

波浪のリアルタイム実況推定値および 客観解析値データベース作成システムの構築

DEVELOPMENT OF REAL-TIME WAVE INFORMATION AND ANALYSIS DATABASE

松浦邦明¹・鈴木史朗²・橋本典明³・本橋昌志⁴

Kuniaki MATSURA, Shiro SUZUKI, Noriaki HASHIMOTO and Masashi Motohashi

¹水修 (財) 日本気象協会 首都圏支社調査部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

²工修 (財) 沿岸技術研究センター 波浪情報部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

³フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

⁴(財) 日本気象協会 首都圏支社調査部 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

We develop a real-time wave information and analysis system on the basis of a data assimilation technique, the optimum interpolation method, applied for wave observation data and forecasted data. The system can provide nowcast wave information for the sea area where there is no wave observation point. In the system, first, the initial estimate (nowcast) is computed in real-time with the observation data and forecasted information, and then the estimate is corrected after 12 hours with more accurate forecasted wave information. Finally, the corrected data is stored in the wave information database for analysis. We investigate the characteristics of the nowcast wave data and confirmed that the accuracy of the data is high enough for practical applications.

Key Words : *data assimilation, optimum interpolation,
real-time wave information system, wave analysis database.*

1. はじめに

これまで、波浪観測が行われていない地点における波浪実況(波高や周期)の推定には、その地点の波浪予測値や近隣の波浪観測値を参照してきた。しかし、波浪予測値にはバイアスや誤差が大きい場合もあり、波浪実況情報として必ずしも適切ではない。また、気象庁の沿岸波浪観測値および港湾局の全国港湾海洋波浪情報(NOWPHAS)はオンラインリアルタイムで情報配信されており、近年観測地点数が充実してきたが、任意地点の波浪をこれらの観測値のみから推定することは困難である。したがって、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の両方を用いて、これまでの波浪予測値よりもさらに精度の良い推定値をリアルタイムで作成するシステムを開発する必要がある。また、海岸・港湾施設の設計波高等を求める際に、観

測データが利用できない場合は波浪推算が用いられるが、波浪推算の精度にはなお問題があり、観測データに代わり得るまでの信頼を得ていない。そのため、波浪推算の位置づけは「主」ではなく、あくまでも「副」に留まり、信頼性設計、性能設計に向けて波浪情報を波浪推算によって決定するという体制にはなっていないのが現状である。したがって、この様な状況を変革するためには、日本周辺の波浪推算をさらに高精度(かつ高解像度)に行える数値波浪モデルを開発するとともに、さらにこれに観測データを併用して設計波の算定等を行う客観解析法の開発が必要不可欠となろう。

そこで本研究では、その第一段階として、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、その精度等について検討した。

2. 解析データと解析手法

(1) 解析データ

a) 波浪予測値

波浪予測値には、COMEINS（財団法人沿岸技術研究センターによる沿岸気象海象情報配信システム）による沿岸域波浪予測値（格子間隔2'の沖波，予測時刻は初期時刻から6時間間隔で72時間先迄，1日2回更新）のうち有義波高・有義波周期を使用した。これは，気象庁の波浪GPV（格子間隔6'の沖波，予測時刻は初期時刻から6時間間隔で72時間先迄，1日2回更新）を受信した後，2'格子の地形を用いて沿岸地形を詳細に再現して波浪モデルにより空間内挿したものである。

b) 波浪観測値

対象とした海域は，図-1に示す東北から関東の太平洋沿岸域（以下第1領域）と南海の太平洋沿岸域（以下第2領域）とした。このうち，解析に使用した観測地点は表-1に示す気象庁の沿岸波浪観測地点と港湾局のNOWPHAS観測地点である。解析対象期間は，観測地点数が多く，台風による高波が数多く観測された2004年の1年間とした。近年連続観測の地点が徐々に増え始めているが，各地点を同一条件とするため，本研究では毎偶数時の波浪観測値を用いた。用いた要素は有義波高・有義波周期とした。

(2) 解析手法

a) 最適内挿法

データ同化の手法として最も優れているのは力学的整合性を満たす4次元変分法（4D-VAR）であろう。しかし，リアルタイムで情報を提供するためには時間的な制約があるため適用が困難である。そこで，計算負荷の小さい最適内挿法（以下，OI）により解析値を作成した。OIはベイズ型の線形最小分散推定で，波浪予測値を初期推定値として，これにD値（観測値から観測地点の初期推定値を引いた値）の情報を加える際に，予測誤差，観測誤差の大きさおよびこれらの時空間相関の情報を元にして内挿の重みを決定するものである¹⁾。

$$F_g^I = F_g^P + \sum_{i=1}^N w_i (F_i^O - F_i^P) \frac{\sigma_g^P}{\sigma_i^P} \quad (1)$$

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D値の内挿を行う。 $F_g^I - F_g^P$ は解析インクリメント， $F_i^O - F_i^P$ （=D値）は観測インクリメントである。(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。

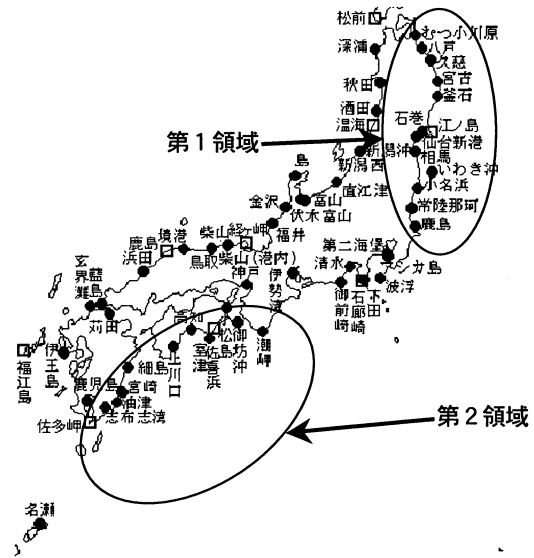


図-1 気象庁，NOWPHAS波浪観測地点と解析対象海域
□は気象庁，●はNOWPHASの波浪観測地点である

表-1 解析対象海域と波浪観測地点

第1領域	第2領域
むつ小川原 (N)	潮岬 (N)
八戸 (N)	室津 (N)
久慈 (N)	*高知 (N)
江ノ島 (M)	上川口 (N)
石巻 (N)	細島 (N)
仙台新港 (N)	佐多岬 (M)
*相馬 (N)	—
小名浜 (N)	—
常陸那珂 (N)	—
鹿島 (N)	—

(M) は気象庁観測地点，(N) はNOWPHAS観測地点，

*は精度検証地点を示す。

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，

$$\mu_{ij}^O = \{e_i^O e_j^O\} / \sigma_i^O \sigma_j^O, \quad \mu_{ij}^P = \{e_i^P e_j^P\} / \sigma_i^P \sigma_j^P, \quad \mu_{ig}^P = \{e_i^P e_g^P\} / \sigma_i^P \sigma_g^P,$$

$$\lambda_i = \sigma_i^O / \sigma_i^P \quad (2)$$

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。

μ_{ig}^P は，以下に示すローレンツモデルを拡張した橋本らのモデル²⁾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の通常の適用の際には用いないが、後述する波浪観測データの欠測時に、OIを適用する際に利用する項である。

b) 実況推定値・客観解析値の作成法

本研究では、波浪予測値と波浪観測値を用いてOIにより推定した結果を総称して解析値と呼ぶこととする。

COMEINS波浪予測値は初期時刻から約7時間後に配信される。したがって、波浪観測値が得られた直後にリアルタイムで解析値を作成する際には、初期時刻から06, 12, 18時間後の予測値を1時間内挿し、そのうちの毎偶数時の値を用いる。この予測値を波浪観測値により修正した情報は、準観測実況値ともいうことができる。このため実況推定値と呼ぶこととする。この6時間後の予測値と、12時間後に予測が更新される時の初期値およびその初期

値を用いた新たな6時間後の予測値を用いて、先の実況推定値を一括更新する。この予測値を波浪観測値により修正した情報は、より確かな情報であると考えられるため客観解析値と呼ぶこととする。

3. D値の時空間相関解析

NOWPHAS波浪観測値とその地点におけるCOMEINS波浪予測値からD値の地点間相関（以下、空間相関）を求めた。第1領域における2004年の毎偶数時の全観測値を用いた空間相関解析（方法1）の結果を図-2 (1), (2) に示す。誤差相関のばらつきは大きく、曲線はデータを十分に近似していない。

D値の空間相関は、海域、対象とする現象のスケール、モデルの性質やモデルの分解能により異なると考えられる。例えば、波高が高く周期が長いときは原因となる擾乱の規模も大きく、D値の空間相関の広がりも大きいと考えられる。一方、波高が小さく周期が短いときは局所

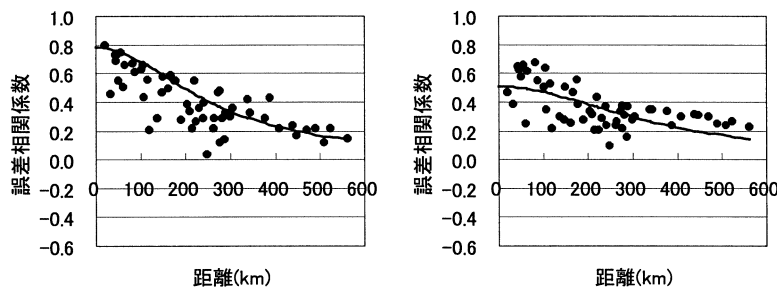
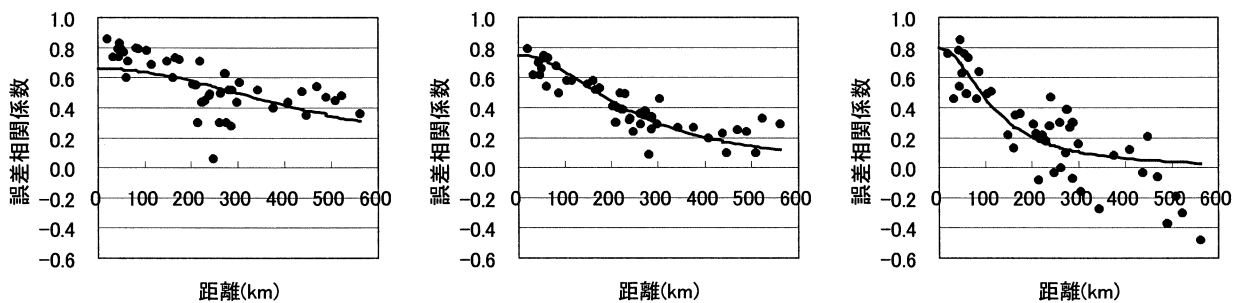
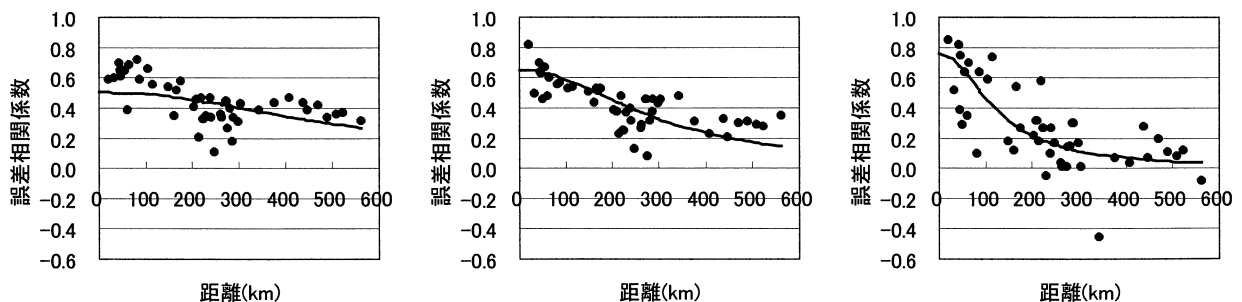


図-2 第1領域におけるD値の空間相関解析結果（方法1, (1) 左：波高, (2) 右：周期）



波高のD値の空間相関（(1) 左：Rank1, (2) 中央：Rank2, (3) 右：Rank3）



周期のD値の空間相関（(4) 左：Rank1, (5) 中央：Rank2, (6) 右：Rank3）

図-3 第1領域におけるD値の空間相関解析結果（方法2, 上：波高, 下：周期）

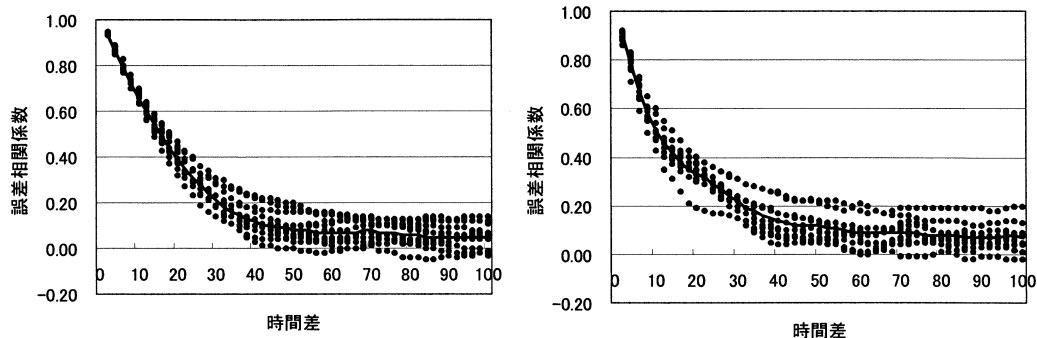


図-4 第1領域におけるD値の時間相関解析結果（方法1, (1) 左：波高, (2) 右：周期）

表-2 D値の空間相関解析のRank分け

現象	Rank	波形勾配
うねり	Rank1	0.01未満
減衰距離の短いうねり	Rank2	0.01-0.025
風波	Rank3	0.025以上

的な風により発生した波浪が観測されておりD値の空間相関の広がり小さいと考えられる。この様な局所的な風によると考えられる波浪を、数10kmから数100km程度離れた波浪観測地点の観測値の情報を元に修正するのは不合理である。波高が大きいときと小さいときで海上風の原因となる擾乱の種類が異なり、D値の空間相関（の広がり）も異なる。したがって、予測誤差情報を有効に利用するためには、海域、現象のスケールに応じて予測誤差の空間構造を把握する必要がある。

そこで、本研究では海域別に現象のスケールを表-2のように、波形勾配により3つのランクに分けてD値の空間相関解析を行った（方法2）。波高のD値の空間相関解析結果を図-3 (1) から (3) に、周期のD値の空間相関解析結果を図-3 (4) から (6) に示す。Rank分けをした場合、Rank1のうねりでは、距離0における誤差相関係数（誤差分散）は小さく、誤差相関が及ぶ距離（以下、相関距離）は長い。Rank2, Rank3と風波に移行するにつれて誤差分散は大きく、相関距離は短くなる傾向がある。また、特にRank1, Rank2では、誤差相関の値はローレンツ型近似曲線とのばらつきは小さい。すわち、波形勾配が小さい（うねりに近い）ほど、誤差分散が小さく、ローレンツ関数はデータを良く近似し（ばらつきが小さく）、誤差相関は遠方まで高い。

擾乱時にはしばしば波浪観測が欠測することがある。観測値が欠測の際には、観測値を補完さらに解析値をできるだけ欠測にしないため、前述のように、D値の時間差による相関（以下、時間相関）を求めることにより、本来用いる観測値よりも過去の観測値を用いて解析値を作成することとした（欠測のない通常時は空間相関のみを用いて解析値を作成した）。D値の時間相関は波形勾配によるRankによって明瞭な違いがなかったため、全て

表-3 ローレンツモデルパラメータ (波高)

領域	現象	a	b	c
第1領域	Total	0.781	0.0000225	0.993
	Rank1	0.661	0.0000036	0.998
	Rank2	0.751	0.0000172	0.994
	Rank3	0.802	0.0000737	0.988
第2領域	Total	0.838	0.0000329	0.990
	Rank1	0.657	0.0000133	0.994
	Rank2	0.823	0.0000328	0.989
	Rank3	0.882	0.0000424	0.988

の事象を区別せずに解析した。D値の時間相関解析結果を図-4に示す。図中の曲線は、誤差相関の平均値を示す。時間差が10時間の時の波高のD値の相関は周期のD値の相関よりも高いが、両者とも相関係数は0.5以上である。

表-3にD値の時空間相関を(4)式により近似した結果を示す。第2領域ではRank1, 2のbの値は第1領域と比較して大きい（したがって相関距離は短い）。これは、この海域が岬や湾が入り組んでおり、沿岸波浪観測値の空間代表性が狭くなっているためであると考えられる。

4. 精度検証の結果

本手法による客観解析値の精度を検証した。検証は、表-1に示した観測地点（第1領域において相馬、第2領域において高知）がないものとして解析を行い、実際に測得された波高・周期と比較して行った。

予測値と観測値の経時変化図の比較（2004年1月）を図-5上図に、客観解析値と観測値の経時変化図の比較を図-5下図に示す。客観解析値は予測値に比べて観測値に近くなり、また変化傾向も概ね再現している。

予測値と観測値の散布図（統計期間1年間）を図-6 (1) に、客観解析値と観測値の散布図を(2)に示す。図より、客観解析値の回帰直線からのばらつきは予測値と比較して、波高が低い（観測波高1m以下）ときに若干大きい、波高が高い（観測波高が1mから3mの範囲）ときにはかな

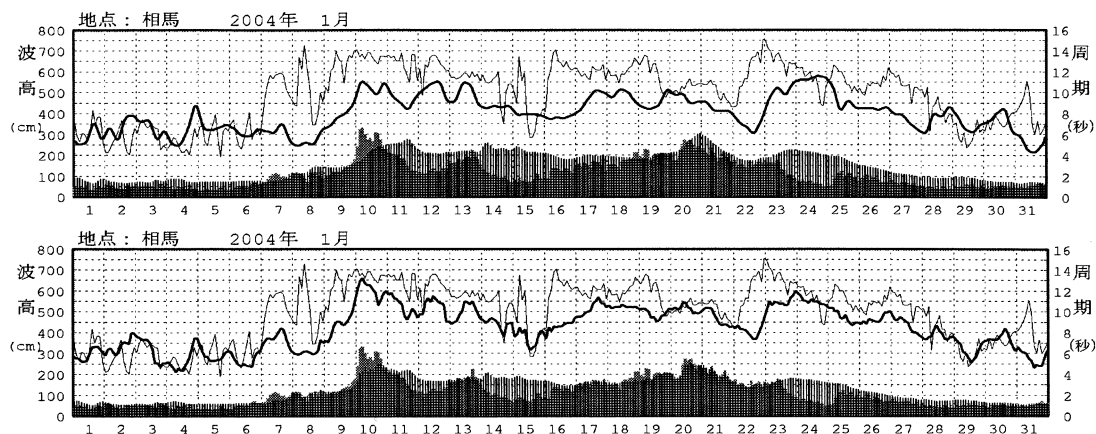


図-5 経時変化の比較(地点：相馬，期間：2004年1月)

上図：予測値（濃黒）と観測値（薄黒），下図：解析値（濃黒）と観測値（薄黒）
波高：棒グラフ，周期：折れ線グラフ

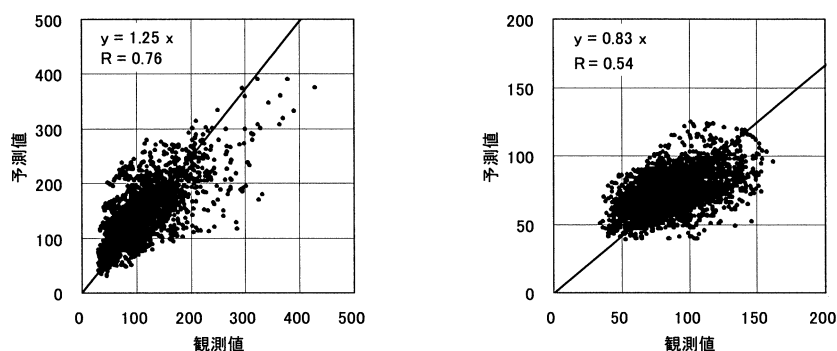


図-6 (1) 予測値と観測値の比較（地点：相馬，期間：2004年1年間，左：波高 (cm)，右：周期 (0.1秒)）

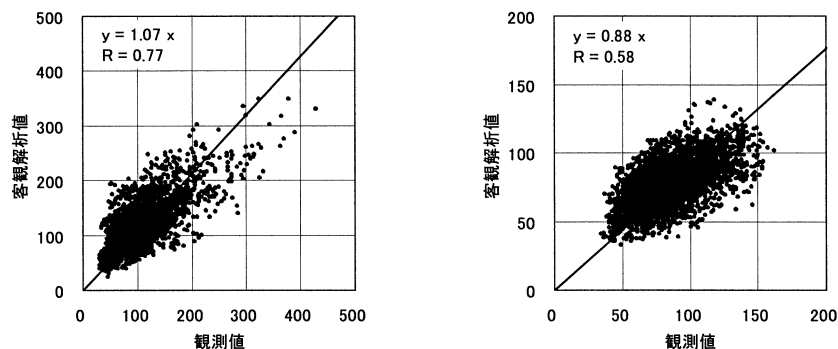


図-6 (2) 客観解析値と観測値の比較（地点：相馬，期間：2004年1年間，左：波高 (cm)，右：周期 (0.1秒)）

表-4 精度検証の結果

領域	要素	予測値		解析値	
		回帰係数	相関係数	回帰係数	相関係数
第1	波高	1.25	0.76	1.07	0.77
	周期	0.83	0.54	0.88	0.58
第2	波高	1.21	0.90	1.12	0.91
	周期	1.04	0.63	1.01	0.67

検証地点は，第1領域は相馬，第2領域は高知

り小さい。また，客観解析値は予測値に見られるバイアスが小さくなり，回帰係数は1に近づく。

表-4に各領域の回帰係数と相関係数を示す。第1，第2領域とも波高・周期の回帰係数は1に近づき，相関係数も若干向上した。回帰係数は，第1領域の方が第2領域に比べてより改善された。これは，第1領域の方が，D値の相関が時間的，空間的に長く，また観測密度が高いため観測値による修正量が大きかったためであると考えられる。

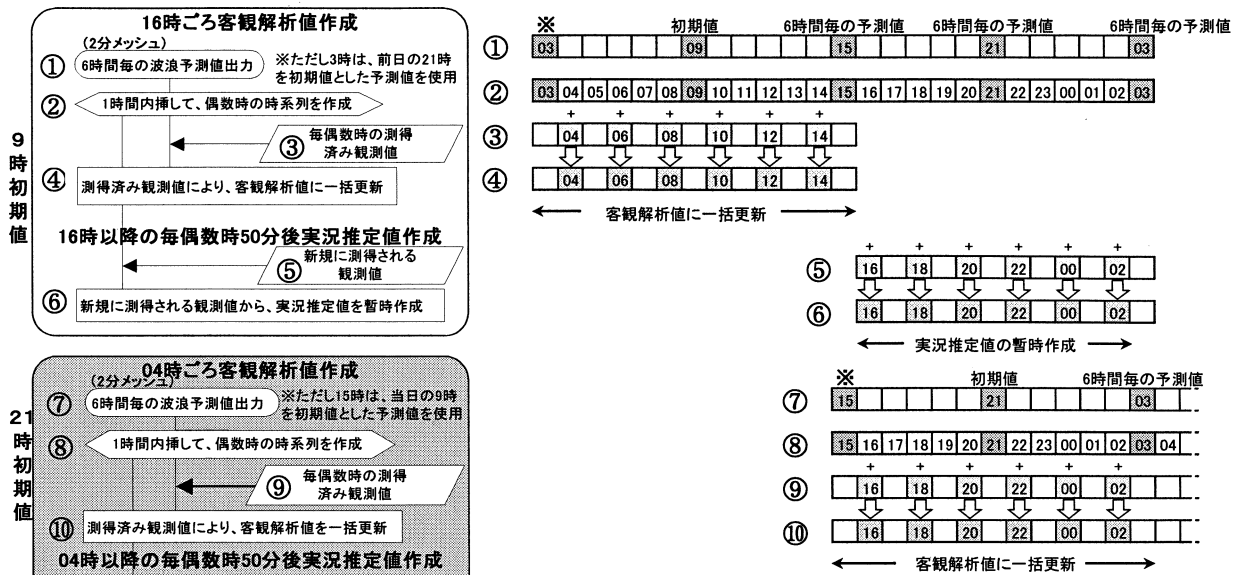


図-7 システムフローと解析値作成に用いる予測値・観測値の時刻

5. システムの概要

COMEINS波浪予測(2'格子)は1日2回、09時を初期値とした予測値が16時頃、21時を初期値とした予測値が04時頃に更新される。システムフローと解析値作成に用いる予測値と観測値の時刻について図-7に示す。本システムは、予測が更新された後に、以下の手続きを実施する。

- ① 参照する全観測地点において、6時間間隔のCOMEINS波浪予測値を1時間間隔に内挿する。既に測得されている毎偶数時の波浪観測値と波浪予測値を用いてD値を求める。
- ② 任意地点において、D値の空間相関関数を用いて、OIにより各時刻の誤差を一括修正する。これは、初期時刻および6時間後の波浪予測値を用いており精度が高く解析結果はより確からしい値である。
- ③ その後、毎偶数時の50分程度後に波浪観測値が取得される度に、参照する全観測地点においてD値を求め、OIによりその時刻の誤差を修正する。これは、初期時刻に対して6から18時間後の波浪予測値を用いているため、予測値の精度はやや低くなるが、速報性を重視して波浪観測値が取得される度にリアルタイムで情報を更新する。

なお、3.のD値の時間相関解析の結果、10時間以内であれば波高、周期とも誤差相関係数が0.5以上であった。そこで、波浪観測値が欠測の場合は2時間ずつ、最大10時間迄時間を遡って観測値を参照することとした。

6. おわりに

本研究では、COMEINSの波浪予測値と気象庁および

NOWPHASの波浪観測値を用いて、太平洋側の海域で波高、周期についてリアルタイムで実況推定を行い、客観解析値データベースを作成するシステムを開発した。

第1、第2領域とも波高・周期の回帰係数は1に近づき、相関係数も若干向上した。回帰係数は、第1領域の方が第2領域に比べてより改善された。これは、第1領域の方が、観測値の代表性が高く、また近年NOWPHASが次第に整備され観測密度も高く、データ同化の効果が大きかったためであると考えられる。一方、第2領域では、岬や湾が入り組む複雑な海域であることから、観測地点の時空間代表性はやや小さく、さらに観測密度が比較的疎であるため第1領域ほど精度が向上しなかったと考えられる。したがって、データ同化の観点からは、波浪観測地点は、空間代表性の高い湾外等に、相関距離に応じた空間密度で設置されていると効果的であると考えられる。

今後、本システムをCOMEINSにより運用し、ユーザの要望に応じた地点について実況推定値をリアルタイムに情報を配信するとともに、客観解析値のデータベース化を進める予定である。

今後の検討課題は以下のとおりである。

- ① 波向の誤差解析と客観解析値の作成
- ② 日本海側、北海道の実況推定値、客観解析値の作成
- ③ 沿岸波浪観測地点の少ない中部地方、沖縄地方における実況推定値、客観解析値の作成手法の検討。

参考文献

- 1) 気象庁編：データ同化の現状と展望，財団法人気象業務支援センター，1997。
- 2) 橋本典明・松浦邦明(2004)：WAM Cycle5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. 206-21