

内海・内湾域を対象とした波浪推算モデルの高精度化に向けた検討

Attempt for Accuracy Improvement of Wave Hindcasting in Inland Sea

橋本典明¹・萩本幸将²・松浦邦明³・松藤絵理子⁴・鈴山勝之⁵

Noriaki HASHIMOTO, Yukimasa HAGIMOTO, Kuniaki MATSUURA
Eriko MATSUFUJI and Katsuyuki SUZUYAMA

Recently, the third generation wave models are widely employed in many countries. However, the examination of their estimation accuracy in an inland sea is not necessarily sufficient due to insufficient wave observation data and difficulty of estimating accurate wind field around the area. In this paper, therefore, we applied a modified WAM to Seto Inland Sea with the wind data estimated for Typhoon 0514 with MM5 and Typhoon Bogus. The estimation accuracy of wind and waves were investigated with the data observed at a few stations. Several energy source functions that had been proposed so far were examined in the modified WAM. In addition, ADWAM (Adjoint WAM) was also applied for the data and its applicability and usefulness were discussed.

1. はじめに

今日、外洋に面した多くの海域で第三世代波浪モデルが適用されその精度が高いことが確認されると共に、海岸・港湾構造物の設計波の算定等の実務に広く利用されている。一方、これまで内海・内湾域では海上風推算が難しく、また波浪観測が少なく検証事例が少ないことから、波浪推算の精度は外洋に比べて低かった。最近、内湾においても局地気象モデルによる海上風推算と第三世代波浪モデルによる波浪推算により高い精度の結果が報告されている（河合ら（2006）、中野ら（2006））が、解析者が用いる海上風の特性や海域に応じて、エネルギー入力・減衰項等のエネルギーソース項の式の組み合わせを変更して用いているのが現状である。本研究でも精度の高い局地風モデルにより求めた海上風を用い、既往の研究で提案されている幾つかのエネルギーソース項を組み合わせて変更し、それらの推算特性を比較したところ、多くの設定で観測値に対して推算値が過大になった。そこで一つの試みとして、データ同化手法を用いてエネルギーソース項に含まれる物理パラメータを修正し、適切なパラメータを再設定することによって、内海・内湾域における暴風時の波浪を精度良く推算する波浪モデルを開発することを目的とした。

2. 解析対象海域と期間および波浪観測

本研究では、瀬戸内海および広島湾を対象海域とし、

- | | | | |
|---|------|----|-----------------------------|
| 1 | フェロー | 工博 | 九州大学大学院教授 |
| 2 | | | 国土交通省 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 |
| 3 | | 水修 | (財)日本気象協会 首都圏支社 |
| 4 | | 学修 | (財)日本気象協会 首都圏支社 |
| 5 | | 工修 | (株)エコー 環境水工部 課長 |

最近の台風 0514, 0610, 0613 号により高波が発生した期間を対象事例とした。この期間に観測された最大有義波高と起時を表-1 に、これらの台風経路を図-1 に示す。岩国では、狭い海域であるにもかかわらず、台風 0514 号来襲時に 1.87 m, 0613 号来襲時に 3.45 m の高波高が観測された。また、刈田でも台風 0514 号来襲時に 3.64 m, 0613 号来襲時に 2.23 m の高波高が観測された。

3. 海上風推算

気象場の推算は、局地気象モデル MM5 により図-1 の領域 1 から 3 を格子間隔 13.5 km, 4.5 km, 1.5 km と nesting により段階的に空間解像度を上げて行い、海上風を 10 分毎に算出した。初期値・境界値は気象庁の領域客観解析データ (RANAL)、海面水温は気象庁のアジア域客観解析データ (Near-goos) を用いた。また、気象場の追算精度を上げるために 3 時間毎にナッジングによる 4 次元データ同化を行い、台風ボーガス投入した。推算手順は、まず粗い格子間隔 (40.5 km) での計算により 3 時間毎のデータを作成し、このデータに台風ボーガス投入して新たに解析値を作成し、その解析値を初期・境界値、あるいは解析値として 4 次元同化を行いながら計算した。

表-1 最大有義波と起時

地 点	台 風	最大有義波		起 時			
		波高 (m)	周期 (s)	年	月	日	時
刈 田	0514	3.64	7.6	2005	9	6	14
	0610	1.83	5.5	2006	8	18	14
	0613	2.23	5.9	2006	9	17	18
岩 国	0514	1.87	5.5	2005	9	6	22
	0610	0.79	3.5	2006	8	19	11
	0613	3.45	5.0	2006	9	18	0

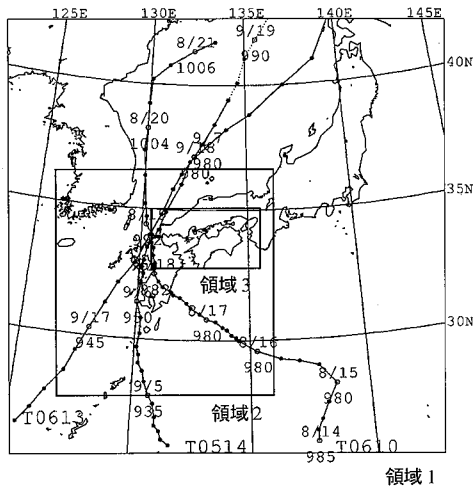


図-1 台風経路図と海上風推算領域 領域1から領域3

表-2 海上風推算結果

事例	荻田	岩国
台風 0514	1.08(0.96)	1.19(0.89)
台風 0610	1.00(0.87)	1.47(0.80)
台風 0613	1.10(0.86)	1.13(0.84)

表の数値は回帰係数で1よりも大きい場合は過大に推算していることを示す。カッコ内の数値は相関係数。

また、気象場の推算期間（積分時間）が長い場合は、データ同化を行っても台風中心位置が時間とともにベストトラックから大きくずれる場合がある。そこで、進路誤差を低減するために12時間毎に15時間積分計算を実施して結果を接続した（はじめの3時間はスピニングアップのための予備計算とした）。なお、領域3の気象場の推算は台風接近時の48時間について行った。

風観測は、この期間、荻田および岩国で海上風に近い風が観測されている。そこで、この2地点における検証を実施した。推算結果を表-2、図-3（上段）に示す。回帰係数は荻田では各事例ともほぼ1、岩国では各事例とも1をやや上回るが、相関係数は両地点で0.8以上と高く、時間変化の傾向も概ね再現した。

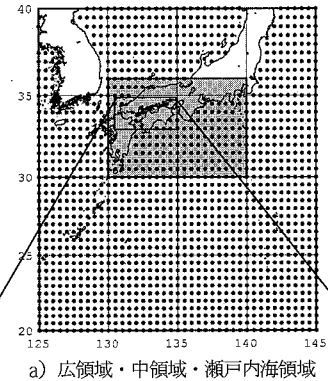
4. 波浪推算

波浪場の推算は、加藤ら（2007）が改良したWAMを用いた。これは、浅海域では水深に起因する砕波を考慮する必要があるため、WAM Cycle 4のエネルギーソース項（風から波へのエネルギー輸送項、白波砕波によるエネルギー消散項、非線形相互作用、海底摩擦によるエネルギー消散項）にBattejes and Janssen（1978）のboreモデルによる地形性砕波項を追加したものである。

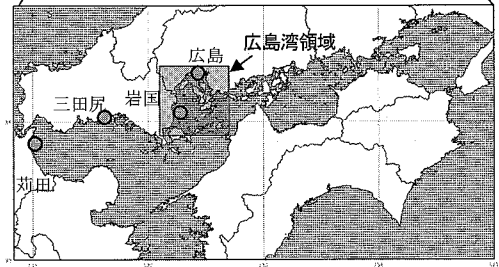
解析領域は、図-2に示すように、広領域（格子間隔30分）、中領域（格子間隔10分）、瀬戸内海領域（格子

表-3 計算条件の組合せ

方法	風から波へのエネルギー輸送	白波砕波によるエネルギー消散
方法①	Janssen(1989, 1991)	Janssen(1992)
方法②	Janssenの方法を用いるが U^* は波齢を考慮せずWuの式によった	Janssen(1992)
方法③	Komen et al. (1984)	Komen et al. (1984)
方法④	本田・光易(1982)とHsiao, Shemdin(1983)	鈴木・磯崎(1994)



a) 広領域・中領域・瀬戸内海領域



b) 瀬戸内海領域と広島湾領域

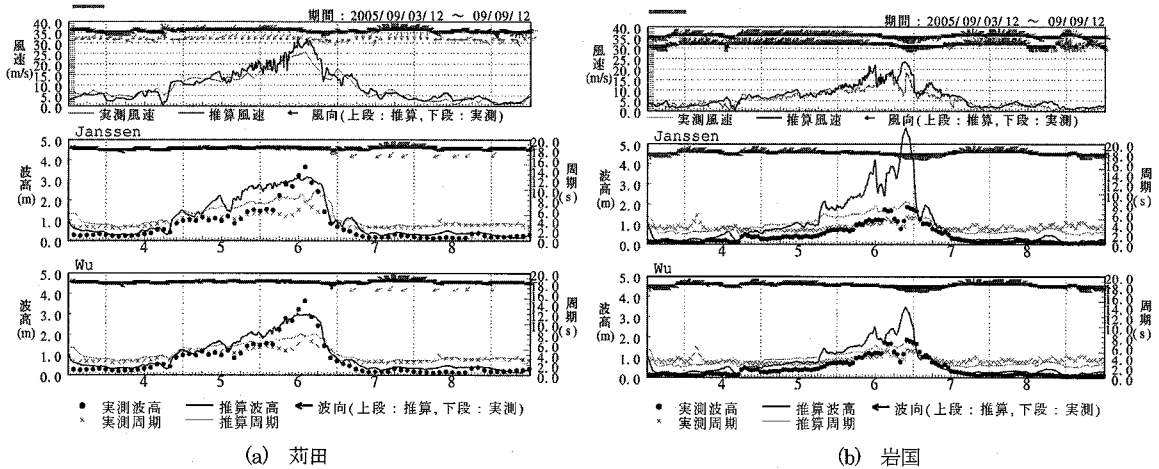
図-2 解析対象領域

間隔1分）、広島湾領域（格子間隔30秒）とし、nestingにより段階的に空間解像度を上げて波浪場の計算を行った。

なお、広領域と中領域は深海波、瀬戸内海領域と広島湾領域は浅海波の計算を行った。広領域の波浪推算には気象庁RANALを時空間内挿した海上風を、中領域の波浪推算には図-1の領域2の海上風を、瀬戸内海領域および広島湾領域の波浪推算には台風接近時は図-1の領域3、それ以外の時間帯は図-1の領域2の海上風を用いた。

局地気象モデルMM5により求めた海上風を入力として、表-3に示す方法①から④の、風から波へのエネルギー輸送項と白波砕波によるエネルギー消散項の組み合わせによる波浪推算特性を比較・検討した。

荻田では港湾局のNOWPHAS（全国港湾海洋波浪情報網）により波浪を常時観測している。また台風0514号、0610号、0613号来襲時は岩国において、台風0610



(a) 荻田 (b) 岩国
海上風(上段)と波浪推算結果の相違(中段:方法①, 下段:方法②)

図-3 海上風と波浪の経時変化図 (a: 荻田, b: 岩国)

表-4(1) 瀬戸内海領域の観測地点における波浪検証結果
a) 荻田 (水深 9.0 m)

入力項	T0514	T0610	T0613
Observation	3.64	1.83	2.23
方法①	3.18 1.23(0.93)	2.77 1.39(0.93)	3.21 1.29(0.96)
方法②	3.04 1.08(0.97)	2.16 1.10(0.93)	2.98 1.10(0.93)
方法③	3.00 1.21(0.92)	2.63 1.37(0.94)	2.97 1.23(0.96)
方法④	2.96 1.08(0.95)	2.25 1.18(0.94)	2.91 1.10(0.96)

b) 三田尻 (水深 18.2 m)

入力項	T0514	T0610	T0613
Observation	観測なし	2.49	4.12
方法①	7.38	4.12 1.78(0.92)	7.43 1.40(0.90)
方法②	4.71	2.84 1.36(0.94)	4.33 0.91(0.94)
方法③	5.93	3.71 1.70(0.93)	5.68 1.18(0.95)
方法④	5.40	3.33 1.54(0.90)	5.51 1.13(0.95)

上段: 最大有義波高、下段: 回帰係数 (相関係数)

号, 0613 号来襲時は三田尻, 広島において波浪観測を実施した。

これらの地点において, 波浪推算精度を検討した。図-3 は荻田, 岩国における海上風と波浪の経時変化図である。波浪推算値は, 荻田では方法①よりも方法②を用いた場合に観測値とよく一致したが, 岩国では方法①と方法②のいずれの入力項を用いても過大に推算した。表-4 は観測地点における最大有義波高, 回帰係数および相関係数を示す。相関係数は, 荻田では 3 事例とも 0.9 以上と高く, 岩国でも台風 0514 号, 0613 号の事例で 0.9 程度, 0610 号の事例で 0.8 以上と高いが, 回帰係数は両地点で 1 を超え, 特に岩国では方法①と④では

表-4(2) 広島湾領域の観測地点における波浪検証結果
a) 岩国 (水深 27.5 m)

入力項	T0514	T0610	T0613
Observation	1.87	0.79	3.45
方法①	5.82 2.39(0.90)	2.54 2.73(0.84)	4.44 1.38(0.93)
方法②	3.49 1.56(0.90)	1.64 1.98(0.84)	2.57 0.89(0.92)
方法③	3.85 1.90(0.92)	2.08 2.50(0.85)	3.09 1.10(0.92)
方法④	4.65 2.01(0.91)	2.20 2.36(0.83)	3.64 1.18(0.94)

b) 広島 (水深 14.9 m)

入力項	T0514	T0610	T0613
Observation	観測なし	0.38	1.47
方法①	4.34	1.22 2.85(0.18)	3.24 1.79(0.90)
方法②	2.69	1.02 2.19(0.22)	1.94 1.19(0.92)
方法③	2.83	1.04 2.53(0.25)	2.23 1.41(0.91)
方法④	3.53	1.06 2.38(0.19)	2.64 1.50(0.90)

上段: 最大有義波高、下段: 回帰係数 (相関係数)

2 を超えている。三田尻, 広島でも, 回帰係数が 1 を大きく超える事例が多く, 特に方法①による台風 0514 号, 0613 号の事例でこれらの海域としては過大な波高を推算した。

事例, 海域, 方法により回帰係数が異なっており, 推算特性に差があるが, 多くの場合に回帰係数が 1 を大きく上回る (過剰に発達する) 傾向がある。ただし, 荻田で方法②による推算値と観測値の一致度が高い。これは, 過大に推算された波浪が, 観測地点の水深が 9 m と浅いために砕波によって減衰する効果も含まれていると考えられる。

図-4 は台風接近時の広島湾領域の海上風と方法①に

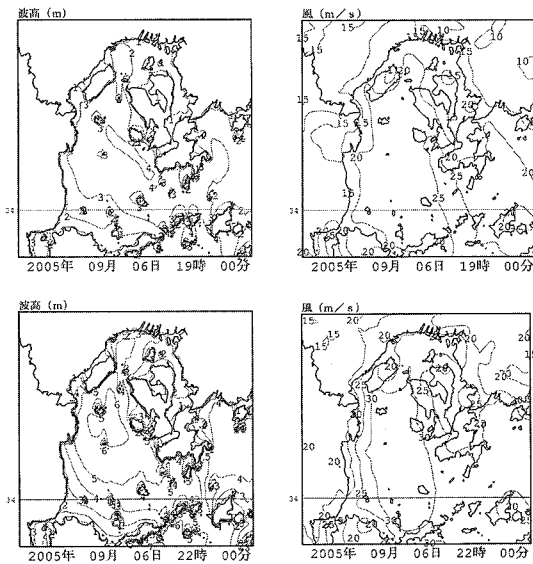


図-4 海上風と方法①による波浪の発達の時間変化

よる波高の分布で、波浪の異常発達を顕著に示した例である。波高は19時の時点でおおむね3m（高いところで一部4m）であるが、風速25から30m/sの強風により、3時間後の22時にはおおむね5m（高いところでは6m）に達し、強風により急速に過剰な発達をしていることが分かる。

5. ADWAM (Adjoint WAM) による検討

内湾域の波浪推算において、誤差が生じる原因には幾つかのものが考えられるが、本事例では境界からの影響が小さい内湾であること、波浪は静穏な状況から急速に過剰に発達したことから、事前に推算された初期値や境界値の影響であるとは考えにくい。また外力となる海上風には誤差があると考えられるが、精度検証の結果、ほぼ適切に推算されていた。したがって、局地気象モデルで推算された海上風を入力とする条件下で、波浪の発達・減衰に関する種々のパラメータを再設定し直す必要があると考えられる。特に、浅海域におけるエネルギー散逸項には未解明点が多く、観測データや実験データとの整合により関数形が決められている。したがって、このような場合にはデータ同化手法を用いてエネルギーソース項に含まれる物理パラメータを修正し、適切なパラメータを再設定すれば、内海・内湾域における暴風時の波浪を精度良く推算できるようになると考えられる。

そこで、Hersbach (1998) の ADWAM (Adjoint WAM) により、波浪観測値を波浪推算モデル (図-2 の広島湾領域) に同化し、波浪の発達・減衰に関する適切なパラメータを再検討し、推算値が観測値に一致する

表-5 パラメータ同化による変数の変化

No	パラメータ	初期値	推定値	倍率
1	Jonswap 海底摩擦	0.0380	0.0383	1.0079
2	Depth 水深	各格子	各格子	0.9794
3	Betamax 波浪発達率	1.2000	0.5333	0.4444
4	Zalp 発達曲線の shift	0.0110	0.0100	0.9106
5	Nlref 非線形輸送効率	1.0	1.0540	1.0540
6	cref 白波砕波	9.4×10^{-5}	11.6×10^{-5}	1.2354
7	dref 白波砕波	0.5000	0.5182	1.0364
8	Powref 白波砕波	2.0	2.8798	1.4399

ようにモデルを修正した。同化変数としたパラメータは表-5 に示す橋本・松浦 (2004) と同様のパラメータとした。

Adjoint 法は、非線形性を含むモデルの同化変数を最尤推定量として推定することができる。このため、気象の分野では Adjoint 法により基礎方程式の時間発展を拘束条件として、次式で表される評価関数を最小にするように同化変数を推定する。

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)' B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(Hx - y^o)' R^{-1}(Hx - y^o) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、右辺第1項は背景誤差項、第2項は観測誤差項である。 x は n 個の成分からなる同化変数ベクトル、 x^b はその第一推定値からなるベクトル、 y^o はその時刻の m 個の観測値からなるベクトルである。演算子 H は同化変数を観測変数に変換する観測演算子である。行列 B と R は、それぞれ背景誤差共分散行列と観測誤差共分散行列と呼ばれ、第一推定値の誤差を Δx^b 、観測誤差を Δy^o すると、次式で定義される。

$$B = \langle \Delta x^b (\Delta x^b)' \rangle, \quad R = \langle \Delta y^o (\Delta y^o)' \rangle \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\langle \rangle$ は期待値を表す。また、上付き添字 t は行列またはベクトルの転置を表す。誤差共分散行列の対角成分は誤差分散に等しく、非対角成分は誤差相関係数に比例する。

一般に、評価関数を最小にする x の値を解析的に求めることは困難で、数値的に求めなければならない。降下法を用いる場合には、評価関数の勾配を計算する必要がある。評価関数の勾配は、

$$\nabla_x J = B^{-1}(x - x^b) + H' R^{-1}(Hx - y^o) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。 $\nabla_x J$ を計算するためには、観測演算子の転置行列 H' が必要である。これは、接線形観測演算子

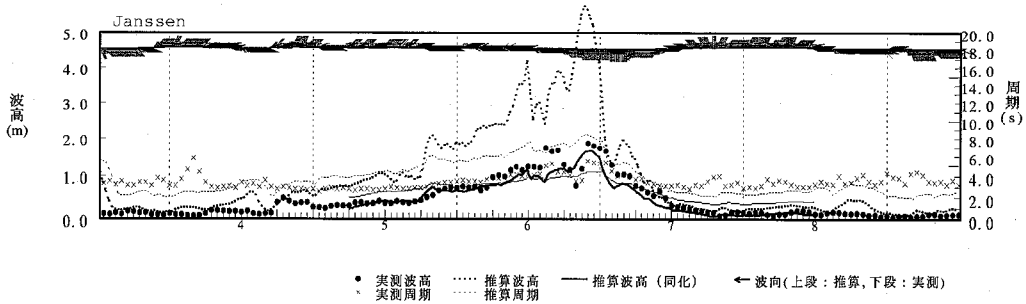


図-5 データ同化の結果 (岩国, 台風0514号)

H のAdjoint演算子 H^* に相当する。実際には、 $\nabla_x J$ は数値モデルのソースコードからAdjointコードを作成し、アジョイントランを実行することによって求めることができる。本研究では、Adjointコードの作成にはAMC (Adjoint Model Compiler)を用いた。また、評価関数の最小化 (非線形最適化)には降下法及び準ニュートン法 (LBFGS 公式)を用いた。

台風0514号時のデータ同化の結果を表-5、図-5に示す。同化後は観測値とほぼ一致した。この時のパラメータは、発達に関するパラメータが半減する一方、減衰に関するパラメータがやや大きくなり、定性的には適切なパラメータが推定できたものと考えられる。

そこで、0610、0613号についてもADWAMによる観測値の同化計算を実施したが、計算は収束せず、最適解は得られなかった。これは、非線形エネルギー輸送項の調整係数や海底摩擦によるエネルギー消散項の海底摩擦係数のように調整比例係数と、風から波へのエネルギー輸送に関するパラメータや白波砕波によるエネルギー消散に関するパラメータのように調整指数があり、特に調整指数はわずかな変化により推算結果が大幅に変化するため、これを逆推定する場合には計算が不安定になりやすく最適解を得にくい可能性があるためであると推察される。このように特性の異なるパラメータを混在させて同時にデータ同化する際には、更なる検討が必要であることが示唆された。

6. おわりに

本研究をまとめると以下のとおりである。

- ① 台風0514号、0610号、0613号に関して瀬戸内海領域、広島湾領域の海上風、波浪を推算した。
- ② 台風ボーガスを投入した局地気象モデルMM5による海上風推算値は観測値と良い一致を示した。
- ③ 浅海域に対応したWAMにより波浪推算を実施した結果、多くの場合で波高を過大に評価した。
- ④ ADWAMにより、波浪観測値を波浪推算モデルに

同化し、波浪の発達・減衰に関して、適切なパラメータを再設定した結果、台風0514号の事例では、推算値が観測値に一致するようにモデルが修正された。

当該海域において精度の高い実用的な波浪推算モデルを開発するためには、さらに多くの事例でパラメータの推定を行う必要がある。今後、最適解を得るための同化変数の設定法や計算手法を工夫して行く予定である。

また、沿岸波浪観測の精度を検証する際、浅海域における波浪観測データのゼロクロス解析では、特に低波高の場合に周期の精度が悪くなる。したがって、今後は波浪推算値との比較・検討には、ゼロクロス解析値ではなく、波浪観測データから求められるエネルギー換算波高とモーメント周期、スペクトルピーク周波数等を用いて検討を進める予定である。

参考文献

- 加藤史朗・福濱方哉・橋本典明・三嶋宣明・松藤絵理子・宇都宮好博(2007):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, 2007, pp. 225-230.
- 河合弘泰・中野俊夫・川口浩二・松浦邦明(2006):IAUデータ同化手法のメソ気象モデルへの導入と台風9918号の海上風・波浪・高潮の追算, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 381-385.
- 中野俊夫・大澤輝夫・吉野 純・益子 渉・河合弘泰・松浦邦明(2006):台風ボーガスの高度化による数値予報モデルを用いた海上風推算手法の精度向上, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1286-1290.
- 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評価関数に関する検討, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 206-210.
- Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M. (1978):Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 569-587.
- Hans Hersbach (1998):The adjoint of the WAM model, KNMI-WR, pp. 7-9, 15.