

# 各種波浪データ同化手法の実海域への適用性に関する検討と 波浪客観解析値の作成

橋本典明<sup>1</sup>・松浦邦明<sup>2</sup>・河合弘泰<sup>3</sup>・川口浩二<sup>4</sup>

波浪推算によって波浪客観解析値を作成するために、いくつかの 4 次元変分法によるデータ同化手法を第三世代波浪推算モデルに導入し、その適用性を検討しながら精度の向上を図った。スペクトル境界値の同化の精度向上に関する検討では、選点法を取り入れ、背景誤差共分散行列を対角行列として扱えるようにすることで、波浪の推算精度を向上できた。地形や浅海変形の影響を考慮した場合は、ピーク時の精度が向上した。地形解像度のみを上げた場合、初期推定値の精度は向上したが、データ同化の効果は小さかった。スペクトル初期値同化の検討では、解析サイクルを構築することにより、高精度かつ簡便にデータ同化が可能になった。

## 1. はじめに

海岸・港湾施設は、例えば 50 年などの適切に定めた再現期間の確率波浪を設計波として定め、これに対する構造物の安全率が所要の値を満たすように設計されてきた。この確率波浪の推定には、観測データを用いることが基本とされている。ところが、現実には極値統計解析を行うために十分な観測データが蓄積されている地点は、非常に限られている。そのため、観測データの代用として波浪推算値も使われてきたが、既往の推算値の精度は必ずしも十分とは言えない。その一方で、海岸・港湾施設の設計に性能設計が導入されつつあり、質・量ともにますます充実した波浪データが必要になっている。したがって、今後は日本周辺の波浪を高精度かつ高解像度で推算できる波浪推算モデルを構築し、これに観測データを併用して設計波の算定を行う客観解析が必要不可欠となろう。近年、高精度な第三世代波浪推算モデルが広く用いられるようになり、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)も次第に充実してきた。

以上のことを踏まえ、本研究では、沿岸域の「波浪客観解析値の作成」を目的として、いくつかの 4 次元変分法のデータ同化手法に基づき、推算スペクトルを観測された波浪諸元によって修正する方法について基礎的な検討を行った。

## 2. 解析方法および解析条件

本研究では、4 次元変分法によりデータ同化を考慮できる第三世代波浪推算モデル WAM Cycle5 を用いて、

NOWPHAS 観測データの内、有義波高を同化要素としてデータ同化を行った。解析対象海域は、図-1 に示す東北太平洋側(以下、領域①)と南海太平洋側(領域②)とした。同化変数は、全推算期間の計算領域境界線上の波浪スペクトルを同化変数に選ぶ方法(以下では「スペクトル境界値の同化」と記す;橋本ら, 2004, 2005)と初期時刻における全格子点の波浪スペクトルを同化変数に選ぶ方法(「スペクトル初期値の同化」;橋本ら, 2003)とした。

狭領域のスペクトル境界値を同化変数とする場合は、以下に示すコントロール変数  $X_c$  (データ同化によって実際に修正される変数) をスペクトル値に乘じることによってデータ同化を行った。

$$S_b(x_i, t_j, f_m, \theta_n) = S_b(x_i, t_j, f_m, \theta_n) \times X_c(x_i, t_j, f_m, \theta_n) \quad (1)$$

ここで、 $x_i$  は入射境界の格子点 (0.5° 間隔)、 $t_j$  は積分時間ステップ、 $f_m$  は周波数、 $\theta_n$  は方向である。

また、狭領域のスペクトル初期値を同化変数とする場合は、同様に以下に示すコントロール変数  $X'_c$  をスペクトル値に乘じることによってデータ同化を行った。

$$S_{initial}(x_i, f_m, \theta_n) = S_{initial}(x_i, f_m, \theta_n) \times X'_c(x_i, f_m, \theta_n) \quad (2)$$

空間解像度は 15 分 (0.25 度) と 6 分 (0.1 度) とした。図-2 に格子間隔 6 分の計算領域を示す。また、解析精度を向上させる工夫として、後述の「選点法」および「地形や波浪変形の影響の考慮」についても検討した。

波浪推算は深海条件とし、海上風には ECMWF/TOGA (0.5 度間隔) を用いた。あらかじめ、広領域の波浪推算を実施して、ネスティングにより同化領域のスペクトル境界値として入力した。解析条件を表-1 に、データ同化に用いた波浪観測地点を表-2 に示す。海域①では、2000 年 7 月 6 日 12 時から 10 日 12 時の台風の事例、海域②では 2003 年 5 月 29 日 15 時から 6 月 1 日 15 時の低気圧の事例について、前述の各種データ同化手法によって作成され

1 フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門

2 水修 (財)日本気象協会首都圏支社

3 正会員 修(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部 海洋水理・高潮研究室長

4 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部 主任研究官

表-1 解析条件

| 条件    | 検討ケース                                                                 |    |    |    |    |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|-----|
|       | 01                                                                    | 02 | 03 | 04 | 05 | 06  |
| 同化領域  | ①                                                                     | ①  | ②  | ②  | ②  | ①   |
| 同化変数  | 境界                                                                    | 境界 | 境界 | 境界 | 境界 | 初期  |
| 同化要素  | H                                                                     | H  | H  | H  | H  | H   |
| 空間解像度 | 15'                                                                   |    |    | 6' |    | 15' |
| 時間間隔  | 10分                                                                   |    |    | 5分 |    | 10分 |
| 工夫    | -                                                                     | 選点 | -  | 地形 | -  | -   |
| 分割数   | 方向: 16成分, 周波数: 25成分,<br>$f(1) \times 1.10(i-j)$ , $f(1) = 0.04177248$ |    |    |    |    |     |
| 水深    | 深海条件                                                                  |    |    |    |    |     |
| 境界条件  | 広領域 (15-63°N, 115-170°E)<br>30分格子の結果をネスティング                           |    |    |    |    |     |

同化領域: ①は東北太平洋, ②は南海太平洋, 同化変数: 境界はスペクトル境界値, 初期はスペクトル初期値, 同化要素: Hは波高のみを同化, 海上風: ECはECMWF/TOGA(0.5°格子).

表-2 データ同化に用いた波浪観測地点

| 海域①   | 海域② |
|-------|-----|
| むつ小川原 | 潮岬  |
| 八戸    | 室津  |
| 久慈    | 高知  |
| 石巻    | 上川口 |
| 仙台新港  | 細島  |
| 相馬    | —   |
| 小名浜   | —   |
| 常陸那珂  | —   |
| 鹿島    | —   |

た客観解析値の精度を検討した。

### 3. スペクトル境界値の同化の精度向上に関する検討

#### (1) 選点法の導入

橋本ら(2004, 2005)は, WAM Cycle5 をベースとした波浪推算モデルを用い, スペクトル境界値を同化変数として, 4次元変分法により, 格子間隔 15分 で NO-WHAS の沿岸波浪観測データを同化した。しかし, 解析結果が良好な場合とそうでない場合があるという問題があった。この原因としてモデルの非線形性に起因する影響が考えられた。また, 誤差の地点間相関は実際には 0 ではないが, 計算の効率化のために背景誤差共分散行列を対角行列と仮定したために矛盾を生じていた可能性がある。そこで, スペクトル境界値を同化変数として, 領域①を対象として, 同化変数(スペクトル境界値)の誤差相関が無視できる程度(90分=1.5度)に同化変数を間引いてから同化した(本研究ではこれを選点法と呼ぶこととする)。その結果, 選点法により精度が改善された地点が多かった。図-3は相馬の波高の時系列である。全格子を同化した場合(a)case01に比べて, 選点法により格子を間引いて同化した場合(b)case02の方が同化後

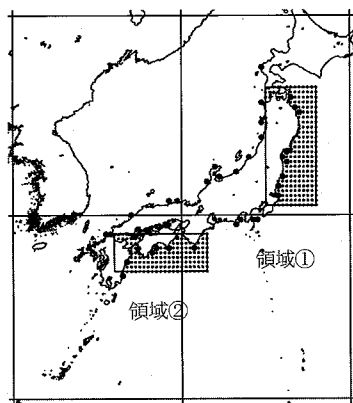


図-1 解析対象領域 (格子間隔 15 分の計算領域)

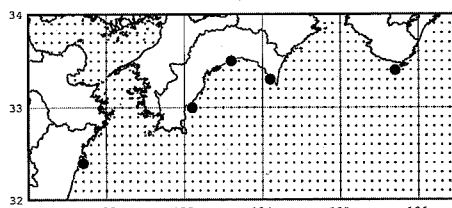
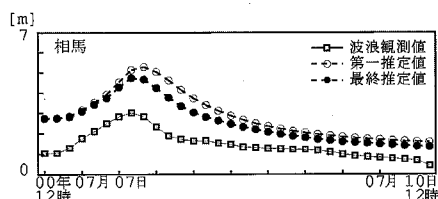
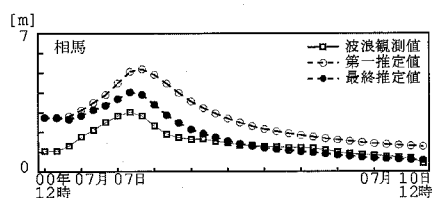


図-2 領域②の格子間隔 6 分の計算領域



(a) 全境界格子を同化 (case01)



(b) 選点法により境界格子を同化 (case02)

図-3 領域①(相馬)の経時変化

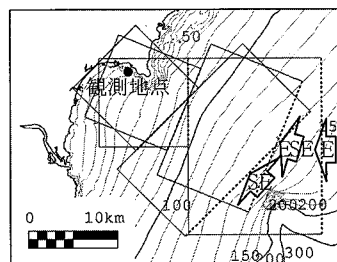


図-4 浅海変形計算領域の例 (上川口)

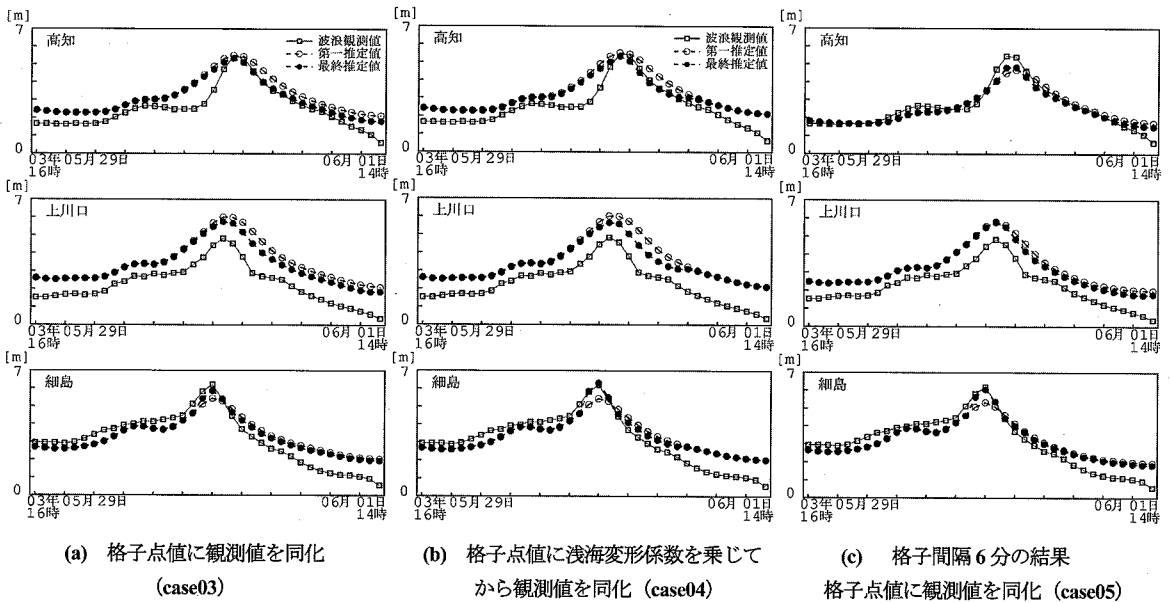


図-5 領域② (高知, 上川口, 細島) の経時変化

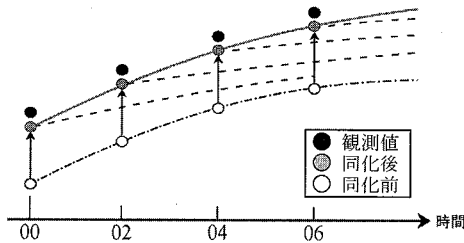


図-6 解析サイクルについて

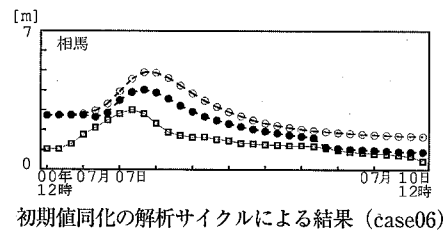


図-7 領域① (相馬) の経時変化

の精度が向上した。

## (2) 地形および波浪変形の影響に関する検討

橋本ら(2005)では, 南海太平洋岸を対象とした同化事例においては, データ同化の効果は小さかった。これは, 領域②のように地形が複雑な海域では地形解像度が 15 分では, 地形の再現性が悪いために地形による遮蔽等の影響が再現されていないことが原因であると考えられた。そこで, 最寄りの計算格子点から観測地点までの浅海変形計算によって, 浅海変形係数のテーブルを作成し, これを利用してデータ同化を行った。浅海変形計算手法には, 高山ら(1991)の碎波および反射を考慮した波浪変形計算を用い, 岬などによる遮蔽, 浅水変形, 屈折変形, 碎波変形を考慮した。格子間隔は 100 m (波浪推算格子点から波高計地点までの距離が遠い場合には波高計付近で 100 m, その外側で 200 m) とした。上川口における浅海変形計算領域 (E から SE) の例を図-4 に示す。

データ同化を行う際には, 観測値に浅海変形係数の逆数を乗じて沖波格子点における観測値に換算し, これに推算値を同化させる方法と, 推算値に浅海変形係数を乗

じて観測地点の推算値に換算し, これを観測値に同化させる方法の 2 通りが考えられる。しかし, 浅海変形計算の結果, 異なる入射 (沖) 波向にもかかわらず, 観測地点で同一波向になる場合があった。そのため, 後者の沖波に係数を乗じる方法によりデータ同化を行った。

領域②を対象とした同化事例 (格子間隔 15 分) の結果 (高知, 上川口, 細島の時系列) を図-5 に示す。格子点値に観測値を同化した場合 (a) case03 と, 格子点値に浅海変形係数を乗じて地形の遮蔽等を考慮してから観測値を同化した場合 (b) case04 を比較すると, 高知では両者ともほぼ同様に最終推定値は観測値に一致する。一方, 岬など地形の影響があると考えられる上川口や細島では, (b) の方がピーク付近の精度は改善される。しかし, ピークから離れた時刻については case03 よりも同化の効果が小さい。これは, 波向が変化したことにより, 用いる浅海変形係数が大きく変化したためであると考えられる。

## (3) 地形解像度に関する検討

岬などの地形の影響を考慮するために, 高解像度で推算を実施する方法がある。しかし, 地形解像度を 6 分,

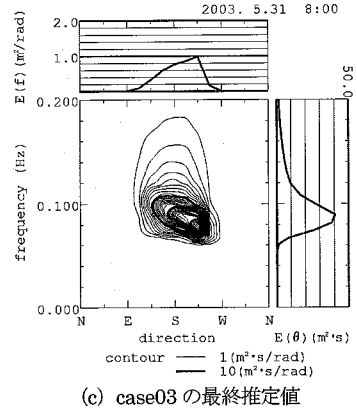
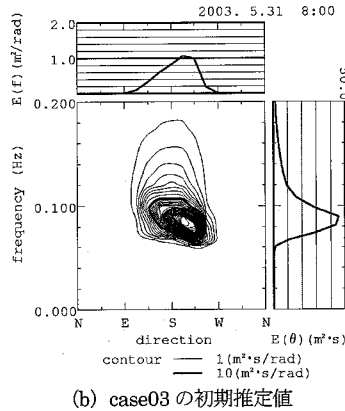
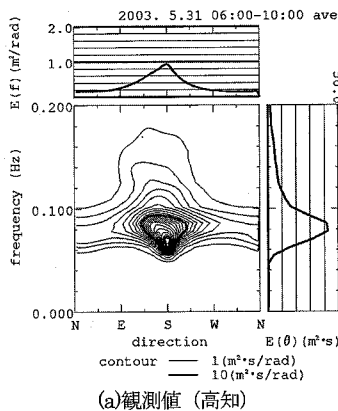
3分と高解像度にした場合、計算所要時間は、各々15分の場合の約 $2.5^3 (=15.6)$ 倍、約 $5^3 (=125)$ 倍の時間がかかる。

また、4次元変分法によるデータ同化により客観解析値データセットを作成する際には、チェックポイント法を利用しているので、初期時刻から最終時刻までのタイムステップ数を $n$ 、各チェックポイント間のタイムステップ数を $nc$ 、 $T_f$ をフォワードランの実行時間、 $T_{ad}$ をアジョイントランの実行時間とすると計算時間は1往復で $T_{ad} + T_f + \{(n - nc)/n\} \times T_f$ である。例えば、繰り返し回数が10回の場合、WAM Cycle 5では通常の波浪推算の計算時間と比較して25倍程度の計算時間を要することとなり、計算時間が問題となるが、格子間隔を6分にするPC-WSでも約1日で計算可能であることから、本研究では格子間隔を6分とした。図-5(c)にcscase05(格子間隔6分)の同化結果を示す。初期推定値は、各地点とも(a)、(b)よりも観測値に近い。特に、高知ではピーク時を除いて観測値と概ね一致する。最終

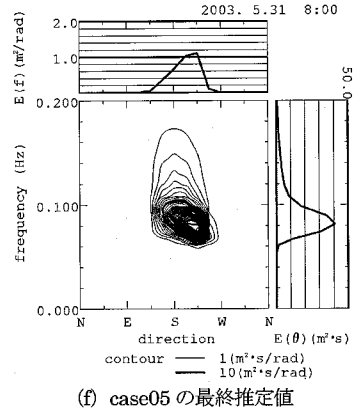
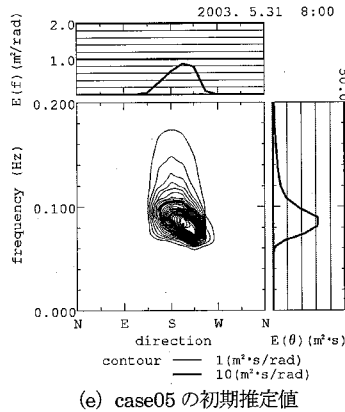
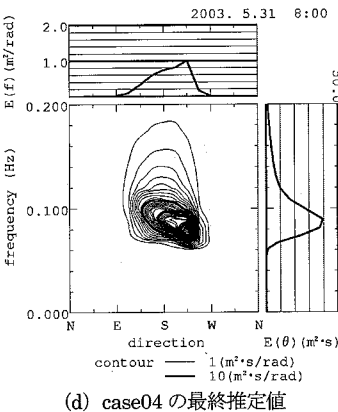
推定値は、各地点とも(a)、(b)よりも初期推定値からの変化は小さく、ピークを十分に再現していない。ただし、細島では(b)と同様にピーク付近でも観測値とよく一致する。空間分解能に応じてスペクトルおよび同化変数の分解能を適切に上げれば、データ同化の効果が上がる可能性がある。

#### 4. スペクトル初期値の同化に関する検討

次に、同化変数をスペクトル境界値とした場合と、スペクトル初期値とした場合を比較した。橋本ら(2003)では、スペクトル初期値を同化変数とした場合は、データ同化の効果は時間とともに急激に小さくなる。そこで、NOWPHASの波浪観測が実施されている毎偶数時を初期値として、同化期間を比較的短時間にしてデータ同化を行った。同化領域②は比較的狭く、波浪は領域内を6時間以内に伝播すると考えられるため、同化期間は6時間とした。したがって、1回の同化期間内に(欠測がなければ)4個のデータを同化する。このデータ同化を2



地形および波浪変形の影響の考慮について



解像度の相違による方向スペクトルの比較

図-8 高知における方向スペクトルの比較

表-3 評価指標

| ケース    | 評価指標  |       |              |           |
|--------|-------|-------|--------------|-----------|
|        | $V_b$ | $V_a$ | $\Delta V_a$ | $V_{inc}$ |
| case01 | 7.22  | 6.08  | 0.16         | 0.24      |
| case02 | 7.22  | 4.19  | 0.42         | 5.26      |
| case03 | 4.67  | 3.49  | 0.25         | 0.21      |
| case04 | 4.67  | 3.51  | 0.25         | 0.26      |
| case05 | 2.14  | 1.65  | 0.23         | 0.09      |
| case06 | 7.22  | 3.52  | 0.52         | 1.88      |

時間ずつ前進させるサイクルを構築してデータ同化を行った（本研究では、これを解析サイクルと呼ぶこととする）。解析サイクルのイメージを図-6に示す。

同化変数をスペクトル初期値とした場合は、同化変数の数が少なくなるので、背景誤差共分散行列の非対角成分を考慮してデータ同化を行うことができる。背景誤差項はローレンツモデルを仮定した。

データ同化の結果を図-7に示す。最終推定値は、初期推定値と比較して観測値に近づく。また、初期値同化は境界値同化のように、修正されたスペクトルが伝播してくるまでの助走期間を必要としない。したがって、同化開始時刻、同化期間を自由に選択しても結果に影響はないので、高精度かつ簡便にデータ同化が可能である。

## 5. 各ケースの精度の比較

本研究では、以下に示す第一推定値  $x_i^b$ （同化前の値）と観測値  $y_i^o$  の差の自乗和  $V_b$ 、同化後の推定値  $x_i^a$  と観測値  $y_i^o$  の差の自乗和  $V_a$  および同化後の推定値  $x_i^a$  と第一推定値  $x_i^b$  の差の自乗和  $V_{inc}$  を評価指標としてデータ同化の効果を検討した。

$$V_b = \sum_{i=1}^m (y_i^o - x_i^b)^2 / (m-1) \dots\dots\dots (3)$$

$$V_a = \sum_{i=1}^m (y_i^o - x_i^a)^2 / (m-1) \dots\dots\dots (4)$$

$$V_{inc} = \sum_{i=1}^m (x_i^a - x_i^b)^2 / (m-1) \dots\dots\dots (5)$$

$V_b$  は第一推定値と観測値との誤差分散、 $V_a$  は最終推定値と観測値との誤差分散、 $\Delta V_a = (V_b - V_a) / V_b$ 、 $V_{inc}$  は解析インクリメントで、データ同化による修正量である。 $V_b$  と比較して  $V_a$  が小さく、また  $\Delta V_a$  および  $V_{inc}$  が大きいほどデータ同化の効果が大きいといえることができる。表-3に評価指標を示す。case02はcase01と比較して  $V_b$  は等しく、 $V_a$  と  $V_{inc}$  は向上した。また、case04はcase03と比較して  $V_b$ 、 $V_a$  と  $V_{inc}$  は同程度であった。したがって、case04はピーク時に精度は向上したが、同化期間全体では精度は向上しなかった。case05はcase03、04と比較して初期推定値の精度  $V_b$  は向上したが  $\Delta V_a$  および  $V_{inc}$  は小さく、データ同化の効果は小さ

かった。case06はcase01、02と比較して  $V_b$  は等しく  $\Delta V_a$  は大幅に向上した。

図-8に高知港における方向スペクトルの観測値と、case03から05の初期推定値と最終推定値を示す。高知港においては、case03の初期推定値、最終推定値の波高は観測値と概ね一致した。しかし、(f)、(g)を(b)観測値と比較すると、観測値よりもSEからE方向にかけてのスペクトルが高い。一方、case05の初期推定値、最終推定値の波高は観測値と比較して低かった。これは、case03のようにSEからE方向のエネルギーが地形による遮蔽効果によって減衰しているためであると考えられる。

## 6. おわりに

波浪推算によって波浪客観解析値を作成するために、いくつかの4次元変分法によるデータ同化手法を第三世代波浪推算モデルに導入し、その適用性を検討しながら精度の向上を図った。スペクトル境界値の同化の精度向上に関する検討では、選点法を取り入れ、背景誤差共分散行列を対角行列として扱えるようにすることで、波浪の推算精度を向上できた。地形や浅海変形の影響を考慮した場合は、ピーク時の精度が向上した。地形解像度のみを6分に上げた場合、初期推定値の精度は向上したが、データ同化の効果は小さかった。空間分解能に応じてスペクトルおよび同化変数の分解能を適切に上げれば、データ同化の効果が上がる可能性がある。スペクトル初期値同化の検討では、解析サイクルを構築することにより、高精度かつ簡便にデータ同化が可能になった。

本研究では、有義波高を同化要素としてデータ同化を行った。しかし、方向スペクトルのレベルで観測値に一致させるためには、周期、波向についても適切に同化する必要がある。しかし、本研究では（現段階では）周期、波向を制御していない。今後はこれを解決し、4次元変分法による高解像度のスペクトル推定（客観解析値）を、信頼性設計の入力値として利用できるように精度向上をさせて行きたい。

## 参 考 文 献

- 高山知司・池田直太・平石哲也(1991)：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第30巻，第1号，pp. 23-65.
- 橋本典明・川口浩二・松浦邦明・宇都宮好博(2003)：Adjoint WAM(Cycle 5)のデータ同化における評価関数の検討，海岸工学論文集，第50巻，pp. 186-190.
- 橋本典明・松浦邦明(2004)：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.
- 橋本典明・松浦邦明・永井紀彦・河合弘泰(2005)：波浪観測地点の配置に関する検討を目的とした波浪観測データ同化システムの利用，海岸工学論文集，第52巻，pp. 166-170.