

確率を考慮した高潮の推算手法について

長友文昭*・鶴谷広一**・副島 毅***・宮原 誠****

1. ま え が き

高潮対策施設を合理的に計画・設計するためには、高潮量（偏差）を精度良く推定する必要がある。設計高潮位を決めるために現在広く採用されている方法は、既往最高潮位、あるいはこれに若干の余裕を見込んだ潮位を用いるか、さく望平均満潮位に既往の最大潮位偏差、あるいはモデル高潮の潮位偏差を加えたものを用いるのが普通である。しかし、これらの方法には確率的な考え方がなされておらず、設計高潮位を求めるためには相当長期間の資料を必要とする。既往の異常高潮位の生起確率曲線を求めて、外そうによりある再現期間に対する高潮位を求めれば、確率的な考慮ができる。しかし、比較的短期間の資料から長期の予想を行うのは信頼性に問題がある。また、観測資料のない地域については適用がむずかしい。

本研究は、モデル台風の概念を高潮推算に用いることにより、高潮の確率的予測手法の開発を試みたものである。

まず、九州地区で高潮の起こりやすい有明海、鹿児島湾および西瀬戸地区を対象に、モデル台風を100年分発生させて実験式による高潮量の推定を行った。さらに、有明海については得られたモデル台風50年分を用いて数値シミュレーションによる高潮推算を行って、確率年最大偏差を求めた。

2. モデル台風の発生と実験式による高潮推算

(1) 台風の各要素の出現確率

モデル台風は、暴風に対する構造物の防災対策を考える上での基準化のために考え出されたものであり、長大橋や超高層建築物の設計に際して直接その場所で観測された風の資料を用いるのではなく、暴雨の原因となる異常気象現象にまで考えを及ぼして予測を行うところに特徴がある。

高橋¹⁾は、淡路島周辺での年最大風速の超過確率を推定するために、来襲確率を考慮に入れたモデル台風を提案している。

また、光田^{2),3)}は、特定地域だけを対象とするのではなく、一般に用い得るものとして標準計画台風を提案している。

高潮を確率的に考える場合、実際の観測潮位を用いて統計処理する方法⁴⁾もあるが、台風をモデル化して高潮推算に応用した例はまだないようである。後者によれば、既往の高潮の観測資料のない所でも応用できる利点がある。

最初にモデル台風を発生させるが、これには高橋¹⁾と同様にモンテカルロ法を用いた。

台風要素を抽出するにあたり、台風が対象地点からどの範囲までを通過すれば高潮に影響するかを考慮すると、日本に来襲する台風の暴風の半径はほぼ200km内外であるので、対象地点から東西500kmの範囲をとれば、高潮に影響を与えると考えられる台風が十分抽出されるものと考えた。対象としている地域間は、それほど離れていないので、ここでは東経130.5°を中心に東西500kmの範囲を決めて、この区間を通過した台風を昭和15～51年について調べ、来襲度数、台風の経路、進行方向、進行速度、中心示度の出現確率を調べた。

来襲した台風は年平均4.3個であり、通過時の平均移動速度は、鹿児島湾32km/h、有明海36km/h、瀬戸内海西部40km/hであった。台風の経路、進行方向および中心示度の出現確率分布は表1、2、3のとおりであ

表1 台風の経路

地 域	鹿児島湾 (%)	有 明 海 (%)	瀬戸内海西部 (%)
経 路			
東	58.6	61.0	59.3
西	41.5	39.0	40.7

表2 台風の進行方向

	鹿児島湾		有 明 海		瀬戸内海西部	
	度 数 (%)	超過確率 (%)	度 数 (%)	超過確率 (%)	度 数 (%)	超過確率 (%)
N	46.2	46.2	39.1	39.1	32.5	32.5
NNE	19.7	65.9	25.6	64.7	26.3	58.8
NE	34.2	100.0	35.4	100.0	41.3	100.0

* 正会員 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所長
 ** 正会員 工務 運輸省港湾技術研究所海洋水理部主任研究官
 *** 正会員 工務 運輸省第三港湾建設局関西国際空港調査室調査第二課長
 **** (財)日本気象協会福岡本部調査課課長

表-3 台風の中心示度超過確率

中心示度	超過確率(%)	中心示度	超過確率(%)
910	0.3	965	35.0
915	0.5	970	43.8
920	0.8	975	52.6
925	1.2	980	61.4
930	1.9	985	70.1
935	3.0	990	78.9
940	4.6	995	87.6
945	7.3	1000	91.5
950	11.2	1005	95.4
955	17.5	1010	100.0
960	26.5		

る。

台風の各要素の生起確率が求まったところで、乱数を用いて100年分の台風の発生推定を行う。

各要素の生起確率は前記の出現確率分布に従うものとする。まず、来襲度数は年平均4.3個のポアソン分布に従うものとし、ポアソン乱数を発生することにより年間に通過する台風の数を決める。

次に台風の強さを決めるが、台風の強さは中心示度によって決まりその強さの度数分布は表-3を平滑化した関数で与えるものとする。図-1にその度数分布図を示す。なお、平滑化した指数関数と線型関数は次式で表わ

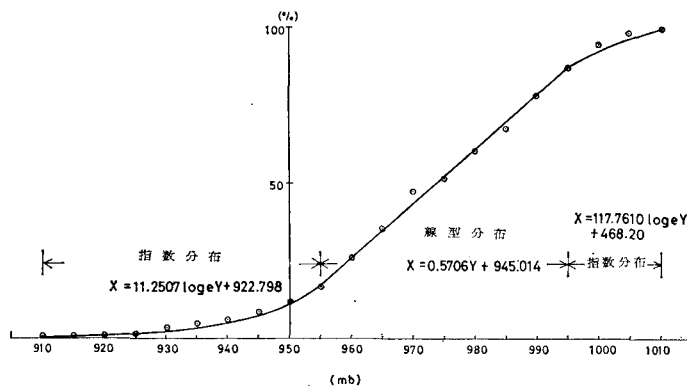


図-1 中心示度の超過確率

される。

$$x = 11.2507 \log_e y + 922.798, \quad 910 \leq x < 955 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$x = 0.5706 y + 945.014, \quad 955 \leq x < 995 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$x = 117.7610 \log_e y + 468.20, \quad 995 \leq x \leq 1010 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 x は中心示度 (mb)、 y は超過確率 (%) である。

以上より台風の強さの超過確率に相当する台風の中心示度が決まるので、一様乱数を発生させることにより台風の中心示度が決まる。

同様に、一様乱数を発生させて東西の通過距離、進行方向を求める。

ここで、各要素の生起確率は独立とし、進行速度は地域別の平均移動速度とした。発生させた台風は100年分427個である。

(2) 台風域内の気圧と風の与え方

モデル台風を発生させたところで、次に台風域内の気圧と風を与える。

台風の気圧分布は藤田の式を用いた。

$$P(r) = P_\infty - \frac{a(t)}{\sqrt{1 + (r/r_0)^2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 P_∞ は台風域外の気圧、 $a(t)$ は中心気圧降下量、 r_0 は台風の規模を表す要素である。

モデル台風では、 P_∞ は一般によく用いられる1010 mb ($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$) の値を、 r_0 は台風によってかなり異なるが、日本に上陸する台風の r_0 は平均的に50 km とされるので²⁾、 $r_0 = 50 \text{ km}$ として計算を行った。

台風域内の風は一般流と中心対称風から成るものとした。一般流の風速は移動速度に比例し、中心からの距離とともに指数関数的に減少し、中心対称風は傾度風に比例した風速を持ち、その方向は等圧線に対して30°の角をなして内側に吹く風と仮定する⁵⁾。

以上の仮定から、台風域内の風速成分 W_x 、 W_y は次のようになる。

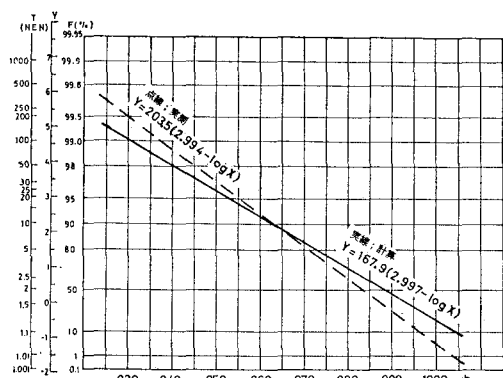
$$W_x = c_1 V_x \exp\left(-\frac{r\pi}{5 \times 10^5}\right) - c_2 \left[\sqrt{\frac{10^8}{\rho_a}} \frac{1}{r_0} \left\{ \frac{r_0}{\sqrt{r^2 + r_0^2}} \right\}^{3/2} - \frac{f}{2} a^{-1/2} \right] a^{1/2} (0.5x + 0.866y) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$W_y = c_1 V_y \exp\left(-\frac{r\pi}{5 \times 10^5}\right) + c_2 \left[\sqrt{\frac{10^8}{\rho_a}} \frac{1}{r_0} \left\{ \frac{r_0}{\sqrt{r^2 + r_0^2}} \right\}^{3/2} - \frac{f}{2} a^{-1/2} \right] a^{1/2} (0.866x - 0.5y) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 V_x 、 V_y は台風の移動速度成分 (m/s)、 r は台風中心からの距離 (m)、 ρ_a は空気密度、 f はコリオリ係数、 c_1 、 c_2 は比例定数である。 c_1 は各台風によって異なるが、比較的 r_0 の小さい台風では6/7、 r_0 の大きい台風で4/7といわれている。後述の既往台風の数値シミュレーションではこれらの値を用いた。また、モデル台風においては c_1 は0.5と仮定した。

c_2 は、既往台風で0.6を用い、モデル台風では0.5と仮定した。

確率年最低気圧の実測値と推定値を比較するために、鹿児島を例にとると、図-2のようになりよく一致し、実測値と計算値の差は大きいところで8 mb (800 Pa) 程度である。



図—2 確率年最低気圧の実測値と計算値 (鹿児島)

(3) 実験式による高潮推算

通過する台風の経路、気圧分布、風速分布が与えられたので、各地における最大風速、風向および最低気圧が求められる。高潮の最大偏差は観測から得られている次式で示される実験式で推定した。

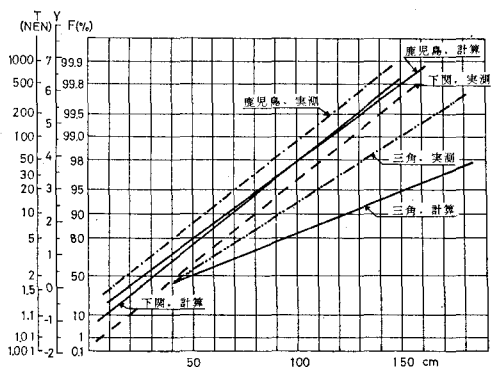
$$h = a\Delta p + bV_{\max}^2 \cos \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 h は最大偏差 (cm)、 Δp は気圧降下量 (mb)、 $V_{\max}$ は最大風速 (m/s)、 θ は偏差を最大にする風向と最大風速時の風向のなす角度である。 a, b は定数で、対象地点によって異なる。対象地点を代表する港の a, b を表—4 に示す。

表—4 対象地点における a, b の値

地 名	a	b	主 風 向
鹿児島港 (鹿児島湾)	1.234	0.056	SSE
三角港 (有明海)	1.185	0.154	SSW
下関港 (瀬戸内海西部)	1.231	0.033	ESE

得られた高潮の最大偏差を Gumbel 分布を仮定して統計処理し確率年最大偏差を求める。こうして得られた確率年最大偏差の計算値を実測値と比較したのが 図—3 である。これによれば、鹿児島港、下関港では同様の傾向



図—3 確年最大偏差の実測値と実験式による推定値

を示し、その差も 10~15 cm 程度であるが、三角港ではその差が大きい。これは、実測値のバラツキもあるが、ここで用いたような簡単な予測式では台風と海水の干渉効果を十分に表現するのがむずかしいためと考えられる。

3. 高潮の数値シミュレーション

実験式では簡単に高潮偏差を推定できるが、台風と海水との力学関係が明らかでなく、各地点毎の細かい予測も十分に行えない。そこで、2. (1) で得られたモデル台風を用いて数値シミュレーションによって有明海での高潮最大偏差を求め、統計処理を行った。図—4 に有明海と検潮所の位置を示す。



図—4 有明海と検潮所

(1) 数値モデル

流体の運動方程式、連続式を鉛直方向に積分した 2 次元一層モデルを用いる⁶⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} \\ + A_L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \zeta) c^2} \\ + (1 + k) \frac{\rho_a}{\rho_w} g \frac{W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{(h + \zeta) c^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} \\ + A_L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{(h + \zeta) c^2} \\ + (1 + k) \frac{\rho_a}{\rho_w} g \frac{W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{(h + \zeta) c^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (h + \zeta) u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (h + \zeta) v \} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 u, v ではそれぞれ x, y 方向の水深方向平均

流速, h は水深, ζ は潮位, f はコリオリ係数, c は底面の粗度係数, ρ_w は海水の密度, ρ_a は空気密度である。

また, A_t は水平混合項で, 考えている現象の規模の $4/3$ 乗に比例し, その比例係数は 10^{-2} (CGS 単位) 程度といわれている⁷⁾。式 (8), (9) の左辺最後の項は風による吹寄せの効果を表わし, k は一般に $0.25 \sim 0.5$ の値をとる。本計算では $k=0.25$ とおいた。

(2) 計算手法と計算条件

数値計算の差分法は, ADI 法を採用した。高潮計算は, まず有明海の外洋において口の津の高潮偏差を求める 1 次計算を行った。次に, 口の津を境界条件 (湾口条件) とした有明海を対象とする 2 次計算を行い, 各代表地点の高潮偏差を求めた。

計算対象範囲を図-5 に示す。

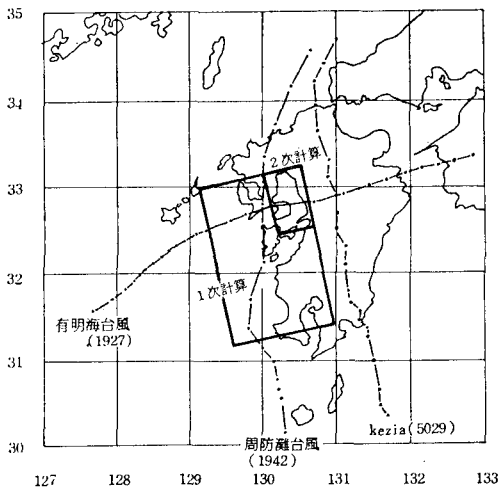


図-5 計算対象範囲

本計算に用いた差分式での格子間隔は, 1 次計算で 6750 m , 2 次計算で 2250 m にとり, タイムステップは次式の関係を満足するよう, 1 次計算では Δt を 240 秒, 2 次計算では 120 秒とした。

$$\frac{\Delta t}{2} < \frac{\alpha \Delta S}{\sqrt{gh_{\max}}} \quad (\alpha=1 \sim 3) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに, $h_{\max}$ は最大水深, ΔS は格子間隔である。

a) 1 次計算

1 次計算は 2 次計算に対する境界条件の一部を求めるもので, 計算対象領域は九州西方領域および有明海を含み, 高潮計算によって口の津の高潮量を求めた。

境界条件は, 西方 3 辺の外洋面で天文潮位を零とし, 偏差を与えた。この偏差は気圧降下量に伴う静力学的水位上昇量に等しいと仮定する。

$$\Delta \zeta = 0.991 \frac{a(t)}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^2}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

初期条件は流速および潮位とも零とした。

b) 2 次計算

本計算は対象領域を有明海にとり, 潮流・潮汐・高潮計算を行うもので, 有明海の潮位, 潮流は口の津の境界条件によって決定される。まず, 初期条件としての潮位, 潮流を潮汐計算で求めておき, 先の 1 次計算で求めた口の津の高潮偏差と潮位の和を湾口条件として与え, 高潮計算を行った。

口の津の潮位振幅は M_2, S_2 分潮の和 1.45 m を与えた。

従って, 湾口条件 ζ_2 は次式で与えられる。

$$\zeta_2 = 1.45 \sin \omega t + \zeta_1 \quad \dots\dots\dots (13)$$

(3) 既往台風による高潮計算結果

高潮数値シミュレーションのモデルの妥当性をみるために, 既往の台風を入力し, 高潮偏差の実測値と計算値の照合を試みた。入力する台風は, 過去有明海に高潮の被害を与えた代表的な台風であること, および経路として有明海の高潮を代表的に説明できるものとし, 1927 年の有明海台風, 1942 年の周防灘台風, 1950 年の Kezia 台風, 1956 年の Babs 台風, 1970 年の Wilda 台風をとりあげた。図-6 に計算結果の一部を示すが, 比較的良好一致を示している。

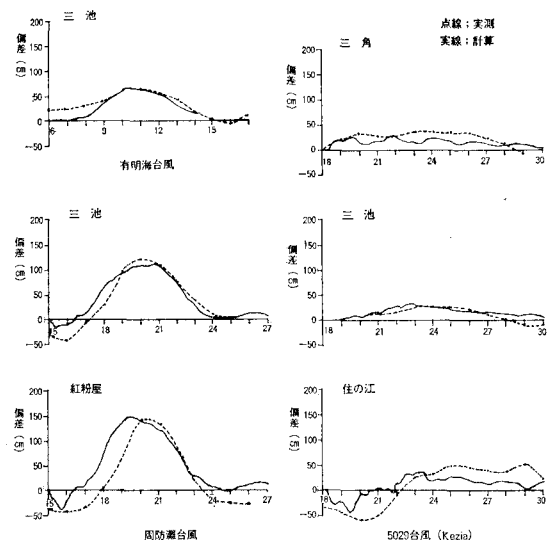
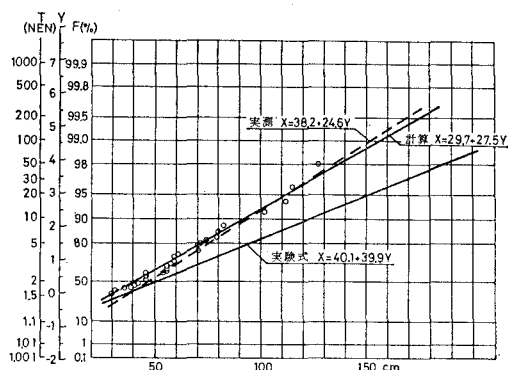


図-6 既往台風の高潮偏差の実測値と計算値

4. 確率年台風 (モデル台風) による高潮推算

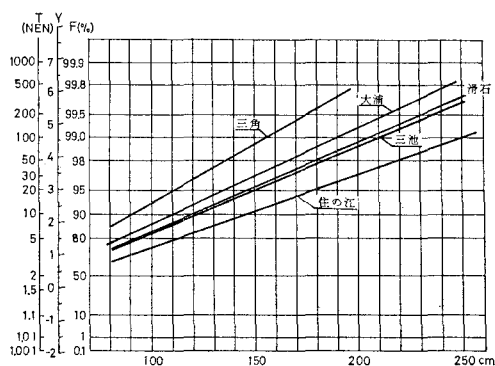
既往台風による高潮数値シミュレーションの結果, 有明海の高潮推算モデルとして比較的良好の結果が得られることがわかったので, 先に得られたモデル台風を用いて高潮シミュレーションを行い, 最大偏差を求めた。入力する台風は実験式で各年の最大偏差を与えたものを 50 年分抽出し, 50 個の台風による年最大偏差を計算した。



図—7 確率年最大偏差の実測値と推算値 (三角)

こうして得られた高潮の最大偏差を、Gumbel 分布を仮定して統計処理し、各地点の確率年最大偏差を求めた。

三角港での実測値と計算値を比較したのが図—7である。実測値は測点数が少ないこと、Gumbel 分布と仮定するにはやや無理があることなどの問題は残るが、実測値と計算値の傾向はかなり良く一致している。さらに、有明海の代表的な地点における確率年最大偏差の計算結果を図—8に示す。



図—8 確率年最大偏差 (計算値)

また、仮想台風として伊勢湾台風が 56 09 台風 (Babs) の経路を通過したケースについても計算を実施した。この場合には、最大偏差は三角 118 cm、三池 165 cm、紅粉屋 230 cm、住の江 258 cm、鹿島 241 cm の結果を得た。気象庁の報告⁸⁾では、同様の計算から三角 113 cm、三池 188 cm、紅粉屋 263 cm、住の江 241 cm、鹿島 280

cm と計算されており、今回のモデルは湾奥で気象庁報告よりやや低い値となっている。

5. まとめ

単純化されたモデル台風により、高潮推算を行って確率年最大偏差を求める手法を開発した。地域によっては実験式で簡単に傾向を求められる所 (鹿児島、下関) と、シミュレーションを実施することにより精度が向上すると思われる所 (三角) があることがわかった。高潮の推算手法はほぼ確立されたと言われているが、モデル台風を適用するに当たっては、台風域内の風速を表わす比例定数 c_1 , c_2 や、吹き寄せの効果を表わす k の見積りおよび台風の通過時刻と最大偏差の出現する時刻の関係等まだまだ検討すべき項目は多い。

今後は、他地点の推算も行い、長期間の実測値との検証をしながらモデルの精度を高めてゆき、高潮推算に確率の概念をとり入れて港湾、海岸構造物の計画および設計に応用してゆきたいと考えている。

最後に、本計算を進めるにあたり御指導頂いた港湾技術研究所、堀江毅海水浄化研究室長、村上和男海水汚染水理研究室長に感謝致します。なお、数値計算に際して、港湾技術研究所所有の高潮推算プログラム (L013) および電算機 (ACOS-800 II) を使用した。

参考文献

- 1) 高橋浩一郎: モデル台風による年最大風速超過確率の推定, 本州四国連絡架橋調査, 気象調査 (中間報告その 2), pp. 1-1~1-33, 1964.
- 2) 光田 寧: 標準計画台風について (1), 京大防災研究所年報, 第 8 号, pp. 605~612, 1965.
- 3) 光田 寧: 標準計画台風について (2), 京大防災研究所年報, 第 9 号, pp. 267~271, 1966.
- 4) 運輸省港湾局防災課: 全国港湾海岸潮位調査, 214 p., 昭和 51 年 3 月.
- 5) たとえば, 堀口孝男: 高潮推算に関する一考察, 第 13 回海講演文集, pp. 242~247, 1966.
- 6) 金子安雄・堀江 毅・村上和男: ADI 法による潮流と汚染拡散の数値計算——大阪湾に適用した場合について——, 港研報告, 第 14 巻, 第 1 号, pp. 1~16, 1975.
- 7) 堀江 毅他: 潮流計算における境界等の取扱い——特に ADI 法による検討——, 港研報告, 第 15 巻, 第 2 号, pp. 251~287, 1976.
- 8) 気象庁: 有明海高潮の総合調査報告, 気象庁技術報告, 第 28 号, 174 p., 昭和 38 年 3 月.