

確率的低気圧モデルに関する研究

山口正隆*・大木泰憲**・畑田佳男***・前川浩章****

1. 緒 言

超長期の再現期間に対する確率波高を推定するための方法の1つとして、異常気象擾乱の確率的発生モデルと海上風・波浪推算モデルを組み合わせたシステムが考えられる。台風の場合には、こうした方法は著者ら(1994, 1995)により開発されているが、低気圧の場合には、低気圧そのものの確率的なモデル化がこれまで行われていない。そこで、本研究では低気圧に伴う気圧分布を簡単なモデルで近似したうえで、天気図から求めた低気圧属性資料の統計解析を行い、その確率的発生モデルの構築を試みる。

2. 低気圧モデルおよび低気圧属性資料

(1) 低気圧モデル

低気圧に伴う気圧分布は、発達した場合でも、台風のように円形で近似することに無理があるので、第1次近似として円を一般化した楕円で表示する。

$$p = p_{\infty} - (p_{\infty} - p_c) \exp[-\{(x/a_1)^2 + (y/b_1)^2\}^{1/2}] \dots (1)$$

ここに、 p_{∞} ：一般気圧場の気圧、 p_c ：低気圧の中心気圧、 x, y ：低気圧中心を原点とする局所座標系、 a_i, b_i ($i=1, 2$)：正、負側で異なる値をとる楕円の長・短径(低気圧半径)、である。 $a_1=b_1$ とすれば、式(1)は台風モデル法で使用される Myers 式に帰着する。

局所座標系 (x, y) と全体座標系 (X, Y) の関係は、図-1に示すように、局所座標系 x 軸の全体座標系 X 軸からの反時計回りの傾きを θ とすれば、

$$\left. \begin{aligned} x &= (X - X_c) \cos \theta + (Y - Y_c) \sin \theta \\ y &= -(X - X_c) \sin \theta + (Y - Y_c) \cos \theta \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

で表されるので、これを用いることにより、式(1)は全体座標系に変換される。ここに、 X_c, Y_c は全体座標系での低気圧中心位置である。したがって、低気圧属性は $X_c, Y_c, p_c, p_{\infty}, \theta, a_1, a_2, b_1, b_2$ の9つの変量によって代表される。式(1)の妥当性は楕円長・短軸上気圧読み取り値との比較的良好な一致から確認された。

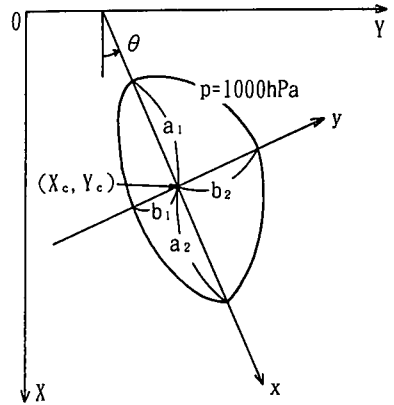


図-1 局所座標系と全体座標系の関係

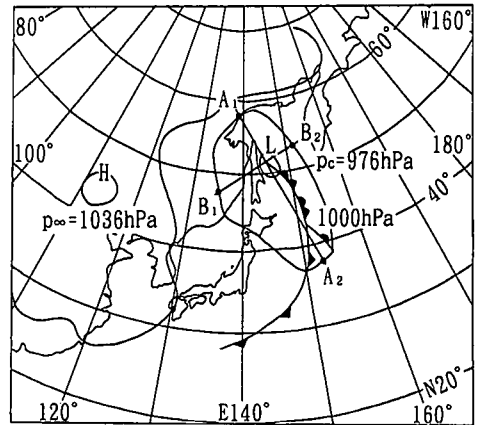


図-2 低気圧属性の解析に使用する天気図の1例

(2) 低気圧属性資料の作成方法

低気圧属性の解析は図-2に従って次の順序で行う。

- ① 対象低気圧の中心位置(緯度、経度)および中心気圧 p_c (hPa) を読み取る。
- ② 対象低気圧に支配的影響をもつとみなされる高気圧(通常は対象低気圧より西側にある)を卓越高気圧と定義し、その中心気圧 p_{∞} を読み取る。低気圧の場合、高気圧によって等圧線密度が異なることから、実資料に基

* 正 会 員 工 博 愛媛大学教員 工学部環境建設工学科
 ** 正 会 員 工 修 東亜建設工業株式会社
 *** 正 会 員 工 修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科
 **** 学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科

づいて p_{∞} を決定する。

③ 低気圧は前線を伴い、寒冷前線が先行する温暖前線に追いついて閉塞前線を形成するとともに、等圧線の主軸が反時計回りに傾いていくことが多い。この特性をモデル化するために、寒冷前線と温暖前線の中間点と低気圧中心を結ぶ直線（長径）およびこれに直交する直線（短径）と、1000 hPa 等圧線の4交点（ A_1, A_2, B_1, B_2 ）の緯度・経度を可能なかぎり読み取る。

④ 緯度・経度座標系—全体直交座標系変換数値表の線形補間によって、緯度・経度座標系資料を全体座標系資料に変換する。ついで、中心位置資料と楕円長軸正側交点資料（ A_2 に相当する）より楕円長軸傾斜角 θ を、また、式（1）より a_1, a_2, b_1, b_2 を求める。

（3）低気圧資料の選択

低気圧資料の抽出は6時間間隔のアジア太平洋天気図による。期間は天気図の入手が可能であった1988～1995年の8年間で、抽出対象低気圧は、北緯約 $30^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 、東経約 $115^{\circ} \sim 170^{\circ}$ の範囲で中心気圧が980 hPa 以下に発達したもののうち、西から東へ移動した低気圧とするが、関東・東北沖や日本海で発生した低気圧も含む。ただし、東経 160° 付近の海域や北緯 50° 付近の領域で発生した低気圧、および北側、東側境界付近をかすめた程度の低気圧は除外する。抽出低気圧数は8年間で245個である。

低気圧属性の確率的発生モデルを作成する領域は、モデル化の精度があまり期待されない領域内発生低気圧（48個）の数を少なくし、より精度の高いモデル化が可能な、境界を横切る低気圧（境界発生低気圧197個）を多くとるとともに、対象領域を広くするという立場から、おおよそ東経 $133^{\circ} \sim 170^{\circ}$ 、北緯 $33^{\circ} \sim 54^{\circ}$ の範囲に設定する。対象領域の大きさは、格子間隔80 km で 33×39 であり、西北端を原点として南方に X 軸、東方に Y 軸をとり、長さは格子間隔単位で表す。

3. 確率的低気圧モデルの定式化

確率的低気圧モデルは、①低気圧年発生数モデル、②境界低気圧発生モデル、③領域内低気圧発生モデル、④低気圧の発達・移動モデル、より構成される。

（1）低気圧年発生数モデル

まず、中心気圧980 hPa 以下の低気圧の年発生数は、低気圧抽出条件の相違により1988～1995年（アジア太平洋天気図）と1951～1987年（気象要覧）の期間で異なることから、1987年以前の低気圧年発生数にそれぞれの期間の年平均発生数の比（31/24）を乗じて調整する。ついで、各年の発生数資料について、図-3のような累積分布図（ F ：未超過確率）を作成し、これに0～1間の一様乱数を入力することにより、低気圧の年発生数 N を求める。

低気圧の年発生数は8年間の発生数の比率（197：37）で

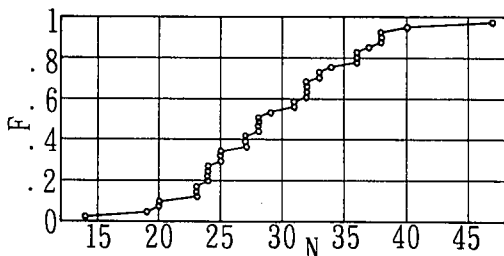


図-3 低気圧年発生数の累積分布

境界低気圧発生数と領域内低気圧発生数に分けられる。

（2）境界低気圧発生モデル

境界上の低気圧属性は境界を横切る直前直後の2時刻における低気圧属性資料の線形補間に基づいて、また、各低気圧属性変化量（ $\Delta X_c, \Delta Y_c, \Delta p_c, \Delta p_{\infty}, \Delta \theta$ ）は両時点における差として算出する。本モデルで使用する低気圧属性資料は前述の低気圧属性9個と上記の変化量5個の合計14個になる。北側境界や東側境界における発生低気圧数は2～3個であるので、低気圧発生境界は西側境界および南側境界とする。

図-4に示すように、西側境界から南側境界に沿った1次元境界座標 ξ を導入する。原点は西側境界の北端付近（ $X=5$ ）に決める。図-5は境界座標で表した低気圧発生位置の累積分布図であり、これに0～1の一様乱数を入力することにより、低気圧の発生位置を決める。

境界発生モデルの基本的考え方は、4つの低気圧半径を除く各低気圧属性の境界座標 ξ に関する平均的挙動を重み付き1次元平滑化スプライン関数によって近似するとともに、個々の資料値のスプライン関数値からの偏差を累積分布で表示し、両者の和で各低気圧属性を与えるというものである。境界は、境界軸に沿う低気圧属性の地域特性を考慮するため、図-4に示すように、6つの

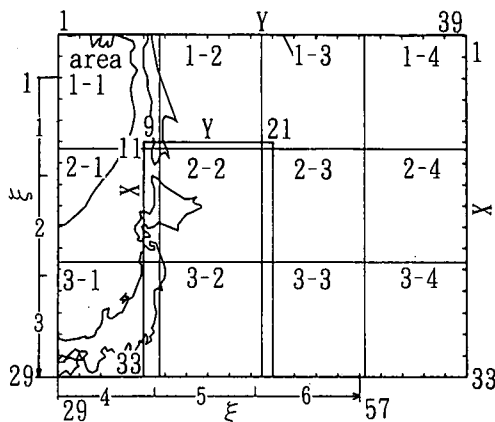


図-4 境界座標 ξ 、小領域分割法および領域内発生領域

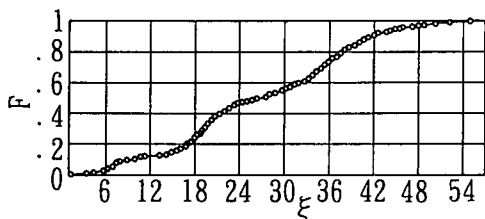
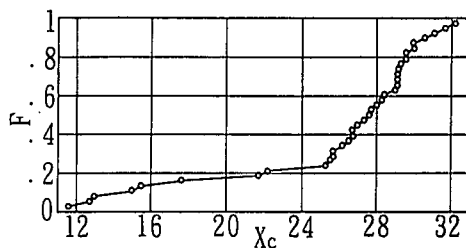


図-5 低気圧発生位置の累積分布

図-8 領域内発生低気圧属性 X_c の累積分布

小境界に分割し、小境界ごとに低気圧属性偏差の累積分布図を作成する。たとえば、 ΔX_c 、 ΔY_c は、

$$\Delta X_c = f_1(\xi) + \text{dev}(\Delta X_c)$$

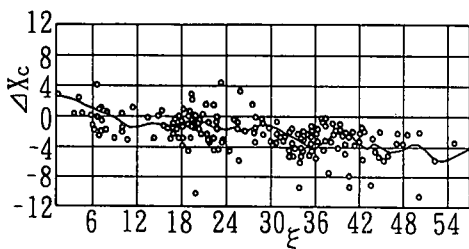
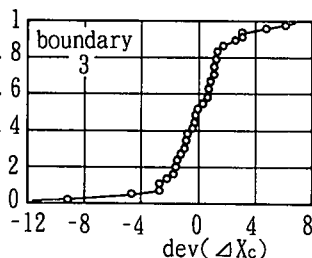
$$\Delta Y_c = f_2(\xi) + \text{dev}(\Delta Y_c) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。ここに、 f_i ($i=1\sim 8$) は境界座標を用いて近似された各低気圧属性 (ΔX_c 、 ΔY_c 、 p_c 、 Δp_c 、 p_{∞} 、 Δp_{∞} 、 θ 、 $\Delta \theta$) に対する1次元スプライン関数(境界全体でそれぞれ1個)、 $\text{dev}()$ は小境界ごとの累積分布に0~1の一樣乱数を与えて求められる各低気圧属性偏差を表す。図-6および図-7は ΔX_c にあてはめた平滑化スプライン関数およびスプライン関数値からの偏差の累積分布の1例を示す。

低気圧半径 ($a_1 \sim b_2$) は、 p_c 、 p_{∞} および θ との相関が比較的高いことから、小境界ごとに線形重回帰式、

$$a_1 \sim b_2 = a + b(p_c - 1000) + c(p_{\infty} - 1000) + d \cdot \theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

による値と線形重回帰式からの偏差の累積分布に基づく値との和として表す。ここに、 $a \sim d$ は回帰係数である。

図-6 境界低気圧属性 ΔX_c と平滑化スプライン関数図-7 境界低気圧属性 ΔX_c の偏差の累積分布

(3) 領域内低気圧発生モデル

領域内の低気圧発生地点はかなりのばらつきを伴い、しかも資料数が少ないので、モデル化は発生地点が集中している図-4の太枠で示した領域に限定する。採用した領域内低気圧発生数は収集資料数48個のうち37個である。モデル化にあたっては、低気圧半径を除く各低気圧属性資料相互の独立性を仮定し、低気圧発生位置 (X_c 、 Y_c)、 p_c 、 p_{∞} 、 θ およびそれらの変化量ごとに図-8のような累積分布図を作成し、これに対する0~1の一樣乱数入力から、発生地点における各低気圧属性資料を得る。ただし、低気圧属性変化量の定義は発生直後時点と発生時点における値の差とする。

低気圧半径は、境界発生モデルの場合と同様に、式(4)の重回帰式による値とそれからの偏差の和で表示する。

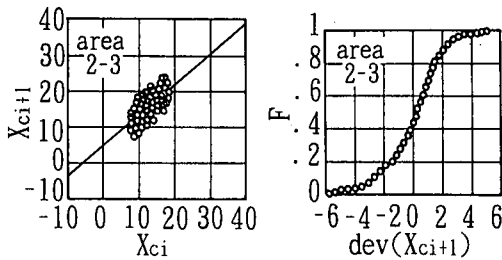
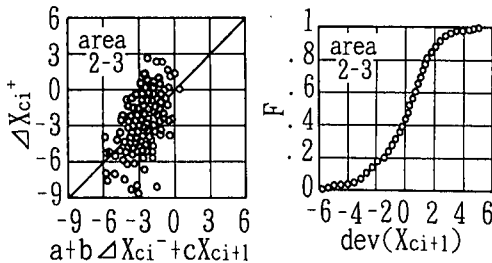
(4) 低気圧の発達・移動モデル

境界あるいは領域内発生モデルより得られた14個の低気圧属性を初期値とする、低気圧の発達(減衰)・移動モデルを定式化する。

低気圧属性の地域特性の影響をモデル化するため、図-4に示すように、対象領域をX軸方向に3、Y軸方向に4に等分割した小領域ごとに低気圧属性資料を分類し、別個に定式化を行う。定式化にあたっての基本的考え方は、 $i+1$ 時点における低気圧属性資料が i 時点におけるものと高い相関をもつことを利用して、 i 時点から $i+1$ 時点に至る低気圧属性が、図-9に1例を示すように、両時点における諸量間の線形単重回帰式における値と回帰式からの偏差の累積分布図に0~1乱数を入力して得られる値との和で表されとすることである。線形単重回帰式は低気圧半径を除く低気圧属性に対して次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X_{ci+1} &= a + bX_{ci}, & Y_{ci+1} &= a + bY_{ci} \\ p_{ci+1} &= a + bp_{ci}, & p_{\infty i+1} &= a + bp_{\infty i} \\ \theta_{i+1} &= a + b\theta_i \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、低気圧属性変化量も、図-10に1例を示すように、線形重回帰式による値とその偏差の累積分布図からの値の和として表す。この場合の線形重回帰式は、

図-9 低気圧属性 X_c の相関および偏差の累積分布図-10 低気圧属性変化量 ΔX_c の相関および偏差の累積分布

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_{ci}^+ &= a + b\Delta X_{ci}^- + cX_{i+1} \\ \Delta Y_{ci}^+ &= a + b\Delta Y_{ci}^- + cY_{i+1} \\ \Delta p_{ci}^+ &= a + b\Delta p_{ci}^- + c(p_{ci} - 1000) \\ \Delta p_{\infty i}^+ &= a + b\Delta p_{\infty i}^- + c(p_{\infty i} - 1000) \\ \Delta \theta_i^+ &= a + b\Delta \theta_i^- + c\theta_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

のように記述される。ここに、

$$\Delta(\quad)_i^+ = (\quad)_{i+1} - (\quad)_i, \quad \Delta(\quad)_i^- = (\quad)_i - (\quad)_{i-1} \dots\dots\dots (7)$$

である。線形重回帰式の使用は線形単回帰式が低気圧属性変化量に対してあまり高い相関を与えないことによる。

シミュレーションでは、 i 時点から $i+1$ 時点に至る低気圧属性の変化量が上述の方法から求められる限界低気圧属性変化量を越えないようにする。限界低気圧属性変化量は式(6)の線形重回帰式による値と未超過確率5%および95%に相当する偏差の和として定義する。これらの値は経験的なものであり、特に根拠はないが、未超過確率曲線の変化の緩やかな部分として採用した。

低気圧半径 ($a_1 \sim b_2$) は、時間経過に伴う不連続な変化を避けるため、 i 時点の低気圧半径、 $i+1$ 時点の中心気圧および卓越高気圧を説明変数とする線形重回帰式のみによってモデル化する。たとえば、 a_1 の重回帰式は次式で表される。

$$a_{1i+1} = a + ba_{1i} + c(p_{ci+1} - 1000) + d(p_{\infty i+1} - 1000) \dots\dots\dots (8)$$

4. シミュレーションの手順

シミュレーションはつぎの手順に従って行う。

① 0～1 の一様乱数を低気圧年発生数累積分布図(図-3)に与えることによって、低気圧の年発生数を決定し、これを197:37の比率で境界発生数と領域内発生数に分ける。

② 境界発生条件では、一様乱数を境界上低気圧発生位置の累積分布図(図-5)に与えることにより、発生位置の境界座標 ξ を求める。

③ 境界座標 ξ における低気圧属性を ξ に対するそれぞれのスプライン関数値(図-6)と偏差の累積分布図(図-7)に一様乱数を与えて決まる値の和として求める。また、低気圧半径 a_1, a_2, b_1, b_2 は、式(4)に p_c, p_{∞}, θ を与えて得られる値と偏差の累積分布図に一様乱数を与えて得られる値の和として求める。

④ 境界発生時点において、初期移動速度 c が10～180 km/h、移動方向 β (Nより時計回りに定義) が西側境界で10～150°, 南側境界で10～85°, p_c が960～1030 hPa, p_{∞} が1000～1075 hPa, θ が-30～100°, a_1, a_2, b_1, b_2 が5～80の範囲をはずれる場合あるいは $p_{\infty} < p_c$ の場合に、③の計算を再度行う。

⑤ 領域内発生条件では、一様乱数を領域内発生低気圧属性資料の累積分布図(図-8)に入力することによって、領域内発生位置などの低気圧属性を求める。また、低気圧半径 ($a_1 \sim b_2$) を線形重回帰式による値と累積分布図より得られる偏差の和として求める。

⑥ 領域内発生時点において、低気圧属性の累積分布図(図-8)に入力する一様乱数が0.1～0.9の範囲をはずれる場合、 a_1, a_2, b_1, b_2 が5～80の範囲をはずれる場合あるいは $p_{\infty} < p_c$ の場合に、⑤の計算を再度行う。

⑦ 式(5)の第1式から得られる値と累積分布図(図-9)より得られる偏差の和として、 $i+1$ 時点におけるX方向低気圧中心位置 X_{ci+1} を求めたのち、これが式(6)の第1式と累積分布図(図-10)の和より得られる限界X方向中心位置変化量 ΔX_{ci+cr} より大きい場合には、限界低気圧属性変化量より小さくなるまで同じ計算を繰り返し、一方、満たす場合には、つぎの低気圧属性の計算に移行する。 $i+1$ 時点における低気圧半径は i 時点の低気圧半径と、 $i+1$ 時点の p_{ci+1} および $p_{\infty i+1}$ を式(8)の線形重回帰式に代入して計算する。

⑧ 低気圧が対象領域の外に出る場合に、計算を終了する。

5. シミュレーション結果の考察

本モデルが現実の低気圧属性を再現するかどうかを調べるために、8年間のシミュレーションを100回実施し

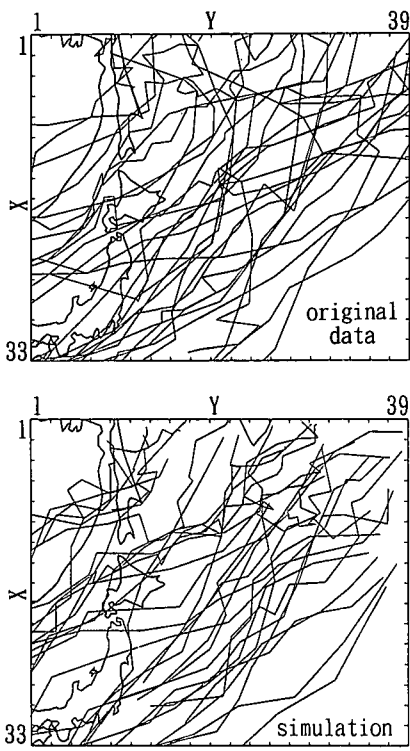


図-11 低気圧経路に関する比較

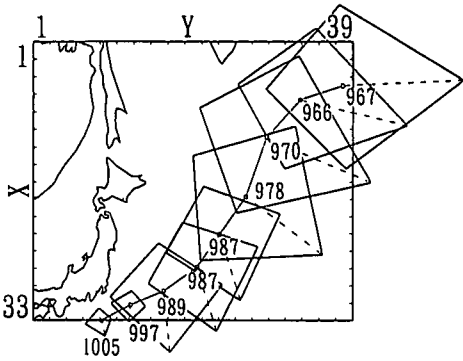


図-12 低気圧属性の経時変化のシミュレーション結果

表-1 低気圧属性の平均値と標準偏差の小領域別比較

		area 3-2		area 3-3	
		mean	st. dv.	mean	st. dv.
p_c (hPa)	obs.	997.0	10.1	991.6	10.3
	cal.	994.9	8.2	990.3	8.6
p_m (hPa)	obs.	1032.0	10.2	1029.7	8.6
	cal.	1032.4	8.1	1031.3	8.0
c (km/h)	obs.	59.6	26.2	72.5	26.4
	cal.	57.4	21.2	62.9	18.4
β (°)	obs.	51.0	31.0	52.3	23.9
	cal.	53.0	22.7	57.7	18.6
θ (°)	obs.	37.4	22.8	47.1	24.9
	cal.	41.7	16.5	50.1	16.8
a_1	obs.	21.3	18.4	17.0	14.0
	cal.	23.2	7.9	19.6	7.3
a_2	obs.	27.1	16.8	24.1	12.9
	cal.	27.7	6.9	24.9	6.3
b_1	obs.	29.8	20.9	24.2	12.1
	cal.	31.1	9.1	26.4	8.6
b_2	obs.	24.6	17.2	23.7	18.4
	cal.	27.4	9.2	20.8	6.6

た。図-11 はシミュレーションで発生したある1年間の低気圧の経路と現実の低気圧の経路を示したものであり、両者は比較的良好に類似している。一方、図-12 はシミュレーションで発生した1個の低気圧の低気圧属性(中心位置、中心気圧、半径)の6時間ごとの経時変化図である。低気圧は、時間の経過につれて、発達しながらENE から NE 方向へ進行するとともに、長軸傾斜角が反時計回りに変化し、しかもその経時変化は滑らかである。

表-1 は小領域別低気圧属性の平均値および標準偏差に関する比較の2例を示したものであり、低気圧の中心位置のかわりに、進行速度 c および進行方向 β が用いられている。標準偏差は、変動分を考慮していない低気圧半径に関して原資料の50%程度、他の低気圧属性で80%程度となっているが、ほぼすべての小領域および発生境界や発生領域で、両者の比較的良好な一致がみられる。

6. 結 語

本研究で開発した確率的低気圧モデルは現実の低気圧経路の特性や低気圧属性の平均値および標準偏差の領域

特性をよく再現することから、その有用性が確認された。

参 考 文 献

山口正隆・畑田佳男・中村雄二・大木泰憲 (1994): わが国太平洋沿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・大木泰憲・西村教博・中村雄二 (1995): 確率的台風モデルに基づく台風時浅海波高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.