

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

橋本典明*・松浦邦明**・永井紀彦***・河合弘泰****

波浪推算の精度を向上させる波浪観測地点の配置等を検討するために、Cross Variation 法により各観測地点の波浪データ同化システムへの寄与の指標を検討した。日本沿岸4領域の各地点で欠測の少ない期間5ケースを対象として検討した。データ同化システムの実用化を目的として、同化変数、同化する波浪データの前処理法、最適化における収束計算の安定化と精度について検討した。その結果、波浪推算の精度向上に及ぼす観測地点の同化システムへの寄与は、東北日本海領域では酒田、山陰日本海領域では浜田、東北太平洋領域では相馬、常陸那珂が大きかった。

1. はじめに

波浪観測は、これまで各港湾における設計波の設定や海上工事の安全性確保等に貢献してきたが、観測には多大の費用が必要であり、より合理的で効率的な波浪観測が求められている。一方、近年優れたデータ同化技術が開発され各方面で利用され始めた。データ同化技術は、数値モデルに観測情報を付加することにより推算精度を向上させるものであるため、これを逆に利用すれば、観測データの同化システムへの寄与、即ち数値モデルの精度向上における観測地点の重要度を検討することができる。しかし、データ同化による解析結果は、同化変数の選択法や、観測誤差項と背景誤差項とで構成される評価関数、データ同化に利用する観測値の前処理法の相違によって差異が生じる。また、最適化計算の収束性についても解決すべき課題がある。本研究は、波浪のデータ同化システムの実用化を目的としてこれらの問題を検討・解決するとともに、NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網)の波浪観測データを本システムに適用することにより、波浪推算の精度を向上させる観測地点に関する検討を行うものである。

2. 検討諸元

本研究では、波浪観測データ同化システムに、Hersbach (1998) のモデルを橋本ら (2004) が改良したモデルを用いた。これは、波浪推算モデルに第3世代波浪推算法 WAM Cycle5 (以下 WAMC5)、データ同化手法に4次元変分法 (Adjoint 法) を用いたものである。4次元変分法は基礎方程式の時間発展を拘束条件として、背景誤差項と観測誤差項の和で表される評価関数を最小

化する同化変数の最適値を探索するものである。

波浪推算条件を表-1に示す。はじめに、広領域の波浪推算を行い、狭領域のスペクトル境界値を推算した。次に、これを入力条件として狭領域において波浪観測値をデータ同化し、狭領域のスペクトル境界値を修整することにより、データ同化による波浪推算の精度向上を行った。

データ同化した4つの狭領域とNOWPHAS観測地点を図-1に示す。なお、山陰日本海領域における境港、東北太平洋領域における釜石は観測位置が岬の遮蔽域にあ

表-1 波浪推算条件

目的	広領域	狭領域
	狭領域のスペクトル境界値を作成	NOWPHAS 波浪観測地点で波高を同化
東北日本海	115.0-170.0°E, 15.0-63.0°N	138.5-140.5°E, 38.5-43.0°N
山陰日本海		131.0-137.0°E, 34.0-37.5°N
東北太平洋		140.0-143.0°E, 35.5-41.5°N
南海太平洋		131.0-136.5°E, 32.0-34.0°N
格子間隔	0.5°	0.25°
周波数分割数	25	
	$f(1) \times 1.10(i-1)(f(1) = 0.04177248)$	
方向分割数	16	
積分時間間隔	10分	
水深	深海条件	
風場	ECMWF/TOGAの海上風データ(格子間隔0.5°)	

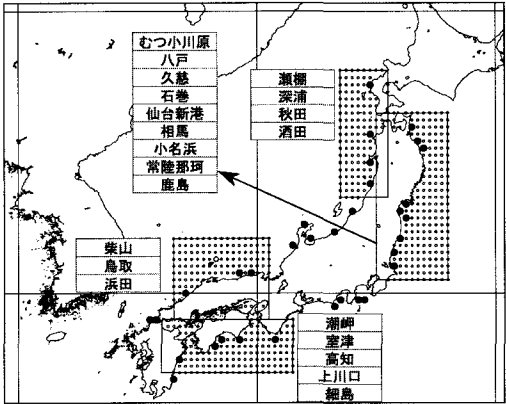


図-1 検討領域とデータ同化地点

* フェロー 工修 九州大学大学院教授 工学研究院 環境都市部門
** 水修 (財)日本気象協会 首都圏支社 調査部
*** フェロー 工博 (独)港湾空港技術研究所 海象情報研究室長
**** 正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所 海洋水理・高潮研究室長

表-2 検討対象事例

	海域	ケース	助走期間を含む同化期間							期間	擾乱の 種 類
			年	月	日	時	月	日	時	時間	
1	東 北 日本海	case1	2003	1	4	6	1	7	6	78	冬型
		case2	2003	9	13	0	9	15	0	48	台風
		case3	2003	11	21	6	11	23	18	60	冬型
		case4	2003	3	6	6	12	8	12	54	冬型
		case5	2003	12	19	6	12	21	18	60	冬型
2	山 陰 日本海	case1	2003	2	19	6	2	21	18	60	低気圧
		case2	2003	9	12	6	9	14	18	60	台風
		case3	2003	10	12	6	10	14	12	54	低気圧
		case4	2003	11	21	0	11	23	12	60	冬型
		case5	2003	12	18	18	12	21	6	60	低気圧
3	東 北 太平洋	case1	2002	1	20	12	1	23	12	72	低気圧
		case2	2002	1	26	12	1	29	0	60	低気圧
		case3	2002	4	3	12	4	7	6	90	低気圧
		case4	2002	10	20	12	10	23	18	78	低気圧
		case5	2002	11	24	12	11	27	12	72	低気圧
4	南 海 太平洋	case1	2003	1	26	6	1	28	12	54	低気圧
		case2	2003	4	7	12	4	9	18	54	低気圧
		case3	2003	5	29	6	6	1	6	72	低気圧
		case4	2003	8	7	0	8	10	0	72	台風
		case5	2003	10	11	18	10	14	0	54	低気圧

り(湾内であるため)、本調査の地形解像度では再現が困難であると判断して予め領域内の観測地点から除外した。表-2 に示す本研究の対象事例は以下の条件で選定した。

①波浪観測値点数が充実している2002年又は2003年を対象とする。

②各地点で欠測が少ない擾乱時とする。ただし、ピーク時以外の欠測は観測データを補間して用いる。

なお、データ同化における波浪の初期条件は、同化期間の前2日間について波浪推算を実施して作成した。また、同化期間には、同化によって修整された領域境界上のスペクトルの主要成分が観測地点に到達するまでの伝播時間を考慮して6時間の助走期間を設けている。

3. 同化システムの検討 (問題点と解決法)

(1) 同化変数

本研究では狭領域のスペクトル境界値を同化変数として、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、 θ_n は方向である。同化変数の数は、領域の大きさ、解析期間によるが、波浪推算で用いられる一般的な設定を行うと数百万～数千万と膨大になる。そこで、東北太平洋を対象として、幾つかの同化変数に共通のコントロール変数を用いることにより、コントロール変数の数を減じた場合の推算精度に及ぼす影響を検討した。その結果、コントロール変数を時間に関

して1/6 (10分間隔から1時間間隔) に減じると擾乱時のピーク付近をうまく再現できず、波高を過小評価する。また、方向分割数は16とし、周波数については幾つかの周波数成分に共通のコントロール変数を用い、コントロール変数の数を1/5に減じても推算精度に及ぼす影響は小さかった。そこで以下では、周波数成分については幾つかの成分をまとめて5成分のコントロール変数を考慮することによりデータ同化を実施した。

(2) 評価関数

一般に、背景誤差共分散行列の非対角成分は0ではなく、何らかの相関を考慮する必要がある。本研究では、各時刻のスペクトル境界値を同化しており、背景誤差共分散行列の非対角成分は、一般に距離と時間の関数としての相互相関を考慮する必要がある。しかし、コントロール変数の数は数100万であり、この場合の背景誤差共分散行列の逆行列を求めることは計算時間や記憶容量の面から実用的ではない。そこで、本調査では、背景誤差共分散行列には対角成分のみを考慮することとし、この対角成分には、気象庁 (1997) に倣い背景誤差分散を統計的に推定し、その逆数を与えた。また、観測誤差は地点毎、観測毎に独立であり、互いに相関を持たないと仮定し、観測誤差行列には対角成分のみを考慮した。これについても同様に、この対角成分には観測誤差分散を統計的に推定し、その逆数を用いた。

(3) 同化に用いる波浪データの事前処理

本研究の波浪推算は、格子間隔0.5°で6時間間隔のECMWFの風データを用いて実施した。この場合、入力データとしての風情報の時間・空間スケールの粗さに依存して、推算可能な現象の時空間スケールの大きさが決まり、これよりも小さな時空間スケールの変動を推算することは難しい。一方、データ同化に利用可能な波浪観測データは一般に2時間毎に測得される。

図-2は、山陰日本海のcase5についてNOWPHAS波浪観測データを同化した結果の一例である。図に見られるように、元々の波浪推算値 (第一推定値) には観測値に見られるような短時間の変動は推算されていない。しかし、同化したことにより最終推定値は観測値に近づいている。これは、数値モデルと入力情報からは再現不可能な変動成分 (数値モデルから見ると再現不可能な誤差成分) を同化している可能性があり、この様な同化結果を用いて、波浪推算の精度向上に及ぼす観測地点の検討を行うことは適切であるとは言えない。本研究では、データ同化技術を利用して、波浪推算の精度向上に及ぼす波浪観測地点の検討を行うことが主目的であり、必ずしも精度の良い波浪推算を実施することが目的ではない。そこでここでは、2時間毎に測得された有義波高の時系列データに数時間の移動平均を施して平滑化し、波浪推

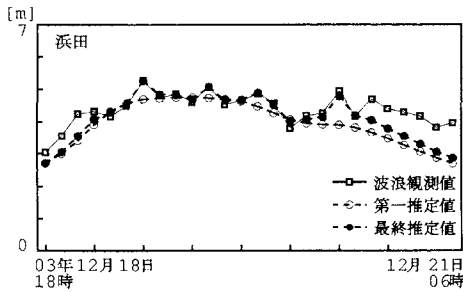


図-2 山陰日本海領域 case5 のNOWPHAS 浪観測データを同化した結果

算で再現可能な有義波高の時系列データに対してデータ同化を適用して検討することとした。検討の結果、本研究では5～9時間の移動平均を用いることとした。

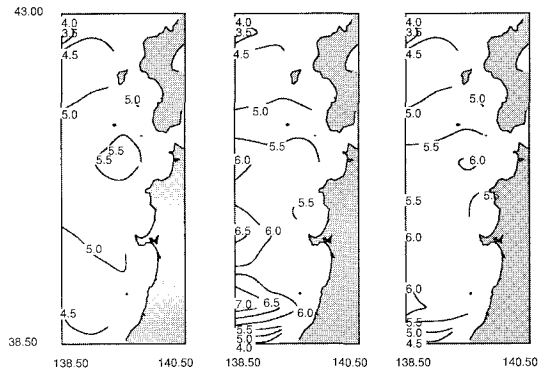
(4) 非線形最適化における収束性に関する検討

波浪観測データを用いて4次元データ同化を行う際に、評価関数の最小値探索において繰り返し計算が収束しない、すなわち最適解が見つからないケースが散見された。図-3は東北日本海領域のcase3(2003年11月22日16時)の例である。図-3(b)に示す最終推定値(非線形)は、(a)に示す第一推定値の平面分布と比較して、西側境界上に局所的に高い波高が推算されている。これは、モデル内の非線形項により評価関数が2次を超える関数になり、最小値探索の繰り返し計算が局所的な最小値に陥ったためであろうと推察される。モデルが線形ならば評価関数は2次関数となり、大域的な収束が保証され、最適解に到達する。波浪推算モデルは非線形相互作用項を除けば線形であり、この項を省略可能ならば、最適化における繰り返し計算は収束し、大域的な最適解の近似値が得られるはずである。

本研究では、図-1に示す4つの狭領域を対象としている。広領域の波浪推算で非線形相互作用項を無視すれば、不合理な推算結果が得られるが、図-1に示す狭領域であれば、非線形相互作用の役割から判断してその影響は小さいと推察される。そこで本研究では、データ同化における最適解探索時の収束計算で収束解が得られない場合には、非線形項を省略した計算を行い、大域的な最適解に近づけるような修正を導入した。図-3(c)は、このようにして非線形相互作用項を省略した場合の有義波高の平面分布の一例である。図-3(c)および後述の図-4に示す時系列図においても最終推定値は観測値に近づき、適切な処理が行われたものと推察される。なお、非線形相互作用項を省略することにより、計算時間は約40%の大幅な短縮が可能になる。

4. 波浪推算の精度向上に及ぼす観測地点の検討

前節で述べたデータ同化手法を用いて、波浪推算の精



(a)第一推定値 (b)最終推定値(非線形) (c)最終推定値(線形)

図-3 東北日本海領域 case3 のデータ同化前後の波高分布の変化(m)

度向上に及ぼす観測地点の検討を行った。データ同化の効果を評価するためには、 χ^2 検定が有効である。しかし、観測誤差そのものは未知である。そこで、以下に示す第一推定値 x_i^0 (同化前の値)と観測値 y_i^0 の差の自乗和 V_b 、同化後の推定値 x_i^f と観測値 y_i^0 の差の自乗和 V_a および同化後の推定値 x_i^f と第一推定値 x_i^0 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。

$$V_b = \sum_{i=1}^m (y_i^0 - x_i^0)^2 / (m-1) \quad (2)$$

$$V_a = \sum_{i=1}^m (y_i^0 - x_i^f)^2 / (m-1) \quad (3)$$

$$V_{inc} = \sum_{i=1}^m (x_i^f - x_i^0)^2 / (m-1) \quad (4)$$

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、 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。データ同化領域内の全波浪観測地点の観測値を同化する場合(以下、 n 地点同化)と波浪観測地点を1地点ずつ除外して同化する場合(以下、 $n-1$ 地点同化)のデータ同化の効果の指標として、式(2)と(3)を比較することにより、波浪推算の精度向上に及ぼす各観測地点の寄与の大きさを検討した(Cross Variation法)。すなわち、 n 地点同化に比べて、 $n-1$ 地点同化における誤差 V_a が大きくなり修整量 V_{inc} が小さくなれば、同化の際に除外した地点は波浪推算の精度向上におけるデータ同化の影響が大きい、すなわち波浪推算の精度向上のための重要な情報を提供する地点であると言えるであろう。

図-4(a)は、東北日本海のcase3で全地点を同化した結果、(b)は酒田のみを除外して同化した結果の一例である。全地点同化の場合には、深浦、酒田ともに同化後の最終推定値は観測値に近づき、しかし、酒田を除外すると、酒田の最終推定値は第一推定値からあまり変化しな

いが、深浦の最終推定値は観測値に概ね一致するように変化する。表-3はこの例（東北日本海 case3）の評価結果である。全地点同化の V_a に比べ、酒田を除外した場合の V_a が最も大きくなっている。しかし、この例では V_{inc} も大きくなっている。これは、酒田を除外することにより、酒田の推算精度は低下したものの、深浦では逆に推算精度が向上しており、この影響によるものである。図-5と表-4は酒田の観測値を除外することにより、 V_a が大きくなり、 V_{inc} が小さくなった例である。この例では、図に見られるように、酒田の観測値を除外すれば、酒田だけでなく、その他の地点（秋田）の波浪推算精度も低下する。この様に、波浪推算の精度向上における波浪観測地点のデータ同化に及ぼす影響は、 V_a 及び V_{inc} の両方を同時に評価することによって検討できることが分かる。ただし、幾つかの波浪推算結果に基づいて総合的に波浪観測地点の検討を行う場合には、 V_a 及び V_{inc} は対象事例毎に異なる大きさになることから、本研究では、各ケースにおける $n-1$ 地点同化と n 地点同化の V_a および

V_{inc} の差を求め、 V_b により基準化した以下のような指標を用いて検討することとした。

$$\Delta V_{as} = (V_a^{n-1} - V_a^n) / V_b \dots \dots \dots (5)$$

$$\Delta V_{incs} = (V_{inc}^{n-1} - V_{inc}^n) / V_b \dots \dots \dots (6)$$

表-5は各検討領域における、誤差の変化量 ΔV_{as} 、修正量の変化量 ΔV_{incs} の5事例の平均を示したものである。 ΔV_{as} が正で大きく、 ΔV_{incs} が負で小さければデータ同化における観測地点の寄与が大きいことを表している。表中には ΔV_{as} が正で、 ΔV_{incs} が負の箇所にハッチングを掛けて示している。また、表-6は、表-5に基づいて、各領域でデータ同化への寄与が大きい観測地点の上位3地点を示したものである。東北日本海領域では、酒田は ΔV_{as} が正で大きく、 ΔV_{incs} が負で小さく、同化への寄与が最も大きい。秋田、深浦は ΔV_{incs} は正になってしまったが、 ΔV_{as} は正であり、秋田、深浦の順で大きく、この順にデータ同化への寄与があると言えよう。山陰日本海領域では、浜田は ΔV_{as} が正で、 ΔV_{incs} が負であり、同化への寄与が大きい。柴山、鳥取を除外すると ΔV_{as} は

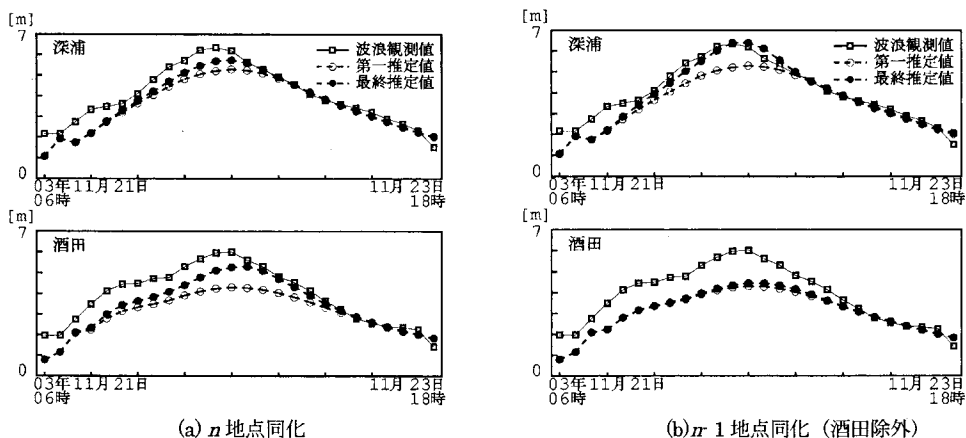


図-4 東北日本海領域 case3 の n 地点同化(a)と $n-1$ 地点同化（酒田除外）(b)の結果の比較

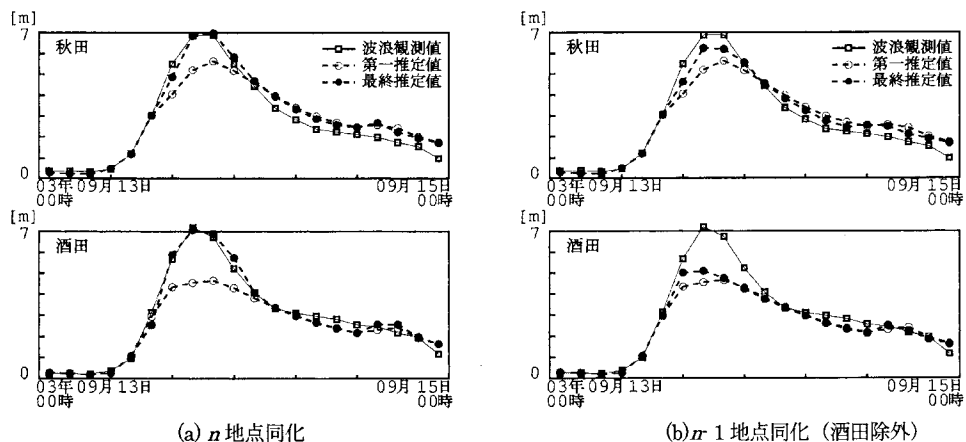


図-5 東北日本海領域 case2 の n 地点同化(a)と $n-1$ 地点同化（酒田除外）(b)の結果の比較

表-3 東北日本海領域 case3 の評価結果

	同化条件	Iteration	V_b	V_a	V_{inc}
1	全地点同化	4	3.33	2.39	0.32
2	瀬棚除外	3	3.33	2.39	0.32
3	深浦除外	4	3.33	2.50	0.31
4	秋田除外	3	3.33	2.48	0.30
5	酒田除外	3	3.33	2.72	0.41

表-4 東北日本海領域 case2 の評価結果

	同化条件	Iteration	V_b	V_a	V_{inc}
1	全地点同化	4	2.85	0.97	2.31
2	瀬棚除外	3	2.85	0.97	2.26
3	深浦除外	3	2.85	1.11	2.41
4	秋田除外	3	2.85	1.23	2.57
5	酒田除外	5	2.85	1.47	0.72

表-5 Cross Variation 検討結果 (5 事例平均)

(a) 東北日本海

	同化条件	ΔV_{as}	ΔV_{incS}
1	瀬棚除外	0.00	0.00
2	深浦除外	0.02	0.01
3	秋田除外	0.04	0.02
4	酒田除外	0.11	-0.13

(b) 山陰日本海

	同化条件	ΔV_{as}	ΔV_{incS}
1	柴山除外	0.01	0.03
2	鳥取除外	0.01	0.03
3	浜田除外	0.06	-0.05

(c) 東北太平洋

	同化条件	ΔV_{as}	ΔV_{incS}
1	むつ小川原除外	0.00	0.00
2	八戸除外	0.00	0.00
3	久慈除外	0.00	0.00
4	石巻除外	0.00	0.00
5	仙台新港除外	0.02	-0.01
6	相馬除外	0.03	-0.05
7	小名浜除外	0.01	-0.03
8	常陸那珂除外	0.03	-0.05
9	鹿島除外	-0.01	0.02

(d) 南海太平洋

	同化条件	ΔV_{as}	ΔV_{incS}
1	潮岬除外	0.00	0.00
2	空津除外	0.00	0.00
3	高知除外	0.00	0.00
4	上川口除外	0.00	0.00
5	細島除外	—	—

表-6 上位 3 位迄の順位

	第 1 位	第 2 位	第 3 位
東北日本海	酒田	秋田	深浦
山陰日本海	浜田	—	—
東北太平洋	相馬, 常陸那珂	—	小名浜
南海太平洋	—	—	—

正であるが小さく, ΔV_{incS} も正である。従って, 対象とした 5 事例においては同化への寄与は殆どないと考えら

れる。東北太平洋領域では, 仙台新港から常陸那珂にかけての 4 地点で, ΔV_{as} が正になり, ΔV_{incS} が負になっており, データ同化への寄与があった。相馬, 常陸那珂が同化への寄与が高い。南海太平洋領域では, 細島除外のケースでは計算が発散した。また, この領域では全ケースで ΔV_{as} が正になり, ΔV_{incS} が負になった地点はない。これは本領域ではデータ同化の効果が小さかったことを示している。この理由として, 南海太平洋領域の観測地点の多くは岬等による遮蔽等の影響を受けているが, モデルそのものが元々このような局所的な地形の影響を十分に再現できるようになっていない。このため, この様に元々モデルが不完全であるために推算精度が悪い海域で, 観測されたデータ (修整情報) を与えて修正しようとしても, 観測データの情報をデータ同化システムにうまく反映できないためであると考えられる。このような場合には, 予め浅海変形計算等を行い, 各観測地点の浅水変形, 屈折, 遮蔽等の効果を何らかの形でモデルに反映させておくような改良を行う必要があると考えられる。

5. おわりに

本調査では我が国周辺海域の 4 つの海域を対象として, データ同化により波浪推算の精度を向上させる波浪観測地点に関する検討を行った。検討結果は, 瀬棚等のように, 元々推算精度が高い地点ではデータ同化への寄与が小さく, 第一推定値が実測値と大きく異なるものの, 同化により最終推定値が観測値に近づくような地点でデータ同化への寄与が大きくなることを示していると考えられる。本研究では, 各々 5 擾乱について検討し, 幾つかの知見を得たが, 波浪推算の精度向上に及ぼす波浪観測地点の最適な配置等をより適切に検討するためには, さらに多くの事例を対象として検討を行い, さらに信頼性を高めて行く必要がある。なお, 今回実施した Cross Variation 法は, いわゆる 1 地点の変数減少法である。より適切に波浪推算の精度向上に及ぼす観測地点に関する検討を行うためには, 変数増減法によるより詳細な検討が必要であろう。本研究では, ECMWF から提供された海上風データを用いて波浪推算を行った。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 気象庁編(1997): データ同化の現状と展望, 気象業務支援センター, pp. 74-82.
- 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. 206-210.
- Hersbach, H. 1998. Application of the adjoint of the WAM model to inverse wave modeling. J. Geophys. Res. Vol. 103, No. C5, pp. 10469-10487.