

北西太平洋および東シナ海における台風発生波高の極値の推定

畑田 佳男*・山口 正隆**・平田 敬之***

1. 緒 言

山口ら (1994, 1995 b) は、北西太平洋や東シナ海において数百年以上の長期の再現期間に対する台風時波浪の極値を推定する方法として、台風属性の確率的発生モデルと海上風・波浪推算モデルの組み合わせよりなるシステムを提案した。しかし、このシステムでは、波浪推算に1点深海・浅海モデルが用いられているので、波浪の極値の平面分布を推定するためのシステムとしては、計算時間の点で実用的でない。

そこで本研究では、1点深海・浅海モデルを格子点浅海・深海モデルに置き換えた「確率的台風モデルに基づく台風時波浪の極値の平面分布推定システム」を新たに構築し、北西太平洋海域では1000年間、東シナ海海域では500年間のシミュレーション台風に対する波浪推算結果の極値統計解析に基づいて、超長期の再現期間に対する確率波高の平面分布を推定するとともに、台風発生年最大波高資料の母分布特性を検討する。

2. 台風時波浪の極値の平面分布推定システム

2.1 対象海域

波浪推算の対象海域は北緯20°~44°、東経120°~147° (南北2800 km, 東西2720 km) の北西太平洋海域および北緯20°~35°、東経120°~134° (南北1760 km, 東西1440 km) の東シナ海海域である。北西太平洋海域には図-1に示す格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 80$ km, 格子分割数 36×35 の計算格子網、図中太枠で囲んだ東シナ海海域には $\Delta x = \Delta y = 40$ km, 格子分割数 44×36 の計算格子網を設ける。台風の確率的発生・移動領域は、南側境界が2格子分 (160 km) 北側に位置することを除けば、北西太平洋を対象とした波浪推算領域と同じである。また、東シナ海のうち、北部から西部にかけて水深が小さい。そこで、波浪の極値に及ぼす海底地形の影響を検討するため、波浪推算には格子点深海モデルのみならず、格子点浅海モデルを用いる。

2.2 システムの概要

本システムは、台風属性 (台風の中心位置, 中心気圧, 台風半径) の確率的発生モデル, 台風モデル法に基づく海上風推算モデル, 格子点法に基づく波浪推算モデル, 最小2乗法に基づく波高の極値統計解析モデル, よりなる。各モデルの概要はつぎのようである。

a) 確率的台風モデル

山口ら (1994) は、過去41年の間に図-1の北西太平洋海域で中心気圧980 hPa以下に発達した320個の台風の台風属性資料の統計解析に基づいて台風属性の確率的発生モデルを作成した。本研究で使用するモデルは、山口らのモデルにおいて台風の発生年代および発生季節を考慮することにより、新たに再構成した年代季節別確率的台風モデルである。このモデルでは、まず41年間の期間と発生台風を、①前半 (1951年~1971年の21年間) の178個と、②後半 (1972年~1991年の20年間) の142個の2つに大別し、ついでそれぞれの期間の台風を、その発生時点および履歴特性を考慮して、①7月以前 (前半39個, 後半36個), ②8月 (43個, 39個), ③9月 (46個, 32個), ④10月以降 (50個, 35個), の4つの季節

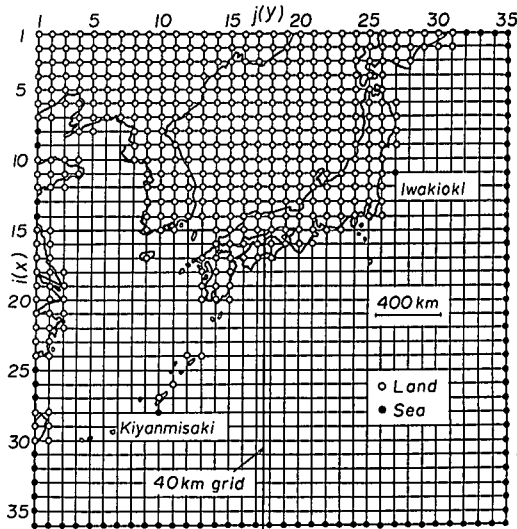


図-1 北西太平洋における計算格子網

* 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

*** 香川県

に細分割する。

モデル化にあたり、年代季節別に台風年発生数をポアソン分布、境界上の台風属性の平均値を1次元重み付きスプライン関数、対象領域内の台風属性および台風属性変化量間の関係を小領域別に回帰式で近似するとともに、境界および領域内での平均値からの変動量を資料解析より小区域別に求められる経験的確率分布で表示する。

確率的台風モデルを1940年～1994年に発生した429個の比較的勢力の強い台風についての台風属性資料に置き換えれば、既往台風に対する台風時波浪の極値の平面分布推定システムが構成される。

b) 海上風推算モデル

海上風推算は台風モデル法による。海上風算定に必要な諸量は上述の台風属性(台風半径の推定はMyers式による)と、緯度によって決まる吹込み角である。計算にあたっては、6時間間隔の台風属性資料から1次補間を通じて1時間あるいは30分間隔で得た台風属性資料を入力値として海上風を推定する。この場合、10 m 高度における海上風速 U_{10} への補正係数は0.6とする。

c) 波浪推算モデル

波浪推算には、第2世代に属する格子点深海モデルおよび格子点浅海モデル(山口ら, 1984)を使用する。

北西太平洋海域での波浪推算に用いる周波数データと個数は0.045～1.0 Hz 間を不等分割した20個、方向データと個数は0～360°間を $\Delta\theta=20^\circ$ で等分割した19個、波および海上風の計算時間間隔はそれぞれ1時間、一方、東シナ海海域での波浪推算に用いる周波数データと個数は0.04～0.5 Hz 間を不等分割した21個、方向データと個数は上記と同じ19個、波および海上風の計算時間間隔はそれぞれ30分、である。

d) 波高の極値統計解析モデル

台風時年最大波高資料および台風時極大波高資料に対して、Gumbel 分布および形状母数 $k=0.75, 1.0, 1.4, 2.0$ の3母数 Weibull 分布の5種類を候補確率分布とする最小2乗法(LSM)に基づく極値統計解析モデル(合田, 1990)を適用し、相関係数基準に従って最適確率分布を選択するとともに、確率波高およびその標準偏差を推定する。また、台風時年最大波高資料に対しては、3母数 Weibull 分布を候補確率分布とするPWM法に基づく極値統計解析モデル(山口ら, 1995 a)も使用する。

2.3 計算方法

本システムの計算手順は次のようである。①ポアソン乱数を与え、年代季節別発生台風数を決定したのち、6時間ごとの台風属性をシミュレートする。シミュレーション期間および発生台風は北西太平洋海域で1000年および7862個である。②発生台風の全期間について、1

時間ごとの海上風の平面分布を台風モデル法で推定する。③格子点深海モデルを用いて波浪推算を行い、台風別最大波高を格子点ごとに求める。④台風別最大波高から求めた年最大波高資料および極大波高資料に対して、最小2乗法あるいはPWM法(前者のみ)に基づく極値統計解析モデルを適用し、確率波高およびその標準偏差を格子点ごとに推定する。⑤格子点ごとに第1位の波高とその周期および波向の資料を抽出し、期間最大波浪の平面分布を求める。

一方、既往台風に対する波浪追算では、1940年～1994年の55年間の間に対象領域を通過した台風のうち、ある程度以上の勢力(たとえば、990 hPa)にまで発達した429個の台風を対象とする。年最大波高資料は、台風資料が毎年得られている1948年～1994年の47年間について、また極大波高資料は上記の期間のほか日本周辺に勢力の強い台風が接近しなかった1947年を除く1940年～1994年の55年間についても格子点ごとに作成し、3種類の極値資料に最小2乗法に基づく極値統計解析モデルを適用して、確率波高とその標準偏差の平面分布を求める。また、各期間についての期間最大波高を格子点ごとに得る。

東シナ海海域を対象とした計算手順も、北西太平洋海域の場合と同様であるが、波浪推算モデルとして格子点浅海モデルおよび深海モデルを使用する。また、計算時間を短縮するため、対象領域を通過した台風に計算対象台風を限定するとともに、波浪推算期間を台風発生時点から計算格子網の北端および東端よりそれぞれ250 km離れた時点までとする。この結果、東シナ海海域における波浪追算の対象となる既往台風数は297個(55年間)、シミュレーション台風数は2570個(500年間)に減少する。

既往台風では台風資料の抽出段階で、シミュレーション台風ではモデル化の段階で相対的に勢力の弱い台風は削除されているが、現実にはこれらの台風によって年最大波高がもたらされる場合もある。したがって、低い値をもつ年最大波高の推定精度は必ずしも高いとはいえないので、年最大波高資料のうち大きいものから90%の資料を用いて極値統計解析を行う。つまり、最小2乗法に基づくモデルでは $N=0.9K=0.9N_T$ ($K=47, 500, 1000$ 年) という条件、PWM法に基づくモデルでは $N=K=N_T$ ($K=42, 450, 900$ 年) という条件を使用する。ここに、 N は採択資料数、 K は対象年数、 N_T は極大波高資料総数、である。モンテカルロシミュレーションによれば、確率波高の推定精度に及ぼす採択資料数の10%程度の削減の影響は小さいことが明らかにされている。

一方、極大波高資料の解析では採択資料数の選択が問題であるが、ここでは対象年数 ($K=47, 500, 1000$ 年) に等しいとする。極大波高資料総数は、台風勢力(中心

気圧)を勘案して計算した各格子点数百 km 以内への接近台風の数とする。両極値資料に基づく確率波高とその標準偏差は相互にそれほど異ならない。

3. 台風時波浪の極値の平面分布特性

3.1 北西太平洋海域における台風時波浪の極値

図-2は既往台風を対象とした年最大波高資料の極値統計解析に基づいて得られた100年確率波高 H_{100} およびその標準偏差 σ_{100} と、1000年間のシミュレーション台風ケースに対応する100年確率波高の平面分布図である。100年確率波高は、台風が最盛期を迎える南方海域では16m以上、台風勢力が漸減する東シナ海および北西太平洋東方海域では16mから6mに減衰する特性など、両者は平均的によく対応することから、本システムは超長期の再現期間に対する確率波高の推定においても有効であると考えられる。しかし、既往台風を対象として得られた年最大波高資料の数が相対的に少ないので、前者の100年確率波高は後者より大きな空間変動を示す。この結果は100年確率波高の標準偏差にも現れてお

り、前者では0.8~2.6mの間に分布し、確率波高の大きい海域ほど標準偏差も大きい傾向がみられるのに対し、シミュレーションでは年最大波高資料数がきわめて多いことから、その標準偏差(図省略)は0.2m前後にすぎない。

図-3はシミュレーション台風ケースに対応する1000年確率波高 H_{1000} の平面分布図である。平面分布の状況は100年確率波高の場合と類似するが、南方海域で20mを越える確率波高は東シナ海や北西太平洋東部の北側海域では10m程度にまで減少する。これはもちろん北上に伴う台風勢力の減衰を反映する。わが国沿岸部では、紀伊半島~中部沿岸域にかけて18mという高い波高が出現する。また、年最大波高資料数が多いことから、1000年確率波高の標準偏差(図省略)の値は最大0.3m程度にすぎない。

図-4はシミュレーション台風を対象とした年最大波高資料の極値統計解析から得られた相関係数 ρ を $1000(1-\rho)$ として平面分布図の形で示したものであり、たとえば、図中の等値線上の5は $\rho=0.995$ を意味する。

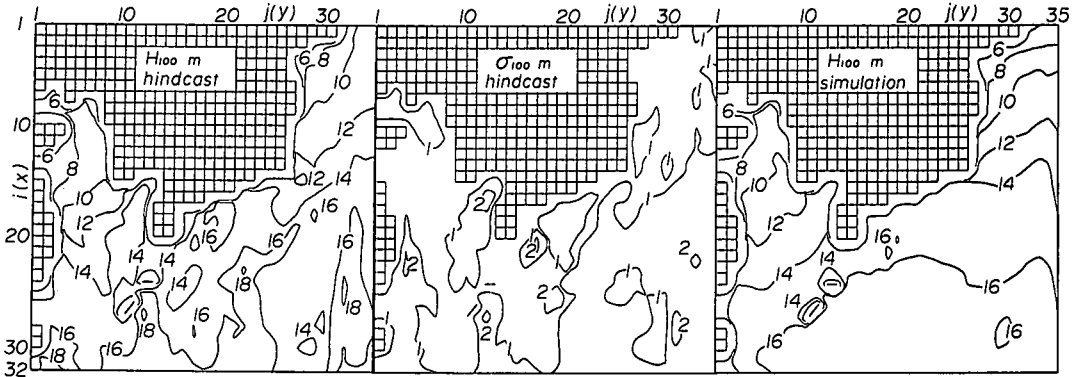


図-2 北西太平洋海域における100年確率波高

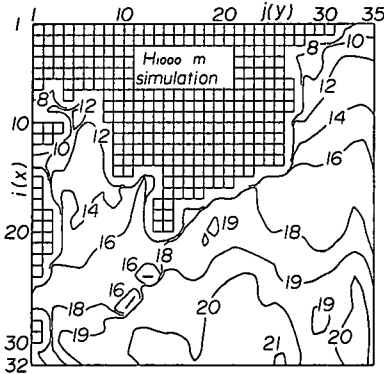


図-3 北西太平洋海域における1000年確率波高

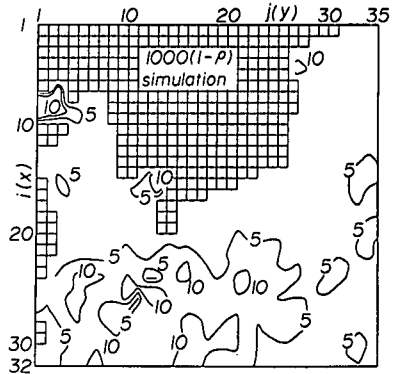


図-4 相関係数の平面分布

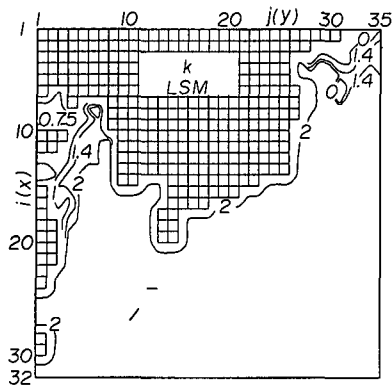


図-5 形状母数の平面分布 (最小2乗法)

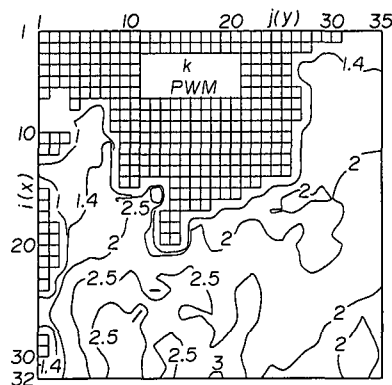


図-6 形状母数の平面分布 (PWM法)

これらの値はその最大値でも、黄海、九州西北部、沖縄本島や奄美大島周辺および南方海域にみられる10~12 ($\rho=0.990\sim0.988$)であるから、年最大波高資料に対する最適確率分布の適合度はかなり高い。

本システムによれば、長期間にわたる年最大波高資料が広い範囲で得られるので、これを利用して台風に伴う年最大波高資料の母集団の推定を試みる。図-5は、北西太平洋海域における1000年間の年最大波高資料に対する最適確率分布の形状母数の平面分布図であり、Gumbel分布が最適確率分布の場合には $k=0$ としている。形状母数は黄海と北海道および東北沖を除くすべての海域で、3母数Weibull分布における $k=2.0$ をとる。しかし、最小2乗法に基づく極値統計解析モデルは、 $k=2.0$ を最も尖鋭な分布の形状母数としているので、 $k>2$ の場合にも $k=2.0$ として評価する可能性が高い。図-6は同じ年最大波高資料にPWM法に基づく極値統計解析モデルを適用して推定したWeibull分布の形状母数の平面分布図である。形状母数は0.8~3.0の間で変動し、南方海域で大きく北側海域ほど小さい傾向にある。した

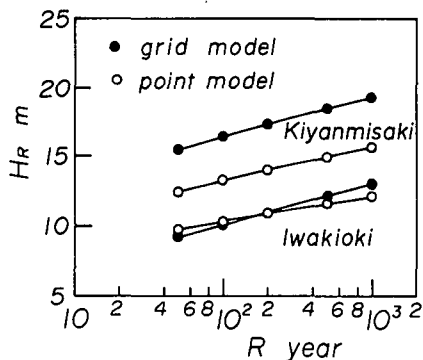


図-7 各再現期間に対する確率波高の比較

がって、台風に伴う年最大波高資料の母分布は $k=2.0$ の3母数Weibull分布で表されるという結果は、最小2乗法に基づく極値統計解析モデルの制約によるものと考えられるけれども、本シミュレーション結果に従うかぎり、母分布がかなり尖鋭な形状特性をもち、そのため確率波高の再現期間に対する変化があまり大きくないという特性は推測可能である。

つぎに、1点浅海モデルに基づく台風時波浪の極値推算システム(山口ら, 1995b)および本システムを用いた波高の極値の推定結果を比較する。図-7は確率波高 H_R ($R=50, 100, 200, 500, 1000$ 年)と再現期間 R の関係を示す。標準偏差は最大0.3mであるので、与えていない。いわき沖では、山口ら(1995b)のシステムと本システムに基づく確率波高はほぼ同じ値をとるが、喜屋武岬では本システムに基づく確率波高が山口ら(1995b)のシステムに基づく確率波高よりかなり大きい。いわき沖は海岸より約40km沖合の水深154m地点に位置し、外洋の波浪が直接来襲するのに対して、喜屋武岬は沖合約1kmの水深50m地点に位置し、陸地地形の遮蔽効果および水深の影響を受ける。しかし、格子点モデルで用いる計算格子網の地形分解能は1点モデルの場合より著しく低く、波浪推算では、これらの影響が考慮されないで、大きな相違が喜屋武岬において現れる。

3.2 東シナ海海域における台風時波浪の極値

図-8は東シナ海海域における100年確率波高の平面分布を既往台風およびシミュレーション台風ケースについて図示したものであり、後者の場合には浅海モデルのみならず、深海モデルによる結果も与えられる。また、図は省略するが、標準偏差の最大値は前者では3.0m、後2者では0.4mである。既往台風に基づく結果では、100年確率波高は南方海域から沖縄諸島周辺にかけて16mをとり、東シナ海では14mから北部の6mへと、北西側に向うにつれて減少する。また、四国および九州沿岸では12mである。同様の傾向はシミュレーション台風

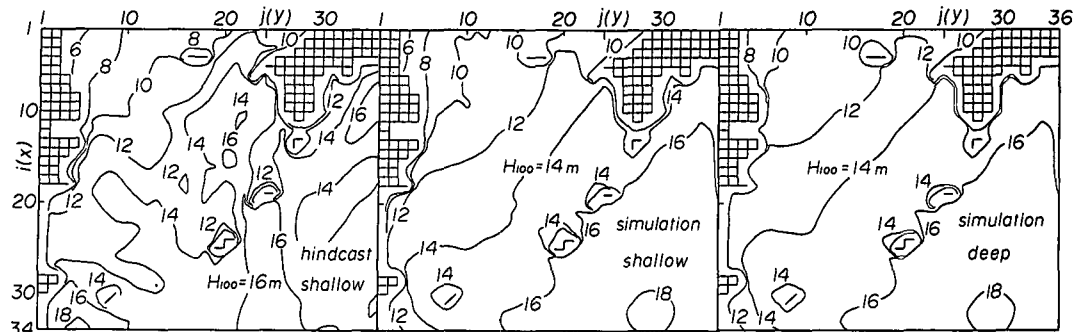


図-8 東シナ海海域における100年確率波高

ケースのうち、とくに浅海モデルに基づく結果にみられる。つまり、既往台風に基づく100年確率波高の平面分布はシミュレーション台風に基づく結果(浅海モデル)に比べてかなり複雑であるけれども、両平面分布の平均的傾向は比較的良好に対応する。ただし、南西側海域では台風の確率的なモデル化の制約によって、シミュレーション台風ケースに対する確率波高が低い。

浅海モデルおよび深海モデルに基づくシミュレーション台風ケースの結果を比べると、水深が大きく、海底地形の影響を受けない太平洋側では、100年確率波高はほぼ一致するが、東シナ海側では、水深の浅い北西端の黄海で2 m程度の相違がみられる。すなわち、東シナ海のように水深の小さい海域を対象とした波浪の極値の推定においては、浅海モデルの適用が必要になる。

図-9は浅海モデルを用いたシミュレーション台風ケースに対する東シナ海海域での1000年確率波高分布図を示す。この場合の最大標準偏差は0.5 m以下である。沖縄本島および奄美大島南東の太平洋側の広い海域で、20 m以上の波高が出現するが、東シナ海では、九州南端～南西諸島沿いの18 mから黄海南部の10 mに減少する。20 m以上の高波高域の位置は、北西太平洋海域における推定結果(図-3)とほぼ一致するが、東シナ海海域における波高はやや低い。これは、東シナ海海域の計算格子網の地形分解能が高いため、北西太平洋海域より強風、したがって高波が出現する可能性があるにもかかわらず、南西諸島の遮蔽効果がより強く影響することによると推測される。

4. 結 語

本研究の主要な成果はつぎのように要約される。

① 本システムによれば、北西太平洋海域や東シナ海海域において超長期の再現期間に対する確率波高の平面分布を推定することが可能であり、その信頼性は、既往台風とシミュレーション台風を対象として推定された

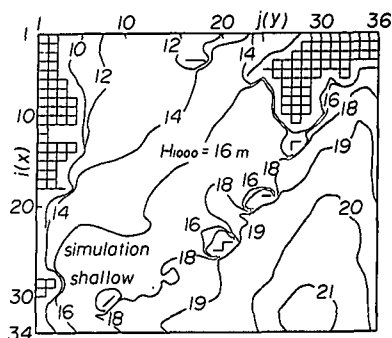


図-9 東シナ海海域における1000年確率波高

100年確率波高の比較的良好な一致から傍証される。

② 水深が小さい東シナ海海域における波浪の極値を推定するためには、浅海モデルの適用が必要である。

③ 台風に伴う年最大波高資料はかなり尖鋭な形状特性をもつので、 $k=2.0$ のWeibull分布を最も尖った候補確率分布とする最小2乗法に基づく極値統計解析モデルに従うかぎり、台風に伴う年最大波高資料の母分布は $k=2.0$ のWeibull分布とみなされる可能性が高い。

参 考 文 献

- 合田良實(1990): 港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説—, 鹿島出版会, 333 p.
- 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄(1984): エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値予知モデルについて, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127.
- 山口正隆・畑田佳男・中村雄二・大木泰憲(1994): わが国太平洋岸における超長期の台風発生波高の極値の推定, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 206-210.
- 山口正隆・畑田佳男・中村雄二・大木泰憲(1995 a): 波高の極値統計解析における母数推定法の比較, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 231-235.
- 山口正隆・畑田佳男・大木泰憲・西村敦博・中村雄二(1995 b): 確率的台風モデルに基づく台風時浅海波浪の極値推算システムの適用性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 246-250.