

低気圧属性の確率的発生モデルの再構成

山口正隆*・畑田佳男**・前川浩章***・野中浩一***

1. 緒 言

低気圧に伴う波高の極値推算システムを構築するための第1段階として、山口ら(1996)は北西太平洋海域における最近8年間の低気圧属性資料の統計解析に基づき、低気圧属性の確率的発生モデルを開発した。しかし、低気圧特性の経年変動を考慮するとき、8年という抽出期間は短すぎるように考えられる。そこで、本研究では、抽出期間を32年に延長した場合に、確率的低気圧モデルを再構成するとともに、傾度風モデルを組み込んだモデルのモンテカルロシミュレーションに基づいて、長期の再現期間に対する気圧および海上風の平面分布を推定する。モデルの再定式化にあたっては、低気圧資料数の増加に対応して、低気圧年発生数の境界上および領域内発生数への確率的配分や領域内低気圧の小領域別発生などを新たに工夫する。

2. 低気圧モデル、傾度風モデルおよび低気圧属性資料

(1) 低気圧モデル

図-1に示すように、低気圧に伴う気圧分布を楕円型分布で近似する。

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

ここに、 p_∞ ：遠方場(卓越高気圧)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。式(1)は山口ら(1996)の楕円型分布と異なっており、 $a_i = b_i$ とすれば、台風モデル法で用いられる $\exp(-r_0/r)$ タイプのMyers式に帰着する。

ついで、全体座標系(X, Y)を導入し、局所座標系 x 軸(楕円長軸)の全体座標系 X 軸からの反時計回りの傾き(楕円長軸傾斜角)を θ 、全体座標系からみた低気圧の中心位置を X_c, Y_c とすれば、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。

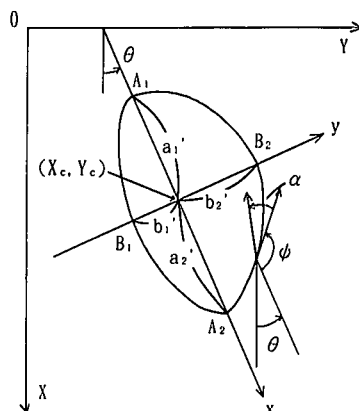


図-1 楕円型気圧分布

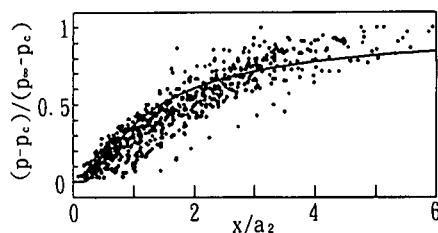


図-2 楕円長軸方向の気圧分布

図-2は5ケースの低気圧の等圧線分布(4 hPa ごと)から読みとった楕円長・短軸方向無次元気圧値 $(p - p_c) / (p_\infty - p_c)$ と無次元距離 (x/a_2) の関係を図示したものである。図中の実線は指数関数 $\exp\{-(x/a_2)^n\}$ を表し、 a_2 は局所 x 座標正軸上の1000 hPa等圧線までの距離資料を式(1)に与えて求められている。各資料は当然大きなばらつきを伴うけれども、その平均的挙動は指数関数で近似される。また、気圧変化の平均的挙動をよりの確に表すために、 $\exp\{-(x/a_1)^n\}$ または $\exp\{-(y/b_1)^n\}$ を最小2乗法であてはめた。べき数 n は x 軸負・正方向(a_1, a_2)および y 軸負・正方向(b_1, b_2)に対応して、それぞれ1.08, 0.91, 1.08, 0.91であるから、低気圧の軸方向気圧分布は第一次近似的には指数関数で表され、低気圧半径 a_i または b_i によるscalingが可能であると考えられる。

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科
 ** 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

(2) 傾度風モデル

気圧分布が与えられれば、低気圧に伴う傾度風速 G および全体座標系における傾度風速成分 G_x , G_y は、

$$G = V_g / [(1/2) + \{1/4 + V_g^2 / f |R|\}^{1/2}]$$

$$G_x = G \cos(\psi + \theta + \alpha), G_y = G \sin(\psi + \theta + \alpha) \cdots (2)$$

により表される。ここに、 V_g : 地衡風速, $f (=2\omega \sin \phi)$, $\omega = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, ϕ : 緯度, R : 等圧線の曲率半径, ψ : 等圧線の接線角, α : 等圧線に対する吹き込み角 ($\alpha = 30^\circ$ もしくは緯度 ϕ により変化), である。一般に, R は次式のように与えられる。

$$R = (p_x^2 + p_y^2)^{3/2} / (2p_{xy}p_xp_y - p_x^2p_{yy} - p_y^2p_{xx}) \cdots (3)$$

ここに、下添字はそれぞれの変数による微分を表す。

気圧場の移動に伴う風速 V は台風モデル法の場合にあらって、

$$V = C \cdot \exp(-\pi F^{1/2}), F = (x/a_i)^2 + (y/b_i)^2 \cdots (4)$$

で近似されると仮定する。ここに、 C は低気圧中心の移動速度である。風速 V の成分 V_x , V_y は式 (4) で C のかわりに C の X , Y 成分 C_x , C_y を用いれば得られる。したがって、10 m 高度での海上風速 U および X , Y 成分 U_x , U_y は海上風への変換係数を $C_1 = C_2 (=0.6)$ として、

$$U = (U_x^2 + U_y^2)^{1/2}$$

$$U_x = C_1 G_x + C_2 V_x, U_y = C_1 G_y + C_2 V_y \cdots (5)$$

より計算される。

(3) 低気圧属性資料

低気圧属性資料の作成方法は山口ら (1996) と全く同じである。すなわち、1 枚のアジア・太平洋天気図上で中心気圧 p_c 、卓越高気圧 p_∞ 、低気圧中心位置 (X_c , Y_c) や、寒冷前線と温暖前線の間中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 の等圧線の交点 (A_1 , A_2 , B_1 , B_2) の緯度・経度を読みとったのち、 p_c , p_∞ を除く諸量を全体直交座標系表示に変換する。そして、中心位置資料と楕円長軸正側交点 (A_2) 資料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。なお、図-1 中 $a'_1 \sim b'_2$ は $a_1 \sim b_2$ を定数倍したものである。

低気圧資料の抽出は 32 年間にわたる 6 時間間隔のアジア・太平洋天気図による。このうち、1976~1995 年の 20 年間では、中心気圧 980 hPa 以下に発達した低気圧を対象とするが、1964~1975 年の 12 年間では、資料作成作業の手間や天気図枚数を節減するとともに、異常低気圧に対するモデルの再現性を向上させるため、中心気圧 960 hPa 以下に発達した異常低気圧に限定する。抽出範囲は北緯約 $30^\circ \sim 55^\circ$ 、東経約 $115^\circ \sim 170^\circ$ であり、この領域を通過した低気圧、もしくは領域内で発生・発達した低気圧を対象とする。低気圧総数は 718 個である。

確率的低気圧モデルの作成領域は、おおよそ北緯 $33^\circ \sim 54^\circ$ 、東経 $133^\circ \sim 170^\circ$ の範囲に設定する。対象領域の大き

さは、図-3 に示すように、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、長さを格子単位で表す。

3. 確率的低気圧モデル

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、より構成されるが、資料数の増加を除いて、②および④は山口ら (1996) のモデルと全く同じである。また、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 個と低気圧属性変化量 (ΔX_c , ΔY_c , Δp_c , Δp_∞ , $\Delta \theta$) 5 個の合計 14 個である。

(1) 低気圧年発生数モデル

980 hPa 以下の低気圧の年発生数は、低気圧の抽出条件の相違により、1976~1995 年 (アジア・太平洋天気図) と 1951~1975 年 (気象要覧) の期間で大きく異なることから、1975 年以前の低気圧年発生数に、それぞれの期間における年平均発生数の比 ($34.7/24.5$) を乗じて調整する。ついで、1951~1995 年の 55 年間における年発生数資料の累積分布図を図-4 のように作成し、これに 0~1 間の一様乱数を入力して年発生数 N を決めたのち、境界発生数 (N_1) と領域内発生数 (N_2) に分ける。配分は、 N_1/N と N との相関直線による値 (N_1/N) とそれからの変動量

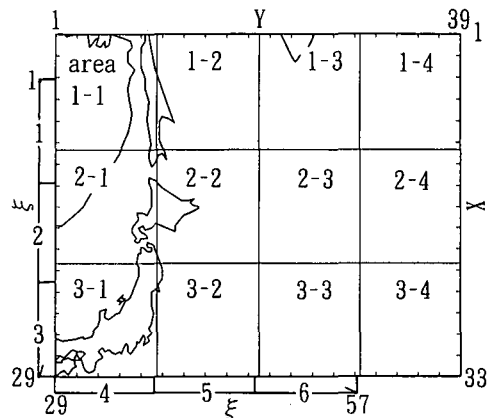


図-3 モデル作成領域、小領域分割法および境界座標

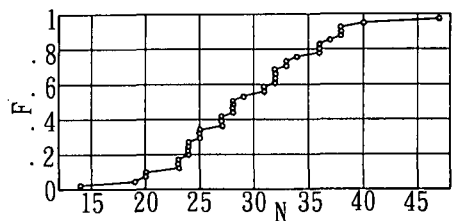


図-4 低気圧年発生数の累積分布

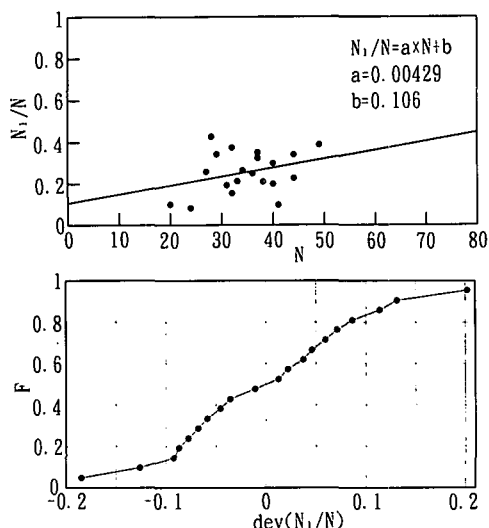


図-5 境界低気圧年発生数の配分方法

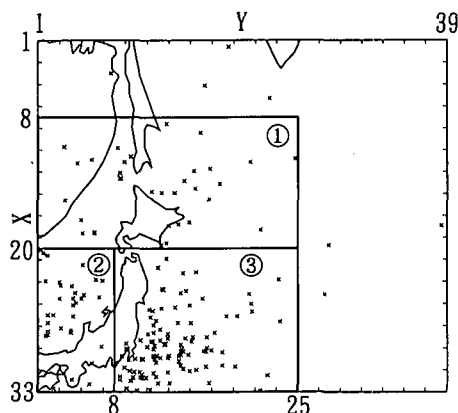


図-6 領域内低気圧発生地点および小領域分割法

$\text{dev}(N_1/N)$ の累積分布による出力の和 (図-5) とする方法による。

(2) 境界低気圧発生モデル

本モデルは領域の境界に沿う 1 次元境界座標 ξ で表した低気圧発生位置の累積分布への一様乱数入力による低気圧発生位置の決定、スプライン関数近似値と小境界別偏差累積分布に基づく各低気圧属性とその変化量の計算および、小境界別重回帰式と偏差累積分布に基づく低気圧半径の算出よりなる。

(3) 領域内低気圧発生モデル

領域内の低気圧発生地点は、図-6 に示すように、広範囲に分布する。そこで、地域特性を考慮に入れて、発生領域を発生地点が集中している図-6 の太枠で示す、① 北部小領域 ($X=8\sim 20$, $Y=1\sim 25$)、② 日本海小領域 ($X=20\sim 33$, $Y=1\sim 8$)、③ 太平洋小領域 ($X=20\sim 33$,

$Y=8\sim 25$)、の 3 つの小領域に分け、別個にモデル化する。採用低気圧数は内部発生低気圧 187 個のうち、180 個であり、これが小領域ごとにそれぞれ 33 個、36 個、111 個に分けられる。シミュレーションにおける各小領域内の低気圧年発生数は領域内発生数 N_2 をこれらの発生数の比 (33:36:111) で分割して求める。

モデル化にあたっては、低気圧半径を除く各低気圧属性およびその変化量資料相互の独立性を仮定して、それぞれの累積分布を作成し、これに対する 0~1 乱数の入力から、発生地点における各低気圧属性およびその変化量資料を得る。また、低気圧半径のモデル化は境界発生モデルの場合と同じである。

(4) 低気圧の発達・移動モデル

これは資料数が飛躍的に増加している点を除いて山口ら (1996) のモデルと同じである。すなわち、低気圧属性に及ぼす地域特性の影響を考慮するため、図-3 に示すように、対象領域を X 軸方向に 3、Y 軸方向に 4 分割して決められる小領域ごとに低気圧属性およびその変化量を分類し、それぞれについて別個のモデル化を行う。その基本的な考え方は、 $i+1$ 時点における低気圧属性あるいはその変化量が i 時点と $i+1$ 時点の低気圧属性間の線形単回帰式あるいは低気圧属性変化量間の線形重回帰式による値と回帰式からの偏差の累積分布に 0~1 乱数を入力して得られる値との和で表されるとすることである。そして、 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制約条件を課す。また、 $i+1$ 時点の低気圧半径は、 i 時点の低気圧半径、 $i+1$ 時点の中心気圧・遠方場高気圧を説明変数とする線形重回帰式を用いてモデル化する。

(5) シミュレーションの方法

シミュレーション手順はつぎのようである。

① 0~1 の一様乱数を低気圧年発生数累積分布図 (図-4) に与えることにより、低気圧年発生数 N を求め、これを図-5 に従って、境界発生数 N_1 と領域内発生数 N_2 に確率的に配分する。

② 境界低気圧発生モデルにより、境界上の低気圧発生位置、発生位置での低気圧属性とその変化量および低気圧半径を求める。

③ 領域内発生年低気圧数 N_2 を上述した一定の比率で分割し、各小領域内年発生数を求める。そして、各小領域ごとに、領域内発生位置、そこでの低気圧属性とその変化量および低気圧半径を求める。

④ 領域内における低気圧属性を、限界低気圧属性変化量の制約条件のもとに、6 時間間隔で順次求め、低気圧が対象領域外に出た場合に、つぎの低気圧に対するシミュレーションに移る。

⑤ 1つの低気圧に対するシミュレーションから得られた低気圧属性資料を入力条件として、式(1)および式(5)から図-3の全格子点における気圧および海上風速を各時間ステップごとに計算し、これから低気圧別最低気圧・最大風速資料を求める。

⑥ 年発生数相当分の低気圧シミュレーションを行い、特定の年における最低気圧・最大風速資料を得る。同様の計算をシミュレーション期間相当分実施して、年別最低気圧・最大風速資料を作成する。

4. シミュレーション結果の考察

本モデルの再現性を調べるために、20年間のシミュレーションを100回(2000年相当)実施した。表-1は低気圧属性の小領域別平均値および標準偏差に関する比較の2例であり、低気圧の中心位置のかわりに、移動速度 C および移動方向 β (N より時計回りに定義)が用いられ

ている。また、原資料を用いた演算では、異常値の影響を除去するため、それぞれ上下限側の5%を削除した資料を用いている。この結果、各低気圧属性の平均値および標準偏差に関してシミュレーション値と資料値は比較的良く一致するが、資料の変動範囲が大きい移動方向 β や楕円長軸傾斜角 θ に関しては、シミュレーション資料の方がそれぞれやや過大あるいは過小な標準偏差を与える。

表-2は小領域別最低気圧の平均値および標準偏差の一覧である。表の各欄の上段および下段はそれぞれ今回および山口ら(1996)のモデルを用いた20年100回のシミュレーションに基づく結果である。今回のモデルによる最低気圧の平均値はいずれの領域でも山口ら(1996)のモデルによる値と比べて低く、標準偏差は大きいことから、今回のモデルは山口ら(1996)のモデルと比べて異常低気圧の規模と出現機会を増加させるといえる。

つぎに、1000年間の気圧および海上風のシミュレーションを1回実施し、得られた格子点別年最低気圧資料および年最大風速資料に対する極値統計解析に基づいて、それらの1000年期待値と標準偏差の平面分布を求めた。用いた極値統計解析システムはGumbel分布とWeibull分布を候補分布とする合田(1990)の最小2乗法に基づく極値統計解析システムを修正したシステム(山口ら, 1997)である。修正システムはGumbel分布と $k=0.5\sim 100$ の間の任意個数(実際には、合田のシステムにおける4個を含む33個)のWeibull分布を候補分布とし、合田のプロットングポジション公式を用いた非超過確率表示に基づく再現期待値推定法、相関係数に基づく最適分布選択基準、jackknife法に基づく分散推定法よりなる。

図-7は気圧資料にあてはめた最適Weibull分布の形状母数 k (Gumbel分布の場合には G で表示)の平面分布を示したものである。この場合の相関係数は0.993~1.00の間にあるから、最適分布の適合度は非常に高い。形状母数はおおむね2.0より大きい値をとり、南側領域から北側領域に向けて増加する傾向にある。Weibull分布は形状母数が高いほど正側に分布の裾を

表-1 低気圧属性の小領域別比較

		area 2-2 mean $\pm$ st. dv.	area 2-3 mean $\pm$ st. dv.
p_c	obs.	989.2 $\pm$ 9.2	983.6 $\pm$ 8.6
	(hPa) cal.	988.9 $\pm$ 10.8	983.4 $\pm$ 9.9
p_m	obs.	1033.1 $\pm$ 9.2	1032.9 $\pm$ 9.0
	(hPa) cal.	1034.5 $\pm$ 8.8	1033.5 $\pm$ 8.0
C	obs.	46.8 $\pm$ 19.5	51.2 $\pm$ 20.1
	(km/h) cal.	48.7 $\pm$ 22.0	51.7 $\pm$ 20.9
β	obs.	49.5 $\pm$ 27.2	48.6 $\pm$ 25.1
	($^\circ$) cal.	50.1 $\pm$ 35.6	49.6 $\pm$ 31.5
θ	obs.	41.9 $\pm$ 21.4	55.1 $\pm$ 23.2
	($^\circ$) cal.	48.8 $\pm$ 17.7	60.2 $\pm$ 16.9
a_1	obs.	6.5 $\pm$ 3.4	6.9 $\pm$ 3.6
	cal.	6.1 $\pm$ 3.1	6.6 $\pm$ 3.0
a_2	obs.	8.9 $\pm$ 4.6	9.7 $\pm$ 5.1
	cal.	9.5 $\pm$ 4.7	9.7 $\pm$ 4.5
b_1	obs.	7.8 $\pm$ 3.2	7.9 $\pm$ 3.3
	cal.	7.5 $\pm$ 3.7	7.8 $\pm$ 3.4
b_2	obs.	6.1 $\pm$ 2.6	6.5 $\pm$ 3.8
	cal.	6.7 $\pm$ 3.1	6.9 $\pm$ 3.0

表-2 最低気圧の小領域別比較

model	area	Y 1	Y 2	Y 3	Y 4
new	X 1	964.3 $\pm$ 4.2	956.0 $\pm$ 3.8	949.3 $\pm$ 1.3	942.7 $\pm$ 3.6
old		969.8 $\pm$ 3.7	963.3 $\pm$ 3.1	958.8 $\pm$ 2.7	956.6 $\pm$ 3.0
new	X 2	965.8 $\pm$ 4.8	956.1 $\pm$ 4.7	950.1 $\pm$ 4.4	949.7 $\pm$ 4.0
old		971.2 $\pm$ 3.9	962.9 $\pm$ 3.2	950.0 $\pm$ 2.6	959.6 $\pm$ 3.0
new	X 3	972.0 $\pm$ 5.0	960.2 $\pm$ 5.1	957.2 $\pm$ 5.0	961.2 $\pm$ 4.3
old		976.9 $\pm$ 4.0	971.5 $\pm$ 3.8	968.6 $\pm$ 4.2	970.1 $\pm$ 4.1

mean $\pm$ st. dev., unit: hPa

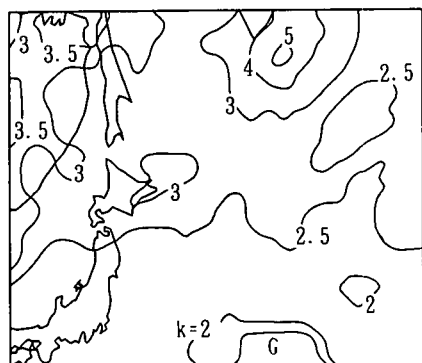


図-7 形状母数の平面分布 (最低気圧資料)

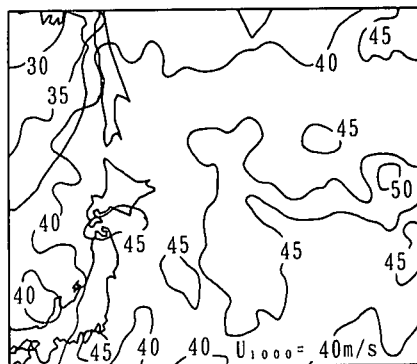


図-9 1000年確率風速の平面分布

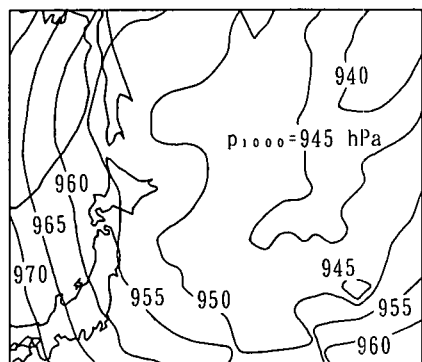


図-8 1000年確率気圧の平面分布

引かなくなるので、再現期間に対する再現期待値の変動幅が小さくなる。すなわち、南側領域では、低気圧中心気圧の年ごとの変動が相対的に大きいけれども、北側領域に向かうほど変動幅が減少し、確率気圧は再現期間が増加してもそれほど大きく変化しなくなる。

図-8は1000年確率気圧 p_{1000} の平面分布を示す。この場合の標準偏差は0.4~1.2 hPaの間にあって非常に小さいので、与えていない。1000年確率気圧は低気圧の発生・発達特性を反映して南西側領域 (970 hPa) から北東側領域 (940 hPa) に向けて減少する傾向が見出される。

ついで、1000年確率風速 U_{1000} の平面分布を図-9に示す。強風域は異常低気圧が発達・通過するわが国東南海域に出現している。この特性は過去の気象資料から推測される結果と定性的に一致するけれども、北東海域ほど低い値をとる1000年確率気圧分布と必ずしも対応しな

い。

以上の結果はわが国南岸や東シナ海および日本海で発生し、発達しながら北東に進行し、カムチャッカ半島東方海域で強い勢力を保ったまま停滞するわが国周辺における低気圧の発生・発達過程を定性的には反映するけれども、定量的には過去の気圧・風速資料に対する極値統計解析結果との比較が必要である。また、海上風計算では、式(4)を用いて低気圧の移動に伴う場の風を考慮するとともに、海上風への変換係数を0.6としているが、これらの仮定が妥当であるかどうかを検討することも今後の課題である。

5. 結 語

本研究で再構成した確率的低気圧モデルは現実の低気圧属性を異常低気圧を含めて山口ら (1996) のモデル以上に再現し、楕円型気圧分布モデルや傾度風モデルを組み込んだシステムはある程度合理的な気圧や海上風の再現期待値を与える。しかし、定量的な対応を得るためには、個々のモデルの適用性を観測結果との比較に基づいてより詳細に検討する必要がある。

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.
- 山口正隆・大木泰憲・畑田佳男・前川浩章 (1996): 確率的低気圧モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 246-250.
- 山口正隆・前川隆海 (1997): 最小2乗法に基づく極値統計解析システムの拡張とその精度の検討 (未発表)。