

瀬戸内海における波浪の長期推算システムの適用性

Applicability of a Long-Term Wave Hindcast System in the Seto Inland Sea

山口正隆¹・日野幹雄²・畑田佳男³・大福 学⁴・野中浩一⁵

Masataka YAMAGUCHI, Mikio HINO, Yoshio HATADA, Manabu OHFUKU and Hirokazu NONAKA

Based on a 3 to 23-year comparison between hindcast and measured wave data at 20 widely separated stations in the Seto Inland Sea, the applicability of a long term wave hindcast system is investigated. The system consists of data sets of one-hourly sea surface wind distribution made from ECMWF analysis/reanalysis wind data in the open sea and measurements at many stations in the Inland Sea, and a backward ray tracing model on a grid with high spatial resolution. One major finding is that the system yields reasonable estimates of the time variations of waves and the resulting climatic properties both at stations exposed to open sea waves and inland sea waves, although a consistent discrepancy appears in the comparison of the inland sea wave periods because of the poor quality of the measurements.

1. 緒 言

海上風が局所地形の影響を強く受ける内湾・内海において長期の波浪特性を高精度で推定するために、著者ら(山口ら, 2006; 山口ら, 2007; 日野ら, 2008)は外洋では表面風再解析/解析資料に台風モデル風を組み込んだ海上風分布資料、伊勢湾、瀬戸内海、東京湾ではそこに位置する多数地点の観測風資料より求めた9年以上の海上風分布を入力条件として、高地形解像度条件のもとに1点浅海モデルを利用す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その精度を確認してきた。このうち地形条件が最も複雑な瀬戸内海においては、対象地点は内海発生波浪が卓越する周防灘の苅田、播磨灘の江井ヶ島と引田、大阪湾のMT局の4地点にすぎない。

そこで本研究では、瀬戸内海の全沿岸域において収集しえた上記4地点を含む20波浪観測地点における推算資料と観測資料の比較に基づいて、外洋波浪の影響を強く受ける地点や内海発生波浪が卓越する地点に対する本システムの精度を包括的に明らかにする。

2. 波浪の長期推算システムと波浪観測資料

(1) 海上風分布資料

北西太平洋領域では、ECMWF表面風再解析/解析資料に楕円型気圧分布を仮定する台風モデル風を組み込んだ80 km間隔の海上風分布(ECMWF風資料)、瀬戸内海では多数の海上・沿岸地点における観測風資料の空間補間から求めた2 km間隔の海上風分布のそれぞれ1時間間隔値(山口ら, 2007)を入力条件とする。期間は1983~2005

年の23年である。

瀬戸内海の海上風は、最大57地点における観測風資料の10 m高度海上風換算値に加重1次補間法(塩野ら, 1985)を適用して、海上部に設けた17仮想地点における風を補間後、増幅した海上風資料、さらに領域境界上の7地点のECMWF風資料を加えた最大で合計81地点における海上風資料に加重1次補間法を再び適用して、格子間隔2 kmの格子網で算出する。10 m高度風速への変換は1/7乗則の適用、海上風速への変換は海上風速と沿岸風速の観測資料を参照して、それぞれの地点の地形状況に応じて経験的に決めた定数を乗じることにより行う。海上部仮想地点の導入は沿岸より海上で強風が吹送する特性を再現するためであり、ECMWF風資料の導入は内海と外洋の風を滑らかに接続するためである。また、風向に対する地形の影響の補正は行わない。

(2) 波浪推算の方法

波浪推算は格子間隔5 kmの北西太平洋領域に格子間隔0.5 kmの瀬戸内海(図-1)を組み込んだ2段階高地形解像度格子網を用いて、1点浅海モデル(山口ら, 1987)により対象地点ごとに実施する。周波数は外洋から伝播する波浪成分と内海発生波浪成分を考慮するために、0.04~1 Hz間を不等分割した29個、方向は0~360°を10°で

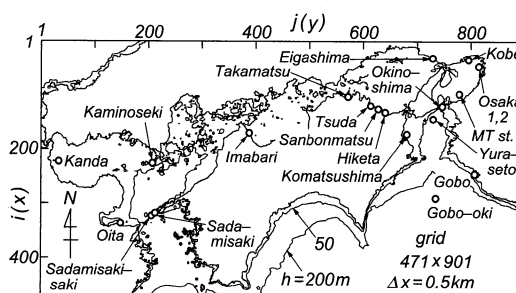


図-1 瀬戸内海の水深格子網と波高計の位置

1 正 会 員 工博 愛媛大学大学院理工学研究科教授
2 正 会 員 工修 (株)テクノシステム
3 正 会 員 博(工)愛媛大学大学院理工学研究科講師
4 愛媛大学工学部技術専門職員
5 正 会 員 博(工)愛媛大学工学部契約職員

等分割した37個、海上風分布の入力時間間隔は1時間でその間一定、計算時間間隔は10分、波浪推算の期間は1983～2005年の23年とする。1点浅海モデルにおいて各成分波の波向線上波計算点が2 km 風格子網をはずれる場合には、80 km 格子網のECMWF風資料を、2 km 格子網内に位置する場合には2 km 格子網の海上風資料を4点双1次補間することによって、波向線上波計算点における風を求める。波浪推算地点は瀬戸内海のほぼ全域で観測資料を収集しえた20波浪観測地点である。

(3) 波浪観測資料

資料収集をした波浪観測地点は外洋波浪の影響を強く受ける紀伊水道内の御坊沖、御坊、由良瀬戸、小松島、沖ノ島の5地点と豊後水道北端の佐田岬先と佐田岬の2地点、内海発生波浪が卓越する大阪湾内のMT局、大阪1、大阪2、神戸の4地点、播磨灘の江井ヶ島、津田、三本松、引田、高松の5地点、燧灘の今治1地点、瀬戸内海西部海域の上関、荻田、大分の3地点の計13地点、総数20地点よりなる。図-1にこれらの位置を、表-1に波高計設置水深 (h m)、資料期間の年数 (K 年)、測得率 (r %) を与える。観測資料の期間は3年から23年、測得率は39～98%と広く分布する。

表-1 波浪観測地点の諸元

地点名	h m	K 年	r %	地点名	h m	K 年	r %
御坊沖	170	14	70	引田	12	4	90
御坊	36	11	87	三本松	7	7	68
由良瀬戸	65	10	78	津田	7	3	39
小松島	22	8	89	高松	8	5	72
沖ノ島	36	10	87	今治	26	7	63
MT局	21	23	98	上関	29	11	92
大阪1	11	6	79	荻田	9	13	88
大阪2	13	13	92	大分	14	19	84
神戸	17	6	95	佐田岬先	20	4	76
江井ヶ島	11	13	88	佐田岬	15	20	58

大阪1：1983～1988、大阪2：1993～2005

瀬戸内海のうちでも内海発生波浪の影響が卓越する地点の波浪観測資料の質は低波高や低波高時周期に対して低く、波高は一定値以下の値をほとんどとらず、周期は風速や波高の経時変化に必ずしも追従しないことが多い。この傾向は東京湾や伊勢湾においても同様である。ここでは、(有義)波高 H_s について観測資料全部を比較対象とするが、(有義波)周期 T_s については経験的に決めた制約条件 $T_s < 10(H_s)^{1/2}$ を満たす観測資料に限定する。

(4) 資料解析の方法

期間を観測資料の全期間(累年)として、推算資料と観測資料の時系列や散布図による比較、累年・累月別・月別の波高 H_s や周期 T_s の各種統計量、たとえば上位1/3の資料の平均値である1/3最大波高 H_{s3} と1/3最大周期 T_{s3} の比較を行う。また、波高・周期に関する誤差指標として相関

係数 ρ 、原点を通る相関直線の勾配値 a_0 、2乗平均平方根誤差 σ を期間別資料ごとに使用する。

3. 波浪の推算資料と観測資料の比較

(1) 波浪時系列

図-2は外洋波浪の影響が強い紀伊水道北端の由良瀬戸における1ヶ月間の波浪時系列の比較例を示す。波高と周期の推算資料は外洋波浪と内湾発生波浪の混在する状況下での観測資料に追従して変化しており、両者はよく符合する。図-3は由良瀬戸における累年特別波高・周期出現率の等値線を示し、図中には波高誤差指標(ρ_H , a_{0H} , σ_H)と周期誤差指標(ρ_T , a_{0T} , σ_T)を与える。波高・周期の両者について推算資料と観測資料の平均的対応は良好であり、これが各誤差指標によって裏づけられる。

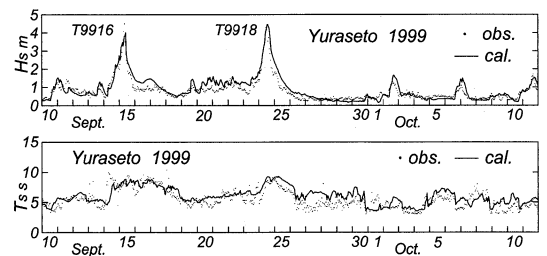


図-2 波高・周期時系列の比較

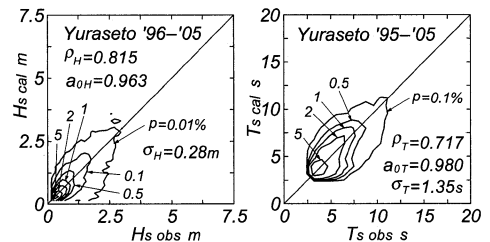


図-3 特別波高と周期に対する比較

表-2は瀬戸内海のほぼ全沿岸域に位置する20波浪観測地点における累年波高・周期誤差指標の一覧である。外洋波浪の影響が強い紀伊水道内の御坊沖～沖ノ島の5地点と豊後水道北端の佐田岬先・佐田岬の2地点と、内海発生波浪の影響が卓越する他の11地点のいずれにおいても、波高の再現精度は高い。ただし、高松と今治では波高観測資料が雑音的な変動を示すことから、相関係数は相対的に小さい。一方、周期の精度は外洋波浪の影響が強い地点では悪くないが、内海波浪が卓越する地点で低い。これは内海における短周期の波浪に対して、とくに低波高時の観測資料の精度が著しく低いことに起因するものであり、内海域でほぼ共通してみられる。

(2) 波候統計量

表-3は推算資料と観測資料に基づく各種累年波候(波

表-2 累年波高・周期誤差指標の一覧

地点名	ρ_H	a_{0H}	σ_H m	ρ_T	a_{0T}	σ_T s	地点名	ρ_H	a_{0H}	σ_H m	ρ_T	a_{0T}	σ_T s
御坊沖	0.79	0.94	0.45	0.66	0.97	1.57	引田	0.80	0.94	0.10	0.37	0.97	0.51
御坊	0.84	1.04	0.35	0.74	0.94	1.42	三本松	0.79	0.89	0.11	0.03	0.98	0.70
由良瀬戸	0.82	0.96	0.28	0.72	0.98	1.35	津田	0.73	1.02	0.10	-0.14	1.00	0.97
小松島	0.83	0.92	0.16	0.69	0.95	1.35	高松	0.43	0.98	0.09	0.07	0.73	1.36
沖ノ島	0.83	0.92	0.21	0.73	0.92	1.32	今治	0.63	0.97	0.13	-0.05	1.00	0.72
MT局	0.89	0.95	0.11	0.12	0.95	0.66	上関	0.84	0.97	0.14	0.50	1.01	0.54
大阪1	0.86	1.02	0.14	-0.24	0.93	1.06	荏田	0.88	1.00	0.11	0.35	0.99	0.54
大阪2	0.86	0.93	0.13	0.01	0.94	0.86	大分	0.75	0.87	0.17	0.14	1.00	0.76
神戸	0.85	1.04	0.11	0.16	0.95	0.70	佐田岬先	0.74	0.92	0.27	0.66	0.93	1.18
江井ヶ島	0.77	0.97	0.13	0.59	0.90	0.57	佐田岬	0.74	0.94	0.27	0.61	0.90	2.03

高・周期) 統計量の一覧を山口ら(2007)の4地点を含む20地点について示す。表中の各記号の添字 ' m , 3 , 10 ' はそれぞれ全体, 上位1/3, 上位1/10の資料の平均値を, 添字 ' σ ' は標準偏差を表す。推算資料と観測資料は外洋波浪の影響が強い地点のみならず内海発生波浪が卓越する地点においても, 波高・周期の両者について全体的によく符合する。内海発生波浪が卓越する地点の周期について, 個々の時点では両資料の対応は必ずしもよくないが, 統計量については同程度の値を生じる。しかし外洋波浪の影響が大きい御坊や佐田岬では, 上位波高統計量の場合に推算資料が観測資料よりやや大きい値を与える。また, 高松での周期観測資料はスパイク状の経時変化を伴うことから, 各種平均値についても適正な値をとっていない。図-4は表-3に与えた推算資料と観測資料に基づく累年の1/3最大波高 H_{s3} と1/3最大周期 T_{s3} を20地点について示す。外洋波浪の影響が強い地点の波高・周期

は内海発生波浪が卓越する地点のものより当然大きい。いずれの地点でも高松における周期を除いて, 両資料に基づく波高・周期統計量はそれぞれよく符合する。

ついで, 図-5は累月別の1/3最大波高 H_{s3} と1/3最大周期 T_{s3} を由良瀬戸について示す。当該地点では夏季に台風などに伴う外洋波浪の影響が, 冬季にN寄りの季節風に伴う内海発生波浪の影響が強まることから, 累月別波候は逆U字型分布をとり, とくに周期においてその特徴が明確に現れる。波浪推算は観測資料におけるこの挙動をよく再現する。同様の再現性は他の大部分の地点でも確認されるが, 周期に関して両者の乖離が高松, 大分など内海の4~5地点でみられる。これらは周期観測資料の質に問題があることによると推測される。

図-6は推算資料と観測資料に基づく月別の1/3最大波高 H_{s3} と1/3最大周期 T_{s3} および両資料に基づくそれぞれの結果の散布図を由良瀬戸について示す。推算資料は観測

表-3 推算資料および観測資料に基づく累年波高・周期統計量の一覧

地点名	H_{sm} m		H_{s3} m		H_{s3} m		H_{s10} m		T_{sm} s		T_{s3} s		T_{s3} s		T_{s10} s	
	cal.	obs.	cal.	obs.	cal.	obs.	cal.	obs.	cal.	obs.	cal.	obs.	cal.	obs.	cal.	obs.
御坊沖	1.05	1.07	0.71	0.68	1.78	1.78	2.66	2.57	6.88	6.97	1.93	1.86	9.05	9.09	11.08	10.82
御坊	0.74	0.70	0.64	0.54	1.40	1.23	2.21	1.97	6.13	6.49	1.98	1.74	8.34	8.35	10.40	10.35
由良瀬戸	0.62	0.63	0.48	0.44	1.14	1.07	1.76	1.66	5.22	5.16	1.80	1.79	7.32	7.17	9.04	9.15
小松島	0.39	0.41	0.27	0.26	0.66	0.66	1.01	1.00	4.79	4.84	1.66	1.77	6.69	6.81	8.57	8.65
沖ノ島	0.45	0.48	0.37	0.35	0.84	0.81	1.32	1.29	4.54	4.94	1.82	1.45	6.59	6.50	8.57	8.35
MT局	0.40	0.41	0.22	0.23	0.65	0.65	0.92	0.97	3.15	3.25	0.52	0.48	3.75	3.76	4.32	4.24
大阪1	0.44	0.41	0.27	0.25	0.72	0.66	1.06	1.04	3.82	3.99	0.70	0.63	4.57	4.69	5.40	5.16
大阪2	0.38	0.40	0.24	0.26	0.64	0.64	0.94	1.02	3.44	3.55	0.63	0.58	4.12	4.19	4.86	4.73
神戸	0.34	0.32	0.20	0.18	0.54	0.48	0.80	0.73	3.36	3.47	0.56	0.51	3.97	4.02	4.64	4.55
江井ヶ島	0.24	0.22	0.19	0.18	0.44	0.39	0.71	0.66	3.08	3.42	0.55	0.46	3.72	3.93	4.31	4.42
引田	0.22	0.22	0.16	0.16	0.38	0.38	0.61	0.61	3.04	3.11	0.47	0.42	3.58	3.57	4.09	3.89
三本松	0.23	0.23	0.16	0.17	0.39	0.40	0.59	0.64	3.59	3.60	0.51	0.49	4.14	4.15	4.75	4.66
津田	0.19	0.16	0.13	0.13	0.33	0.29	0.52	0.48	4.26	4.12	0.44	0.79	4.73	5.03	5.31	5.80
高松	0.17	0.16	0.10	0.08	0.27	0.22	0.40	0.31	2.84	3.49	0.23	1.19	3.09	4.77	3.38	5.49
今治	0.25	0.23	0.16	0.15	0.41	0.36	0.61	0.58	3.48	3.39	0.43	0.55	3.95	3.98	4.46	4.64
上関	0.34	0.31	0.24	0.25	0.59	0.56	0.92	0.93	3.16	3.09	0.55	0.52	3.80	3.66	4.43	4.25
荏田	0.34	0.31	0.18	0.21	0.55	0.53	0.75	0.80	2.99	2.96	0.44	0.50	3.49	3.51	3.95	3.94
大分	0.34	0.36	0.23	0.24	0.61	0.61	0.85	0.92	3.48	3.39	0.52	0.62	4.08	4.08	4.61	4.65
佐田岬先	0.56	0.58	0.40	0.37	0.99	0.97	1.46	1.44	4.58	4.86	1.47	1.29	6.21	6.25	7.87	7.73
佐田岬	0.39	0.39	0.40	0.34	0.80	0.70	1.33	1.19	6.42	7.00	2.31	2.04	9.08	9.32	11.24	11.07

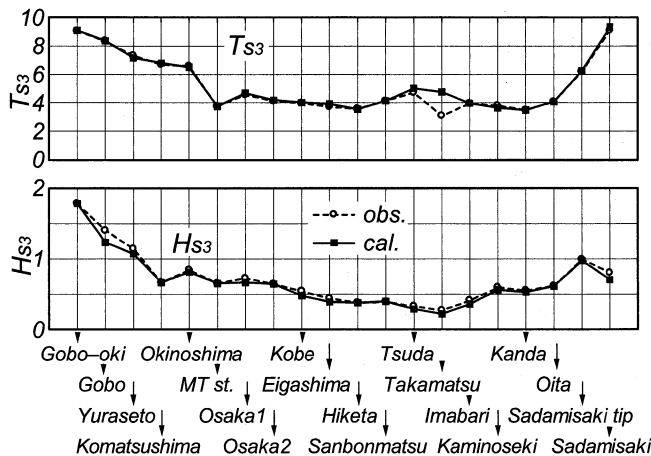


図-4 瀬戸内海沿岸の20波浪観測地点における累年波高・周期統計量

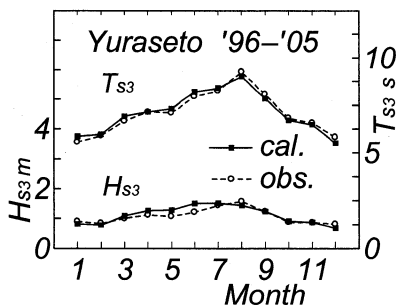


図-5 累月波高・周期統計量

資料の変化によく追従し、この挙動は波候誤差指標である相関係数 $\rho(H_{s3})$ 、 $\rho(T_{s3})$ と勾配値 $a_0(H_{s3})$ 、 $a_0(T_{s3})$ にそれぞれ反映される。すなわち、相関係数、勾配値ともに1に近い値をとることから、月別波候統計量に対する再現精度が高いことが示唆される。

表-4は20地点における各種月別波高・周期統計量に対する誤差指標の一覧を示す。外洋波浪の影響が強い地点では相関係数および勾配値が波高と周期について、ともに1に近い。一方、内海波浪が卓越する地点でも波高についてこれらは1に近い値をとるが、周期については相関係数が小さいか、負の値を与える。これは観測資料と推算資料それぞれの誤差に加えて、月別周期資料の変動範囲が小さいことによる。ただし、江井ヶ島での相関係数は1に近い値をとるし、上関や苅田での相関係数は他の内海波浪が卓越する地点よりかなり大きい。

図-7は月別の1/3最大波高 H_{s3} および1/3最大周期 T_{s3} に対するそれぞれの相関係数 $\rho(H_{s3})$ 、 $\rho(T_{s3})$ と勾配値 $a_0(H_{s3})$ 、 $a_0(T_{s3})$ を20地点について図示する。1/3最大波高 H_{s3} に対する相関係数 $\rho(H_{s3})$ は観測資料の質に疑念がある高松や今治を除いて、最も小さい大分で0.75、ついで江井ヶ島で0.80、12地点で0.90以上をとり、勾配値 $a_0(H_{s3})$ も苅田の

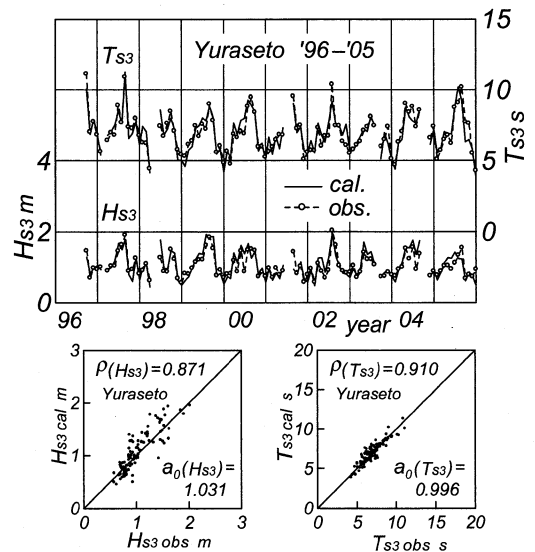


図-6 月別波高・周期統計量および散布図

0.86や高松の1.13、御坊の1.14を除いて0.90～1.10の範囲にあることから、全体的に推算資料の精度は高い。一方、周期に関して外洋波浪の影響が強い地点における相関係数 $\rho(T_{s3})$ は内海波浪が卓越する地点の多くに比べて、1に近い値をとることが明らかである。

4. 結 語

以上の検討から、本研究で使用した波浪の長期推算システムは、①外洋波浪の影響が強い地点や内海波浪が卓越する地点における波高の長期特性を時系列のみならず累年、累月別、月別の波候特性についてよく再現すること、②外洋波浪の影響が強い地点では周期に対しても同様に有意な精度をもつが、内海波浪が卓越する地点では周期観測資料の低品質性に起因して十分な再現性を与え

表-4 月別波高・周期誤差指標の一覧

地点名	H_{sm}		$H_{s\sigma}$		H_{s3}		H_{s10}		T_{sm}		$T_{s\sigma}$		T_{s3}		T_{s10}	
	$\rho()$	$a_0()$	$\rho()$	$a_0()$	$\rho()$	$a_0()$	$\rho()$	$a_0()$	$\rho()$	$a_0()$	$\rho()$	$a_0()$	$\rho()$	$a_0()$	$\rho()$	$a_0()$
御坊沖	0.80	0.99	0.90	1.01	0.85	1.00	0.90	1.01	0.88	0.98	0.73	1.04	0.86	0.99	0.80	1.02
御坊	0.89	1.07	0.93	1.14	0.91	1.11	0.93	1.10	0.91	0.95	0.85	1.09	0.91	0.98	0.89	1.00
由良瀬戸	0.85	1.00	0.91	1.06	0.87	1.03	0.90	1.04	0.92	1.01	0.81	0.95	0.91	1.00	0.88	0.99
小松島	0.91	0.95	0.90	1.01	0.91	0.99	0.92	0.98	0.84	0.99	0.73	0.94	0.80	0.98	0.77	0.98
沖ノ島	0.89	0.95	0.93	1.02	0.91	1.01	0.92	0.99	0.91	0.92	0.90	1.21	0.92	0.99	0.93	1.03
MT局	0.94	0.98	0.95	0.95	0.97	0.99	0.96	0.95	-0.32	0.97	0.13	1.03	-0.13	0.99	-0.03	0.99
大阪1	0.95	1.05	0.93	1.06	0.97	1.09	0.96	1.01	-0.60	0.95	-0.32	1.00	-0.56	0.96	-0.41	0.99
大阪2	0.85	0.96	0.97	0.94	0.96	0.99	0.97	0.92	-0.11	0.96	0.05	1.03	-0.05	0.98	0.03	0.99
神戸	0.86	1.07	0.93	1.09	0.89	1.13	0.92	1.09	0.40	0.97	0.40	1.03	0.38	0.98	0.46	1.00
江井ヶ島	0.56	1.05	0.80	1.03	0.75	1.11	0.75	1.03	0.93	0.90	0.84	1.25	0.93	0.95	0.90	0.97
引田	0.86	0.99	0.90	1.01	0.85	1.00	0.89	1.00	0.67	0.98	0.72	1.07	0.74	1.00	0.77	1.04
三本松	0.65	0.97	0.88	0.90	0.71	0.95	0.83	0.94	-0.30	1.00	0.51	1.00	-0.09	0.99	0.31	1.01
津田	0.78	1.15	0.92	1.04	0.84	1.15	0.93	1.06	-0.57	1.02	-0.42	0.54	-0.54	0.94	-0.59	0.91
高松	0.75	1.10	0.61	1.13	0.72	1.21	0.66	1.14	0.14	0.80	-0.19	0.18	-0.04	0.65	-0.05	0.60
今治	0.61	1.09	0.64	1.04	0.62	1.11	0.65	1.03	-0.34	1.02	0.01	0.72	-0.10	0.99	0.06	0.94
上関	0.81	1.03	0.92	0.99	0.87	1.03	0.91	1.00	0.45	1.03	0.64	1.00	0.60	1.03	0.64	1.03
荏田	0.76	1.10	0.83	0.86	0.79	1.02	0.83	0.93	0.55	1.01	0.63	0.88	0.70	1.00	0.78	1.00
大分	0.90	0.93	0.75	0.90	0.83	0.96	0.79	0.87	0.00	1.02	0.26	0.75	0.14	0.98	0.33	0.96
佐田岬先	0.75	0.96	0.88	1.05	0.84	1.01	0.88	1.00	0.93	0.95	0.92	1.13	0.93	0.99	0.94	1.00
佐田岬	0.92	1.03	0.87	1.10	0.91	1.10	0.88	1.07	0.77	0.92	0.70	1.14	0.75	0.98	0.76	0.99

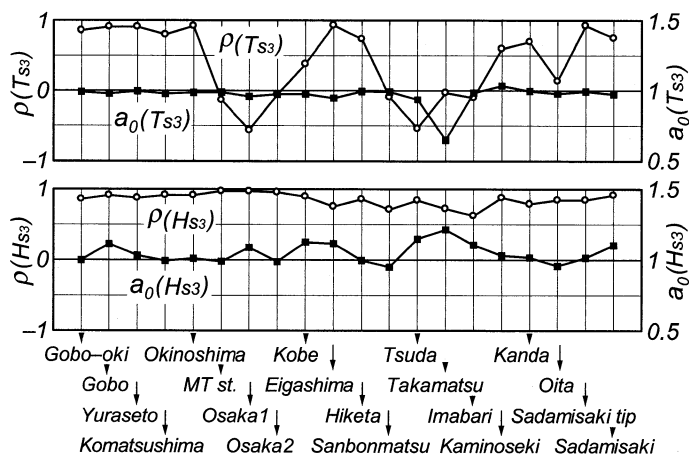


図-7 瀬戸内海沿岸の20波浪観測地点における月別波高・周期誤差指標

ない地点が多いこと、を明らかにした。

最後に、膨大な風・波浪観測資料を提供戴いた多数の関係機関に謝意を表すとともに、NOWPHASによる波浪観測資料も利用したことを付記する。

参考文献

- 塩野清治・弘海原 清・升本真二 (1985) : パソコンで不規則に分布するデータを格子点データに変換してコンターマップを作成する方法(1) - 加重一次補間法, 情報地質(10), pp.65-78.
日野幹雄・山口正隆・畑田佳男・大福 学・野中浩一(2008) : 東京

湾における長期の波浪特性の推定, 水工学論文集, 第52巻, pp.1351-1356.

- 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・大福 学・日野幹雄・畑田佳男・森 正憲・野中浩一(2006) : 内湾・内海における波浪の長期推算システムの構築 - 伊勢湾の場合 -, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.116-120.
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.