高解像度波浪推算データベースとNOWPHAS沿岸波浪観測値を利用した方向スペクトル客観解析値の推定

OBJECTIVE ANALYSIS OF DIRECTIONAL WAVE SPECTRUM BY DATA ASSIMILATION USING HIGH RESOLUTION WAVE SIMULATION DATA AND NOWPHAS COASTAL WAVE OBSERVATION DATA

松浦邦明[1]・橋本典明[2]・河合弘泰[3]・川口浩二[4]・本橋昌志[5]・松藤絵理子[6]
Kuniaki MATSUURA, Noriaki HASHIMOTO Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI, Masashi MOTOHASHI and Eriko MATSUFUJI

[1] 水修　財団法人日本気象協会　首都圏支社（〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 55F）
[2]フェロー　工博　九州大学大学院教授　環境都市部門（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地）
[3]正会員　修（工）独立行政法人港湾空港技術研究所　海洋・水工部　海象情報研究領域長心得（〒239－0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
[4]正会員　博（工）　独立行政法人港湾空港技術研究所　海洋・水工部　主任研究官（〒239－0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
[5] 財団法人日本気象協会　首都圏支社（〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 55F）
[6] 学修　財団法人日本気象協会　首都圏支社（〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 55F）

An objective analysis, the optimum interpolation method, was applied for estimating directional wave spectrum from the data of a high resolution wave simulation system and the NOWPHAS coastal wave observation system. In the analysis, the number of components of directional spectrum with respect to frequency and direction was appropriately determined to minimize the error of the initial guess of the directional spectrum since it is strongly required to take into account the balance between the accuracy of the observation data and that of the numerical simulation data in the assimilation. The proposed method enabled the accuracy improvement of estimating directional wave spectrum as well as the significant wave height and period.

Key Words : *high resolution wave simulation data-base, NOWPHAS coastal wave observation, data assimilation, objective analysis of wave directional spectrum.*

1．はじめに

海岸・港湾の安全管理や設計波算定等において，波浪観測が行われていない地点でも正確な波浪情報が必要とされている．そこで，松浦ほか[1),2)]は，波浪観測が行われていない任意の地点を対象として，波浪予測値と波浪観測値（NOWPHAS および気象庁沿岸波浪観測地点）の両方を用いて，実況推定および予報値の修正を行い，先にリアルタイムで作成した実況推定値を，12 時間後の予測更新時により確かな波浪情報に更新して，これを客観解析値としてデータベースに追加するシステムを構築した．

その結果，日本沿岸の波浪推算精度は，波高の場合，回帰式の勾配（回帰係数）は 0.8～1.2 程度，相関係数は 0.7～0.9 程度であるが，波浪観測を実施していない地点においても，その周辺海域の観測値を同化することで，回帰係数の勾配はほぼ 1 に近づき，また相関係数も 0.1 程度向上し，有義波諸元の高精度な客観解析値を求めることが可能になった．

しかし，方向スペクトルについては未だ観測値と精度よく一致しない場合もあるのが現状である．より高精度な波浪諸元情報や方向スペクトルを推算するためには，これまで以上に精度のよい海上風の推算データが必要であるとともに，より高精度な波浪モデルを開発する必要がある．本研究では，波浪モデルの改良による BIAS 補正（実測値と推算値の回帰式の傾きを 1 に近づける）を行い，現状で利用可能な方向スペクトルの推算値と観測値を用い，より

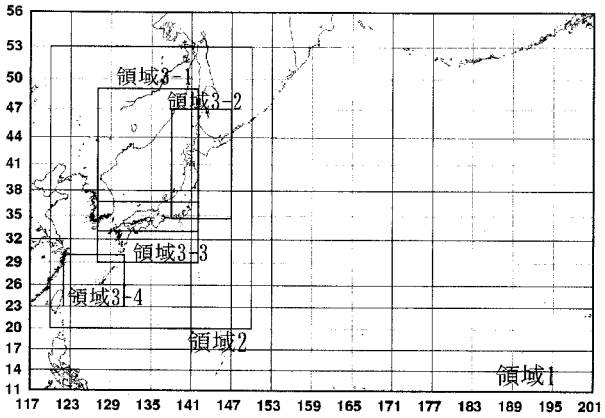


図-1 波浪推算データベースの領域（領域1～3）

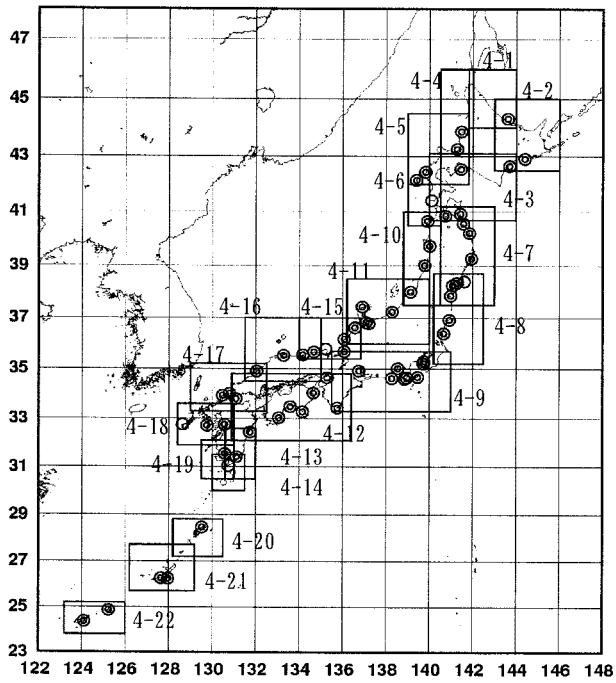


図-2 領域4の分割とデータ同化地点
◎NOWPHAS，○気象庁

高精度な方向スペクトルを推定するための実用的な方法を検討し，波浪情報を必要とする種々の実務の役に資することを目的としている．

2．解析手法

(1) 解析データ、解析対象領域と波浪推算手法

解析に用いたデータは，波浪推算値と波浪観測値とした．本研究の最終目的は，波高・周期だけではなく，方向スペクトルも含めた客観解析値を作成することである．そこで，（財）日本気象協会が構築したデータベースを利用した．本研究では，この波浪推算データベースの有義波諸元と方向スペクトルを初期推定値とした．

このデータベースは領域 1 から領域 4 までを図-1,2, 表-1 に示すとおり NESTING により順次詳細な推算を行い，領域 4 では 2'間隔のデータを作成している．

表-1 解析対象領域と波浪観測地点

領域	領域1	領域2	領域3	領域4
	1-1	1-2	3-1～3-3	4-1～4-22
格子間隔	36'(約60km)	12'(約20km)	6'(約10km)	2'(約3.7km)
方向分割数	32×25	32×25	32×25	32×25
海上風	Reanalysis NCEP	RSM 気象庁	RSM 気象庁	RSM 気象庁

表-2 波浪推算モデルWAMの概要

エネルギーソース項	採用した式
風から波へのエネルギー入力項	Honda・Mitsuyasu式[3]の改良型
白波砕波	Janssen [4]
非線形エネルギー輸送	Hasselman et al. [5]
海底摩擦	深海条件のため考慮しない
地形性砕波	深海条件のため考慮しない

表-3 解析対象領域と波浪観測地点

領域No.	同化地点							
4-1	紋別							
4-2	紋別	釧路	十勝					
4-3	十勝	苫小牧						
4-4	留萌	石狩新港						
4-5	留萌	石狩新港	苫小牧					
4-6	十勝	苫小牧	襟裳	(松前)				
4-7	むつ小川原	八戸	久慈	宮古	釜石	仙台新港	石巻	相馬
4-8	仙台新港	石巻	相馬	小名浜	鹿島	(江ノ島)		
4-9	アシカ島	波浮	下田	御前崎				
4-10	深浦	秋田	酒田	(温海)	新潟沖			
4-11	新潟沖	直江津	輪島	富山	伏木富山	金沢		
4-12	潮岬	室津	高知	上川口	細島			
4-13	細島	志布志						
4-14	志布志							
4-15	金沢	福井	敦賀	(経ヶ岬)	鳥取			
4-16	柴山	鳥取	境港	浜田				
4-17	浜田	藍島	玄界灘					
4-18	(福江)	伊王島						
4-19	(佐多岬)							
4-20	名瀬							
4-21	那覇	中城湾港						
4-22	平良	石垣						

括弧なし：NOWPHAS，括弧あり：気象庁
ハッチングした地点は，局地性により空間代表性が低いと判断された地点

対象海域，対象期間は，領域 4-8（東北太平洋；検証地点は小名浜）では 2004 年 9 月の 1 ヶ月間,領域 4-21（沖縄本島周辺；検証地点は中城湾港）では 2002 年 7 月の 1 ヶ月間とした．

波浪観測地点が少なく，データ同化の効果が期待できない海域では，あらかじめ第一推定値の BIAS や誤差を小さくしておく必要がある．そこで，波浪推算に用いたモデルは，WAM を改良し入力風に対してできるだけ BIAS が生じない様にエネルギーソース項を調整している．表-2 に各ソース項を示す．なお，過去の研究から順風による波浪の発達率と逆風による減衰率は同程度であるとされている（例えば，光易・吉田 [6]）ため，風から波へのエネルギー入力項は，逆風時に負値をとるようにし，エネルギー減衰させた．さらに，Miles 項の風向依存性については多くのモデルでは風速に $\cos(\theta-\theta_w)$ を乗じている．ここで，θ は風向，θ_w は波向である．しかし,Janssen [7] は $B \propto (c/u_*)^2$ のため，$\cos^2(\theta-\theta_w)$ と推論した．ここで，B は Miles 項，c は波速，u_* は摩擦速度である．本研究でもこれ

を採用した．さらに，Powell et al.[8]，Donelan et al.[9]，Andreas[10),11)]等の最近の観測結果から，海面抵抗係数Cdは風速があるレベルに達すると飽和し減少するとしている．そこで，本モデルは簡便にCdに上限を設け，2.5×10^{-3}とした．波浪推算モデルのスペクトル分解能は（32 方位×25 周波数）成分とした．

有義波高，有義波周期の同化には，表-3 の NOWPHAS，気象庁の沿岸波浪観測地点（表中括弧書き）を用い，方向スペクトルの同化には，水位・流速の波形データを検定・保存している NOWPHAS 地点を利用した．

観測された波形から方向スペクトルを求める際には橋本ほか[12)]の方法に倣った．

(2) 解析手法

観測された波浪は，風の時間・空間的な積分の結果であり，スペクトルの方向・周波数の各成分は「風の履歴」を表現しているということができる．波浪推算結果を，観測地点の有義波と比較する場合，後述するが，本解析においても相関係数は概ね 0.8～0.9 程度で一致する．一方，観測地点のスペクトルと比較する場合はあまり一致しないのが現状である．これは，有義波高は全エネルギーであるので入力となる海上風が平均に合えば一致するが，方向スペクトルは入力となる海上風の時間的な変化・空間的な分布の精度に依存し，さらに，波浪モデルの精度（特性）にも依存するためであると考えられる．

推算方向スペクトルを観測方向スペクトルで修正するためには，まず方向スペクトルの推算誤差を評価しておく必要がある．しかしこの場合，誤差評価は方向スペクトルの分解能に依存するが，現状の海上風・波浪推算精度では，いたずらに高分解能な方向スペクトルを設定して評価しても意味がない．スペクトルの誤差は，風の時空間精度と波浪モデルの精度に依存するため，風の推定精度，モデルの精度に見合ったスペクトル誤差の修正が重要である．したがって，初期推定値の誤差が最小となるように，成分波を適切にまとめてから同化することが望ましい．そこでここでは，現状の波浪モデルにおいて，方向スペクトルをどのような分解能で設定した場合に，より合理的な推算値の修正が可能であるのかを検討することとした．データ同化の際の方向スペクトルの方向分割数は波浪推算分解能の 32 方位とその半分の 16 方位とした．これは，現在波向情報が 16 方位で現されることが多いためである．周波数分割数は波浪推算分解能の 25 分割，エネルギーレベルが高くなる可能性のある周期 10 秒前後の分解能を維持しそれ以外の周期帯で解像度を粗くした 12 分割および NOWPHAS の周期帯別波浪情報と同様の 5 分割とした．データ同化の際の方向スペクトル分割は表-4 に示す 4 ケースとした．

解析手法は，同化成分が多いため，計算負荷の小さい最適内挿法（Optimum Interporation）を用いた．この際，誤差の空間相関μ_{ig}^{P}は，ローレンツモデル

表-4 データ同化の際の方向スペクトルの方向分割と周波数分割の設定

No	周波数	周期	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
			方向スペクトル成分１	方向スペクトル成分２	方向スペクトル成分３	方向スペクトル成分４
			32方位	32方位	16方位	16方位
1	0.04177	23.9	1	1	1	1
2	0.04595	21.8	2			
3	0.05054	19.8	3	2	2	
4	0.05560	18.0	4			
5	0.06116	16.4	5	3	3	
6	0.06727	14.9	6			
7	0.07400	13.5	7	4	4	2
8	0.08140	12.3	8	5	5	
9	0.08954	11.2	9	6	6	
10	0.09850	10.2	10	7	7	
11	0.10835	9.2	11	8	8	3
12	0.11918	8.4	12	9	9	
13	0.13110	7.6	13	10	10	4
14	0.14421	6.9	14			
15	0.15863	6.3	15			
16	0.17449	5.7	16	11	11	5
17	0.19194	5.2	17			
18	0.21114	4.7	18			
19	0.23225	4.3	19			
20	0.25548	3.9	20	12	12	
21	0.28102	3.6	21			
22	0.30913	3.2	22			
23	0.34004	2.9	23			
24	0.37404	2.7	24			
25	0.41145	2.4	25			

表-5 モデル改良前後における波浪諸元の相関解析結果

		改良前		改良後	
		相関係数	回帰係数	相関係数	回帰係数
小名浜	波高	0.86	1.23	0.83	1.02
	周期	0.60	1.19	0.65	1.13
	波向	0.83	0.87	0.81	0.88
中城湾港	波高	0.91	1.30	0.90	1.14
	周期	0.71	1.16	0.69	1.12

により近似した．

$$\mu_{ig}^{P}=\frac{a}{1+br_{ig}^{2}} \qquad (1)$$

r_{ig}は2点i,g間の距離(km)である．また，bは誤差相関の及ぶ距離(相関距離)を決定する量で，$r_{ig}=\sqrt{1/b}$で共分散が半分になる．aは予測誤差分散を表すパラメータである．

松浦ほか[1)]は，ローレンツモデルのパラメータは，海域別に現象のスケールを波形勾配により rank1（うねり：波形勾配 0.01 未満），rank2（減衰距離の短いうねり：波形勾配 0.01～0.025），rank3（風波：波形勾配 0.025 以上）に分けて D 値（観測値と予測値の差）の空間相関解析を行った．ここでは，方向スペクトルの成分毎に同化することが，rank 分けに相当する．

3．波浪推算モデルの修正とデータ同化の検証結果

本研究における同化手法は，ローレンツモデルを仮定して最適内挿法により誤差を空間内挿するもの

である．この際，同化する観測地点は最低2地点以上必要である．領域4-19の九州西岸から22の南西諸島のように周辺に同化できる観測値が少ない（2地点未満）場合には，はじめに実施したモデルの改良によるBIASの除去が必要不可欠である．

小名浜，中城湾港のモデル改良前後の相関解析結果を表-5に示す．改良により，両地点とも，波高・周期の相関係数は概ね同程度であるが，回帰係数は大幅に1に近づいた．本研究の改良により，波高だけでなく周期のBIASも補正された．ただし，波向については改良の効果は顕著ではない．

一方，領域4-8のように領域中に観測地点が多い場合はデータ同化による修正が効果的である．検証地点（小名浜）における有義波高，有義波周期を，小名浜を除く周辺の観測値と推算値の誤差を用いて修正し推定した．データ同化前後の検証結果を表-6および図-3に示す．データ同化により，波高だけでなく，周期，波向についても，相関係数，回帰係数ともに概ね1に近づき精度は向上した．

次に，領域4-8の小名浜の方向スペクトルの客観解析値を推定した．この際，まず，領域内の観測地点における推算値と観測値の2乗平均誤差を算出した．各分割ケースの方向スペクトルの初期推定誤差を表-7に示す．方向スペクトルの推算誤差はケース3で最小になり，ケース1，2では逆に大きくなった．したがって，波浪推算精度に応じた適切な分解能でデータ同化することが望ましいと示唆された．方向スペクトルの客観解析値を求めるためには，成分波数×領域内の観測地点数の誤差相関を求め，ローレンツモデルを推定する必要があり，解析処理量が膨大になるが，分割数を少なくすることにより効率的なデータ同化が可能になる．

誤差が最小であったケース3について，各成分波の誤差（D値）の空間相関を求め，検証地点（小名浜）における各成分波を，小名浜を除く周辺の観測値と推算値の成分波の誤差を用いて修正し推定した結果を図-4に示す．方向スペクトルの客観解析値は，特に，方向分散性において，初期推定値から観

表-6 データ同化前後における波浪諸元の相関解析結果（小名浜）

		同化前		同化後	
		相関係数	回帰係数	相関係数	回帰係数
改良前	波高	0.86	1.23	0.86	1.02
	周期	0.60	1.19	0.75	1.05
	波向	0.83	0.87	0.84	0.87
改良後	波高	0.83	1.02	0.89	0.96
	周期	0.65	1.13	0.75	1.03
	波向	0.81	0.88	0.84	0.87

表-7 各分割ケースの方向スペクトル初期推定値の誤差（小名浜）

ピーク時刻付近			ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
地点	年月日	時分	1_32x25	2_32x12	3_16x12	4_16x05
206	040908	0000	0.311	0.245	0.228	0.313
206	040908	0200	0.433	0.355	0.325	0.440
206	040908	0400	0.491	0.481	0.425	0.508
206	040908	0600	0.537	0.585	0.503	0.573
206	040908	0800	0.582	0.678	0.582	0.641
206	040908	1000	0.604	0.700	0.603	0.669
期間全体			17.307	18.003	15.593	17.679

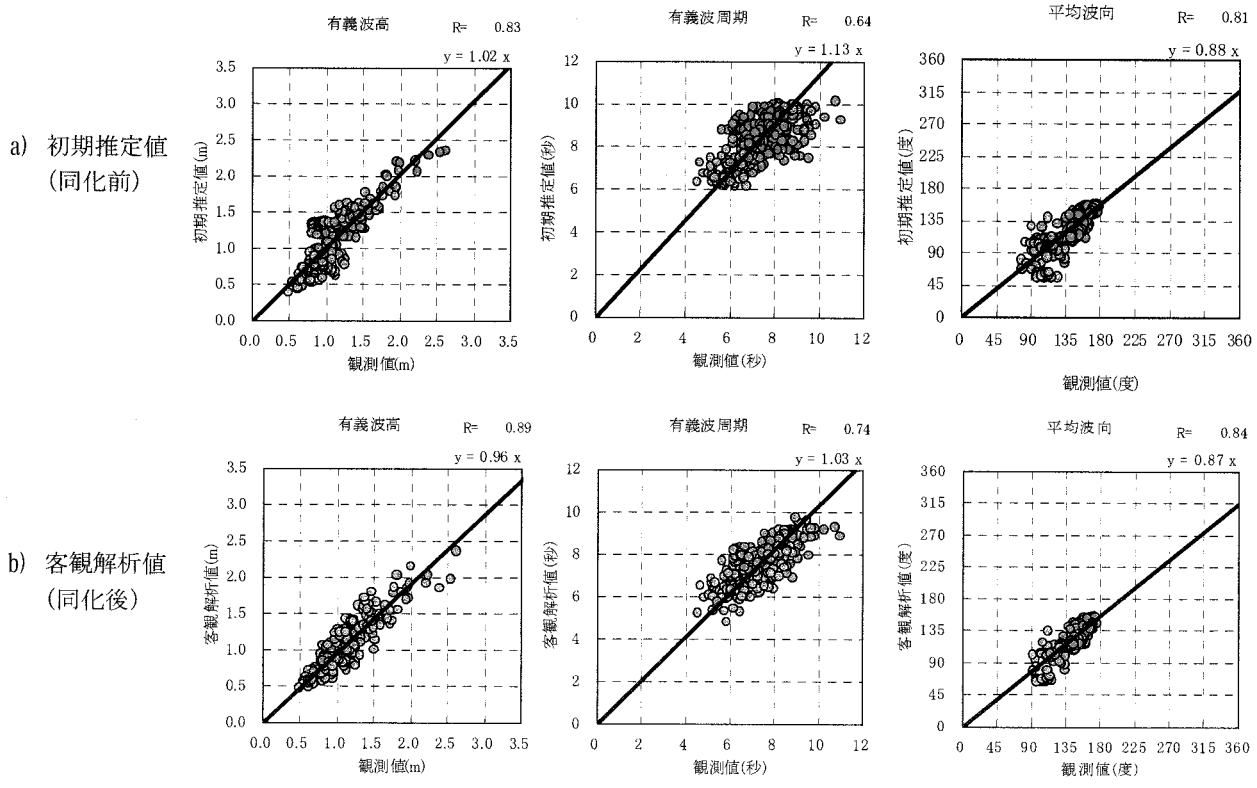
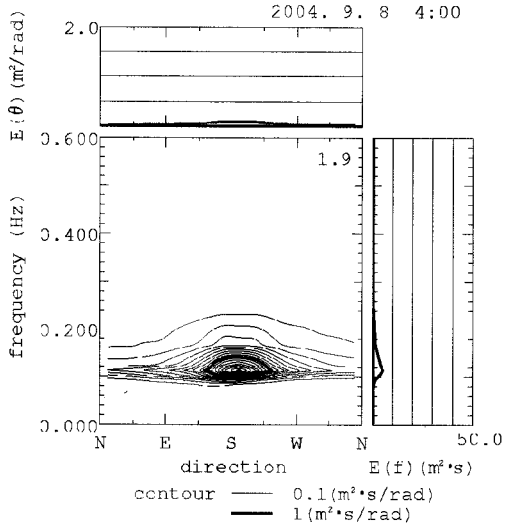
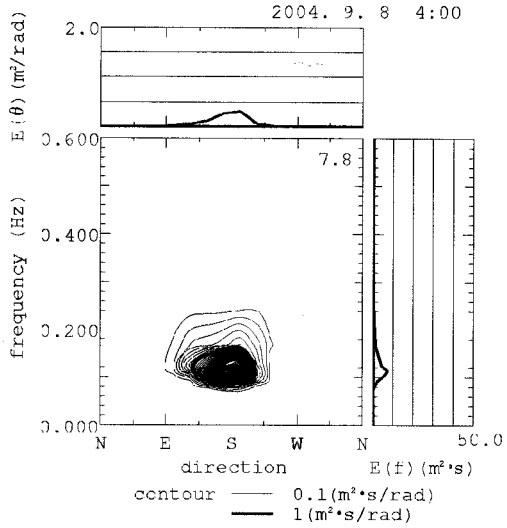


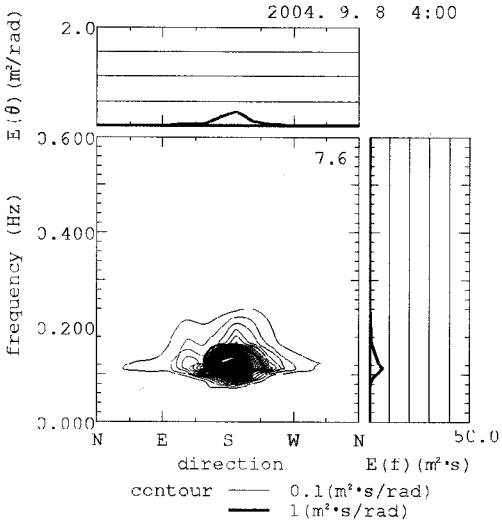
図-3 モデル改良後の同化前後の相関解析結果（小名浜）



a) 方向スペクトル（観測値）



b) 方向スペクトル（初期推定値）



c) 方向スペクトル（客観解析値）

図-4 方向スペクトル
（地点：小名浜，日時：2004年9月8日04:00 JST）
図中，右上の数値は全エネルギーを示す

a) 初期推定値
（同化前）

b) 客観解析値
（同化後）

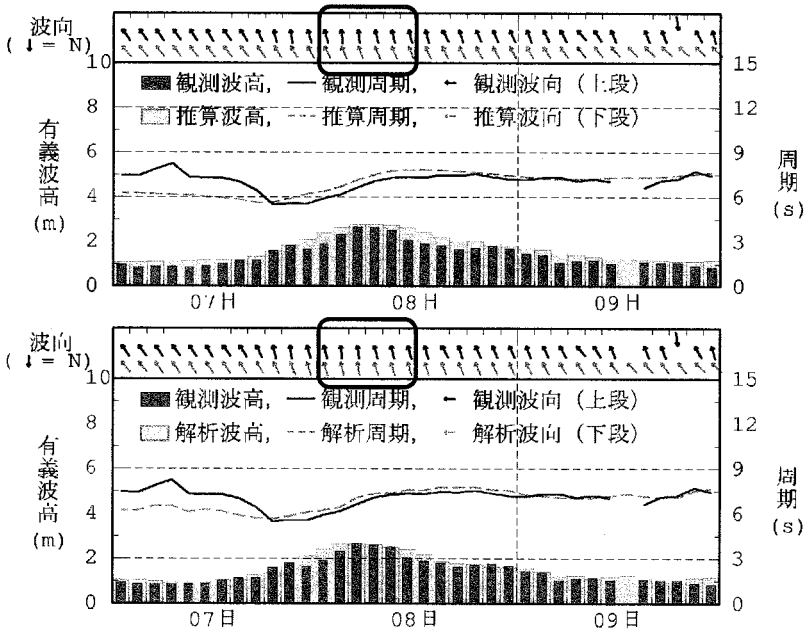


図-5 有義波諸元の経時変化図（方向スペクトルから算出）
（地点：小名浜，期間：2004年9月7日から9日）

測値に近づいた．データ同化前後の方向スペクトルから推定した波高，周期，波向を図-5 に示す．本方法により推定された波高，周期，波向についてもデータ同化により観測値に近づいた．

4．おわりに

本研究で用いた波浪推算データベースでは，波浪推算における海面抵抗係数Cdは，これまで多くの実験式がそうであったように，風速のみの関数としている．しかし，最近の観測結果によると，波齢によって波浪の発達率に差異がある．波浪推算精度をさらに向上するためには，Cdを風速U_{10}だけではなく，波齢βの関数$f(U_{10},\beta)$とすべきであると考えられるが，この点については別途報告予定である．

波浪推算モデルの改良により有義波高，有義波周期の BIAS が修正され，有義波高，有義波周期，波向のデータ同化によりこれらの諸元の相関係数，回帰係数が 1 に近づいた．さらに，適切に分割した成分波のデータ同化により効率的な方向スペクトルの客観解析値の推定が可能になり，波浪の周波数・方向分散性に関する推定精度が向上した．これを再合成して求めた有義波高，有義波周期，波向の精度も向上した．ただし，方向スペクトルの客観解析値を作成できる事例は，波形データが保存され方向スペクトル解析が可能な場合のみに限られるため，有義波諸元の場合に比べて少なくなる．

次に，本研究で作成された波浪の客観解析値の活用について触れたい．現行の直立護岸の設計においては，背後施設の利用目的に応じて許容越波流量を設定し，設計波来襲時にその値を越えないような天端高（所要天端高）が用いられている．越波流量の算定には合田ほか[13]による越波流量推定図を用いるのが一般的である．この推定図は二次元造波水路における水理模型実験および波高の確率分布を用いた数値計算により提案されたものであり，単一方向不規則波の波浪が護岸に直角に作用した場合の平均越波流量を算定することができる．しかし，平石ほか[14]，早川ほか[15]は，沖合人工島などの建設や港の大水深化が進められ，波浪が十分に屈折せず多方向性を有したまま護岸に来襲するような条件下では，多方向不規則波が護岸に対し直角に近い角度で作用した場合でも，越波流量は単一方向不規則波と比較すると減少すると報告している．多方向性を考慮し，方向スペクトルを入力とした信頼性設計を行ううえで，本情報は有効であるといえよう．

今後，図-1 における外洋域の領域 1,2 や，沿岸域の領域 3,4 でも同化地点の少ない九州西岸や南西諸島では，人工衛星や海洋短波レーダーの波高データを同化することも考えられる．さらに，沖合いに展開する GPS 波浪計は沿岸波浪計と比較して空間代表性が高いと考えられるため，NOWPHAS と GPS 波浪計の両方のデータを用いた検討も有望であろう．

最後に，本研究で用いたデータベース作成システムは，波浪予報・データ同化（実況推定と予報の修正）システムに導入・利用し，財団法人沿岸技術研究センターの COMEINS による運用を予定している．

参考文献

1) 松浦邦明・鈴木史朗・橋本典明・本橋昌志：波浪のリアルタイム実況推定および客観解析値データベース作成システムの構築，海洋開発論文集，第 22 巻，pp. 85-90，2006.
2) 松浦邦明・西村修一・木村克俊・岡田弘三・窪田和彦・ 本橋昌志：データ同化によるリアルタイム波浪推定と海岸道路管理への利用の検討，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 1123-1128，2007.
3) 光易恒：海面に及ぼす風の応力，水工学に関する夏期研修会講義集 B，土木学会，1980.
4) Janssen, P.A.E.M. : Consequences of the effect of surface gravity waves on the mean air flow, Int. Union of Theor. And Appl. Mech. (IUTAM), Sydney, Australia, 193-198, 1991.
5) Hasselmann, S. and K. Hasselmann : A symmetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity-wave spectrum, Homb. Geophys, Einzelschr, Serie A., 52, pp.138, 1981.
6) 光易恒・吉田賀一：風に逆行するうねりが存在する海面における大気海洋相互作用，九州大学応用力学研究所所報，68，47-71，1989.
7) Janssen P. A. E. M.: Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves, J. Phys. Oceanogr., vol.19, 1989.
8) Powell, M.D., Vickery, P.J. and T.A. Reinhold: Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones Nature 422 pp.279-283, 2003.
9) Donelan M. A., B. K. Haus, N. Reul, W. J. Plant, M. Stiassnie, H. C. Graber, O. B. Brown, and E. S. Saltzman: On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds. Geophys. Res. Lett., 31, L18306, doi:10.1029/2004GL019460, 2004.
10) Andreas E. L.: An algorithm to predict the turbulent air–sea fluxes in high-wind, spray conditions. Preprints, 12th Conf. on Interaction of Sea and Atmosphere, Long Beach, CA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, 3.4, 2003.
11) Andreas E. L: Spray stress revisited. J. Phys. Oceanogr., 34, 1429-1440, 2004.
12) 橋本典明，永井紀彦，浅井正，菅原一晃，久高将信，小野修平：方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法（MEP）の拡張，海岸工学論文集，第 40 巻，pp. 136-140，1993.
13) 合田良実・岸良安治・神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 4 号，pp. 3-44，1975.
14) 平石哲也・金澤剛・桝本達也・佐藤一央：多方向不規則波の護岸越波流量の数値計算，海岸工学論文集，第 43 巻，pp. 716-720，1996.
15) 早川哲也・山本泰司・梅沢信敏：信頼性設計をめざした多方向不規則波による越波流量算定法，海岸工学論文集，第 48 巻，pp. 741-745，2001.