

ECMWF 風を用いた長期波浪推算システムの適用性の検討

山口正隆*・畑田佳男**・松木太郎***

1. 緒 言

波浪の長期変動, すなわち波候を評価するために, 山口ら (1991, 1992, 1995) は不規則に配置された多地点での気圧資料を入力データとする Bijvoet (1957) の海上風推算モデルとエネルギー平衡方程式に基づいて波浪推算点での方向スペクトルの経時変化を計算する 1 点浅海波浪推算モデルを組み合わせた, 長期浅海波浪推算システムを構築し, わが国沿岸における 2~10 年間の波浪観測結果との比較から, その適用性を明らかにしてきた。しかし, 気圧資料の作成に膨大な労力と時間を必要とするうえに, 気象状況の複雑な太平洋では, 海上風, したがって波浪の推算精度が十分でない場合も見受けられた。

近年, ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; 中規模範囲気象予報ヨーロッパセンター) では, 地形解像度の高い表面風の解析値を提供するようになっているので, これを入力データとすれば, 海上風推算に係わる大幅な省力化が可能になり, しかも従来のシステムより高い精度の波浪推算が期待される。そこで, 本研究では, 従来の海上風推算モデルを ECMWF 解析値に基づく表面風データ (以後, ECMWF 風と云う) に置き換えた長期浅海波浪推算システムを再構築し, 気象庁所轄のわが国沿岸 11 波浪観測地点における 9 年間 (1986 年~1994 年) の波浪推算結果と観測結果の比較に基づいて, 新しいシステムの適用性を検討する。

2. 長期浅海波浪推算システムの概要

(1) 海上風データ

本システムでは, ECMWF 風が海上風に対する入力データとして与えられる。本システムで使用する ECMWF 風 (10 m 高度風成分) は世界標準時 (UTC) 0 時, 6 時, 12 時, 18 時の 1 日 4 回得られている。その空間解像度は, ① 1.875° ; 1985 年 1 月 1 日~1985 年 4 月 30 日, ② 1.125° ; 1985 年 5 月 1 日~1991 年 9 月 16 日,

③ 0.5625° ; 1991 年 9 月 17 日~, というように, 最近になるほど高くなっており, 今回入手した ECMWF 風はこれに対応する。したがって, ECMWF 風の精度は上記の期間ごとに異なると推測されるけれども, 今回の検討ではこの影響を無視する。

波浪推算では, 北西太平洋に設けた格子間隔 80 km の格子網上の風を用いることから, まず, 緯度・経度座標と直交座標の変換数値表を用いて, 80 km 格子網上各格子点の緯度・経度座標を内挿したのち, 各格子点位置での海上風成分を緯度・経度座標格子点における ECMWF 風成分に対する 2 次元 1 次補間式の適用によって推定する。波浪推算のために準備した海上風成分データは, 北西太平洋領域を囲む格子間隔 80 km の格子網上での, 1985 年 1 月 1 日 0 時 (UTC) ~1994 年 12 月 31 日 18 時の 9 年間における 6 時間ごとのデータである。

(2) 波浪推算条件

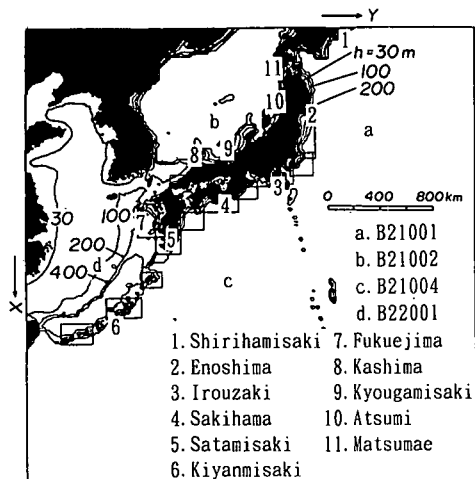
波浪推算地点は, 気象庁が沿岸波浪計を設置している尻羽岬 (水深 47 m), 江ノ島 (57 m), 石廊崎 (50 m), 佐喜浜 (48 m), 佐多岬 (45 m), 喜屋武岬 (51 m), 福江島 (51 m), 鹿島 (47 m), 経ヶ岬 (47 m), 温海 (45 m) および松前 (49 m) の合計 11 地点であり, これらの地点はほぼ日本全国沿岸に分布する。

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。波浪推算は, この領域を格子間隔 $\Delta x = 5$ km で 673×673 に分割した大領域水深格子網に, 波浪推算点周辺海域を格子間隔 $\Delta x = 1$ km あるいは 0.5 km (四国沿岸領域) で分割した小領域水深格子網を組み込んだ高地形解像度をもつ 2 段階水深格子網において行う。図-1 は波浪推算に用いる大領域とこれに組み込んだ小領域の範囲, 等深線分布および海洋観測ブイと波浪推算地点の位置を示したものである。実際の波浪推算では, 関東以北の太平洋岸に到達するうねりをよりの確に評価するため, 図-1 の東端を東に 800 km 拡大した領域を用いる。また, 大領域と同じ座標系で表した日本海沿岸小領域水深格子網が用意されていないので, 日本海沿岸における波浪推算では, 大領域水深格子網のみを用いる。

* 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 愛媛大学大学院理工学研究科



図一 計算対象領域、ブイ設置位置および波浪推算地点

計算に用いる周波数データは $f=0.04\sim 0.1$ Hz 間を 0.005 Hz で等分割した 13 個および $f=0.1\sim 0.5$ Hz 間を高周波側ほど粗い間隔 ($0.01\sim 0.1$ Hz) で不等分割した 10 個の合計 23 個の周波数値, 方向データは各波浪推算地点における波向線計算結果を参考にして決定した成分波の到達範囲を等分割した 19~37 個の方向値 (周波数によらず一定), である。ただし, 0.3 Hz より高周波側の方向データは, これらの成分波が吹送距離によらず全風向で発達しうることを考慮に入れて, $0^\circ\sim 360^\circ$ を 37 個に等分割した方向値とする。方向は 0° を N として反時計回りに定義される。

波浪推算は, 時間に関する線形補間を通じて 1 時間ごとに格子間隔 80 km の格子点上で算出した海上風を, 各成分波に対する波向線上波浪計算点に 2 次元 1 次補間することによって, 計算時間間隔 $\Delta t=1$ hr で行う。なお, 波候解析では, (有義) 波高・周期, 平均波向の期間別平均値や出現率のほか, 周波数スペクトル, 方向別エネルギーおよび方向スペクトルの期間平均値を求める。

3. ECMWF 風の精度の検討

ECMWF 風の最小地形解像度は 0.5625° であるから, 陸地地形の影響が詳細に考慮されているとは云えない。

したがって, ECMWF 風の精度の検討には, 地形の影響をあまり受けない外洋での風観測資料を用いる必要がある。わが国周辺海域には, 気象庁によって 4 基 (1991 年以降 3 基) の海洋観測ブイが配置されているので, これらのブイによる 1986 年~1994 年の 9 年間の風観測資料との比較を行う。4 基のブイは B 21001 (仙台沖), B 21002 (日本海), B 21004 (四国沖), B 22001 (東シナ海) であるが, B 21001 (仙台沖) は 1991 年以降撤去されている。ブイ位置における ECMWF 風は 80 km 格子網上の ECMWF 風資料に 2 次元 1 次補間式を適用することによって算出する。また, B 21001 の位置は 1987 年以前と 1987 年以降 (約 160 km 程南東に移動) で異なっているが, ここでは, その位置を資料期間の長い 1987 年以降の位置とする。

表一はブイ位置における風速・風向の累年平均誤差統計量の一覧である。表は風速・風向資料の平均値 ($\bar{U}$, $\bar{\theta}$), 標準偏差 (U_σ , θ_σ), ECMWF 風と観測風の差の標準偏差 (σ_U , σ_θ) および相関係数 (ρ_U , ρ_θ) よりなり, 添字 cal および obs はそれぞれ ECMWF 風および観測風を意味する。これよりつぎのことが云える。

① 平均風速は全般的によく対応する。ただし, ECMWF 風は, 東シナ海ブイ位置および日本海ブイ位置では平均風速 $\bar{U}$ に関して, また, いずれのブイ位置でも風速の標準偏差 U_σ に関して観測風より 0.5 m/s 程度小さい値を与える。

② ECMWF 風速と観測風速の差の標準偏差 σ_U は 2~2.5 m/s の範囲にあるが, 仙台沖や日本海でやや大きい。

③ 風速の相関係数 ρ_U は 0.76~0.82 の範囲にある。風速の精度は東シナ海ブイや四国沖ブイが位置する西南海域で高い。

④ 風向の平均値 $\bar{\theta}$ および標準偏差 θ_σ はかなりよく符合しており, しかも相関係数は 0.91~0.95 の範囲にあるから, 風向の精度も風速以上に高い。

⑤ ECMWF 風と観測風の風向に対する標準偏差 σ_θ は $37\sim 48^\circ$ の範囲にあり, 見かけ上かなり大きい。これは, 風向が $0\sim 360^\circ$ の区間で定義されており, その結果周期性が考慮されていないため, 風向との相違が極端に拡大されていることによると推測される。

表一 風速・風向の累年平均誤差統計量

Buoy	$\bar{U}_{obs}$	$\bar{U}_{cal}$	$U_{\sigma obs}$	$U_{\sigma cal}$	σ_U	ρ_U	$\bar{\theta}_{obs}$	$\bar{\theta}_{cal}$	$\theta_{\sigma obs}$	$\theta_{\sigma cal}$	σ_θ	ρ_θ
21001	6.8	7.0	3.9	3.5	2.5	.76	185	190	105	111	46	.91
21002	6.7	6.1	3.8	3.0	2.4	.79	187	203	113	119	48	.93
21004	6.4	6.5	3.5	3.1	2.0	.82	196	205	102	110	40	.93
22001	7.1	6.5	3.5	2.9	2.2	.81	225	233	111	116	37	.95

* $\bar{U}_{obs}$, $\bar{U}_{cal}$, $U_{\sigma obs}$, $U_{\sigma cal}$, σ_U : m/s, ** $\bar{\theta}_{obs}$, $\bar{\theta}_{cal}$, $\theta_{\sigma obs}$, $\theta_{\sigma cal}$, σ_θ : degree

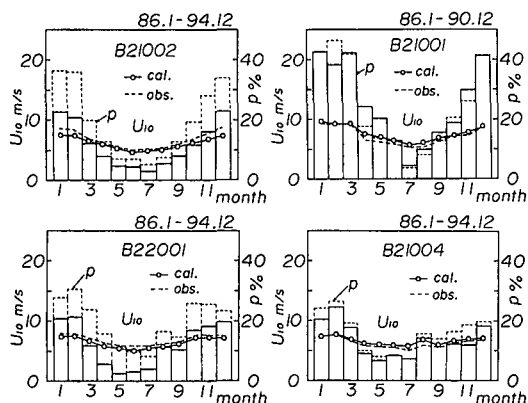


図-2 月平均風速および強風出現率の比較

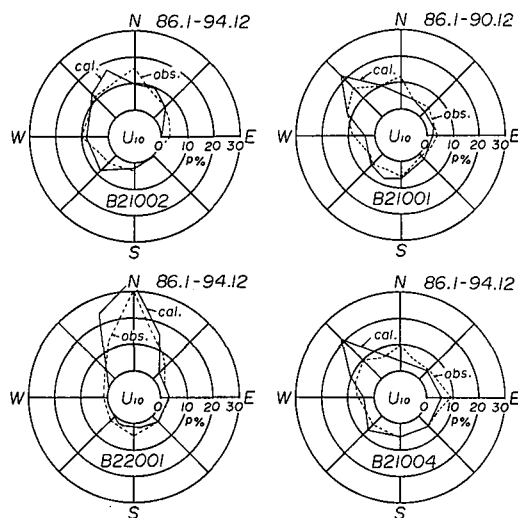


図-3 風向別強風出現率の比較

図-2は10 m高度風速 U_{10} の累年月平均値および10 m/s以上の強風の累年月別平均出現率 p に関する比較図である。ECMWF風の月平均風速および強風出現率は、仙台北位置や四国沖北位置で観測結果とかなりよく符合するのに対して、日本海北位置では1~3月と10~12月、東シナ海北位置では年を通して観測結果よりやや小さい。とくに、この傾向は当然のことながら、強風出現率により明瞭に現れる。

図-3は10 m/s以上の強風の16方位風向別出現率に関する比較図である。ECMWF風は観測風に比べてやや特定の方向に集中した出現率を示す傾向にあり、卓越風向が明瞭な東シナ海北位置を除く3つの北位置で、若干の相違がみられるが、全般的には、ECMWF風と観測風の風向別強風出現率はよく符合している。

以上の検討から、ECMWF風の精度はかなり良好であることが理解される。

4. 長期波候に関する比較検討

ここでは、気象庁11沿岸波浪観測地点で取得された1986年~1994年の9年間における3時間ごとの有義波観測資料に基づく波候解析結果と、これに対応して3時間ごとに抽出した波浪推算資料に基づく波候解析結果との比較を行う。

図-4は11地点における有義波高 $H_{1/3}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の累年月別平均値および2 m以上の高波出現率 p の経月変化を示したものである。日本海側では、冬季季節風に伴う波浪が卓越し、夏季には静穏な海況が持続するため、波浪の経月変化はU字型分布を示す。東シナ海側では、冬季季節風に加えて秋季の低気圧および夏季から秋季の台風による波浪の発達がみられるため、波浪の経月変化図におけるU字型分布の特徴が弱くなる。一方、太平洋岸北東部では、春先では低気圧、秋季では低気圧・台風に伴う波浪が卓越し、波浪の経月変化はM字型分布となる。また、太平洋岸西南部では、夏季から秋季の台風に伴う高波のために、夏季および秋季の波浪の規模が大きい特徴をもち、太平洋岸中部の石廊崎では、太平洋岸北東部と西南部の波候の中間的变化を示す。

本システムは上記の日本沿岸における波候特性を全般的によく再現するが、細部においては、いくつかの相違がみられる。すなわち、日本海沿岸から東シナ海沿岸にかけては、月平均波高および高波出現率に対する推算結果と観測結果の対応はかなり良好であるが、月平均周期の推算結果は鹿島を除いて観測結果より約0.5 s大きい。太平洋岸北東部の尻羽岬や江ノ島では、月平均波高および高波出現率が過大評価されており、江ノ島における月平均周期に対する精度も不足している。これら両地点、とくに尻羽岬は計算領域の北東端近くに位置することから、計算領域の制約により波浪推算精度が不足する可能性もある。石廊崎以西の太平洋岸西南部では、周辺地形が複雑な佐多岬において高波出現率が過大評価されている点を除き、本システムの再現性は良好である。

図-5は江ノ島、佐喜浜、喜屋武岬、福江島、鹿島および温海の6地点における階級別波高出現率の比較図である。日本海沿岸に位置する温海では、夏季に静穏な海況が持続することから、低波高部の出現頻度が高く、波高の増加とともに出現頻度は急減する。日本海沿岸西南部に位置する鹿島や東シナ海沿岸の福江島でも、同様の傾向がみられるが、西南部に向かうほど最低波高部の出現頻度が相対的に減少し、2番目の低波高帯の出現頻度が高くなる。本システムはこうした日本海沿岸から東シナ海沿岸にかけての波高出現率の変化をよく再現する。一方、太平洋岸では、半閉鎖海域である日本海や東シナ海と異なり、静穏時においてもある程度の波高をもつ波浪

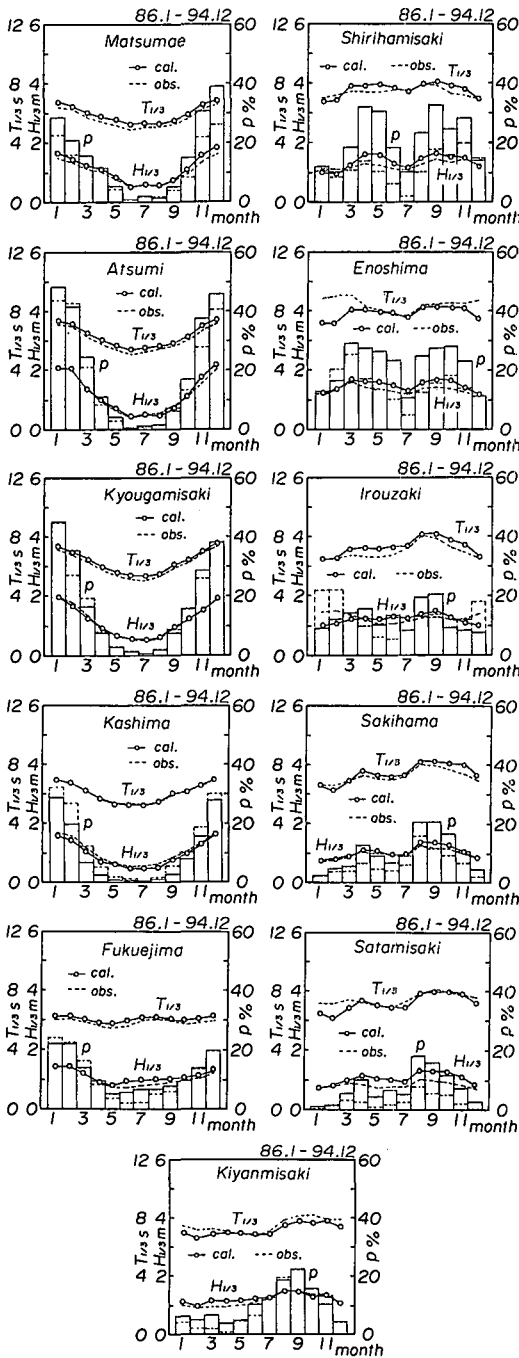


図-4 月平均有義波および高波出現率の比較

が常時存在するので、最低波高部の出現頻度がよく江ノ島や喜屋武岬で低い。また、喜屋武岬や佐喜浜では、夏季から秋季の台風に伴い異常波浪が生起するが、その頻度は低いので、波高出現率図にほとんど影響しない。これらの地点では、むしろ常時波浪に伴う0.5~1.5 m

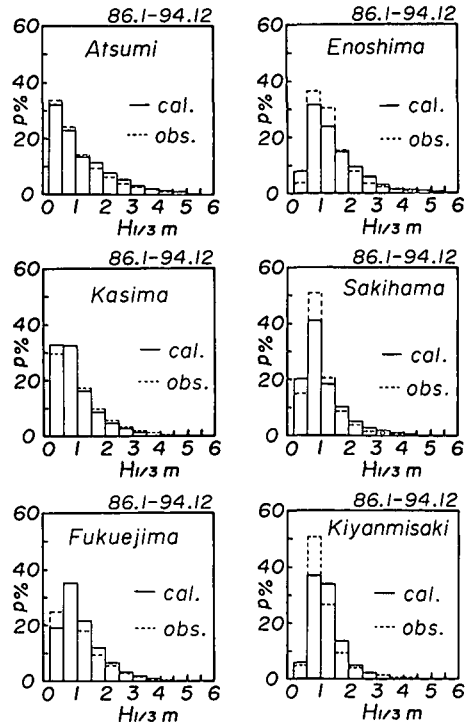


図-5 階級別高波出現率の比較

の波高帯における出現頻度が高く、分布形状は尖った形を示す。しかし、春季と秋季の低気圧に伴う波浪が卓越する江ノ島では、高波高の出現頻度が高いので、波高出現率の分布形状は上記の2地点に比べてなだらかである。推算結果はこうした挙動を示す観測結果と比較的良好に符合するが、太平洋における複雑な気象条件を反映して、いくぶんの偏りが最大出現率近傍でみられる。

図-6は上記の6地点における波高と周期の相関分布に関する推算結果と観測結果の比較図である。半閉鎖海域である日本海の沿岸では、季節風や低気圧に伴う風波が卓越し、波高・周期は風速の増減にตอบสนองする。その結果、波高と周期の相関が高くなり、波高と周期の相関分布の等値線は斜め上方に鋭く伸びた形状をとる。一方、前面が大きく開放されている太平洋側では、静穏時においても低波高・長周期のうねり性波浪が存在するため、周期の分布幅が広く、相関分布の等値線形状は丸みを帯びる。また、東シナ海沿岸では、冬季・秋季の季節風や低気圧に伴う風波と夏季のうねり性波浪の存在によって、相関分布の等値線は日本海側と太平洋側の中間的な形状を示す。本システムは以上に述べた相関分布の等値線形状をよく再現するが、江ノ島のように、ピークが短周期側に位置し、周期の分布幅も狭いため、観測結果より尖った等値線形状を与える地点もある。

図-7は11地点における累年平均波高の推算値

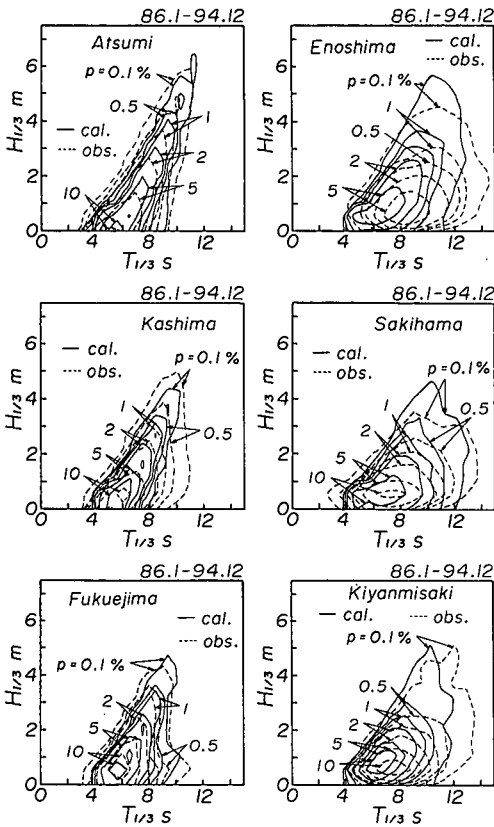


図-6 波高と周期の相関分布の比較

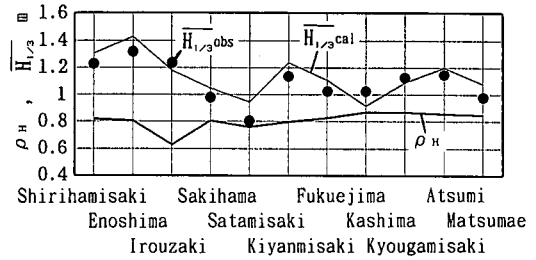


図-7 わが国沿岸での累年平均波高の比較

者に良好な一致がみられることを付記する。

5. 結 論

本研究では、ECMWF風の精度ならびにECMWF風を入力データとする長期浅海波浪推算システムの波候推定に対する妥当性を、わが国周辺海域に配置された4基のブイによる風観測資料およびわが国沿岸のほぼ全域に配置された気象庁11沿岸波浪計による波浪観測資料との比較に基づいて明らかにした。このことから、新しいシステムはわが国沿岸のみならず、長期波浪観測資料が得られていない周辺諸外国沿岸における波候の推定にも有効であると推測される。今後、平均波向や周波数スペクトル、方向別エネルギーおよび方向スペクトルなどのスペクトル特性に関する波候や、より長期間(18年)の波候に対する本システムの適用性を検討する予定である。

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

参 考 文 献

- 山口正隆・畑田佳男・稲垣孝佳・旭置武志 (1991): 東シナ海沿岸での波候推定に対する長期浅海波浪推算システムの適用性, 自然災害科学 J. JSNDS, 10-3, pp. 187-199.
- 山口正隆・畑田佳男・旭置武志 (1992): 日本海沿岸での波候推定に対する長期浅海波浪推算システムの適用性の検討, 自然災害科学 J. JSNDS, 11-3, pp. 157-174.
- 山口正隆・畑田佳男・大迫誠吾 (1995): 長期浅海波浪推算システムの適用性の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 331-335.
- Bijvoet, H. C. (1957): A new overlay for the determination of the surface wind over sea from surface weather charts, KNMI, Mededelingen en Verhandeligen, Vol. 71, pp. 1-35.

($\overline{H_{1/3cal}}$) と観測値 ($\overline{H_{1/3obs}}$), および推算波高と観測波高の相関係数 (ρ_H) を、太平洋岸, 東シナ海沿岸および日本海沿岸の地点順に示したものである。種子島や屋久島が南方前面に位置する佐多岬, 紀伊半島を東方側面にひかえた四国東部沿岸の佐喜浜, 隠岐諸島が北方前面に位置する鹿島や松前半島先端付近に位置する松前では, それぞれの地点特有の地形による遮蔽効果を受けるため, 累年平均波高は外海に面する地点に比べて低い。推算平均波高は, やや過大な値を与える佐多岬を除く地点で, 観測平均波高と比較的良好に一致する。相関係数は, 風および波浪条件が日本海に比べて複雑な太平洋側でやや小さいが, それでも石廊崎を除けば0.8前後であるから, 推算精度はかなり高いと云える。

なお, 紙数の関係上, 有義波時系列に対する推算結果と観測結果の比較検討結果を与えていないけれども, 両