
報 告

沿岸波浪モデルの統計的検証と改善について*

吉田 久美・三浦 大輔・高野 洋雄**

要 旨

気象庁で運用している沿岸波浪モデルについて、日本周辺の海域における平均的な予測誤差やその季節変化などを把握するため、衛星観測データを用いて、モデルで計算された有義波高予測値の統計的検証を行った。

検証の結果、有義波高の予測誤差は概ね波高の 20～30% 程度であることがわかった。また、冬期にはモデルが波高を過小に予測しやすいなど、季節による違いも明らかになった。冬季の負バイアスは、波浪モデルのエネルギー入力過程を見直すことによって改善できた。見直したモデルは 2011 年 4 月に現業に導入し、冬季の波高予測が改善されている。

波浪モデルの予測精度は、データ同化の導入によって更に改善されることを確認した。2012 年度には、現業の波浪モデルにデータ同化を導入する予定である。

1. はじめに

2011 年 4 月に試行を開始し、2012 年 3 月から本運用となった沿岸防災解説業務では、波浪警報・注意報及び波浪予報の発表に資する解説資料を本庁海洋気象情報室及び海洋气象台から提供することとしている。解説資料の詳細については竹内ほか (2012) や高野 (2012) で述べられているが、解説資料には基本的に波浪の実況、波浪ガイダンス (波浪モデルの予測) と実況のずれの解説、ガイダンスの修正の考え方等を記述することになっている。この解説資料の作成と予測値の修正には、

波浪モデルの予測値が持つ特性を海域ごとに把握しておく必要がある。したがって、まず周辺の海域を含めた全体的な特性を把握した上で、各沿岸海域の特性を把握する。

気象庁では、現在、全球波浪モデル (75° S～75° N, 格子間隔 0.5 度) と沿岸波浪モデル (20° N～50° N, 120° E～150° E, 格子間隔 0.05 度) を運用している。2 種類の波浪モデルの主な違いは計算領域と格子間隔で、基本的な部分はほぼ共通であり、MRI-III と呼ばれる気象研究所で開発、改良が行われた第 3 世代波浪モデル

* Statistical Validation and Improvement of the Coastal Wave Model

** Kumi Yoshita, Daisuke Miura, Nadao Kohno

Office of Marine Prediction, Global Environment and Marine Department (地球環境・海洋部海洋気象情報室)

(Ueno and Kohno, 2004) である。1998 年に MRI-III が現業に導入された後、2007 年 5 月に物理過程の改善、水平解像度の向上及び 2 次元スペクトルの方向分解能を含む全面的な更新を行うことによって精度の向上を図り、その後もパラメータの最適化などの改良を重ねている (杉本, 2007; Tauchi *et al.*, 2007)。本稿では、特に日本周辺の波浪予測を計算する沿岸波浪モデルを主な対象とする。

沿岸波浪モデルの予測精度については、これまでに杉本 (2007) や峯松 (2009) で報告されているが、これらの報告は沿岸波浪計の観測値との比較など地点や期間に限られている。人工衛星に搭載された海面高度計の観測による波高データを利用すれば、特定の地点だけでなく、沿岸波浪モデルの計算領域の全域を対象とした検証が可能である。今回、沿岸波浪モデルの日本周辺の海域における予測誤差やその季節変化など全体的な特性を把握することを目的として、沿岸波浪モデルの有義波高予測値の統計的検証を行った。今回の検証では、衛星による波高の観測データを用いた基本的な統計調査を行うとともに、最初に述べた沿岸防災解説業務と予報作業で参考にできるように、波浪警報及び注意報の発表基準を考慮した波高階級の検証結果も示した。また、今回の検証で明らかになった波浪モデルの冬季の負バイアスを改善するために、モデルのエネルギー入力過程を見直したので、その結果を報告する。このエネルギーの入力過程の見直しは、2011 年 4 月から現業モデルにも適用されている。

更に、2012 年度には、波浪モデルにデータ同化を導入する予定であり、これによる精度の向上が期待される。ここでは、データ同化による波高予測へのインパクトについて調べた結果を報告する。

まず、第 2 章で検証に使用したデータと検証方法について述べ、第 3 章に検証結果を示す。第 4 章では検証によって明らかになった沿岸波浪モデルの冬季の負バイアスの改善について述べる。第 5 章でデータ同化システムの検証結果を紹介し、第 6 章でまとめを記述する。

2. 検証方法

検証には、気象庁で運用している沿岸波浪モデルの 2009 年 4 月から 2011 年 3 月までの 2 年間の波高予測値 (以下、モデル波高) を用いた。沿岸波浪モデルの計算は、00, 06, 12, 18UTC を初期時刻として、1 日 4 回、6 時間ごとに実行され、3 時間ごとに 84 時間先までの予測値を出力している。検証は、予測時間 (以下、FT) ごとに行った。

モデル波高と比較する観測データには、Jason-1 衛星及び Jason-2 衛星に搭載されている海面高度計による有義波高観測値 (以下、衛星波高) を用いた。検証に用いた準確定データ (IGDR) の有義波高の精度は、どちらの衛星についても、10% 又は 0.4m の大きい方とされている (ただし JASON-2 については設計値, AVISO and PODAAC User Handbook (2008), OSTM/Jason-2 Products Handbook (2009))。1 秒間隔の観測データを 5 秒 (水平距離にして約 30km) ごとに間引いて検証に使用した。

検証は、対象とする時刻のモデル GPV と、その前後 30 分以内の衛星データを比較した。個々の衛星データについて、衛星観測位置の周囲 4 格子のモデル GPV から、単純内挿によって衛星観測位置におけるモデル波高を計算し、衛星波高との比較を行った。検証の対象とした領域は、沿岸波浪モデルの計算領域である $20^{\circ} \text{N} \sim 50^{\circ} \text{N}$, $120^{\circ} \text{E} \sim 150^{\circ} \text{E}$ である。

3. 検証結果

3.1 通年の検証

まず、モデル波高の通年の特性を把握するため、対象の全期間である 2 年間を通した検証を行った。検証に用いた衛星データの数は 39,673 個で、その波高の平均は 1.9m である。衛星データの分布には、空間的にも時間的にも大きな偏りはなかった。

第 1 図に衛星波高と FT=0 のモデル波高の散布図及びヒストグラムの比較を示す。散布図からは目立ったバイアスはみられず、多少ばらつきがみられるものの、衛星波高が 7m 以下では概ね対応がよいことがわかる。一方、衛星波高が 7m 以上では、モデル波高の方が低い傾向がみられる。ヒ

ストグラムでみると、度数が最大となる波高に違いはないものの、分布には若干違いがみられる。モードより低波高側でモデルの方が度数が大きく、逆に高波高側 +2.0m までの範囲でモデルの方が度数が小さくなっている。

第 1 表に FT=0 のモデル波高の検証結果を示す。全データを用いた検証結果ではバイアス（モデル波高 - 衛星波高）は -0.1m であり、モデル波

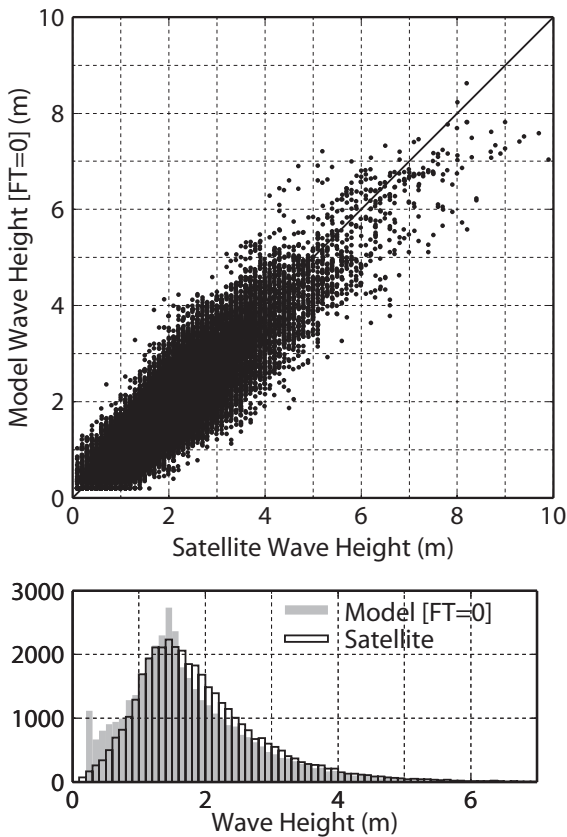
高は衛星波高よりも低い傾向があることがわかる。RMSE は 0.5m, SI (スキャターインデックス) は 26%, 相関係数は 0.89 であった。なお, SI は波浪モデルの精度検証でよく使用される指標で、以下の式で定義され、観測波高の平均値で規格化した誤差に相当する。

$$SI(\%) = \frac{\sqrt{\sum_i (Y_i - X_i)^2 / N}}{\bar{X}} \times 100 = \frac{RMSE}{\bar{X}} \times 100$$

ここで、 X 及び Y はそれぞれ観測波高及び予測波高、 N はデータ数である。SI の値が小さいほど誤差が小さいことを示す。

モデル予測精度の予測時間 FT への依存性をみるため、第 2 図に FT=0 ~ 72 における 6 時間ごとの検証結果を示す。バイアスは FT=72 までほぼ一定である。RMSE, SI 及び相関係数は、FT=24 まではほとんど変わらず、FT=24 以降で徐々に精度が悪くなる。ただし、その変化はわずかである。現業における波浪予測の主な対象期間である翌日までの範囲では、どの統計量についても FT=0 の値とほぼ変わらないことから、以降では FT=0 のモデル波高を用いた検証結果を報告する。

観測波高を 1m 幅で階級分けし、それぞれの階級で検証を行った結果を第 3 図に示す。波高に対する誤差の割合を示す量である SI は、波高が大きくなるほど小さくなるが、バイアスや RMSE の値は波高が大きいのほど大きくなる。前述のように、全データを用いて検証した場合の RMSE は 0.5m だが、モデルの予測値を利用する際は、波



第 1 図 衛星波高とモデル波高の比較
上図：散布図，下図：ヒストグラム。

第 1 表 FT=0 及び FT=36 のモデル波高の検証結果と検証に使用した衛星観測データの数

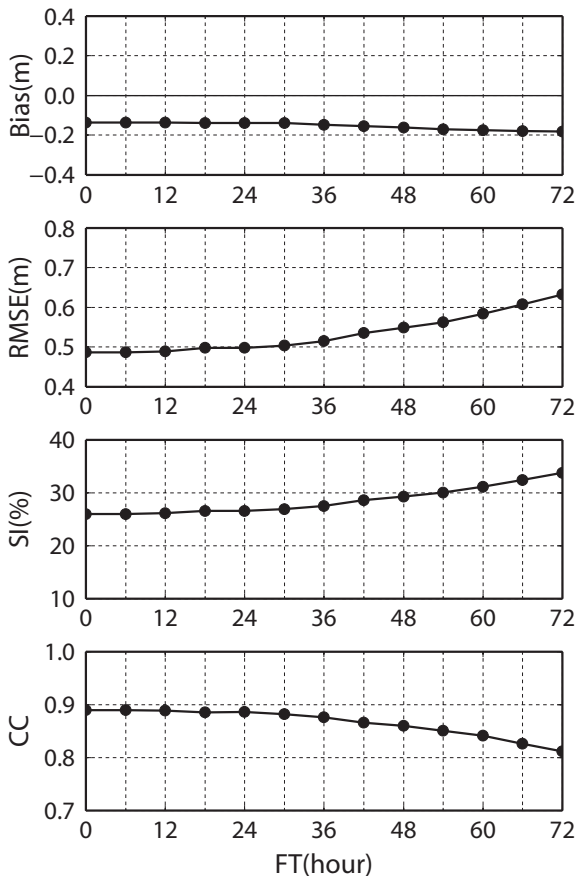
	全データ	3m 未満		3m 以上 6m 未満		6m 以上	
データ数	39673	34778		4685		210	
衛星波高の平均 (m)	1.9	1.6		3.7		6.9	
	FT=0	FT=0	FT=36	FT=0	FT=36	FT=0	FT=36
バイアス (m)	-0.1	-0.1	-0.1	-0.4	-0.4	-0.8	-0.8
RMSE (m)	0.5	0.4	0.5	0.7	0.8	1.2	1.2
SI (%)	26	27	28	20	22	17	17
相関係数	0.89	-	-	-	-	-	-

高が大きいほど予測誤差が大きくなることに留意する必要がある。

現業でのモデル波高の誤差の程度として使用できるように、多くの海域で波浪注意報、警報の発表基準となっている波高 3m 及び 6m をしきい値として、波高階級ごとに検証を行った結果を第 1 表にまとめた¹。警報発表基準に相当する波高 6m 以上の場合は、バイアスが -0.8m, RMSE が 1.2m となる。第 1 表には FT=36 のモデル予測値の検証結果も示したが、FT=0 と大きく変わらないことがわかる。

3.2 月別の検証

季節による予測精度の変化をみるため、月別に

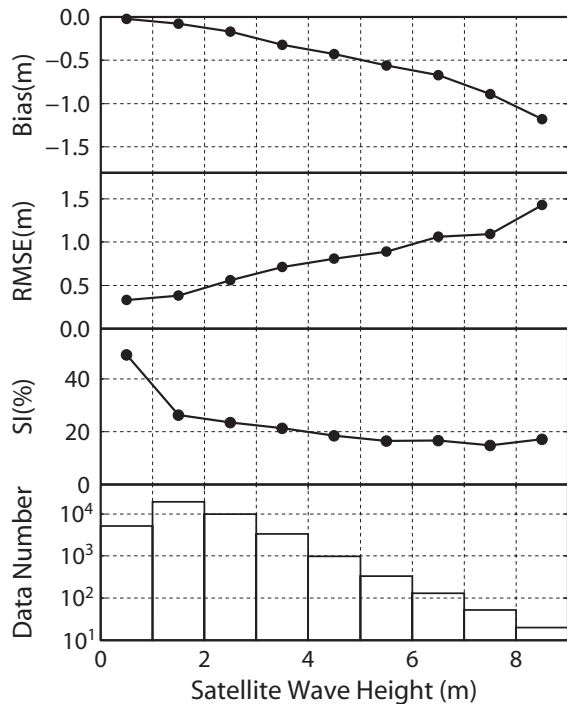


第 2 図 モデル波高の衛星波高に対するバイアス、RMSE、SI 及び相関係数 (CC) の FT による変化

検証を行った結果を第 4 図に示す。第 3.1 節の通年の検証では、モデル波高は負のバイアスをもっていたが、月別にみると夏季の 6～8 月には正バイアスとなることがわかる。また、冬季には負バイアスが大きく、12 月は -0.3m となる。

そのほかの統計量も季節によって変化する。RMSE は 0.3m から 0.6m の間で変動し、冬季に大きく、夏季に小さい傾向がある。逆に、SI は夏季の方が大きい。

第 4 図の衛星波高の月平均のグラフからわかるように、日本周辺の海域では、平均として冬季に波が高く、夏季に低い。平均波高が高い冬季にバイアスの絶対値が大きく、RMSE も大きくなっている。通年の検証で波高が大きいほど予測誤差が

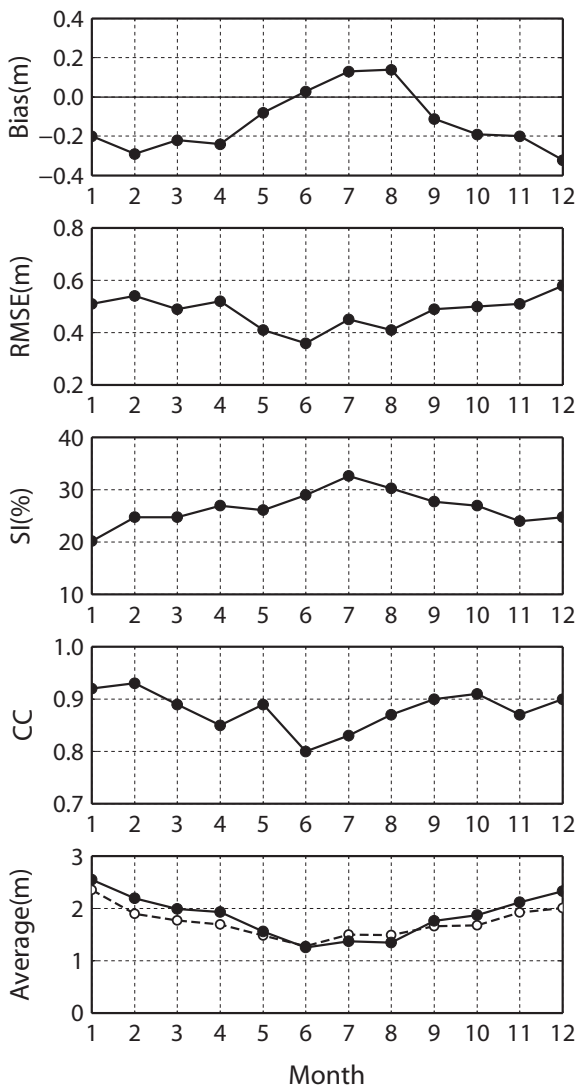


第 3 図 FT=0 における波高別の検証結果

横軸は衛星波高を示す。上から順にバイアス、RMSE、SI、データ数。

¹ 2011 年 4 月に波浪モデルを更新しているのので、利用の際には留意する必要がある。2011 年 4 月のモデル更新後は、主に冬季の負バイアスが改善されている。

大きいことを示したが、季節変化でも平均波高に比例して冬季の方が予測誤差が大きくなる。また、波高に対する誤差の割合を示すSIは、波高が低い夏季の方が大きく、相関係数も夏季の方が小さい。日本周辺では、夏季は台風接近時を除くと平均的に海がおだやかである。一般に低い波は時間スケールが短く、モデルではそのような変動を追従できないため、夏季には相関が悪くなると考えられる。

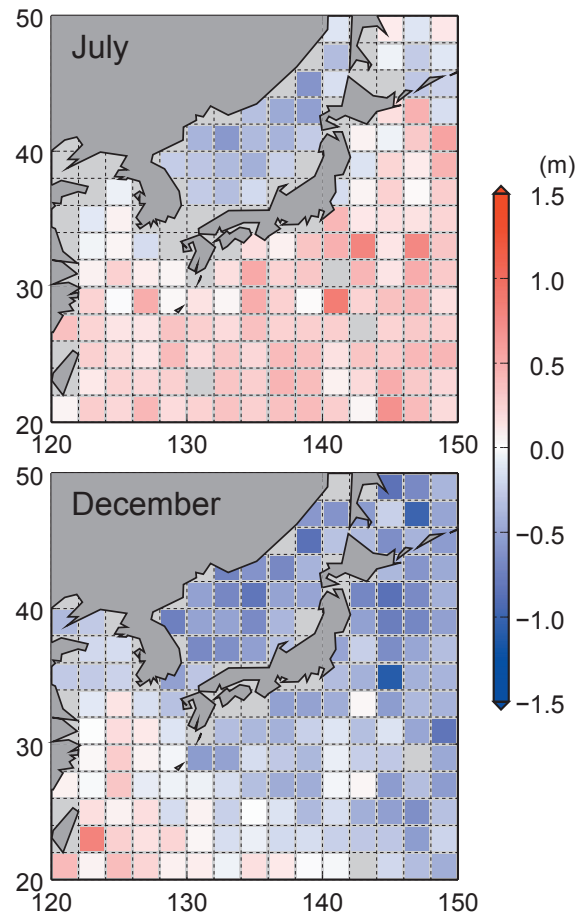


第4図 月別の検証結果

上から順にバイアス、RMSE、SI、相関係数(CC)、衛星波高(黒丸+実線)及びモデル波高(白丸+破線)の平均。

3.3 バイアスについての考察

第3.2節で述べたバイアスの季節による違いについて調べるため、正バイアスとなる7月と負バイアスとなる12月について、2度格子ごとにバイアスを計算した結果を第5図に示す。バイアスは、季節だけでなく、海域によっても違いがあることがわかる。バイアスが正となる7月には、日本海を除いた海域で概ね正バイアスである。一方で、負バイアスが大きい12月は、沖縄の南から東シナ海にかけての海域を除き、ほとんどの海域



第5図 衛星波高に対するモデル波高のバイアスの分布

上図：7月、下図：12月。

で負バイアスとなっている。0.5 ~ 1m の負バイアスを示す格子が多い。

波浪モデルによる波高予測の誤差には波浪モデルに与えた全球大気モデル (GSM) の海上風の誤差が含まれるため、波浪モデルの誤差の評価には、海上風の誤差を考慮する必要がある。波浪モデルに入力した海上風の誤差を把握するため、GSM の海上風と Metop-A 衛星搭載のマイクロ波散乱計 ASCAT から算出した海上風との比較を行った。比較する ASCAT 海上風は、数値予報課のデコードデータを用いた。GSM の海上風の GPV を波浪モデルの格子に内挿し、ASCAT データの観測位置の周囲 4 格子の単純内挿で計算した値を ASCAT の観測値と比較した。なお、ASCAT 海上風のうち風速 15m/s 未満のデータは、現業の全球解析のデータ同化に利用されている (高橋 2010)。また、Metop-A 衛星は太陽同期軌道をとるため、観測データの空間分布に大きな偏りがあるが、今回の検証ではデータの分布の偏りを考慮していない。

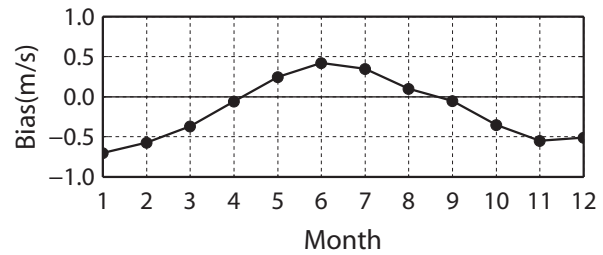
沿岸波浪モデルの計算領域を対象として、2009 年 4 月から 2011 年 3 月までの 2 年間のデータを用いて風速の比較を行った結果を第 2 表に示す。FT=0 では、バイアスは -0.1m/s、RMSE は 1.5m/s となった。第 6 図には、月別に求めた FT=24 の海上風速のバイアスの変化を示す。波高予測値と同様に、夏季に正バイアス、冬季に負バイアスを示すことがわかる。バイアスの空間分布をみると (図省略)、12 月は日本周辺で負バイアスとなっており、波高の結果と概ね一致した。したがって、冬季については、波浪モデルに入力する海上風が実況よりも弱めであるために、波高予測値が実況より低くなっていると考えられる。

海上風の誤差のほかに、峯松 (2009) でも述べられているように、現業モデルでは静穏な状態からの急激な波の立ち上がりが遅れる傾向があることが波高予測値の負バイアスの原因の 1 つとして考えられる。冬季には、日本周辺では寒気移流による風浪の場になることが多く、風浪の発達が波高予測に大きく影響するため、負バイアスが大きくなると考えられる。

一方、第 5 図の 7 月の正バイアスは、太平洋側

第 2 表 波浪モデルに入力している海上風と ASCAT 観測値の風速の比較結果

	FT=0	FT=24	FT=36
バイアス (m/s)	-0.1	-0.2	-0.2
RMSE (m/s)	1.5	1.9	2.0
相関係数	0.90	0.85	0.82
ASCAT 海上風平均風速 (m/s)	7.2		



第 6 図 月別に求めた ASCAT 海上風に対する FT=24 のモデル海上風のバイアス

で顕著となっている。夏季には、太平洋高気圧の縁辺で吹く風によって、日本の南の海域で吹続時間が長く吹走距離が長い風浪が発達しやすい。杉本 (2007) に述べられているように、現業モデルは吹走距離が長い場合に風浪を飽和させず、発達させ続けやすいという特性をもつため、太平洋高気圧の縁辺ではモデルの予測値が実況より高めになりやすい。

夏季には、海上風のバイアスも正の値となる。ただし、ピークは 6 月で、7 月から 8 月にみられる波高の正バイアスのピークとずれている。バイアスの空間分布も波高と海上風で対応が悪く、今回の結果からは夏季における波高の誤差と海上風の誤差の関係はわからなかった。

4. 冬季の負バイアスの改善

4.1 エネルギー入力過程の見直し

今回の検証の結果、沿岸波浪モデルによって予想される波高は平均として負バイアスをもち、特に冬季に顕著であることがわかった。入力する海上風が実況よりも弱めであることが負バイアスの大きな原因の 1 つであるが、風浪の立ち上がりの遅れによる負バイアスは、波浪モデルにおけるエネ

ルギー入力過程を見直すことによって改善できる可能性がある。

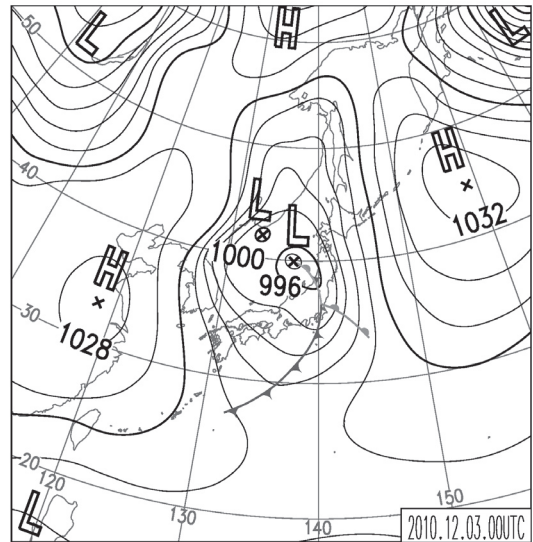
2008年7月から2011年4月のモデル更新まで運用していた波浪モデル（以下、0807モデル）では、現実的なタイムステップで波浪の発達を表現できるように、一定の風速（3.5m/s）に対応した JONSWAP スペクトル²を用いて発達を補正していた（Ueno and Kohno, 2004; 気象庁ほか, 2008）。今回は、この補正をモデルに入力する海上風の風速に応じたスペクトルに変え、風速が大きい場合の風浪を発達しやすくすることによって、発達の遅れの改善を試みた。

4.2 新モデルの検証

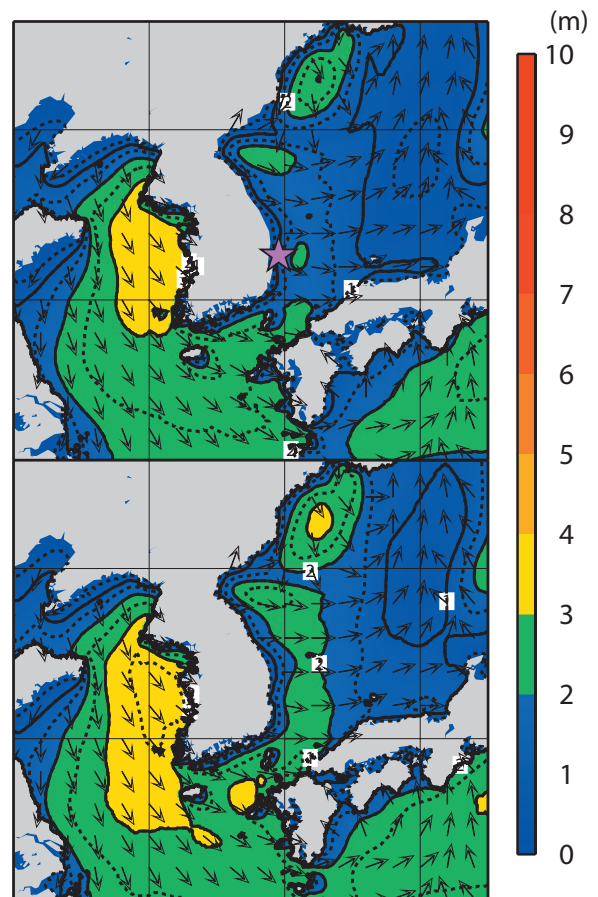
今回、第4.1節で述べた波浪の発達の遅れのほかに、エネルギー入力項の風向依存性（特に逆風時の減衰）や計算の高速化、安定性についても見直しを行った。これらの見直しを行ったモデル（以下、新モデル）で実験を行い、計算結果を0807モデルと比較した。

例として、2010年12月3日の事例の比較結果を紹介する。第7図に3日00UTCの地上天気図を示す。低気圧が日本海を進み、風浪が発達する場であった。第8図に2日18UTCを初期時刻とした0807モデルと新モデルによる3日00UTCの波高予測図を示す。ウラジオストク沖では、0807モデルの波高予測値は2m台であるが、新モデルは高いところで3mを予想している。その他の海域でも、黄海で新モデルが3.5m以上を予想しているなど、全体的に新モデルの方が高い波高を予想していることがわかる。

第9図には、韓国が設置している固定ブイ No. 22106（第8図に位置を示す）において12月2日12UTCから3日12UTCの期間に観測された波高及び風向・風速と、波浪モデルで計算されたFT=0の波高・波向、波浪モデルに入力した風向・風速を比較した結果を示す。波浪モデルに入力した海上風は0807モデルと新モデルで同じである。風向・風速の比較では、波浪モデルに入力した海上風の時間変化は観測値とよくあっている。一方、



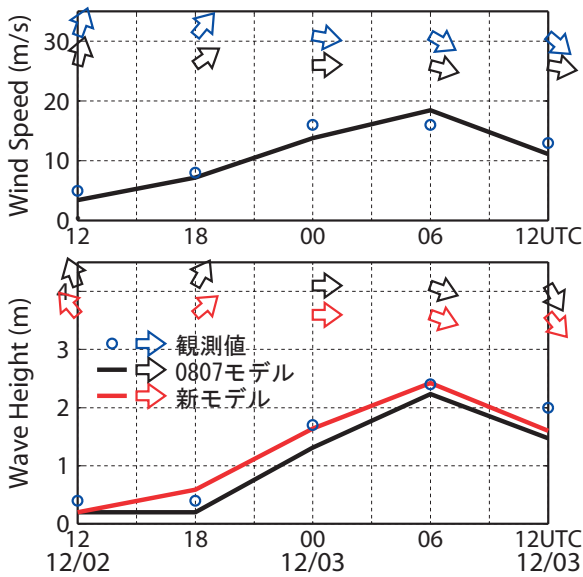
第7図 2010年12月3日00UTCの地上天気図



第8図 2010年12月3日00UTCを対象とした波浪予測図 (FT=6)

上図は0807モデル、下図は新モデルによる予測。上図の星印は、韓国ブイ22106の位置を示す。

² 発達過程にある風浪の標準的なスペクトルで、風浪を表現するのによく用いられる。



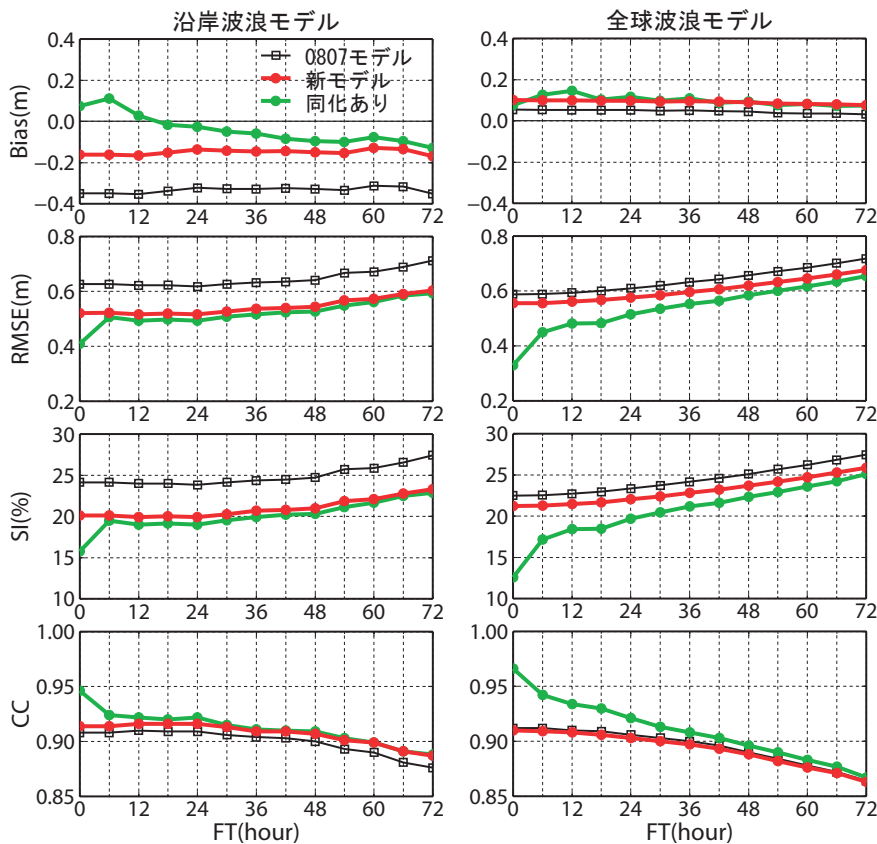
第9図 2010年12月2日～3日の韓国ブイ22106による観測値と波浪モデル値の時系列の比較

上図：風速及び風向，下図：波高及び波向の比較結果．矢印は風向（上図）又は波向（下図）を示す．波浪モデルに入力した風は0807モデルと新モデルと同じである．

波高については，0807モデルは波の立ち上がりが遅く，波の発達時の波高が実況よりも低かったが，新モデルでは3日00UTC前後で0.5m程度改善されていることがわかる．

この事例以外にも，風と波のデータが同時に得られる観測を用いて，波の発達が改善されているかを調べたところ，新モデルでも波の立ち上がりが改善されない事例があった．新モデルで改善されない事例の中には，モデルの風速の増加が実況に比べてなだらかで，そのために波の立ち上がりが遅れていると考えられるものがあった．

新モデルの全体的な予測精度を確認するため，2010年12月の1か月間の計算を行い，検証結果を0807モデルと比較した．検証方法は，第2章で述べた方法と同じである．結果を第10図に示す．沿岸波浪モデルでは，0807モデルのバイアスの値が-0.4～-0.3mと負バイアスが大きいが，新モデルでは-0.1～-0.2mと約半分になっている．RMSEとSIのどちらも新モデルの方が良く，



第10図 2010年12月の0807モデルと新モデル（同化なし，あり）の検証結果
上から順にバイアス，RMSE，SI，相関係数（CC）．

FT=0でRMSEが0.1m, SIが4ポイント小さくなった。また, 全球波浪モデルの検証については, バイアスは新モデルの方が0807モデルより若干大きくなっているものの, 沿岸波浪モデルのような大きな違いはなく, RMSEやSIは小さくなっていることがわかる。

更に, 夏季の検証として, 2010年7月についても同様の検証を行った。沿岸波浪モデルでは, 正バイアスが0807モデルより0.1m大きくなったが, RMSEとSIは大きく変わらず, 相関係数はわずかではあるが0807モデルより大きくなり, 改善される傾向がみられた(図省略)。全球波浪モデルについては, 0807モデルとの違いは冬季とほぼ同じで, RMSEやSIが0807モデルより小さくなった。

以上より, 波浪モデルにおけるエネルギー入力過程を見直した新モデルでは, 冬季の日本沿岸における波高の予測精度が改善され, それ以外では, 日本沿岸で夏季のバイアスがやや大きくなることを除いて, 0807モデルとほぼ同じか, やや改善されることを確認できた。このため, 2011年4月に現業の波浪モデルを更新し, 新モデルを導入した。

5. データ同化の導入に向けて

5.1 データ同化の導入に向けた技術開発

現在, 気象庁で運用している波浪モデルは, 初期値に追算結果を用いており, 観測データの同化は行っていない。追算とは, 前回初期値を用いてさかのぼってモデル計算を行うことにより対象時刻の初期値を得る手法のことである。一方, 波高の観測は, プイや船舶などに加え, 前章までの検証でも利用したJason-1衛星, Jason-2衛星を含む人工衛星による観測が世界的に行われるようになっており, これらの観測データを用いた波浪モデルのデータ同化が可能となっている。海外では, ECMWF(欧州中期予報センター)やNCEP(米国環境予測センター)など, 既にデータ同化を行っている予報センターもあり, 特に衛星による波高データを同化することで予測誤差を大きく減らすことができることがわかっている(Bidlot *et al.*, 2002)。気象庁の波浪モデルも, データ同化の導

入による予測精度の向上が期待され, 2012年度の導入に向けて開発を進めている。

気象庁では, 北西太平洋及び日本近海における有義波高, 波向, 周期などの情報を掲載した波浪実況図を配信している。2009年12月には, この波浪実況図の有義波高の解析に, 観測データと波浪モデルの結果を用いた最適内挿法による客観解析を導入した。開発中のデータ同化システムは, この客観解析値を波浪モデルの初期値の修正に利用する。データ同化システムについては, 別途Kohno *et al.* (2011)を参照されたい。

5.2 データ同化による波高予測へのインパクト

データ同化システムによる波高予測精度を確認するため, 2010年12月の1か月間の計算を行った。検証結果を0807モデル及び新モデルと比較して第10図に示している。データ同化の導入により, 予測時間が短い場合を中心に予測精度が改善されることがわかる。沿岸波浪モデルでは, データ同化なしに比べてバイアスが全体的に小さくなっている。RMSE, SI, 相関係数は, FT=6までは大きく改善され, 予測時間が長い場合もわずかではあるが改善がみられる。一方, 全球波浪モデルでは, バイアスは大きく変わらないが, RMSE, SI, 相関係数で見ると, FT=24においてもデータ同化の効果がみられ, 改善されている。同様に, 夏季の実験でもデータ同化の導入によって予測精度が改善することが確認されている。

6. まとめ

気象庁で運用している沿岸波浪モデルで計算された有義波高について, 衛星による観測波高と比較し, 統計的検証を行った。その結果, FT=24までは予測誤差はほぼ一定で, 誤差の増大はわずかであった。予測誤差は波高に依存し, 波高が大きいほど誤差も大きくなるが, 波高に対する誤差の割合は波高が大きいほど小さく, 全般的には予測誤差は波高の20~30%程度と考えればよいことがわかった。現業での利用を考え, 沿岸波浪モデルの予測誤差の程度として, 注意報未満, 注意報発表程度, 警報発表程度の波高の階級別にバイアス, RMSE, SIをまとめた。

また、予測誤差は季節によっても変化することを確認した。バイアスは冬季に負、夏季には正となり、RMSEは冬季の方が大きい、SIは夏季の方が大きかった。波浪モデルの予測結果を検討する際には、波高、季節、海域による予測誤差の違いにも留意する必要がある。

今回の検証で確認できた波浪モデルの冬季の負バイアスは、モデルのエネルギー入力過程を見直すことによって改善できることがわかった。この結果に基づき、2011年4月には現業の波浪モデルを更新した。

更に、データ同化を導入することによって、沿岸、全球ともに波浪モデルの予測精度が改善されることを確認した。2010年12月の実験によると、沿岸波浪モデルではRMSE、相関係数などの大きな改善はFT=6程度までであったが、全球波浪モデルではFT=24でもデータ同化の効果がみられた。2012年度に予定しているデータ同化の導入によって、現業波浪モデルの予測精度のさらなる改善が期待される。

竹内ほか(2012)で紹介されているように、データ同化のほかにも浅海効果を導入するなど波浪モデルに関する様々な開発を計画している。今後も、波浪モデルの精度検証を行うことによって波浪モデルの問題点を明らかにし、その改善に必要な技術開発を進める必要がある。

参 考 文 献

AVISO and PODAAC (2008) : AVISO and PODAAC User Handbook - IGDR and GDR Jason Products. 28. (http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_j1_gdr.pdf)

Bidlot, J., D. Holmes, P. A. Wittmann, R. Lalbeharry and H. S. Chen (2002) : Intercomparison of the performance of operational ocean wave forecasting systems with buoy data. *Weather and Forecasting*, 17, 287-310.

CNES, EUMETSAT, JPL, NOAA/NESDIS (2009) : OSTM/ Jason-2 Products Handbook. 9. (http://www.aviso.oceanobs.com/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_j2.pdf)

気象庁・気象研究所・気象大学校(2008) : 気象庁第3世代波浪モデルMRI-IIIユーザーガイド。

高野洋雄(2012) : 波浪情報について。平成23年度予報技術研修テキスト(第4章, 第1節), 68-77.

Kohno, N., D. Miura and K. Yoshita (2011) : The development of JMA wave data assimilation system. *Proceedings of the 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, 1-8. (<http://www.waveworkshop.org/12thWaves/index.htm>)

峯松宏明(2009) : 気象庁で現業運用している波浪モデル。天気, 56, 669-674.

杉本悟史(2007) : 新波浪モデルの概要と特性。平成19年度量的予報研修テキスト, 28-40.

高橋昌也(2010) : マイクロ波散乱計ASCATデータのグローバル解析での利用。平成22年度数値予報研修テキスト, 43-47.

Tauchi, T., N. Kohno and M. Kimura (2007) : The improvement of JMA operational wave models. *Proceedings of the 10th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, 1-9. (http://www.waveworkshop.org/10thWaves/Papers/Full_WaveW2007Tauchi.pdf)

竹内仁・高野洋雄・山根彩子・松枝聡子・板倉太子・宇都宮忠吉・金子秀毅・長屋保幸(2012) : 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び波浪モデルの現状と展望。測候時報, 79, 特別号, S25-S58.

Ueno, K. and N. Kohno (2004) : The development of the third generation wave model MRI-III for operational use. *Proceedings of the 8th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, 1-9. (<http://www.waveworkshop.org/8thWaves/Papers/G2.pdf>)