

確率台風モデルの構築とその統計的特性

橋本典明*・佐藤裕司**・松浦邦明***・市川雅史****

1. はじめに

平成 11 年 9 月に九州地方を襲った台風 18 号により、周防灘北西岸や熊本県西岸では護岸の天端を超える高波を伴った高潮が発生し、甚大な被害が生じた。発生した高潮・高波は当該地域の港湾・海岸構造物の設計条件を超えていると考えられ、従来の既往最大台風を用いた波浪推算や高潮推算により求められる再現期待値の考え方には収まらない。また、性能設計の観点からは、可能最大の台風を想定した設計条件の検討が求められている。

将来起こり得る台風を予測する方法は、気象モデルを用いる方法と、統計モデルを用いる方法の 2 つがある。しかし、上記の要請に応えるためには、確率的に起こり得る台風を推定するモデルを構築することが有効である。本研究は、統計モデルを用いて時間発展型の確率台風モデルを構築し、その統計的特性を明らかにすることを目的とする。

自己回帰モデル(以下、AR モデル)は確率台風モデルの有効な 1 つと考えられ、端野・桑田(1987)、山口他(1995)はこれを用いた確率台風モデルを構築している。しかし、AR モデルの最適次数の検討と、台風属性が季節変化する点は考慮されていない。また、端野・桑田ではシミュレーション領域が大阪湾を中心とした狭い範囲に限られている。そこで、本研究では北緯 23°~39°、東経 120°~150°の広領域において、季節毎に AR モデルを適用した。さらに AIC により最適次数を決定した。

2. 確率台風モデル

1 時間毎の気圧、速度、進行方向を台風属性の絶対量と呼びベクトル T で表し、これらの 1 時間あたりの変化量を台風属性の時間変化量と呼び ΔT で表す。ある時刻 i における台風中心位置を (x_i, y_i) とすると、台風属性 T は次式で予測することができる。

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_{i-1} + \Delta T_i \\ \Delta T_i &= \Delta S(x_i, y_i) + Z_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\Delta S(x_i, y_i)$ は時刻 i の台風中心位置 (x_i, y_i) に依存する台風属性の時間変化量の空間平均場である。 Z_i は台風属性の時間変化量 ΔT_i からその空間平均場 $\Delta S(x_i, y_i)$ を引いた偏差を表す。

この偏差 Z_i に関して、以下の多変量 AR モデルを適用する。

$$Z_i = \sum_{m=1}^n A_m Z_{i-m} + \nu_i \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 n は自己回帰の次数(AR 次数)、 A_m は自己回帰係数で、 ν_i は正規分布に従うランダム成分である。

過去の台風データを用いて、 $\Delta S(x_i, y_i)$ と A_m 、 ν_i を決定すれば、(1)(2)式によって台風属性の時間発展を得ることができる。

3. データセットの作成と AR 係数の推定

AR モデルの推定に用いたデータは、1951~2000 年の 50 年間に北緯 23°~39°、東経 120°~150°の領域内で発生、又は通過した熱帯低気圧のうち風速が 35 kt 以上に発達したもの 656 個の台風属性の絶対量と台風属性の時間変化量である。但し、台風の移動速度が遅くほとんど停滞している場合は、台風の進路が円を描くように迷走することがあるため、移動速度が下限値(5 km/h)以下となったデータを除外した。また、1 時間毎のデータセットを作成する際には、等加速を仮定して内挿した。

台風の月別通過経路と日本列島の位置関係から、季節を 6、7 月、8 月、9 月、10 月、11、12、1~5 月(冬季)の 5 つに分けた。

まず、季節毎に台風属性の時間変化量について、空間平均場 $\Delta S(x_i, y_i)$ を求めた。空間平均場は、特に冬季に対象領域中データが疎になる部分が多くなるため、スプライン法による平滑化を用いず、緯度方向 2°、経度方向 3°のメッシュ平均値を用いた。

次に、ハウスホルダー変換に基づく最小自乗法によって季節毎に AR 係数 A_m 、 ν_i を推定した。

図-1 は AR 次数と AIC の関係である。AR 次数は、AIC が最も低下したところを選択した結果、各季節とも 2 となった。これは、今回の解析対象領域内の台風データのうち多くが 3 時間間隔で得られていることに起因す

* 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所
** 国土交通省国土技術政策総合研究所
*** 水修 財団法人日本気象協会首都圏支社
**** 理修 財団法人日本気象協会首都圏支社

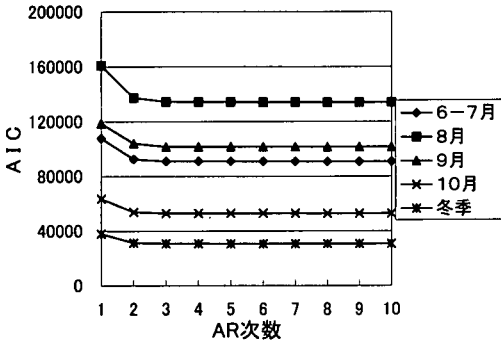


図-1 AIC による AR 次数の決定

と考えられる。

4. シミュレーション条件

台風属性の時間発展のシミュレーションは、推定された $\Delta S(x_i, y_i)$ と A_m, v_i を用いて、モンテカルロ法により行った。ランダム成分 v_i は、平均 0、分散 σ^2 の正規乱数とした。その際与える台風の発生個数、初期位置、初期値は、2通りの方法により決定した。それぞれ再現計算、予測計算と呼ぶ。

再現計算の台風発生個数、初期位置、初期値には、過去 50 年間の実データを用いた。これを 1 セットとして、季節毎に 10 セット再現計算を行った。

予測計算の台風発生個数は、季節毎の実データの平均発生個数に従うポアソン乱数により決定した。初期位置は実データの累積度数分布に従う乱数により決定した。初期値は次のように与えた。季節毎に実データの台風属性の絶対量について、空間平均場 $\bar{T}$ を求めた。 $\bar{T}$ とそれからの偏差 ε の和を初期値とした。その際、実データの各台風属性の偏差は、相互に相関がないことが確認されたので、予測計算の各台風属性の偏差は、それぞれ独立に、実データから求めた台風属性の偏差に関する累積度数分布に従う乱数として与えた。50 年を 1 セットとして 10 セット、及び 500 年を 1 セットとして 10 セットそれぞれ季節毎に予測計算を行った。

再現計算、予測計算の実施において、乱数 v_i の値に制限を設けない場合には、台風の進行方向に異常な値が計算されることがある。このため、計算では発生乱数の値は $\pm\sigma$ 以内の値をとるように制限を設けた。また、移動速度に下限値 (5 km/h) を設け、下限値を下回るときには下限値を用いた。

5. 確率台風モデルの再現計算結果

実データと再現計算 (50 年 $\times$ 10 セット) の台風の通過頻度 (全期間におけるメッシュ通過回数) を図-2(a), (b) に示す。実データ、再現計算とも北緯 23°, 東経 127°

付近で 55 回の最頻値を示し、40 回の等頻度線が北緯 28°, 東経 133° 付近まで達する。実データ、再現計算ともにここから北東へ向かい、北緯 31°~35°, 東経 140°~145° の日本の南東海上まで、高頻度帯が延びた分布形状を示す。しかし、再現計算の通過頻度は、実データに比べてやや少ない。東日本付近も同様に、再現計算の通過頻度は、実データに比べて約 5 回少ない。一方、沖縄から黄海にかけての通過頻度の分布形状は、実データでは等頻度線は北東へ延びているが、再現計算では北西へ向かって延びている。西日本については、通過頻度は概ね一致している。

図-3(a), (b) は、台風中心気圧の平均値 (全期間におけるメッシュ平均値) である。実データ、再現計算ともに北緯 27° 付近を中心に 970 hPa の等圧線が概ね東西方向に延びている。980 hPa の等圧線は、いずれも本州に沿って延びる。東シナ海から黄海に広がる低圧域も概ね再現されているが、黄海付近の再現計算の平均気圧は実データに比べてやや低くなっている。

図-4(a)~(c) は、季節毎の計算領域全体における台風属性 (気圧、速度、方位) の平均値である。各属性とも、季節変化の傾向は概ね再現されたが、気圧の平均値は再現計算結果の方が全般に約 5 hPa 低い。これは、図-2(a) (b) において再現計算の台風通過頻度が実データよりも東シナ海から黄海付近で多いこと、図-3(a) (b) において再現計算の平均気圧が黄海付近で低くなっていることに対応する。方位は北を 0°, 時計回りを正と定義している。再現計算は実データに比べて全般に西寄りで、特に 10 月は約 30° 西寄りである。これは、図-2(a) (b) において再現計算の通過頻度は実データと比較して解析領域の東側で低く、西側の黄海方面で高くなっていることに対応する。速度の平均値に関しては、再現性が良い。

図-5 は、実データと再現計算の台風中心気圧の計算領域全体での出現頻度である。再現計算の出現頻度は最頻値付近で実データと概ね一致している。しかし、気圧の低いところ (約 950 hPa 以下) では再現計算の出現頻度は実データに比べて多くなっている。

本確率台風モデルは過去 50 年の台風の統計値に対して上記のような特徴を有するが、これをふまえて次章で予測計算を適用する。

6. 確率台風モデルの予測計算結果

実データと予測計算 (50 年間) の台風中心気圧の計算領域全体での出現頻度を図-5 に示す。予測計算の最頻値の気圧は実データに比べ低いが、気圧の低いところ (930 hPa 以下) では概ね実データと一致している。

図-6(a) (b) は、実データと予測計算の台風中心気圧の最低値 (50 年間におけるメッシュ最低値) である。北

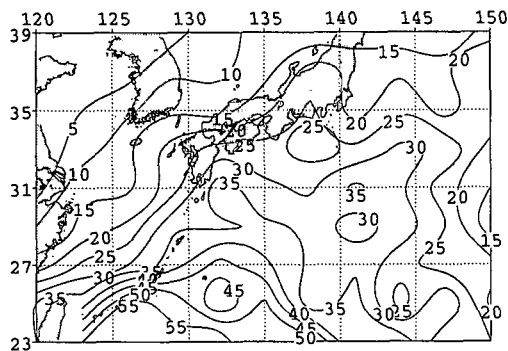


図-2(a) 台風の通過頻度(回)
(実データ, 1951~2000年)

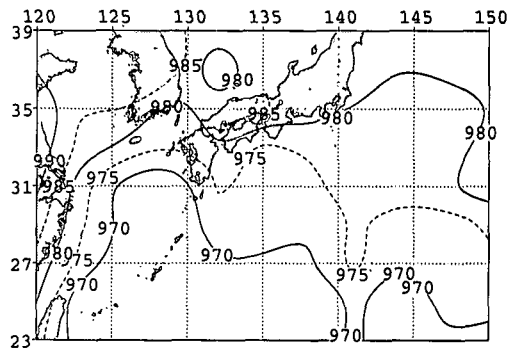


図-3(a) 台風中心気圧の平均値 (hPa)
(実データ, 1951~2000年)

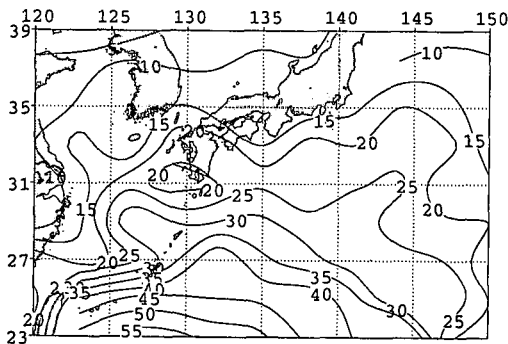


図-2(b) 台風の通過頻度(回)
(再現計算結果, 50年間)

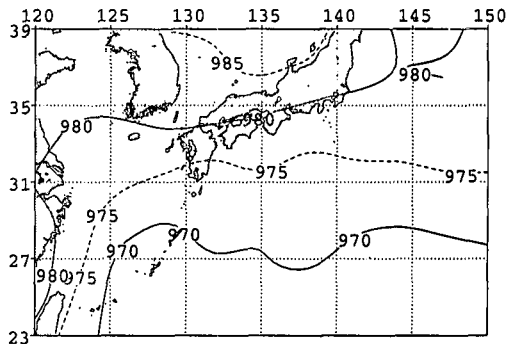
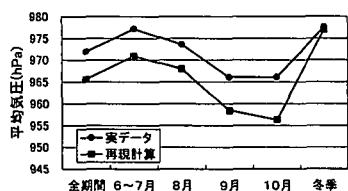
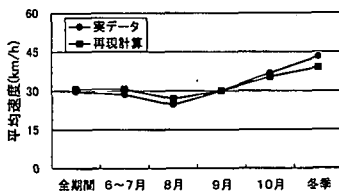


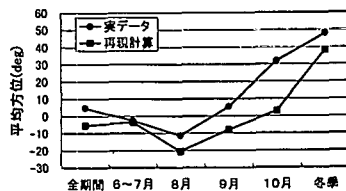
図-3(b) 台風中心気圧の平均値 (hPa)
(再現計算結果, 50年間)



(a) 気圧



(b) 速度



(c) 方位

図-4 計算領域全体における台風属性の平均値

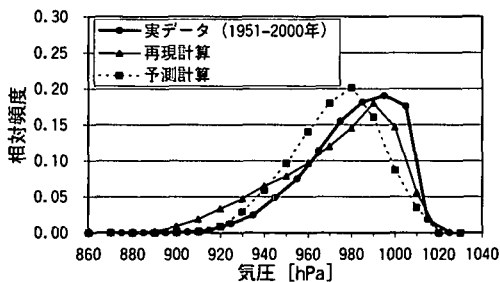


図-5 計算領域全体における台風中心気圧の出現頻度

緯 23~25°, 東経 127~145°の南方海上において, 実データには 890~900 hPa の最低圧域が広く分布しているが, 予測計算では北緯 25°, 東経 126°の宮古島付近の狭い範囲に限られる。日本列島付近についてみると, 920 hPa の等圧線は, 実データでは九州南部を通る。一方, 予測計算では薩南諸島付近を通り概ね一致する。930 hPa, 940 hPa の等圧線についても日本付近については比較的一致する。

図-6(c) は, 予測計算の台風中心気圧の最低値 (500 年間におけるメッシュ最低値) である。分布形状は 50 年間の予測計算結果と似ているが, 気圧は 10~20 hPa 低く

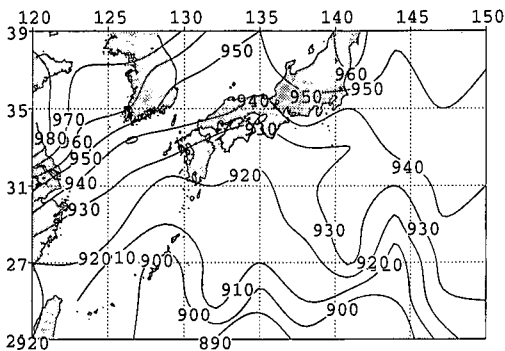


図-6(a) 台風中心気圧の最低値 (hPa)
(実データ, 1951~2000 年)

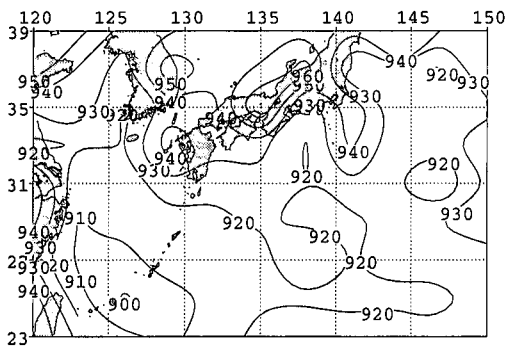


図-6(b) 台風中心気圧の最低値 (hPa)
(予測計算結果, 50 年間)

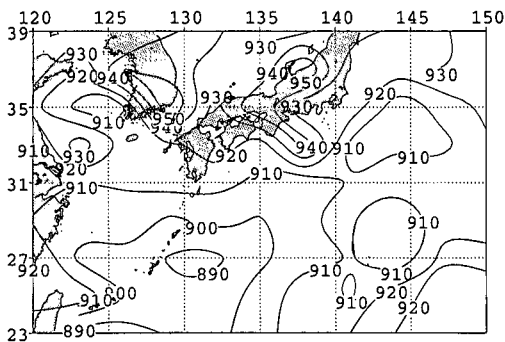


図-6(c) 台風中心気圧の最低値 (hPa)
(予測計算結果, 500 年間)

表-1 予測計算による 500 年間の台風最低気圧 (hPa)

	平均値	標準偏差
東京湾	908.6	9.7
伊勢湾	913.2	3.1
大阪湾	911.0	3.1

なっている。900 hPa 以下の領域が南西諸島海域に広がっている。910 hPa の等圧線は九州から本州のすぐ南を通り、920 hPa の等圧線は九州、930 hPa の等圧線は本州を通っている。

図-7(a)~(c)は、過去 50 年間に東京湾、伊勢湾、大阪湾の中央から半径 300 km 圏内に接近した台風の最大気圧降下量 (1010—気圧値) の上位 50 ケースを抽出し、実データと予測計算の出現特性を比較したものである。東京湾、大阪湾については、気圧降下量の小さいところで予測計算は実データに比べて約 10 hPa 高くなっているが、気圧降下量の大きいところでは予測計算と実データはほぼ一致している。伊勢湾については、予測計算と実データは全体的に一致している。

なお、過去 50 年間に計算領域内で観測された台風中心気圧の最低値は 882.2 hPa である。一方、予測計算 (50 年) において、この領域内の最低気圧は 896.0 hPa であり、実データに比べてやや高い。Holland (1997) は、物理的に可能な台風の最低気圧を約 870 hPa と見積もっているが、本研究における計算領域は北緯 23°以北を対象としているのでこの様な極値は出現していない。

予測計算 (500 年) により、3 大湾を対象とした 500 年間の第 1 位の台風最低気圧を推定した結果、表-1 の通りとなった。東京湾では平均 908.6 hPa、伊勢湾では平均 913.2 hPa、大阪湾では平均 911.0 hPa を得た。これを、過去本州に来襲し最低気圧を記録した台風と比較すると、1934 年 9 月 21 日に上陸した室戸台風の上陸時の気圧 911.9 hPa に対応する。

7. おわりに

本研究では、AR モデルによる時間発展型の確率台風モデルを構築し、その統計的特性を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

① AR 次数は、AIC が最も低下したところを選択した結果、各季節とも 2 となった。

② 再現計算 (50 年) を行った結果、台風経路は実データに比べてやや西よりになる傾向があった。台風中心気圧の平均の平面分布は概ね実データのそれと概ね一致した。計算領域全体での台風中心気圧の出現頻度頻度は、最頻値付近で実データのそれと一致したが、気圧が低いところでは実データよりも多くなった。

③ 予測計算 (50 年) を行った結果、日本付近における最低気圧は概ね再現された。計算領域全体での台風中心気圧の出現頻度頻度は、最頻値の気圧は実データに比べて低いが、気圧の低いところで実データと一致した。

④ 過去 50 年間に東京湾、伊勢湾、大阪湾の中央から半径 300 km 圏内に接近した台風の最大気圧降下量の上位 50 ケースを抽出し、実データと予測計算の出現特性を

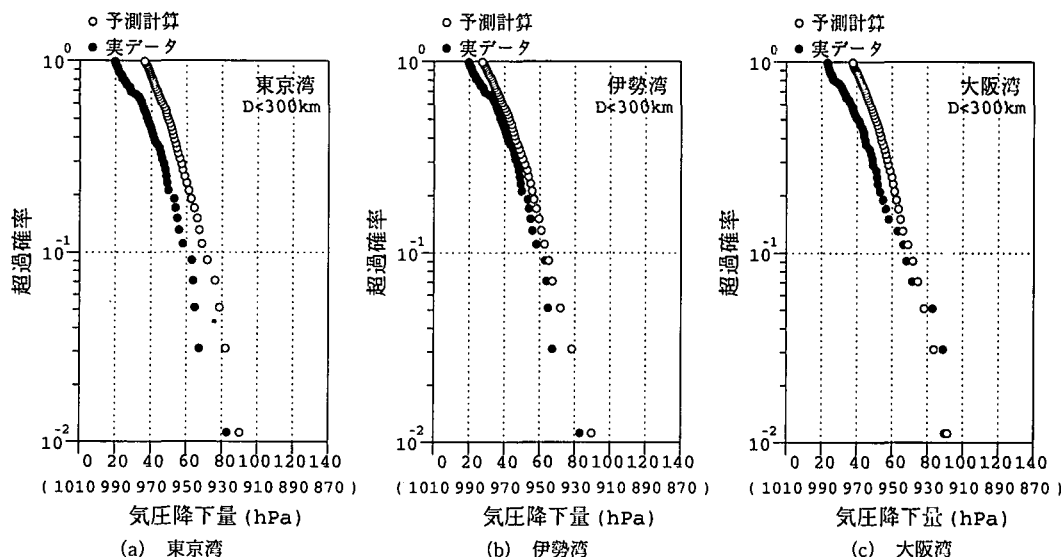


図-7 3大湾における最大気圧降下量の出現特性 (実データと予測計算)

比較したところ、気圧降下量が小さいところでは予測計算は実データに比べて約 10 hPa 大きい、気圧降下量大きいところではほぼ一致した。

⑤ 予測計算(500年)により、3大湾を対象とした500年間の第1位の台風最低気圧を推定した結果、東京湾では平均 908.6 hPa、伊勢湾では平均 913.2 hPa、大阪湾では平均 911.0 hPa を得た。

また、本研究の課題と適用について、以下に示す。

① 本モデルは自己回帰モデルであり、台風属性は台風位置に依存して予測される。このため、気圧や最大風速の予測精度向上のためには台風位置の精度向上が重要である。移動速度に関しては、ほぼ妥当な再現結果が得られており、今後は進行方向の精度向上をはかる必要がある。これに関連して、4章で述べたように予測計算では、発生乱数の値と移動速度に制限を設けている。より妥当な制限値の検討が課題である。

② 本モデルでは最大風速の予測は対象としていないが、ほぼ同じ方法により予測可能であり、今後の課題である。

③ 本モデルは定常モデルであり、将来予想される地

球温暖化がもたらす台風発生への影響は考慮されていない。地球温暖化による台風発生数の変化や発生時の勢力の変化は、これまでのところ正確には予測されていないが(例えば Henderson-Sellers 他 (1998)), 将来における発生数や発生勢力の変化が定量化された際には、本モデルの台風発生数、発生の初期値に対してこれらのトレンドを考慮することが可能と考える。

参考文献

- 端野道夫・桑田康雄 (1987): 確率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.
- 山口正隆・畑田佳男・花山格章・中村雄二 (1995): 確率台風モデルと波高重回帰モデルに基づく台風時波浪の極値の推定, 自然災害科学, 14-2.
- Holland, G. J. (1997): The Maximum Potential Intensity of Tropical Cyclones, Journal of the atmospheric sciences, Vol. 54, pp. 2519-2541.
- Henderson-Sellers, H. Zhang, G. Berz, K., Emanuel, W. Grey, C. Landsea, G. Holland, J. Lighthill, S.-L. Shieh, P. Webster, and K. McGuffie (1998): Tropical Cyclones and Global Climate Change: A Post-IPCC Assessment, Bulletin of American Meteorological Society, Vol. 79, No. 1, pp. 19-38.