

表面風再解析資料を用いた波浪の長期推算システムの適用性の向上

畑田佳男*・山口正隆**・大福 学***・高橋秀典****

本研究では, NCEP 表面風再解析資料および ECMWF 表面風再解析・解析資料に台風モデル風を埋込んだ波浪の長期推算システムを, わが国太平洋岸・東シナ海沿岸の波浪観測地点に適用し, 台風モデル風の埋込みの有無が波候や波高の傾向変動および波高極値の推定結果に及ぼす影響を調べた。そして, NCEP 風資料への台風モデル風の埋込みは, 波高の傾向変動に対する判別結果をほとんど変えないまま, とくに周期に関する波候や波高極値に対する推定精度の向上をもたらすこと, 推定精度の向上は波浮付近から南西側に位置する地点でみられること, ECMWF 風資料の場合には推定精度の向上の度合は NCEP 風資料の場合ほどでないこと, などを見出した。

1. 緒 言

畑田ら (2000) および山口ら (2000) はわが国沿岸や周辺海域を対象として 20 年間の ECMWF 表面風再解析・解析資料 (ECMWF 風資料) あるいは 51 年間の NCEP/NCAR 表面風再解析資料 (NCEP 風資料) と 1 点浅海モデルよりなる波浪の長期推算システムを構築した。各システムは月平均波高などの波候統計量とその傾向変動をかなり高い精度で評価するが, 入力風資料の時空間解像度の制約を受けて, とくに異常台風時の波浪に対して低めの値を与える傾向を示す。このため, 山口ら (2002) は台風モデル風を NCEP 風資料に埋め込んで作成した風資料を入力条件とすることによって, 本システムの台風時波浪に対する推算精度の向上をはかってきた。しかし, 対象地点は太平洋岸の喜屋武岬 1 地点に限られている。

本研究では, 台風モデル風の埋込みを伴う NCEP 風資料および ECMWF 風資料を入力条件とする波浪の長期推算システムを, わが国太平洋岸・東シナ海沿岸の 18 波浪観測地点に適用し, 観測資料や台風モデル風の埋込みを行わない場合の推算資料との比較に基づいて, 台風モデル風の埋込みの有無が波候や波高の傾向変動および波高極値の推定結果に及ぼす影響を検討する。

2. 波浪の長期推算システムの概要

(1) 海上風資料

a) 表面風再解析・解析資料

NCEP 風資料の原資料は, 1948 年 1 月 1 日～2002 年 12 月 31 日の 55 年間にわたり 6 時間ごとに空間解像度約 1.9° のガウス座標格子網で与えられる。一方, ECMWF 風資料の原資料は空間解像度 1.125° (1979 年 1 月 1 日

～1991 年 9 月 16 日) と空間解像度 0.5625° (1991 年 9 月 17 日～2002 年 12 月 31 日) の緯度・経度座標格子網で 24 年間にわたり 6 時間ごとに与えられる。両風資料の高度は 10 m である。波浪推算に用いる風資料はいずれも, 日本付近の領域における緯度・経度座標格子点値を格子間隔 80 km で 45×45 に分割した北西太平洋格子網に 2 次元 4 点補間することにより作成している。NCEP 風資料の特徴は資料の等質性に注意が払われている点に, ECMWF 風資料の特徴は NCEP 風資料より約 3 倍高い空間解像度をもつ点にある。

b) 台風モデル風の埋込み

台風に伴う 10 m 高度風速成分は, 楕円型気圧分布を仮定する場合の傾度風速成分と場の移動に伴う風速成分を加え合せ, 海面での摩擦抵抗の影響を考慮して求める。この際, 傾度風の海上風への変換係数には, 遠方場の値を 0.6 とする supergradient wind の仮定 (山口ら, 2002) を用い, 場の風に対しては 0.6 とおく。

台風モデル風の埋込みの対象とする台風は対象領域内で中心気圧が 980 hPa 以下の時点におけるものとし, 1 時間ごとに求めた台風モデル風速成分を 1 時間間隔で線形補間した NCEP 風速成分に埋め込む。埋込みのために用意した台風モデル風の時点数は 1948～2002 年の 4～12 月における 32,196 である。埋込みは台風モデル風速が NCEP 風速より大きい場合に, 山口ら (2002) の方法によって行う。

ECMWF 風資料の場合にも, 1979～2002 年の 4～12 月における資料に対して 1 時間間隔で同様の埋込みを行う。埋込み用台風モデル風の時点数は 16,390 である。

(2) 波浪推算モデルと計算条件

波浪推算は, 図-1 に示すように, 格子間隔 5 km の北西太平洋領域に格子間隔 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 2 段階高地形解像度格子網で, 1 点浅海モデル (山口ら, 1987) を用いて対象地点別に 55 年間 (NCEP 波資料) および 24 年間 (ECMWF 波資料) 1 時間ごとに実施する。波浪推算地

* 正会員 博(工) 愛媛大学講師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

*** 愛媛大学技術専門職員工学部環境建設工学科

**** 修(工) (株)四国材料試験所

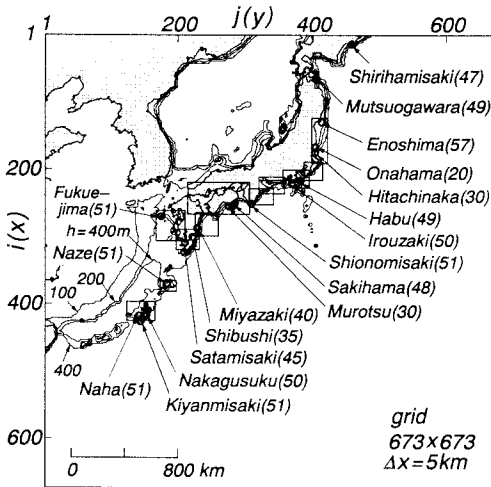


図-1 北西太平洋領域および波浪観測地点と水深

点は沖縄本島南端の喜屋武岬から北海道東岸の尻羽岬に至る18波浪観測地点であり、水深を図-1の地点名のかっこ内に与える。観測資料の期間は13年から28年に及ぶ。

(3) 波浪資料の解析法

a) 特別波浪解析

全対象期間についての季節・年単位で2～3時間間隔の観測資料と推算資料に基づく(有義)波高 H_s ・(有義)周期 T_s の順位値の相関図をそれぞれ作成する。両者の対応の度合を表わす誤差統計量として、相関係数 ρ と原点を通る回帰直線の勾配値 a_0 を用いる。

b) 波候解析

波候解析は各1年についての月・季節・年単位と、全対象期間についての月・季節・年単位で行う。波候統計量は波高・周期資料の平均値($\bar{H}_s$, $\bar{T}_s$)や上位1/10・1/3の資料の平均値(1/10・1/3平均波高 H_{s10} , H_{s3} および1/10・1/3平均周期 T_{s10} , T_{s3})である。誤差統計量として、波高・周期の観測資料と推算資料より得た月別各平均値資料間の相関係数 ρ と勾配値 a_0 を用いる。

c) 傾向変動解析

傾向変動の解析は、年別の各平均波高資料にあてはめた回帰直線の勾配値およびこれに対して有意水準5%で行った片側t検定の結果による。すなわち、統計的に有意な増加傾向を $L=1$ 、減少傾向を $L=-1$ 、それ以外を $L=0$ で表わし、 L を傾向変動指標と呼ぶ。また、鈴木(1975)によるトレンド示数 I_t も用いる。有意水準5%でトレンド示数 I_t の値が $I_t > 1.65$ の場合、増加傾向、 $I_t < -1.65$ の場合、減少傾向、 $|I_t| < 1.65$ の場合、傾向変動なしと判別する。

d) 波高の極値解析

極値解析には、年最大波高資料に候補分布の母数推定

を最小2乗法に基づく極値統計解析モデル(Yamaguchi・Hatada, 1997)を適用する。本モデルは、候補分布をGumbel分布および形状母数が0.5～10の27種類のWeibull分布とし、各資料への非超過確率の割当てを合田(1990)のプロットング公式、最適分布の選択を最大相関係数基準、標準偏差の推定をjackknife法による。

3. 推算精度の検討

(1) 特別波浪

高波高部および長周期部に対する推算資料と観測資料の対応をみるために、台風モデル風の埋込み時点数が多い7～9月期の波高・周期の順位値に対する比較を表したのが図-2であり、作図はそれぞれNCEP波資料とECMWF波資料による。対象地点は沖縄本島南部の中城である。NCEP波資料およびECMWF波資料のいずれの場合にも、台風モデル風の埋込みケースが埋込みを伴わないケース(単独ケース)に比べて、高波高部・長周期部で良好な対応関係を与えるが、完全相関を表わす45°直線への近接度からみて、中城ではECMWF波資料の精度が高く、また埋込みに伴う推算精度の向上の割合はNCEP波資料の場合に、より大きい。

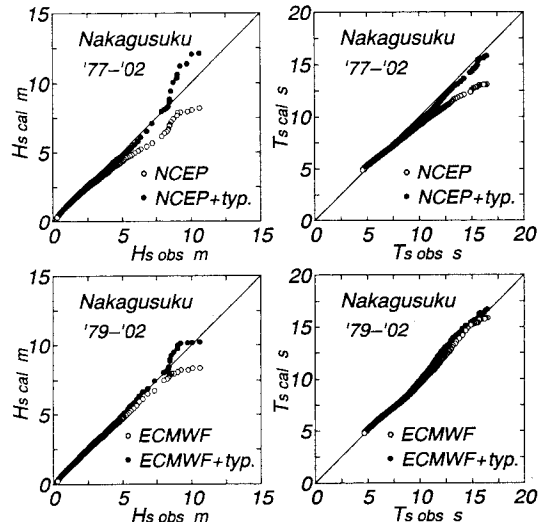


図-2 波高・周期の順位値の相関図(中城)

図-3は7～9月期の波高・周期の順位値の相関図における勾配値 $a_0(H_s)$, $a_0(T_s)$ をNCEP波資料とECMWF波資料について示す。対象地点は太平洋岸・東シナ海沿岸18波浪観測地点である。順位値の相関図における相関係数は1にかなり近い値をとるため、単独ケースと埋込みケースにおける相関の強弱に対する識別能力を低下させているので、図の掲載を省いている。波高に関して、勾配値は一貫して単独ケースより埋込みケー

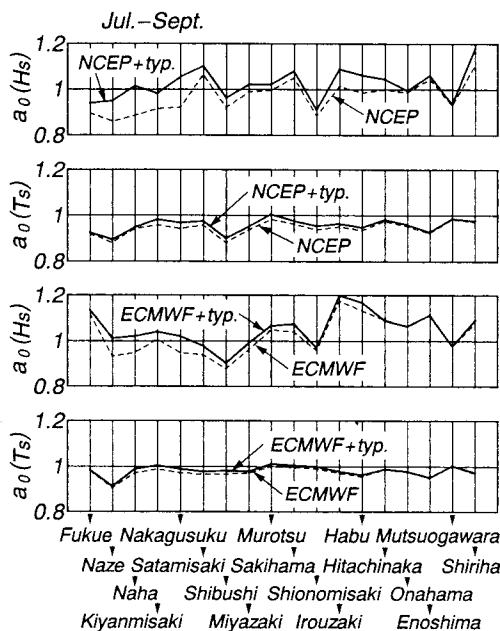


図-3 波高・周期の順位値の相関図における勾配値の比較

スで大きい値をとる。このため、単独ケースで1に近い勾配値が、埋込みケースでは1からより離れる地点が太平洋岸の北側地点を中心に見出される。周期に関しては、埋込みケースがより1に近い勾配値をとることから、埋込みに伴う推算精度の向上はおおむね波浮から南側の地点で高波高部よりむしろ長周期部に強く現れていることがわかる。

また、ECMWF 風資料、したがって ECMWF 波資料の精度が NCEP 波資料に比べて全般的に高いので、台風モデル風の埋込みに伴う台風時波浪の精度の増加の割合は NCEP 波資料の場合より小さい。

(2) 波 候

表-1 は累月（9月）の1/10平均波高 H_{s10} と1/10平均周期 T_{s10} の地点別一覧を観測資料および単独ケース（NCP）と埋込みケース（NTY）の NCEP 波資料について示す。台風モデル風の埋込みの影響は累年資料においては埋もれてしまうことから、表の掲載を省略している。観測資料との対応をみると、波高に関して、宮崎から南西側の地点で単独ケースの推算結果が観測結果より小さく、北側の地点で大きい傾向にあることから、埋込みケースの推算結果は宮崎から南西側の地点で観測結果に近づくのに対して、北側の地点で差が増大する。一方、周期に関しては、埋込みケースの推算結果が一貫して単独ケースより観測結果に近い値を与える。すなわち、台風モデル風の埋込みに伴う推算精度の向上は波高より周期において明瞭にみられる。

表-1 累月（9月）1/10平均波高・周期の地点別一覧

location	Sept. H_{s10} m			Sept. T_{s10} s		
	obs.	NCP	NTY	obs.	NCP	NTY
Shirihamisaki	2.82	3.39	3.48	12.0	11.3	11.7
Mutsuogawara	2.86	3.00	3.01	11.2	10.8	10.9
Enoshima	3.14	3.46	3.52	11.5	10.8	11.0
Onahama	3.03	2.89	2.98	12.2	11.0	11.3
Hitachinaka	2.79	3.07	3.15	11.4	10.5	10.7
Habu	3.24	3.24	3.41	11.5	10.3	10.7
Irouzaki	2.77	3.02	3.17	11.5	10.3	10.7
Shionomisaki	3.27	3.00	3.10	11.8	11.0	11.8
Sakihama	2.73	3.01	3.14	11.7	11.0	11.6
Murotsu	2.70	2.70	2.75	12.4	11.9	12.3
Miyazaki	3.74	3.60	3.79	12.3	10.9	11.7
Shibushi	2.42	2.35	2.42	11.6	10.0	10.6
Satamisaki	2.40	2.52	2.65	11.7	12.5	11.2
Nakagusuku	3.53	2.98	3.26	11.8	10.2	11.0
Kiyanmisaki	3.59	3.05	3.23	11.6	10.5	11.3
Naha	2.73	2.38	2.71	9.8	9.4	9.7
Naze	2.60	2.40	2.59	9.3	8.6	8.8
Fukuejima	2.48	2.16	2.21	8.4	7.5	7.6

図-4 は中城における月別1/10平均波高と1/10平均周期についての観測結果と推算結果（NCEP 波資料）の相関を単独ケースと埋込みケースごとに与える。波高、周期について、埋込みケースは単独ケースより高い観測結果との一致を与える。その度合は相関係数 $\rho(H_{s10})$ 、 $\rho(T_{s10})$ と勾配値 $a_0(H_{s10})$ 、 $a_0(T_{s10})$ により代表されよう。

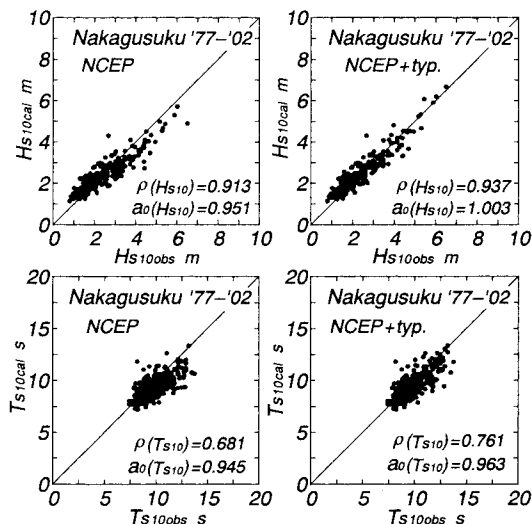


図-4 月別1/10 平均波高・周期の比較（中城）

図-5 は太平洋岸・東シナ海沿岸18地点における相関係数 $\rho(H_{s10})$ 、 $\rho(T_{s10})$ と勾配値 $a_0(H_{s10})$ 、 $a_0(T_{s10})$ を単独ケースと埋込みケース（NCEP 波資料）について示す。波高に関して、埋込みケースの相関係数 $\rho(H_{s10})$ は一貫して単独ケースより大きい、勾配値 $a_0(H_{s10})$ は必ずし

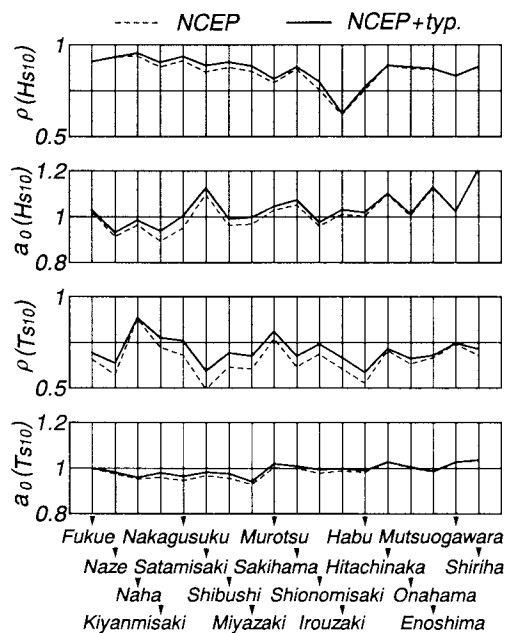


図-5 月別1/10平均波高・周期に対する相関係数と勾配値

もより1に近い値を与えるとは言えない。後者の特徴は台風モデル風の埋込みが波高の増加をもたらすので、単独ケースで1に近い値が埋込みケースでは1から離れることによる。一方、周期に関しては、埋込みケースにおける相関係数 $\rho(T_{s10})$ と勾配値 $a_0(T_{s10})$ がほぼいずれの地点でも単独ケースに比べてより1に近い値をとる。以上の傾向は台風の影響を強く受ける太平洋岸の波浮から南西側地点で明瞭になる。このことから、台風モデル風の埋込みが高波高や長周期、とりわけ長周期の波浪に対する推算精度の向上に寄与することが示唆される。

(3) 波高の傾向変動

図-6 は中城における年別1/10平均波高資料の時系列を観測資料および単独ケースと埋込みケースのNCEP波資料について示す。いずれの推算資料も観測資料と比較的よく対応し、年ごとの変動をほぼ再現する。測得率が75%以上の年のみに限定した年別1/10平均波高資料にあてはめた直線の勾配値 $a(H_{s10})$ は、観測資料および単独ケースと埋込みケースの推算資料に対して (0.94, 0.62, 0.93) cm/year, 傾向変動指標 $L(H_{s10})$ はいずれも0, テンド示数 $I_t(H_{s10})$ は (0.74, 0.94, 1.09) であるから、中城では観測資料と推算資料に基づく波高の傾向変動に対する判別結果が符合することや、台風モデル風の埋込みの有無により判別結果が変化しないことがわかる。

表-2 は沿岸18地点におけるテンド示数 $I_t(H_{s10})$ を観測資料および2種類の推算資料 (NCEP 波資料) につ

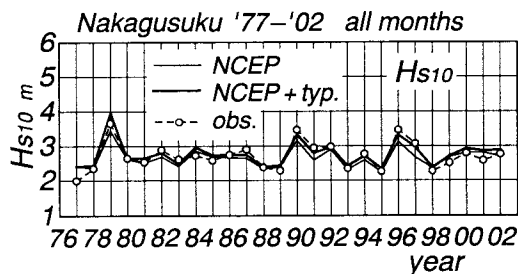


図-6 年別1/10平均波高の経年変化 (中城)

いて示す。表中の地点名に続くかっこ内の数値は資料年数を表す。テンド示数 I_t は資料の大きさが20以上の欠落を伴わない資料の傾向変動を表すのに有効な指標であるが、今回の事例では $I_t = \pm 1.65$ を限界値とする傾向変動 (越える場合に太字により表示) の統計的有意性に対する判別結果が傾向変動指標 L による判別結果と完全に一致することから、連続値をとるテンド示数を使用する。まず傾向変動の有無に関して、単独ケースと埋込みケースにおけるテンド示数は相互に類似した値をとり、両者の判別結果は完全に符合する。また、観測資料と推算資料による判別結果が異なる地点は尻羽岬、小名浜、佐多岬 (観測資料で傾向変動なし、推算資料で増加傾向) および石廊崎、福江島 (観測資料でそれぞれ増加または減少傾向、推算資料で傾向変動なし) の5地点である。ついで、NCEP 風資料に質的な問題を残すと考えられる1948~1957年の資料を削除した1958~2002年45年間のNCEP 波資料では、傾向変動指標とテンド示数による判別結果が志布志 (埋込みケース, $L(H_{s10}) = 1$, $I_t(H_{s10}) = 1.62$) および喜屋武岬 (単独ケース,

表-2 年別1/10平均波高資料のテンド示数

location (yrs.)	obs. period			'58~'02	
	obs.	NCP	NTY	NCP	NTY
Shirahisaki(18)	0.27	1.92	2.03	1.23	1.25
Mutsuogawara(28)	0.35	-0.27	-0.23	0.10	0.23
Enoshima(25)	-0.91	-1.03	-1.15	0.35	0.31
Onahama(21)	0.74	2.14	2.14	1.17	1.21
Hitachinaka(22)	0.72	-0.06	-0.06	0.08	-0.04
Habu(27)				1.19	1.15
Irouzaki(27)	1.74	1.52	1.56	0.47	0.51
Shionomisaki(16)	0.61	1.34	1.22	-0.10	-0.16
Sakihama(26)	2.05	2.23	1.87	1.82	1.51
Murotsu(13)				0.37	0.37
Miyazaki(13)				2.58	2.31
Shibushi(22)	0.42	0.76	0.54	2.03	1.62
Satamisaki(21)	0.24	1.99	1.85	3.19	2.74
Nakagusuku(26)	0.74	0.94	1.09	2.35	1.49
Kiyamisaki(22)	-0.38	0.10	0.17	1.74	1.49
Naha(28)				0.51	0.74
Naze(26)	0.25	-0.99	-0.82	0.14	-0.43
Fukuejima(23)	-1.88	0.19	-0.06	1.60	1.39

$L(H_{S10})=0$, $I_1(H_{S10})=1.74$) 以外の地点で一致し、佐喜浜、志布志、中城、喜屋武岬の4地点を除いて台風モデル風埋込みの有無により傾向変動の判別結果が変化しない。また、わが国の太平洋岸・東シナ海沿岸では過去45年の間に統計的に有意な高波高部の傾向変動は多くの地点で検出されない。この特性は年別平均波高についても言えるが、統計的に有意な増加傾向を生じる地点の数が減少する。すなわち、波高の平均値資料の種類によって傾向変動の判別結果が多少変化する可能性もある。

(4) 確率波高

図-7は観測資料および単独ケースと埋込みケースのNCEP波資料ならびにECMWF波資料(いずれも年最大波高資料)から推定した50年確率波高 H_{50} とその標準偏差 $H\sigma_{50}$ を沿岸方向に比較したものである。推算資料の期間は観測資料の期間に合わせている。確率波高は単独ケースより埋込みケースで増加するが、その度合は台風の影響を強く受ける太平洋岸の波浮や常陸那珂から南西側地点で大きく、しかも埋込みケースの確率波高がおおむね観測資料に基づく確率波高に近い値をとる。逆に、台風モデル風の埋込みの影響が小さい江ノ島以北の地点で、両ケースの確率波高にあまり差を生じない。標準偏差は第1位の年最大波高資料が突出する地点で、観測資料、推算資料によらず大きい値をとり、標準偏差・確率波高比($H\sigma_{50}/H_{50}$)で定義される変動係数が増大し、確率波高の信頼性が低下する。

ECMWF波資料の場合、台風モデル風埋込みの影響をあまり受けないことから、単独ケースと埋込みケースにおける確率波高のみならず標準偏差の差が大部分の地点でかなり小さい。

4. 結 語

本研究で得られた結果はつぎのようである。

- ①波浪の長期推算システムにおいて入力条件として使用するNCEP風資料への台風モデル風の埋込みは、波高の傾向変動に対する判別結果をほとんど変えないまま、波候のみならず波高極値に対して全般的な推定精度の向上をもたらす。また、推算精度の向上は波候に関して波高より周期に強くみられる。
- ②台風の影響が相対的に大きい太平洋岸の波浮付近から南西側に位置する地点で、台風モデル風の埋込みに伴う波浪推算精度の向上がみられる地点が多く、その度合は南西部にいくほど大きい。一方、波浮付近から北側の地点で、波浪推算精度に及ぼす台風モデル風の埋込みの影

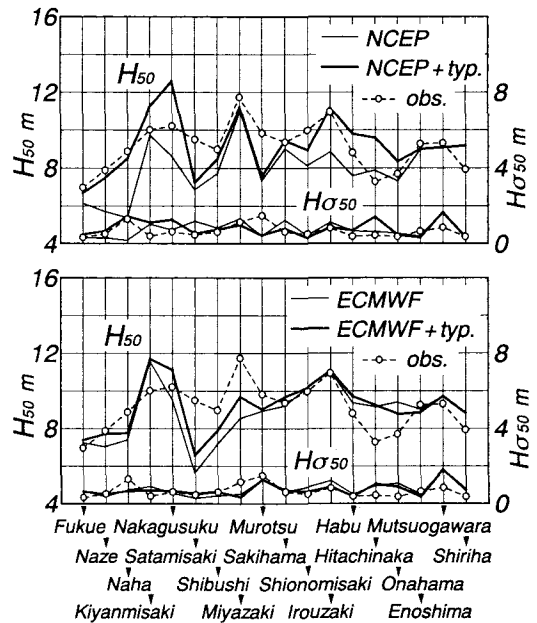


図-7 50年確率波高とその標準偏差

響はあまり顕在化しない。

- ③ECMWF風資料の精度はNCEP風資料に比べて高いために、台風モデル風の埋込みに伴う波浪推算精度の向上の度合は、NCEP風資料の場合ほどでない。

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, 333p.
- 鈴木栄一(1975): 気象統計学(第5版), 地人書館, 314p.
- 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・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.
- 山口正隆・畑田佳男・野中浩一・大福 学(2002): 台風モデル風の埋込みによる51年波浪推算システムの改良, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 206-210.
- 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. WAVES97, Vol. 2, pp. 932-946.