

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

河合弘泰*・竹村慎治**・原 信彦***

東京湾を例に、過去約 40 年間に来襲した台風と伊勢湾台風クラスのモデル台風について、高潮と高波を推算し、これらの経時変化に三角形のモデルをあてはめて、ピーク時間差と継続時間を整理した。ピーク時間差は東京湾内の場所や台風により異なる。東京湾に顕著な高潮や高波を発生させる台風には、中心が東京湾の西方を通過したものが多く、このような台風では、東京湾の西部で有義波高のピークの方が早く、奥部ではほぼ同時で、東部では高潮偏差のピークの方が早い、という平均的な傾向がある。高潮と高波の継続時間は湾口の付近を除くとほぼ一定しており、高潮より高波の継続時間の方が長い傾向にある。

1. はじめに

これまで港湾・海岸施設は、当該地域に災害をもたらした台風や伊勢湾台風クラスのモデル台風による、高潮偏差（または高潮偏差を含む潮位）のピーク値と有義波高のピーク値に基づいて設計されてきた。施設の被災が人命や膨大な資産の喪失を招くこともあるため、このような最悪な条件の想定も必要である。しかしながら、高潮が気圧低下と強風によって発達するのに対し、波浪の発達に気圧は直接関係なく、陸地による遮蔽の影響は高潮よりも強く受ける。その結果、高潮偏差と有義波高が同時にピークになるとは限らない。國富ら（1999）により大阪湾の特性は明らかにされているが、他の海域ではあまり検討されていない。

ところで、施設の損傷や背後地の浸水の規模は、高潮偏差や有義波高のピーク値だけでなく、ピークに近い状態の継続時間にも依存する。例えば、防波堤の期待滑動量の推定では、ピークの状態が 2 時間継続すると仮定されている（河合ら、1997a, 1997b；下迫ら、1997 など）。また、成瀬・北原（1998）は、擾乱における高潮偏差や有義波高の経時変化を三角形でモデル化し、総越波量の推定を試みているが、高潮偏差と有義波高のピークは同時で、高潮が発達し始めてピークとなり減衰し終えるまでの継続時間を 10 時間、高波の継続時間をその倍と仮定している。しかしながら、これらの継続時間についても十分に明らかになっていない。

そこで、東京湾を例として、高潮と高波の同時性と継続時間特性を推算値で調べた。

2. 高潮と波浪の追算

(1) 代表的な台風の抽出

1958～1998 年の約 40 年間に東京湾に顕著な高潮や波

浪を発生させた台風を 20 個（台風 5811, 5821, 5915, 6734, 6909, 7506, 7916, 7920, 8115, 8124, 8210, 8218, 8506, 9011, 9019, 9021, 9028, 9118, 9707, 9805 号）抽出した。これらの多くは、図-1 に示すように、紀伊半島から伊豆半島の間に上陸し、東京湾の西方を北北東ないし北東方向に通過したものである。東京湾に最接近した頃の中心気圧は 960～990 hPa（最低は台風 5821 号）、移動速度は 40～90 km/h（20 台風の平均値は 65 km/h）である。その来襲時期は図-2 に示すように 8～10 月に多く、出現分布を正規分布にあてはめると、平均は 9 月 9 日、標準偏差は 41 日である。なお、東京の月平均潮位

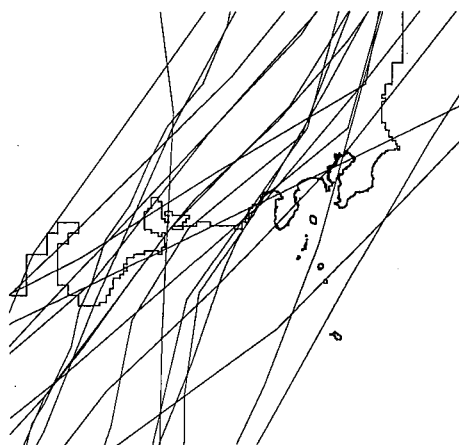


図-1 抽出した台風の経路

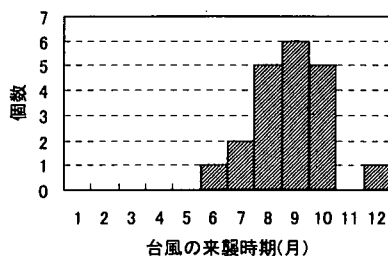


図-2 抽出した台風の来襲時期

* 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部主任研究員
** 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港工事事務所
(元 (独法) 港湾空港技術研究所)
*** 正会員 工修 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室
修生 (株) エコー沿岸デザイン本部環境水工部

は、台風来襲の最頻月である9月に最も高くなり、通年の平均潮位との差は約10 cmである(気象庁, 2001)。

(2) 高潮および波浪の推算方法

これらの台風が来襲したときに東京湾周辺で観測された気圧、風、潮位、波浪のデータを整理した。また、東京湾内の潮位や波浪の観測点は限られており、観測が開始される以前の台風も多く含まれているので、これら全ての台風に対して高潮と波浪の推算を行った。

台風の気圧分布には Myers の分布を仮定し、その強風半径は気圧の観測値によって定めた。海上風の推算には、後藤・柴木(1993)による境界層モデルを用いた。ただし、このモデルによる推算風速に対する観測風速の比を求めると、S系とW系の風に対してそれぞれ、東京灯標では1.0, 0.8, 第二海堡では0.8, 0.6であった。そこで、これらの係数を用いて、海上風の推算値を補正した。以上の方法で推算した海上風を、高潮と波浪の追算に共通して用いた。

高潮は直交座標系により計算した。その計算領域は、図-3に示すように、外洋部分を再現する領域A(格子間隔: 32.4 km)の内部に、領域B(16.2 km), C(5.4 km), D(1.8 km), E(0.6 km)を順次接続させたものである。海面抵抗係数は本多・光易(1980)による値を用い、海水の運動は単層の非線形長波近似モデルにより計算した。

一方、波浪は緯度・経度座標系により計算した。その計算領域は、図-4に示すように、外洋部分を再現する領域A(格子間隔: $1^\circ/2$)の内部に、領域B($1^\circ/8$), C($1^\circ/24$), D(0.6 km)を順次接続させたものであり、この領域Dは高潮の計算領域Eの一部と同じ座標の格子になっている。波浪の計算には、MRI法に基づくモデルを用いた。

3. ピーク時間差と継続時間の定義

高潮偏差や有義波高の経時変化は、ピーク値を頂点とする三角形に比較的近い形状をしている。そこで、図-5に示すような三角形モデルをあてはめた。高潮偏差や有義波高の経時変化がピーク値の前後に長く裾を引いている場合には、なるべくピーク付近の変化を表現できるようにあてはめた。また、高潮偏差の場合には、主となるピークに対してあてはめ、副振動は無視した。そして、図に示したように、高潮偏差と有義波高のピーク時間差 T_d (有義波高のピークが早い場合に正の値)、高潮の継続時間 D_s (=立ち上がり時間 D_{s1} + 減衰時間 D_{s2})、高波の継続時間 D_w (=立ち上がり時間 D_{w1} + 減衰時間 D_{w2}) を定義し、これらの値を求めた。なお、ここでいう継続時間とは、高潮偏差や有義波高の経時変化を三角形で近似したときの底辺の長さであり、成瀬・北原(1998)の定

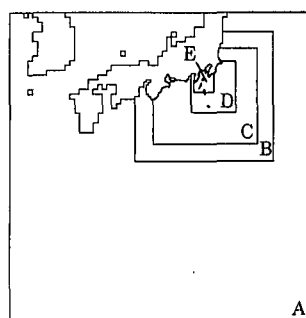
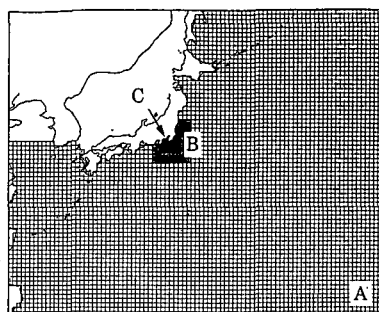
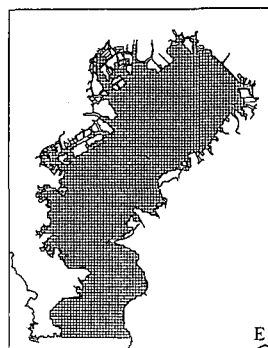


図-3 高潮の計算格子



(a) 外洋



(b) 東京湾内

図-4 波浪推算の計算格子

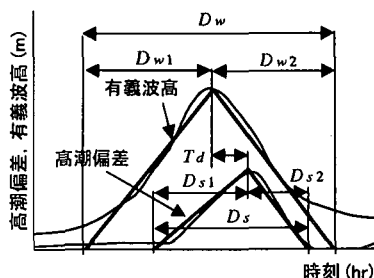


図-5 ピーク時間差と継続時間の定義

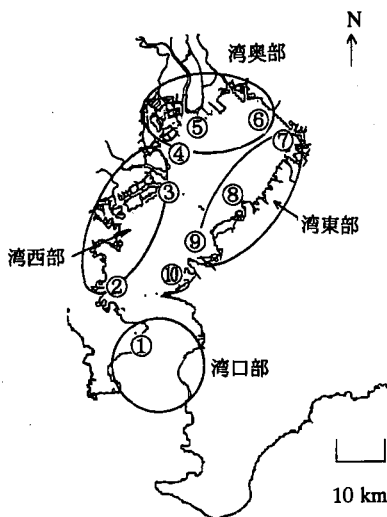


図-6 代表地点の位置

義と同じである。防波堤の期待滑動量の推定などで使われているピークの継続時間とは異なる。

検討の対象とする代表地点としては、東京湾をとりまくように、図-6 に示す 10 地点を選んだ。

4. 既往の台風による高潮と高波の同時性

(1) 既往の 20 台風による特性

各地点における 20 台風によるピーク時間差 T_d (hr) の出現特性を、累積確率分布として図-7(a)に示す。この図が示すように、高潮偏差のピークと有義波高のピークは必ずしも同時には生じせず、その時間差は東京湾内の場所や台風によっても異なる。ピーク時間差の絶対値が 3 時間以上になる場合もある。

ピーク時間差 T_d の頻度をみると、

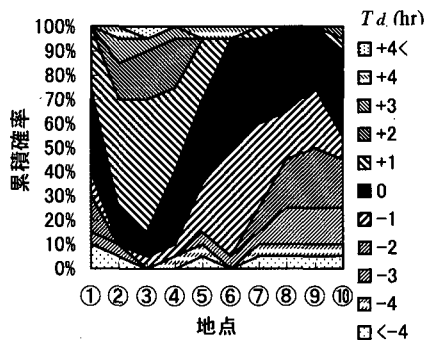
湾口部：高潮偏差のピークが早い ($T_d < 0$)

湾西部：有義波高のピークが早い ($T_d > 0$)

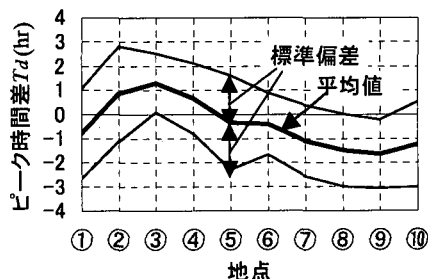
湾奥部：ほぼ同時にピークとなる ($T_d \approx 0$)

湾東部：高潮偏差のピークが早い ($T_d < 0$)

という場合が多い。ここで対象とした 20 台風の多くは、図-1 にも示したように、東京湾の西方を北北東進または北東進したものである。このような経路をとった台風に対して、湾口部と湾西部では、高潮を引き起こす効果として気圧低下の影響が卓越し、台風の中心がその地点に最接近した頃に高潮偏差はピークとなる。また、湾奥部や湾東部では、吹き寄せの効果が卓越するので、その地点が台風の右半球（危険半円）に入っている間に高潮偏差はピークとなる。他方、波浪は、風向や吹送距離に依存し、湾西部では台風の中心の前方で吹く東ないし南東の風、湾奥部では台風の中心の右方で吹く南ないし南西の風（湾口から湾軸に沿って湾奥に向かう風）、湾東部



(a) 累積確率分布



(b) 平均値と標準偏差

図-7 既往の 20 台風によるピーク時間差の分布

では台風の中心のやや後方で吹く南西ないし西の風によって発達する。以上のような高潮と波浪の発達メカニズムの違いによって、高潮偏差と有義波高のピーク時間差に湾内の地域差が生じたものと考えられる。

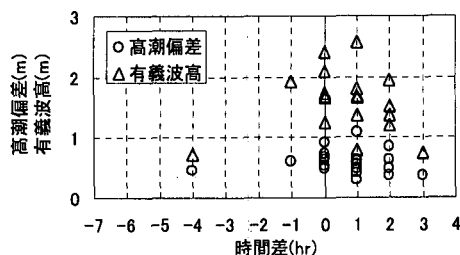
ところで、東京湾の地形には、南北に長い内湾で、湾口の岬によって外洋からの波浪が遮蔽されやすい、という特徴がある。例えば周防灘のように、東西に長く、外洋からの波浪も比較的入射しやすい内湾では、ピーク時間差の分布が東京湾と異なるものと考えられる。

各地点におけるピーク時間差の分布を正規分布として整理すると、図-7(b)に示すように、平均値は -2 ~ +1 時間、標準偏差は 1 ~ 2 時間である。したがって、東京湾の多くの地点で、高潮偏差と有義波高のピークが同時になる可能性はあるが、期待値としてはピークに時間差を持っているものと考えられる。

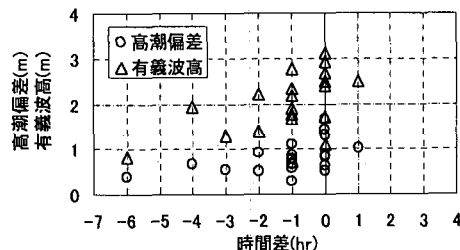
(2) 既往の代表的な台風による特性

図-8 は、④東京と⑦千葉を例に、高潮偏差や有義波高のピーク値とこれらの時間差の関係を示したものである。図-7 にも示したように、台風によってピーク時間差には数時間のバラツキがあるが、高潮偏差や有義波高のピーク値が大きいものに限れば、ピーク時間差は東京で -1 ~ 2 時間、千葉でも -2 ~ 1 時間に絞られる。

そこで、20 個の台風の中から、高潮偏差や有義波高のピーク値の大きい台風を各地点において 3 ~ 4 個ずつ抽



(a) 東京



(b) 千葉

図-8 高潮偏差、有義波高とピーク時間差の関係

出し、ピーク時間差と継続時間を整理した。ほとんどの地点で選ばれたのが台風 5915 号、7920 号、8506 号であり、これらが東京湾に最接近した頃の中心気圧は約 970 hPa、進行速度は最初に選んだ 20 個の台風の中では上位の 80~90 km/h である。その結果を図-9 に示す。ピーク時間差 T_d は、図-7 に示した 20 個の台風による傾向とよく似ている。

5. 既往の台風による高潮と高波の継続時間特性

高潮偏差や有義波高のピーク値が小さい場合には、図-5 に示した方法による継続時間の定義が困難であるため、前節で抽出した代表的な 3~4 個の台風により継続時間を整理した。その結果を図-9 に示す。高潮の継続時間 D_s は、湾口部の①と湾口に近い②の 2 地点を除けば、8~10 時間である。一方、高波の継続時間 D_w はこれより長く 13~19 時間である。東京湾では満潮が 1 日に 2 回あるので、高波の継続時間中に 1 度は満潮に遭遇することになる。また、高潮では立ち上がり時間 D_{s1} が減衰時間 D_{s2} より長く、高波では逆に立ち上がり時間 D_{w1} は減衰時間よりやや短い傾向もある。

図-10 は、高潮や高波の継続時間が D (hr) である場合に、その間に遭遇する最高天文潮位の確率分布を示す。天文潮位は東京 (芝浦) における 60 分潮を用いて台風期のみを計算した。継続時間を考慮しない場合 ($D=0$) に朔望平均満潮位を超える天文潮位となる確率は 1.8% であるが、10 時間継続する場合には 21% に達する。

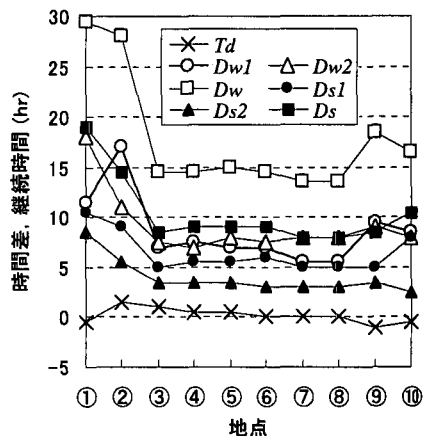


図-9 代表台風によるピーク時間差と継続時間

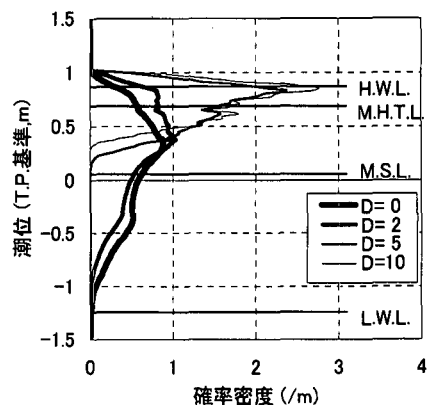


図-10 継続時間による天文潮位の出現確率の変化

なお、防波堤の期待滑動量の推定では、ピークの継続時間が 2 時間と仮定されている。これがピーク値の 90% 以上となる時間に対応すると仮定すれば、高潮と高波の継続時間はそれぞれ約 1 時間、1~2 時間となり、ピーク時間差が大きな場合にはこれらのピークは重ならない。

6. 伊勢湾台風クラスの台風による高潮と高波の同時性および継続時間特性

前章では過去約 40 年間に来襲した台風を対象として高潮と高波の特性をまとめたが、伊勢湾台風クラスの台風の直撃は受けていない。そこで、図-11 に示すような経路で、中心気圧が 890~935 hPa、進行速度が 73~90 km/h の台風をモデル台風として計算し、その高潮と高波の特性を調べた。

図-12 にその結果を示す。ピーク時間差 T_d については、図-7, 9 に示した過去の台風と同様の傾向が見られる。その一方で、継続時間は図-9 に示した過去の台風と

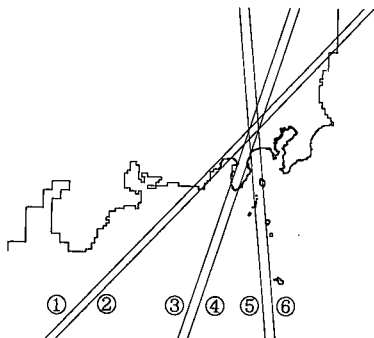


図-11 伊勢湾台風クラスのモデル台風の経路

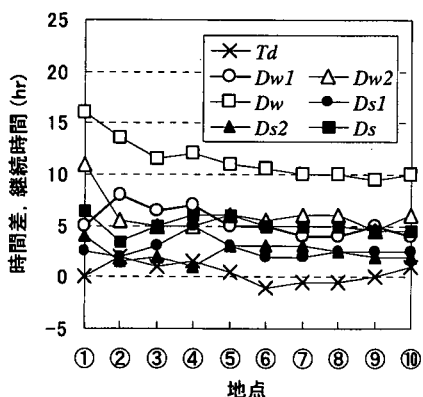


図-12 伊勢湾台風クラスの台風によるピーク時間差と継続時間

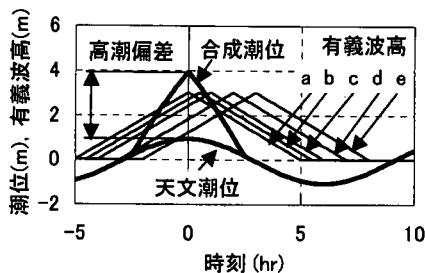
比べて短くなっている。台風の進行速度は同程度であるため、主として経路や中心気圧の違いによるものと考えられる。立ち上がり時間と減衰時間は、高潮偏差も有義波高もそれぞれ同程度になっている。

このようなピーク時間差や継続時間が港湾・海岸施設の安全性に及ぼす影響を把握するために、一擾乱の護岸越波量を試算した例を図-13に示す。高潮偏差と有義波高のピーク値はともに3m、高潮と高波の継続時間は図-12をもとにそれぞれ5時間、10時間と仮定した。この例で、ピークが同時の場合(a)の総越波量は、ピークの越波流量が46分継続したときの量に相当している。また、ピーク時間差が大きいほど総越波量は小さくなる。

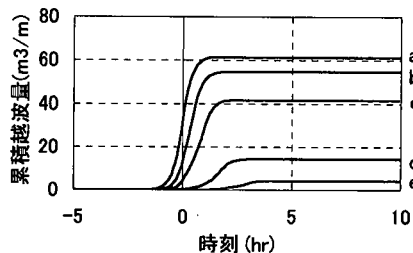
7. おわりに

本研究では、東京湾を例として、過去に来襲した台風と伊勢湾台風クラスのモデル台風による高潮と高波の同時性や継続時間特性を検討し、東京湾内の場所や台風によってピーク時間差が異なることを示した。

しかしながら、ここで検討した台風の条件は実際に発生し得る台風の一部に過ぎない。確率台風モデルなどによってさらに多くの台風を設定し、高潮と高波の特性を



(a) 計算の仮定



(b) 総越波流量

図-13 ピーク時間差による総越波流量の変化

調べる必要がある。また、高潮偏差と有義波高の経時変化を三角形で近似したが、ピーク付近の短時間におけるこれらの変動特性についても詳細な検討が必要である。以上のことを今後の課題として考えたい。

なお、本研究にあたっては、国土交通省関東地方整備局(当時は運輸省第二港湾建設局)、東京都港湾局、海上保安庁、気象庁より観測データを提供していただいた。厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 河合弘泰・高山知司・鈴木康正・平石哲也 (1997a): 潮位変化を考慮した防波堤堤体の被災遭遇確率, 港湾技術研究所報告, 第36巻, 第3号, pp. 3-41.
- 河合弘泰・平石哲也・関本恒浩・鶴飼克臣 (1997b): 許容応力度設計法と信頼性設計法による防波堤断面の比較, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 976-980.
- 気象庁 (2001): 平成十四年潮位表, 290 p.
- 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特性, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 333-338.
- 後藤智明・柴木秀之 (1993): 陸上地形の影響を考慮した海上風推算, 港研報告, 第32巻, 第3号, pp. 65-97.
- 下迫健一郎・高橋重雄 (1997): モンテカルロ法を用いた混成防波堤の期待滑動量の計算, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 831-835.
- 成瀬 進・北原政宏 (1998): 海岸事業の費用対便益分析について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1231-1235.
- 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.