

確率的台風モデルを用いた波高の極値推定システムの相互比較

野中浩一¹・山口正隆²・大福 学³・畑田佳男⁴

台風の期間別発生特性に着目して作成した 4 種類の確率的台風モデルに基づく波高の極値推定システムを気圧と海上風・波浪のシミュレーションに適用し、得られた台風属性の平均値や確率気圧および確率波高の特性を既往台風資料に対応する結果との比較を含めて検討した。その結果、各モデルは台風属性や確率気圧に識別可能な差をほとんど生じないが、確率波高に有意な差を生じ、既往台風資料に対応する結果との類似性からみて、季節別モデルがより適切であることや、確率的台風モデルにおける気圧分布モデルや台風の移動・発達モデルの拡張は既往台風資料に基づく確率波高に対する本システムの再現性を向上させることを示した。

1. 緒 言

統計的に安定した台風時確率波高の推定値を得るために、野中ら (2000) は北西太平洋領域を対象として各種の確率的台風モデルに基礎を置く超長期の台風時波高の極値推定システムを開発してきたが、気圧や波高の極値に対する推定結果の相互関係を明確にしていない。

本研究では、楕円型気圧分布を仮定する各種確率的台風モデルに基づくシステムについて、北西太平洋領域における台風属性や確率気圧および確率波高に及ぼすモデル化の影響を、確率的台風モデルの期間別定式化、気圧分布の形状、台風の移動モデルの更新という観点から包括的に検討する。

2. 確率的台風モデルの構成

(1) 台風内気圧分布

気圧分布を局所座標系 (x, y) で表した楕円型分布

$$p = p_c + (p_\infty - p_c) \exp[-\{(x/a)^2 + (y/b)^2\}^{-1/2}] \quad (1)$$

によって仮定すれば、台風は全体座標系 (X, Y) でみた台風中心位置 (X_c, Y_c) 、中心気圧 p_c 、局所座標系 x 軸の全体座標系 X 軸に対する楕円長軸傾斜角 θ 、平均台風半径 $R = (a+b)/2$ 、楕円短軸方向と長軸方向の台風半径比 b/a 、の 6 つの属性によって代表される。ここに、 p_∞ は遠方場気圧であり、データ解析によれば、良い近似で 1013 hPa と置ける。式 (1) は $a=b$ の場合、円型気圧分布に対応する Myers 式に帰着する。

(2) 確率的台風モデルの定式化

a) モデルの概要

確率的台風モデルでは、上記の 6 つの台風属性と 4 つ

の台風属性変化量 $\Delta X_c, \Delta Y_c, \Delta p_c, \Delta \theta$ の合計 10 個の変量を対象とする。本モデルは、①台風の期間別発生数と、10 個の台風属性変量の②境界発生および③移動・発達、に関する 3 つのサブモデルよりなる。台風属性資料は図-1 に示す北西太平洋領域 (格子間隔 80 km で 34×35 に分割) において 1951~1991 年の 41 年間で発生し、中心気圧 980 hPa 以下に発達した 320 ケースの台風より 6 時間間隔で作成している。②と③のモデルは台風の地域特性を考慮するために、図-1 の 6 つの小境界および 16 個の小領域別に定式化する。

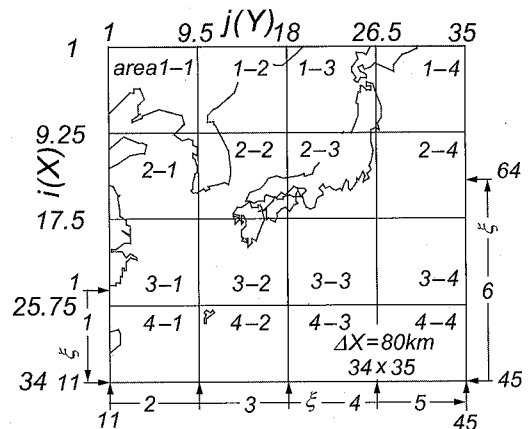


図-1 確率的台風モデルの作成領域

b) 期間別台風発生数モデル

対象とする年や季節などの期間について、台風の発生数をポアソン分布で近似する。図-2 は 9 月における年別台風発生数に対するポアソン分布のあてはめ例であり、ポアソン分布の近似度は比較的高い。

c) 台風の境界発生モデル

台風が領域に進行した境界上の位置を台風の発生位置 (X_{c0}, Y_{c0}) と定義し、図-1 に示す境界上に配した 1 次元座標 ξ との関係で作成した発生位置の累積分布に 0~1 の一様乱数を与えて発生位置を求める。境界に沿

1 正会員 博(工) 愛媛大学契約職員
2 正会員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科教授
3 愛媛大学技術専門職員
4 正会員 博(工) 愛媛大学大学院理工学研究科講師

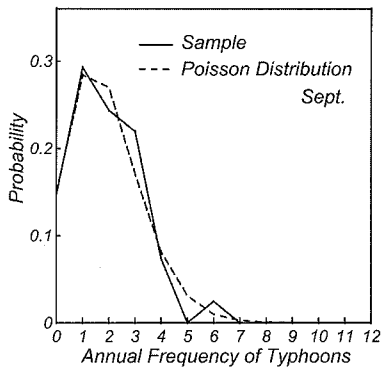


図-2 9月における年別台風発生数のモデル化

った台風属性 (p_{c0} , θ_0) と台風属性変化量 (ΔX_{c0} , ΔY_{c0} , Δp_{c0} , $\Delta \theta_0$) はそれぞれの平均的挙動を近似した境界座標 ξ に関する1次元重み付きスプライン関数値 $f_i(\xi)$ とスプライン関数値からの小領域別偏差 $\text{dev}(\)$ の和で表す。添字 '0' は境界を示す。これは中心気圧 p_{c0} の場合、気圧低下量を p'_{c0} ($=1013 - p_{c0}$) として次式になる。

$$p'_{c0} = f_p(\xi) + \text{dev}(p'_{c0}) \quad (2)$$

図-3はその事例 (F : 非超過確率) を示す。平均台風半径 R_0 は p_{c0} を説明変数とするベキ状型関数回帰式、台風半径比 $(b/a)_0$ は p_{c0} と R_0 を説明変数とする線形重回帰式と各回帰式からの偏差の和で小領域別に表す。

d) 台風の移動・発達モデル

定式化の基本は、 $i+1$ 時点の台風属性が i 時点の台風属性と高い相関を保つ特性を利用するという考え方であり、 $i+1$ 時点の台風属性を i 時点の台風属性との間の線形単回帰式による値と回帰式からの偏差の和で小領域別

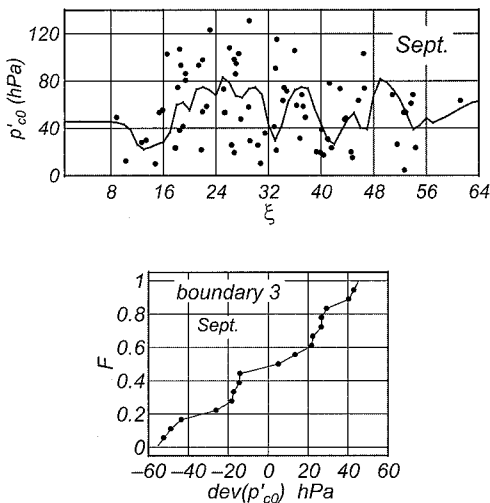


図-3 境界における台風属性のモデル化

に表す (1次マルコフモデル)。線形単回帰式は R と (b/a) を除く各台風属性に対して与える。たとえば、台風の中心位置 X_{ci+1} の場合、次式である。

$$X_{ci+1} = a + b \cdot X_{ci} + \text{dev}(X_{ci+1}) \quad (3)$$

モデルの定式化におけるもう1つのキーポイントは台風属性 (X_c , Y_c , p_c , θ) の各時間ステップあたりの変化量を非超過確率 10~90%あるいは5~95%に相当する台風属性変化量 (ΔX_c , ΔY_c , Δp_c , $\Delta \theta$) の範囲内に制限するという仮定であり、これによって、台風属性の実現値の急激な変化を避ける。

平均台風半径 R_{i+1} は R_i と p_{ci+1} を説明変数とする線形重回帰式、台風半径比 $(b/a)_{i+1}$ は $(b/a)_i$, p_{ci+1} , R_{i+1} を説明変数とする線形重回帰式とそれぞれの重回帰式からの偏差の和で小領域別に表す。これらはいずれも平均的にみて小領域別に計算値と資料値の間で高い相関が得られた回帰式である。また、現実のシミュレーションでは各時間ステップごとの急激な平均台風半径と台風半径比の変化を避けるため、それらの偏差を考慮しない。

以上に述べた1次マルコフモデルでは、両時点の資料間の相関がやや低くなり、シミュレーションで得られる台風属性のうち、とくに中心位置が時間ステップごとに著しく変化する可能性がある。そこで、 $i+1$ 時点の台風属性が i 時点と $i-1$ 時点の台風属性に依存するとする2次マルコフモデルを導入する。たとえば、中心位置 X_{ci+1} の場合、次式で表す。

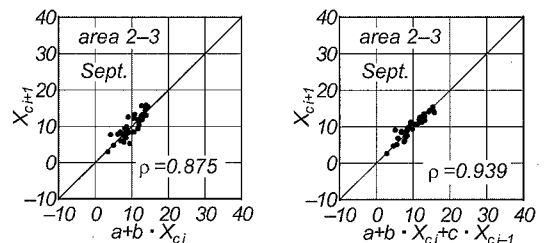
$$X_{ci+1} = a + b \cdot X_{ci} + c \cdot X_{ci-1} + \text{dev}(X_{ci+1}) \quad (4)$$

図-4は X_{ci+1} と式 (3) あるいは式 (4) の回帰式による値との関係を例示し、2次マルコフモデルにおいて資料値と回帰式による計算値の相関が高い。

平均台風半径 R_{i+1} と台風半径比 $(b/a)_{i+1}$ については、説明変数を増加させてもシミュレーション結果に改善がみられないので、それぞれの線形重回帰式を変更しない。

(3) 確率的台風モデルの種類

台風の年代変動や季節変動を考慮して、4種類のモデ

図-4 台風の中心位置 X_c の相関関係

ル化を行う。すなわち、①資料期間 (1951~1991 年の 41 年間) 全体を対象とする累年モデル (year と略記)、②台風の来襲パターンや台風勢力の変動を考慮して、資料期間を 1951~1971 年の 21 年間と 1972~1991 年の 20 年間の 2 つに分けて別々に定式化を行う年代別モデル (chron.), ③ 4 季節 (7 月以前, 8 月, 9 月, 10 月以降) 別に定式化を行う季節別モデル (season), ④年代変動と季節変動の両者を考慮する年代季節別モデル (chron. - season), である。2 次マルコフモデルは季節別モデルとして定式化を行う。

(4) 台風シミュレーション結果の検討

円型気圧分布 ($a=b$) に帰着させた上記の 4 種類の確率的台風モデルを用いて、41 年間 100 回の台風シミュレーションを図-1 の領域で実施し、各台風属性の平均値と標準偏差を小境界および小領域ごとに求める。表-1 は 4 種類のシミュレーション台風資料と 41 年間の既往台風資料 (hist.) に基づく結果の 1 例を示し、台風の中心位置は移動速度 C (km/h) と N 方向より時計回りの移動方向 β ($^{\circ}$) に変換している。表に例示するように、各確率的台風モデルによる結果と既往台風資料による結果はおおむね符合する。もちろん両者の対応関係は小境界および小領域ごとに異なるけれども、台風属性の平均値や標準偏差でみたモデル間の優劣はあまり明確でない。

3. 波高の極値推定システム

(1) システムの概要およびシミュレーションの条件

本システムは、①確率的台風モデル、②場の移動に伴う風を考慮した傾度風に基づく海上風推算モデル (野中ら, 2000)、③第 2 世代に属する格子点深海波浪推算モデル (山口ら, 1984)、④候補分布を Gumbel 分布と 27 種類の形状母数固定型 Weibull 分布、母数推定を最小 2 乗法による極値統計解析モデル (Yamaguchi・Hatada, 1997)、からなる。①の確率的台風モデルを既往台風資料に置き換えれば、既往台風に伴う波高の極値推定システムが得られる。

シミュレーションでは、まず円型気圧分布 ($a=b$) に帰着させた 4 種類の確率的台風モデルでそれぞれ発生

した 1,000 年間約 7,800 ケースの各台風について気圧と海上風・波浪の計算を行い、得られた格子点別年最大気圧降下量資料や年最大波高資料に対する極値統計解析によって、確率気圧や確率波高を推定する。ついで、楕円型分布を仮定する季節別モデルを対象として、台風の移動・発達を 1 次マルコフモデルと 2 次マルコフモデルによる場合の気圧と海上風・波浪のシミュレーションおよび極値統計解析を実施する。また、円型気圧分布と楕円型気圧分布をそれぞれ仮定した場合に、1951~1996 年の 46 年間 367 ケースの既往台風資料を用いた同様の計算に基づいて推定した確率気圧および確率波高を比較用資料とする。

(2) シミュレーション結果の考察

図-5 は 4 種類の確率的台風モデル (円型気圧分布を仮定) に基づく 1,000 年のシミュレーション台風資料に対する極値統計解析から得た 100 年確率気圧 p_{100} の平面分布を示し、既往台風資料に基づく 100 年確率気圧も与えている。いずれのモデルによる確率気圧の平面分布も既往台風資料による結果と全般的に符合するが、後者は小標本に起因する大きい空間変動を伴う。より詳細にみると、確率気圧の平面分布は 2 つのパターンに分類される。1 つは累年モデルと年代別モデルに基づく結果であり、確率気圧の等値線は東西方向に延び、東西方向の変化が相対的に小さい。他の 1 つは季節別モデルと年代季節別モデルである。これらのモデルは台風の季節変動を考慮しているので、台風の北上に伴う NE 方向への転向の影響が顕在化する結果、等値線は NE 方向に延びており、東西方向の変化もより強い。これは既往台風資料に基づく結果にやや近い。

図-6 は円型気圧分布に帰着させた場合に、4 種類のシミュレーション台風資料および既往台風資料より得た 100 年確率波高 H_{100} の平面分布を示す。累年モデルに基づく結果では、南方領域端で 16 m を越える波高は台風の北上に伴う台風勢力の減衰とともにほぼ円形状に減少して沖縄付近から日本西部で 14 m になり、関東以北では 12~8 m に漸減する。同様の挙動は東シナ海でもみられ、沖縄本島から黄海に向けて NW 方向に波高が減少する。年代別モデルに基づく結果では、南方海域で

表-1 台風属性の平均値と標準偏差の比較例

	C (km/h)	β ($^{\circ}$)	p_c (hPa)	R (km)
model	area 2-3	area 2-3	area 2-3	area 2-3
	mean $\pm$ st. dv.	mean $\pm$ st. dv.	mean $\pm$ st. dv.	mean $\pm$ st. dv.
hist.	42.6 $\pm$ 20.9	37.2 $\pm$ 31.9	981 $\pm$ 15	139 $\pm$ 72
year	38.8 $\pm$ 13.7	35.4 $\pm$ 26.0	980 $\pm$ 13	153 $\pm$ 45
chron.	38.6 $\pm$ 14.0	34.2 $\pm$ 27.1	980 $\pm$ 14	151 $\pm$ 49
season	36.1 $\pm$ 16.1	31.8 $\pm$ 32.0	981 $\pm$ 14	151 $\pm$ 53
chron. - season	34.9 $\pm$ 15.9	27.4 $\pm$ 34.0	981 $\pm$ 14	145 $\pm$ 53

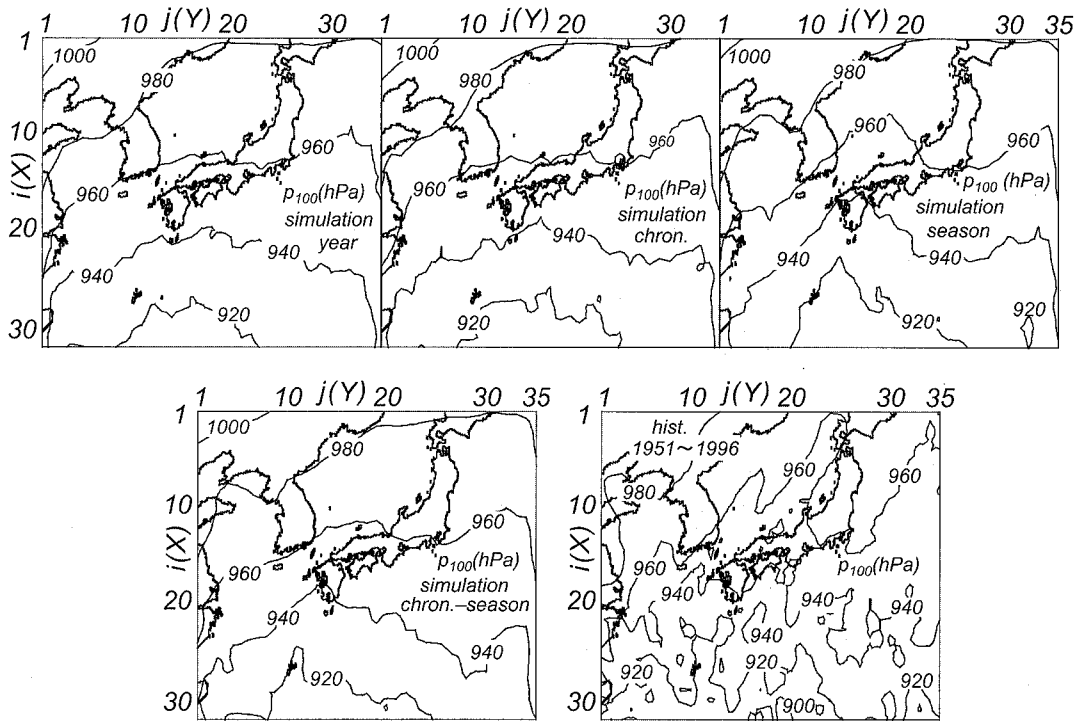


図-5 100 年確率気圧の比較

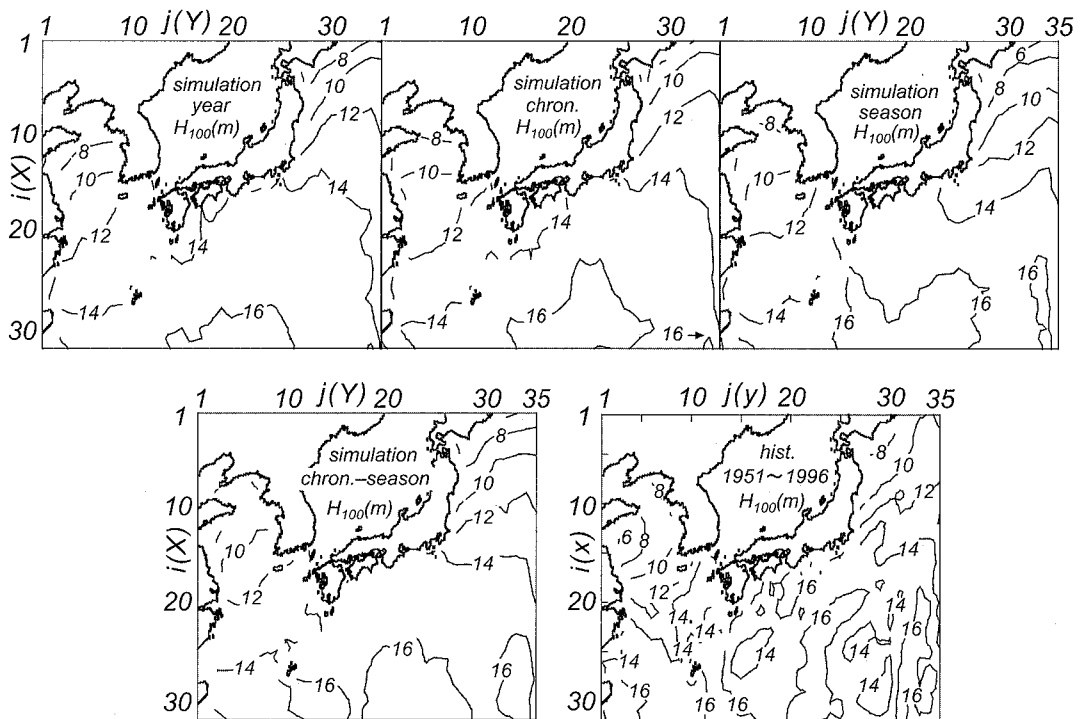


図-6 100 年確率波高の比較

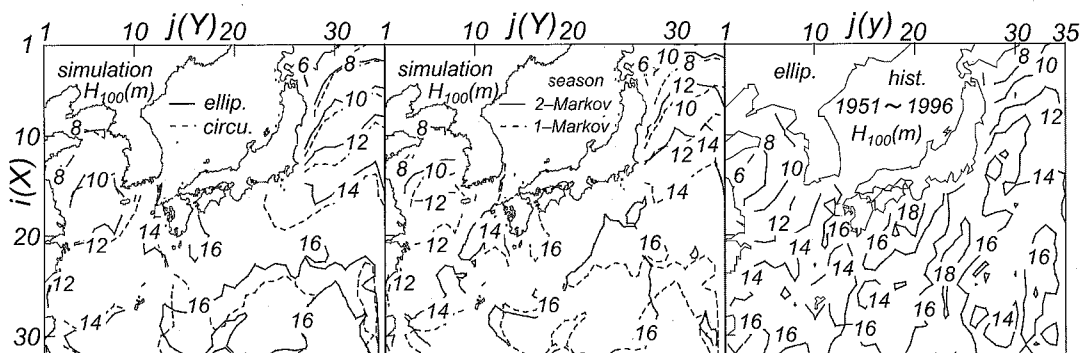


図-7 確率波高に及ぼす気圧分布および台風の移動・発達モデルの影響

16 m 波高域がより広く、季節別モデルに基づく結果では、16 m 波高域の拡大と新たな 16 m 波高域の出現および台風の平均的進行方向への等値線の伸びが見出される。年代季節別モデルに基づく波高は年代別モデルと季節別モデルに基づく結果の特徴を併せた空間変化を示す。これらはいずれも、既往台風資料に基づく結果の中で短い資料期間のために例外的に突出する部分を除いて、おおむね符合するが、季節変動を考慮した季節別モデルや年代季節別モデルに基づく結果がより近い分布状況を与える。しかし、台風属性資料を細分割 (8 分割) して作成された年代季節別モデルでは、モデル化のために使用される資料数が少なすぎることから、以下では季節別モデルを採用する。

図-7 は計算期間を 1,000 年とした季節別モデルにおいて、円型気圧分布と楕円型気圧分布を用いた場合、および気圧分布を楕円型分布とし、移動に伴う台風属性の変化を 1 次マルコフモデルから 2 次マルコフモデルに変えた場合の 100 年確率波高の平面分布を示す。図には楕円型気圧分布を用いた既往台風資料に対する結果も与えられる。楕円型気圧分布を用いると、楕円短軸側 (台風の進行方向右側) で風速が増加することから、円型分布の場合に比べて全体として波高が若干大きくなる。その結果、南方海域で 16 m 波高域が拡大し、四国沖にもこれが出現する。また日本周辺の東方海域で、高波高域がやや NE 方向に延びる。既往台風の場合にも確率波高が全体的に大きくなっている。ついで、台風の移動・発達モデルの変更による確率波高の特徴をみると、2 次マルコフモデルの波高が 1 次マルコフモデルよりやや大きい

値を与え、しかも南方海域、関東沿岸、東シナ海中央部、さらに沖縄付近から日本海西南部において既往台風資料に基づく結果に近い。なお、円型分布からのひずみが小さいために、確率気圧に及ぼす気圧分布形状の影響は無視しうるし、台風の移動・発達に対するモデル化の影響も小さい。

4. 結 語

本研究で得られた知見はつぎのようにまとめられる。

① 4 種類の期間別確率的台風モデルは台風属性や気圧の空間分布に関して明確な差を生じないが、波高に関して有意な差を与え、既往台風資料に基づく結果との類似性からみて、季節別モデルがより適切である。

② 本システムにおける確率的台風モデルの拡張 (楕円型気圧分布, 2 次マルコフモデル) は確率波高の平面分布の推定結果を既往台風資料に基づく結果に近づけることから、その有効性が認められる。

参 考 文 献

- 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知モデルについて, 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.