

わが国沿岸における波浪の長期推算資料の相互比較

畑田 佳男*・山口 正隆**・大 福 学***・野中 浩一****

波浪の長期推算に利用できる代表的な表面風(再)解析値資料である ECMWF あるいは NCEP/NCAR (NCEP) による風資料を入力条件として波浪推算を行った場合, 用いる風資料によってわが国沿岸での波浪の長期推算資料の精度がどう変わるかを調べた。このため, 各風資料を入力条件とする 1 点浅海モデルを用いた日本沿岸の 45 波浪観測地点における 20 年間 (1979~1998 年) の推算波浪資料を波候と波高の傾向変動の観点から観測資料と比較した。そして, 波候に対しては空間解像度で優る ECMWF 風資料を使用する波資料の精度が, 波高の傾向変動に対しては等質性で優る NCEP 風資料を使用する波資料の精度がより高いことを明らかにした。

1. はじめに

10 年以上の長期にわたる波浪資料は従来の波浪観測に加えて, 気象資料の整備や波浪推算手法の進歩および計算機の性能の向上に伴い, 波浪推算によっても作成可能になっている。とくに最近では, 欧米の気象研究機関による比較的高い精度をもつ気象要素解析値・再解析値資料の公表に伴い, 波浪推算の入力条件として表面風解析値・再解析値資料が用いられつつある。わが国沿岸の波浪に関して, 畑田ら (2001, 2002) は日本海領域および北西太平洋領域にそれぞれ設けた直交格子網において, ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) より提供を受けた 1979~1998 年の 20 年間にわたる 6 時間間隔の 10 m 高度表面風解析値・再解析値資料 (ECMWF 風資料), および NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) より提供を受けた 1948~1998 年の 51 年間にわたる 6 時間間隔の 10 m 高度表面風再解析値資料 (NCEP 風資料) の各データセットを作成するとともに, これと 1 点浅海モデル (山口ら, 1987) を組み合わせた浅海波浪の長期推算システムを構築した。そして, わが国沿岸のほぼ全域を網羅するように配置された 45 箇所の沿岸波浪観測地点を対象とした波浪の長期推算と波候解析および波高の傾向変動解析などを行い, 観測資料との比較に基づいて, 各システムの精度がかなり高いことを明らかにした。しかし, ECMWF 風資料あるいは NCEP 風資料を入力条件とする浅海波浪の長期推算システム相互の比較は行っていない。

そこで, 本研究では風資料の期間が重複する 1979~1998 年の 20 年間について, 両システムに基づくわが国沿岸 45 箇所における推算波浪資料 (それぞれ ECMWF 波資料および NCEP 波資料と云う) と観測資料を比較す

ることにより, 個々のシステムの精度と相互の特性を検討する。

2. 波浪の長期推算システムの概要

(1) 表面風解析値・再解析値資料のデータセット

ECMWF 風資料は世界標準時 (UTC) 0 時, 6 時, 12 時, 18 時の 1 日 4 回 6 時間ごとに全球規模で得られている。その空間解像度は, ① 1.125° ; 1979 年 1 月 1 日 0 時~1991 年 9 月 16 日 18 時, ② 0.5625° ; 1991 年 9 月 17 日 0 時~1998 年 12 月 31 日 18 時, となっており, 上記の期間ごとに異なる。

NCEP 風資料は世界標準時 (UTC) 0 時, 6 時, 12 時, 18 時の 1 日 4 回 6 時間ごとに全球規模で得られている NCEP/NCAR Global Reanalysis Archive ds 090.0 の 10 m 高度表面風再解析値資料から採録した。再解析値資料は全球を 192×94 に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° であり, 南北方向に不等間隔となっている。NCEP 風資料の特徴は, その空間解像度が ECMWF 風資料に比べて低い反面, 資料の等質性をほぼ有している点にある。

波浪推算用の各風資料は, 日本海領域では NW-SE 方向を X 軸とする格子間隔 40 km の直交格子網, 北西太平洋領域では N-S 方向を X 軸とする格子間隔 80 km の直交格子網で, 球面座標表示の原風速成分資料に対する 2 次元 4 点補間式の適用によって作成する。

日本周辺に配置されていた 4 基の気象庁海洋観測ブイ (仙台沖 B 21001, 日本海中央部 B 21002, 四国沖 B 21004, 東シナ海 B 22001) における観測風資料と ECMWF 風資料および NCEP 風資料との比較結果によれば, 両風資料は, 風向に対して観測資料とよく符合し, 風速に対しても比較的高い精度 (ECMWF 風資料で相関係数は $0.730 \sim 0.825$, NCEP 風資料で $0.680 \sim 0.778$) をもつけれども, 全般的に ECMWF 風資料の精度が NCEP 風資料より高いことや両資料は高風速時ほど観測資料より低い値を与え, とくに, 空間解像度が低い NCEP 風資料でその傾向が著しいことが示されている

* 正会員 博(工) 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

** 正会員 工 博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

*** 愛媛大学技官 工学部環境建設工学科

**** 正会員 博(工) 愛媛大学科学研究支援者 工学部環境建設工学科

(山口ら, 2000)。

(2) 波浪推算条件

波浪推算は、格子間隔 5 km の日本海領域 (図-1) あるいは北西太平洋領域 (図-2) に、格子間隔 1 km または 0.5 km の波浪推算地点周辺小領域を組み込んだ高地形解像度 2 段階格子網で、わが国沿岸 45 箇所の波浪観測地点ごとに 1 点浅海モデル (山口ら, 1987) を用いて時間間隔 1 時間で行う。

周囲を陸地で囲まれた日本海の沿岸域における波浪推算では、両風速資料の過小評価傾向を補正するため、陸地の影響をとくに強く受ける玄界灘・対馬海峡領域および能登半島から男鹿半島に至る北陸沿岸領域において、それぞれ 1.05~1.35 および 1.20~2.00 の定数を乗じることで風速を増強する。これらの係数は、玄界灘・対馬海峡領域では南西に向かうほど、北陸沿岸領域では南東に向かうほど大きい。また、NCEP 風資料を入力条件とする波浪推算では、20 年間の ECMWF 風速資料と NCEP 風速資料の平均値の比を 6 時間間隔の NCEP 風速に乗ずるとともに、12.5 m/s を越える補正 NCEP 風速の超過風速分に係数 0.03 を乗じて強風時風速の補強を行う。

北西太平洋領域における波浪推算でも、NCEP 風資料を入力条件とする際に、20 年間の平均風速比を 6 時間間隔の NCEP 風速に乗じて風速の補正を行うが、12.5 m/s 以上の風速に対する増強は、波浪推算精度の向上をもたらさなかったため、加えていない。図-1 および図-2 はそれぞれの小領域格子網の範囲および波浪推算 (観測) 地点とその水深を含む。

(3) 波浪資料の解析法

波候解析は、累年単位および各年・月単位で実施する。取りあげる波候統計量は、平均波高 $\bar{H}_s$ と標準偏差 H_{sd} 、波高 2 m 以上の高波出現率 p_H のほか、高波高部の特性を検討するために使用する、波高資料の上位 1/3 および 1/10 の平均値 (1/3 最大波高 H_{s3} 、1/10 最大波高 H_{s10}) と

する。誤差統計量は、推算・観測波高資料間の相関係数 ρ_H 、両資料の相関図において原点を通る直線の勾配値 a_{oH} および両資料間の差の 2 乗平均平方根値 σ_H 、である。

波高統計量の傾向変動の解析結果の表示は、各種年別波高資料にあてはめた 1 次回帰式 $H=at+b$ (t : 年数) の勾配値 a に対する t 分布に基づく片側検定結果を表す指標 L およびトレンド示数 I_T (鈴木, 1975) による。有意水準は 5% とする。評価基準は、たとえば 1/3 最大波高 H_{s3} について、統計的に有意な増加傾向がある場合 $L(H_{s3})=1$ 、 $I_T(H_{s3})>1.65$ 、減少傾向がある場合 $L(H_{s3})=-1$ 、 $I_T(H_{s3})<-1.65$ 、ない場合 $L(H_{s3})=0$ 、 $|I_T(H_{s3})|<1.65$ である。

3. 波浪の長期推算資料に対する精度の検討

(1) 波 候

図-3 は日本海沿岸 19 箇所および太平洋岸・東シナ海沿岸 26 箇所の波浪観測地点における波高の累年波候統計量および累年誤差統計量をそれぞれ示す。まず、日本

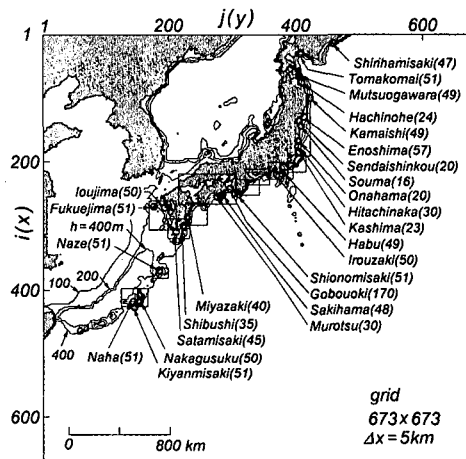


図-2 北西太平洋領域および波浪推算地点

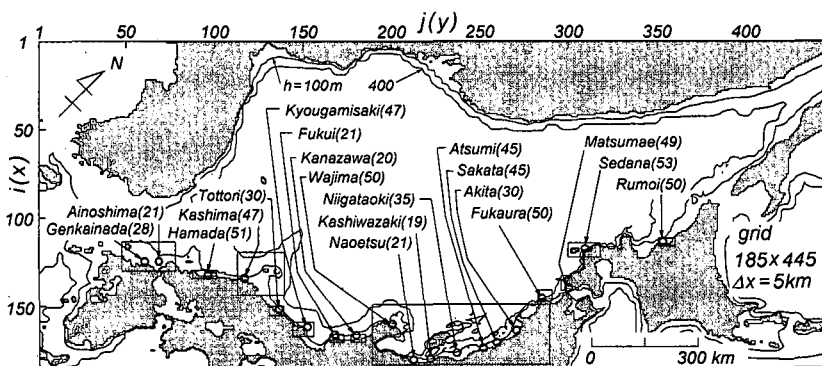


図-1 日本海領域および波浪推算地点

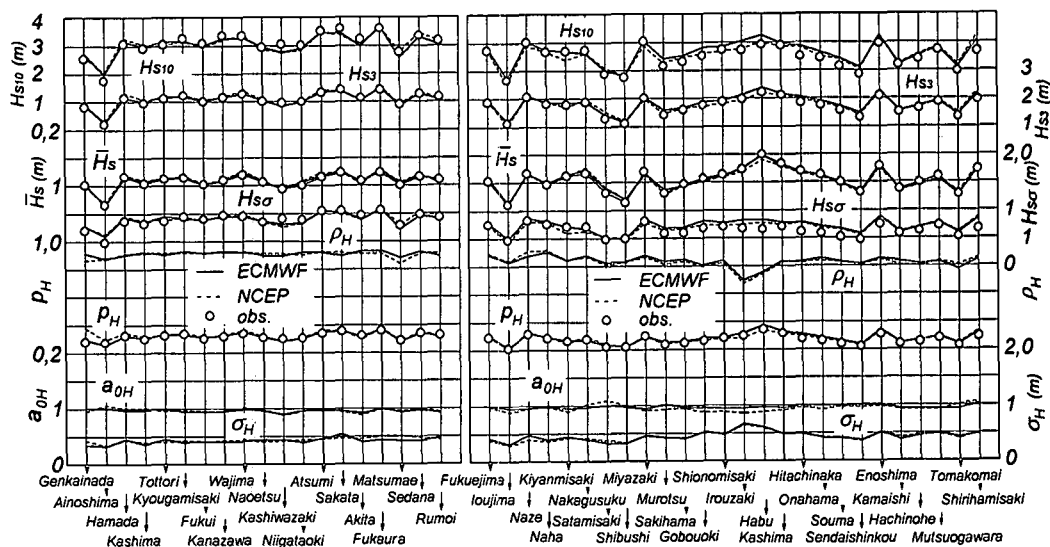


図-3 日本沿岸における累年波高統計量および累年波高誤差統計量

海沿岸では、波高統計量のうち H_{s3} , $\bar{H}_s$ については、いずれの推算資料も観測資料と全体的にかなりよく符合する。しかし、 H_{s10} については、ECMWF 波資料は鳥取以西、NCEP 波資料は鹿児島以西の地点で観測資料よりやや大きく、他の地点では観測資料よりやや小さい。 $H_{s\sigma}$ については、藍島、柏崎以外の地点で両資料とも観測資料とかなりよく符合する。 ρ_H については、ECMWF 波資料は全般的に観測資料とかなりよく一致するのに対して、NCEP 波資料は鹿児島以西でやや大きい。

波高誤差統計量のうち、 ρ_H は地点に伴う変動が少なく、おおむね 0.85 以上の値をとるが、NCEP 波資料の場合松前で若干低い。 σ_H は ρ_H が大きいときに小さい値をとる傾向にあり、全体的に ECMWF 波資料の方が小さい。このことから、ECMWF 波資料の精度は NCEP 波資料よりやや高いと云える。また、いずれの推算資料についても a_{0H} は 1 より若干小さい地点が多い。すなわち、個々の時点の波高は平均的には若干低めに評価されている可能性がある。

太平洋岸・東シナ海沿岸をみると、 $\bar{H}_s$, ρ_H については、いずれの推算資料も観測資料と全体的によく符合する。しかし、 H_{s3} , H_{s10} については推算資料と観測資料は類似するが、推算資料の方が全体的に観測資料よりやや大きい。 $H_{s\sigma}$ も同様に多くの地点で推算資料の方が大きい。波高誤差統計量をみれば、いずれの推算資料による ρ_H も石廊崎および波浮を除いて、地点間の差異は少なく、0.8 程度の値をとる。 σ_H についても両資料はほぼ同じ値を与えている。このほか、 a_{0H} はいずれの推算資料においても 1 のまわりを変動するが、ECMWF 波資料の変動幅が NCEP 波資料より小さい。

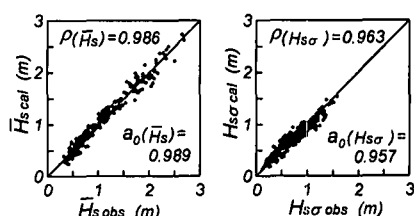
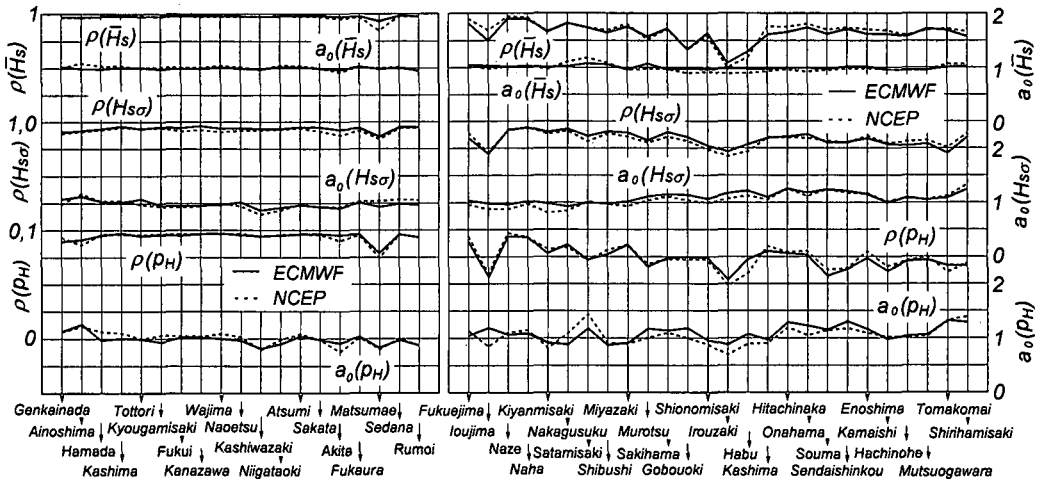


図-4 月別波高統計量の比較の 1 例 (金沢)

図-4 は ECMWF 波資料と観測資料に基づく月別波高統計量 ($\bar{H}_s$, $H_{s\sigma}$) 間の相関図を金沢を例に示す。累年月別波高誤差統計量として、推算資料と観測資料に基づく月別波高統計量 ($\bar{H}_s$, $H_{s\sigma}$, ρ_H) に対する相関係数 ($\rho(\bar{H}_s)$, $\rho(H_{s\sigma})$, $\rho(\rho_H)$) および相関図において原点を通る回帰直線の勾配値 ($a_0(\bar{H}_s)$, $a_0(H_{s\sigma})$, $a_0(\rho_H)$), を求める。

図-5 は日本海沿岸および太平洋岸・東シナ海沿岸の波浪観測地点における月別波高統計量に対する相関係数と勾配値をそれぞれ沿岸方向に図示したものである。日本海沿岸では、ECMWF 波資料の場合、 $\bar{H}_s$ に対して $\rho(\bar{H}_s)$ は松前を除いて 0.95 以上、 $a_0(\bar{H}_s)$ はほぼ 1.0、 $H_{s\sigma}$ に対して $\rho(H_{s\sigma})$ はほぼ 0.9、 $a_0(H_{s\sigma})$ は 0.9~1.1 であるから、ECMWF 波資料と観測資料の一致度はかなり高い。ただし、 $a_0(H_{s\sigma})$ は玄界灘、藍島で 1.0 よりやや大きく、柏崎以東で 1.0 よりやや小さい傾向にある。 ρ_H に対しても、 $\rho(\rho_H)$ は松前を除いてほぼ 0.9 以上、 $a_0(\rho_H)$ も藍島を除いて 0.8~1.2 の範囲にあり、しかも多くの地点で比較的 1.0 に近いことから、平均的にはその精度は高い。

NCEP 波資料の場合、 $\rho(\bar{H}_s)$ は松前を除いて 0.95 以



図—5 日本沿岸における累年月別波高誤差統計量

上, $a_0(\bar{H}_s)$ はほぼ 1.0, $\rho(H_{ss})$ はほぼ 0.9, $a_0(H_{ss})$ は玄界灘, 柏崎, 秋田を除いて 0.9~1.1 であるから, ECMWF 波資料ほどではないにしても観測資料との一致度はかなり高い。 $\rho(p_H)$ は松前と藍島を除き 0.9 以上, $a_0(p_H)$ も藍島を除いてほぼ 0.8~1.2 の範囲にあり, 精度は比較的良好。

一方, 太平洋岸・東シナ海沿岸では, ECMWF 波資料の場合, $\rho(\bar{H}_s)$ は石廊崎および波浮を除き, 太平洋岸西南部から中央部に向けて, 0.9 から 0.8 に減少し, 東北部に向けて再び漸増する。 $a_0(\bar{H}_s)$ は 1 より若干大きい値から 1 前後の値に変化する。つまり, $\bar{H}_s$ に関して, 中城から室津にかけて ECMWF 波資料は観測資料よりやや大きい値を与えるが, 北東部に向かうにつれて平均的には観測資料より小さいかほぼ一致する。 $\rho(H_{ss})$ や $\rho(p_H)$ も沿岸方向に同様の変化を示し, $a_0(H_{ss})$ は 1 から 1.3 程度に増大する。 $a_0(p_H)$ も 0.9~1.3 の範囲にある地点が多い。これは ECMWF 波資料が観測資料よりやや大きい H_{ss} と p_H を与えることを示唆する。 NCEP 波資料の場合, 相関係数および勾配値は定性的に ECMWF 波資料と類似した沿岸方向の変化を示す。また, 東シナ海沿岸における推算精度はいずれの資料の場合にもかなり高い。しかし, 波高の変動幅が小さいため, とくに伊予島における各種相関係数の値は低めの値を示す傾向にある。

(2) 波高の傾向変動

図—6 は日本沿岸 45 箇所の波浪観測地点における年別測得率 75% 以上の観測資料とこれに対応する推算資料より得た年別 1/3 最大波高資料 H_{83} に対する傾向変動の解析結果を表す。ここに, K は観測年数, K_0 は測得率 75% 以上の観測年数であり, 地点ごとにより異なる。

日本海沿岸地点における両推算資料は切片 $b(H_{83})$ に対して観測資料とほぼ一致する。また, 勾配値 $a(H_{83})$ に

対しても推算資料は観測資料に近い値を与え, 正負の符号を含めて相互に比較的良好に符合する。一方, 傾向変動判別指標 $L(H_{83})$ をみると, ECMWF 波資料と観測資料では $L(H_{83})$ は 1~3 地点で異なり, その他の地点では一致する。 NCEP 波資料の場合には $L(H_{83})$ は浜田以外の地点で一致する。すなわち, 両推算資料や観測資料で共通して有意な傾向変動が認められるのは瀬棚のみである。また, トレンド示数 $I_T(H_{83})$ の絶対値は両推算資料および観測資料のいずれにおいてもせいぜい 2 以下であるから, ほとんどの地点で統計的に有意な傾向変動を与えないという意味で相互にほぼ符合する。

一方, 太平洋岸・東シナ海沿岸地点における両推算資料も日本海沿岸地点と同様に, $b(H_{83})$ に対して観測資料とよく一致する。 $a(H_{83})$ に対しても観測資料に比較的良好な値を与えるが, 正負の符号も含め, 若干のへだたりを生じる地点もある。 ECMWF 波資料と観測資料についてみると, $L(H_{83})$ は 26 地点中 6 地点で異なる。 NCEP 波資料と観測資料の場合の相違地点数は $L(H_{83})$ に対して 3 地点である。 トレンド示数 $I_T(H_{83})$ に基づく判別結果はこれらの結果をほぼ支持する。

なお, 観測資料に基づく波高統計量の勾配値 $a(H_{83})$ は地点ごとにやや大きく変動し, この挙動は NCEP 波資料よりもむしろ ECMWF 波資料とよく符合する。つまり, NCEP 波資料に基づく勾配値の地点ごとの変化は観測資料に比べて小さい。しかし, 絶対値でみれば, ECMWF 波資料は観測資料より過大あるいは過小な勾配値を与える地点もあるので, 波高の傾向変動に対する判別結果が観測資料に基づく結果と一致しない地点の数が NCEP 波資料の場合に, より多くなると考えられる。

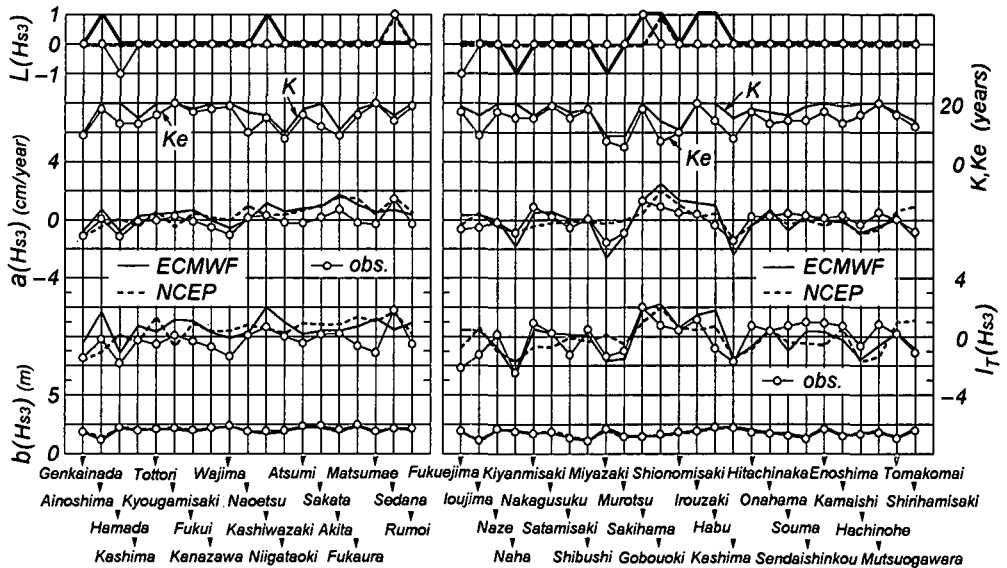


図-6 日本沿岸における波高の傾向変動の比較

4. 結 語

本研究で得た知見はつぎのように要約される。

① 日本海沿岸における ECMWF 波資料は、地点によらず観測資料と全般的によく符合する。NCEP 波資料の精度は ECMWF 波資料よりやや低いけれども、依然として良好である。一方、太平洋岸・東シナ海沿岸における ECMWF 波資料は、観測資料と比較的よく符合するか若干大きい値を与える。また、NCEP 波資料と観測資料の波高についての相関は、ECMWF 波資料とあまり変わらないが、周期については全体的に低い (畑田ら, 2003)。いずれにしろ、広大な外洋の多様な気象条件のもとで生成される太平洋岸の波浪に対する推算誤差は準閉鎖海域である日本海の沿岸の場合に比べてやや大きくなるが、許容しうる程度のものである。

② ECMWF 波資料および NCEP 波資料に基づくわが国沿岸での波高の傾向変動の判別結果はいずれも観測資料に基づく結果とよく符合し、なかでも空間解像度の低い風資料に基づく NCEP 波資料が空間解像度の高い風資料に基づく ECMWF 波資料より適切な判別結果を与える。これは波高の長期変動の解析においては、空間解像度よりむしろ等質性の条件を満たす風資料に基づく

推算波浪資料を用いる必要があることを示唆する。

最後に、ECMWF 表面風解析値・再解析値データセットを提供戴いた ECMWF ならびに NCEP/NCAR 表面風再解析値データセットを提供戴いた NCAR に謝意を表す。また、本研究は日本学術振興会科学研究費基礎研究 (C) (2) (代表 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

- 鈴木栄一 (1975): 気象統計学 (第5版), 地人館, 314 p.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・李 敏杰・野中浩一 (2001): 波浪の20年推算システムの日本沿岸における適用性, 自然災害科学, 20-3, pp. 307-324.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一・李 敏杰 (2002): わが国沿岸での長期波浪推算資料に基づく波高の傾向変動の解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1346-1350.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一 (2003): 日本沿岸における波浪の長期推算結果の相互比較, 工学ジャーナル, 第2巻 (愛媛大学工学部紀要 第22巻), pp. 149-163.
- 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・李 敏杰・野中浩一・野間 敬 (2000): 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, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 276-280.