

データ同化による波浪推算の高精度化

小林 智尚* 藤園 康弘**・山口 幸司***
足立 忠行****・安田 孝志*****

1. はじめに

近年, WAM モデル (Komen *et al.*, 1994) をはじめとする第三世代波浪推算モデルが国内外で開発・利用されるようになってきている。また推算精度を向上させるためにモデルの物理過程表現の改良やデータ同化手法の導入なども試みられている。データ同化手法とは数値解析モデルに現地での観測結果を適用して解析結果を修正する手法である。これにより数値モデルの不備や入力データの品質による解析誤差が修正され, より高精度の数値解析結果を得ることができる。Hersbach (1998) や小林ら (2000) は WAM モデルに Adjoint 法を適用し, それぞれ北海および日本海での波浪の推算精度向上を試みている。このうち小林らはデータ同化に用いる観測地点と同じ地点でデータ同化による推算精度の検証を行っている。これによって波浪推算モデルにおけるデータ同化手法としての Adjoint 法の特徴などが把握できる。しかし実際には観測データの無い地点での推算精度を向上させるのが一般的なデータ同化手法の活用法であり, 小林らの試みは実用的ではない。

そこで本研究ではデータ同化した波浪推算モデルの実用的な運用法を前提とし, 小林ら (2000) と同様に, 推算対象領域の開境界上の波浪条件を目的変数とした Adjoint 法を波浪推算モデル WAM に組み込み, 複数の地点での観測データを用いて波浪場のデータ同化を行った。そして新たな地点において推算結果を観測値と比較することにより, このデータ同化による効果を検討した。ここでは, とくに対象とする領域の大きさや, データ同化に用いる観測地点の数やその配置がデータ同化による推算精度向上にどの程度影響するか検討を行った。

2. Adjoint 法によるデータ同化

(1) Adjoint 法について

Adjoint 法は変分法を用いたデータ同化手法である。この手法では同化する観測データや, 修正される目的変数を任意に選ぶことができる。さらに時間軸を遡りデータ同化を行うため, 観測データの時刻などにも制限がない。このように Adjoint 法はデータ同化手法として自由度の大きい手法であり, さまざまな適用が可能である。

(2) 波浪推算での Adjoint 法

Hersbach (1998) は波浪推算モデル WAM に Adjoint 法を適用したモデル, ADWAM で北海の波浪推算精度向上を試みている。彼は Adjoint 法を適用する際に, Giering and Kaminski (1998) が開発した, 物理モデルのプログラムコードから Adjoint 法を適用したプログラムコードを生成するコンパイラを用いている。このようなコンパイラはきわめて有用であり, 波浪推算だけでなく, 今後さまざまな分野でのデータ同化の適用に活用されるものと期待される。ただし ADWAM では WAM のエネルギー生成項に含まれる経験定数などを, データ同化によって修正される目的変数としている。これにより ADWAM では, 特に北海の波浪場条件において, 波浪推算モデル WAM の諸係数を最適化することにより, より高精度推算モデルへと修正を行っている。しかしその一方で, 時々刻々得られる観測データはその時刻の波浪場には直接反映されず, 観測データの推算結果に対する精度改善の時間的応答性は低いものとなっている。経験係数の最適値を時間発展的に求めるのであれば, Adjoint 法に比べて観測ノイズなどを考慮したカルマンフィルタの方が優れているものと考えられる。

一方, 小林ら (2000) は WAM に, 計算領域開境界での波浪の方向スペクトルを目的変数とする Adjoint 法を適用した。これにより一般には推定が困難である, 開境界の条件を得ることができた。さらにこの方法では, WAM における現象表現の不備を補う形で開境界上の方向スペクトルの修正も時々刻々加わるため, 突発的な推算誤差に対しても, データ同化に用いた観測データと推算結果とが一致する方向で絶えず修正されることにな

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻
** 岐阜大学大学院 工学研究科環境エネルギーシステム専攻
*** (株)シーテック
**** 工修 応用技術(株)
***** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻

る。ただし、負の値が許されない方向スペクトルを目的変数に選んだために、波浪推算モデルが極端に過大な方向スペクトルを推算してしまった場合にはデータ同化によっても十分に修正されない可能性がある。

(3) 波浪推算での Adjoint 法の定式化

本研究では波浪推算モデルとして WAM Cycle4 モデル (Gunther *et al.*, 1992) を用いた。また Adjoint 法で修正される目的変数は開境界上での波浪の方向スペクトルとする。WAM の基礎方程式は

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial F}{\partial x} + k \frac{\partial F}{\partial k} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (1)$$

である。ここで F は空間座標 x , 時間座標 t , 波数ベクトル k を独立変数とする波浪のエネルギースペクトルである。また S_{in} , S_{nl} , S_{ds} はそれぞれ風から波へのエネルギー輸送項, 波浪成分波間の非線形相互作用によるエネルギー輸送項, 砕波などによるエネルギー消散項である。この方程式から Adjoint 法で用いる方程式を導く。

まず数値モデルによる解析結果と観測結果との差を表す距離関数 H を定義する。ここでは観測から得られる波浪の方向スペクトル F_{obs} と波浪推算モデルによって得られる方向スペクトル F とを用いて距離関数 H を

$$H = \sum (F - F_{obs})^2 \quad (2)$$

とした。つぎに Adjoint 法に従い Adjoint 方程式を導く。式 (1), 式 (2) の基礎方程式, 距離関数より Adjoint 方程式は以下になる。

$$-\frac{\partial \delta F}{\partial t} - \dot{x} \frac{\partial \delta F}{\partial x} + k \frac{\partial \delta F}{\partial k} = \frac{\partial}{\partial F} (S_{in} + S_{nl} + S_{ds}) \delta F + 2 \sum (F - F_{obs}) \quad (3)$$

ここで δF は目的変数の修正ベクトルの向きである。

Adjoint 法では式 (2) の距離関数 H が最小となるように目的変数である開境界上の地点での方向スペクトルを逐次修正する。修正する際には式 (3) の Adjoint 方程式を用い、時間軸を遡って計算し、得られた修正ベクトルにしたがって開境界上での目的変数の値を修正する。

3. Adjoint 法の波浪推算への適用

本研究では、波浪推算モデル WAM において Adjoint 法で開境界上の波浪の方向スペクトルを求めることとした。そして、計算対象領域の大きさが推算結果に及ぼす影響、および、データ同化に用いる観測地点の数やその位置の影響について検討を行うこととした。

(1) 計算条件

本研究では図-1 に示すとおり、計算対象領域を東経 134°~138°, 北緯 35°~39° の約 400 km×400 km, および東

経 131°~138°, 北緯 35°~42° の約 700 km×700 km の 2 種類とした。図より対象領域の東西北の各方向の境界が開境界となる。したがってここではこの開境界上の波浪条件を推定することになる。また、観測地点は図のとおり、経ヶ岬、徳光海岸、輪島の 3 地点である。後に示す結果では、この 3 地点のうち 2 地点の観測値をデータ同化に用いており、残りの 1 地点で推算値と観測値とを比較することにより、データ同化の有用性を検討している。解析対象期間は 1996 年 1 月 1 日から 10 日までの 10 日間とした。波浪推算に必要な海上風データには ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) から提供されている再解析値を用いた。

この図-1 で示されている観測地点では有義波高と有義波周期しか得られておらず、距離関数 H や Adjoint 方程式で必要な方向スペクトル F_{obs} は不明である。そこで本研究では、各計算時間ステップの F_{obs} は同一計算時間ステップ同一地点に WAM の波浪推算によって得られる方向スペクトル F と相似形であると仮定し、このスペクトル F を観測された有義波周期、有義波高にしたがって周波数方向およびスペクトル強度方向に伸長させて F_{obs} を求めた。もし波浪スペクトルの観測値が得られているのであれば、その値を直接 Adjoint 方程式に利用でき、データ同化による推算精度の向上にはきわめて有利であることは式 (3) から明らかである。

(2) 対象領域の違いによる推算結果の比較

まず、計算対象領域の大きさがデータ同化による推算結果に及ぼす影響について検討を行った。本研究では Adjoint 法の目的変数が開境界上の波浪方向スペクトルであるため、計算領域の大きさはこの開境界から観測点までの吹送距離に関係するため重要な要素である。ここでは、データ同化に経ヶ岬および輪島での観測値を用い、最終的な推算結果比較・精度検証には徳光海岸での観測

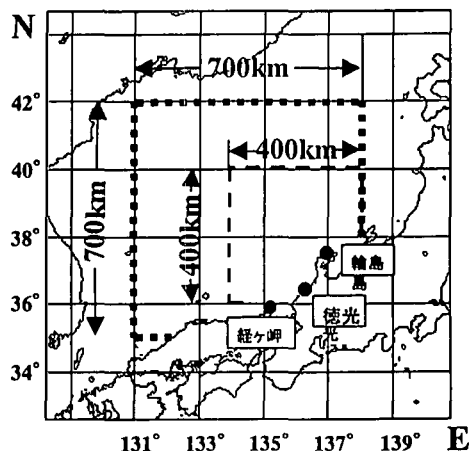


図-1 解析対象領域

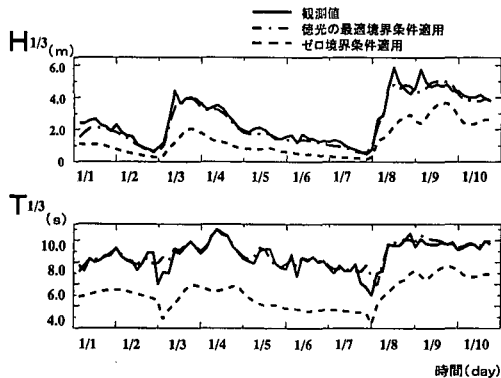
値を用いることとした。

まず、データ同化による推算データ修正の様子を確認するために、観測値をデータ同化に用いた経ヶ岬での推算結果を観測値と比較した。その結果を図-2に示す。これらの図のうち、700 km×700 km 領域での計算で、1月9日あたりで有義波高の推算値が過大に評価されている以外は、どの大きさの領域を対象とした場合でも、データ同化による有義波高、有義波周期の推算がかなり良好であることが分かる。また、700 km×700 km 領域での計算では、開境界での方向スペクトルを全てゼロにした場合とデータ同化した場合の推算値との差が、400 km×400 km 領域での計算結果に比べて小さいことが分かる。これは、700 km×700 km 領域での計算では、データ同化による開境界での方向スペクトルの修正量が小さいことを意味している。これは図-1からも、日本海全体と比較して、700 km×700 km 領域での計算では経ヶ岬などの観測点で十分な吹送距離を確保できていることが分かる。このような推算結果は輪島でも同様であった。これより、Adjoint 法によるデータ同化によって、経ヶ岬および輪島の観測値は波浪場の推算結果に十分反映されてい

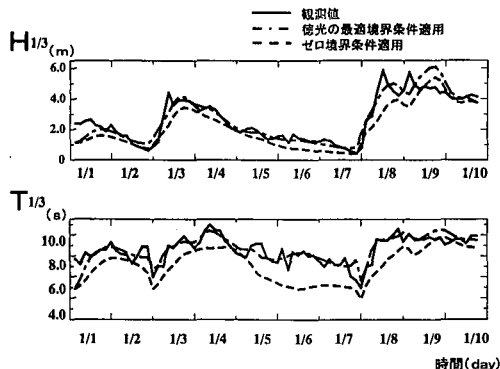
ることが分かった。

次に、経ヶ岬および輪島での観測値をデータ同化に用いた波浪推算において、同化に用いなかった徳光海岸での波浪推算値を観測値と比較した結果を図-3に示す。この図では、1月4日から5日にかけてデータ同化による有義波高の推算結果が観測値より過小であるが、1月8日から10日にかけては逆に観測値より過大な推算結果を表している。このうち1月4日から5日までの有義波高推算値が過小評価であるのは、Adjoint 法の目的変数である開境界上の波浪方向スペクトルのうち、データ同化に用いた観測地点である経ヶ岬と輪島に向かう成分波はこのデータ同化手法により十分修正されているが、徳光海岸に向かう成分波の修正は十分でなかったためである。また、1月8日から10日までの過大な推算結果は波浪推算モデル WAM の空間分解能が大きく、能登半島を完全には再現していなかったために生じたものと考えられる。この点については、後に再度議論する。

このように、データ同化による推算では観測地点の配列と主波向の方向の関係に影響を受けるものと思われる。また図-3(a) (b) を比較すると、今回の計算条件で

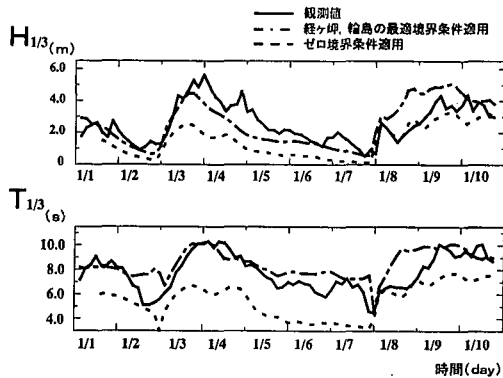


(a) 400 km×400 km 領域での推算結果

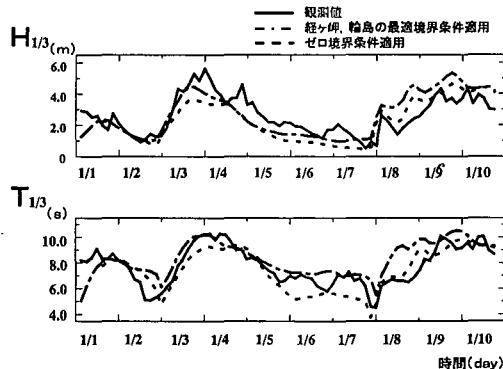


(b) 700 km×700 km 領域での推算結果

図-2 経ヶ岬での推算結果(経ヶ岬、輪島での観測値をデータ同化)



(a) 400 km×400 km 領域での推算結果



(b) 700 km×700 km 領域での推算結果

図-3 徳光海岸での推算結果(経ヶ岬、輪島での観測値をデータ同化)

は $700\text{ km} \times 700\text{ km}$ 領域での推算結果の方がわずかに観測値に近いが、両者の差はほとんどないことが分かる。また今回、データ同化による波浪推算誤差は有義波高でおよそ $1 \sim 2\text{ m}$ であった。

(3) 観測地点配置の違いによる推算結果の比較

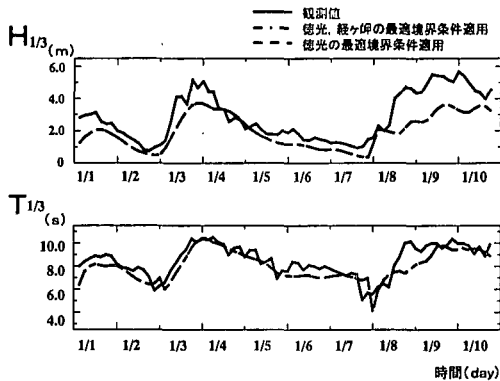
つぎに、データ同化に用いる観測値の観測地点と、波浪推算結果を評価する地点の配列が推算結果に及ぼす影響について検討を行った。

図-4 は、データ同化に徳光海岸と経ヶ岬あるいは徳光海岸のみの観測値を用いて波浪推算を行い、その推算結果を輪島の観測地点にて観測値と比較した結果である。また図-5 は、データ同化に徳光海岸と輪島あるいは徳光海岸のみの観測値を用いて波浪推算を行い、その推算結果を経ヶ岬にて観測値と比較した結果である。図-4 では、徳光海岸と経ヶ岬の2地点での観測結果を用いてデータ同化を行った波浪推算結果と、徳光海岸のみの観測値を用いた波浪推算とが、有義波高・有義波周期ともにほぼ同じ値を示していた。とくに $400\text{ km} \times 400\text{ km}$ の領域での推算結果図-4(a) では両者がほぼ完全に一致していた。またこの結果は図-5 でも同様であった。この

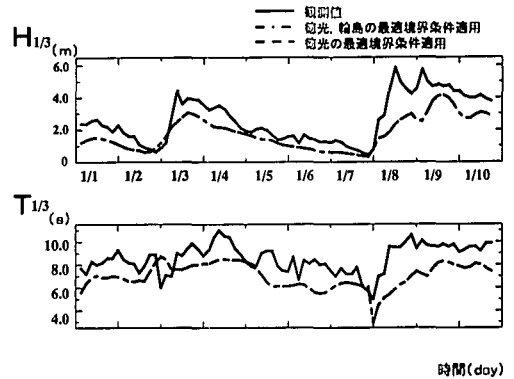
ことから、Adjoint 法によるデータ同化ではデータ同化に観測値を用い地点のうち任意の波浪推算地点に最も近い地点の観測値が推算地点の推算結果に大きな影響を及ぼしており、とくに狭い領域での推算ではこの傾向が顕著であることが分かった。これより、データ同化手法を用いて波浪推算を行う場合には推算対象となる地点に対して、できるだけ近くに品質の高い観測値を有する観測点があることが重要であることが分かる。

また、図-3 ほど明確ではないが、図-4 および図-5 でも1月4日から5日までの有義波高の推算値が観測値よりやや小さい傾向が見られた。これは図-3の徳光海岸と同様、開境界上方向スペクトルのうち、データ同化に用いた観測地点に向かう成分波はデータ同化により良好に修正されているものの、波浪推算対象地点に向かう成分までは十分に修正されていなかったためである。

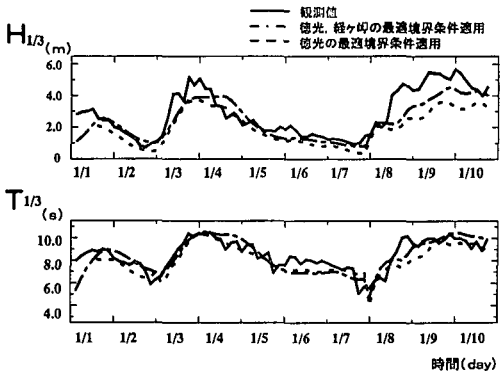
次に1月8日から10日までの有義波高に着目すると、図-3に示される徳光海岸ではデータ同化による波浪推算値が観測値を上回っているのに対し、図-4 および図-5とも、逆に推算値が観測値を下回っている。これはこの期間、徳光海岸での観測値が輪島や経ヶ岬での観測値



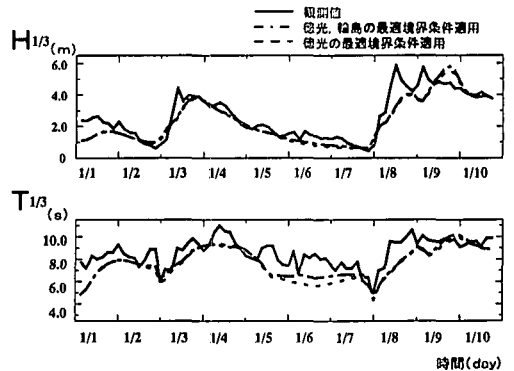
(a) $400\text{ km} \times 400\text{ km}$ 領域での推算結果



(a) $400\text{ km} \times 400\text{ km}$ 領域での推算結果



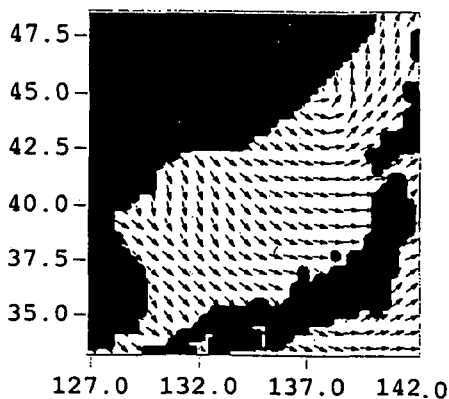
(b) $700\text{ km} \times 700\text{ km}$ 領域での推算結果



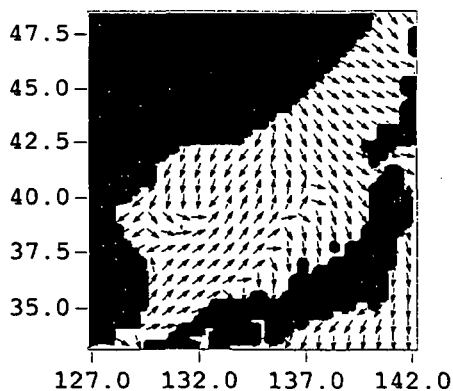
(b) $700\text{ km} \times 700\text{ km}$ 領域での推算結果

図-4 輪島での推算結果(徳光海岸と経ヶ岬, または徳光海岸のみでの観測値を値データ同化)

図-5 経ヶ岬での推算結果(徳光海岸と輪島, または徳光海岸のみでの観測値を値データ同化)



(a) 1月4日6時



(b) 1月8日6時

図-6 日本海波浪の主波向分布 (推算値)

と波浪推算上で整合性が取れていないことを表している。この理由としては徳光海岸での観測値に誤差が含まれている可能性もある。また、実波浪場と波浪推算で得られた波浪場とに大きな差がある可能性もある。日本海全域を対象とした波浪推算でえられた1月4日6時および1月8日6時の波向きの様子を図-6に示す。この図(a)では北西からの冬季季節風により日本海ではほぼ一様に大陸から日本列島に向かう波浪が推算されている。しかし、1月7日ごろから1月9日ごろにかけて発達した低気圧が日本海上空を通過した。そのためこの期間の日本海の波浪は図-6(b)に示される主波向分布のように、きわめて複雑な状態になってしまっている。さらに徳光海岸近傍では主波向が南で、能登半島による一部の波浪成分の遮蔽も考えられる。このように、今回の波浪推算では複雑な波浪場や海岸地形を正確に再現できるにはグリッドサイズが十分でなく、このために、徳光海岸での推算値に誤差がある可能性も考えられる。

このように、Adjoint法ではデータ同化に用いる観測値は特に重要で、グリッドスケールや対象物理現象などで、物理モデルと整合性の取れていない観測値や、品質

の低い観測値をもちいると、データ同化手法を用いても推算結果の精度がむしろ悪化する可能性がある。

4. おわりに

本研究では波浪推算モデルWAMに、目的変数を開境界上の方向スペクトルとするAdjoint法を組み込んだモデルを用い、このAdjoint法による推算精度の向上について検討を行った。ここでは、このモデルの実用化を意識して、データ同化に用いた観測地点と推算精度を評価する地点を別にした。

その結果、計算対象領域の大きさは推算精度にあまり大きな影響を及ぼさなかった。特に、計算対象領域が大きな場合には、観測地点と開境界上の点との距離が大きくなり、データ同化に用いた観測値による開境界上の方向スペクトルの修正、およびこの方向スペクトルが推算精度を評価する地点の推算値に及ぼす影響がともに小さくなり、データ同化による推算精度向上の効果があまり見られなくなることが分かった。

また、任意の地点の推算結果が、データ同化に用いた観測地点のうち、もっとも近傍の地点での観測値に強く影響を受けていることが分かった。そして、このデータ同化に用いる観測値の品質が推算精度を左右することも確認された。このことから、有義波高や有義波周期だけでなく波浪の方向スペクトルなど、観測で得られる情報の量および質を向上させることが、Adjoint法によるデータ同化で高精度の推算結果を得るのに重要であるといえる。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究助成金基盤研究(B)(2)(課題番号10093329、代表 安田孝志)によって行われました。ここに謝辞を表します。また解析にはECMWFより提供されました再解析気象データを活用しました。

参考文献

- 小林智尚・足立忠行・藤園康弘・安田孝志(2000): データ同化を用いた波浪推算開境界条件の推定法, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 266-270.
- Giering, R., and T. Kaminski (1998): Recipes for adjoint code construction, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 24, No. 4, pp. 437-474.
- Günther, H. *et al.* (1992): The Wamodell Cycle 4 (revised version), Deutsches Klima Rechen Zentrum, Technical Report No. 4, 101 p.
- Hersbach, H. (1998): Application of the adjoint of the WAM model to inverse wave modeling, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. C5, pp. 10, 469-10, 487.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen (1994): Dynamic and Modelling of Ocean Waves, Cambridge Univ. Press, 532 p.