

確率的台風モデルに基づく台風時浅海波浪の 極値推算システムの適用性

山口正隆* ・畑田佳男**・大木泰憲***
西村教博****・中村雄二*****

1. 緒 言

海上空港や海上発電所など社会的に重要な沿岸・海洋施設の被災可能性をできるだけ低減するためには、数百年以上の再現期間に対する確率波高を精度よく推定する必要がある。山口ら (1994 b) は、台風に伴う波高の極値を推定する手法として、「確率的台風モデルに基づく台風時波浪の極値推算システム」を開発したが、波浪推算を 1 点法に基づく深海波浪推算モデル (1 点深海モデル) に依っているため、周辺地形や海底地形の影響を受ける浅海部任意地点における適用に制約がある。

本研究では、当該システムのうち、波浪推算の部分を 1 点浅海モデルに変えて高地形解像度水深格子網上での浅海波浪推算を可能にしたうえで、わが国太平洋岸西部 9 波浪観測地点における 1000 年間 1 回および 50 年間 100 回相当の台風を対象とした浅海波浪シミュレーションから、超長期の再現期間に対する確率波高とその標準偏差を求めるとともに、既往台風に対する波浪追算結果および観測結果に基づいて推定した波高の極値との比較から、本システムの有効性を検討する。

2. 確率的台風モデルに基づく台風時浅海波浪の極値推算システム

2.1 システムの概要

本システムは、確率的台風モデルに基づく台風属性 (台風中心の位置、中心気圧、台風半径) 資料の発生、台風モデル法に基づく海上風推算、1 点浅海モデルに基づく波浪推算、積率法、PWM 法、最小 2 乗法に基づく台風極大波高資料および台風年最大波高資料への Gumbel 分布、3 母数 Weibull 分布のあてはめと確率波高およびその標準偏差の推定、より成る。各モデルの概要を示せば、つぎのようである。

(1) 確率的台風モデル

本モデル (山口ら, 1994 a) は過去 41 年の間で中心気

圧 980 hPa 以下に発達した 320 個の台風属性資料の統計解析に基づいて作成した台風属性の確率的発生モデルである。このモデルでは、台風年発生数を平均値 7.8 のポアソン分布、境界上の台風属性の平均値を 1 次元重み付きスプライン関数、対象領域内の台風属性および台風属性変化量間の関係を回帰式で近似するとともに、境界および領域内での平均値からの変動量を資料解析より求められる経験的確率分布で表示する。

確率的台風モデルを 1948 年～1992 年に発生した 390 台風の台風属性資料に置き換えれば、既往台風に対する台風時浅海波浪の極値推算システムになる。

(2) 海上風推算モデル

海上風推算は台風モデル法 (佐藤・合田, 1972) による。海上風算定に必要な諸量は上述の台風属性 (台風半径の推定は Myers 式による) と、緯度によって決まる吹込み角である。計算にあたっては、6 時間間隔の台風属性資料から 1 次補間を通じて 1 時間間隔で得た台風属性資料、あるいは 1 時間間隔の台風属性資料を入力値として海上風を推定する。この場合、10 m 高度における海上風速 U_{10} への補正係数は 0.6 とする。また、摩擦速度 u_* は、Mitsuyasu and Kusaba (1984) の式により求める。

(3) 波浪推算モデル

波浪推算には、計算時間が比較的短く、しかも地形解像度の高い格子網上の計算によって良好な追算精度が得られる 1 点浅海モデル (山口ら, 1987) を使用する。

本モデルのソース関数は、Phillips 機構による風波の発生項、Miles 機構による風波の発達項、底面摩擦項、擬似粘性によるエネルギー減衰項、逆風による減衰項から構成される。また、砕波によるエネルギー減衰の評価は浅海平衡方向スペクトルによる。

境界は陸地境界と開境界から構成される。陸地境界では、方向スペクトルの値を 0 とし、開境界では、Ross のハリケーンモデルに基づく JONSWAP 型周波数スペクトルと $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数の積から、局所風速・風向と台風中心までの距離に応じた方向スペクトル値を与える。

(4) 波高の極値統計解析モデル

確率波高を推定するために、台風極大波高資料 (シミ

* 正 会 員 工 博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科

** 正 会 員 工 修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科

*** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科

**** 正 会 員 山口県庁

***** 正 会 員 工 修 株式会社ハザマ

ュレーション) および台風年最大波高資料(観測・追算) に対して3母数 Weibull 分布および Gumbel 分布をあてはめる。母数は積率法, PWM 法 (Greenwood et al., 1979), 最小2乗法 (合田, 1990) により評価するとともに, 前2者の場合, jackknife 法に基づく確率波高の bias の補正および確率波高の分散(標準偏差)の推定を, 後者の場合, 合田の提案式に基づく標準偏差の推定を行った。

しかし, モンテカルロシミュレーションを用いた検討 (山口ら, 1995) によれば, Gumbel 分布および3母数 Weibull 分布に対して, PWM 法が最適な母数推定法であることなどが明らかになったので, ここでは PWM 法に基づく確率波高および jackknife 法の適用による標準偏差の推定結果を用いる。分布関数選択基準は Q-Q プロットにおける相関係数 ρ (Muir and El-Shaarawi, 1986) である。積率法および PWM 法は厳密な意味では極大波高資料を取り扱えないが, 資料個数=対象年数として年最大波高資料と同様の解析を行う。

2.2 対象台風および計算方法

(1) 対象台風

確率的台風モデルに基づく本システムでは, ポアソン乱数を与えて年発生台風数を決定したのち, 一様乱数を入力することにより各台風についてその台風属性の経時変化を6時間間隔でシミュレートする。しかし, 波浪推算点から離れた経路をとる台風や勢力の弱い台風は波高の極値に寄与しないので, 波浪推算の対象としない。

1000年間相当の台風シミュレーションにおいて各地点で波浪推算を行った台風の数は台風発生数約7800のうち, 3200~3800の間に分布し, 50年間100回相当のシミュレーションでは, これらの数字はそれぞれ約5倍になる。

一方, 既往の台風属性資料を用いた本システムでは, 波浪追算の対象台風は, 台風属性資料が6時間あるいは1時間間隔で準備されている1948年~1992年の390台風のうち, 観測開始以前については, 各波浪推算点に影響を及ぼしたと考えられる毎年2~3個以上の台風, 観測開始以降は全台風であり, その数は150~200になる。

(2) 計算方法

波浪推算で用いる計算格子網は, 西太平洋上に設けた格子間隔 $\Delta x = 5 \text{ km}$ の大領域水深格子網に格子間隔1 km あるいは500 m の小領域水深格子網を各小海域ごとに組込んだ2段階格子網である。図-1は2段階計算領域と各領域の等深線 (h : 水深) および波浪推算・観測点の位置を示す。

わが国太平洋岸での台風に伴う波浪の極値を検討するという立場から, 波浪推算点として, 伊豆大島の波浮(水深49 m), 伊豆半島先端の石廊崎(50 m), 紀伊水道内の

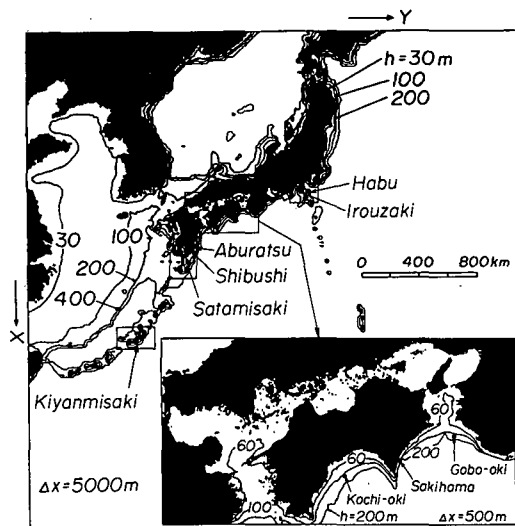


図-1 2段階計算領域と等深線および波浪推算・観測点の位置

御坊沖(170 m), 室戸岬北東側の佐喜浜(48 m), 土佐湾内の高知沖(120 m), 九州宮崎沿岸の油津(48 m), 九州東岸の志布志(35 m), 大隅半島東側の佐多岬(45 m)の8地点および沖縄本島太平洋側の喜屋武岬(51 m)の合計9つの気象庁および運輸省波浪観測地点を選択する。

計算に用いる周波数データは0.04~0.50 Hz間を不等分割した $N_f = 23$ 個, 方向データは波浪推算点に到達する波の方向範囲を等分割した $N_\theta = 19$ 個である。波浪推算は, 海上風および波計算時間間隔を1時間として, 上記の基準に従って各波浪推算点で選択された台風ごとに行い, 台風別最大波高とそのときの周期および波向を求める。ついで, これから, 1000年間(9地点)あるいは50年100回(石廊崎, 高知沖, 喜屋武岬の3地点)相当の台風時波浪のシミュレーションの場合には, 上位1000位あるいは上位50位の台風極大波高資料を, 波浪追算の場合には, 1948年~1992年の45年間における台風年最大波高資料を抽出する。

また, 上記の9波浪観測点における波高観測資料より, 観測年数(11~21年)に相当する台風年最大波高を抽出する。なお, 油津では1年間の欠測を無視して観測年数とする。

3. 台風時波高の極値の推定

3.1 1点浅海モデルの適用性

図-2は, 波浮, 佐喜浜, 高知沖および喜屋武岬における台風別最大波高の追算結果 H_{cal} と観測結果 H_{obs} を比較したものであり, 図中の直線は完全相関を表す直線, 図中の点線は $\pm 20\%$ の誤差を表す直線である。これによると, 波高の小さいところではばらつきが大きいが, 全

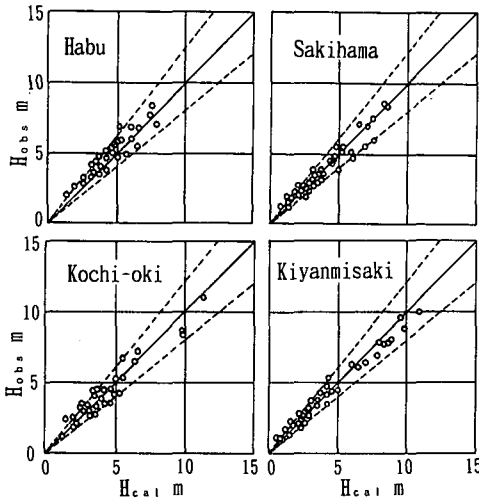


図-2 台風別最大波高に対する追算結果と観測結果の比較

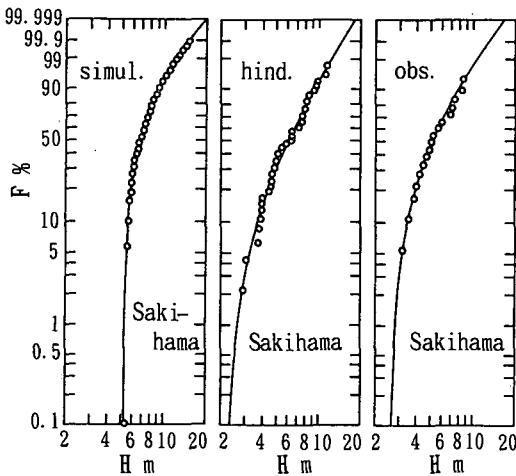


図-3 Weibull 分布のあてはめ結果

般的には $\pm 20\%$ 、高波高時には $\pm 10\%$ の誤差線の中に大部分の資料は図示されることから、比較的良好な追算精度が得られている。すなわち、波高の極値推定に対して問題となるような高波高に対する本モデルの追算精度は、わが国太平洋岸中部から南西部に至る沿岸部のうち、高知沖や喜屋武岬のように外洋に直接さらされた地点のみならず、佐喜浜や波浮のように、周辺地形の遮蔽効果を受ける地点においても比較的良好であるが、平均的にみて 10% 程度の誤差は生じる。

3.2 確率波高およびその標準偏差の推定

図-3は3種類の波高極値資料(非超過確率 F の算出はWeibull公式による)に対する3母数Weibull分布のあてはめ結果を佐喜浜について示したものである。この場合、相関係数 ρ がシミュレーション資料、追算資料お

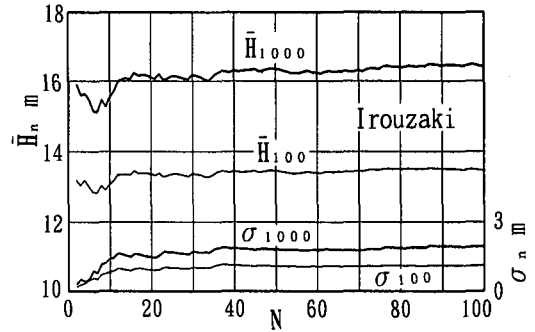


図-4 確率波高および標準偏差に及ぼす計算回数の影響

び観測資料に対してそれぞれ0.9993、0.9921および0.9894であることから明らかなように、統計年数の長い資料ほど3母数Weibull分布によってよく近似されている。

また、シミュレーション資料は極大波高、追算資料は年最大波高に基づいているので、資料個数を統計年数にとる場合、両資料分布は非超過確率の大きい部分でほぼ対応するが、非超過確率の低い部分では異なる形状を示す。一方、年最大波高に基づく追算資料分布と観測資料分布は追算誤差や観測年数の不足のために必ずしも重なり合わず、同じ非超過確率に対する波高が観測資料の場合に低く評価されている。

図-4は50年間相当の台風に対する波浪シミュレーションに基づく100年および1000年確率波高の平均値($\bar{H}_{100}$, $\bar{H}_{1000}$)および標準偏差(σ_{100} , σ_{1000})が計算回数 N (2~100回)とともにどのように変化するかを石廊崎について示したものである。これらは計算回数が50回(2500年間に相当)程度まで漸増減するが、これを越えると、変動幅も減少するし、80回以上ではほぼ一定値に漸近する。以上のことから、統計的に安定した確率波高と標準偏差をシミュレーションから直接評価するためには、50年間相当の台風に対するシミュレーションを少なくとも50回以上行う必要があるといえよう。

表-1は9つの波浪推算点における水深、統計年数 N_y および、シミュレーション資料、追算資料、観測資料に基づく期間最大波高 H_{max} 、相関係数 ρ 、3母数Weibull分布の形状母数 k (Gumbel分布の場合には、Gumを記載)、 n 年(50, 100, 200, 500, 1000年)確率波高 H_n とその標準偏差 σ_n の一覧表であり、50年100回相当のシミュレーション資料では100ケースの n 年確率波高の平均値と標準偏差およびjackknife法の適用によって各ケースごとに推定した標準偏差の平均値が与えられる。また、図-5は標準偏差相当分の変動を含む1000年確率波高の沿岸分布を示す。これらの図表からつぎのことが云えよう。

表-1 統計年数, 期間最大波高, 相関係数, 形状母数, n 年確率波高および標準偏差の地点別一覧

location (depth m)	data	N_y (years)	H_{max} (m)	ρ	k	$H_n \pm \sigma_n$ (m) $n=50, 100, 200, 500, 1000$ years				
						50 y.	100 y.	200 y.	500 y.	1000 y.
Habu (49)	simul.	1000	11.6	0.9994	1.25	9.1 $\pm$ 0.1	9.7 $\pm$ 0.2	10.3 $\pm$ 0.2	11.1 $\pm$ 0.3	11.7 $\pm$ 0.3
	hind.	45	9.2	0.9928	2.44	9.7 $\pm$ 0.5	10.3 $\pm$ 0.6	10.8 $\pm$ 0.7	11.5 $\pm$ 0.9	11.9 $\pm$ 1.0
	obs.	21	8.4	0.9777	1.72	9.1 $\pm$ 0.7	9.6 $\pm$ 0.9	10.2 $\pm$ 1.2	10.8 $\pm$ 1.5	11.3 $\pm$ 1.7
Irouzaki (50)	simul.	1000	14.2	0.9979	1.31	12.5 $\pm$ 0.2	13.4 $\pm$ 0.2	14.2 $\pm$ 0.3	15.3 $\pm$ 0.3	16.1 $\pm$ 0.4
	simul.	50 $\times$ 100	15.5	—	—	12.5 $\pm$ 0.9	13.5 $\pm$ 1.1	14.5 $\pm$ 1.4	15.7 $\pm$ 1.7	16.6 $\pm$ 2.0
	jack.					0.9	1.1	1.3	1.6	1.9
	hind.	45	11.6	0.9891	2.50	12.6 $\pm$ 0.5	13.4 $\pm$ 0.6	14.1 $\pm$ 0.7	15.0 $\pm$ 0.9	15.6 $\pm$ 1.1
	obs.	18	10.2	0.9906	1.87	11.3 $\pm$ 1.4	12.2 $\pm$ 1.7	13.0 $\pm$ 1.9	14.0 $\pm$ 2.3	14.7 $\pm$ 2.5
Gobooki (170)	simul.	1000	18.7	0.9987	1.31	13.4 $\pm$ 0.2	14.4 $\pm$ 0.3	15.3 $\pm$ 0.3	16.5 $\pm$ 0.4	17.3 $\pm$ 0.5
	hind.	45	16.3	0.9831	1.73	14.1 $\pm$ 1.6	15.1 $\pm$ 2.0	16.1 $\pm$ 2.3	17.3 $\pm$ 2.8	18.2 $\pm$ 3.1
	obs.	10	11.4	0.9949	1.33	13.8 $\pm$ 2.9	15.3 $\pm$ 3.7	16.7 $\pm$ 4.7	18.4 $\pm$ 6.0	19.7 $\pm$ 7.0
Sakihama (48)	simul.	1000	14.9	0.9994	1.25	11.4 $\pm$ 0.2	12.3 $\pm$ 0.3	13.1 $\pm$ 0.3	14.2 $\pm$ 0.4	15.0 $\pm$ 0.4
	hind.	45	11.6	0.9921	1.95	11.5 $\pm$ 0.9	12.3 $\pm$ 1.1	13.1 $\pm$ 1.3	14.0 $\pm$ 1.6	14.6 $\pm$ 1.8
	obs.	17	8.6	0.9894	1.63	9.9 $\pm$ 0.8	10.7 $\pm$ 1.0	11.4 $\pm$ 1.3	12.3 $\pm$ 1.2	12.9 $\pm$ 1.7
Kochioki (120)	simul.	1000	14.8	0.9990	1.23	12.0 $\pm$ 0.2	12.9 $\pm$ 0.3	13.8 $\pm$ 0.3	14.9 $\pm$ 0.4	15.8 $\pm$ 0.5
	simul.	50 $\times$ 100	16.1	—	—	12.0 $\pm$ 0.8	12.9 $\pm$ 1.0	13.8 $\pm$ 1.2	15.0 $\pm$ 1.5	15.8 $\pm$ 1.7
	jack.					0.9	1.1	1.3	1.6	1.9
	hind.	45	12.5	0.9959	1.95	12.7 $\pm$ 0.8	13.6 $\pm$ 1.0	14.5 $\pm$ 1.1	15.5 $\pm$ 1.3	16.3 $\pm$ 1.5
	obs.	11	10.9	0.9864	1.20	12.4 $\pm$ 2.9	13.6 $\pm$ 3.7	14.8 $\pm$ 4.5	16.3 $\pm$ 5.8	17.4 $\pm$ 6.8
Aburatsu (48)	simul.	1000	13.9	0.9982	1.31	11.7 $\pm$ 0.2	12.4 $\pm$ 0.2	13.2 $\pm$ 0.2	14.1 $\pm$ 0.3	14.8 $\pm$ 0.3
	hind.	45	11.8	0.9946	2.10	11.7 $\pm$ 0.7	12.4 $\pm$ 0.8	13.0 $\pm$ 1.0	13.8 $\pm$ 1.1	14.4 $\pm$ 1.3
	obs.	15	10.3	0.9580	Gum	10.2 $\pm$ 1.4	11.0 $\pm$ 1.7	11.8 $\pm$ 1.9	12.9 $\pm$ 2.2	13.7 $\pm$ 2.4
Shibushi (35)	simul.	1000	11.3	0.9987	1.30	9.0 $\pm$ 0.1	9.6 $\pm$ 0.2	10.2 $\pm$ 0.2	11.0 $\pm$ 0.3	11.5 $\pm$ 0.3
	hind.	45	9.0	0.9884	1.48	9.7 $\pm$ 0.6	10.5 $\pm$ 0.7	11.3 $\pm$ 0.8	12.2 $\pm$ 1.0	12.9 $\pm$ 1.1
	obs.	13	8.3	0.9718	1.80	10.2 $\pm$ 0.7	11.0 $\pm$ 1.0	11.7 $\pm$ 1.4	12.6 $\pm$ 1.9	13.3 $\pm$ 2.4
Satamiasaki (45)	simul.	1000	10.5	0.9979	1.48	8.6 $\pm$ 0.1	9.1 $\pm$ 0.1	9.6 $\pm$ 0.2	10.2 $\pm$ 0.2	10.6 $\pm$ 0.2
	hind.	45	9.5	0.9916	2.58	8.9 $\pm$ 0.6	9.3 $\pm$ 0.7	9.7 $\pm$ 0.8	10.2 $\pm$ 0.9	10.6 $\pm$ 1.1
	obs.	12	8.5	0.9860	6.60	9.6 $\pm$ 0.6	9.9 $\pm$ 0.9	10.2 $\pm$ 1.0	10.6 $\pm$ 1.3	10.9 $\pm$ 1.4
Kiyannmisaki (51)	simul.	1000	15.2	0.9988	1.40	12.4 $\pm$ 0.2	13.2 $\pm$ 0.2	14.0 $\pm$ 0.3	15.0 $\pm$ 0.3	15.7 $\pm$ 0.4
	simul.	50 $\times$ 100	15.6	—	—	12.4 $\pm$ 0.8	13.2 $\pm$ 1.0	14.0 $\pm$ 1.2	14.9 $\pm$ 1.5	15.7 $\pm$ 1.7
	jack.					0.7	0.9	1.1	1.4	1.6
	hind.	45	12.8	0.9948	3.85	12.2 $\pm$ 0.6	12.7 $\pm$ 0.7	13.1 $\pm$ 0.8	13.7 $\pm$ 1.0	14.0 $\pm$ 1.1
	obs.	11	9.9	0.9947	6.77	10.8 $\pm$ 0.8	11.2 $\pm$ 0.9	11.5 $\pm$ 1.0	11.9 $\pm$ 1.2	12.1 $\pm$ 1.3

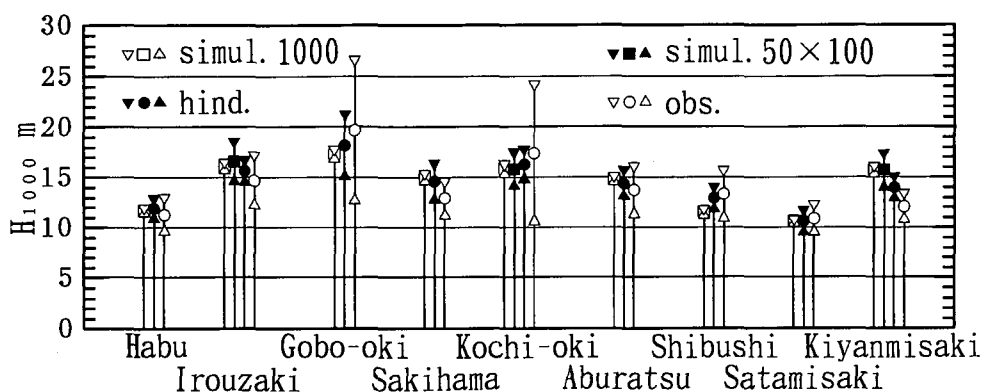


図-5 標準偏差相当分の変動を含む 1000 年確率波高の沿岸分布

① 同一地点では、資料の種類の違いにもかかわらず、対象期間が長いほど、期間最大波高および相関係数が増大する。これは3種類の資料が整合性をもち、しかも理論確率分布への適合度が資料数の増加とともに向上することを表す。

② 形状母数 k によれば、1000年という超長期の期間に対する極大波高資料の分布形状は地点ごとにあまり変化しないのに対して、統計期間の短い観測資料では地点ごとの分布形状の変化が大きい。とくに、佐多岬および喜屋武岬における観測資料から得られた形状母数がきわめて大きいのは周辺地形の影響によって異常波高の出現が抑えられるかあるいは観測期間が短いこと上位の波高資料の変動範囲が小さいためである。

③ 1000年間および50年間100回相当のシミュレーション資料に基づく確率波高はほぼ符合するが、前者は対象年数が長いことから、標準偏差の最大値は約0.5mであり、後者の1/5程度になる。また、50年100回相当のシミュレーション資料から直接求められる確率波高の標準偏差はjackknife法より得られる標準偏差の平均値と $\pm 10\%$ の範囲で一致することから、jackknife法の有用性が確認される。

④ シミュレーション資料と追算資料より評価される確率波高は再現期間1000年に対して1mの差を許容するならば、比較的良好に対応するが、喜屋武岬や志布志では1.5m程度の差がみられる。また、50年100回相当のシミュレーション資料に基づく確率波高の標準偏差は追算資料に基づく結果より数十%以上大きい。これはシミュレーションにおいてより多様な経路や台風勢力をもつ台風に対する波浪が計算されているためと考えられるので、確率波高の変動範囲を検討する際には考慮すべき事項であろう。

⑤ 観測資料に基づく確率波高は再現期間1000年に対して1mの差を許容するならば、追算資料に基づく確率波高とはほぼ対応する地点が多いが、御坊沖、高知沖では前者が1m以上大きく、佐喜浜、喜屋武岬では1m以上低い。これは10年間程度の観測期間の間にたまたま出現した異常高波によって確率波高が過大評価されるかあるいは観測期間中に台風6118号のような巨大台風に伴う異常高波が含まれず、確率波高が過小評価されるためである。

⑥ 短い観測期間中に異常波高が出現した地点ほど確率波高の標準偏差は大きい。とくに、御坊沖および高知沖では、標準偏差が異常に大きくなり、あまり有意な結

果を与えない。

⑦ 4種類の確率波高は、1000年という超長期の再現期間であっても、標準偏差を考慮すると大部分の地点で相互に重なり合う。

⑧ 外洋に面した御坊沖、高知沖、喜屋武岬、石廊崎では1000年確率波高は15mを超える大きい値をとるが、周辺地形の遮蔽効果を受ける佐多岬、志布志、波浮では確率波高がかなり低い。また、巨大台風時にそれぞれ九州および四国東部の遮蔽効果を受ける油津および佐喜浜では、N~NNW方向に進行する台風に伴う高波によって1000年確率波高は予想以上に大きくなり、14~15mに達する。

4. 結 語

台風属性の確率的発生に基づく台風時浅海波浪の極値推算システムは、台風の影響が卓越する外洋に面した沿岸地点のみならず周辺地形や島嶼による遮蔽効果を受け、その結果、1点深海モデルを用いた旧システムでは推定精度の確保が難しい沿岸地点における超長期の再現期間に対する確率波高とその変動幅の推定にきわめて有用である。

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, 333 p.
- 佐藤昭二・合田良實(1972): 海岸・港湾, わかり易い土木講座 17, 彰国社, pp. 104-106.
- 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・中村雄二(1994a): 確率的台風モデルと高潮・波浪の極値推定への応用, 第13回日本自然災害学会学術講演会講演概要集, pp. 135-138.
- 山口正隆・畑田佳男・中村雄二・大木泰憲(1994b): わが国太平洋岸における超長期の台風発生波高の極値の推定, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 206-210.
- 山口正隆・畑田佳男・中村雄二・大木泰憲(1995): 波高の極値統計解析における母数推定法の比較, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 231-235.
- Greenwood, J. A. et al. (1979): Probability weighted moments; Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form, Water Resources Res., Vol. 15, pp. 1049-1054.
- Mitsuyasu, H. and T. Kusaba (1984): Drag coefficient over water surface under the action of strong wind, Jour. Natural Disas. Sci., Vol. 6, No. 2, pp. 43-50.
- Muir, L. R. and A. H. El-Shaarawi (1986): On the calculation of extreme wave heights; A review, Ocean Eng., Vol. 13, No. 1, pp. 93-118.