

北西太平洋における気象擾乱別確率波高の標本分布の検討

山口正隆*・野中浩一**・大福 学***・畑田佳男****

本研究では、北西太平洋における超長期の台風時・低気圧時年最大波高のシミュレーション資料をそれぞれ期間 50 年の複数組の小標本とみなすことにより、母分布を既知とした場合と母分布を未知とした場合について推定した確率波高の標本分布の特性を検討した。そして、確率波高標本の変動係数や非対称度は海域ごとに変化し、その特性は台風と低気圧の場合に異なること、母分布既知ケースにおける確率波高標本の変動幅が小さく確率波高の推定精度が高いこと、確率波高の標本分布は粗い近似では正規分布で表されるが、詳細には非対称分布である Weibull 分布や Gumbel 分布により高い精度で近似されること、などを見出した。

1. 緒 言

野中ら (2003) は北西太平洋における台風および低気圧の確率的発生モデルと波浪推算モデルを利用して、台風の場合 20,000 年、低気圧の場合 10,000 年の波浪シミュレーションを別々に行い、これから得た各年最大波高の大標本資料に対する極値統計解析に基づいて、それぞれの母分布を推定してきた。しかし、大標本資料を 1 組の標本として取り扱っているために、確率波高の分散 (標準偏差) は非常に小さいものとなり、既往気象擾乱の資料年数に相当する推定値となっていない。

そこで、本研究では、既往気象擾乱に対する波浪推算に基づく確率波高の推定で通常用いられる 50 年を目安として、年最大波高の大標本を 50 年の資料期間についての複数組の標本とみなすことにより、確率波高の標本分布の特性を検討する。一組の小標本から確率波高の変動特性 (標準偏差) を推定せざるをえない現実の気象擾乱ケースと異なり、シミュレーション資料の場合には多数組の標本から確率波高の変動特性を直接評価できる。

2. 資料の作成方法および解析方法

(1) 資料の作成方法

本研究で使用する波高極値資料の生成システムは異常気象擾乱の各属性に対する確率的発生モデル、海上風推算モデルおよび波浪推算モデルから成る。対象とする気象擾乱は台風あるいは低気圧であり、それぞれ別個に波高極値資料の生成システムを構成する。対象領域はいずれも北西太平洋領域である。しかし、台風あるいは低気圧の発生領域が異なることから、両者の領域は相互にずれている。すなわち、低気圧の場合には、その領域はより北方に位置するが、日本海を含めて日本周辺の領域では重複する。各システムの計算手順の概略はつぎのようであり、詳細は野中ら (2003) に与えられている。

① 異なる形の楕円型気圧分布を仮定する台風あるいは低気圧の各属性の確率的発生モデルにより、1 ケースの気象擾乱に対する属性の 6 時間間隔時系列資料を得る。

② 各気象擾乱の気圧分布に対応する傾度風と気象擾乱の移動に伴う場の風をベクトル合成したのち、海面における摩擦抵抗や気象擾乱中心への吹込み角を考慮して、10 m 高度海上風成分を得る。

③ 海上風分布を逐次入力条件とする波浪推算を第 2 世代に属する山口ら (1984) の格子点深海モデルによって行い、1 つの気象擾乱期間中の波浪時系列資料を格子点別に得たのち、これから気象擾乱別最大波高資料を抽出する。対象領域の格子間隔は 80 km、海上風の入力時間間隔および波浪推算の時間間隔は 1 時間である。

④ ①～③の計算を 1 年間に発生した気象擾乱について繰り返すことにより、年最大波高を求め、ついで、指定年数相当分の演算を行って、全対象期間における気象擾乱別年最大波高を格子点ごとに得る。対象気象擾乱の数は、拡張型季節別確率的台風モデルから得た 20,000 年間の台風約 156,000 ケース、および確率的低気圧モデルから得た 10,000 年間の低気圧約 350,000 ケースである。

(2) 資料の解析方法

極値統計解析には、候補分布を Gumbel 分布と 27 種類の形状母数固定型 Weibull 分布の計 28 種類、非超過確率の割当てを合田のプロットング公式、尺度母数 A と位置母数 B の計算を線形最小 2 乗法、最適分布の選択を最大相関係数基準によるモデル (合田, 1990; Yamaguchi・Hatada, 1997) を用いる。そして、まず 20,000 年のシミュレーション台風時年最大波高資料にこのモデルを適用し、最適分布や R 年確率波高を求める。ついで、20,000 年間のシミュレーション台風時年最大波高資料を 50 個 (年) 400 組の標本としたうえで、各組の標本に対して R 年確率波高を求め、この演算を繰り返して 400 個の R 年確率波高の標本を得る。候補分布のあてはめは、大きさ 20,000 の大標本から推定した最適分布を母分布として形状母数を固定した場合 (母分布既知ケース) と、固定

* 正会員 工 博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科
** 正会員 博(工) 愛媛大学契約職員 工学部環境建設工学科
*** 愛媛大学技術専門職員 工学部環境建設工学科
**** 正会員 博(工) 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

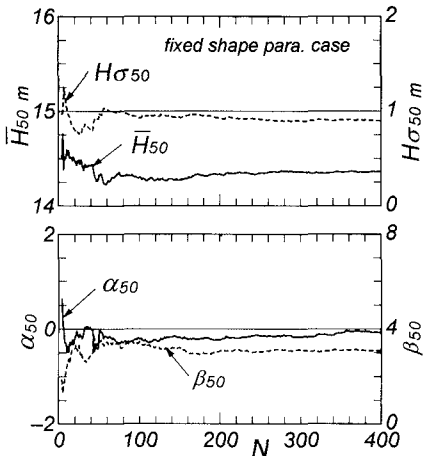


図-1 確率波高統計量の標本数による変化

しない場合(母分布未知ケース)の2通りについて行う。つぎに、大きさ400の確率波高標本から各種統計量(平均値 $\bar{H}_R$, 標準偏差 $H_{\sigma R}$, skewness α_R , kurtosis β_R)を計算するとともに、上記の極値統計解析モデルを准用することによって、標本分布を形状母数固定型 Weibull 分布か Gumbel 分布で近似する。

図-1は代表地点における台風時年最大波高資料についての各標本から得た母分布既知ケースの50年確率波高に関する各種統計量($\bar{H}_{50}$, $H_{\sigma 50}$, α_{50} , β_{50})の標本数 N に伴う変化を示す。kurtosisなどの高次積率統計量であっても標本数が200以上であれば、その推定値は標本数にほとんど依存しないことがわかる。

10,000年間のシミュレーション低気圧時年最大波高資料についても、10,000年1組の標本およびこれを50個(年)200組の標本として、同じ解析を行う。

3. 気象擾乱別確率波高の標本分布特性

(1) 台風時資料に基づく結果

図-2は20,000年1組のシミュレーション台風時年最大波高資料に対して得た最適分布であるWeibull分布の形状母数 k の空間分布(野中ら, 2003)を再掲する。この場合、最適分布にGumbel分布をとる地点は存在しない。形状母数は沖縄本島付近の5を中心に周辺に向けて減少し、太平洋海域ではNE方向に向けて、東シナ海ではNW方向に向けて1.4程度になる。また、日本海では北陸・東北沖合海域の5から大陸沿岸のNW方向に向けて2以下に小さくなる。これは異常台風の通過経路と通過頻度の特性を反映する。

図-3は50年確率波高の平均値 $\bar{H}_{50}$, 標準偏差 $H_{\sigma 50}$ および skewness α_{50} の空間分布を母分布既知ケース(fixed shape para. case)と母分布未知ケース(variable shape

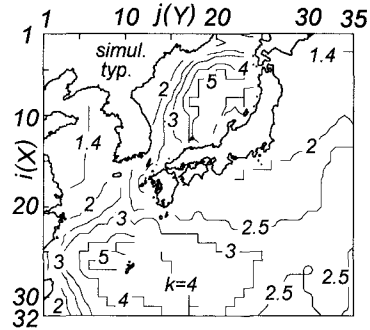


図-2 台風時年最大波高資料に対する最適分布

para. case)について示す。ただし、 α_{50} は図の錯綜を避けるため、母分布既知ケースのみとしている。母分布既知ケースの場合の $\bar{H}_{50}$ は20,000年1組の大標本より得た値とほぼ完全に一致する。確率波高は台風の発達・減衰特性を反映して、南方海域からNE方向の東日本沖合海域あるいはNW方向の東シナ海北西部海域に向けて、日本海においてもNE方向に向けて減少する。両ケースの空間分布はほぼ符合するが、母分布未知ケースの値が全海域で母分布既知ケースの値を上まわり、その度合は最適分布の形状母数が多い海域ほど強くなる。とくに形状母数の値が多い沖縄本島周辺や日本海北陸・東北沖合の海域で、差は2%程度に達する。

$H_{\sigma 50}$ は母分布既知ケースでは北西太平洋で0.75m, 東シナ海北西部および日本海北西部で1mであり、台風の通過頻度が少ない海域で大きい。母分布未知ケースでは1m域が拡大し、 $H_{\sigma 50}$ の値は母分布既知ケースより大きい。その割合は5~50%をとり、30%以上となる海域は東シナ海・北西太平洋では九州・四国周辺海域、日本海では中国地方沖合から中央部海域となっている。変動係数 $H_{\sigma 50}/\bar{H}_{50}$ はいずれのケースでもほぼ5~15%の範囲にあり、その空間変化は $H_{\sigma 50}$ よりむしろ $\bar{H}_{50}$ の分布と類似するが、 $\bar{H}_{50}$ の分布と逆相関の関係を示す。

α_{50} は多くの海域で-0.1~0.4の範囲にある。海域別ではその値は南方海域で小さく、そこからNE方向の東日本沖合海域やNW方向の東シナ海で大きい傾向をとる。日本海では、0.2弱の値が広い範囲を占める。 β_{50} (図省略)はおおむね2.75~3.25の範囲にあり、特徴的な空間変化をあまり示さない。また、母分布既知ケースでは確率波高標本の skewness および kurtosis は確率波高の再現期間にほとんど依存しない。一方、母分布未知ケースでは α_{50} および β_{50} はいずれも母分布既知ケースより大きい値をとり、空間的にはとくに東シナ海から日本海で0.2~0.4の α_{50} の増大と10~30%の β_{50} の増加がみられる。確率波高の信頼区間の推定にあたり、確率波高の標本は正規分布に従うと仮定される。今回の標本は α_{50}

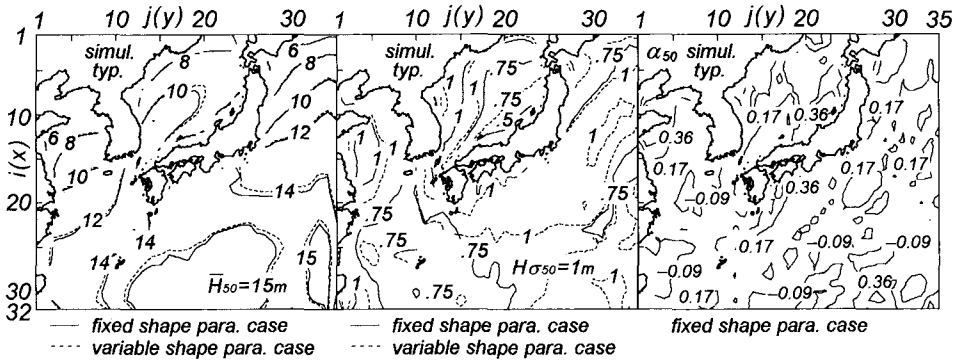


図-3 確率波高統計量 (台風時資料)

および β_{50} からみて、粗い近似では正規分布に近い確率分布構造をもつと言えるけれども、日本海や北西太平洋の北海道・東北沖合海域では正の α_{50} と 3 よりやや大きい β_{50} をとる傾向にある。

つぎに、図-4 は代表地点における 50 年確率波高の標本値と最適分布 (Weibull 分布) から求めた計算値の Q-Q プロットを母分布既知ケースおよび母分布未知ケースについて示す。適合度はいずれも非常に高い。また、母分布既知ケースにおける形状母数 k_{50} は母分布未知ケースの値より大きい。すなわち、確率波高の標本はこの場合 Weibull 分布によって高い精度で近似されるとともに、

母分布既知ケースにおいて標本の変動幅が小さいことが示唆される。

図-5 は最適分布を用いて求めた 50 年確率波高の各種統計量と標本より直接得た結果の比較を母分布既知ケースについて表す。これらは計算結果が低次積率のものほど標本より得られる統計量とよく符合することを例示する。

図-6 は 50 年確率波高標本に対する最適分布として得た Weibull 分布の形状母数 k_{50} の平面分布を母分布既知ケースについて示す。 k_{50} は広範な海域で 4 程度をとるが、北海道周辺海域、朝鮮半島北部の東・西海域のように台風の通過頻度が少なく、確率波高の変動係数が大きい海域で、小さくなる。この場合、形状母数、したがって尺度母数で無次元化した標準偏差, skewness, kurtosis という無次元量は確率波高の再現期間に依存しない。一方、母分布未知ケースでは、形状母数 k_{50} (図省略) は日本海中央部など一部の海域を除いて、母分布既知ケースのものと類似した空間変化を示すけれども、全体的にその値はやや減少し、分布幅のより広い Gumbel 分布をとる海域も出現する。また、確率波高標本を Weibull 分布で近似して得られる上記の形状母数の値は (再現期間/資

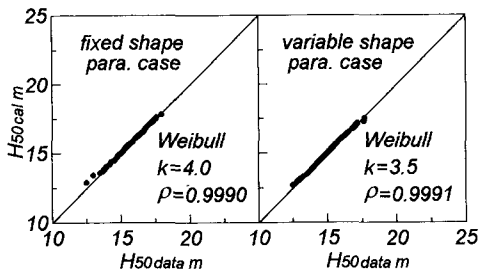


図-4 確率波高標本への最適分布のあてはめ (台風時資料)

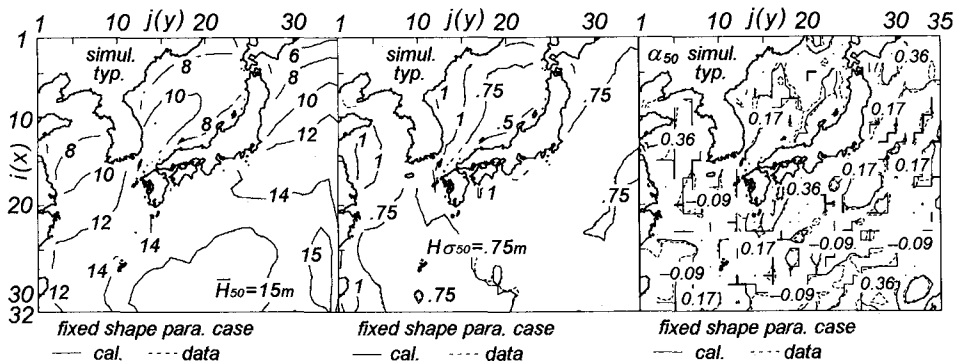


図-5 確率波高統計量の比較 (台風時資料)

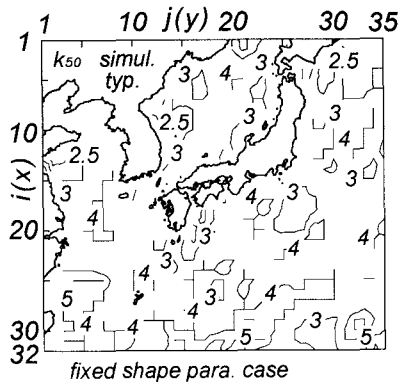


図-6 確率波高標本に対する最適分布 (台風時資料)

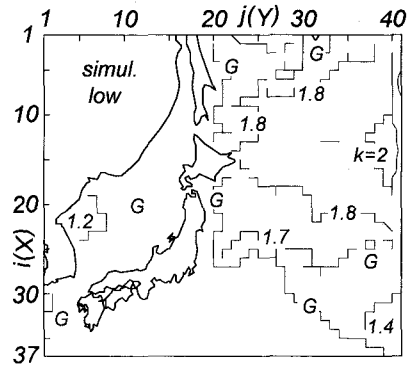


図-7 低気圧時年最大波高資料に対する最適分布

料年数) 比の増大とともに減少する傾向にあり, たとえば確率波高標本の変動幅は再現期間 50 年より 100 年の場合に広がる。

(2) 低気圧時資料に基づく結果

図-7 は 10,000 年間の低気圧時年最大波高資料に対する最適分布の形状母数 k (Gumbel 分布は G) の空間分布を示す。 k は北東端海域での 2 を中心として, 三方に 1.7 程度に減少するが, 日本海を含む日本周辺の広い海域では最適分布は Gumbel 分布をとる。

図-8 は母分布既知ケースと母分布未知ケースにおける 50 年確率波高の各種統計量 (平均値 $\bar{H}_{50}$, 標準偏差 $H_{\sigma 50}$, skewness α_{50}) の空間分布を表す。ただし, α_{50} は母分布既知ケースのみとする。まず母分布既知ケースにおける $\bar{H}_{50}$ は 10,000 年 1 組の標本として得た 50 年確率波高とほぼ完全に一致する。また, いずれのケースでも, $\bar{H}_{50}$ は海域東端の 14 m 域を中心に三方に向けて減少し, 南西端の九州南岸や朝鮮半島東岸で 6 m 程度をとる。絶対値でみれば, 母分布未知ケースがやや大きい値を与え, その程度は最大 2 % である。 $H_{\sigma 50}$ は母分布既知ケースで概略 0.3~0.75 m, 母分布未知ケースで 0.5~1.0 m であ

り, 後者の場合に大きい。空間分布でみれば, $\bar{H}_{50}$ が大きい東日本沖合の東側海域でより大きい値をとる。変動係数 $H_{\sigma 50}/\bar{H}_{50}$ は母分布既知ケースで 5~8 %, 母分布未知ケースで 6~12 % であり, $\bar{H}_{50}$ の小さい海域ほど大きい。 α_{50} も $\bar{H}_{50}$ の空間分布と連動し, $\bar{H}_{50}$ の大きい東日本東方海域での 0.17 から三方に向けて 0.63 にまで増加する。一方, 母分布未知ケースでは, skewness α_{50} も最大 1.14 にまで増加する。すなわち, 母分布未知ケースにおける標本の変動幅や非対称度は母分布既知ケースに比べて増加する。なお, β_{50} はおおむね 2.75~3.25 の範囲にあるが, 母分布未知ケースでは領域南部の海域や日本海の大津側沿岸で 5 以上の海域も出現する。また, 台風の場合と同様に, 母分布既知ケースでは, (標準偏差/尺度母数) 比, skewness, kurtosis は再現期間にほとんど依存しないが, 母分布未知ケースでは, (再現期間/資料年数) 比とともに増加する。

図-9 は 50 年確率波高の各種統計量に対する計算値と標本資料による値の比較を母分布既知ケースの skewness α_{50} のみについて示す。両者は標本資料の 3 次積率から得られる統計量についてかなりよく符合することか

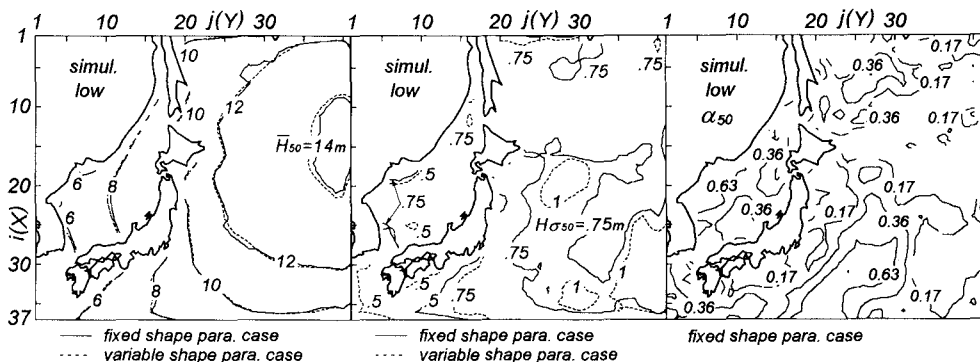


図-8 確率波高統計量 (低気圧時資料)

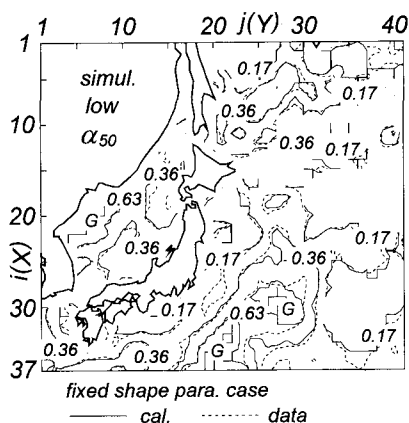


図-9 確率波高標本の skewness の比較 (低気圧時資料)

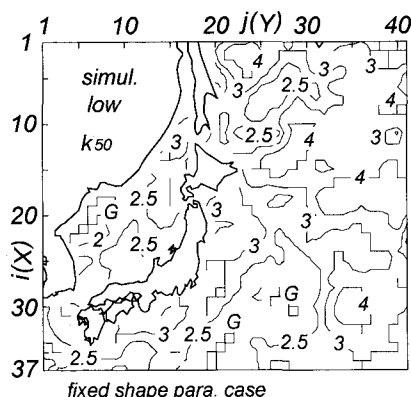


図-10 確率波高標本に対する最適分布 (低気圧時資料)

ら、より低次の積率から得られる $H_{0.50}$ や $\bar{H}_{50}$ についてより一層よい一致を与えることが想像されよう。

図-10 は 50 年確率波高の標本資料にあてはめた最適分布の形状母数 k_{50} の空間分布を母分布既知ケースについて示す。 k_{50} は領域東側海域における 4 を中心に三方に向けて 2 程度に減少したのち、南側海域や日本海の大陸側で最適分布は Gumbel 分布により表される。この特性は $\bar{H}_{50}$ の空間分布と連動しており、 $\bar{H}_{50}$ が小さい海域ほど確率波高の標本分布は正規分布から偏り、分布の非対称度や平坦度を増加させる。また、母分布未知ケースでは、 k_{50} が減少するとともに、Gumbel 分布がより広い海域を占めることから、確率波高標本の正規分布からの偏りが増大することが示唆される。

4. 結 語

本研究で得られた結果の概要はつぎのようである。

① 台風時確率波高標本の変動幅 (標準偏差) や非対称度は台風の通過頻度が高く確率波高が大きい南方海域で小さく、台風の通過頻度が低く確率波高が小さい北側の海域で大きい。一方、低気圧時確率波高標本の変動幅は確率波高が大きい東方海域で大きい、変動係数や非対称度は確率波高が小さい南部海域や日本海で増大する。

② 母分布既知ケースにおける確率波高の標本統計量は母分布未知ケースより小さい値をとる。すなわち、母分布既知ケースの場合に、標本の変動幅がより減少し、

確率波高の推定精度が向上する。

③ 確率波高の標本分布は粗い近似では正規分布で表されるが、詳細にみれば、非対称分布である Weibull 分布や Gumbel 分布により高い精度で近似される。これらの分布は高次積率量に係わる標本統計量までよく再現する。また、Weibull 分布の形状母数は確率波高の変動係数が大きい海域、すなわち台風時波高の場合北西太平洋北側海域、低気圧時波高の場合南部海域や日本海で小さい。母分布既知ケースでは形状母数は (再現期間/資料年数) 比にほぼ依存しないが、母分布未知ケースでは形状母数は (再現期間/資料年数) 比が増加すると減少し、変動幅が相対的に大きい Gumbel 分布で表される海域も拡大する。

最後に、本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究 (C) (2) (代表 山口正隆) による研究成果の一部であることを付記する。

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.
- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・大福 学 (2003): 北西太平洋における気象要因別波高極値の母分布の推定, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 216-220.
- 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測モデルについて, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127.
- Yamaguchi, M. and Y. Hatada (1997): An extremal analysis system and its application to the estimation of extremes of meteorological and oceanographic elements around the coasts of Japan, Proc. WAVES97, Vol. 2, pp. 932-946.