

波浪の長期推算システムの瀬戸内海沿岸における適用性の検討

畑田 佳男* ・ 山口 正隆** ・ 大 福 学***
野 中 浩一**** ・ 白水 英路*****

瀬戸内海の沿岸部における波浪の長期推算システムを構築するための第1段階として、外海やその沿岸部を対象に開発した波浪の長期推算システムをそのまま適用した場合の当該システムの精度を、周防灘西岸の苅田および播磨灘東岸の江井ヶ島で取得された長期の波浪観測資料との比較に基づいて調べるとともに、沿岸代表地点における波候の特性を推定した。その結果、当該システムは、外海やその沿岸部の場合ほどでないにしても、波浪時系列および波候特性に関して観測資料と許容しうる程度の対応を与えることから、瀬戸内海の沿岸地点における全期間および期間別の波高・周期に関する波候統計量の第1段階推定に十分有用であると結論づけた。

1. 緒 言

わが国沿岸では、波浪の気候学的特性、すなわち波候の調査は高密度に配置された沿岸波浪計による長期の波浪観測資料、あるいは高地形解像度条件のもとで、長期の表面風解析資料を入力条件として得られた波浪推算資料(畑田ら, 2000)を解析することによって可能となっている。一方、わが国の内湾・内海のうち瀬戸内海の沿岸では、波浪の長期観測地点が周防灘西岸の苅田港沖(単に苅田と言う)や播磨灘東岸の江井ヶ島などきわめて限られており、しかもここでの波浪は多島海特有の複雑な地形の影響を受けて地点ごとに大きく変化することから、波浪観測資料に基づく波候の調査は容易でない。また、波浪推算に基づく波候の推定は、陸上部の風観測資料を入力条件とした、SMB法などの有義波法の適用によって、実務レベルで行われているが、その精度は必ずしも保証されない。

内海では、波浪の発生要因である海上風の場合が周辺地形の影響を受けて局所性を強くすることから、波浪推算の精度を向上させるためには、地形の影響を考慮した海上風資料の作成が必要となる。これに対して、欧米諸国では1990年代半ばから、わが国では最近、地域気象モデルとWAMやSWANなどの第3世代波浪推算モデルの組み合わせによって、地形の影響を考慮した海上風を入力条件とする波浪推算が行われている。とくに、波浪の長期推算の観点からみると、橋本ら(2002)は東京湾における2年間の波浪推算資料と観測資料の比較に基づいてその精度を検討しているが、現時点では膨大な計算努力に見合うだけの推算精度の向上は今後の課題であるように思われる。

本研究では、瀬戸内海における波浪の長期推算システ

ムを構築するための第1段階として、外海やその沿岸部を対象に開発した波浪の長期推算システム(畑田ら, 2000)をそのまま適用した場合の当該システムの精度を、苅田および江井ヶ島の各観測地点において調べるとともに、任意の代表地点における波浪の長期推算資料を用いてそこでの波候の特性を検討する。

2. 波浪の長期推算システムと資料解析法

(1) システムの概要

本システムは、格子間隔80 kmの北西太平洋格子網上で再編集した1979~2002年の24年間にわたる6時間間隔ECMWF表面風解析・再解析資料(ECMWF風資料)を入力条件として、格子間隔5 kmの北西太平洋大領域と格子間隔0.5~1 kmの波浪推算地点周辺小領域からなる2段階高地形解像度格子網上で、1点浅海モデル(山口ら, 1987)により波浪の長期推算を地点別に行う。

瀬戸内海を対象とする場合、小領域の格子間隔は0.5 km、6時間間隔のECMWF風資料に対する線形補間を通じて得る海上風資料の入力時間間隔は60分、波浪推算の時間間隔は10分であり、中心気圧980 hPa以下の台風に対しては、楕円型気圧分布を仮定して求められる台風モデル風(野中ら, 2000)を60分ごとに組み込む。傾度風の海上風への変換には、台風中心からの距離に応じて変化する係数を乗じる。また、ECMWF風資料は高風速時ほど過小評価の傾向にあるので、風速8 m/sを越える風速時にはその超過風速に0.03を乗じた係数相当分の風速の増強をはかる。

図-1は瀬戸内海の計算格子網および等深線を示す。波浪推算地点は苅田(水深9 m)と江井ヶ島(水深10.5 m)の2観測地点および松山港海岸に属する和気(水深19 m)の計3地点、波浪推算の期間は1979~2002年の24年間、観測資料との比較期間は観測資料が収集・整備されている1991~1998年の8年間(苅田)および1992~2002年の11年間(江井ヶ島)である。計算に用いる周波数データの個数は0.1~1.0 Hzを不等分割した23個、方向データの個数は0~360°を10°で等分割した

* 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
*** 愛媛大学技術専門職員 工学部環境建設工学科
**** 正 会 員 博(工) 愛媛大学契約職員 工学部環境建設工学科
***** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程

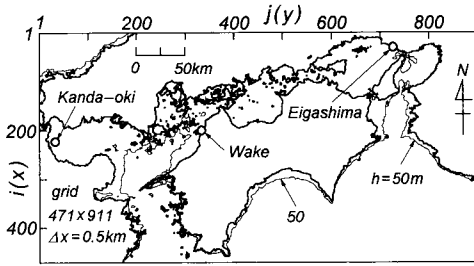


図-1 瀬戸内海の水深格子網と波浪推算地点の位置

37 個である。

図-2 は 3 地点における方向別対岸距離を示す。図-1 および図-2 から明らかなように、いずれの波浪推算地点からも波向線が外海に到達しないので、実質的には陸地境界で囲まれた海域での波浪推算を行うことになる。最大対岸距離の概略値は苅田・江井ヶ島で 80 km、和気で 30 km であり、有意な対岸距離をもつ方向の範囲は和気で狭く、苅田、江井ヶ島の順に広がる。

(2) 資料解析の方法

波候解析は、累年および月単位で実施する。有義波高(波高) H_s に関して、対象となる波候統計量は、平均波高 $\bar{H}_s$ と標準偏差 H_{ss} 、波高 0.5 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_{0H} 、および両資料間の差の 2 乗平均平方根 σ_H 、である。有義波周期(周期) T_s に関しても同様の波候統計量(高波出現率を除く)と誤差統計量を求める。瀬戸内海における波高、周期は外海に比べて小さいことから、とくに周期に対する観測資料の精度は高くないと考えられる。そこで推算・観測資料の比較にお

いては、 $T_s > 10(H_s)^{1/2}$ を満たす波浪観測資料を削除する。

3. 推算結果の考察

(1) 苅田における比較

図-3 は 1993 年 7 月～12 月の 6 ヶ月間における波高・周期時系列に対する推算資料と観測資料の比較を示す。波高に関して、推算資料は台風や低気圧あるいは小気象擾乱の通過に伴い増減を繰り返す観測資料の挙動と比較的よく符合する。とくに、8 月 9 日～10 日の台風 9307 号および 9 月 3 日～4 日の台風 9313 号の通過に伴う波浪の急発達と急減衰について、推算資料は観測資料とよく似た挙動を与える。これは台風モデル風の組込みによる入力風速の増強によるところが大きい。一方、周期に関しては、苅田における波浪が風波を主体とすることから、推算周期は推算波高に相当する増減を繰り返すのに対して、観測周期は細かく変動するだけであまり変化しない。この原因の 1 つとして、低波高に対応する周期観測資料の精度が不足している可能性を指摘できよう。

図-4 は 2 時間間隔の波高・周期に対する推算資料と観測資料の散布図である。波高に関して個々の資料のばらつきは小さくないが、両者は平均的にある程度の対応を示す。因みに、波高誤差統計量である相関係数は $\rho_H = 0.639$ 、原点を通る相関直線の勾配値は $a_{0H} = 0.881$ 、2 乗平均波高誤差は $\sigma_H = 0.18$ m であるから、推算波高資料は許容しうる程度の精度をもつ。一方、周期に関しては、波高よりばらつきが大きく、等値線は丸みを帯びる。これは相関係数が $\rho_T = 0.281$ をとることからも推測される。しかし、原点を通る直線の勾配値は $a_{0T} = 0.983$ 、2 乗平均周期誤差は $\sigma_T = 0.7$ s であるから、全体的には、推算資料の精度はそれほど低くない。

表-1 は波高・周期に関する累年波候統計量と誤差統計量の一覧である。推算資料は波高・周期に関する各種波候統計量について観測資料とよく対応する。波候誤差統計量もある程度以上の精度を示唆するが、周期に関しては相関係数の値が小さい点が目につく。これは、図-3 でみたように、観測周期が推算周期ほど波高の増減に対応して変化しないため、個々の資料が散布図で比較的幅広く分布し、結果的に低い相関を与えることによる。

図-5 は累月平均の波高・周期と高波出現率を表す。波高・周期のいずれについても、両者の平均的挙動は比較的良好に符合するが、推算資料による波候統計量は弱い U 字型月変化を示し、夏季において観測資料に基づく結果より若干小さいことから、両者の月変化の挙動がやや異なっている。

図-6 は各種月別波高統計量(H_{s10} 、 H_{s3} 、 $\bar{H}_s$ 、 H_{ss})の経月変化に対する比較を示す。推算値と観測値の隔たり

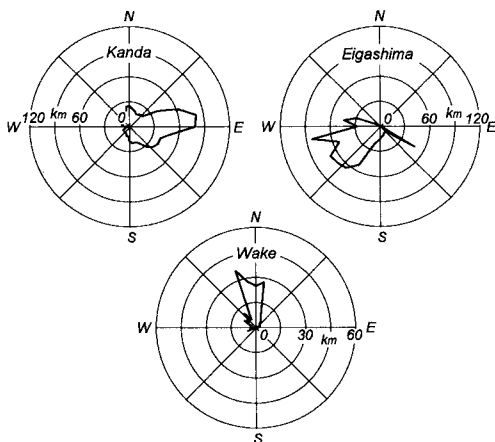


図-2 波浪推算地点における方向別対岸距離

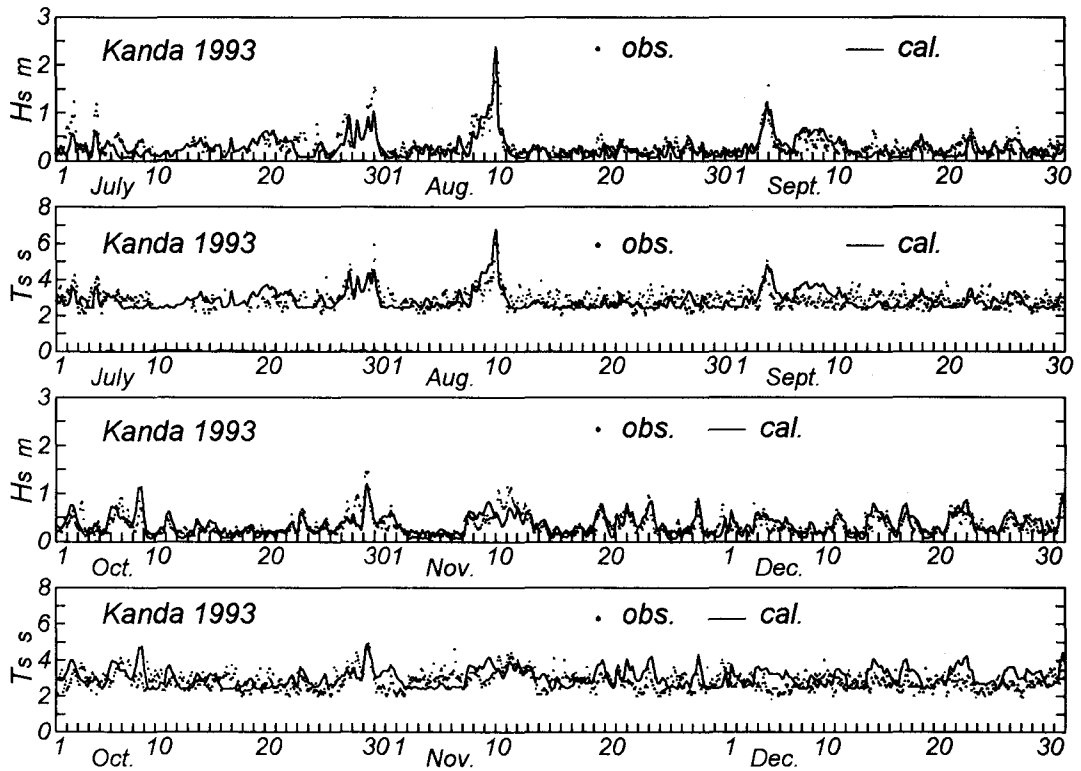


図-3 推算資料および観測資料による波高・周期時系列 (荻田)

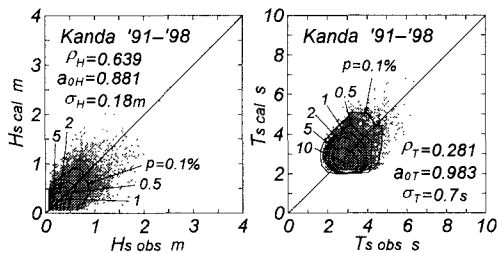


図-4 特別波高および周期資料の比較 (荻田)

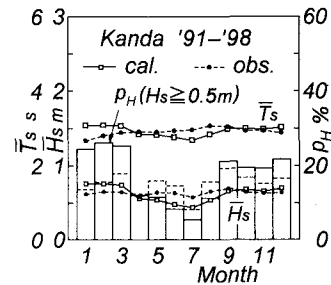


図-5 累月波候統計量の比較 (荻田)

表-1 累年波候統計量と誤差統計量の一覧 (荻田)

W.H.	obs.	cal.	W.T.	obs.	cal.
H_{s10} (m)	0.83	0.79	T_{s10} (s)	3.9	4.1
H_{s3} (m)	0.55	0.56	T_{s3} (s)	3.5	3.5
$\bar{H}_s$ (m)	0.32	0.31	$\bar{T}_s$ (s)	2.9	2.9
H_{ss} (m)	0.22	0.22	T_{ss} (s)	0.5	0.5
ρ_H	0.153	0.174			
ρ_H	0.639		ρ_T	0.281	
a_{0H}	0.881		a_{0T}	0.983	
σ_H (m)	0.18		σ_T (s)	0.7	

Kanda '91~'98

が少なからず見出されるけれども、推算資料は、全般的に冬季に大きく、夏季に小さい各波高統計量に関して、

観測資料と比較的よく符合する。これは図-7の月別1/3最大波高 H_{s3} および平均波高 $\bar{H}_s$ の相関図($\rho(H_{s3})$, $\rho(\bar{H}_s)$:相関係数, $a_0(H_{s3})$, $a_0(\bar{H}_s)$:原点を通る相関直線の勾配値)において例示される。4種類の波高統計量に対する相関係数は0.63~0.70, 原点を通る直線の勾配値は0.90~0.98の値をとる。すなわち、推算資料と観測資料に基づく各波高統計量の相関はあまり高くないが、平均的な対応は比較的良好。

(2) 江井ヶ島における比較

表-2は累年波候統計量と誤差統計量の一覧である。波高について、推算資料は観測資料と比べて波高統計量のうち、1/10最大波高 H_{s10} をやや小さく、1/3最大波高

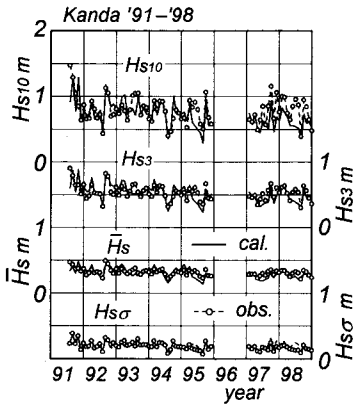


図-6 月別波高統計量の経月変化の比較 (刈田)

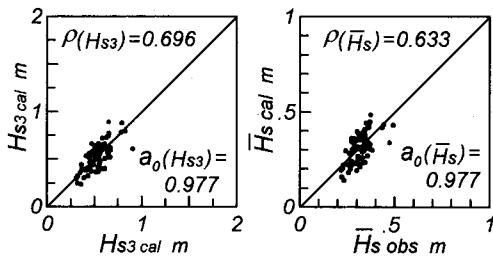


図-7 月別波高統計量の比較 (刈田)

H_{s3} および高波出現率 p_H を過大に評価するが、平均波高 $\bar{H}_s$ と標準偏差 $H_{s\sigma}$ についてはよく符合する。誤差統計量でみれば、相関係数は $\rho_H = 0.572$ 、原点を通る直線の勾配値は $a_{0H} = 0.866$ 、2乗平均誤差は $\sigma_H = 0.18$ m であるから、推算資料の再現性は十分と言えないまでも、ある程度確認される。一方、周期について、推算資料は観測資料と比べていずれの周期統計量に対しても $0.3 \sim 0.5$ s 小さい値を与え、とくに、平均周期に対してその傾向が著しい。これは、低波高時の推算周期がほぼ一貫して観測周期より 0.5 s 程度低い値をとるためである。江井ヶ島と同様に風波が卓越する刈田では、推算周期と観測周期が比較的良好な対応を示す事情を考慮すると、直径 2.5 m のパイによる低波高時の観測周期資料の精度が必ずしも高くないことを示唆するのかもしれない。あるいは、周辺の強い潮流の影響も要因として考えられる。また、誤差統計量は推算周期と観測周期のある程度の相関と、推算周期が観測周期より全体的に若干小さい傾向を示唆する。

図-8 は累月波候統計量の比較を示す。推算資料はいずれの月の平均波高に対しても観測資料とよく一致するが、高波出現率に対して過大な値を与える。また平均周期に対して、推算資料は観測資料と比べて、いずれの月でも $0.5 \sim 0.8$ s 上まわる。これは上述のように、低波高

表-2 累年波候統計量と誤差統計量の一覧 (江井ヶ島)

W.H.	obs.	cal.	W.T.	obs.	cal.
H_{s10} (m)	0.74	0.70	T_{s10} (s)	4.4	4.1
H_{s3} (m)	0.45	0.51	T_{s3} (s)	3.9	3.6
$\bar{H}_s$ (m)	0.27	0.27	$\bar{T}_s$ (s)	3.4	2.9
$H_{s\sigma}$ (m)	0.19	0.20	$T_{s\sigma}$ (s)	0.5	0.6
ρ_H	0.098	0.148	—	—	—
ρ_H	—	0.572	ρ_T	—	0.434
a_{0H}	—	0.866	a_{0T}	—	0.835
σ_H (m)	—	0.18	σ_T (s)	—	0.8

Eigashima '92~'02

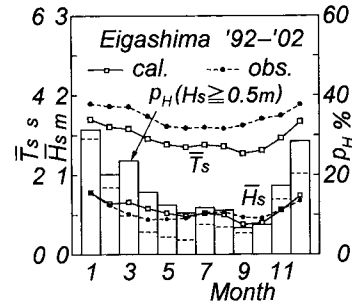


図-8 累月波候統計量の比較 (江井ヶ島)

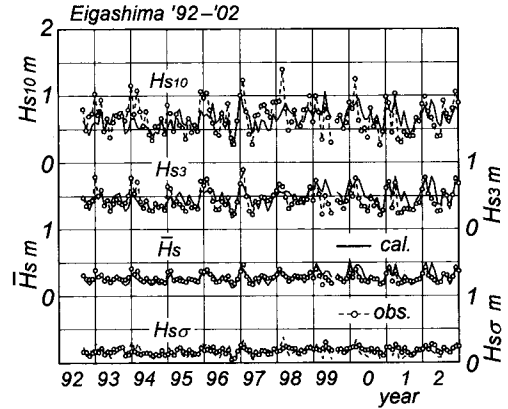


図-9 月別波高統計量の経月変化の比較 (江井ヶ島)

時において観測周期が推算周期より同程度に大きいためである。

図-9 は月別波高統計量の経月変化に対する比較図である。推算資料はいずれの波高統計量に対しても、冬季に大きく夏季に小さい値をとる観測資料と類似した経月変化を与えるが、高波高部を代表する統計量ほど両者の乖離が目立ち、とくに春季にその度合いが大きい傾向にある。

図-10 は月別 $1/3$ 最大波高 H_{s3} と平均波高 $\bar{H}_s$ について推算資料と観測資料の相関を表す。各月の資料は 45° 直線のまわりにややばらついて図示されるが、平均的な対

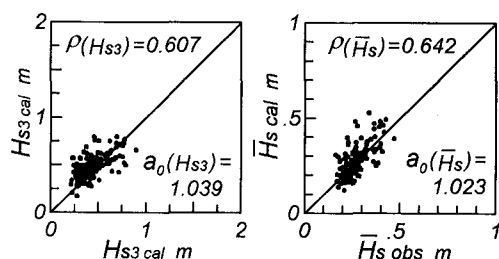


図-10 月別波高統計量の比較 (江井ヶ島)

応は比較的良好である。因みに、相関係数は H_{s3} と $\bar{H}_s$ の順に 0.607 と 0.642、原点を通る直線の勾配値は 1.039 と 1.023 であるから、これらの数値は上記の特徴を裏付ける。

以上、江井ヶ島における推算資料の精度は荻田と比べて若干低いけれども、これらは波候の定性的のみならず定量的評価にも、ある程度利用可能と考えられる。

(3) 和気における波候の検討

斎灘西端海域に面する松山市和気海岸は、隣接する堀江海岸と併せて全長約 800 m の砂浜海岸である。ここでは、和気海岸における波候の特性を 24 年間の波浪推算資料に基づいて検討する。まず、累年平均値について波候特性をみると、和気における最大対岸距離は約 30 km で、しかもその方向が NNW~NNE の狭い範囲に限定されることから、波高に対して $H_{s10}=0.50$ m, $H_{s3}=0.35$ m, $\bar{H}_s=0.21$ m, $H_{s\sigma}=0.12$ m, 周期に対して $T_{s10}=3.5$ s, $T_{s3}=3.1$ s, $\bar{T}_s=2.5$ s, $T_{s\sigma}=0.4$ s, 高波出現率 $p_H=4.1\%$ となっており、かなり小さい。

図-11 は累月平均の波高・周期および 0.5 m 以上の高波出現率を表す。平均波高は 0.15~0.27 m, 平均周期は 2.3~2.8 s, 高波出現率は 0.1~8.2% となっており、波高は冬季・秋季で高く、夏季に低い。

図-12 は全波高資料および波高 0.5 m 以上の高波資料の方向別出現率を表す。全波高資料は NW~NNE で若干大きい出現率をもつものの、ほぼ全方向で同程度の出現率を与えるのに対して、高波資料は方向別対岸距離に対応して N を卓越波向とし、NNW~N で高い出現率を示す。和気における風観測資料に基づく強風の卓越風向は NE であり、NNW~ENE で出現率が高いことから、方向別対岸距離の特性を考慮すると、高波と強風の出現方向の範囲はほぼ符合する。

4. 結 語

以上の考察によれば、ECMWF 風資料を入力条件とする波浪の長期推算システムは、外海やその沿岸部に対する場合ほどでないにしても、瀬戸内海の沿岸地点にお

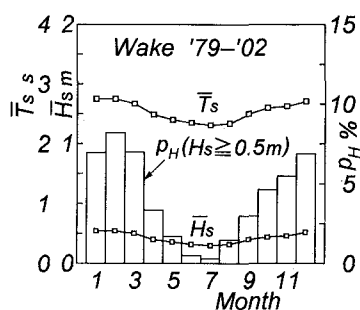


図-11 累月波候統計量 (和気)

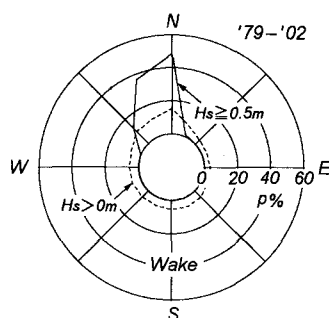


図-12 方向別波高出現率 (和気)

る全期間および期間別の波高・周期に関する波候統計量の第 1 段階推定に十分有用であると結論できる。しかし、現状の海上風条件のもとでは、本研究で得た以上の推算精度を期待できないので、推算精度のさらなる向上のためには、局所地形の影響を考慮した海上風資料の作成が今後の重要な課題となる。

最後に、NOWPHAS により収集された荻田における波浪観測資料を利用して戴いた(財)沿岸開発技術研究センターならびに江井ヶ島における波浪観測資料を提供戴いた国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所と海象年表を提供戴いた国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室に謝意を表する。

参 考 文 献

- 野中浩一・山口正隆・畑田佳男・伊藤吉孝 (2000): 拡張型確率的台風モデルを用いた波高の極値推定システム, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 271-275.
- 橋本典明・杉本 彰・川口浩二・宇都宮好博 (2002): 局地気象モデルと第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 201-205.
- 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.