

気象庁で現業運用している波浪モデル

峯 松 宏 明*

1. はじめに

護岸施設が整備された近年の日本においても、波浪は時として大きな災害をもたらす。2008年2月23日から24日にかけて、日本海北部を発達しながら通過した低気圧の影響で高波が発生し、富山県で2人が亡くなったのをはじめ、新潟県を含む広い地域で港湾や漁港に大きな被害をもたらした。また、外洋においても、2006年10月7日から8日にかけて、関東の南から三陸沖を急速に発達しながら北上した低気圧による高波により、関東の東海上や三陸沖で船舶の座礁事故が相次いだ。

こうした災害を軽減させていくためには、より正確な波浪予測情報の提供、及びその利用が重要である。ここでは、現在の気象庁の波浪予測の基礎となっている波浪モデルの概要について紹介する。波浪全般に関して、より詳しくは磯崎・鈴木(1999)、磯崎(2006)を参照して欲しい。

2. 波浪モデル

波浪は、一般に風浪とうねりに大別される。風浪とは海上を吹く風からエネルギーを与えられて発達しつつある波であり、うねりとは風が弱まった後にエネルギーを失って減衰しながら伝播する波のことである。波浪モデルでは、波浪が風浪として発生してからうねりとして消滅するまでの一連の現象を数式で表し、日々の波浪を計算している。

ただし、予報変数として使用しているのは一般になじみの深い波高や周期といった要素ではなく、地点毎

に周波数(周期の逆数)と波向の関数として表される、波の2次元エネルギースペクトルである。以下では、まず波の2次元エネルギースペクトルについて述べ、その後波浪モデルの基礎方程式等について紹介していく。

2.1 波の2次元エネルギースペクトル

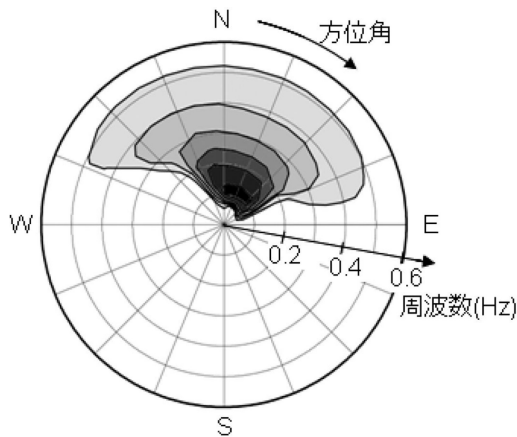
波の2次元エネルギースペクトル(以下、2次元スペクトル)とは、地点毎に波のエネルギーを周波数および波向に対する分布として表現したものである。観測された海面の状態を様々な周波数、振幅、向きを持った多数の規則波に分解(スペクトル解析)することで得られる。

一般に海面は非常に複雑な形状をしており、単一の波高や周期だけではその状況を十分に表現できない。しかし、2次元スペクトルを用いると、ある地点での波浪がどの方向、何秒の周期の成分にどの程度のエネルギーを持っているのかを細かく表現することが可能となる。

波浪モデルによる波の予測で、地点毎の海面の高さを予報変数とするのではなく、エネルギーである2次元スペクトルを予報変数としている理由は、波浪の水平スケールがたかだか数100mと小さいことである。個々の波を表現するためには数m~数10m程度の細かい水平格子間隔が必要となるため、実用的な広い領域の計算を行うには膨大な計算機資源が必要となり、現実的ではない。

これに対して2次元スペクトルは、統計量としての性質を持つために、数km~数100kmという比較的粗い水平解像度でも扱うことが出来る。最終的にプロダクトとして提供される波高や周期、波向は、2次元スペクトルから有義波に相当する値に換算して求めら

* Hiroaki MINEMATSU, 気象庁地球環境・海洋部。
© 2009 日本気象学会



第1図 2次元エネルギースペクトルの例。ある地点での波のエネルギー、周波数および波向に対する分布を表す。色が濃いほどエネルギーが大きいことを表し、円周方向の角度が波の来る向き、中心からの距離が波の周波数（周期）を表す。

れる。

第1図は波浪モデルで表現された2次元スペクトルの例である。色が濃いほどエネルギーが大きいことを表し、円周方向の角度が波の来る向き、中心からの距離が波の周波数（周期）を示している。この例の場合、西北西から時計回りに東北東までの範囲の方向から波が来ており、北北東・周期7秒（周波数0.15 Hz）付近にエネルギーが集中していることを示す。

ある地点の2次元スペクトルにエネルギーの極大が複数ある場合、これはその地点にそれぞれの方向から波が入っていることを示す。例えば、風浪に加えてうねりが入っている場合等が、それに該当する。

2.2 エネルギーバランス方程式

前述のように、波浪モデルでは波浪の2次元スペクトルを予報変数とし、各格子点で定義されたエネルギーの時間変化を計算している。基礎方程式である式(1)はエネルギーの収支を表しており、エネルギーバランス方程式と呼ばれる。

$$\frac{\partial F(f, \theta)}{\partial t} + C_g(f) \cdot \nabla F(f, \theta) = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (1)$$

ここで、 $F(f, \theta)$ は2次元スペクトルで f は周波数、 θ は波向、 C_g は波の群速度を表す。右辺 ($S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$) はソース項と呼ばれ、波浪の発達・減衰に

作用する外力を表現する。

この方程式で特に重要なのはソース項の扱いで、ここには以下の3つの効果が含まれる。

- ・風からのエネルギー入力 (S_{in})
- ・非線形効果による成分波間のエネルギー輸送 (S_{nl})
- ・砕波や内部摩擦によるエネルギー散逸 (S_{ds})

S_{in} や S_{ds} に比べて S_{nl} は直感的に意味がわかりにくい。風浪の発達や、風浪とうねりの相互作用による2次元スペクトルの変化を表すために重要な項である。

波浪モデルは、 S_{nl} の扱い方により第1世代モデルから第3世代モデルまでの3種類に分類されている。

まず、歴史的に最も古く、1960年代から1970年代にかけて開発された波浪モデルが第1世代モデルである。この世代のモデルはソース項が S_{in} と S_{ds} のみから構成されており、 S_{nl} の効果は基本的に考慮されていない。このため、風浪の発達とうねりの伝播はそれぞれ独立に計算され、相互作用は考慮されないという欠点があった。

次に、1970年代から1980年代にかけて開発されたのが第2世代モデルである。 S_{nl} の重要性が認識されるようになったが、非常に多量の計算を必要とするため、パラメータ等による簡便な表現にとどまっていた。

第3世代モデルでは S_{nl} を明示的に計算するようになり、風浪やうねりの計算精度が向上した。現在は第3世代モデルが世界で多く運用されている。

3. 現業波浪モデル

3.1 モデルの種類

気象庁で運用している波浪モデルは、気象研究所で開発、改良が行われてきた。1977年に初の波浪モデルとして第1世代波浪モデルであるMRIの運用を開始し、1986年に第2世代のMRI-II、1998年に第3世代のMRI-IIIを導入した。そして2007年には同じ第3世代ながらモデルの全面的な更新を行い、物理過程の改善、水平解像度の向上、2次元スペクトルの方向分解能の向上により精度を向上させてきている (Ueno and Kohno 2004; 杉本 2007)。

現在、気象庁では全球波浪モデルと沿岸波浪モデルという2種類の波浪モデルを運用しているほか、新たに浅海波浪モデルの運用を開始する準備を進めている。それぞれの概要を第1表に示す。

全球波浪モデルは極付近を除く地球上の海のほぼ全

域をカバーし、アリューシャン近海から日本に達するうねりや、南半球から北半球に伝わるうねりの伝播も計算できる。沿岸波浪モデルは日本近海の領域のみをカバーし、細かい解像度でより詳細な計算ができる。

浅海波浪モデルは、前述の2つのモデルとは異なり、水深の浅い領域での計算に特化したモデルである。波浪は陸地に近づいて水深の浅い海域に入ると、浅海効果と呼ばれる効果により、深い海域を伝播する場合は異なった振る舞いをするようになる。前述の沿岸・全球波浪モデルでは浅海効果は考慮されていないが、それを取り込んだモデルが浅海波浪モデルで、国土交通省国土技術政策総合研究所で開発されたモデルを試験運用中である。

外力として使用する海上風は、全球波浪モデルと沿岸波浪モデルでは全球モデル (GSM) (北川 2008) の予測値を使用し、浅海波浪モデルではメソモデル (MSM) (原ほか 2007) の予測値を使用している。ただし台風近傍については、台風の予報位置と大気モデルでの台風の位置のずれを補正するために、GSM や MSM の風を台風ボーガスと呼ばれる仮想的な風に置き換えて使用している。

台風ボーガスとは、台風の中心気圧と1000 hPa 半径から計算された理想的な傾度風に台風の移動ベクトルを加えたものである。

3.2 精度と特性

現在の全球・沿岸波浪モデルは2007年5月30日に運用を開始した。ここでは主に沿岸モデルを対象として2008年1～12月の1年間における精度検証の結果を紹介し、モデルの特性を述べる。なお、以下に示すモデルの値は、波浪モデルそのものの特性を調べるため

第1表 現業波浪モデルの仕様

モデル名	全球波浪モデル	沿岸波浪モデル
計算領域	地球のほぼ全海域 南緯75度～北緯75度 西経180度～0度～東経180度 (周期境界)	日本近海 北緯20度～50度 東経120度～150度
格子数	720×301	601×601
格子間隔	0.5度	0.05度
スペクトル成分	900成分 (25周波数×36方位) 周波数成分：0.0375～0.3 Hz (対数分割) 方位成分：10度間隔	
外力	全球数値予報モデル GSM 台風域内は仮想的な傾度風で補正 (72時間先まで)	
予想時間 [12 UTC] [00,06,18 UTC]	216時間 84時間	84時間 84時間

モデル名	浅海波浪モデル			
計算領域	東京湾 北緯35.05度～ 35.75度 東経139.55度～ 140.15度	伊勢湾 北緯34.35度～ 35.05度 東経136.45度～ 137.45度	播磨灘・大阪湾 北緯34.05度～ 34.85度 東経134.15度～ 135.45度	有明海 北緯32.45度～ 33.25度 東経130.05度～ 130.75度
格子数	37×43	61×43	79×49	43×49
格子間隔	1分			
スペクトル成分	1260成分 (35周波数×36方位) 周波数成分：0.0418～0.3 Hz (対数分割) 方位成分：10度間隔			
外力	メソ数値予報モデル MSM 台風域内は仮想的な傾度風で補正			
予想時間 [03,09,15,21UTC]	33時間			

に、外力として与える風のデータに大気モデルの解析値を利用した

第2図に気象庁が運用する沿岸波浪計の配置図、第3図に松前 (北海道) の沿岸波浪計の波高の観測値およびそれに対するモデルの推算値の時系列を示す。全体的な傾向としてモデルは観測値をよく再現しており、波高の急激な変化も、概ね表現できている。

第2表に、気象庁が運用する各波浪計の波高に対するモデルの平均二乗誤差 (RMSE)、平均誤差 (BIAS) および相関係数を示した。相関係数は概ね0.8を超え、RMSE も30～40 cm 程度と全体的に良い精度である。石廊崎 (静岡県) や佐多岬 (鹿児島県) は比較的成績が悪いが、これらは地点周辺の島等の地形をモデルが十分に表現できていないためであると考えられる。

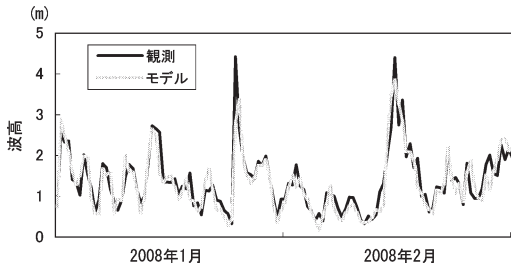
以下に、風浪とうねりのそれぞれが卓越した場合の

具体例を示す。

第4図に、風浪の例を示す。この図は2008年4月



第2図 気象庁が運用する沿岸波浪計の配置図。



第3図 松前の波高の観測値と沿岸波浪モデルの推算値の時系列。松前の観測値（黒線）と、沿岸波浪モデルの推算値（灰線）。データは12時間間隔で、期間は2008年1月～2月。

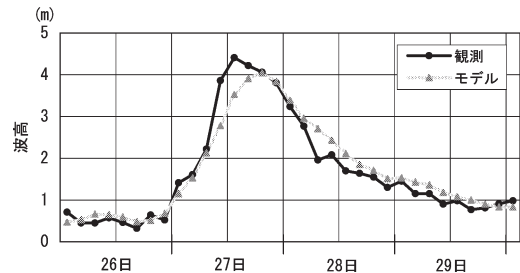
第2表 沿岸波浪計の波高の観測値に対する沿岸波浪モデルの推算値の検証結果。期間は2008年1月～12月で、各沿岸波浪計と沿岸波浪モデル推算値を比較した結果。

	BIAS (cm)	RMSE (cm)	相関係数
松前	0	31	0.93
江ノ島	-8	39	0.86
石廊崎	-3	45	0.65
経ヶ岬	-13	33	0.93
福江島	10	35	0.88
佐多岬	23	34	0.81

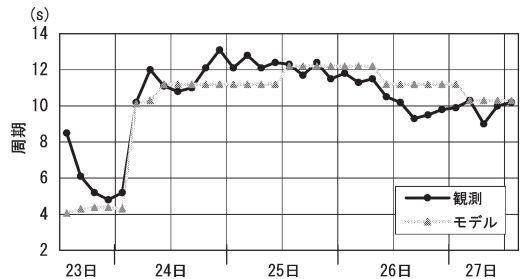
26～30日に松前で観測された波高と、それに対するモデルの推算値を表している。第2表での松前の相関係数の高さからもわかるように、モデルは波高の変化傾向を非常によく表現している。

風浪の発達については、これまでに多くの実験や観測が行われてきたことから、物理機構の解明や数式化が進んでいる。波浪モデルへの入力として使われる大気の数値予報モデルによる風の予測精度が向上してきていることもあり、波浪モデルは一般的に風浪の表現は比較的精度が高い。ただし、風浪の初期発達の表現の難しさのため、この例にも表れているように、静穏な状態からの急激な立ち上がりが遅れる場合がある。

うねりの例として、第5図に2008年2月23～27日にかけて江ノ島（宮城県）で観測された周期と、それに対するモデルの推算値を示す。この例では江ノ島で最大約4.5mのうねりが観測されたが、モデルは約3mまでとなっており、波高の表現は不十分であった（図省略）。しかし、図に示されている通り、両者の周期を比較するとよく一致している。



第4図 風浪が卓越した現象の例。2008年4月26～30日の松前の波高の観測値（黒線）と、沿岸波浪モデルの推算値（灰線）。



第5図 うねりが卓越した現象の例。2008年2月23～27日の江ノ島の周期の観測値（黒線）と、沿岸波浪モデルの推算値（灰線）。

一般に、波浪モデルにとってうねりの表現は非常に難しい。エネルギー散逸の機構が最も未解明である上、うねりの観測が十分でないためにその伝播状況がよくわかっていないためである。しかし、この例で示したように、モデルはうねりの波高が不十分な場合でも周期は計算できており、うねりの表現も改善されつつある。

最後に、うねりの表現に関して、世界各国で運用する波浪モデルの精度を比較した結果を紹介する。年間を通じてうねりが卓越する機会が多いハワイのプイ (NOAA が運用) を対象として、気象庁を含む世界 6ヶ国の気象センターが運用する全球波浪モデルの波高の24時間予測値の RMSE を第 6 図に示す。図中の「平均」は、図に載せていないセンターを含む10ヶ国の平均を示す。気象庁の波浪モデルは、全ての月で平均よりスコアが良く、世界的に見ても上位の精度となっている。

4. 波浪モデルのプロダクト

気象庁では、波浪モデルのプロダクトとして気象無線模写通報 (JMH) 放送用 FAX 図を発表している。

第 7 図に示したように領域の異なる 2 種類の図があり、日本近海を対象にしたものが沿岸波浪モデルの 12, 24, 36, 48時間予想 (FWJP04)、北西太平洋を対象にしたものが全球波浪モデルの 12, 24, 48, 72時間予想 (FWPN07) である (ただし、第 7 図では両モデルともに12時間予想のみを掲載している)。どちらも、図中には有義波に換算した波高、周期、及びエネルギー分布の重心から求めた波向を記入している。

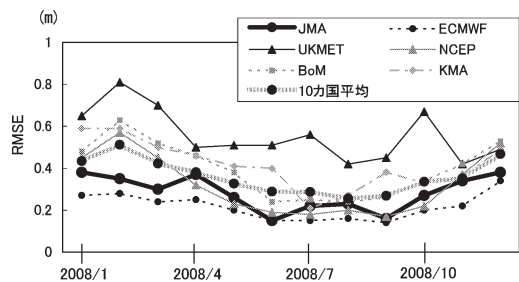
5. 今後の開発計画

現在の気象庁の波浪モデルでは、初期値は追算 (ハインドキャスト) により作成しており、観測値は反映されていない。追算とは、初期時刻よりもさかのぼって波浪計算を開始し、波浪場の初期値を作成することである。

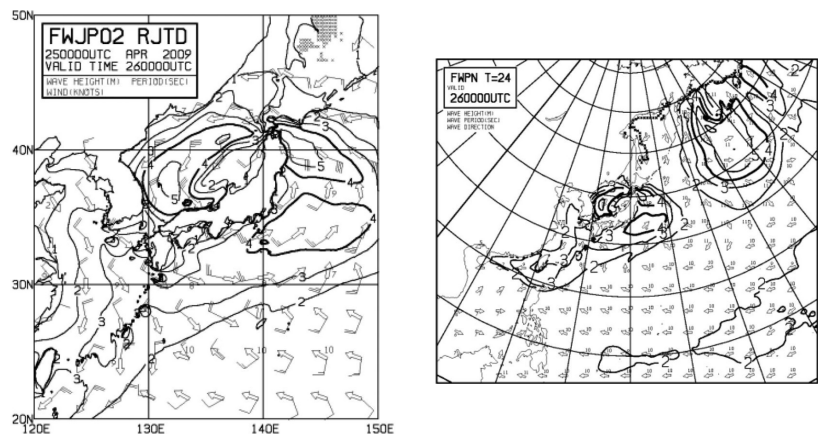
波浪モデルで観測値を利用していない理由は、モデ

ルが直接利用できる観測がほとんどないためである。波浪は観測自体が少ないが、その観測も多くは有義波のみを扱っており、モデルの予報変数である 2 次元スペクトルは観測が非常に少ないのが現状である。

しかし、近年は同化技術の進展により、沿岸波浪計や衛星による有義波高観測値からモデルの 2 次元スペクトルを補正する技術が開発されてきている。このことを踏まえ、今後データ同化技術の開発を進めていく



第 6 図 世界の気象センターが運用する波浪モデルの精度比較。NOAA が運用するハワイのプイに対する、各気象センターの全球波浪モデルの波高の24時間予測値の RMSE。期間は2008年 1~12月の 1 年間。図中で、JMA は日本、ECMWF はヨーロッパ中期予報センター、UKMET はイギリス、NCEP はアメリカ、BoM はオーストラリア、KMA は韓国の各気象局を示し、「平均」は図に載せていないセンターを含む10ヶ国の平均を示す。



第 7 図 波浪モデルのプロダクト (JMH 用 FAX 図)。左は沿岸波浪モデル、右は全球波浪モデルの12時間予測値。沿岸波浪モデルは12, 24, 36, 48時間予測値、全球波浪モデルは12, 24, 48, 72時間予測値のプロダクトを発表しているが、ここではその一部を示す。

計画である。

現状では、仮に風浪の予測が過小な場合は、これを波源とするうねりの見積もりも不十分となってしまうが、データ同化が実用化されると、観測値が反映されることによりその表現が改善されると期待される。

この他、現在でも波浪の物理過程については根本的な所に未解明な部分があり、研究が進められている。今後も、これらの知見を踏まえて、モデルの物理過程を改善していく予定である。

6. おわりに

気象庁では、1977年に波浪モデルの現業運用を開始し、その後も改良を続けることで予測精度を向上させてきた。直近では2007年5月に大幅な改良を施し、全体的なパフォーマンスを向上させた。特に、それ以前と比べてうねりの表現を改善している。

今後、現在の波浪モデルのさらなる改良や浅海波浪モデルの現業運用の開始のほか、データ同化技術の開

発等によって、より良い精度できめ細かな情報を提供していきたいと考えている。

参考文献

- 原 旅人, 三浦大輔, 古市 豊, 成田正巳, 2007: メソ数値予報モデル. 平成19年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 29-47.
- 磯崎一郎, 2006: 波浪学の ABC. 成山堂書店, 173 pp.
- 磯崎一郎, 鈴木 靖, 1999: 波浪の解析と予報. 東海大学出版会, 274 pp.
- 北川裕人, 2008: 気象庁の新しい高解像度全球数値予報モデルについて. 天気, 55, 509-514.
- 杉本悟史, 2007: 新波浪モデルの概略と特性. 平成19年度量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 28-40.
- Ueno, K. and N. Kohno, 2004: The development of the third generation wave model MRI-III for operational use. 8th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, <http://www.waveworkshop.org/8thWaves/Papers/G2.pdf> (2009年7月27日閲覧).