

気象モデルを用いた波浪推算の高精度化

森 信人*・平口博丸**・筒井純一***

1. 緒 言

近年, 日本においても第 3 世代波浪モデルに注目が集まるようになり, 物理モデルの拡張や精度検証が盛んに行われるようになってきた。第 3 世代波浪モデルを用いた場合の有義波高の推算誤差は観測値と比較して平均 0.3 m 前後であり (例えば Cavaleri et al., 1994), これまでのモデルに比べ方向スペクトルの推算精度が高い (例えば橋本ら, 1999) ことが報告されている。

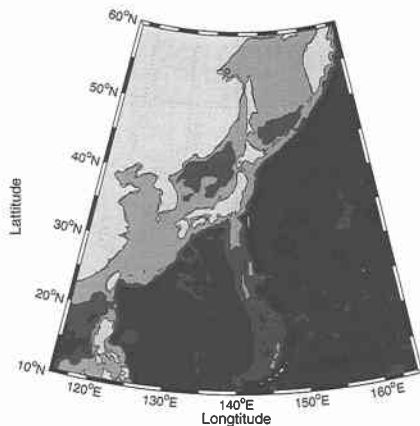
一般に, 波浪予測・推算の精度は海上風の与え方により大きく変化するため, 波浪モデルの開発が進む一方で海上風の与え方について様々な検討がなされてきた。Cardone et al. (1995) は SWADE を対象に, 異なる 6 種類の海上風のデータセットを用いて波浪推算を行い, 海上風データによる波浪推算精度の変動について検討を行った。その結果, 入力する海上風のデータセットの種類により, 推算される有義波高がかなり変化する事を明らかにしている。

そこで本研究では, 気象モデルを用いて詳細な時空間分解能を持つ海上風データを推算し, これを用いて波浪推算を行い, 両者の推算精度について検討を行う。

2. 研究の概略

(1) 気象・波浪モデルの概要

気象の再現計算には, ペンシルバニア州立大学と米国大気研究所が共同開発したメソ気象モデル MM5 を用いた (Grell and Stauffer 1994)。降水過程としては, 雲水・雨水・雪・氷を陽に扱うスキームと積雲のパラメタリゼーションとを併用するハイブリッド方式を用いた。格子スケールの降水を表現する前者には Reisner and Bruintjes (1999) のスキームを, 格子スケール以下の対流性の降水を計算する後者には Kain and Frisch (1993) のスキームを用いた。気象モデルの大気境界層スキームは, 海上風の予測精度に影響を及ぼす可能性が有るため, 簡便な Deardorff (1977) のバルク法と Mellor and



図一 気象・波浪モデルの計算範囲

Yamada (1974) の乱流クロージャー Level 2.5 モデルの 2 種類を用いて比較を行った。以下では, バルク法を用いたケースを MM5-Bulk, Mellor-Yamada モデルを用いたケースを MM5-MY とそれぞれ略記することにする。

波浪モデルは WAM モデル (WAMDAI Group 1988) を用い, 風からのエネルギー入力項として Snyder, スペクトル間のエネルギー移送項に Hasselmann, エネルギー散逸項として Komen らのモデルの標準的な組み合わせを用いた。

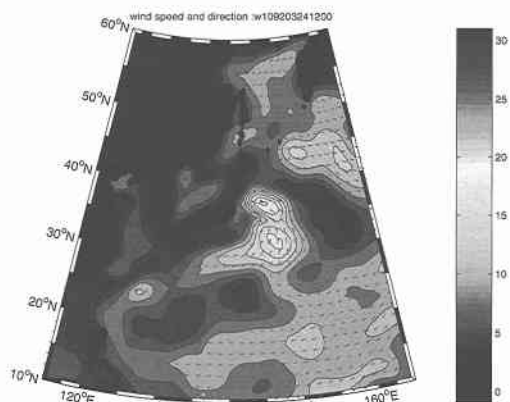
(2) 計算条件

本研究では, 日本を含む中緯度域の気象の再現計算をするために, ランベルト図法 (地図の中心位置は北緯 35 度, 東経 140 度) を用い, 水平格子間隔 45 km の格子網 (151×151) とした。また, 鉛直方向は 23 層の不等間隔格子, モデル最上層は 80 hPa (ただし基準大気値) とした。これにより, モデルの最下層の風速は高度約 45 m, モデル最上層は約 14 km で計算されることになる。なお, 気象モデルの計算範囲は, 図一に示す波浪モデルの計算範囲を包含するように設定されている。側方境界条件にはヨーロッパ中期予報センターの 6 時間毎の客観解析値 (以下 ECMWF データと略記) を時間内挿して用いた。ただし, 雲水・雨水等については解析値が無いため

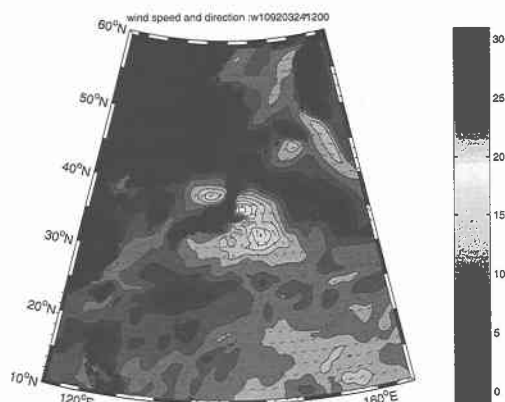
* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境科学部

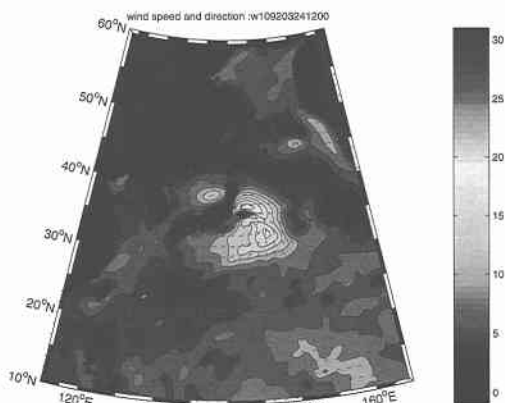
*** 正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学部



(a) ECMWF



(b) MM5-MY



(c) MM5-Bulk

図-2 太平洋側を通過する低気圧低気圧の風場：1992年3月24日12時

側方境界値は0としている。また、海面温度には Reynolds の月平均観測値を用いた。

波浪モデルの計算は球面座標系を用い、気象モデルと同じ計算範囲（図-1）に対して格子間隔0.5度・深海条

件で計算を行った後、目標地点を中心に北緯・東経各2度（格子間隔0.05度）の範囲の海底地形を与えてネスティング計算した。海上風としては、MM5-MYについては診断的 U_{10} を、MM5-Bulk では最下層の風速を1/7乗則を用いて U_{10} に換算し、これを波浪モデルの入力条件とした。また、比較のため ECMWF データを用いた計算も行った。著者らは、 $H_{1/3}$ の最大値が海上風の入力時間間隔により変化し、条件によっては波高が約10%低下することを明らかにしており（森・平口，2000）、本研究では、波浪モデルへの海上風の入力間隔を30分に設定した。

気象擾乱としては、太平洋岸における南岸低気圧と日本海側の冬季季節風の2パターンを対象とした。気象・波浪モデルによるシミュレーションは、1992年3月23日9時～26日9時および1988年12月13日21時～16日21時までのそれぞれ3日間とした。ただし、波浪場の初期値にはあらかじめ ECMWF データを用いてスピナップを1～2日実施したものを用いた。

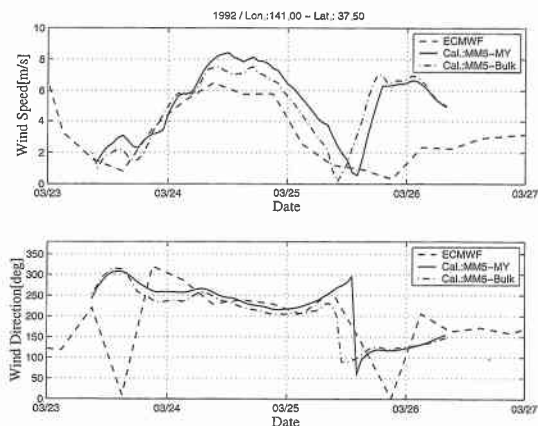
計算結果の検証としては、福島沖水深約13mと山形沖水深約45mにおけるブイのデータを用いて計算結果の検証を行った。なお南岸低気圧は観測点のほぼ真上を通過している。

3. 結果と考察

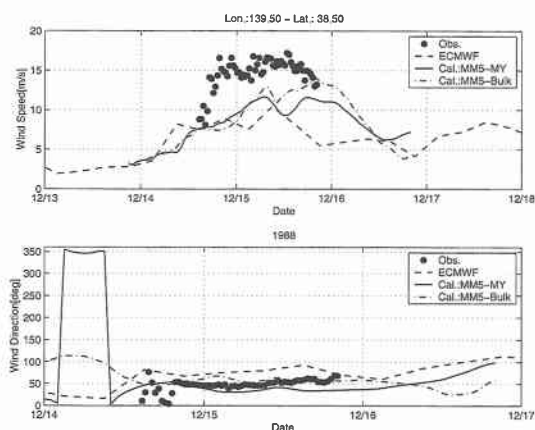
(1) 気象推算結果

図-2に示すのは、南岸低気圧が発達しながら福島沖を通過する代表的なケースとして採用した1992年3月24日12時における気象モデル（MM5-MYとMM5-Bulk）と ECMWF データの風速分布である。この時間に観測点における風速は極大値を示しており、福島沖に低気圧の中心があることがわかる。低気圧は東シナ海で発生し、本州南岸を東進するが、その移動速度は ECMWF データが最も速く、MM5-Bulk、MM5-MY5の計算結果の順に遅くなっている。

図-3(a)は、図-2と同じケースにおける福島沖の観測点における気象モデルの計算結果および ECMWF データの風速と風向を比較したものである。風速の立ち上がりについては、気象モデルの結果と ECMWF データはほぼ同じであり、ピーク値は MM5-MY が最も大きく、また継続時間も長い。風向については、気象モデル・ECMWF データともほぼ同じ傾向を示している。図-3(b)は、冬季季節風を対象にし、1988年12月13日～16日にかけての山形沖での観測点における観測結果、気象モデルおよび ECMWF データの風速と風向を比較したものである。風速については、気象モデル・ECMWF データ両者とも観測値より数 m/s 低い値となっている。また、気象モデルピークの立ち上がりは ECMWF データに比べて3時間ほど遅れている。海上風の時空間変化に



(a) 福島沖



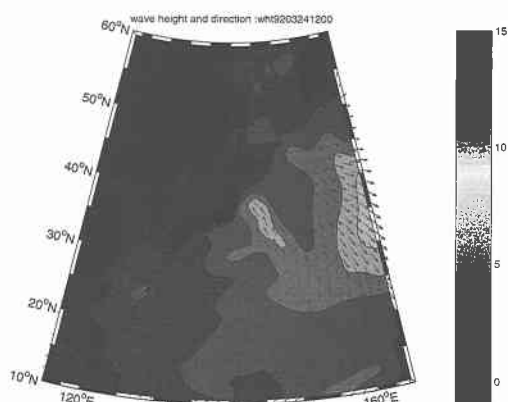
(b) 山形沖

図-3 観測地点における風速と風向の時間変化の比較：
1992年3月23日～26日

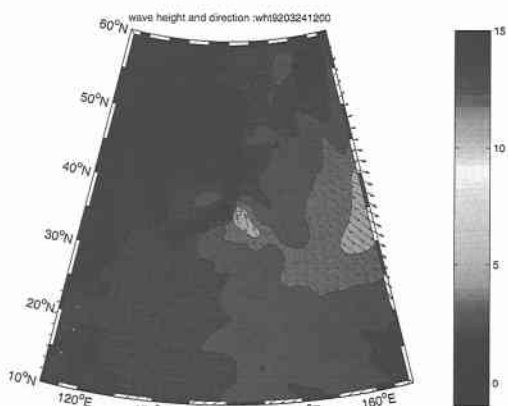
については掲載していないが、ECMWF に対し気象モデルでは低気圧の発生および初期の発達はいずれに再現されているが、その移動が遅く、山形沖では風向は ECMWF データと気象モデルでは最大 45 度近く異なっている。ECMWF データは再解析データであるため、当然のことながら ECMWF データの方が実際の気圧配置に近いものとなっている。日本海側の冬季季節風の再現精度が良くない原因としては、初期に与えた日本海上の水蒸気の分布や海面水温が水蒸気の精度が考えられ、今後の改良の余地が残る。

(2) 波浪推算結果

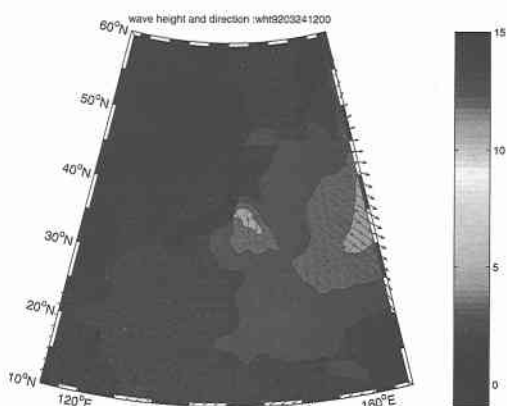
図-4 に示すのは、図-2 と同じケースにおける波浪推算結果である。図-2 より明らかなように、低気圧の移動速度が ECMWF, MM5-Bulk, MM5-MY の順で早いため、福島沖の $H_{1/3}$ の分布の違いも同じ傾向を示している。図-5(a) は、同じケースにおける福島沖での $H_{1/3}$ お



(a) ECMWF



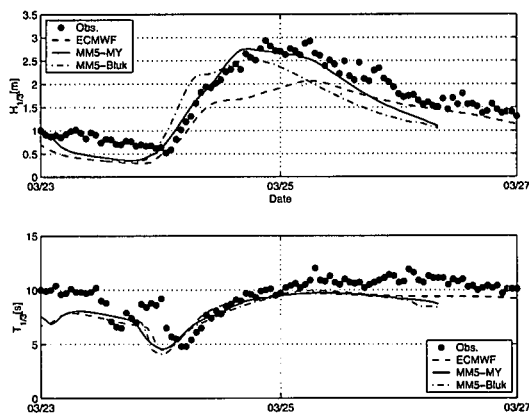
(b) MM5-MY



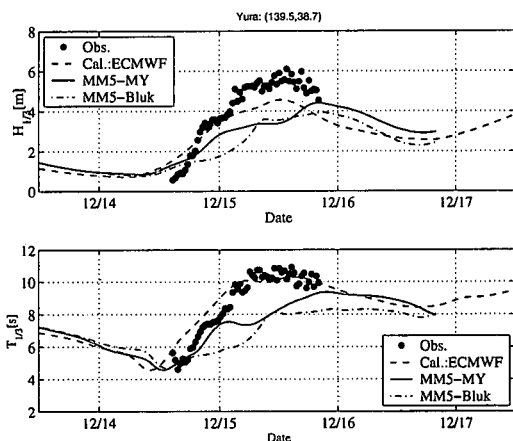
(c) MM5-Bulk

図-4 太平洋側を通過する低気圧に対する $H_{1/3}$ の分布：
1992年3月24日12時（図-2と同じケース）

および $T_{1/3}$ について、MM5-MY, MM5-Bulk および ECMWF データを元に行った波浪推算と観測結果を比較したものである。 $T_{1/3}$ についてはいずれの計算結果もほぼ同じ傾向となっている。一方、 $H_{1/3}$ は用いた海上風



(a) 福岡沖



(b) 山形沖

図-5 観測地点における $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の時間変化の比較：
1992年3月23日～26日（図-3と同じケース）

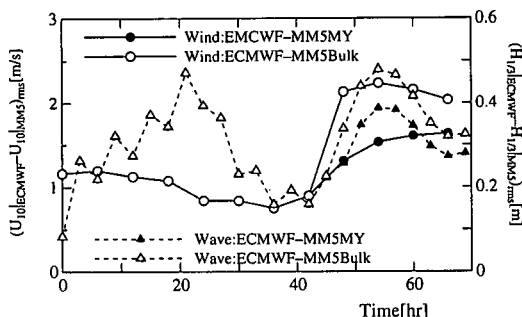


図-6 計算領域全体における ECMWF と MM5 による推
算結果の差

データにより傾向が異なり、ECMWF データを用いた結果は観測値と比べ最大 30% 程度過小評価となっており、MM5-Bulk を用いた場合はピーク値の差異は改善されるものの立ち上がりが早くなっている。また、MM5-Bulk を用いた結果は、観測値に対し全体的にやや過小評価と

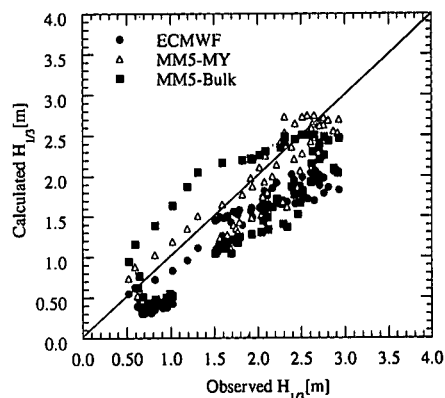
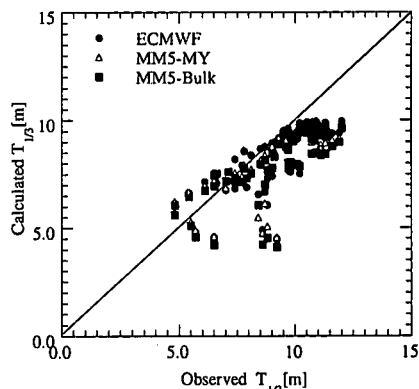
(a) $H_{1/3}$ (b) $T_{1/3}$

図-7 福岡沖における $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ の観測値と推算値の
関係

なっている。これに対し、MM5-MY を用いた場合は、ピーク値・時系列とも現地データと最も良く一致していることがわかる。図-5(b) は、山形沖の観測点での $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ の計算を比較したものである。観測結果と比較して、ECMWF データを用いた波浪推算結果は、定性的な傾向は似ているもののピークで 2 m 近く過小評価となっている。これに対し、MM5-MY、MM5-Bulk を用いた波浪推算結果は、 $H_{1/3}$ のピークの立ち上がりが悪だけでなく定性的な傾向も異なったものとなっている。この傾向は、先に示した風速の立ち上がりと同様であり、気象モデルと ECMWF データにおいて低気圧の配置が異なることに起因していると考えられる。ECMWF データの方が実際の気象に近い気圧配置となっているため、フェッチが短い日本海における $T_{1/3}$ の ECMWF データを用いた計算による再現性は非常に高い。

図-6 に示すのは、低気圧のケースについて計算領域全体における ECMWF データと気象モデルの風速（スカラー量）および $H_{1/3}$ の差の rms 値である。図より、ECMWF データと気象モデルの風速の差は計算領域全

表—1 計算結果と観測値の比較： $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$

(a) $H_{1/3}$												
	ECMWF				MM5-MY				MM5-Bulk			
測点	平均誤差	RMSE	COR	SI	平均誤差	RMSE	COR	SI	平均誤差	RMSE	COR	SI
福島	-0.46	0.52	0.93	29	-0.19	0.32	0.95	18	-0.30	0.51	0.85	29
山形	-1.04	1.22	0.98	30	-1.39	1.65	0.92	40	-2.10	2.33	0.85	57

(b) $T_{1/3}$												
	ECMWF				MM5-MY				MM5-Bulk			
測点	平均誤差	RMSE	COR	SI	平均誤差	RMSE	COR	SI	平均誤差	RMSE	COR	SI
福島	-0.95	1.45	0.79	15	-1.08	1.58	0.80	17	-1.20	1.70	0.78	20
山形	0.12	0.48	0.98	6	-1.64	1.84	0.92	21	-2.13	2.39	0.85	27

体で約 1 m/s, $H_{1/3}$ の差は 0.2~0.4 m であり, 大気境界層のモデルの差の影響はマクロ的には計算開始 2 日ぐらいで現れることがわかる。

表—1 は, 各ケースにおいて観測値と波浪推算結果の平均誤差 [m], 誤差の rms 値 [m] (RMSE), 両者の相関係数 (COR) および誤差の rms 値を対象とする期間の観測値の平均値で正規化した値 [%] (SI) を示したものである。ECMWF データを用いた計算結果は, 福島沖および山形沖のいずれの場合も COR および SI 共にそれほど変化はない。但し, 山形沖の $T_{1/3}$ については非常に高い値となっており日本海側では外洋からのうねりの影響がないため, フェッチが正確に再現されている場合にこのような結果になると考えられる。MM5-MY5 を用いた場合の波浪推算結果は, ECMWF データを用いた計算結果と比較して福島沖では COR および SI とともに良い値を示しているが, 山形沖では逆に推算精度が落ちている。これは, 先にも述べたように, MM5-MY5 では冬季の日本海側における気圧配置が正確に再現できなかったためであると推測される。MM5-Bulk を用いた結果は, ECMWF データと同等もしくはそれ以下の値を示している。また, 全ての計算結果において推算された $H_{1/3}$ は, 観測値に比べて負のバイアスが掛かっていた。

図—7 に示すのは, 福島沖における $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ の観測値と推算値の関係である。図より $H_{1/3}$ については, MM5-MY を用いた計算結果が観測値と良い関係にあり, MM5-Bulk の結果はやや初期の立ち上がりが早く過小評価, ECMWF データを用いた計算結果はやや過小評価の傾向にあることがわかる。 $T_{1/3}$ については, モデル間の違いはそれほど顕著ではなく, また全てのモデルにおいて $H_{1/3}$ に比べてややバラツキが多い。

4. 結 語

本研究では, 気象モデルを用いた場合の波浪推算の精度の向上について太平洋側の南岸低気圧と日本海側における冬季季節風の 2 種類の気象擾乱を対象に検討を行った。その結果, 気象モデルを用いて海上風を時間的に密に与えることにより, ECMWF データを用いるよりも

$H_{1/3}$ の変化の立ち上がりやピーク値の推算精度を向上させることが可能であることを示した。但し, 気象モデルをそのまま用いた場合, 大陸の影響を大きく受ける冬季季節風速場の再現性が悪く, モデルの改良の余地があることを示した。

最後に, 波浪データを提供していただいた東京電力株式会社原子力技術部土木調査グループ松本悟氏および船舶技術研究所運動性能部富田宏博士に感謝する。

参 考 文 献

- 橋本典明・川口浩二・真期俊行・永井紀彦 (1999): 方向スペクトル観測地に基づく第三世代波浪推算法の推定精度に関する検討。海岸工学論文集, 第 46 巻, 276-280。
- 森 信人・平口博丸 (2000): 第 3 世代波浪モデルの推定精度に及ぼす海上風の時間空間精度の影響について。Technical report, CRIEPI. (印刷中)。
- Cardone, V., H. Graber, R. Jansen, S. Hasselmann and M. Caruso (1995): In search of the true surface wind field in swade iop-1: Ocean wave modelling perspective. *The Atmosphere Ocean System* 3 (2-3), 107-150。
- Cavaleri, L., B. Burgers, H. Gunther, V. Makin and L. Zambresky (1994): *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Chapter IV. 4: Operational applications. Cambridge Univ. Press.
- Deardorff, J. (1977): Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models. *Mon. Wea. Rev.* 100, 93-106。
- Grell, G. a. J. D. and D. Stauffer (1994): A description of the fifth-generation penn state/ncar mesoscale model (mm5). Technical Report NCAR/TN-398+STR, NCAR Technical Note, Boulder, CO.
- Kain, J. and J. Fritsch (1993): Convective parameterization for mesoscale models: The kain-fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models. *Meteor. Monogr.* 46, 165-170。
- Mellor, G. and T. Yamada (1974): A hierarchy of turbulence closure models for planetray boundary layers. *J. Atmos. Science* 31, 1791-1806。
- Reisner, J., R. R. and R. Bruintjes (1999): Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the mm5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 124B, 1071-1107。
- WAMDAI Group (1988): The WAM model—a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1378-1391。