

わが国沿岸海域任意地点における波浪の 51 年推算システム

山口正隆* ・畑田佳男** ・大福 学***
李 敏 杰**** ・野中浩一***** ・野間 敬*****

1. 緒 言

最近, アメリカ合衆国の National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) は, 1948~1998 年の 51 年間にわたる全地球規模の 6 時間間隔表面風解析値資料 (NCEP 風資料) を公表している。NCEP 風資料の空間解像度 (約 1.9°) は, 畑田ら (2000) が使用してきた European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) による 1979~1998 年 20 年間の 6 時間間隔 ECMWF 風資料の空間解像度 (1.125°あるいは 0.5625°) に比べてかなり低いけれども, 空間解像度が不変である 51 年間の NCEP 風資料は, 地球環境の変化を表す指標の 1 つとして近年注目されている風候や波候の長期変動を検討するうえできわめて有用であろう。

本研究では, わが国沿岸周辺海域を対象として 51 年間の NCEP 風資料を入力条件とする 1 点浅海モデルに基づく波浪の長期推算システムを開発するとともに, これを B 21004 (四国沖ブイ) における波浪推算に適用する。そして最近 10 年間あるいは 20 年間の風・波観測資料と NCEP 風・波資料あるいは ECMWF 風・波資料に基づく風候・波候の比較から, NCEP 風・波資料の精度や特性を検討したのち, 51 年間の NCEP 風・波資料に基づいて風候・波候の傾向変動や風速・波高の極値を考察する。

2. 波浪の長期推算システムと資料解析の方法

2.1 NCEP/NCAR 表面風解析値資料

本研究で使用する NCEP 風資料は, 1948 年 1 月 1 日 0 時~1998 年 12 月 31 日 18 時の 51 年間に於いて世界標準時 (UTC) 0 時, 6 時, 12 時, 18 時, の 1 日 4 回得られている NCEP/NCAR Global Reanalysis Archive ds090.0 の 10 m 高度表面風解析値資料から採録した。解析値資料は全球を 192×94 で分割したガウス座標格子網

上で与えられる。空間解像度は東西方向 1.875°, 南北方向約 1.9°であるが, 南北方向の格子間隔は不等間隔になっている。

波浪推算のために, まず NCEP/NCAR Global Reanalysis Archive ds090.0 から日本付近に相当する北緯 8.5713~58.094° (第 17~43 格子), 東経 116.25~163.125° (第 63~88 格子) の範囲の緯度・経度座標格子点値を抽出する。ついで, 北西太平洋領域に設けた格子間隔 80 km の直交格子網 (45×45) 上格子点の緯度・経度座標を, 直交座標と緯度・経度座標の変換数値表を用いて補間したのち, 各格子点位置での風速成分を緯度・経度座標表示の NCEP 風速成分に対する 2 次元 1 次補間式の適用によって推定する。ECMWF 風資料についても, 格子間隔 80 km で 60×56 に分割した北西太平洋領域で同じ方法によって 1979~1998 年の 20 年にわたり作成したもの (畑田ら, 2000) を使用する。

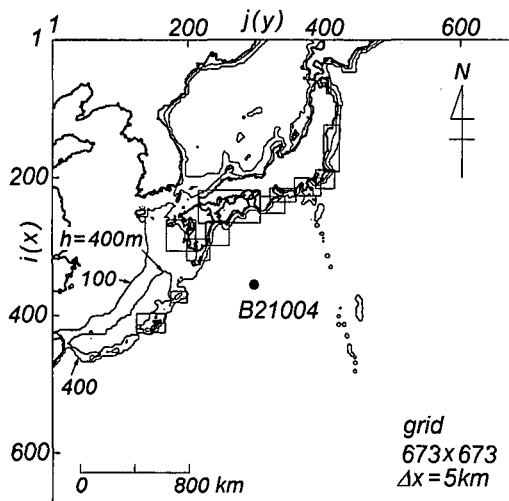
2.2 波浪推算モデルと計算条件

1 点浅海モデル (山口ら, 1987) は計算対象地点に到達する各成分波の波向線上におけるエネルギーの発達・減衰および伝播計算から, 1 地点における方向スペクトルの経時変化を計算する方法である。NCEP 風資料は, 空間解像度の不足のため, 高風速時ほど現実の風速より小さい風速を与えるが, 今回の検討では風速の補正を行わず, 風波の発達式中の係数を変更して, 高風速時ほど波の発達率を増加させることにより, 波浪観測資料との対応を得る手法を便宜的に採用する。

計算対象領域は北緯 20~43°, 東経 120~152° (南北 3360 km, 東西 3360 km) の北西太平洋, 東シナ海および日本海からなる海域である。波浪推算では, 図-1 に示すように, 北西太平洋領域を格子間隔 $\Delta x = 5$ km で 673×673 に分割した大領域水深格子網に波浪推算点周辺沿岸海域を格子間隔 1 km で分割した小領域水深格子網 (図中の小枠) を組み込んだ 2 段階水深格子網を使用することを原則とする。波浪推算の計算時間間隔は 1 時間, 期間は 51 年, 対象地点は太平洋上に位置する B 21004 であり, ここでは格子間隔 5 km の大領域水深格子網を使用する。

計算に用いる周波数データの個数は, $f = 0.04 \sim 0.50$

・ 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
・ 正 会 員	工 修	愛媛大学技官	工学部環境建設工学科
・ 正 会 員	工 修	愛媛大学外国人客員研究員	工学部環境建設工学科
・ 正 会 員	工 修	愛媛大学大学院	理工学研究科
・ 正 会 員	工 修	愛媛大学大学院	理工学研究科



図一 北西太平洋領域および波浪推算地点

Hz 間を不等分割した 23 個、方向データの個数は 0°~360°を等分割した 37 個である。方向は 0°を N として反時計回りに定義する。NCEP 風資料および ECMWF 風資料を入力条件として得た波浪推算資料をそれぞれ NCEP 波資料および ECMWF 波資料と呼ぶ。

2.3 波浪資料の解析法

(1) 波候解析法

波候解析は各 1 年間についての月 (月別)・季節 (季節別)・年 (年別) 単位、および対象全期間についての月 (累月)・季節 (累季節)・年 (累年) 単位で実施する。波候統計量は、前者の期間 (月別・季節別・年別) では波高・周期・波向の平均値と標準偏差や波高 2 m 以上の高波出現率であり、後者の期間 (累月・累季節・累年) では波高・周期・波向の階級別出現率、波高と周期および波高と波向の相関出現率、全波高および高波の波向別出現率を加える。また、誤差統計量として、波高・周期・波向の推算資料と観測資料の特別値および月別・季節別値に対する相関係数、推算資料と観測資料の相関図において原点を通る直線の勾配値のほか、特別値資料では 2 乗平均誤差を計算する。

(2) 傾向変動解析法

波候統計量の長期変動を調べるため、年別・季節別・月別の平均波高や高波出現率資料などに対する 1 次式のあてはめと勾配値 a が 0 という仮説の検定およびトレンド示数 (鈴木, 1957) よりなる傾向変動解析を行う。本研究では有意水準 α (両側検定の場合 10% と 5%, 片側検定の場合 5% と 2.5%) で仮説 $a=0$ が成立する場合にパラメータ $L=1$, 成立しない場合に $L=0$ とする。すなわち, $L=0$ のときには信頼度 $1-\alpha$ で時系列は傾きをもつと判定される。また、データ数が 20 より大きい場合に、

トレンド示数 $I_T > 1$ なら時系列は増加傾向, $I_T < -1$ なら減少傾向と判定する。 $|I_T| > 1$ という判別条件が両側検定では有意水準 10% あるいは 5% (片側検定では 5% および 2.5%) とする t 分布の理論に基づく棄却検定結果と整合性をもつ保証はないが, $|I_T| > 2$ とすれば, 両者の方法による判定結果はほぼ合致する。

(3) 波高の極値解析法

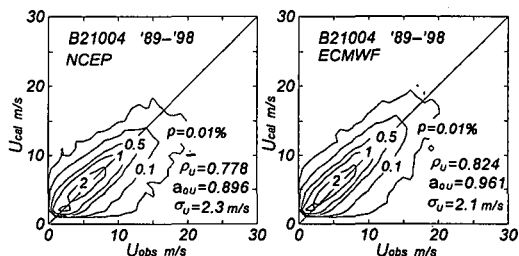
極値統計解析では、波高時系列資料から基準波高 2 m, 生起時間間隔 72 時間以上の極大波高資料の抽出と年最大波高資料の作成を行ったのち、最小 2 乗法に基づく拡張型極値統計解析モデル (合田, 1990; Yamaguchi ら, 1996) を適用して、確率波高とその標準偏差を推定する。拡張型モデルでは、Gumbel 分布と形状母数 $k=0.5 \sim 10.0$ の 27 種類の Weibull 分布よりなる候補分布の中から相関係数基準により最適分布を選択し、各再現期間に対する確率波高を算出するとともに、確率波高の標準偏差を jackknife 法により推定する。

なお、風資料に対する風候・傾向変動・極値の解析も同様の方法による。

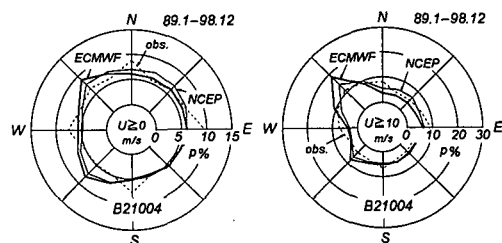
3. 推算精度の検討

3.1 観測資料との比較

図一は測得率が比較的高い 1989~1998 年の 10 年間における 3 時間ごとの特別観測風速資料と NCEP 風速資料あるいは ECMWF 風速資料の相関を相対出現頻度の等値線分布として示したものである。ECMWF 風速資料の場合の等値線が NCEP 風速資料の場合の等値線より



図二 解析値資料と観測資料に基づく特別風速の比較



図三 全風速資料および強風資料の方向別出現率の比較

り45°勾配直線の近傍において高風速側まで伸びている。これを数値でみると、NCEP 風速資料と観測風速資料では相関係数 ρ_U 、原点を通る直線の勾配値 a_{0U} 、2乗平均風速誤差 σ_U はそれぞれ(0.778, 0.896, 2.3 m/s), ECMWF 風速資料と観測風速資料では(0.824, 0.961, 2.1 m/s)である。すなわち、ECMWF 風速資料の精度がNCEP 風速資料より高いし、NCEP 風速資料は高風速時ほど観測風速資料より低い値を与える傾向が明瞭にみられる。

図-3は22.5°ごとに整理した全風速資料および強風(10 m/s以上)資料の方向別出現率の比較図である。全風速資料でみれば、風は全方向からほぼ同じ割合で吹送し、特定の方向に集中しない。全風速資料における方向分布の特徴は、NCEP 風、ECMWF 風および観測風の各資料において共通してみられる。一方、強風資料はNW方向に集中した方向分布を示す。NW方向への集中度はECMWF 風資料、NCEP 風資料、観測風資料の順に低下することから、NCEP 風向資料はECMWF 風向資料よりむしろ観測風向資料と符合する。つまり、ECMWF 風向資料はNW方向で強風の過大な出現を与える。

図-4は1989~1998年の10年間における3時間ごとの観測波高資料とNCEP波高資料あるいはECMWF波高資料の相対出現頻度の等値線分布を示す。NCEP波高は高波高時ほど観測波高より低い。ECMWF波高資料も同様の傾向を示すけれども、NCEP波高資料に比べて高波高時で観測波高に近い値を与える。NCEP波高資料およびECMWF波高資料に対する相関係数 ρ_H 、勾配値 a_{0H} 、2乗平均波高誤差 σ_H はそれぞれ(0.806, 0.926, 0.65

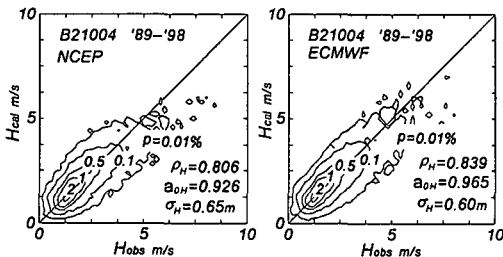


図-4 推算資料と観測資料に基づく時別波高の比較

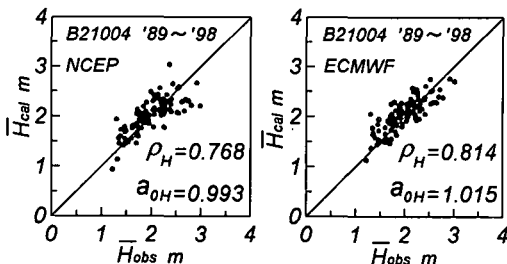


図-5 推算資料と観測資料に基づく月別平均波高の比較

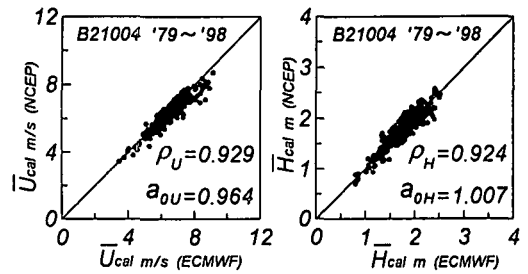


図-6 2種類の資料に基づく月別平均風速・波高の相関

m)および(0.839, 0.965, 0.60 m)であるから、ECMWF波高資料がNCEP波高資料より観測波高資料とよく符合することがわかる。

図-5は月別平均波高に対する観測資料とNCEP波高資料あるいはECMWF波高資料の比較を表わす。NCEP波高資料の場合、低波高時に観測結果より大きく、高波高時に小さい値を与え、相関図における資料値のばらつきもやや大きい。ECMWF波高資料も同様の特性を示すが、相対的に観測波高資料とよく符合する。この場合の相関係数 ρ_H および原点を通る相関直線の勾配値 a_{0H} は、NCEP波高資料では(0.768, 0.993)、ECMWF波高資料では(0.814, 1.015)であるから、図からも明らかなようにECMWF波高資料の精度がNCEP波高資料に比べてやや高いが、NCEP波高資料の精度も低くはない。

3.2 風速解析値資料および波高推算資料の比較

図-6は1979~1998年の20年間におけるNCEP風速資料とECMWF風速資料の月別平均値に対する相関図ならびに波高に対する同様の図を表わす。NCEP風速資料の月別平均値は、その絶対値が大きいかほどECMWF風速資料の平均値より小さい。この場合の相関係数 ρ_U と勾配値 a_{0U} は(0.929, 0.964)である。一方、波高相関図によれば、資料のばらつきはやや大きい、両者は平均的に符合し、相関係数 ρ_H および勾配値 a_{0H} は(0.924, 1.007)をとる。NCEP風速資料がECMWF風速資料より平均的に、また高風速時ほど小さいにもかかわらず、NCEP波高資料が平均的にECMWF波高資料と同程度の値をとるのは、波浪推算モデルにおける波の発達率を増加させたためである。

4. 風速および波高の傾向変動解析と極値推定

4.1 風速および波高の傾向変動

図-7は51年間のNCEP風・波資料から得た風速・波高の月別および季節別の平均値や強風・高波出現率からそれぞれの累年平均値を引いた残差時系列に対するスペクトル解析の例を月別平均風速と波高について示す。スペクトル解析はBlackman-Tukeyの方法によって行い、サンプリング間隔 $\Delta t = 1$ ヶ月、データ数 $N = 612$ 、ラグ

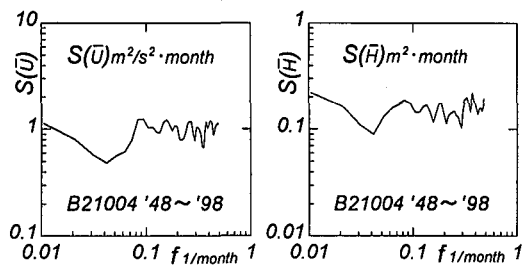


図-7 月別平均風速・波高残差時系列のスペクトル

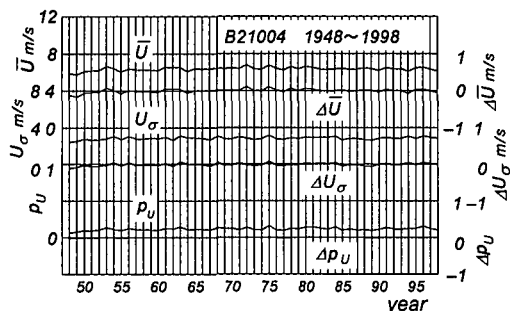


図-8 年別風候統計量の経年変化

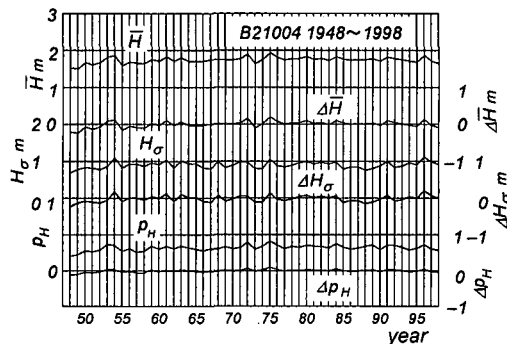


図-9 年別波候統計量の経年変化

$m=48$ の条件を用いた。月別平均風速・波高の残差時系列のスペクトルは、卓越した周期をとらず、白色雑音に近い性質をもつ。これは他の風候・波候統計量についても同様である。すなわち、風速・波高の月別・季節別の平均値や強風・高波出現率に関する時系列は1年を周期とする季節変化以外に卓越する成分をもたない。

図-8はNCEP風速資料に基づく年別風候統計量(風速の平均値 $\bar{U}$ 、標準偏差 U_σ 、10 m/s以上の強風出現率 p_U)とそれらの累年平均値からの変動量($\Delta\bar{U}$, ΔU_σ , Δp_U)に対する経年変化を、図-9はNCEP波高資料に基づく同様の結果($\bar{H}$, H_σ , p_H , $\Delta\bar{H}$, ΔH_σ , Δp_H)を表わす。いずれの風候統計量も1948~1957年の10年間で増加傾向をもち、その後ほぼ一定値のまわりを変動する傾向を示す。

同様の特徴は波候統計量にも現れるが、変動がより大きい。そこで、傾向変動解析では、資料期間を1948~1998年の51年間と1958~1998年の41年間の2種類に分けた資料を用いる。

表-1は51年間と41年間における年別の平均風速と強風出現率ならびに平均波高と高波出現率の各時系列資料にあてはめた1次直線の勾配値 a 、有意水準10% (両側検定)での勾配値の変動幅 Δa_{10} 、勾配値 a に対する有意水準10%および5% (両側検定、片側検定では5%および2.5%)での棄却検定指標 L_{10} , L_5 、トレンド示数 I_T の一覧を示す。51年間資料の場合、有意水準5% (片側検定)で年別風候・波候統計量は増加傾向にあると判定され、トレンド示数も1より大きい値をとることから、増加傾向を裏付ける。ただし、年平均風速は有意水準2.5% (片側検定)では増加傾向にあるといえず、トレンド示数の値も他の諸量に対するものより小さい。一方、41年間資料の場合、年別風候・波候統計量は両有意水準に対する棄却検定でも $L=1$ をとり、トレンド示数についても $|I_T| < 1$ であるから、統計的に有意な増加・減少傾向をもつと判定されない。

以上のように、51年間のNCEP風速・波高資料の年別統計量は1957年以前の10年間ににおける顕著な増加によって統計的に有意な増加傾向(たとえば、年平均風速・波高の増加率はそれぞれ0.32 cm/s/year, 0.21 cm/year)を示すが、41年間の年別統計量は統計的に有意な傾向変動(年平均風速・波高の増加率はそれぞれ-0.13 cm/s/year, 0.02 cm/year)を与えないことから、対象期間あるいは資料年数によって傾向変動に対する統計的な判定結果が異なる。これは、1957年以前の10年間ににおけるNCEP風資料の質に問題があることに起因するのか、自然界で生じた現象、いわゆる「気候ジャンプ」を反映するのか現段階では明らかでないが、おそらく、原因は資料の質にあると推測される。したがって、B21004(四国沖)では、少なくとも1958~1998年の41年間における風候・波候統計量には、統計的に有意な傾向変動は見出されないと結論される。

4.2 風速および波高の極値

表-2は51年間および41年間のNCEP風速・波高資料から抽出した年最大値資料(AM)と資料年数 K の2倍相当分の極大値資料(POT)に対する極値統計解析結果の一覧である。表中の N はデータ数、 N_T はデータ総数、 k はWeibull分布の形状母数(G はGumbel分布)、 ρ は最適分布による計算値と資料値の相関係数であり、風速および波高の再現確率統計量とその標準偏差は再現期間50年に対して与えられる。風速の場合、51年間資料、41年間資料のいずれについても相関係数は大きく、51年間資料(AM)に基づく50年確率風速 U_{50} とその標準偏差

表-1 年別風候・波候統計量の傾向変動解析結果の一覧

Wind and Wave Statistics	51 years (1948~1998)					41 years (1958~1998)				
	$\bar{a}$ (/year)	Δa_{10} (/year)	L_{10}	L_s	I_r	$\bar{a}$ (/year)	Δa_{10} (/year)	L_{10}	L_s	I_r
$\bar{U}$ cm/s	0.32	0.30	0	1	1.34	-0.13	0.35	1	1	-0.45
p_v %	0.05	0.03	0	0	2.30	0.01	0.04	1	1	0.56
$\bar{H}$ cm	0.21	0.13	0	0	2.23	0.02	0.14	1	1	0.20
p_H %	0.10	0.06	0	0	2.38	0.02	0.07	1	1	0.56

表-2 風速・波高の極値統計解析結果の一覧

U	K	N_T	k	ρ	U_{50} m/s	σ_{U50} m/s
AM	51	51	G	.9959	24.8	1.0
POT	51	1922	0.90	.9946	24.7	1.1
AM	41	41	G	.9979	24.3	1.1
POT	41	1566	1.0	.9980	24.4	1.1
H	K	N_T	k	ρ	H_{50} m	σ_{H50} m
AM	51	51	1.3	.9925	11.11	0.74
POT	51	2215	0.70	.9927	11.13	0.75
AM	41	41	G	.9912	10.75	0.67
POT	41	1795	0.90	.9927	10.79	0.70

K : years POT: $N=2K$

5. 結 語

本研究では、51 年間(1948~1998 年)の NCEP/NCAR 表面風解析値資料を入力条件とする 1 点浅海モデルに基づく波浪の長期推算システムを構築するとともに、B 21004(四国沖ブイ)における 51 年間の波浪推算に適用し、主として NCEP 風・波資料の精度や特性および風速・波高の傾向変動や極値を検討した。その結果、とくに 51 年間資料の年別風候・波候統計量は統計的に有意な増加傾向をもつものに対して、1958 年以降の 41 年間資料は統計的に有意な傾向変動を与えないことが明らかになった。今後、北西太平洋全域に分布する多数の地点で同様の検討を行い、風速・波高の傾向変動を究明する予定である。

最後に、表面風解析値資料を提供して戴いた NCEP/NCAR および ECMWF、ならびにブイロボット観測資料を提供して戴いた気象庁海洋課に謝意を表します。

参 考 文 献

- 合田良賢(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.
- 鈴木栄一 (1957): 気象統計学 (第 5 版), 地人書館, 314 p.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・李 敏杰・野中浩一 (2000): 波浪の長期推算に基づく波候と波高極値の推定システム, 自然災害科学 J. JSNDS, 19-1, pp. 69-85.
- 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・大福 学・野中浩一 (2000): ブイ観測資料を用いたわが国周辺海域での気圧・風速・波高の極値の推定, 自然災害科学 J. JSNDS, 19-1, pp. 87-98.
- 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.

σ_{U50} は 24.8 ± 1.0 m/s, 41 年間資料(AM)では 24.3 ± 1.1 m/s と評価されている。波高の場合にも、両者の期間の資料に対する最適分布の適合度は比較的高い。51 年間資料(AM)に基づく 50 年確率波高 H_{50} とその標準偏差 σ_{H50} は 11.11 ± 0.74 m, 41 年間資料では 10.75 ± 0.67 m である。風速・波高資料のいずれの場合にも、再現確率統計量の推定値に及ぼす極値資料の種類や資料年数の影響は小さい。

一方、B 21004 における 1979~1998 年の観測資料から抽出した極大風速資料および極大波高資料に対する極値統計解析結果(山口ら, 2000)によれば、50 年確率風速とその標準偏差は 36.7 ± 1.9 m/s, 50 年確率波高とその標準偏差は 15.8 ± 0.8 m である。したがって、NCEP 風速・波高資料に基づいて推定した 50 年確率風速や 50 年確率波高は観測資料から推定した結果よりはるかに小さい。これは明らかに NCEP 風資料における時空間解像度の不足に起因するものである。