

大阪湾における高潮と高波の同時生起確率特性

國富將嗣*・高山知司**

防潮堤の設計に必要な波浪や水位の設定には、既往最大規模の台風来襲を想定した波浪や高潮の推算が用いられている。大阪湾においては、室戸台風の進路に伊勢湾台風が来襲することを想定しているが、この想定台風の来襲確率や湾沿岸各地における高潮や高波の同時生起特性については、詳細な検討がなされていない。そこで、本研究では、確率台風モデルを用いて当該台風の来襲確率を把握し、さらに大阪湾沿岸における高潮と高波の確率的な生起特性を明確にした。その結果、大阪湾における想定台風は、およそ280年に一度の頻度で来襲することがわかった。また、大阪湾沿岸で高潮と高波を同時に生起させる台風は、およそ3年に一度の頻度で来襲するという結論が得られた。

1. はじめに

平成16年に日本に上陸した台風の個数は、過去最多記録（6個）を大幅に更新する10個を記録した。これは、年間観測された台風総数29個のうち、実に約3割の台風が日本に上陸したことになる。上陸した台風のうち、台風16号や18号来襲時には、西日本を中心に猛烈な風による家屋倒壊や高潮による浸水氾濫などの災害が発生したことは記憶に新しい。

台風来襲時において浸水氾濫の直接的な原因となる高潮に対しては、その防御策として防潮堤等が築造されている。防潮堤の設計に必要な波浪や水位の設定には、波浪や高潮の推算が用いられている。これらの推算は、設計地点に最も大きな高潮が生じた台風経路に既往最大規模の台風（一般に伊勢湾台風）が進行することを想定して計算され、かつ、推算された潮位偏差と波高の最大値が同時に生起することを想定している。大阪湾においては、室戸台風の進路に伊勢湾台風が来襲することを想定しているが、この想定台風の来襲確率や湾沿岸各地における高潮や高波の同時生起特性については、詳細な検討がなされていない。そこで、本研究では、確率台風モデルを用いて当該台風の来襲確率および来襲時の高潮と高波の同時生起特性を把握し、さらに大阪湾沿岸における高潮と高波の確率的な同時生起特性を明確にする。

2. 大阪湾における想定台風の来襲確率

(1) 確率台風モデル

大阪湾における想定台風の来襲確率を求めるため、確率台風モデルを作成した。

確率的に台風資料を任意に作成する手法は、様々な目的のために、これまでも数多く研究されている。例えば、高潮の推算（長友ら、1980）や降雨と高潮の同時生起特

性の評価（端野・桑田、1987）、高潮や波浪の極値推定（山口ら、1994a, 1994b, 1995, 野中ら、2002）、潮位と越波量の確率評価（加藤ら、2003）などの目的に供されるべく開発されてきた。また、確率台風モデルで一般的な手法である自己回帰モデルの統計的性能を詳細に調べた橋本ら（2001）の研究などがある。

本研究において開発した確率台風モデルは、従来の手法と同様に、台風の統計的性質を利用して台風の年発生数および台風の発生から消滅までの台風諸元量（中心気圧、進行速度、進行方位）の変動を確率的に算出する統計モデルである。しかし、一般的な自己回帰モデルとは異なり、任意の空間（セル）ごとに、台風諸元のセル進入時諸元量と、それに対するセル内における単位時間当りの諸元変動量（諸元変動率）を変数として扱い、次式によってセルにおける次時間の諸元量 $p_{i(x,y)}$ を求めている。

$$P_{i(x,y)} = P_{i-1(x,y)} + \Delta P_{(x,y)} \cdot \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

ここに $p_{i-1(x,y)}$ は前時間の諸元量、 $\Delta p_{(x,y)}$ はセル (x,y) 内における諸元変動率である。諸元変動率は、台風の過去資料から予めセルごとに二つの変数について主成分分析を行い、各主成分得点の平均値と分散値を用いて得られる正規分布を用いて平面確率分布を用意し、任意の進入時諸元量に対する任意断面の確率分布からモンテカルロ法によって決定した。なお、 Δt は計算時間間隔である。 Δt は、台風の進行速度に依存し、台風が現在いるセルから必ず隣接するセルに移動するように設定した。

モデルの作成に際して用いた基礎資料は、1950年から1995年にかけて気象庁で観測された1228個の台風情報（時刻、位置、中心気圧、進行速度）である。計算領域は、北緯0度～70度、東経100度～200度の範囲とし、1度四方のセルごとに、台風諸元情報（中心気圧、進行方位、進行速度）を取得した。

台風の発生、つまり台風の初期条件としては、年次の台風発生個数およびそれら個々の台風発生位置ならびに初期諸元量について過去資料の統計的性質を用いて確率

* 正会員 博(工) 國富(株)代表取締役社長
** フェロー 工博 京都大学教授防災研究所

的に算出した。消滅条件は、中心気圧が1015 hPa 以上になった場合と、過去の資料が存在しないセルに侵入した場合に強制的に消滅させている。

開発した台風モデルの性能を把握するため、1 万年の再現計算を2 回実施し、過去資料と比較した。本研究では、大阪湾に来襲する台風の生起確率を求めることを目的としているため、特に大阪湾付近（大阪湾を中心とした東経134.5度から135.5度、北緯34度から35度の範囲）を通過する台風に限定して過去の台風諸元と計算結果を比較した。比較の対象は、台風の進行方位、進行速度、中心気圧であり、それぞれ平均値と標準偏差を求めた。また、台風の年間来襲個数の平均値についても比較した。これらの結果を表-1 に示す。なお、表中の進行方位は東を0度として反時計まわりに度単位で示した。

表-1 から本研究で作成した確率的台風モデルは、次のような台風の再現特性を持つことがわかった。

a) 進行方位については、平均で1度程度東寄りに進行する台風が出現する。標準偏差は、観測値よりも8度程度小さい。

b) 進行速度は、観測値よりも平均で5 km/h 程度速く、その標準偏差は4 km/h 程度観測値よりも小さい。

c) 中心気圧は、観測値よりも平均で4 hPa 程度大きい台風が出現する。また、標準偏差は、観測値よりも4 hPa 程度大きい。

d) 大阪湾付近に来襲する台風は、年間平均で0.03個程度多い。

以上のことを踏まえると、本モデルは、観測値の平均値に比較して、ほぼ同等な値を示していることがわかる。進行方位の標準偏差にやや大きな差があるが、観測された台風資料に限りがあることが原因と考えられる。

従って、本モデルは、台風の来襲確率の算定に供するに有用であると言える。

(2) 大阪湾における想定台風の来襲確率

作成した確率台風モデルを用いて大阪湾における想定台風の来襲確率を求めた。

大阪湾においては、室戸台風経路に伊勢湾台風規模の台風が来襲することが想定されている。

室戸台風は、大阪湾において、過去最大の災害をもたらした台風であり、伊勢湾台風は、日本に来襲した最大規模の台風である。従って、想定台風は、既往最大を想定したものである。

想定台風の諸元は、伊勢湾台風の資料から、中心気圧930～940 hPa、進行速度60 km/h である。これら各諸元の出現率と、室戸台風経路の出現率を掛け合わせることで想定台風の出現率を求めることが可能であるが、台風の経路は、完全に一致した経路を進行する台風は稀である。例えば、図-1 に示すように、室戸台風の再来と言われた第二室戸台風であっても、必ずしも完全に一致した経路を進行しているわけではない。そこで、大阪湾の中央やや南寄りの、北緯34.3度、東経135.0度を基準とした点から、北方向に25～80 km 離れた地点を北東方向（30～60度）に進行する台風を室戸台風や第二室戸台風の経路としてとらえ、これらの出現確率を求めた。

まず、大阪湾付近を通過する台風は、1 万年の再現計算の結果、267835個の総台風数に対し、3488個（約1.30%）であった。この3488個の台風のうち、中心気圧940 hPa 以下、進行速度60 km/h 以上となる台風は、それぞれ123個（3.53%）、2455個（70.38%）であった。なお、参考のため、中心気圧と進行速度の出現率についてまとめた結果を表-2 および表-3 に示す。

一方、台風経路の出現率は、全台風の0.53%であった。

以上のことから、大阪湾における想定台風の出現率は、0.0132%となる。台風の年平均発生個数は過去の台風資料から約27個であったことから、想定台風の年平均来襲数は約0.0035個、つまり、約280年に1回の割合で想定台風が来襲することがわかった。

表-1 台風諸元と年平均来襲個数の比較

比較諸元		観測値	度計算結果	
			Cal. 1	Cal. 2
進行方位 (度)	平均値	52.81	51.50	51.35
	標準偏差	31.97	23.99	22.84
進行速度 (km/h)	平均値	45.45	50.00	51.35
	標準偏差	15.92	11.76	12.03
中心気圧 (hPa)	平均値	981.54	985.41	985.80
	標準偏差	17.74	22.12	21.96
年平均来襲個数 (個)		0.60	0.63	0.63

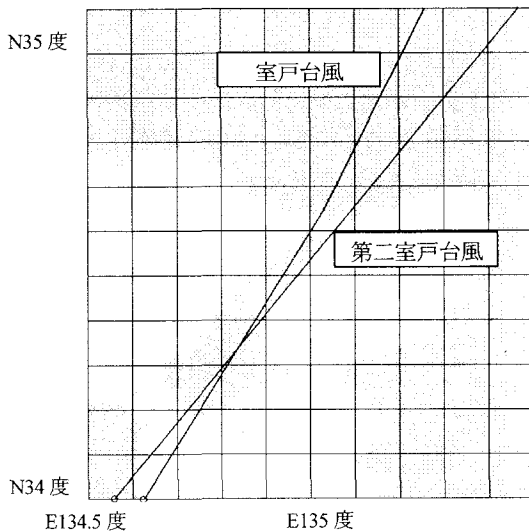


図-1 室戸台風と第二室戸台風の進路

表-2 中心気圧の出現率

中心気圧	個 数	出現率
880 hPa 以下	0	0.00%
880~900 hPa	9	0.26%
900~920 hPa	26	0.75%
920~940 hPa	88	2.52%
940~960 hPa	269	7.71%
960~980 hPa	693	19.87%
980~1000 hPa	1406	40.31%
1000 hPa 以上	997	28.58%
合 計	3448	100.00%

表-3 進行速度の出現率

進行速度	個数	出現率
0~10 km/h	0	0.00%
10~20 km/h	8	0.23%
20~30 km/h	7	0.20%
30~40 km/h	13	0.37%
40~50 km/h	154	4.42%
50~60 km/h	851	24.40%
60~70 km/h	1181	33.86%
70~80 km/h	999	28.64%
80~90 km/h	262	7.51%
90~100 km/h	12	0.34%
100 km/h 以上	1	0.03%
合 計	3448	100.00%

一般に構造物の設計においては、50から100年に1回程度生起する自然外力を想定している。この点と先の結果を踏まえて大阪湾沿岸における護岸等の構造物について考えると、過去最大の被害をもたらした台風の進路に、既往最大規模の台風を進行させるとした想定台風による手法は、一般的な構造物の設計概念よりもやや安全側に近いものを想定していると言える。

3. 想定台風の高潮と高波の同時生起特性

大阪湾沿岸の各地点における高潮と高波の同時生起性については、具体的に数値計算によって把握する必要がある。そこで、大阪湾における想定台風である室戸台風について高潮と波浪の数値計算を用いて同時生起特性を把握した。また、室戸台風の詳細な位置情報が無いことから、参考のため、第二室戸台風についても数値計算を行った。

高潮の計算には後藤モデル（後藤，1997）を、波浪の計算には大阪湾のような浅海域の波浪計算に適しているSWAN（Holthuijsen ら，2000）を用いた。計算の対象とした湾沿岸の代表地点は、舞子、神戸、西宮、大阪、貝塚、住吉崎、洲本の7地点である。それぞれ、湾西北部、湾北部、湾北東部、湾奥、湾東部、湾南部、湾西部

を代表する地点である。この各地点ごとに、想定台風が来襲した際の高潮（偏差）および波高の最大値ならびにそれらの生起時間差を求めた。その結果を表-4に示す。

表-4 から湾北部の神戸、西宮、大阪の各地点では高潮偏差が2m程度、波高は2.5~4.3mと、大きな高潮偏差および高波が生起することがわかった。ただし、それら最大値の生起時間差を見ると、住吉崎を除き、40分から2時間程度の時間差があり、必ずしも同時に高潮と高波が生起するとはいえないことがわかる。

より詳細に調べるため、図-2に神戸、大阪、住吉崎、洲本の各地点における高潮と高波の時系列変化を示す。図中の細黒線が波高を、薄太線が高潮偏差を示す。横軸は、計算の経過時間、縦軸は波高と高潮偏差をm単位で示している。なお、計算結果は室戸台風のものである。これらを見ると、次のことがわかる。

湾北部の神戸では高潮が生起する前に波高が大きくなり、その後高潮の最大値を迎えた後、再びやや波高が大きくなっている。大阪では、高潮が生起した1時間後に波高の最大値を迎えている。何れも湾の北側に位置する地点であり、湾北部では高潮と高波の生起時間に差があることが確認できた。

湾南部の住吉崎については、図-2を見てわかるとおり、高潮偏差の値が経過時間180分頃から約2時間程度1m前後の値を示しており、明確なピークを示していない。つまり、住吉崎における高潮偏差は、他地点の高潮偏差（2m程度）よりは低いものの、比較的長時間高潮が継続していることがわかる。従って、住吉崎では、顕著な高潮偏差のピークを迎えることなく、高潮偏差の

表-4 地点別の高潮偏差、波高、生起時間差の比較
(室戸台風)

代表地点	高潮偏差 (m)	波高 (m)	時間差 (分)
舞 子	1.49	4.87	-75
神 戸	1.72	4.26	-65
西 宮	1.82	3.80	40
大 阪	1.80	2.58	65
貝 塚	1.54	4.03	75
住吉崎	1.17	3.86	5
洲 本	1.09	3.53	-155

(第二室戸台風)

代表地点	高潮偏差 (m)	波高 (m)	時間差 (分)
舞 子	1.41	4.79	-60
神 戸	1.68	4.13	-75
西 宮	1.78	3.64	55
大 阪	1.78	2.57	105
貝 塚	1.53	4.17	90
住吉崎	1.14	3.95	10
洲 本	1.07	3.38	-155

最大値も他地点に比して小さくなる傾向があることがわかった。また、住吉崎では、台風が大阪湾の北西部まで進行した後、吹き返しによる南西風によって高波が生起

するが、高潮の継続時間が長いことから、高潮と高波が同時生起している状態になっているものと言える。また、波高については4mを越えているため、波高については十分考慮する必要があると言える。

最後に湾西部の洲本では、高潮の最大値を迎える時間よりも早く波高が大きくなっている点が特徴的である。これは、台風が大阪湾よりも南西（四国室戸岬付近）に位置している時間帯において、大阪湾が東寄りの風に支配的となり、湾西部で高波が生起したためと考えられる。従って、想定台風と大阪湾との位置条件が変わらない限り、洲本において高潮と高波は同時に生起しないことがわかった。

4. 大阪湾における高潮と高波の同時生起確率特性

大阪湾において来襲が想定されている台風では必ずしも湾沿岸で高潮と高波が同時生起しないことが確認できた。しかし、高潮と高波が同時に生起することは、高潮位において高波を受けることを意味し、沿岸構造物にとって危険な条件となる。そこで、大阪湾沿岸において高潮と高波が同時に生起する可能性について明確にすることを目的として、先の確率台風モデルを用いて高潮と高波の同時生起確率を求めた。

計算は、次の方法で実施した。まず、確率台風モデルを用いた1万年の再現計算を実施し、台風資料を作成した。作成した資料のうち、大阪湾に影響を及ぼす台風を抽出した。抽出した範囲は、2. (1)でモデルの再現性を確認した計算と同じく、大阪湾を中心とした東経134.5度から135.5度、北緯34度から35度の範囲である。この領域は、台風の危険半円内に大阪湾を支配する台風が通過する領域である。

抽出した台風は3448個であるが、これら全てに対して高潮と波浪計算を実施することは困難であると判断し、4種の進行方位別に各20個の台風を中心気圧の低い順に選別して高潮と波浪の計算に供した。進行方位は、0度から30度、30度から45度、45度から60度、60度以上の4種類とした。進行方位別の台風資料数とその出現率を表-5に示す。

次に、選別した80個の台風について高潮と波浪の計算

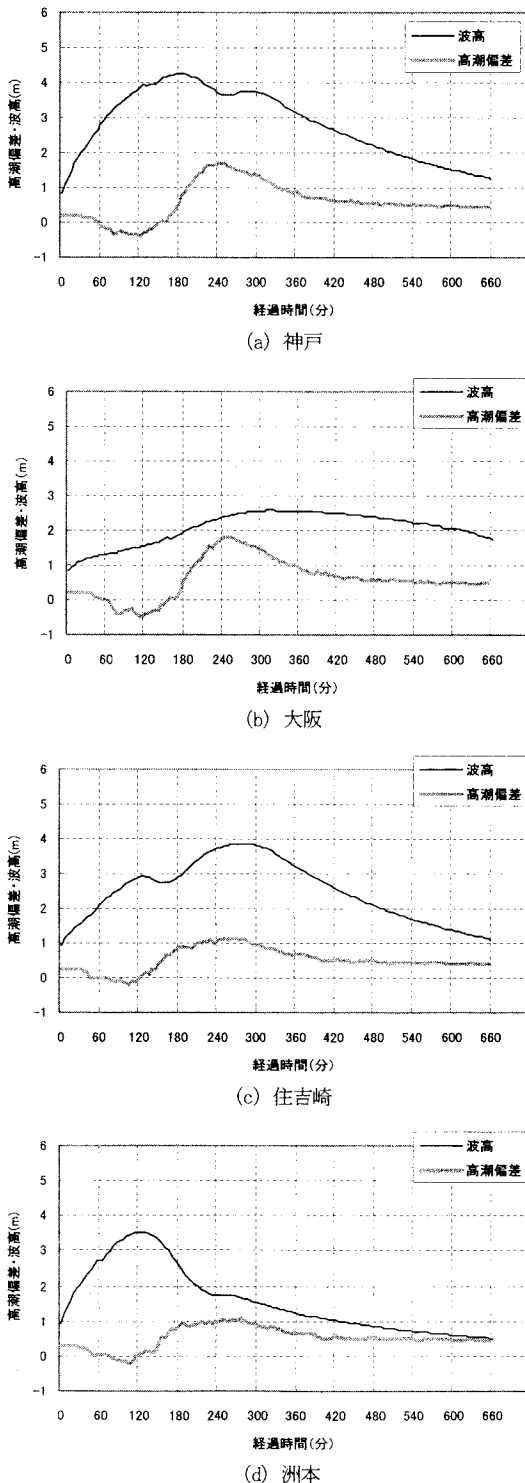


図-2 地点別の高潮偏差と波高の時系列変化

表-5 進行方位別の台風資料数とその出現率

進行方位	資料数	出現率
0度～30度	469	0.1751%
30度～45度	1084	0.4047%
45度～60度	1264	0.4719%
60度以上	671	0.2505%
合 計	3488	1.3023%

を実施した。高潮と波浪の計算では、舞子から洲本までの7地点における高潮と高波の生起時間差を把握し、全80個の台風について高潮と高波が同時に生起しているか否かを判定した。

その結果として、地点別および進行方位別に同時生起した台風の個数をまとめたものを表-6に示す。表-6から洲本では高潮と高波が同時に生起しないことが改めて確認された。一方で、その他の地点では概ね7割以上の台風で同時生起することがわかった。

これまで得られた表-5と表-6を用いて、各地点における高潮と高波の同時生起確率を求めた。具体的には、4種の進行方位について、それぞれ20個の台風について計算を実施していることから、表-6の同時生起した台風の個数を20で除すことで進行方位別の出現比率を地点ごとに算出することができる。こうして求めた結果に、表-5の進行方位別の台風出現率を掛け合わせることで、地点ごとの高潮と高波の同時生起確率を得ることができる。得られた結果を表-7に示す。表-7から、各地点とも高潮と高波が同時に生起する確率は、1.3%未満であることがわかる。従って、大阪湾沿岸において、高潮と高波が同時に生起する台風の来襲する確率は、約3年に1回の割合で生起することがわかった。

また、舞子から住吉崎においては、より北に位置する地点において、高潮と高波の同時生起確率が低くなる傾向にあることがわかった。これは、大阪湾の北西域を北東に進行する台風に対し、大阪湾北西部に位置する地点ほど台風の中心に近いこと、当該地点が台風の最大風速半径内に位置していることが原因と言える。つまり、最大風速半径内では、気圧が低いこと高潮が生起するが、

一方で中心に近づくほど風速が低下するため、波浪が発達せず、高潮と高波が同時生起しないものと考えられる。

5. 結 論

以上のことから、次のような結論が得られた。

作成した確率台風モデルは、これまで観測された台風と比較して、進行方位が平均1度程度東寄りに、進行速度が平均で5 km/h程度速く、中心気圧が平均4 hPa程度大きい台風を再現する傾向にあることがわかった。また、大阪湾付近に来襲する台風は、観測値の平均値よりも年間平均で0.03個程度多く再現することがわかった。

大阪湾における想定台風は、確率台風モデルを用いて試算を行った結果、約280年に一度の頻度で来襲する台風を想定しており、一般的な設計における耐用年数からすると、やや安全側の想定をしている。

想定台風が来襲した際、大阪湾沿岸では必ずしも高潮と高波が同時に生起しない。湾北部の神戸や大阪では、1時間程度の時間差がある。また、特に洲本においては、想定台風が大阪湾の西方を北東進する限り、高潮と高波は同時に生起しない。

大阪湾沿岸で高潮と高波が同時生起する台風は、約3年に一度の頻度で来襲することがわかった。

参 考 文 献

- 加藤史訓・鳥居謙一・柴木秀之・鈴木勝之(2003)：確率的台風モデルを用いた潮位と越波量の確率評価，海工論文集，第50巻，pp. 291-295.
- 後藤智明(1997)：津波・高潮計算プログラムマニュアル，東海大学工学部土木工学科。
- 長友文昭・鶴谷広一・福島毅・宮原誠一(1980)：確率を考慮した高潮の推算手法について，第27回海工論文集，pp. 557-561.
- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・大福学(2002)：確率的台風モデルを利用した波高極値の推定システムの日本海における適用性，海工論文集，第49巻，pp. 176-180.
- 端野道夫・桑田康雄(1987)：確率的台風モデルによる降雨・高潮の同時生起性評価，土木学会論文集，No.387/II-8，pp. 237-246.
- 橋本典明・佐藤裕司・松浦邦明・市川雅史(2001)：確率台風モデルの構築とその統計的特性，海工論文集，第48巻，pp. 456-460.
- 山口正隆・畑田佳男・中村雄二(1994a)：確率的台風モデルと高潮・波浪の極値推定への応用，第13回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp. 135-138.
- 山口正隆・畑田佳男・花山格章(1994b)：わが国太平洋岸における高潮の極値推定，海工論文集，第41巻，pp. 281-285.
- 山口正隆・畑田佳男・花山格章(1995)：伊勢湾における高潮の極値の推定，海工論文集，第42巻，pp. 321-325.
- Holthuijsen, L.H., N. Booij, R.C. Ris, I.J.G. Haagsma, A.T.M.M. Kieftburg and E.E. Kriezi(2000)：SWAM Cycle III version 40.11 User Manual (not the short version), Delft University of Technology.

表-6 同時生起した台風の個数

進行方位	舞子	神戸	西宮	大阪	貝塚	住吉崎	洲本
0度～30度	15	16	16	17	19	20	0
30度～45度	12	14	15	18	18	20	0
45度～60度	13	17	18	20	20	20	0
60度以上	17	19	19	19	19	17	0

表-7 地点別の高潮と高波の同時生起確率

代表地点	同時生起確率
舞子	0.8938%
神戸	1.0625%
西宮	1.1063%
大阪	1.2229%
貝塚	1.2405%
住吉崎	1.2646%
洲本	0.0000%