

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

山口正隆*・畑田佳男**・野中浩一***・羽間義晃****

1. 緒 言

長期の再現期間に対する確率波高を推定する手段の一つとして、過去の異常気象擾乱の属性を統計的にモデル化し、これと海上風・波浪推算モデルを組み合わせる方法が考えられる。Hatada・Yamaguchi (1996) は台風を対象とする場合に、この種のシステムを開発したが、低気圧を対象とする場合には、確率的低気圧モデル(山口ら, 1996)を作成する段階にとどまっている。

わが国の日本海沿岸や太平洋北東部における高波は低気圧や冬型気圧配置に伴う強風によって生起することから、本研究では日本本土および日本海全域をほぼ包含する北西太平洋領域において確率的低気圧モデルを再構築するとともに、海上風推算モデル、2種類の波浪推算モデル(山口ら, 1984, 1987)および極値統計解析モデル(Yamaguchi・Hatada, 1997)を組み込んだ「確率的低気圧モデルに基づく波高の極値推算システム」を新たに開発する。そして1000年間あるいは500年間のモンテカルロシミュレーションに基づいて、北西太平洋における確率気圧・風速および日本海沿岸部や日本海全域における確率波高を推定し、既往資料に基づく結果との比較を通じてその妥当性や特性を考察する。

2. 確率的低気圧モデルの概要

2.1 低気圧モデル

低気圧の気圧分布を4軸で異なる低気圧半径(a_1, a_2, a_3, a_4)をもつ楕円型分布で近似する。

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

ここに、 p_c : 中心気圧、 p_{∞} : 遠方場気圧、 x, y : 低気圧中心を原点とする局所座標系、である。南向きにX軸、東向きにY軸をとった全体座標系を導入し、楕円長軸の傾きを θ 、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。

2.2 低気圧属性の確率的発生モデル

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低気圧の移動・発達モデル、の4つのサブモデルから構成される。本モデルで使用する低気圧属性は上述の9つの変量とそれらの変化量($\Delta X_c, \Delta Y_c, \Delta p_c, \Delta p_{\infty}, \Delta \theta$)である。これらの資料は1964~1995年の32年間に北西太平洋領域で中心気圧980 hPa以下に発達した718ケースの異常低気圧を対象として、天気図から6時間ごとに抽出・作成した。図-1は北西太平洋領域を4×5の小領域に分割したモデル化領域(格子間隔80 km)、3分割した領域内低気圧発生小領域、6分割した小境界および境界に沿って配した1次元境界座標 ξ を示す。

低気圧年発生数モデルは低気圧発生数の累積分布に一樣乱数を与えて各年の低気圧発生数を得るものであり、これを確率的に境界発生数と3小領域内発生数に配分する。低気圧の発生・発達・移動モデルは、境界上の低気圧属性とその変化量の平均特性を重み付きスプライン関数、対象領域内の低気圧属性とその変化量の平均特性を線形回帰式で近似するとともに、平均値からの変動量および小領域内発生低気圧の属性とその変化量を資料より求まる累積分布で表示するものである。線形回帰式および変動量累積分布は、地域特性を考慮するため、図-1に示すように、境界および領域を複数個に分割した小区間で別個に作成する。

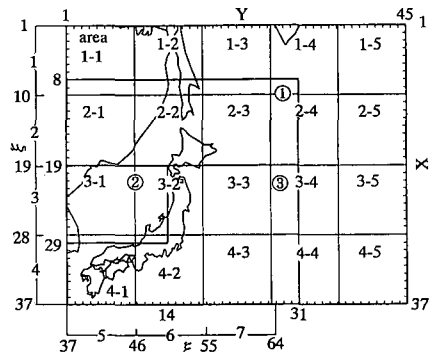


図-1 モデル化領域、小領域の分割法および境界座標

* 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 工修 愛媛大学大学院理工学研究所
 **** 学生会員 京都大学大学院工学研究所

表-1 低気圧属性の小領域別比較

		area 3-1 mean±st. dv.	area 3-2 mean±st. dv.	area 3-3 mean±st. dv.
p_c (hPa)	data	1006.1±6.9	1000.4±6.3	992.5±7.5
	cal.	1001.5±7.9	996.4±8.8	991.9±10.1
p_w (hPa)	data	1037.2±9.5	1036.3±9.4	1034.0±9.3
	cal.	1036.2±8.5	1035.1±8.1	1034.2±7.6
C (km/h)	data	50.8±18.9	63.1±21.3	56.5±19.5
	cal.	44.3±17.3	57.2±21.0	55.1±21.3
β (°)	data	70.4±19.8	61.6±22.3	49.9±19.9
	cal.	64.5±32.5	65.9±27.0	52.8±26.2
θ (°)	data	21.6±15.4	27.4±15.6	42.7±18.2
	cal.	29.1±15.4	33.4±15.3	42.2±15.5
a_1	data	20.3±11.2	22.0±12.1	18.9±11.9
	cal.	22.0±9.7	21.7±9.5	20.9±9.3
a_2	data	23.0±12.1	25.0±13.7	23.9±10.9
	cal.	25.6±10.8	26.0±10.8	24.8±9.8
b_1	data	23.8±11.7	25.8±13.0	23.9±11.8
	cal.	25.3±9.8	25.3±10.3	24.8±10.4
b_2	data	23.9±12.5	24.4±13.6	19.6±10.3
	cal.	26.7±11.1	25.6±11.0	21.8±9.5

2.3 シミュレーション結果の考察

確率的低気圧モデルの再現性を調べるため、20年間のシミュレーションを100回実施した。表-1は東北地方を中心として日本海および北西太平洋を含む3小領域において低気圧属性の小領域別平均値および標準偏差を比較したものであり、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)が用いられる。シミュレーション資料における中心気圧の平均値がやや低く、低気圧半径の標準偏差が一貫して若干小さいけれども、シミュレーション資料は平均的には原資料と比較的よく符合する。このほか、全低気圧経路の分布状況や個々の低気圧の進行に伴う低気圧属性の変化も現実の低気圧に類似する。以上のことから、モデル化領域を拡大した本研究の確率的低気圧モデルも従来のモデル(山口ら, 1996)と同程度の再現性をもつといえよう。

3. 波高の極値推算システム

3.1 海上風モデル

傾度風速Gおよびその成分 G_x, G_y は、

$$G = V_\theta / [(1/2) + \{1/4 + V_\theta / fR\}^{1/2}]$$

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

……………(2)

により表される。ここに、 V_θ : 地衡風速、 f : コリオリ係数、 R, ψ : 等圧線の曲率半径と接線角、 α : 等圧線に対する吹込み角(佐藤・合田, 1972)、である。曲率半径Rは式(1)の1階および2階微分値によって与えられる。

低気圧の移動に伴う場の風速V(成分 V_x, V_y)はCを低気圧中心の移動速度として次式で近似されると仮定する。

$$V = C \cdot \exp(-\pi F^{1/2}), F = (x/a_i)^2 + (y/b_i)^2 \dots (3)$$

したがって、10 m 高度での海上風速Uとその成分 U_x, U_y は、

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

$$U_x = C_1 G_x + C_2 V_x, U_y = C_1 G_y + C_2 V_y \dots (4)$$

より計算される。ここに、 C_1 および C_2 は海上風への変換係数であり、 C_1 は緯度により変化する値(佐藤・合田, 1972)、 $C_2 = 0.6$ とする。

3.2 波浪モデル

波浪推算には2種類のモデルを使用する。第1は山口ら(1987)の1点法に基づく浅海波浪推算モデル(1点浅海モデル)である。第1世代に属する1点浅海モデルは成分波間の独立性を仮定する経験的色彩の濃いモデルであるが、高地形解像度格子網の使用によって効率のかつ精度の高い浅海波浪の計算を可能にする。第2は第2世代に属する山口ら(1984)の格子点法に基づく深海波浪推算モデル(格子点深海モデル)である。格子点モデルは1点モデルに比べてはるかに長大な計算時間を要するので、低地形解像度格子網での深海波浪推算にならざるを得ない。

3.3 極値統計解析モデル

極値統計解析には、候補分布の母数推定を最小2乗法に基づく合田(1990)のモデルを変更に拡張したYamaguchi・Hatada(1997)の拡張型モデルを用いる。拡張型モデルはGumbel分布および形状母数 $k=0.5\sim 10.0$ の27個のWeibull分布の中から、最大相関係数規準に従って最適分布を抽出したのち、確率波高およびその分散を推定するものである。モデルの変更点は候補分布における形状母数の種類と範囲の拡大、および分散推定に対するjackknife法(Miller, 1974)の導入である。

4. 気圧、風速および波高の極値の推定

4.1 北西太平洋領域における確率気圧と確率風速

1000年間約35000個の低気圧に対する気圧・海上風シミュレーションを北西太平洋領域で実施する。シミュレーションでは、個々の低気圧属性が6時間間隔で得られるので、これから1時間ごとに線形補間した値を入力条件として、式(1)および式(4)より図-1の全格子点における気圧および海上風速を計算したのち、低気圧別最低気圧・最大風速資料、ついで低気圧時年最低気圧・最大風速資料を求め、拡張型モデルの適用によって、再現期間50~1000年に対する確率気圧・風速とそれらの標準偏差を推定する。

既往低気圧に対する確率気圧・風速はECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts)海面高度気圧・表面風解析値資料より抽出した低気圧期(1~5月, 11~12月)年最低・最大風速資料に対する極値統計解析に基づいて推定する。ECMWF資料は6時間

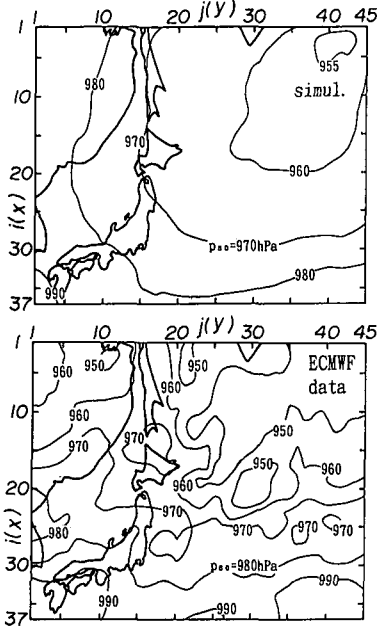


図-2 北西太平洋領域における50年確率気圧

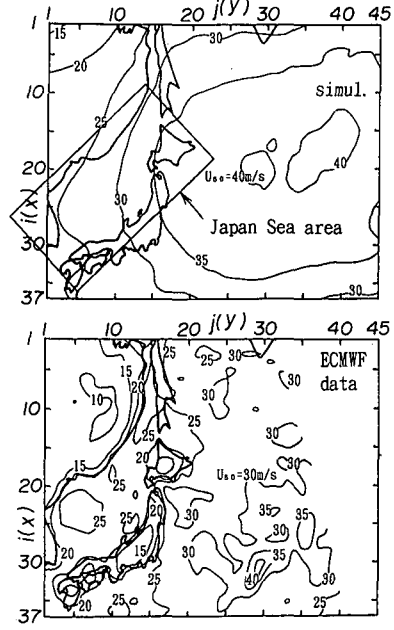


図-3 北西太平洋領域における50年確率風速

ごとに空間解像度 1.125° (1991年9月16日以前)あるいは 0.5625° (1991年9月17日以降) で与えられることから、これを80 km間隔格子網上に補間したのち抽出した低気圧期年最低気圧・最大風速とその前後の値に対する2次曲線のあてはめによって、極値統計解析に使用する年最低気圧・最大風速資料を求める。ECMWF気圧資料の期間は1979~1984年の6年間、ECMWF風資料の期間は1979~1996年の18年間であり、前者はかなり短い。

図-2はシミュレーション資料およびECMWF資料に基づく50年確率気圧 p_{50} (hPa)の平面分布を示す。50年確率気圧の標準偏差は、資料年数が多いシミュレーション資料では1 hPa以下である。一方、資料年数がわずか6年であるECMWF資料では、50年確率気圧が970 hPa以上の領域ではおおむね5 hPaより小さいが、960~950 hPa以下の領域では10 hPa以上に達し、推定値の信頼性が低い。シミュレーション資料によれば、50年確率気圧は、低気圧の経路と発達特性を反映して、南西領域の980 hPaから北東領域の955 hPaに向けて減少する。こうした傾向はECMWF資料に基づく結果とおおむね符合するが、北東領域では確率気圧がECMWF資料に基づく結果より5 hPa以上大きい。また、モデルの作成に際し、領域北西端付近を通過する低気圧をほとんど採用していないことから、北西領域におけるモデルの再現性は十分でない。

図-3はシミュレーション資料およびECMWF資料に基づく50年確率風速 U_{50} (m/s)の平面分布図であり、標準偏差は前者では0.5 m/s以下、後者では確率風速20

m/s域で1 m/s、20~30 m/s域で2 m/s、35 m/sを越える領域で4 m/s程度をとる。確率風速は東北地方・北海道東方海域の40 m/s域を中心に同心円状に減少し、日本海では東側の35 m/s域から西側の25 m/s域に向けて小さくなる。こうした空間変化パターンは、風速が5 m/s程度大きい点を除いて、ECMWF資料に基づく結果と定性的に一致する。しかし、ECMWF資料には地形の影響が強く現れていることから、大陸や日本本土での確率風速が海上部に比べて著しく小さくなる。また、周囲を陸地で囲まれた日本海における確率風速は沿岸で20 m/s、沖合で25 m/s程度をとる。一方、地形の影響を含まないシミュレーション資料では、日本海沖合に周辺沿岸部より高い風速が出現する特性は再現されない。

4.2 日本海における確率波高

1点浅海モデルおよび格子点深海モデルによる波浪シミュレーションを確率的低気圧モデルで発生した1000年間約35000個および500年間約18000個の低気圧に対してそれぞれ実施し、これから得られる低気圧時年最大波高資料の極値統計解析に基づいて、再現期間50~1000年に対する確率波高と標準偏差を推定する。後者による対象期間を500年とするのは計算時間があまりに長大すぎることを考慮したためである。

日本海の波浪推算領域は、陸地地形や海底地形を精度よく再現するため、図-3に範囲を示すように、X軸をN方向から反時計方向に 45° 回転した座標系で与える。そのため、格子間隔40 kmで分割した日本海の海上風は、図-1の北西太平洋領域におけるシミュレーションで得ら

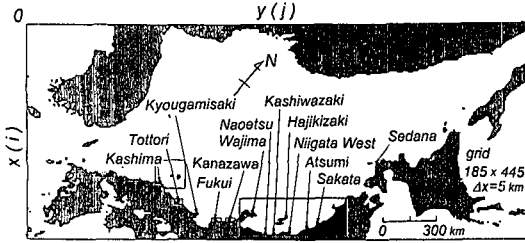


図-4 日本海大領域水深格子網

れる6時間ごとの低気圧属性に対する1時間間隔の線形補間値を用いて、北西太平洋領域の日本海格子点相当位置で計算し、これを45°反時計方向に回転することによって求める。1点浅海モデルでは、図-4に示すように、日本海全域を格子間隔 $\Delta x = 5 \text{ km}$ で分割した大領域に、 $\Delta x = 1 \text{ km}$ で分割した波浪推算点周辺小領域を組み込んだ2段階水深格子網を用いる。波浪推算点は山陰沿岸の鹿島から北海道沿岸の瀬棚に至る13波浪観測地点とする。また、格子点深海モデルでは、海上風計算用の格子間隔40 kmの日本海格子網(後出の図-6)をそのまま使用する。波浪の計算時間間隔はそれぞれ1時間および30分(1時間ごとの風を線形補間)である。

一方、山口ら(1994)は1962~1991年の30年間における143ケースの異常気象擾乱に対して、2種類のモデルを用いた日本海における波浪推算と確率波高の推定を行っているので、ここでは6台風を除く137ケースの波浪推算資料から低気圧時年最大波高資料を抽出し、拡張型モデルによって確率波高とその標準偏差を再度推定する。また、13波浪観測地点における観測開始年から1997年までの低気圧時年最大波高資料を用いて、確率波高と標準偏差を推定する。波高計設置水深は16~54 m、資料期間は14~28年である。

表-2はシミュレーション資料、推算資料および観測資料に基づく極値統計解析結果の一例を福井(水深21 m)について示したものであり、観測期間(26年)はかなり長い。シミュレーション資料による50年確率波高(H_{50})は8.2 mであり、推算資料による8.0 mおよび観測資料による8.2 mとほぼ符合する。また、資料年数の多いシミュレーション資料では当然適合度が高く、50年確率波高の標準偏差 H_{050} はかなり小さい。

図-5は日本海沿岸13地点での3種類の資料に基づく50年確率波高およびシミュレーション資料に基づく500年確率波高を示す。シミュレーション資料に基づく50年確率波高は推算資料や観測資料に基づく結果とおおむね対応するが、資料期間が短いため異常波浪記録を含まない観測資料(輪島、弾崎など)や、推算資料(瀬棚、温海)に基づく結果と比べて大きい値を与える地点

もある。50年確率波高の標準偏差は観測資料では直江津の0.14 mから鹿島の0.91 m、瀬棚の1.09 mと広範に分布し、突出した異常波高を含む地点ほど大きいのに対し、推算資料では0.25~0.49 m、シミュレーション資料では0.2 m以下である。

沿岸方向にみると、シミュレーション資料に基づく50年確率波高は山陰沿岸の鹿島から能登半島西側の金沢にかけて8 m前後、能登半島先端の輪島から北海道の瀬棚にかけて10 m前後の値となっており、北東部沿岸で大きい。佐渡島や能登半島の遮蔽効果を受ける直江津~新潟西の北陸沿岸では7 m前後と低い値をとる。観測資料や推算資料に基づく結果と比較すると、シミュレーション資料に基づく50年確率波高は西南部沿岸でやや小さく、北東部沿岸でやや大きい傾向にある。500年確率波高は50年確率波高より2~3 m増加し、外海に面した沿岸部のうち山陰沿岸から能登半島西側の北陸沿岸で10.5~11.5 m、能登半島から北海道沿岸で12.5 m程度、一方、佐渡島の影響を受ける北陸沿岸で8.5~9.5 mと推定される。

図-6は500年間のシミュレーション資料および30年間の推算資料に基づいて推定した日本海における50年確率波高の等値線図であり、前者の結果には500年確率波高も図示している。シミュレーション資料および推算資料に基づく50年確率波高の標準偏差の最大値はそれぞれ0.3 mおよび0.7 mである。両資料に基づく確率波高は西南部海域から北東部海域に向けて増加し、最大値は9 mを越えるという点で定性的に符合するが、シミュレーション資料に基づく確率波高は推算資料に基づ

表-2 波高の極値統計解析結果(福井)

	simul.	hind.	obs.
K years	1000	30	26
N	500	30	26
ρ	.9988	.9856	.9905
H_{50} m	8.23	8.00	8.16
H_{050} m	0.21	0.30	0.32

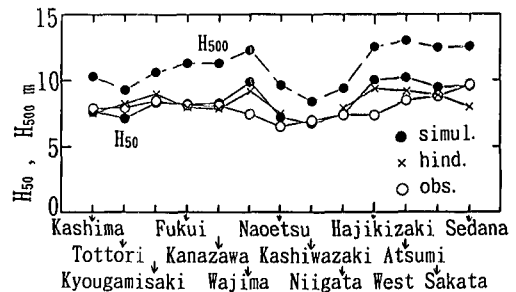


図-5 日本海沿岸における50年および500年確率波高

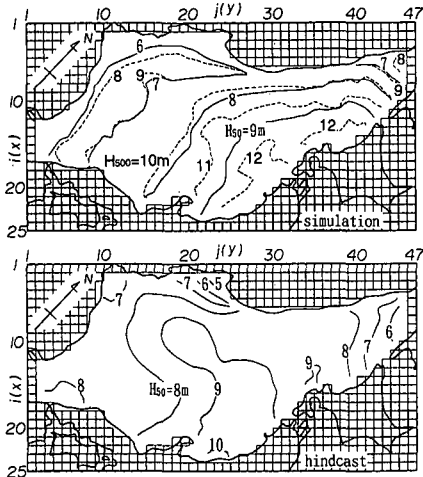


図-6 日本海における50年および500年確率波高

く結果に比べて西南部海域で1m程度小さいのに対し、北東部海域では1m程度大きく、しかも南北方向に長く伸びる等値線形状を示す。これは低気圧に対して楕円形分布を仮定するシミュレーション資料と現実の気圧分布を対象とする推算資料の相違に起因する。また、シミュレーション資料に基づく確率波高の等値線形状が推算資料に基づくものより滑らかであるのは、シミュレーション資料における資料数が圧倒的に多いためであり、推算資料と同程度数のシミュレーション資料によれば、推算資料に基づく結果と同様の屈曲をもつ等値線形状が得られる。

500年確率波高の空間分布は50年確率波高の空間分布と類似するが、確率波高は2~2.5m増加することから、12mを越える高波域が北陸沿岸~北海道沿岸で出現する。また、シミュレーション資料では、格子点深海モデルに基づく確率波高が山陰沿岸から能登半島沿岸にかけて、1点浅海モデルに基づく確率波高より低い値をとる傾向にある。

5. 結 語

長期間の低気圧シミュレーションに基づく本システムは、北西太平洋領域の50年確率気圧・風速や日本海の50年確率波高に関して、既往資料に基づく結果と同程度の値を与えることから、当該領域における100年以上の長期の再現期間に対する気圧・風速・波高の再現確率値の推定にも有効であると判断される。

最後に、本研究は文部省科学研究費基盤研究C(2)(代表者畑田佳男)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一波浪工学への序説一, 鹿島出版会, 333 p.
- 佐藤昭二・合田良實(1972): 海岸・港湾, わかり易い土木講座 17, 彰国社, pp. 104-106.
- 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.
- 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博(1987): 一地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 151-160.
- 山口正隆・畑田佳男・中村雄二(1994): 波浪追算に基づく日本海沿岸での波高の極値の推定, 自然災害科学 J. JSNDS, 13-2, pp. 173-191.
- 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.
- Hatada, Y. and M. Yamaguchi (1996): A stochastic typhoon model and its application to the estimation of extremes of storm surge and wave height, Proc. 25th ICCE, Vol. 2, pp. 1389-1402.
- Miller, R. G. (1974): The jackknife-a review, Biometrika, Vol. 61, No. 1, pp. 1-15.
- 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 Conf., Vol. 2, pp. 932-946.