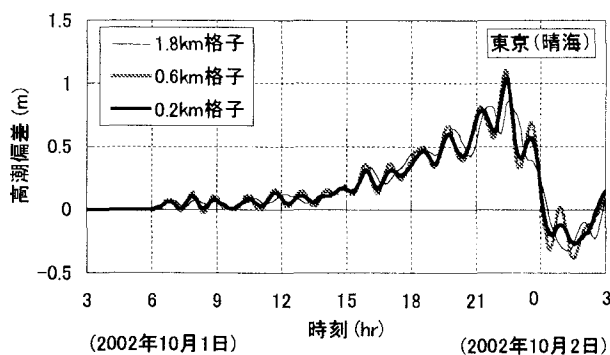


図-10 計算格子間隔による比較（晴海）

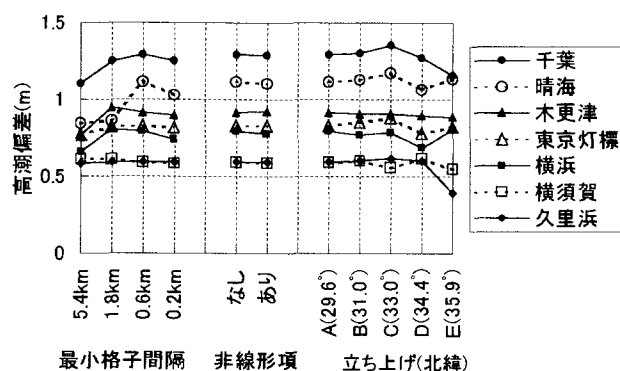


図-11 数値計算の条件と高潮偏差（東京湾）

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。

図-11は他の地点も合わせて高潮偏差の最大値を比較したものである。最小格子間隔を0.6kmにすれば、0.2kmとした場合と大差の無い高潮偏差が得られる。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。また、台風の立ち上げについてはAとBに大差がなく、大阪湾と同様に北緯31degを目安に行えば良い。

5. 今後の検討課題

高潮予測の精度に最も影響するのは台風の進路と中心気圧であり、これらに次ぐのが台風モデルで与える最大風速半径 r_0 であると考えられる。本研究ではこの値を気象官署の観測気圧から推定したが、これを実際の高潮予測時に行うことは不可能である。そこで、あらかじめ中心気圧と最大風速半径の相関関係を季節、海域、台風の発達期と減衰期などに分けて整理し、中心気圧の関数として最大風速半径を与える方法が考えられる。なお、台風は上陸後に陸上地形の影響で気圧や風場が歪むこともあるので、その特性についても検討が必要と思われる。

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。また、プログラム並列化も

考えられる。あるいは、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、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⁷⁾。

防災の観点では、高潮予測そのものが最終目的ではなく、その高潮によって起こる被害の予測と結びつくことが重要である。このため、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。さらに、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、これらに対する浸水計算をあらかじめ実行してデータベース化することも、高潮防災に非常に有用である。

6. 結論

本研究では、大阪湾周辺と東京湾を例として取り上げ、経験式と数値計算モデルによって高潮の計算を行った。主要な結論は、以下のようである。

- ①経験式では、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。
- ②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。
- ③数値計算モデルで東京湾、大阪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る。
- ④今後の課題についてもまとめた。

謝辞：本研究の一部は、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、その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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：平成16年潮位表，CD，2003。
- 2) 山口正隆，畑田佳男，花山格章，曾我部健一：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.316-320，1995。
- 3) 中平順一，吉田武司，高山知司，間瀬 肇：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.201-205，2003。
- 4) 檜垣将和：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.203-206，2001。
- 5) 柴木秀之・渡辺 晃：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.47-61，2002。
- 6) 河合弘泰・川口浩二・橋本典明：台風による内湾の波浪・高潮双方向結合推算モデルの構築と台風9918号を例とした追算，海岸工学論文集，第50巻，pp.296-300，2003。
- 7) 高橋重雄，富田孝史，河合弘泰：沿岸防災施設の性能設計の基本的な考え方，海岸工学論文集，第49巻，pp.931-935，2002。