

瀬戸内海における確率波高の推定

Estimation of Return Wave Height in the Seto Inland Sea

畑田佳男¹・山口正隆²・大福 学³・野中浩一⁴・森 正憲⁵

Yoshio HATADA, Masataka YAMAGUCHI, Manabu OHFUKU, Hirokazu NONAKA and Masanori MORI

Shallow water wave hindcasting for each of many intense storms in the past 23 to 29 years is conducted separately in 3 sea areas of the Seto Inland Sea. The wind distributions are made on the basis of a spatial interpolation of wind data measured at many sea and coastal stations. An extreme value analysis yields estimates of 50-year return wave height and its confidence interval in the areas. A hindcast-based return wave height at each of 10 measurement stations is shown to give reasonable estimates. The return wave height is 9 - 11 m in the sea areas connected to the open sea, 7 m in the strip areas of the inner sea where open sea waves propagate directly and a maximum of 5 m in the area dominated by local wave generation. A reanalysis of data in the public domain produces a rough agreement with the present estimate.

1. 緒言

わが国の沿岸海域においては、内海や内湾を含めて海岸・港湾構造物の計画・設計に際しての基礎資料となる確率波高の推定が関係各機関で行われているが、その結果が論文として公表されてきたことはほとんどない。因みに、わが国最大の内海である瀬戸内海における確率波高の推定に関しては、大阪湾を対象として有義波法を用いた合田・永井(1969)の古典的な研究や、播磨灘以西の海域を対象としてスペクトル法を用いた山口ら(2002, 2004)の研究事例があるにすぎないが、ごく最近になって、瀬戸内海全域を対象としてスペクトル法(WAM)を用いた多くのストームに対する波浪推算資料や確率波高の推定値が、以下では高松技調と称する国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所(2005)から提供されるようになってきている。しかし、これらの推算事例では海上風の推定を主に周辺地形の影響を含まない台風モデル法によっており、しかも観測資料との比較に基づく波浪推算の妥当性の検証もほとんど行われていないことから、確率波高の推定結果の信頼性に不明確さが残る。

そこでここでは、瀬戸内海において1978年以降の23～29年間の観測風資料から求めた多数のストーム時の海上風分布を入力条件とする浅海波浪推算を行い、瀬戸内海の全域に広範囲に分布する多くの波浪観測地点におけるストーム時最大波高に対する推算資料と観測資料の比較からその精度を確認する。ついで、波高の極大値資料に対

する極値統計解析に基づいて瀬戸内海における確率波高とその信頼区間を推定したのち、観測資料を用いて推定した確率波高との比較・検討よりその妥当性を検証するとともに、確率波高の空間分布の特性を考察する。また、高松技調による資料を解析して得た確率波高の空間分布との比較・検討を行う。

2. 波浪推算と極値統計解析の方法

(1) 海上風分布資料の作成

波浪推算は、計算時間や計算機の容量などを考慮に入れて、①周防灘・伊予灘・豊後水道・安芸灘・斎灘からなる西部海域、②燧灘・備後灘・水島灘からなる中部海域、③播磨灘・大阪湾・紀伊水道からなる東部海域、の3小海域で別々に行うことから、波浪推算の対象とするストーム時の海上風分布資料も各海域に高波をもたらしたストームに対して別個に作成する。

各小海域における海上風資料は、図-1に示す瀬戸内海全域の海上部や沿岸部に位置する最大57地点の観測風資料の1時間間隔値と、外洋部境界上7地点の台風モデル風を埋込んだ格子間隔80kmのECMWF表面風解析/再解析資料の1時間間隔補間値に加重1次補間法を2段階

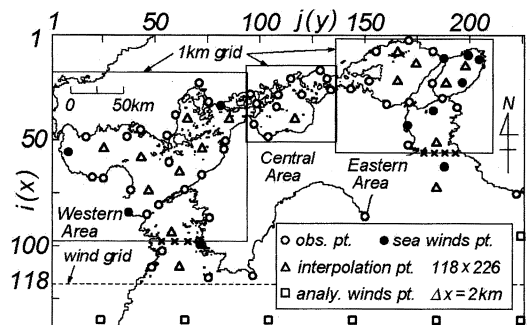


図-1 風入力地点および波浪推算小領域

1 正 会 員 博(工)愛媛大学大学院理工学研究科講師

2 正 会 員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科教授

3 愛媛大学工学部技術専門職員

4 正 会 員 博(工)愛媛大学工学部契約職員

5 修(工)戸田建設(株)

で適用して作成した格子間隔 2 km の瀬戸内海全域の海上風のデータセット(山口ら, 2007)から, 台風などの2~4日間のストーム時のデータを抽出する。期間は1983~2005年の23年である。このほか, 西部海域では1978~1982年と2006年の18ケース, 東部海域では1978~1982年の16ケースのストームに対して別個に同様の方法で海上風分布を作成し, 使用する。結局, 西部海域では1978~2006年の29年間117ケース(台風64ケース, 低気圧・季節風53ケース), 中部海域では1983~2005年の23年間95ケース(台風53ケース, 低気圧・季節風42ケース), 東部海域では1978~2005年の28年間66ケース(台風26ケース, 低気圧・季節風40ケース)を対象とする。

(2) 波浪推算の方法

波浪推算は, 図-1の中で範囲を示す格子間隔 1 km の西部海域, 中部海域, 東部海域の3小海域で観測風資料より得た1時間ごとの2 km間隔海上風分布を入力条件として与えて, 段波モデル付格子点浅海モデル(山口ら, 1984)により時間間隔 1 分で行う。海上風分布の入力時間間隔は20分であり, 1時間ごとの海上風分布資料を時間に関して20分ごとに線形補間, 空間に関して 1 km ごとに4点双1次補間したものを20分の間一定として計算を進める。周波数データの個数は0.047~1 Hz間を不等分割した20個, 方向データの個数は0~360°を20°で等分割した19個, あるいは10~20°で不等分割した24個(西部海域)または37個(東部海域)である。巨大台風時にS方向からの異常波浪が西部海域の豊後海峡や東部海域の友ヶ島水道・鳴門海峡から内海・内湾に伝播する場合には, これを適正に評価するために, 分割数を増やした不等間隔の方向データを使用する。

西部海域と東部海域では, 外洋に接続する南側境界上の代表格子点(図-1に×印で示す豊後水道上の3地点と紀伊水道上の4地点)に, 上述のECMWF風資料と観測風資料を入力条件とする1点浅海モデル(山口ら, 1987)により計算した方向スペクトルを入力境界条件として与える。計算には格子間隔 5 km の北西太平洋と0.5 km の瀬戸内海よりなる2段階高地形解像度格子網を用いる。なお, 中部海域は周囲が陸地で囲まれた閉海域と仮定する。

(3) 極値統計解析の方法

各海域でそれぞれのストーム時の格子点別最大波高資料を集めて作成した格子点別の波高極大値資料に対して, Gumbel分布, Weibull分布(形状母数 $k=0.5\sim10$ の27種類), FT-II型分布(形状母数 $k=2.5\sim40$ の間の20種類)を候補分布とし, 母数の推定を最小2乗法, 最適分布の選択を最大相関係数基準, 確率波高の分散の推定をjackknife法によるYamaguchi・Hatada (1997)の極値統計解析モデルを適用する。極大値資料は, 資料年数(K)の2倍の資料数(N), 資料総数 $N_T=N=2K$ として解析する。また, 波高極大値の観測資料に対しても同様の解析を行う。

3. 波浪推算精度の検証

(1) 波浪観測資料

瀬戸内海の西部海域では, かつて伊予灘の伊予(1962~1986年)と斎灘の菊間(1968~1997年)において, あるいは現在に至るまで周防灘の苅田と上関, 別府湾の大分, 佐田岬(豊後水道側), 広島湾の出島(終了)とごく近くの草津で長期にわたる観測資料が得られている。ただし, 出島と草津の入手資料のケース数は限られる。このほか, 佐田岬先端で3年間, 伊予灘の長浜と斎灘奥部の松山港和気海岸で約3ヶ月間の観測資料も存在するし, ごく最近の3台風時の岩国, 広島, 三田尻における橋本ら(2007)の観測資料に加えて, 波浪推算の期間内では大分の鶴崎における20年以上前の少数ケースの観測資料もある。ここでは, 伊予, 苅田, 上関, 大分, 佐田岬における波高の極大値資料を用いて50年確率波高とその標準偏差を求める。また, これら5地点とケース数が限られる出島や草津, 佐田岬先端, 長浜, 和気, 菊間, 岩国, 広島, 三田尻, 鶴崎の資料をストーム別最大波高の比較検証用資料に用いる。

東部海域では, 播磨灘の兵庫県沿岸にある江井ヶ島, 香川県沿岸にある津田, 三本松, 引田と高松, 大阪湾内の神戸, 大阪, MT局および紀伊水道北部海域の沖ノ島南, 由良瀬戸, 小松島と南側海域の御坊で観測資料が得られている。このうち, 観測期間が長い江井ヶ島, 神戸, 大阪, MT局, 小松島における波高の極大値資料を用いて50年確率波高とその標準偏差を求める。これらの5地点に加えて, 残りの津田, 三本松, 引田, 高松, 由良瀬戸, 沖ノ島南, 御坊における観測資料をストーム別最大波高の比較検証用資料に用いる。中部海域では海域西端にあたる愛媛県の今治を除いて観測資料は得られていない。なお, それぞれの観測地点の位置は紙数の制約のため, 後出の図-3に与える。

(2) ストーム別最大波高の比較

図-2は西部海域と東部海域に位置する上述の全観測地点でのストーム別最大波高に対する推算結果と観測結果の比較を表す。図中には誤差指標として相関係数 $\rho(H_s)$ と原点を通る相関直線の勾配値 $a_0(H_s)$ を与える。推算波高は東部海域において高波高で観測波高よりやや大き

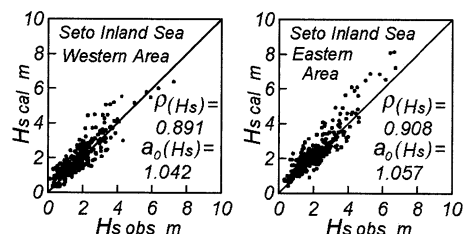


図-2 ストーム別最大波高の比較 (1)

めの傾向にあるけれども、平均的にみれば、いずれの海域でも推算波高は観測波高とほぼ符合する。これらは相関係数と勾配値がともに1に近い値をとることから、統計的指標の有意性によっても支持される。

(3) 確率波高の比較

表-1は波高極大値についての推算資料と観測資料の期間と年数、およびこれらの資料に基づく50年確率波高とその標準偏差の一覧を西部海域と東部海域の各5地点について示す。観測資料に基づく波高極大値資料は電子化された定時データのほか、観測資料の期間を延長するために観測台帳や既存の報告書などを踏査して作成している。この結果、江井ヶ島と小松島では年最大波高資料として極値統計解析を行っている。長期にわたる波浪の観測資料は、異常波浪時の欠測や記録の不備、波高計機種(水圧式、超音波式、ブイ式)、波高計設置水深の変更などに付随する質的問題を伴う。因みに、推算資料の期間は1978~2006年(西部海域)あるいは1978~2005年(東部海域)であるのに対して、観測資料の期間は地点ごとに大きく異なる。たとえば、伊予における観測期間は1962~1986年であり、推算資料の期間と9年間のみ重複する。極値事象の定常性を仮定すると、対象期間の相違は確率波高推定値にあまり影響しないと考えられる。また、年数欄の()内の数値は実質的に観測資料が得られた年数を示しており、佐田岬で5年間、大阪で4年間、小松島で3年間、神戸で2年間、荏田で1年間の観測資料を欠く。極値統計解析において観測期間長を資料年数 K とするので、これらの地点では観測資料に基づく確率波高は多少低めに評価される可能性もある。

各海域における比較地点は、推算資料と観測資料に基づく確率波高推定値が比較的良好に符合する5地点(上関、大分、江井ヶ島、大阪、MT局)と推算資料に基づく結果がより大きい5地点(伊予、荏田、佐田岬、神戸、小松島)に大別される。後者は最上位付近の観測値を欠くことを主な原因とする。たとえば、伊予における観測資料における第1位波高は季節風時の3.25mであるのに対して、推算資料における第1位波高は台風9119号時の

4.61mであるから、観測資料に基づく確率波高は低めの推定値をとる。これは、観測資料と推算資料における第1位波高値がそれぞれ7.28mと9.36mである佐田岬においても同様であるし、神戸についても言える。いずれにしろ、推算資料に基づく確率波高の推定値は、観測資料に基づく値に近い値をとるか、あるいはより大きい値を与えることから、妥当な結果と推測される。確率波高の標準偏差については、推算資料と観測資料に基づく値の大小関係が観測地点ごとに異なることから、必ずしも地点間で系統的な傾向は見出されない。

4. 確率波高の空間分布

(1) 瀬戸内海の小海域別確率波高

図-3は瀬戸内海の西部海域、中部海域および東部海域における50年確率波高 H_{50} とその標準偏差 $H_{\sigma 50}$ の空間分布を示す。西部海域では、50年確率波高は豊後水道境界端の11mから豊予海峡の9mをとり、これがNW方向に対岸の山口県下松付近に向けて7mになる。また、豊予海峡から下松にかけての細長い海域から放射状に50年確率波高は小さくなり、周防灘西部で4m、伊予灘東部で5m近く、別府湾でも5m近くの値をとる。斎灘や安芸灘、広島湾で3~4mである。要するに、外洋から伝播する波浪が到達する豊予海峡から下松付近にかけてのストリップ状の海域における50年確率波高は、外洋沿岸部での毎年最大波高クラスの波高に匹敵する大きさをもつ。50年確率波高の標準偏差は0.9m以下であり、確率波高とともに増加する。しかし、伊予灘東部では確率波高に比べて標準偏差が大きい。これは第1位波高(台風9119号時)が突出した値を示すためである。波高比($H_{\sigma 50}/H_{50}$)の%値である変動係数は16%に達する伊予灘東部を除けば、広範な海域で8~10%の値をとる。

中部海域においては、50年確率波高は燧灘中央部の東西方向を境として、南側にあたる愛媛県側の海域で3mから3.5m、北側にあたる岡山県側の海域で3.5mから4mとなっており、岡山県側の海域(備後灘)で0.5m大きい。確率波高の標準偏差は確率波高に連動しており、大略と

表-1 確率波高の比較

location	data	period	K yrs.	$H_{50} \pm H_{\sigma 50}$ m	location	data	period	K yrs.	$H_{50} \pm H_{\sigma 50}$ m
Iyo	cal.	78~06	29	4.32±0.50	Eiga-shima*	cal.	83~05	23	3.69±0.23
	obs.	62~86	25	3.25±0.14		obs.	72~05	34	3.71±0.46
Kamino-seki	cal.	78~06	29	4.97±0.36	Kobe	cal.	78~05	28	4.48±0.35
	obs.	95~06	12	4.59±0.53		obs.	75~05	31(29)	3.88±0.24
Kanda	cal.	78~06	29	4.62±0.37	Osaka	cal.	78~05	28	3.91±0.33
	obs.	80~06	27(26)	4.02±0.34		obs.	81~05	25(21)	4.00±0.23
Oita	cal.	78~06	29	4.98±0.57	MT st.	cal.	78~05	28	3.20±0.14
	obs.	87~06	20	5.03±0.66		obs.	78~05	28	3.56±0.18
Sadamisaki	cal.	78~06	29	9.15±0.79	Komatsu-shima*	cal.	78~05	28	6.04±0.41
	obs.	73~01	29(24)	7.61±0.74		obs.	74~05	32(29)	4.86±0.51

*Annual Maximum Wave Height

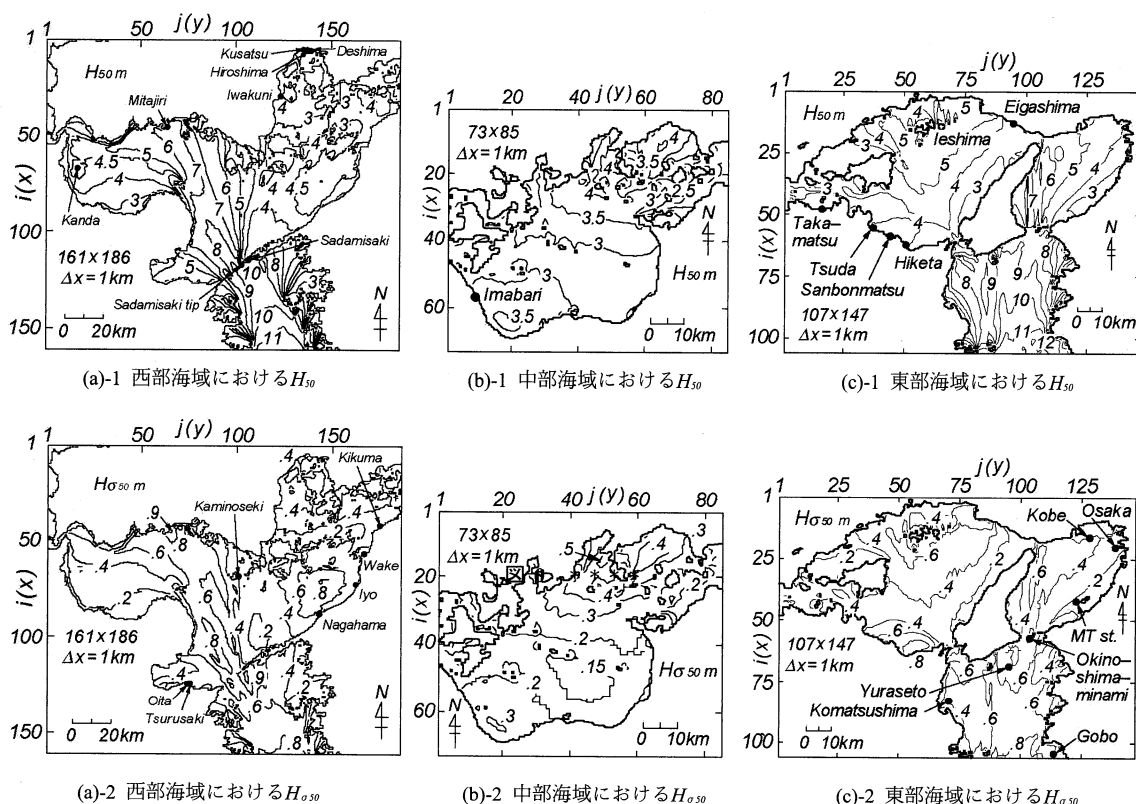


図-3 瀬戸内海の西部海域，中部海域，東部海域における50年確率波高 H_{50} とその標準偏差 $H_{\sigma 50}$

して確率波高3mで0.2m，3.5mで0.3m，4mで0.4mをとる。変動係数は燧灘中央部で5～7%，愛媛県側で8%，岡山県側で10～12%を示す。

ついで東部海域のうち播磨灘では，50年確率波高は中央部の4mから家島南側や兵庫県姫路付近の5m，南側の香川県沿岸で4m，高松近くで3m，淡路島西岸で3mをとる。また，家島背後の兵庫県沿岸では家島の遮蔽効果を受けることから，50年確率波高は4mと家島南側より1m小さい。要するに，播磨灘における50年確率波高は兵庫県側で大きい。標準偏差はおおむね0.2～0.8mの範囲にあり，確率波高に対応して大きくなる。ただし，兵庫県側の江井ヶ島西側沿岸や香川県南部あるいは鳴門海峡付近では確率波高に比べて標準偏差の値がかなり大きい。変動係数は5～15%であり，10%前後の値をとる海域が多い。

大阪湾・紀伊水道においては，50年確率波高は紀伊水道南側海域の12mから友ヶ島水道や鳴門海峡にかけての8mに減少する。大阪湾では，友ヶ島水道から北側に向けて淡路島東部沖合に7m域が延び，ここから東側に向けて放射状に3mにまで小さくなる。鳴門海峡から播磨灘に入ると，50年確率波高は3～4mに急減する。50年確率波高の標準偏差は紀伊水道で0.6～0.8m，大阪湾で0.2

～0.6mであり，淡路島北部東側で大きい。変動係数は紀伊水道で6～7%，大阪湾で6～9%であり，大阪方向に向うほど大きいけれども，突出した値をとらない。

なお，瀬戸内海の各小海域における1978年以降の期間最大波高はほぼ1991年以降の台風によって生じている。

(2) 既往の結果との比較

高松技調(2005)は，地形解像度 $1/32^\circ$ (約3km)で深海WAMにより1951年から2003年に至る53年間165ケースのストームに対して波浪推算資料を得ている。ここでは，これから抽出した格子点別波高極大値資料を用いて50年確率波高を推定し，今回の結果と比較する。極値統計解析はこれまでと同じYamaguchi・Hatada(1997)のモデルによる。資料年数は $K=53$ ，資料総数と資料数は $N_T=N=2K=106$ とする。

図-4はストーム別最大波高に対する推算資料と観測資料の比較を西部海域と東部海域に分けて示す。図によれば，推算結果は観測結果より大きい値を与え，散布図におけるプロット点のばらつきも大きい。この挙動は有意な程度に1より小さい相関係数 $\rho(H_o)$ と1より大きい勾配値 $a_o(H_o)$ という統計的指標によって代表される。

図-5は瀬戸内海全域についての50年確率波高を示す。その標準偏差は0.2～0.8m，変動係数は3～8%であり，

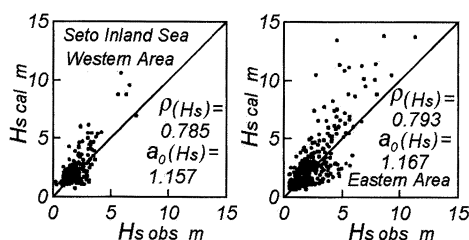


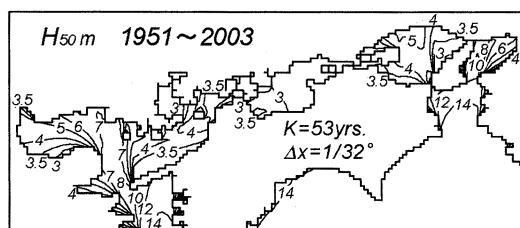
図-4 ストーム別最大波高の比較(2)

突出した値をとらない(図省略)。西部海域においては、50年確率波高は豊後水道入口で14m、豊予海峡で8~10m、豊予海峡から下松にかけて7m、周防灘西部で4~5m、伊予灘東部で4m以下、別府湾で4~5m、安芸灘や斎灘で3m以下となっている。豊後水道を除いて、これらは今回の結果と比較的良好に対応しているようにみえるが、伊予灘では1m程度低い。

中部海域においては、50年確率波高は燧灘中央部の3mから西側の愛媛県沿岸海域の3.5m、東側の海域で3m以下となっている。この挙動は西側の海域では今回の結果と符合するが、東側の海域では燧灘中央部よりNE方向に向けて波高が増大する今回の結果と対応しない。

東部海域のうち播磨灘においては、灘の中央部南側から兵庫県沿岸で4~5m、香川県沿岸で3.5m、淡路島西側で3~3.5mとなっている。これらの値は今回の結果とおおむね定性的に対応するけれども、香川県沿岸において0.5m程度小さい。

大阪湾・紀伊水道においては、50年確率波高は友ヶ島水道で12m、淡路島東側の海域で10m域を形成している。友ヶ島水道の対岸にあたる明石で、波高は8mをとり、大阪湾南部に向けて4mにまで小さくなる。要するに、今回の結果と比べると、友ヶ島水道沖で3m、友ヶ島水道から明石に向けての海域で2m、ここから東側の大阪湾東部海域で1~2m大きい。この相違は、波浪推算の期間(53年)が今回の対象期間(28年)より長いために異常波高を含み、その結果として確率波高推定値が大きくなることや、地形解像度が相対的に低いために友ヶ島水道から過大な波浪が流入することによると推測される。

図-5 瀬戸内海における50年確率波高 H_{50}

5. 結語

本研究で得た結果はつぎのように要約される。

- ①観測風より得た海上風分布を入力条件とする波浪推算の精度は良好であり、確率波高を適切に推定できる。
- ②推算資料に基づく確率波高は観測資料に基づく結果とおおむね符合するが、最上位値付近の観測資料を欠く場合には、より大きい値を与える。後者の傾向は下限値を上まわるという意味で妥当な評価である。
- ③50年確率波高は豊後水道や紀伊水道の境界で11m、内湾・内海入口で9m、外洋波浪が直接入射する内海部で7m、内海波浪が卓越する海域で地形の状況に応じて3~5mと見積もられる。標準偏差は平均的に確率波高の10%程度をとる。
- ④既往資料の再解析に基づいて得た瀬戸内海の50年確率波高は今回の結果と定性的に符合し、定量的にもある程度対応するが、豊後水道や紀伊水道および大阪湾では今回の結果と比べて大きめの値を与える。

最後に、多量の風および波浪観測資料を提供戴いた関係各機関に謝意を表するとともに、NOWPHASによる波浪観測資料を用いたことを付記する。

参考文献

- 合田良実・永井康平(1969)：大阪湾における台風時波浪の数値計算，第16回海岸工学講演会講演集，pp.75-84。
- 国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所(2005)：確率沖波推算システム，CD-ROM。
- 橋本典明・萩本幸将・杉浦邦明・松藤絵里子・鈴山勝之(2007)：内海・内湾域を対象とした波浪推算モデルの高精度化に向けた検討，海岸工学論文集，第54巻，pp.126-130。
- 山口正隆・畑田佳男・細野浩司・日野幹雄(1984)：エネルギー平衡方程式に基づく浅海波浪の数値予知モデルについて，第31回海岸工学講演会論文集，pp.123-127。
- 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・野中浩一・大福 学・小出健太郎(2002)：瀬戸内海西部海域における高潮・波高の極値の推定，海岸工学論文集，第49巻，pp.256-260。
- 山口正隆・野中浩一・畑田佳男・大福 学・増田 真慈(2004)：燧灘および播磨灘における台風時波高の極値の推定，海岸工学論文集，第51巻，pp.171-175。
- 山口正隆・日野幹雄・大福 学・畑田佳男・野中浩一(2007)：内湾・内海における波浪の長期推算システムの構築—瀬戸内海の場合—，海岸工学論文集，第54巻，pp.106-110。
- 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。