

スペクトル波浪相関に基づく宮崎港波浪予測 情報システムの構築

DEVELOPMENT OF REAL-TIME WAVE INFORMATION SYSTEM OF THE
MIYAZAKI-PORT BASED ON THE SPECTRUM CORRELATION ANALYSIS

永井紀彦¹・里見 茂²・小澤康彦³・吉田秀樹⁴・竹下 彰⁵・額田恭史⁶
Toshihiko NAGAI, Shigeru SATOMI, Yasuhiko OZAWA, Hideki YOSHIDA, Akira TAKESHITA
and Kyoushi NUKADA

¹フェロー 工博 (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室長
(〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²非会員 工修 (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部海象情報研究室
(〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³非会員 工修 前九州地方整備局宮崎港湾・空港整備事務所長
(〒880-0858宮崎県宮崎市港1丁目16番)

⁴正会員 工修 九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所長
(〒750-0066山口県下関市東大和町2-29-1)

⁵非会員 工修 (株)東京久栄環境事業部環境創出部担当部長
(〒333-0866 埼玉県川口市芝6906-10)

⁶非会員 工修 前(財)沿岸技術研究センター波浪情報部主任研究員
(〒102-0092東京都千代田区隼町3-16住友半蔵門ビル6F)

Observed coastal wave data are very important information for a port planning, design, construction, operation and management. Nevertheless, it is difficult to install wave gauges off all the ports and harbors due to financial and social restrictions. In the case of the Miyazaki-Port, faced to the Pacific Ocean and located at the southeast coast of the Kyusyu Island of Japan, wave information had to be obtained from a wave gauge off the Hososhima-Port, 60km far from the Miyazaki-Port, as the old on-site wave gauge got unable to continue observation. This paper introduced a newly developed a real-time wave information system of the Miyazaki-Port using the observed directional wave spectrum data off the Hososhima-Port by the way of spectrum correlation analysis.

Key Words : wave information, directional spectrum, observation, spectrum correlation, real-time

1. はじめに

直近沖合に波浪計の設置ができない場合, 少し離れた港湾沖合の波浪観測情報を用いて, 当該港湾の波浪の推定予測を行なわなければならない事例は数多い¹⁾. 宮崎港でも, 定常波浪観測の維持が困難となり, 細島港の観測情報の活用が迫られるようになった. 本研究は, 宮崎港と細島港の2観測点の波浪相関をスペクトル情報として整理し, 予測システムの構築を行ったものである.

2. 観測データと解析方法

細島港沖(水深47m)における海象計²⁾による定常波浪観測データを, 同時期における宮崎港沖(水深29m)における波浪観測データと比較し, 図-1に示す期間中の両観測点のデータの相関を検討した.

この際, 細島港沖における定常波浪観測は2002年4月に新設されたばかりであり, 観測開始当初はさまざまなトラブルによって欠測が多かったため, 両観測点における並行観測期間が必ずしも十分に確保できなかった. また, 2003年5月に終了した宮崎港沖波浪観測システムは, 電源供給の制約によって切れ目のない連続観測を実施することができず, このため, 長周期波浪成分の観測情報が得られていなかったこと, 等を考慮して, 2003年8月から11月までの台風期(約3ヶ月)について, 宮崎港沖の同じ地点に直記式波浪計を設置し, 並行観測データを追加・補足した.

表-1は, 各観測点における観測条件を示したものである. 並行観測期間中の両観測点におけるデータ(有義波諸元, スペクトル解析に基づく風波やうねりの周期帯波浪表示^{3), 4)}, および長周期波成分)について, 相関性を検討した. さらに, ここで

得られた相関式を活用し、細島港沖の波浪観測情報に基づいて宮崎港沖の波浪実況を瞬時に把握することのできるシステムの構築・運用に関して検討し、基本設計を行った^{5)・6)}。

年 月	2002												2003												2004		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3			
宮崎サザン																5/13											
宮崎簡易																	8/25					11/13					
細島																											

図－1 並行観測状況

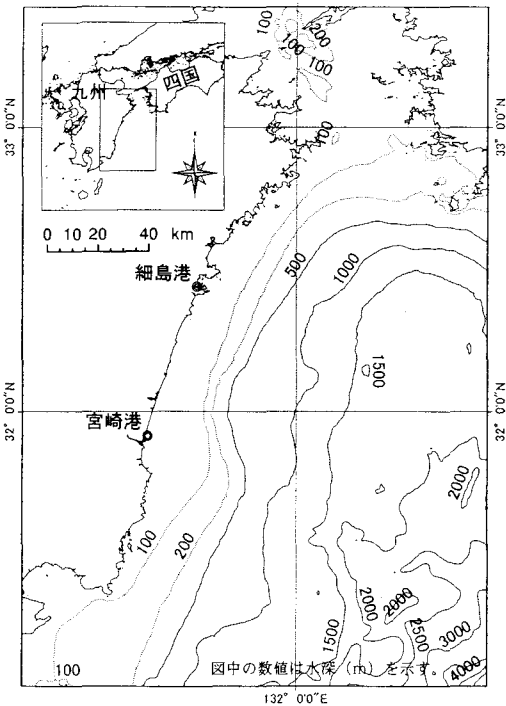
表－1 波浪観測施設・機器の仕様等

	宮崎港 (サザンウェーブ)		宮崎港簡易観測	細島港
波高計設置位置	北緯	31° 49' 08"	(サザンウェーブ)と同じ	32° 26' 36"
	東経	131° 35' 07"		131° 43' 42"
	水深	29m		46.9m
観測機器	波高	超音波式波高計	超音波式波高計	海象計
	波向	超音波式波向計	電磁式流速計	
観測時間	毎偶数正時の前後 20 分間	連続観測	連続観測	連続観測
	サンプリング間隔 0.5 秒	サンプリング間隔 0.5 秒	サンプリング間隔 0.5 秒	サンプリング間隔 0.5 秒
観測期間	1990 年 4 月～ 2003 年 5 月 31 日	2003 年 8 月 25 日～2003 年 11 月 13 日	2002 年 3 月 20 日～現在	

3. 細島港と宮崎港の波浪の概要

(1) 地形の影響

細島港と宮崎港は図－2 に示すように、NNE-SSW 方向に延びる宮崎県の太平洋岸に面し、細島港は宮崎港の約60km北に位置している。



図－2 細島港と宮崎港

吹送距離が長く波浪が発達する方向は、地形的な要因から両地点ともNE-E-SSWと考えられる。しかし、宮崎港より北に位置する細島港では四国の影響で北よりの吹送距離が短く、その方向の波は宮崎港と比

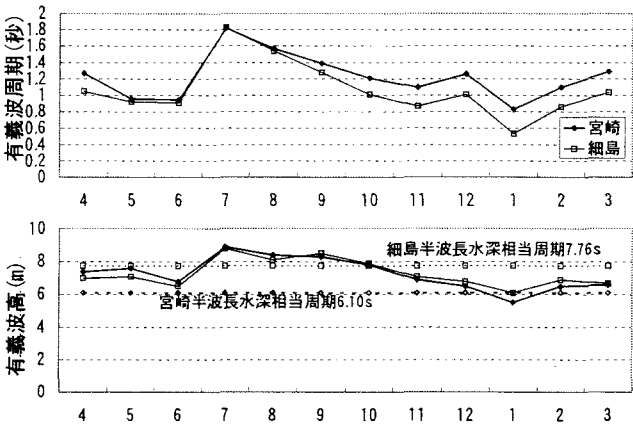
較して発達しにくいと考えられる。また、両港湾ともN-W-SWの方向については陸から沖に向かう方向となるため、波浪が港湾の施工計画等に及ぼす影響はほとんど無いものと考えられる。以上より、本調査ではNE-E-SSWの波向を検討対象とした。

(2) 水深の影響

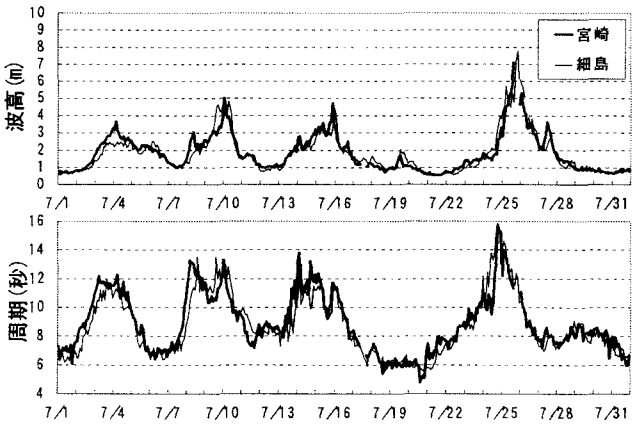
細島港及び宮崎港の波高計の設置水深は、それぞれ47mと29mである。波が海底の影響を受ける目安となる半波長水深に相当する波の周期は、細島で7.8s、宮崎で6.1sとなる。両地点ともこれらの周期より長い波については、水深の変化による屈折や浅水変形といった変形をいくらか受けた波を観測していることになる。

(3) 波高・周期・波向の出現状況

細島港と宮崎港の有義波の月別平均値を図－3に、経時変化を図－4に示す。季節風の影響により、北よりの波浪が多く観測される冬場には、細島に比べ宮崎で波高が高い傾向にあるものの、年間を通してほぼ同じような変動が見られる。また、図－5に波向の出現状況を示す。



図－3 有義波高・有義波周期の月別平均値の推移



図－4 有義波高・有義波周期の経時変化の比較

(4) 代表波向の状況

細島港の有義波波向を基準に宮崎港との波高の回帰式を求め、季節変化について検討した。その結果、季節の違いによる変化はほとんど見られず、波向毎

に細島港の波浪データから宮崎港の波浪データへの換算式を作ること季節変動は包含されると判断した。なお、長周期波や周期帯別波浪の解析も同様に波向毎に相関式を求めた。

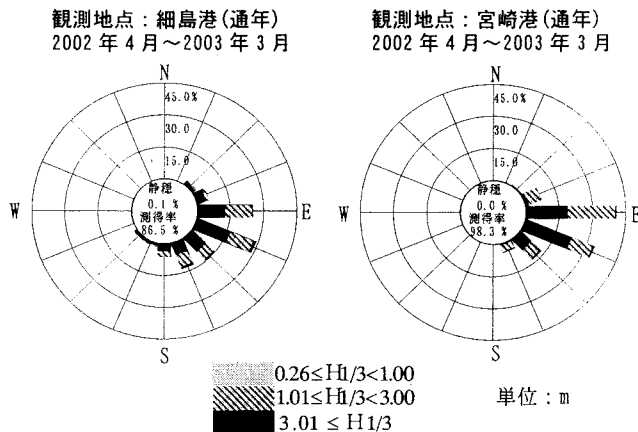


図-5 有義波の波向別波高出現頻度

(5) 周期帯別波浪諸元^{3), 4)}

周期帯別波浪について宮崎港の観測結果の一部(2002年8月から9月)を有義波の実測値や成分波の合成値とともに図-6に、周期帯の区分を表-2に示す。ただし、実際の周波数スペクトルの演算はFFT法によって離散的に行われている。このため、表-2の周期帯区分は、表記上のものであり、実際には、例えばf1の周期帯は32.0s以上の周期に対応するスペクトル演算結果の部分積分値として定義され、f2の周期帯は16.0s以上25.6s以下の周期に対応する部分積分値として定義される。

高波浪時は、主にf3周期帯(10s~15s)が卓越し、f2~f4周期帯(8s~30s)の合成(f2*f3*f4)ではほぼ有義波の実測値と一致している。

表-2 周期帯の区分

区分	対応周期	区分	対応周期
f1	30s以上	f4	8s~10s
f2	15s~30s	f5	5s~8s
f3	10s~15s	f6	5s以下

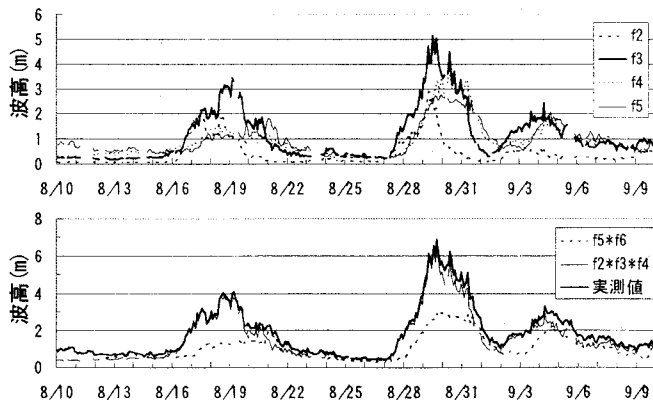


図-6 周期帯成分波の経時変化

(6) 長周期波諸元⁷⁾

比較的大きい長周期波高が観測された2003年9月から10月の宮崎港の長周期波高と有義波高の経時変化を図-7に示す。両者の変動は概ね一致している。

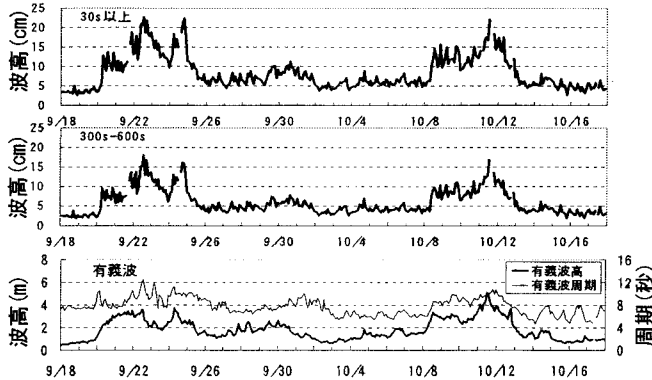


図-7 長周期波の経時変化

4. 波浪の相関解析

(1) 有義波高、有義波周期の相関

細島港の波向別に波高、周期について直線回帰により両者の相関を検討した。結果を表-3に示す。有義波高、有義波周期ともデータ数の少ない4波向(NE, ENE, S, SSW)を除き、0.8以上の相関係数Rが見られた。なお、表-3において、xは細島の観測値、yは宮崎の推算値である。

表-3 有義波の波高と周期の相関解析結果

	波高			周期			データ数
	近似式(y=ax+b)		相関係数R	近似式(y=ax+b)		相関係数R	
	a	b		a	b		
NE	1.2562	0.1005	0.7495	0.7739	1.5413	0.4441	86
ENE	1.1644	0.1459	0.7314	0.7163	1.8962	0.6720	214
E	0.8814	0.3567	0.8247	0.8802	0.7767	0.8084	951
ESE	0.9100	0.2376	0.9190	0.8829	0.9592	0.8576	1094
SE	0.9910	0.0848	0.9591	0.8955	0.9163	0.8717	554
SSE	0.9506	0.1233	0.9475	0.9422	0.5613	0.9193	492
S	0.7832	0.2787	0.7970	0.8568	1.0661	0.7646	233
SSW	0.4163	0.5546	0.4798	0.7781	1.5188	0.6177	67
全方向	0.9137	0.2521	0.9044	0.8995	0.7128	0.8581	4331

(2) 代表波向の相関

通常の波浪観測台帳は、代表波向でとりまとめられている。細島港沖に新設された海象計は方向スペクトル演算を常時実施しているためピーク波向を代表波向としているが、宮崎港沖の流速計型波向計では方向スペクトルの算定を常時行っていないので平均波向が代表波向として波浪台帳に出力されている。こうした問題は残されるものの、ここでは、既存の波浪台帳をもとに、代表波向の相関性を検討した。なお、波向の相関性は、本来、周期によって異なることが想定されるが、ここでは、既存の波浪台帳に基づいた検討を行ったため、周期の影響は考慮できなかった。

細島港の波向は、NE~SWの広い範囲に分布するのに対して、宮崎港の波向は、やや分布範囲が狭く、NE~Sである。この原因としては、細島港の波浪観

測点が水深47mと深いため観測された波が変形をほとんど受けていないのに対して、宮崎港では、観測点の水深が比較的浅く(水深29m)、屈折により波向がそろった波が観測されたためと考えられる。

したがって、単なる波向の相関式で宮崎港の波向を推測することは適当でないと考え、細島港の波向を基準として、細島港と宮崎港の同一時刻の波向差(宮崎港波向－細島港波向)の頻度分布を作成し、波向差の出現頻度の変化を検討した。

その結果、波向毎に波向差の出現度数のピークが順次移動しており、宮崎港の波向の換算は、波向差の頻度分布から細島港の波向別に宮崎港の波向に補正する波向補正角(表－4、時計回りを正)を設定し、補正することとした。

表－4 代表波向き差の度数のピーク

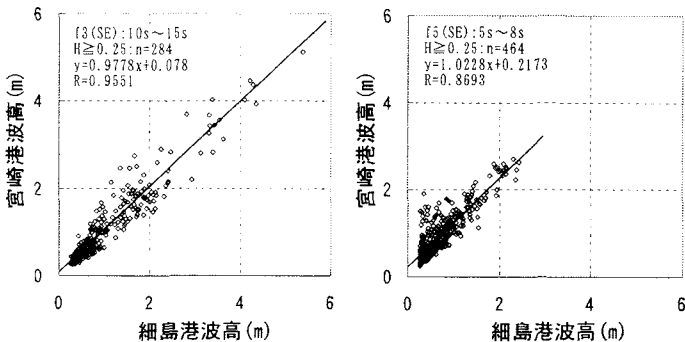
細島波向	NE,ENE,E	ESE	SE	SSE,S,SSW
補正角(度)	5	15	25	35(参考値)

※細島の波向は、解析に使用したデータの出現方向を示すもので、上記以外の波向は出現していない。

(3) 周期帯毎の波高の相関

細島港沖の観測結果を用いて、より精度よく宮崎港沖の波高と周期を算定することを目的として、細島港沖でのスペクトル解析から得られる周期帯別波浪(f1～f6周期帯)の内、f2～f5周期帯のそれぞれに対して、宮崎港沖の周期帯波高の算定を直線回帰によって検討した。この際、波高の小さいデータの波向は物理的意味が少なく不安定な値となるので、波高の小さいデータは検討対象から除外した。すなわち、各周期帯の換算波高が0.25m未満の場合、波向別の相関解析からはずすものとした。なお、f1とf6については波向きが正確に規定できないため、全方向のデータで相関関係を調べた。この結果を、波向がSEの場合のf3とf5周期帯についての事例を図－8に示し、全体の解析結果を表－5に示す。

図－8からわかるように、f3の波高(波向：SE)はR=0.96とさらに良い相関となっており、両港が約60km離れているにもかかわらず、うねりに相当する波は、ほぼ同じように到達していることが推測される。他方、周期の短いf5の波高(波向：SE)ではR=0.87と相関が比較的悪く、短い周期の波は局所的な風の変化により変動するためと考えられる。



図－8 周期帯別波高の相関解析結果

表－5 周期帯波高の解析結果

	f2(15s～30s)				f3(10s～15s)			
	近似式 (y=ax+b)		相関係数R	データ数	近似式 (y=ax+b)		相関係数R	データ数
	a	b			a	b		
NE	—	—	—	1	—	—	—	2
ENE	1.0707	0.0675	0.6910	18	0.8936	0.0971	0.8820	25
E	0.8875	0.1523	0.8718	158	0.9443	0.1072	0.8929	664
ESE	0.6979	0.2134	0.8924	134	0.9297	0.0962	0.9371	738
SE	0.8907	0.1293	0.8699	141	0.9778	0.0780	0.9551	284
SSE	0.6545	0.3575	0.8083	49	0.8100	0.3415	0.8810	92
S	—	—	—	1	0.7452	0.4376	0.9150	7
SSW	—	—	—	0	—	—	—	1
全方向	0.9234	0.0249	0.9338	2944	0.9668	0.0563	0.9464	2944

	f4(8s～10s)				f5(5s～8s)			
	近似式 (y=ax+b)		相関係数R	データ数	近似式 (y=ax+b)		相関係数R	データ数
	a	b			a	b		
NE	—	—	—	0	0.5498	0.9676	0.1944	21
ENE	1.2379	-0.1495	0.9466	7	0.8665	0.7874	0.4051	113
E	0.8086	0.1636	0.8092	536	0.6708	0.6190	0.4670	448
ESE	0.9224	0.1040	0.9029	888	0.9782	0.3295	0.7956	661
SE	0.9740	0.0631	0.9554	531	1.0228	0.2173	0.8693	464
SSE	0.9229	0.0934	0.9323	223	0.8151	0.2790	0.8017	337
S	0.8044	0.0656	0.8686	23	0.8426	0.2410	0.7103	76
SSW	—	—	—	0	6.1220	-1.4990	0.9285	3
全方向	0.9474	0.0688	0.9310	2944	0.9630	0.3020	0.7455	2944

(4) 長周期波高の相関

長周期波高の相関は、周期30秒以上及び60s～300sについて表－6に示す。

表－6 長周期波高の相関

	30s～			60s～300s		
	近似式 (y=ax+b)		相関係数R	近似式 (y=ax+b)		相関係数R
	a	b		a	b	
NE	0.5786	-0.9553	0.8427	0.5465	0.0048	0.7876
ENE	0.5002	0.9995	0.4803	0.4790	0.7413	0.5676
E	0.8733	-0.4816	0.5934	1.0733	-1.6012	0.7572
ESE	1.2157	-2.4309	0.8089	1.1963	-1.8721	0.8259
SE	0.7086	0.6056	0.6218	0.7265	0.3728	0.6642
SSE	0.4132	2.0648	0.4247	0.6109	0.6676	0.5813
S	0.7907	-0.3736	0.6321	0.7268	0.1667	0.6153
SSW	0.0647	4.3487	0.1100	0.2321	2.2281	0.3581
全方向	0.9653	-1.1597	0.7036	1.0058	-1.0842	0.7594

(5) 宮崎港の有義波と長周期波高の相関

宮崎港の有義波と長周期波高の相関の内、30s以上及び60s～300sについて表－7に示す。

表－7 有義波と長周期波高の相関

	30s～			60s～300s		
	近似式 (y=ax+b)×10 ⁻²		相関係数R	近似式 (y=ax+b)×10 ⁻²		相関係数R
	a	b		a	b	
NE	2.4441	1.8375	0.8887	1.5667	1.4768	0.8722
ENE	4.9264	-0.2947	0.8088	3.6462	-0.5060	0.7915
E	3.7745	1.3710	0.8752	2.7385	0.8612	0.8601
ESE	3.0016	2.0492	0.7874	2.1407	1.4094	0.7545
SE	2.9354	1.9957	0.8178	2.0566	1.4260	0.7865
SSE	2.5735	2.2401	0.7832	1.7623	1.6364	0.7470
S	2.7204	1.4367	0.7949	1.9013	1.0362	0.7647
全方向	3.8376	1.2247	0.8571	2.7647	0.7945	0.8388

5. 波浪の換算方法

(1) 有義波の推定

宮崎港の有義波を推定するには、①有義波の相関関係から推定する方法、②スペクトル解析から

得られる周期帯別波浪(f1～f6周期帯)の推定値を合成する方法が考えられる。

①は、表－3及び表－4から推定する。②は、表－5から各周期帯毎に成分波を推定し、それらを合成して有義波を求める。

周期帯別波高から有義波高を求めるにはf1～f6の各成分の波高を次の式のようにエネルギー合成して求めることができる。

$$\text{有義波高} = \{(f1)^2 + (f2)^2 + (f3)^2 + (f4)^2 + (f5)^2 + (f6)^2\}^{1/2}$$

ここで、(f1)～(f6)は各成分の波高を示す。

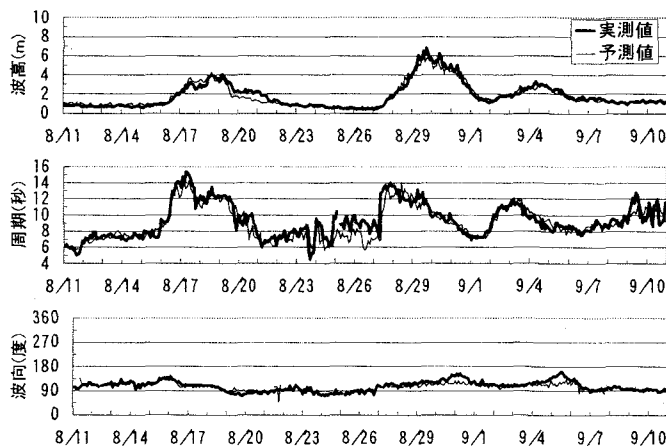
(2) 長周期波の推定

細島港の有義波高から宮崎港の長周期波高を推定するには、①細島港の有義波を宮崎港の有義波に換算し、その後、長周期波に換算する方法(細島港の有義波高の波向別に30s～60s, 60s～300s, 300s～600s, 30s以上の4通りの周期帯について、細島港の有義波高から宮崎港の有義波高を介して宮崎港の長周期波高を推定)、②宮崎港の有義波高を経由せず、細島港の長周期波高から宮崎港の長周期波高に換算する方法(細島港の有義波の波向別に①と同様に4通りの周期帯それぞれについて、細島の長周期波高から宮崎港の長周期波高を推定)する方法が考えられる。

6. 波浪換算結果と実測値の比較による検証

(1) 有義波の検証

有義波の換算は、5.(1)で述べた①と②の手法で、大きな相関性の相違が認められなかったため、より簡便な①の手法を採用することとした。これは、周期の短い周期帯では両観測点の相関性が低くなるためであり、各周期帯を合成した結果の精度は、相関性の低い周期帯によって決まってしまうためである。図－9に実測値との比較を示す。



図－9 換算結果の検証(有義波)

台風接近直前時(8月26日)の有義波周期の予測値と実測値が一致しないのは、局所的な影響を受け

やすい周期の短い波浪成分の一致が悪いためである。

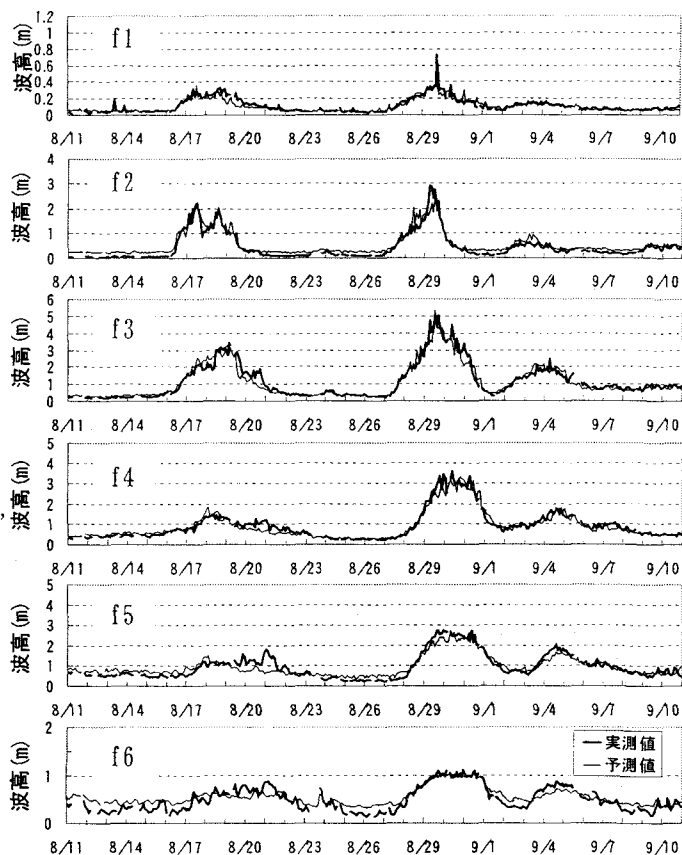
また、波向はやや不安定になっているが、この原因は、予測の元になっている細島港の波向が、波高が比較的小さい時に不安定であったためである。

(2) 周期帯別波高の検証

長周期波の換算にあたっては、より換算精度が良好であった5.(2)で述べた②の手法を採用した。

図－10に実測値との比較を示す。うねり成分に相当する周期の比較的小さいf2やf3は、短周期のf5, f6に比べて実測値と予測値の一致性が良くなっている。

これは周期の長い波が発達するためには、比較的小さい時間と空間スケールが必要であり、約60km離れた場所である細島と宮崎で発生原因が同じなのに対し、周期の短いものは短い時間と空間スケールで発生しており、局所的な風の変化や海底地形の影響を受けやすいことや細島と宮崎で異なった発生原因の場合が多いためと考えられる。



図－10 換算結果の検証(周期帯別波高)

(3) 長周期波高の検証

台風などの気象擾乱が観測点から離れた場所にある場合には、有義波が小さくても大きな長周期波高が観測される場合がある。したがって、長周期波の換算では有義波を媒介に推定した場合、推定精度が低下する可能性があり、有義波諸元との経験的な相関に基づくよりも、実測された長周期波データに基づいて換算したほうが良好な再現性が得られることが確認できた。図－11に実測値との比較を示す。

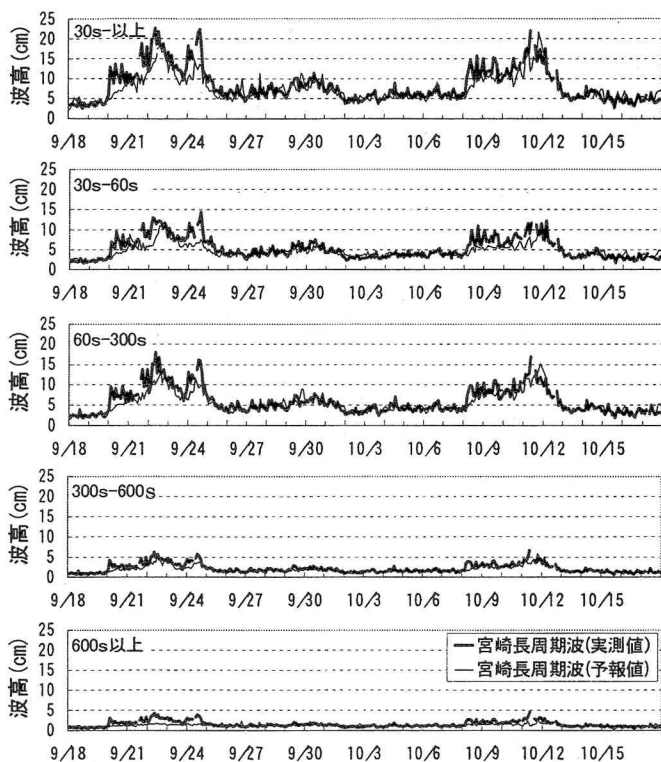


図-11 換算結果の検証(長周期波)

7. リアルタイム運用への応用

本相関式をリアルタイム運用し、宮崎港の波浪実況を、多くの海事関係者に同時配信表示するためには、専用端末方式に加えて、Web配信方式も可能となった既存の沿岸気象海象情報配信システムを改良することが合理的である。この改良システムを利用すれば、細島港沖における周期帯波浪情報はセンターにおいて自動処理されるため、手入力作業なしで、リアルタイムの宮崎港沖の周期帯波浪情報を、多数のユーザが同時監視することが可能である。

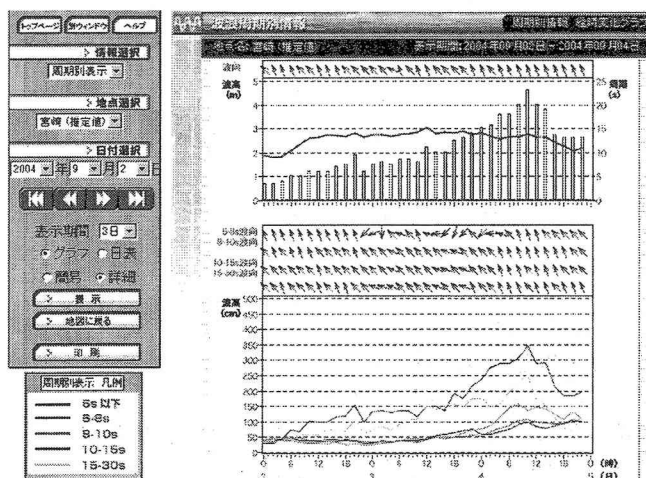


図-12 結果の表示例

図-12は、現存する沿岸気象海象情報配信システム(通称COMEINS)⁶⁾によってリアルタイムでWeb表示される。宮崎港沖波浪情報の提供イメージを示し

たものである。本研究で得られた相関関係式をリアルタイムで細島港沖波浪観測データに適用し、やはりリアルタイムで宮崎港沖波浪情報表示を行なうことが可能である。上段の図は有義波の経時変化図を、下段の図は周期帯波高の経時変化図を、それぞれ示している。このような表示を行なうことによって、波浪計が存在していた時と同様な波浪情報表示が可能となった。なお、図-10あるいは図-11で述べたように、表示結果はあくまでも相関解析による推算値であり、オンサイト観測値と厳密に1:1対応するものでないことには、運用上の注意が必要である。

8. まとめ

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 細島港の有義波観測結果から、宮崎港の有義波を図-9に示す精度で予測できることが示された。
- 2) うねりに相当する周期帯(f3)の波高(波向:SE)では $R=0.96$ と良い相関が得られた。これは両港が約60km離れているにもかかわらず、ほぼ同じように到達しているためと考えられる。
- 3) 周期の短い5~8秒の周期帯(f5)の波高(波向:SE)では $R=0.87$ と相関が比較的悪くなっている。これは、短い周期の波は局所的な風の変化により変動するためと考えられる。
- 4) 有義波の波高・周期は、換算値と実測値が概ね良く一致している。波向はやや不安定になっている部分が見られるが、これは波高が小さい場合に限られ、実務上大きな問題となるものではない。

参考文献

- 1) 永井紀彦・上田裕章・福岡康宣・小山良明：方向スペクトルを考慮した近接観測点における波浪相関の検討事例，海岸工学論文集，第49巻，土木学会，pp.1481-1485，2002。
- 2) 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫：水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発，海岸工学論文集，第42巻，土木学会，pp.1081-1085，1995。
- 3) 合田良実監修，海象観測データの解析・活用に関する研究会編集：波を測る(沿岸波浪観測の手引き)，(財)沿岸開発技術研究センター，212p.，2001。
- 4) 沿岸開発技術研究センター：沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書，181p.(および付録13p.)，2000。
- 5) 永井紀彦・小川英明：我が国における港湾海象観測情報網の現状と将来展望，第31回土木学会関東支部技術研究発表会講演集，2004。
- 6) 額田恭史・森谷誠生・永井紀彦：カムインズにおける津波の実況情報の充実に向けて，沿岸センター研究論文集，No.4，沿岸技術研究センター，pp.105-108，2004。
- 7) 永井紀彦・額田恭史・岩崎峯夫・久高将信：切れ目のない連続観測とスペクトル周期帯表示による全国沿岸の長周期波観測情報システム，海洋開発論文集，第18巻，土木学会，pp.149-154，2002。