

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

山口正隆*・畑田佳男**・野中浩一***・大福 学****

NCEP/NCAR より提供を受けた 51 年間の 10 m 高度表面風再解析値資料のデータセットと 1 点浅海モデルよりなる波浪の長期推算システムにおいて, 台風時波浪に対する推算精度の向上をはかる目的から, 表面風再解析値資料に台風モデルから得た風を埋め込んだ。そして, 観測資料および従来のシステムによる推算資料との比較に基づいて, 新しいシステムは, 沖縄本島南端に位置する喜屋武岬沿岸波浪観測地点のように, 台風時波浪が卓越する海域では, 波候の傾向変動に対する判別結果をほぼ変えないまま, 高波高部を代表する波候統計量のみならず波高極値に対しても推定精度のかなりの向上をもたらすことを明らかにした。

1. 緒 言

近年, 気象資料の整備, とくに世界各国の気象機関による長期気象資料の公開や計算機性能の向上に伴い, 10 年以上の波浪推算に基づいて波浪の気候学特性, すなわち波候をかなり高い精度で推定することが可能になりつつある。このうち, 山口ら (2000) はアメリカ合衆国の NCEP/NCAR から提供を受けた 51 年間の 10 m 高度表面風再解析値資料 (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, 観測資料との比較から適用性を調べた。その結果 (山口ら, 2000; 畑田ら, 2002a, 2002b) によると, 本システムは外洋および沿岸における期間別平均波高など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, NCEP 風資料の時空間解像度の制約のため, 強風時, とくに台風時の波浪に対して低めの値を与え, 波高の極値を過小評価した。

そこで本研究では, NCEP 風資料に台風モデルに基づく風を埋め込むことにより, 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り, 波候やその傾向変動のみならず波高極値の推定に対する適用性の改善を目指す。

2. 波浪の長期推算システムとその改良

2.1 NCEP/NCAR 表面風再解析値資料

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 年間で 6 時間ごとに全球を空間解像度約 1.9° で分割したガウス座標格子網で与えられた原資料 (NCEP/NCAR Global Reanalysis Archive ds 090.0) から, 日本付近の範囲の緯度・経度座標格子点値を抽出したのち, これを格子間隔 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た。NCEP 風資料の特徴は全期間にわたり同じ空間解像度で同一のデータ同化システムに

より資料が作成されており, 資料の等質性に注意が払われている点にある。

2.2 台風モデル風とその埋込み

台風内気圧分布は, 台風の北上に伴い, 円型分布から楕円状分布に変化することが多いので, 台風内気圧分布を楕円型分布により近似する。

つぎに, 台風に伴う 10 m 高度風速成分 (U_{Tx}, U_{Ty}) は楕円型気圧分布を仮定する場合の傾度風速成分 (G_x, G_y) と場の移動に伴う風速成分 (V_x, V_y) 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として, 遠方場の値を 0.6 とした藤井・光田 (1986) による supergradient wind の仮定を用い, 場の風の場合には 0.6 とおく。

台風モデル風の埋込みの対象とする台風は中心気圧 980 hPa 以下の場合とし, 6 時間間隔で与えられた中心気圧や中心位置など 6 つの台風属性資料を 1 時間ごとに線形補間して求めた台風モデル風速成分 (U_{Tx}, U_{Ty}) を 1 時間間隔で線形補間した NCEP 風速成分 (U_{Nx}, U_{Ny}) に埋め込む。埋込みは台風モデル風速 U_T が NCEP 風速 U_N より大きい場合 ($U_T > U_N$) にのみ行う。埋込み後の風速成分 (U_x, U_y) は, 台風半径 R 内で 1, 半径外で指数関数的に減少する係数 C_T を乗じた台風モデル風速成分に, 係数 $(1 - C_T)$ を乗じた NCEP 風速成分を加えることにより求める。

$$\left. \begin{aligned} U_x &= C_T U_{Tx} + (1 - C_T) U_{Nx}, \\ U_y &= C_T U_{Ty} + (1 - C_T) U_{Ny} \\ C_T &= 1; r \leq R, \quad C_T = \exp\{1 - (r/R)^{1/2}\}; r > R \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

埋込み後の風速 U および風向 θ_w は,

$$U = (U_x^2 + U_y^2)^{1/2}, \quad \theta_w = \tan^{-1}(U_y/U_x) \dots\dots\dots (2)$$

による。埋込みケース数は 1948~1998 年の 5105 個 (6 時間間隔) である。

2.3 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 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, 1 点浅海

* 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科生産工学専攻
**** 愛媛大学技官 工学部環境建設工学科

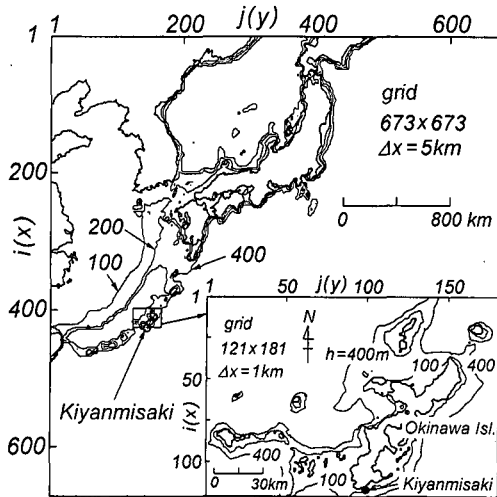


図-1 北西太平洋大領域と波浪推算地点周辺小領域

モデル (山口ら, 1987) を用いて 51 年間 1 時間ごとに実施する。計算に用いる周波数データの個数は $f=0.04\sim0.50$ Hz 間を不等分割した 23 個, 方向データの個数は $0\sim360^\circ$ を等分割した 37 個であり, 方向は 0° を N として反時計回りに定義する。

波浪推算地点は沖縄本島南端の太平洋側に位置する気象庁沿岸波浪観測地点の喜屋武岬 (水深 51 m) であり, ここでの波浪は台風の影響を強く受ける。使用する観測資料の期間は 1983~1998 年の 16 年間, 観測資料の時間間隔は 3 時間である。

2.4 波浪資料の解析法

(1) 波候解析法

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。波候統計量は前者の期間 (月別・季節別・年別) では波高・周期資料の平均値 ($\bar{H}_s, \bar{T}_s$) と標準偏差 ($H_{s\sigma}, T_{s\sigma}$) や波高 2 m 以上の高波出現率 p_H のほか, 波高・周期資料の上位 $1/10 \cdot 1/3$ の平均値 ($1/10 \cdot 1/3$ 最大波高 H_{s10}, H_{s3} および $1/10 \cdot 1/3$ 最大周期 T_{s10}, T_{s3}) であり, 後者の期間では, これらに波高・周期の累積分布などを加える。

観測資料との比較を行う場合, 誤差統計量は, 波高・周期の推算資料と観測資料の特別値および月別値に対する相関係数 ρ , 両資料の相関図において原点を通る直線の勾配値 a_0 のほか, 特別資料では 2 乗平均平方根誤差 σ である。

(2) 傾向変動解析法

傾向変動の解析は年別・季節別の $1/10 \cdot 1/3$ 最大波高 (H_{s10}, H_{s3}) および平均波高 $\bar{H}_s$ の各資料に対するトレンド示数 I_T を用いた判別方法 (鈴木, 1975) により有意水準 5% で行う。トレンド示数 I_T の値が, $|I_T| < 1.65$ の場

合, 傾向変動なし, $I_T > 1.65$ の場合, 増加傾向あり, $I_T < -1.65$ の場合, 減少傾向あり, と判別する。 $|I_T|$ が 1.65 より大きいほど, 時系列の増加・減少傾向が強い。

(3) 波高の極値解析法

極値解析は, 年別・期間別 (台風期にあたる 6~10 月, およびそれ以外の 1~5 月と 11~12 月の 2 期間) 最大波高資料および極大波高資料と 2 期間別極大波高資料に, 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 ら, 1996) を適用して行う。年別・期間別最大波高資料の作成は波高時系列資料から抽出した基準波高 2 m 以上, 生起時間間隔 72 時間以上の極大波高資料による。また, 期間別極値解析結果に基づく合成確率波高および合成分散 (標準偏差) の算出には, それぞれ合田 (1990) および泉谷 (2000) の理論式を用いる。

3. 推算精度の検討

3.1 特別波浪

図-2 は 1990 年 8 月 15 日から 9 月 21 日の 37 日間における風速・波浪時系列を表す。この間, 台風 9012 号から 9019 号の 5 台風が相次いで接近または通過している。台風モデル風の埋込み (NCEP+typ.) により台風通過時点近傍の風速が増加するに伴い, 台風 9015 号と 9019 号のケースの推算波浪が NCEP 風資料単独のケース (NCEP) に比べて観測波浪に近い値を与える。

図-3 は台風モデル風の埋込みを最も多く行った 7~9 月 (1983~1998 年) における 2 種類の特別推算波高資料と観測波高資料の相関をそれぞれ等値線分布として示

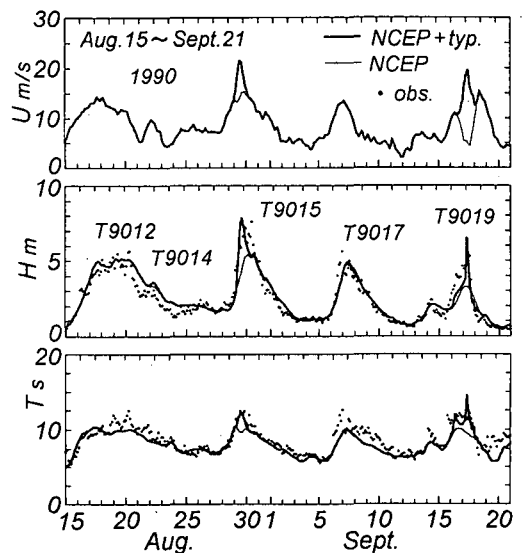


図-2 風速・波浪時系列の比較

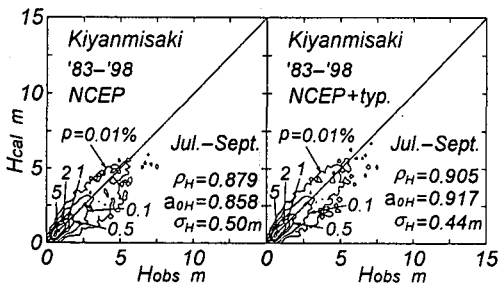


図-3 推算波高と観測波高の特別値の比較

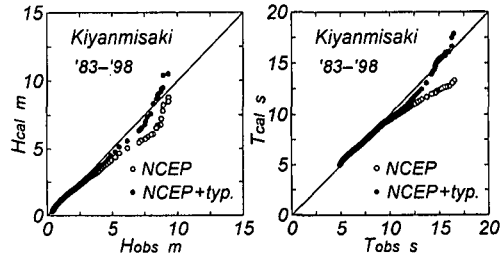


図-4 累積波高・周期資料の比較

す。埋込みを行ったケースでは、NCEP 風資料単独のケースに比べて、資料値は完全相関を表す 45°の直線のまわりに、より扁平な楕円状に分布することから、観測資料との一致度が向上していることがわかる。図中に与えた相関係数 ρ_H 、原点を通る回帰直線の勾配値 a_{0H} および 2 乗平均平方根誤差 σ_H からなる波高誤差統計量は、埋込みを行ったケースにおける推算精度がより高いことを表す。表-1 は累年および累季節（7～9 月）の波高・周期誤差統計量の一覧であり、いずれの期間でも台風モデル風の埋込みにより波高・周期の推算精度が向上している。しかし、埋込みケース数は台風来襲期の 7～9 月に多いことから、累年単位では埋込みにより推算精度が向上する度合はやや不明瞭になる。

表-1 累年・累月波候誤差統計量

error statist.	all months		Jul.~Sept.	
	NCEP	+ typ.	NCEP	+ typ.
ρ_H	0.815	0.840	0.879	0.905
a_{0H}	0.930	0.960	0.858	0.917
σ_H	0.41	0.39	0.50	0.44
ρ_T	0.638	0.661	0.726	0.750
a_{0T}	0.977	0.983	0.945	0.963
σ_T	1.2	1.1	1.2	1.2

+ typ.: NCEP+typ. period: 1983~1998
unit: σ_H (m), σ_T (s)

図-4 は全観測期間（16 年間）の累積波高・周期資料に対する比較を表す。図は波高・周期の推算・観測資料をそれぞれ上位から順に並べ替えたのち、同一の順位の推算資料を縦軸、観測資料を横軸として作成している。NCEP 風資料単独のケースでは、推算値は高波高部あるいは長周期部で観測値より低い値をとるのに対して、台風モデル風の埋込みを行ったケースでは資料値は完全相関を表す 45°の直線のまわりにプロットされることから、埋込みに伴い高波高部・長周期部に対する推算精度が向上していることがわかる。ただし、推算値は最上位付近の波高・周期に対してやや過大な値を与える。

3.2 波 候

表-2 は 1983～1998 年の全観測期間における累年・累季節（7～9 月）各種波候統計量の一覧を 2 種類の推算資料および観測資料について示す。計算には観測資料が得られる時点の推算資料のみを用いている。台風モデル風の埋込みを行ったケースの各種波候統計量は累年単位の平均波高 $\overline{H_s}$ を除き、NCEP 風資料単独のケースに比べて観測資料に基づく結果に近い値を与えることから、台風モデル風の埋込みに伴う波候統計量の推定精度の向上がみられる。

表-2 累年・累月波候統計量

wave statist.	all months			Jul.~Sept.		
	obs.	NCEP	+ typ.	obs.	NCEP	+ typ.
H_{s10}	2.67	2.41	2.50	3.73	3.24	3.48
H_{s3}	1.75	1.72	1.75	2.27	2.07	2.17
$\overline{H_s}$	1.12	1.15	1.16	1.30	1.21	1.25
$H_{s\sigma}$	0.70	0.59	0.64	1.04	0.88	0.97
ρ_H	7.8	6.6	6.9	15.4	13.3	14.0
T_{s10}	10.4	9.7	9.9	11.1	10.0	10.6
T_{s3}	8.9	8.6	8.7	9.4	8.7	8.9
$\overline{T_s}$	7.4	7.3	7.4	7.5	7.3	7.4
$T_{s\sigma}$	1.5	1.2	1.3	1.7	1.3	1.5

+ typ.: NCEP+typ. period: 1983~1998 unit: H (m), T (s), ρ_H (%)

図-5 は月別波候統計量のうち 1/10 最大波高 H_{s10} と 1/10 最大周期 T_{s10} に対する推算値と観測値の比較を表す。台風モデル風の埋込みを行ったケースでは、波高・周期いずれについても、資料値は 45°の直線のまわりにプロットされており、高波高部あるいは長周期部に対する推算精度の向上が現れている。相関係数 $\rho(H_{s10})$, $\rho(T_{s10})$ および原点を通る回帰直線の勾配値 $a_0(H_{s10})$, $a_0(T_{s10})$ という誤差統計量は、波高の相関係数 $\rho(H_{s10})$ を除いて、台風モデル風の埋込みを行ったケースに対する精度が NCEP 風資料単独のケースより高いことを示す。しかし、相関係数は必ずしも埋込みに伴う推算精度の向上を示唆しない。同様の傾向は他の波高統計量についても見出される。これは台風モデル風の埋込みによって推算値

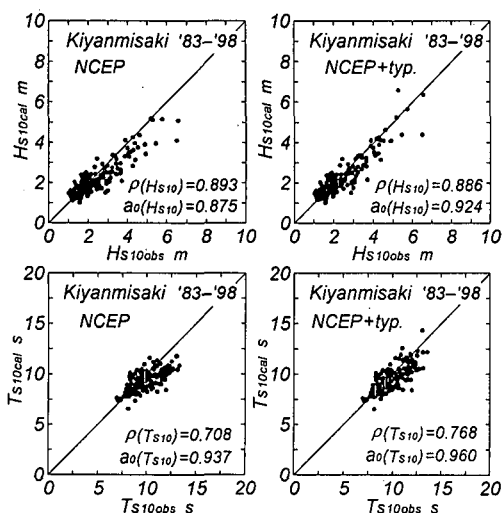


図-5 推算・観測資料に基づく月別波候統計量の比較

と観測値の平均的な対応は向上するが、1次直線まわりの資料値のばらつきの幅が拡大して、両資料間の直線関係の度合が低下することによる。

3.3 波高の傾向変動

図-6は2種類の推算資料および観測資料より得た年別波高統計量(1/10最大波高 H_{s10} 、1/3最大波高 H_{s3} 、平均波高 $\bar{H}_s$)の経年変化に対する比較を表す。いずれの推算資料も、1/10最大波高に対して観測資料より系統的に小さい以外、観測資料と比較的よく符合しており、とくに台風モデル風の埋込みを行ったケースの一致度がやや高い。

表-3は観測期間に相当する1983~1998年の年別および季節(7~9月)別各種波高統計量の経年資料より求めたトレンド示数 I_T の一覧を示す。推算資料より得た

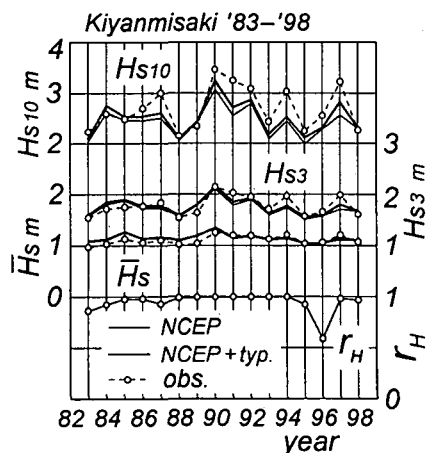


図-6 推算・観測資料に基づく年別波高統計量の比較

各トレンド示数は観測資料による値と正負符合を含めて必ずしも一致しないが、いずれにおいても各波高統計量が統計的に有意な傾向変動を与えないという意味で、トレンド示数による判別結果は符合する。

表-4は1948~1998年の51年間および1958~1998年の41年間における年別および季節(7~9月)別波高統計量資料から求めたトレンド示数 I_T の一覧である。NCEP風資料は観測方法や観測時間の変更などのため、1957年以前でやや低めの値を与えることから、2つの期間で解析を行っている。台風モデル風の埋込みを行ったケースの年別・季節別波高統計量に対するトレンド示数は、いずれもNCEP風資料単独のケースに比べて、ほぼ減少するため、51年間資料における1/10最大波高 H_{s10} のように、傾向変動の判別結果が異なる場合も生じるが、その他の波高統計量では傾向変動の判別結果に変化がないこと、また、41年間資料に基づくトレンド示数の絶対値が51年間資料の場合より小さい値をとり、とくに41年間資料では各波高統計量に有意な傾向変動が見出されないことがわかる。

3.4 波高の極値

表-5は2種類の推算資料から抽出した年別最大波高資料(AM)と期間別最大波高資料、および資料年数の2倍相当分の極大波高資料(POT)と期間別極大波高資料に対する極値統計解析より求めた50年確率波高 H_{50} とその標準偏差 σ_{H50} の一覧である。資料期間はNCEP風資料の全期間に相当する1948~1998年の51年間、NCEP風資料に質的变化が見られる最初の10年間を除く1958~1998年の41年間および観測期間に相当する

表-3 年別・季節別波高統計量のトレンド示数(1)

	all months			Jul.~Sept.		
	obs.	NCEP	+typ.	obs.	NCEP	+typ.
H_{s10}	0.64	-0.25	0.54	0.54	-0.74	-0.18
H_{s3}	0.94	-0.84	-0.09	0.15	-0.64	0.27
$\bar{H}_s$	1.63	-0.54	-0.18	0.35	-0.25	0.09

+typ.: NCEP+typ. period: 1983~1998

表-4 年別・季節別波高統計量のトレンド示数(2)

	1948~1998				1958~1998			
	all months		Jul.~Sept.		all months		Jul.~Sept.	
	NCEP	+typ.	NCEP	+typ.	NCEP	+typ.	NCEP	+typ.
H_{s10}	1.83	1.47	1.83	1.41	0.94	0.76	0.94	0.65
H_{s3}	0.74	0.84	1.29	1.15	0.31	0.43	-0.07	-0.04
$\bar{H}_s$	-0.14	-0.11	0.48	0.43	-0.25	-0.09	-1.10	-0.88

+typ.: NCEP+typ.

表-5 各資料に基づく50年確率波高と標準偏差

	$H_{50} \pm \sigma_{H_{50}} \text{ m}$		period
	AM (CAM)	POT (CPOT)	
obs.	11.02 $\pm$ 0.55 (11.03 $\pm$ 0.55)	11.55 $\pm$ 0.51 (11.19 $\pm$ 0.48)	'83~'98
NCEP	8.34 $\pm$ 0.58 (8.40 $\pm$ 0.57)	8.32 $\pm$ 0.51 (8.36 $\pm$ 0.52)	'48~'98
	8.05 $\pm$ 0.61 (8.12 $\pm$ 0.59)	8.12 $\pm$ 0.55 (8.16 $\pm$ 0.55)	'58~'98
	9.26 $\pm$ 1.21 (9.45 $\pm$ 1.21)	9.01 $\pm$ 1.09 (9.24 $\pm$ 1.12)	'83~'98
	11.19 $\pm$ 0.76 (11.21 $\pm$ 0.75)	10.93 $\pm$ 0.65 (10.94 $\pm$ 0.63)	'48~'98
	11.12 $\pm$ 0.91 (11.16 $\pm$ 0.89)	10.93 $\pm$ 0.81 (10.99 $\pm$ 0.79)	'58~'98
NCEP + typ.	11.41 $\pm$ 1.33 (11.58 $\pm$ 1.30)	11.16 $\pm$ 1.23 (11.22 $\pm$ 1.19)	'83~'98

1983~1998年の16年間の3種類としている。期間別極値資料の解析では、それぞれの解析結果を結合することにより、合成確率波高と合成標準偏差(CAM, CPOT)を求め、表中の()内に与えている。また、観測資料に対する合成確率波高と合成標準偏差は成因別(台風とそれ以外の気象擾乱)極値資料の解析とその後の結合に基づいて得ている。この表からつぎの特徴が指摘されよう。

①台風モデル風の埋込みを行ったケースでは、確率波高は観測資料に基づく値にかなり近い値をとるのに対して、NCEP風資料単独のケースでは確率波高は低い値を与える。

②確率波高の値は極値資料の種類にほとんど依存しないが、標準偏差は極大波高資料に基づく場合に小さい。

③喜屋武岬では台風時波浪の影響が卓越することから、合成確率波高および合成標準偏差は期間別分類を行わない極値資料に基づく確率波高とほぼ一致する。

④データ数(データ年数)の増加とともに、確率波高

の標準偏差は減少し、確率波高推定値の信頼度が向上する。しかし、とくに台風モデル風の埋込みを行ったケースの確率波高の標準偏差は観測資料に基づく値より大きい。これは推算資料における個々の極値データの変動幅が大きいことを示唆する。

4. 結 語

本研究の検討から、51年間のNCEP風資料に台風モデル風の埋込みを行った風資料を入力条件とする波浪の長期推算システムは、台風時波浪が卓越する海域では、波候の傾向変動に対する判別結果をほぼ変えないまま、波候のみならず波高極値に対しても推定精度のかなりの向上をもたらすことを明らかにした。

参 考 文 献

- 泉宮尊司(2000): 設計波の合理的な設定法, 2000年度(第36回)水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 土木学会海岸工学委員会・水理委員会, pp. B3-1-20.
- 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.
- 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(2002a): 51年波浪推算に基づく北西太平洋における波高の傾向変動の解析, 自然災害科学 J. JSNDS, 20-4, pp. 435-448.
- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・李 敏杰・野中浩一(2002b): わが国沿岸における波浪の長期変動の推定, 工学ジャーナル, 第1巻(愛媛大学工学部紀要 第21巻), pp. 211-223.
- 藤井 健・光田 寧(1986): 台風の確率モデルによる強風のシミュレーション, 日本風工学会誌, 第28号, pp. 1-12.
- 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): わが国周辺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.
- 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.