

NOWPHAS沿岸波浪観測値の沿岸波浪予報への リアルタイム同化による予報精度の向上 —沿岸気象海象情報配信システム (COMEINS) の高度化—

ACCURACY IMPROVEMENT BY DATA ASSIMILATION METHOD WITH
OBSERVATION DATA MEASURED AT “NOWPHAS” COASTAL
OBSERVATION STATIONS —IMPROVEMENT OF COASTAL OCEANIC
METEORIC INFORMATION SYSTEM, “COMEINS”—

江口一平¹・松浦邦明²・松藤絵理子³・本橋昌志⁴・三嶋宣明⁵・岡田弘三⁶
Ipei EGUCHI, Kuniaki MATSUURA, Eriko MATSUFUJI, Masashi MOTOHASHI,
Nobuaki MISHIMA and Kozo OKADA

¹非会員 (財) 沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16 6F)

²非会員 博(工) (財) 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)

³非会員 学修 (財) 日本気象協会首都圏支社 (同上)

⁴非会員 (財) 日本気象協会首都圏支社 (同上)

⁵非会員 工修 (財) 日本気象協会首都圏支社 (同上)

⁵正会員 博(理) (財) 沿岸技術研究センター波浪情報部

Wave estimation, nowcast and forecast, will have some biases and errors. Data assimilation, using both estimated data and observed data, cuts biases and minimizes errors even where wave observation has not been carried out and can apply not only nowcast but also forecast. Accuracy of wave information of COMEINS, Coastal Oceanic Meteoric Information System, has improved by data assimilation using optimum interpolation method with observation data measured NOWPHAS coastal observation stations in this development. And this wave information is delivered in real-time by COMEINS, Coastal Oceanic Meteoric Information System.

Key Words : *Data Assimilation, Wave forecast, NOWPHAS coastal wave observation, COMEINS real-time wave information delivery application.*

1. はじめに

1996年に開始した沿岸気象海象情報配信システム (COMEINS, カムインズ) は, 気象庁の波浪GPVを入力として波浪モデルを用いて分解能を2分間隔に細分化するとともに, これに海上風を入力とした風波を合成して, 沿岸の波浪予測精度を向上し, 港湾事業向けに予測情報を配信するシステムである。また, 波浪ポイント予測では, 沖波予測に沿岸係数を乗じるとともに, 付近で波浪観測が実施されている場合はバイアスの補正を行っている。一般に, 数値モデル (波浪予報) は誤差を伴う。数値モデルを現実近づけるためには, データ同化が有効である。データ同化は, バイアス補正だけでなく,

誤差分散を最小化できる。さらに, 波浪観測地点から離れた地点でも同化による補正効果がある。松浦ほか^{1),2),3)}は, データ同化により修正した波浪予測値を用いて北海道における越波の予測精度を向上した。また, 日本沿岸の波浪客観解析データベースを構築した。本研究では, これらの結果を利用してCOMEINSの高度化を図った。

2. 波浪予測・データ同化システム

(1) 波浪予測手法

波浪予測計算領域と沿岸波浪観測地点を図-1, 図-2に, 波浪予測・データ同化諸元を表-1に, データ同化に用いた波浪観測地点を表-2に示す。

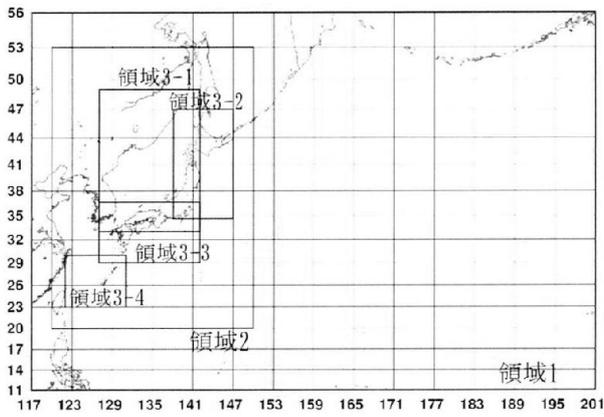


図-1 波浪予測計算領域（領域1～3）

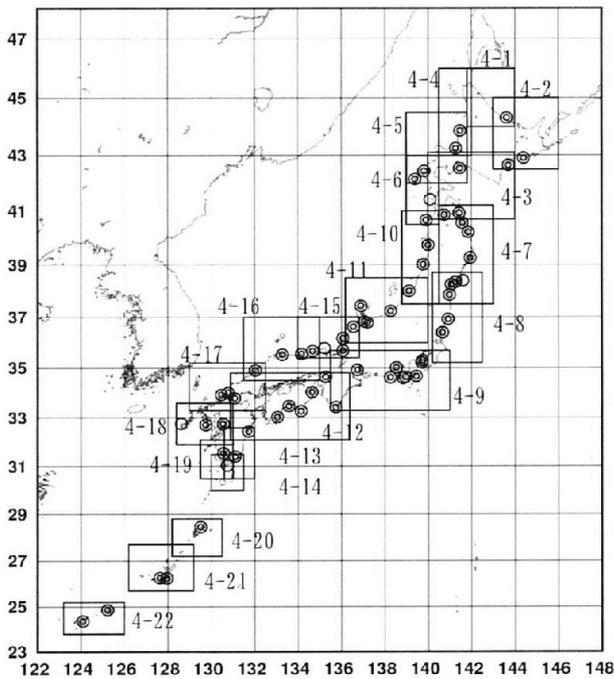


図-2 波浪予測計算領域（領域4）と沿岸波浪観測地点
◎NOWPHAS, ○気象庁

図-1、図-2 に示すように、領域 1～4 を格子間隔 36', 12', 6', 2' と nesting により沿岸に近づくにつれ段階的に空間解像度を上げ、領域 5 では格子間隔 1' で波浪予測を実施している。波浪予測に用いたモデルは、加藤ほか⁴⁾ の浅海域に適応した WAM を松浦ほか³⁾ が改良したモデルである。まず、気象庁 GPV (GSM, 20km mesh) を入力として、最も広い領域で領域 1 (外洋) の波浪予測を行い、同じ風場、領域 1 の境界値を入力として領域 2 (日本近海) の波浪予測を行う。次に、気象庁 GPV (MSM, 5km mesh)、領域 2 の境界値を入力として領域 3 (沿岸) の波浪予測を行い、同じ風場、領域 3 の境界値を入力として領域 4 (詳細地形) の波浪予測を行う。波浪予測・データ同化フローを図-3 に示す。

本波浪予測の特徴は、沿岸、内湾の領域 3,4,5 では、海陸風が発達する内湾域での常時波浪を改善している点、メソ擾乱による高波の予測精度の改善を

表-1 波浪予測・データ同化の諸元

	領域1	領域2	領域3	領域4	領域5 内湾
入力海上風	GSM		MSM (予測計算時に毎時大気解析値をMSMに同化) 予報時間に応じてGSMに変更		
波浪予測モデル	加藤ほか ⁴⁾ の浅海域に適応したWAMを 松浦ほか ³⁾ が改良したモデル				
空間間隔	36'	12'	6'	2'	1'
計算条件	深海	深海	深海	深海	浅海
時間間隔	1時間 (同化前, 同化後とも)				
方向分割	32方位				
周波数分割	25成分				35成分
予測要素	全地点: 有義波高・周期・波向, 風向・風速				
データ同化	なし		有義波高・周期・(スペクトル, 周期帯別) を予測計算終了後, OIにより30時間先まで修正		

領域5は、東京湾、伊勢湾、大阪湾、播磨灘・燧灘・周防灘とした。

表-2 データ同化に用いた波浪観測地点

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	瀬棚	秋前						
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	デシカ島	波浮	下田	清水	御前崎					
4-10	浜浦	秋田	酒田	湯浅	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	小浜島	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	越前	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	伊予島								
4-19	佐多岬									
4-20	名瀬									
4-21	那覇	中城湾港								
4-22	平良	石垣								

ハッチングした地点は、局所性がある等の理由でデータ同化に用いなかった地点である。

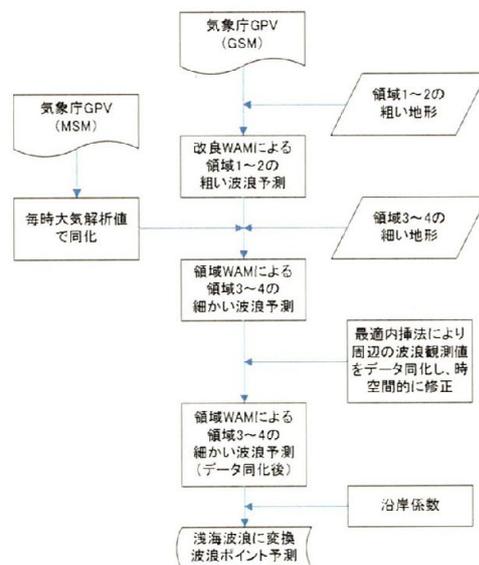


図-3 波浪予測・データ同化のフロー

図るため、入力とする海上風に、沿岸、内湾での精度が高いメソ気象モデル MSM（解像度 5km, 予測計算時に毎時大気解析値を同化している）を用いている点である。

(2) データ同化手法

データ同化手法は、松浦ほか¹⁾に倣い、リアルタイムで情報を提供するために、計算負荷の小さい最適内挿法（以下、OI）を用いた。OIによるデータ同化は、以下のとおりである。

$$F_g^i - F_g^p = \sum_{i=1}^N w_i (F_i^o - F_i^p) \frac{\sigma_g^p}{\sigma_i^p} \quad (1)$$

F_g^i は格子点における解析値、 F_g^p は格子点における初期推定値（波浪予測値）、 F_i^o は波浪観測値、 F_i^p は観測地点における波浪予測値、 w_i は各観測データの内挿の重みであり最終的にこれを求めて $F_i^o - F_i^p$ （観測インクリメント、D値ともいう）の内挿を行う。(1)式は、観測インクリメントの重み付き足し合わせによって $F_g^i - F_g^p$ （解析インクリメント）が計算されることを示す。計算の安定上、インクリメントを予測誤差標準偏差 σ^p で規格化している。

誤差の相関係数 μ と誤差比 λ は、 $e_i^o = F_i^o - F_i^i$, $e_i^p = F_i^p - F_i^i$, $e_g^o = F_g^o - F_g^i$ とすると、

$$\mu_{ij}^o = \{e_i^o e_j^o\} / \sigma_i^o \sigma_j^o, \mu_{ij}^p = \{e_i^p e_j^p\} / \sigma_i^p \sigma_j^p, \mu_{ig}^p = \{e_i^p e_g^p\} / \sigma_i^p \sigma_g^p,$$

$$\lambda_i = \sigma_i^o / \sigma_i^p \quad (2)$$

と表すことができるので、次式を得る。

$$\sum_{j=1}^N (\mu_{ij}^p + \mu_{ij}^o \lambda_i \lambda_j) w_j = \mu_{ig}^p \quad (3)$$

これは、N地点の観測値からN個の内挿の重み w_j を求めるN次元連立方程式である。

この際、誤差の時空間相関 μ_{ig}^p は、ローレンツモデルを拡張した橋本・松浦⁵⁾のモデルにより近似した。

$$\mu_{ig}^p = \frac{a}{1 + b r_{ig}^2} \times c^{\Delta T_{ig}} \quad (4)$$

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、 c は時間差 ΔT_{ig} に関する予測誤差共分散を表すパラメータである。

なお、式(4)右辺の時間差 ΔT_{ig} に関する予測誤差項は、OI を予報に適用する際に利用する項である。本システムの稼動前の事前解析として、2007年1年間の波浪予測計算を行って、観測値との誤差相関解析を実施して、ローレンツモデルパラメータを推定した。

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 値の空間相関解析を行った。パラメータ c は rank による明確な違いはなかったので、D 値の空間相関は波形勾配による rank 別に、時間相関は波形勾配によって区別せずに解析した。

そして、全 mesh について、予測時刻毎に重み

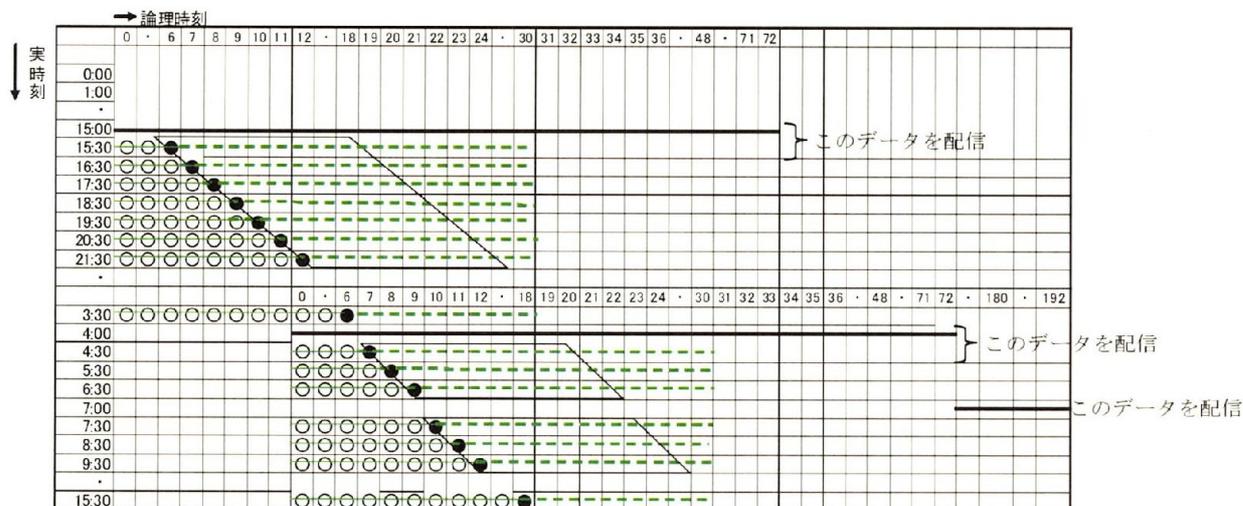


図-4 波浪予測・データ同化のタイムスケジュール

- 四角枠は、データ同化の効果が高い範囲
- 太実線：波浪予測
- 細実線：データ同化による客観解析値作成
- 細点線：データ同化による予測値修正
- ：既測得観測値
- ：最新の観測値

w_j を事前に求め、重み係数表を作成した。予報時には、直接これを利用した。

本データ同化の特徴は、NOWPHAS 沿岸波浪観測値を同化することによって、予報情報に誤差があった場合にも、波浪観測が行われていない任意の場所で誤差を補正し精度を上げることができ、さらに、補正は同化時刻だけではなく、将来（10 数時間先）迄効果が高い点である²⁾。そこで、予測時刻 24 時間までは解析により求めたパラメータ c を用い、予測時刻 30 時間で予測誤差相関が 0 になるように設定している。

(3) 波浪予測フローとタイムスケジュール

図-4 に波浪予測・データ同化のタイムスケ

ジュールを示す。波浪予測を毎日 2 回実施し、初期時刻 00Z（日本時間 09 時）の予測は 72 時間先迄、初期時刻 12Z（日本時間 21 時）の予測は 180（参考値として 192）時間先迄としている。初期時刻 00Z の波浪予測は 15 時 30 分に終了し、その後（30 分後に）得られる NOWPHAS 観測値を用いてデータ同化により、同化時刻から 30 時間先迄修正される。12 時間後の初期時刻 12Z の予測は 04 時に終了し、同様にその後（30 分後に）得られる NOWPHAS 観測値を用いてデータ同化により、同化時刻から 30 時間先迄修正される。

4. 精度検証

日本海側の代表地点として酒田、太平洋側の代表

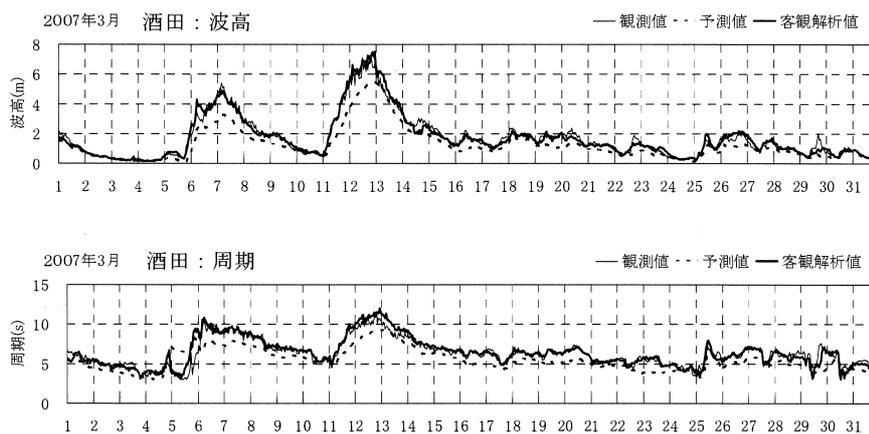


図-5 酒田におけるデータ同化前後の波浪経時変化の比較

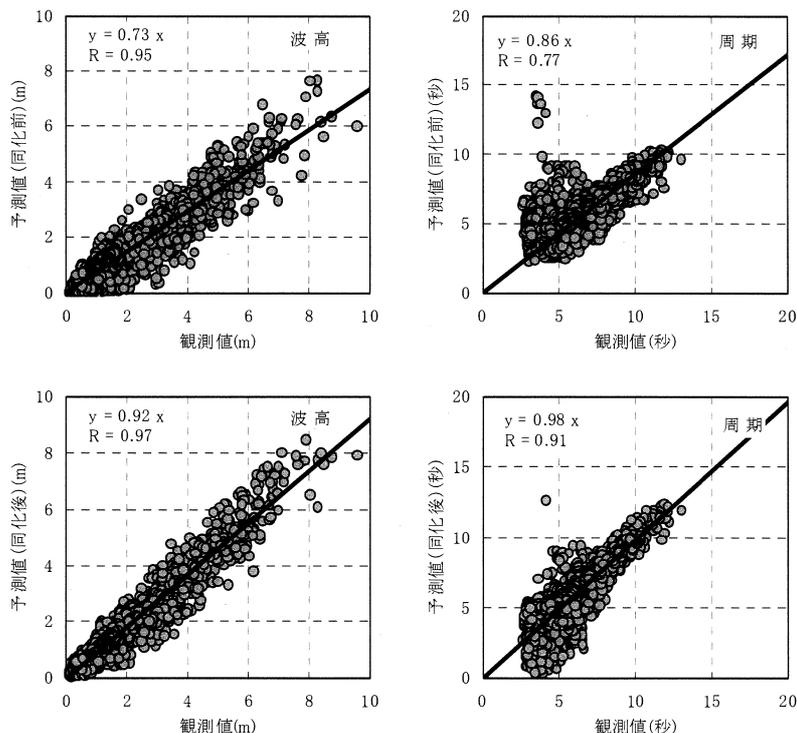


図-6 酒田におけるデータ同化前後の散布図の比較

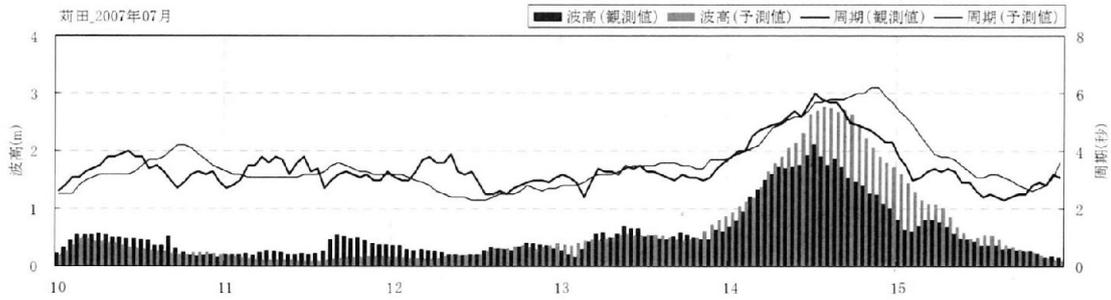


図-7 荻田（内湾）におけるデータ同化前後の波浪経時変化の比

表-3 検証地点における精度検証結果

相関係数	波高		周期	
	同化前	同化後	同化前	同化後
酒田	0.95	0.97	0.77	0.91
相馬	0.86	0.97	0.64	0.85
高知	0.88	0.96	0.50	0.70

回帰係数	波高		周期	
	同化前	同化後	同化前	同化後
酒田	0.73	0.92	0.86	0.98
相馬	0.98	0.99	0.98	1.04
高知	0.95	0.78	0.99	1.09

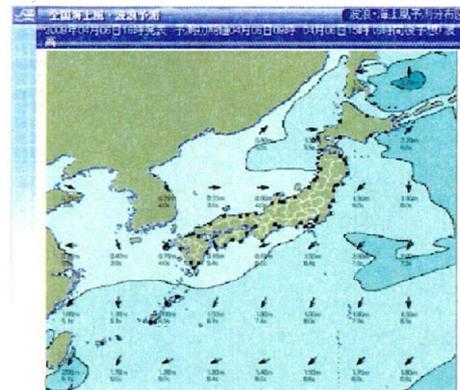


図-8 (1) 画面の例，海上風波浪予測分布



図-8 (2) 画面の例，海上風波浪予測分布

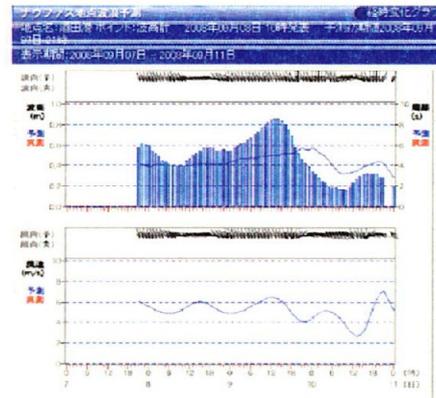


図-8 (3) 画面の例，波浪ポイント予測の経時変化

地点として相馬，高知，内湾の代表地点として荻田のデータ同化前後の精度検証を行った。精度検証は、検証地点で波浪観測値が欠測であったと仮定して周囲の波浪観測地点を同化し、これと検証地点の観測波高と比較して行った。

図-5 は、2007年3月の酒田の波高と周期の経時変化図である。データ同化前の波浪予報は、波高・周期とも観測値と比較してやや過小であるが、データ同化後は、擾乱のピーク時を含め、常に概観測値と一致している。

図-6 は、酒田におけるデータ同化前後の散布図の比較である。波高・周期とも、データ同化前と比較して、データ同化後に、相関係数、回帰係数とも1に近づいて、バイアスが補正され、誤差（ばらつ

き）が小さくなっていることが分かる。

検証地点における精度検証結果を表-3に示す。各海域で、データ同化により相関係数は高くなり、回帰係数は1に近づいている。なお、同化前に回帰係数が1よりも低くなっており、今後、さらに、波浪予測モデルのチューニングを実施する予定である。図-7に、内湾域で波高が2mを越えた事例として、2007年7月の荻田の波高と周期の経時変化図を示す。擾乱ピーク時の波高はやや高めに予測したが、波高・周期ともに予測は概観測値と一致した。

5. まとめ

本開発では、気象庁 GPV(GSM,MSM)を入力とし

て、1日2回波浪予測(推算)を行い、これをNOWPHAS波浪観測値により、1時間毎に、最適内挿法で観測時刻から30時間後迄予測値を修正した。その結果、日本海側、太平洋側、内湾(代表として周防灘)の各海域において、データ同化による精度の改善が見られた。

波浪予測値と波浪観測値を用いて、日本沿岸の任意地点で、より観測値に近い精度の波浪実況推定と、これを将来に適用した高精度波浪予測を実現し、これをリアルタイムで配信するシステムを構築した。

システムの画面の例を図-8(1)~(3)に示す。(1)、(2)は、日本全域、地方毎(ここでは東北地方)の海上風波浪予測分布図の例である。6時間毎の分布図を表示することができ、任意地点を選択して、72時間先迄の予測情報を見ることができる。(3)は酒田港における波高、周期、波向の波浪ポイント予測の経時変化の例である。風、波の予測の変化傾向と工事等の設定値を比較して、工事等の計画に資することができる。

6. 今後の課題

本システムは、最適内挿法によるデータ同化を用いており、同時刻の修正を将来に適用している。データ同化により予測値を修正しているが、性質の異なる波浪が来襲してくる場合には十分に対応できない場合がある。例えば、寄り回り波がその例である。しかし、寄り回り波は、北海道西方沖の北よりの強風で発生し日本海を南下するというように、発生、伝播過程がほぼ明らかであり、発生から来襲まで約1日の時間差がある。発生、伝播過程における波浪の監視、上流側の情報をトリガーとした予測モデルの適用が必要であろう。

波浪ポイント予測は、1日2回更新され、NOWPHASデータの同化により修正、配信されるが、海上風、波浪予測分布データは、通信回線の制約から、6時間間隔の予測値を配信している。

本システムと松浦ら⁴⁾の手法により、データ同化したスペクトル情報の提供、周波数別情報の提供が可能となるが、データ配信量が膨大になる。

今後、これらの改善のためには、データ量が膨大になるにつれ、通信インフラの整備が重要である。

謝辞: 本システムで用いたデータ同化手法は、九州大学大学院環境都市部門橋本典明教授ご指導の下に、著者らが開発したものです。また、(独)港湾空港技術研究所海洋水工部海象情報研究領域の河合弘泰領域長、川口浩二主任研究員には、波浪観測データの利用についてご指導を頂きました。また、本システムは多くの関係者の協力の上に完成したものです。ここに記して、心から感謝の意を表します。

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) 松浦邦明・橋本典明, 河合弘泰, 川口浩二, 本橋昌志, 松藤絵理子: 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, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.915-920, 2008.
- 4) 加藤史訓・福濱方哉・橋本典明・三嶋宣明・松藤絵理子・宇都宮好博: 内湾を対象としたリアルタイム波浪予測システムの開発, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.225-230, 2007.
- 5) 橋本典明・松浦邦明: WAM Cycle 5のデータ同化における同化変数の選択と評価関数に関する検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.206-210, 2004.