

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

野中浩一*・山口正隆**・畑田佳男***・大福 学****

北西太平洋領域における台風あるいは低気圧の確率的発生モデルを利用した超長期の波浪シミュレーション資料に対する極値統計解析に基づいて、台風時・低気圧時波高極値の母分布を別々に推定した。台風の場合には、母分布を表す Weibull 分布の形状母数は沖縄本島周辺海域の 5 を中心に周囲の海域に向けて 2 から 1.4 に減少し、裾長さパラメータはこれにほぼ逆動して 1.16 から 1.35~1.45 に増加する。また、低気圧の場合には、Weibull 分布の形状母数は海域東端の 2 を中心に三方に向けて 1.4 程度に減少するとともに、日本周辺海域では母分布は Gumbel 分布をとり、裾長さパラメータは逆に海域東端の 1.16 から 1.25 程度に増加する。

1. 緒 言

確率波高の推定にあたり、観測資料や推算資料より得た年最大波高資料などの極値資料に適当な確率分布をあてはめて最も適合度の高い分布を最適分布とするのが通例である。こうした手法の観測資料に対する適用に基づいて、わが国沿岸における波高極値の母分布を推定する研究 (Goda ら, 2000) が行われているが、対象地点において既往最大値を越える異常波高が生じた場合には、最適分布、したがって、確率波高の推定値も大きく変化することが生じうる。これは標本数の制約によって波高極値の母分布が必ずしも確定しないことに起因すると考えられる。

そこで本研究では、「台風および低気圧の確率的発生モデルを利用した波高極値の推定システム」を用いて、北西太平洋における 20,000 年間の台風時波浪および 10,000 年間の低気圧時波浪のモンテカルロシミュレーションから台風時・低気圧時年最大波高の大標本資料を別々に作成して、それらの分布特性を調べるとともに、過去 51 年間の既往台風資料および 20 年間の既往低気圧資料から得た台風時あるいは低気圧時年最大波高資料に基づく確率波高や確率波高比の特性と比較検討する。

2. 波高極値の推定システム

(1) 台風属性の確率的発生モデル

台風内の気圧分布を長・短 2 軸が異なる楕円型分布、
$$p = p_c + (p_\infty - p_c) \exp \left[- \left\{ \left(\frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right\}^{-1/2} \right] \cdots (1)$$
で近似した場合に、台風の季節変動を考慮して作成した拡張型季節別確率的台風モデル (野中ら, 2000) を用いる。ここに、 p_c は台風の中心気圧、 $p_\infty (=1013 \text{ hPa})$ は遠方場気圧、 x, y は台風中心を原点として楕円長・短軸方向にとった局所座標系、 a, b は楕円長・短軸方向台風半径、である。南北方向を X 軸、東西方向を Y 軸とす

る全体座標系 (X, Y) を導入すると、本モデルにおける台風属性は、中心位置 (X_c, Y_c) 、中心気圧 p_c 、平均台風半径 $R (= (a+b)/2)$ 、楕円短・長軸方向台風半径比 b/a および全体座標系 X 軸に対する楕円長軸傾斜角 θ の 6 つの変量によって代表される。

季節別モデルは季節別台風年発生数モデル、台風の境界発生モデル、台風の移動モデルよりなる。モデル化領域は 80 km を 1 単位として 34×35 に分割した北西太平洋領域 (図-1) であり、台風の地域特性を考慮するため、境界および領域を複数個に分割して別個にモデルの定式化を行っている。図中の ξ は境界に沿って配置した台風発生位置を表す 1 次元座標である。

(2) 低気圧属性の確率的発生モデル

低気圧内の気圧分布を 4 軸長が異なる楕円型分布、
$$p = p_\infty - (p_\infty - p_c) \exp \left[- \left\{ \left(\frac{x}{a_1} \right)^2 + \left(\frac{y}{b_1} \right)^2 \right\}^{-1/2} \right] \cdots (2)$$
で近似した確率的低気圧モデル (山口ら, 1999) を用いる。ここに、 $a_i, b_i (i=1, 2)$ は正側と負側で異なる値をとる楕円長・短軸方向低気圧半径である。本モデルにおける低気圧属性は低気圧の中心位置 (X_c, Y_c) 、中心気圧 p_c 、遠方場気圧 (低気圧ごとに变化) p_∞ 、楕円長軸傾斜角 θ 、楕円長軸方向低気圧半径 (a_1, a_2) 、短軸方向低気圧半径 (b_1, b_2) の 9 つの変量によって代表される。

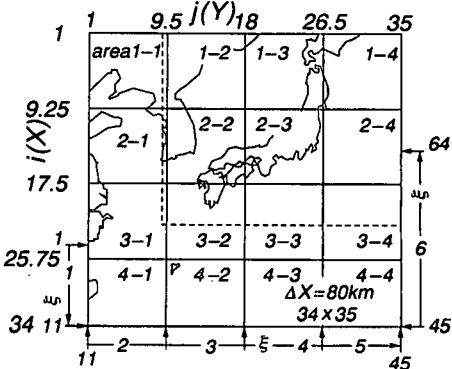


図-1 確率的台風モデルの作成領域

* 正会員 博(工) 愛媛大学科学研究支援者 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
*** 正会員 博(工) 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科
**** 愛媛大学技官 工学部環境建設工学科

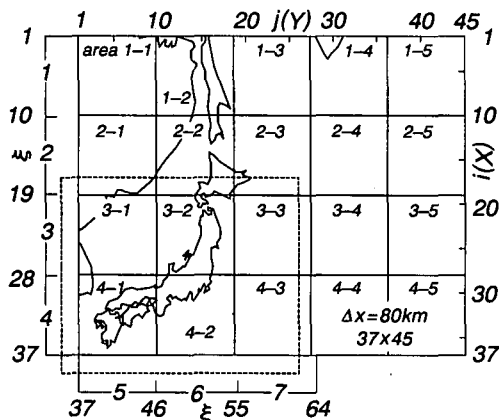


図-2 確率的低気圧モデルの作成領域

確率的低気圧モデルは低気圧年発生数モデル、領域内低気圧発生モデル、境界低気圧発生モデル、低気圧の移動モデルより構成される。モデル化領域は80 kmを1単位として37×45に分割した北西太平洋領域(図-2)である。

(3) 海上風推算モデル

海上風は傾度風と場の風をベクトル合成した風(friction free winds)に、海面での摩擦抵抗の影響を考慮して求める。

傾度風速 G および全体座標系における傾度風速成分 G_x 、 G_y はそれぞれ次のように表される。

$$G = V_0 / \left[\left(\frac{1}{2} \right) + \left\{ \frac{1}{4} + V_0^2 / f^2 R_c^2 \right\}^{1/2} \right] \quad \cdots \cdots (3)$$

$$G_x = G \cdot \cos(\psi + \theta + \delta), \quad G_y = G \cdot \sin(\psi + \theta + \delta) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここに、 V_0 : 地衡風速、 f : コリオリ係数、 R_c 、 ψ : 等圧線の曲率半径と接線角、 δ : 緯度によって決まる等圧線に対する吹込み角、である。

台風や低気圧の移動に伴う場の風の成分 V_x 、 V_y は、それらの移動速度成分を C_x 、 C_y として、台風の場合には、

$$V_x = C_x G / G_{\max}, \quad V_y = C_y G / G_{\max} \quad \cdots \cdots (5)$$

低気圧の場合には、

$$\left. \begin{aligned} V_x &= C_x \cdot F, \quad V_y = C_y \cdot F \\ F &= \exp \left[-\pi \left\{ \left(\frac{x}{a_i} \right)^2 + \left(\frac{y}{b_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \right] \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (6)$$

により近似する。ここに、 $G_{\max}$ は台風半径上で生じるほぼ最大傾度風速である。したがって、10 m高度での海上風速成分 U_x 、 U_y は、

$$U_x = C_1 G_x + C_2 V_x, \quad U_y = C_1 G_y + C_2 V_y \quad \cdots (7)$$

で表される。ここに、 C_1 と C_2 は海上風への変換係数であり、台風の場合 $C_1 = C_2 = 0.6$ 、低気圧の場合 C_1 は緯度により変化する値、 $C_2 = 0.6$ とする。

海上風は6時間間隔の台風・低気圧属性資料を1時間

ごとに線形補間することにより計算する。

(4) 格子点深海波浪推算モデル

波浪の平面分布を推定するために、第2世代に属する格子点深海モデル(山口ら, 1984)を用いる。

周波数データの個数は0.045~1.0 Hzを不等分割した20個、方向データの個数は0~360°を $\Delta\theta = 20^\circ$ で等分割した19個、波計算時間間隔は1時間である。境界条件として、陸地境界では方向スペクトルの値を0におき、開境界の流入方向には台風の場合、局所風速および台風中心と対象地点の距離に依存するRossのハリケーンモデルに基づくJONSWAP型スペクトル、低気圧の場合には局所風速に対応する修正P-Mスペクトルと、それぞれ局所風向に対応する $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数の積で表される方向スペクトルを与えるとともに、流出方向には方向スペクトルがそのまま伝播するとする。

計算対象台風は、拡張型季節別確率的台風モデルから得た20,000年間約156,000ケースのシミュレーション台風および1948~1998年の51年間454ケースの既往台風である。また、計算対象低気圧は、確率的低気圧モデルから得た10,000年間約350,000ケースのシミュレーション低気圧およびECMWF表面風解析値・再解析値資料より抽出した1979~1998年の20年間175ケースの既往低気圧である。

計算は格子間隔80 kmの北西太平洋領域(台風の場合図-1より南側2格子分広い36×35の格子網、低気圧の場合図-2より南側・西側2格子分広く、北側2格子分、東側6格子分狭い37×41の格子網)で行い、台風・低気圧時の格子点別最大波高資料、ついで年最大波高資料を得る。各対象領域は、台風と低気圧の発生領域が異なるため、図-1と図-2においてそれぞれ点線で表すように、わが国周辺の重複領域を除いて相互にずれている。

(5) 極値統計解析モデル

極値統計解析は、27種類の形状母数($k=0.5 \sim 10$)をもつWeibull分布とGumbel分布の計28種類を候補分布とし、プロットング公式に合田(1990)の式、母数推定に最小2乗法、最適分布の選択に最大相関係数基準、分散の推定にjackknife法を用いるYamaguchiら(1997)のモデルによる。また、年最大波高は地点によっては波浪推算の対象としない勢力の弱い台風や低気圧によって生起する可能性もあることから、シミュレーション台風の場合限界波高2 m、それ以外の場合1 mより小さい年最大波高資料を除去した第1種下限 censored data に対して極値統計解析を実施する。

3. 気象擾乱別波高の極値と母分布

(1) 台風時資料に基づく結果

図-3はシミュレーション台風時年最大波高資料から

得た 50 年確率波高 H_{50} 、最適分布である Weibull 分布の形状母数 k 、および 50 年確率波高 H_{50} と 10 年確率波高 H_{10} の比で定義される裾長さパラメータ γ_{50} (合田, 2002) の空間分布を表す。この場合、最適分布に Gumbel 分布をとる地点は存在しない。50 年確率波高は、台風勢力の減衰を反映して南方海域での 15 m から北東方向の関東・東北沖合海域あるいは北西方向の東シナ海南部から北部に向けて 8 m 程度にまで減少する。わが国沿岸のうち太平洋岸の関東以南から九州西岸で 13~14 m 域となっており、関東沿岸から北海道沿岸に向けて漸減する。また、日本海では対馬海峡付近から 10 m 域が広がり北東方向に向けて 8 m にまで小さくなる。ただし、対馬海峡における確率波高は 80 km という低地形解像度格子網のために過大評価されている。

形状母数は沖縄本島付近の 5 を中心にわが国太平洋岸沖合の南西部から北東部に向けて 2 から 1.4 に、あるいは東シナ海南部から北部に向けて 1.4 程度に減少する。日本海では北陸・東北沖合の 5 から大陸側に向けて 2 以下に小さくなる。裾長さパラメータは形状母数と逆の空間分布を取り、北西太平洋海域では沖縄本島付近の 1.16 から北東方向に向けて 1.35 に、あるいは北西方向に向けて 1.45 に増加する。日本海でも北西方向に 1.2 から 1.45 に大きくなる。

Weibull 分布の形状母数あるいは Gumbel 分布の特性を表す指標として、以下の式で定義される ξ (合田, 2002) がある。

$$\xi = (\gamma_{100} - 1) / (\gamma_{50} - 1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 γ_{100} は 100 年・10 年確率波高比である。これは、年最大波高資料の場合 Weibull 分布に対して、

$$\begin{aligned} \xi &= (2^{1/k} - 1) / (1.69897^{1/k} - 1) \\ &= 0.12370k^{-1.08673} + 1.30777 \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

と標記・近似される。上式の 1.30777 は $k \rightarrow \infty$ に対する漸近値である。Gumbel 分布の場合には $\xi = 1.42276$ になる。図-4 は図-3 の形状母数に対応する ξ の空間分布

を表し、 ξ は形状母数と逆方向にしかも緩やかに変化する。

図-5 は既往台風時資料に基づく裾長さパラメータの空間分布を表す。裾長さパラメータは太平洋側では、南方海域で 1.2 以下の値をとり、北東方向の関東から北海道の沖合海域にかけて 1.35 にまで、東シナ海では、北西方向に向けて 1.45 にまで増加する。また、日本海では日本沿岸の 1.2 から大陸沿岸の 1.5 に向けて増加する。つまり、裾長さパラメータは全体的に台風の通過頻度の高い海域で小さい値を、通過頻度の低い海域で大きい値をとる。この特性は上記のシミュレーション台風時資料に基づく結果と定性的のみならずある程度定量的にも符合する。また、50 年確率波高の挙動 (野中ら, 2000) も標本の大きさの制約に伴う局所的な凹凸を除いて、平均的には上記の結果と比較的よく符合する。

(2) 低気圧時資料に基づく結果

図-6 はシミュレーション低気圧時年最大波高資料から得た 50 年確率波高 H_{50} 、最適分布である Weibull 分布の形状母数 (Gumbel 分布 G を含む)、および裾長さパラメータ γ_{50} の空間分布を表す。50 年確率波高は、北西太平洋北東海域では東方海域に分布する 14 m 域を中心として三方に減少して東北・北海道の太平洋側で 10 m をとり、関東沿岸から九州沿岸に向けて 6 m にまで低くなる。形状母数は 50 年確率波高が 12 m を越える北東海域全域で 1.7 より大きい値を、確率波高の最大値を与える東方海域付近で 2 をとる。また、関東以南の太平洋側、および日本海の大陸沿岸の一部を除くほとんどの海域で、最適分布は Gumbel 分布になる。裾長さパラメータは太平洋側では南西部の 1.24~1.25 (Gumbel 分布) から北東部の 1.16~1.18 に向けて減少する。日本海では日本沿岸の 1.25 から大陸沿岸の 1.27 と北西方向に若干増加し、大陸沿岸の一部で 1.3 をとる。

図-7 は既往低気圧時資料より得た 50 年確率波高と裾長さパラメータの空間分布を表す。50 年確率波高は、資料期間が短いために有意な局所的变化を示すものの、

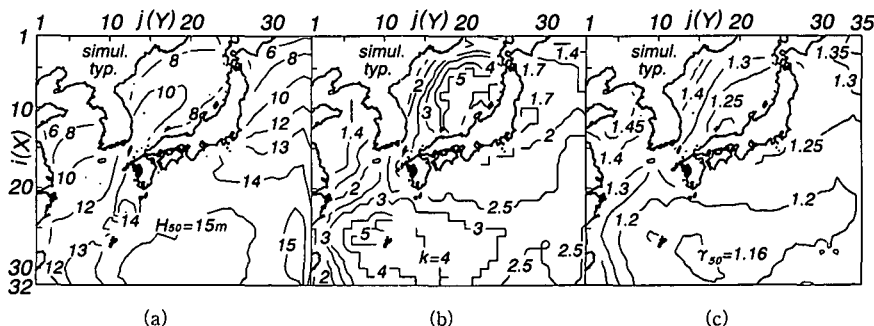


図-3 シミュレーション台風時年最大波高資料に対する極値統計解析の結果

全体としては、東方海域の14~16 m域を中心として三方に向けて減少し、太平洋岸北東部では8~10 mの値をとる。これはわが国周辺海域における低気圧の発達特性を反映する。日本海では、確率波高は日本海中央部~日本沿岸西部および日本沿岸東北部の10 m域から北西方

向に向けて減少し、大陸沿岸で6 mになる。こうした確率波高の空間分布の概略はシミュレーション低気圧時資料より得た結果とおおむね類似する。また、裾長さパラメータが北西太平洋海域であり変化しない挙動や日本海において北西方向に増加する挙動も、シミュレーション低気圧時資料に基づく結果と定性的に符合するけれども、北西太平洋海域ではその増加方向が必ずしも整合しない。

なお、図-8は北西太平洋の図-1と図-2の重複領域において各シミュレーション資料より得た年最大波高資料に対する最適分布を合成(合田, 1990)して ξ を求めたのち、式(9)によって逆算した形状母数の空間分布を表す。これは全気象擾乱時年最大波高資料に対する最適分布をWeibull分布によって近似することに相当する。形状母数は太平洋側海域のうち台風時波高が卓越する南部海域から関東沖合海域では2.5~3から1.6に減少し、低気圧時波高の影響が強くなる東北・北海道沿岸から東方海域に向けて1から1.6に増加する。日本海では台風時波高の影響が強い中央部の3から四方の沿岸域に向けて1.2に減少し、東シナ海では2.5のほぼ一定値をとる。

すなわち、日本周辺海域における全気象擾乱時年最大波高の母分布は、台風時波高が卓越する太平洋側の南西海域、東シナ海および日本海中央部では台風時波高の母分布にほぼ符合し、低気圧時波高の影響が増大する北東部の太平洋側や日本海側では台風時波高と低気圧時波高の母分布の中間に位置する。

以上の特性は、太平洋岸南西部のように、わが国沿岸の観測資料から得た極大波高資料の解析に基づく結果(Godaら, 2000)と必ずしも整合しないので、今後のさらなる検討が必要である。

4. 結 語

本研究では、北西太平洋海域における超長期の台風

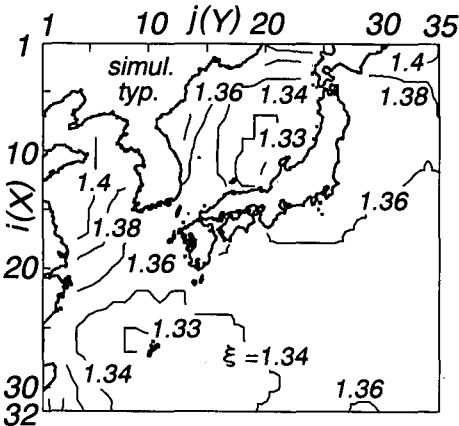


図-4 ξ の空間分布(シミュレーション台風時資料)

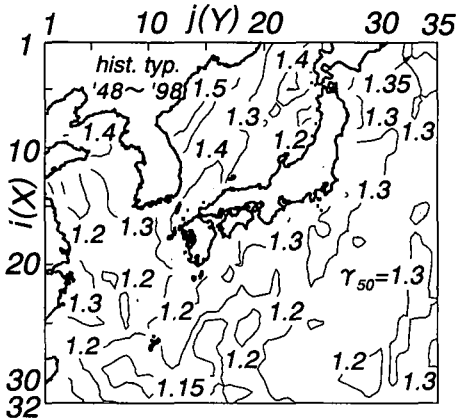


図-5 裾長さパラメータの空間分布(既往台風時資料)

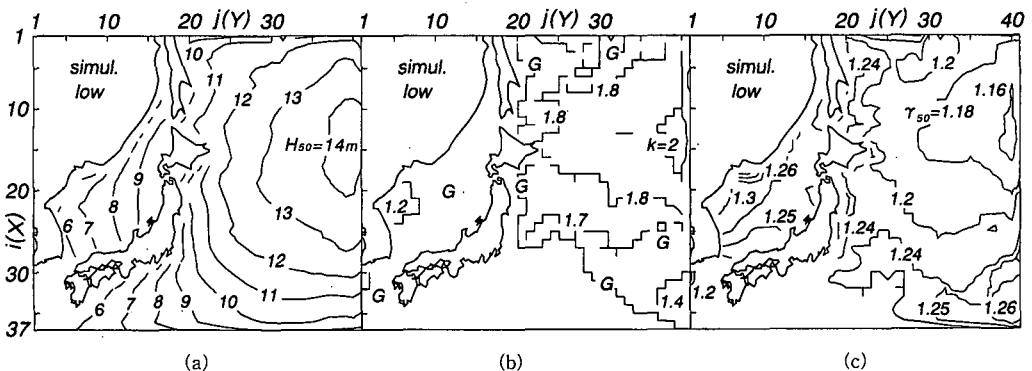
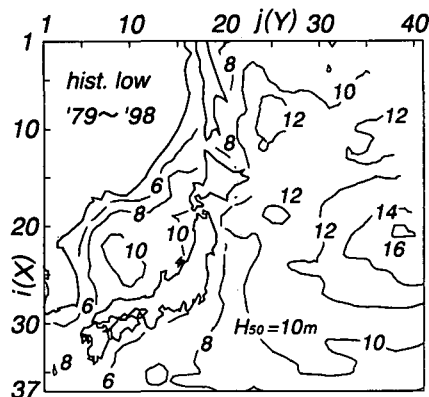
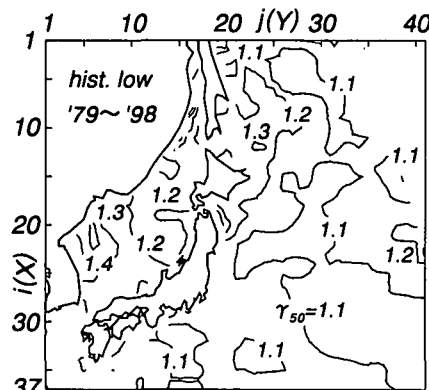


図-6 シミュレーション低気圧時年最大波高資料に対する極値統計解析の結果



(a)



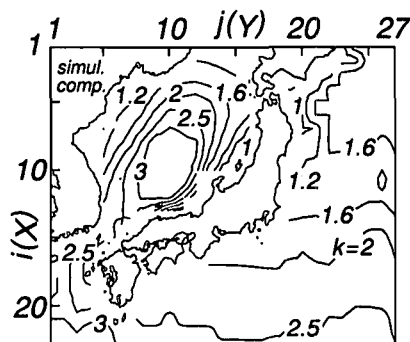
(b)

図一7 50年確率波高および裾長さパラメータの空間分布
(既往低気圧時資料)

時・低気圧時波浪シミュレーション資料に対する極値統計解析結果の考察から、つぎの知見を得た。

① 台風時年最大波高の母分布は Weibull 分布で近似される。その形状母数は沖縄付近における 5 を中心に四方に向けて 1.4 程度に減少する。わが国沿岸でみれば、形状母数は九州西岸の 2.5 から関東沿岸の 2 を経て北海道沿岸の 1.4 になり、南西部から北東部に向けて減少する。日本海では、日本近海の 5 から大陸沿岸の 2 以下になる。

② 低気圧時年最大波高の母分布は、東方海域で形状母数を 2 から三方に向けて 1.4 に減少させる Weibull 分布を、その外側の海域で Gumbel 分布をとる。日本海では、母分布は大部分の海域で Gumbel 分布になる。全体と



図一8 わが国周辺海域における全気象擾乱時年最大波高の母分布 (シミュレーション台風・低気圧時資料)

して、日本沿岸では母分布は Gumbel 分布で表される。

③ 裾長さパラメータは形状母数とほぼ連動して緩やかに変化し、形状母数の増加とともに減少する。

④ 台風時・低気圧時資料に対する解析結果を合成して推定した日本周辺海域における全気象擾乱時年最大波高の母分布は各海域における台風時および低気圧時波高相互の大小関係を反映した空間変化を示す。

最後に、ECMWF 表面風解析値・再解析値資料を提供戴いた ECMWF 当局に謝意を表すとともに、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.
- 合田良実 (2002): 設計波高に係わる極値統計分布の裾長さパラメータとその意義, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 171-175.
- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・伊藤吉孝 (2000): 拡張型確率的台風モデルを用いた波高の極値推定システム, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 271-275.
- 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.
- 山口正隆・畑田佳男・野中浩一・羽間義晃 (1999): 確率的低気圧モデルに基づく波高の極値推算システムの適用性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 251-255.
- Goda, Y., O. Konagaya, N. Takeshita, H. Hitomi and T. Nagai (2000): Population distribution of extreme wave heights estimated through regional analysis, Proc. 27th ICCE, Vol. 2, pp. 1078-1091.
- 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. WAVES 97, Vol. 2, pp. 932-946.