

# 方向スペクトル観測値に基づく第三世代波浪推算法 (WAM) の 推定精度に関する検討

橋本典明\*・川口浩二\*\*・真期俊行\*\*\*・永井紀彦\*\*\*\*

## 1. はじめに

我が国では港湾構造物の耐波設計等の実務に気象庁で開発された MRI が標準的な波浪推算法として用いられている。しかしながら、諸外国においては既に WAM に代表される第三世代波浪推算法が実務的なレベルで用いられている。このような状況の中で、海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会でも第三世代波浪推算法とりわけ WAM に関心が集まり、MRI に代わる次世代型波浪推算法の開発に大きな期待が寄せられている。しかしながら、MRI がこれまで長期間にわたり実務で使用されてきた実績があるのに対して、我が国周辺海域を対象として実務的観点から WAM の適用性や推算精度を検討した例は少ない。一方、近年、波浪観測の高度化が進み、これまで単に波高・周期・波向に関する情報のみであったものが、現在ではより高度な方向スペクトルに関する情報が多く観測・蓄積されるようになってきた。

そこで本研究では、今後の次世代型波浪推算法の開発に資するため、MRI と WAM を用い、種々の気象擾乱を対象として、我が国周辺海域の波浪推算を実施し、両モデルの特性や推算精度を有義波諸元のみならず方向スペクトルの観測値を用いて比較検討することとした。

## 2. 波浪推算モデルの概要

波浪推算法は SMB 法に代表される有義波法とスペクトル法とに大別されるが、現在ではスペクトル法が主流となっている。スペクトル法は波浪のエネルギー・スペクトルに関するエネルギー平衡方程式を基礎方程式とし、波浪スペクトルの時間的・空間的変動を数値的に求める推算法である。Hasselmann(1960)によれば、波の発生・発達・伝播および減衰に伴う波浪のエネルギー (スペクトル) 変動は、 $\omega$  を角周波数、 $\theta$  を波向、 $E(\omega, \theta)$  を波浪の方向スペクトル、 $C_g$  をスペクトルの成分波の群速度とすると、一般的に、次式のようなエネルギー平衡方程式で記述される。

$$\frac{\partial E(\omega, \theta)}{\partial t} + C_g \cdot \nabla E(\omega, \theta) = S \dots \dots \dots (1)$$

ここで、左辺第 1 項および第 2 項は、それぞれ方向スペクトルの局所的な時間変化およびエネルギーフラックスの空間変化を示している。また右辺の S はエネルギーソース関数と呼ばれ、波浪スペクトルを構成する成分波に対するエネルギーの入出力を表現したもので、一般に次式で与えられる。

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $S_{in}$  は風から波へのエネルギー入力項、 $S_{dis}$  は砕波などによるエネルギー消散項、 $S_{nl}$  は非線形相互作用によるエネルギー伝達項である。スペクトル法は、ソース関数 S のうち、 $S_{nl}$  の取り扱い方により、大まかに第一世代から第三世代モデルに分類されている。第一世代モデルである MRI では風から波へのエネルギー輸送項 ( $S_{in}$ ) において、実際の海洋波の観測から求めた発達特性 (発達項) を用いているため、不完全ながら非線形エネルギー伝達項の効果が含まれているものの、直接的な定式化の形では考慮されていない (Isozaki・Uji, 1973)。一方、第三世代モデルである WAM では、 $S_{nl}$  は直接的に定式化されている (Hasselmann, 1962)。しかしながら、実際には共鳴する 4 波の組み合わせは無数存在するため、非線形効果を厳密な形で計算に組み込むことは殆ど不可能である。このため WAM では無限組の 4 波共鳴に伴う非線形エネルギー伝達を 1 組の組み合わせで代表させる離散相互作用近似法 (Discrete Interaction Approximation; DIA 近似) が採用されている (Hasselmann ら, 1985; The WAMDI Group, 1988; Komen ら, 1994)。

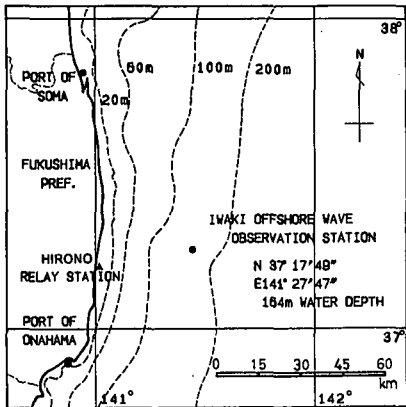
## 3. 検討方法

本研究では、現地観測データと MRI および WAM による推算値を比較することにより、WAM の推算精度に関する検討を行った。以下では、その際に用いたデータおよび推算条件等について述べる。なお、比較した項目は、有義波高、有義波周期および方向スペクトルである。

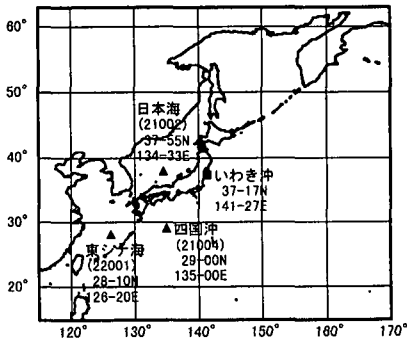
### 3.1 現地観測データ

運輸省第二港湾建設局が 1986 年 10 月に完成させたいわき沖波浪観測システム (以降、いわき沖と呼ぶ) の現

\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋環境部水理研究室長  
\*\* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室  
\*\*\* (株)ニュージェック  
\*\*\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室長



図一 いわき沖波浪観測システム位置



図一 観測位置図

地観測データを用いた。いわき沖観測局は、塩屋崎灯台の北東約 54 km (北緯 37°17'49", 東経 141°27'47") の水深 154 m の地点に位置し(図一), 従来では困難とされてきた沖波の波浪観測を実施している。観測局では、波浪観測機器として 4 台のステップ式波高計および水圧式波高計の装備された超音波式の水平 2 成分流速計が設置されており、最大 7 成分の観測データを取得することが出来る。観測データの取得は、毎偶数正時前後 20 分間、0.5 秒間隔のサンプリングで AD 変換を行っている。また有義波諸元の計算にはゼロアップクロス法を、方向スペクトルの推定には、橋本ら (1993) の拡張最大エントロピー原理法 (EMEP 法) を用いた。

3.2 入力風データ (ECMWF 風)

波浪推算の推算精度はモデル自体の精度とともに推算に用いる風の精度に強く依存する。波浪推算モデルは風から波浪へ輸送されるエネルギーを外力としているため、波浪推算結果の精度は入力風の精度を超えることはない。したがって、波浪推算を実施するうえで、用いる風データの精度を把握しておくことは必要不可欠である。

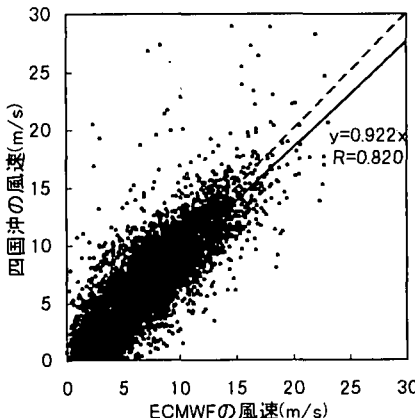
そこで、図二に示す気象庁パイによる日本海 (21002), 四国沖 (21004), 東シナ海 (22001) における 1993 年~1997 年の観測資料を用いて ECMWF 風の精度を検証した。なお、パイデータは海上 7.5 m での観測値である。

ECMWF の風は海上 10 m の風であるので、パイデータを高度補正する必要がある。ここでは次式に示す、1/7 乗則を用いて高度補正を行った。

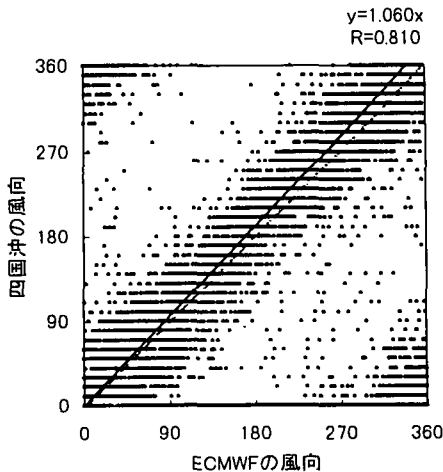
$$U_h = U_0(h/h_0)^{1/7} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $U_h$  および  $U_0$  は高さ  $h$  および  $h_0$  における風速 (m/s) である。

式 (3) を用いてパイデータの高度補正を行い、ECMWF の風データとの相関を計算した。そのうち四国



(a) 風速



(b) 風向

図三 風速・風向の相関図 (四国沖)

沖の相関図を図三に示す。図三より風速については多少のバイアスは認められるものの、相関係数は 0.82 であり、パイデータと ECMWF 風との相関は良好である。また、風向についても風速と比べると多少のばらつきがあるものの相関は良好である。なお、他の 2 地点について

も同様の結果が得られており、風速で相関係数は0.82~0.85, 風向で相関係数は0.70~0.81となっている。以上より、ECMWFの風は信頼できる精度を有するものと考えられる。

3.3 推算条件

計算およびECMWF風の入力、波浪推算結果の検討を行ういわき沖周辺海域で境界の影響を極力受けないようにするため、北緯15°~63°, 東経115°~170°(0.5°格子)の広い領域で行った(図-2参照)。計算は水深の影響を無視した深海条件で行い、方向スペクトルの方向分割数は両モデルとも16とした。検討対象はいわき沖で観測された高波上位30位(1993年)とし、その中から更に系統的・網羅的に種々の気象擾乱およびスペクトル特性を含むようにケースを選定した。なお、推算期間については、最大有義波高が観測された日時的前後約1週間(計2週間)とし、推算値と観測値の比較は、いわき沖観測局に最も近い計算メッシュ上の値を用いて実施した。

4. 検討結果

4.1 有義波諸元に関する検討

図-4は波浪推算を実施したすべての期間における推算および観測の有義波諸元を比較したものである。ただし、推算開始後4日間のデータは推算値に初期条件の影響が残っているものとして除外した。図-4より、MRI、WAMとも高波浪時に有義波高を過小評価し、その傾向はMRIの方が大きいことがわかる。有義波周期についてもWAMでは現地観測結果を良好に再現しているのに対し、MRIは全体的に過小評価している。このように、観測値と比べると波高を過小評価する傾向はあるものの、WAMはMRIに比べて波高・周期とも偏りが小さく、推算精度はWAMのほうが高いと言える。

4.2 方向スペクトルに関する検討

図-5は、日本海北部で発生した低気圧が本州北部を

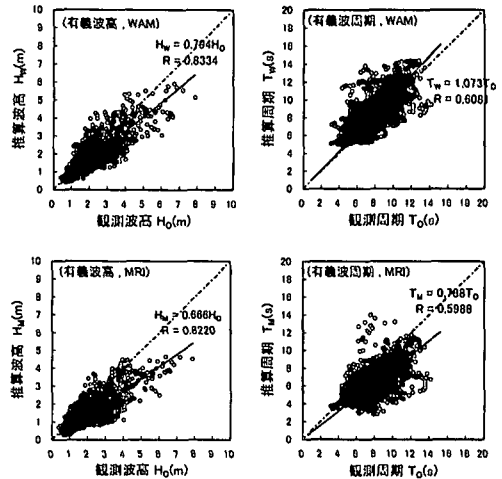


図-4 有義波高および有義波周期の相関図

縦断し、オホーツク海に抜けたケースについて、現地観測データ、WAMおよびMRIの有義波とECMWF風の時系列変化を示したものである。また、図-6はこの時の方向スペクトルを、発達時、ピーク時、減衰時と時間の経過とともに比較した図である。これらの図から、発達時に2方向であった現地波浪場がピーク時には1方向になり、減衰時には多方向になっていることが分かる。このような波浪場の変化はWAMでは再現されているものの、MRIにおいてはピーク時を除いて再現されているとは言い難い。この理由の一つとしては、減衰時におけるECMWF風の変化を見ると風場が急変した直後であり、風場の変化に対する応答性の違いによるものと考えられる。

4.3 風波およびうねり成分に関する検討

図-7に1993年3月9日から3月17日にかけて波浪推算を行った結果を示す。このケースは四国沖から関東地方をかすめるように発達しながら移動し、東方海上に

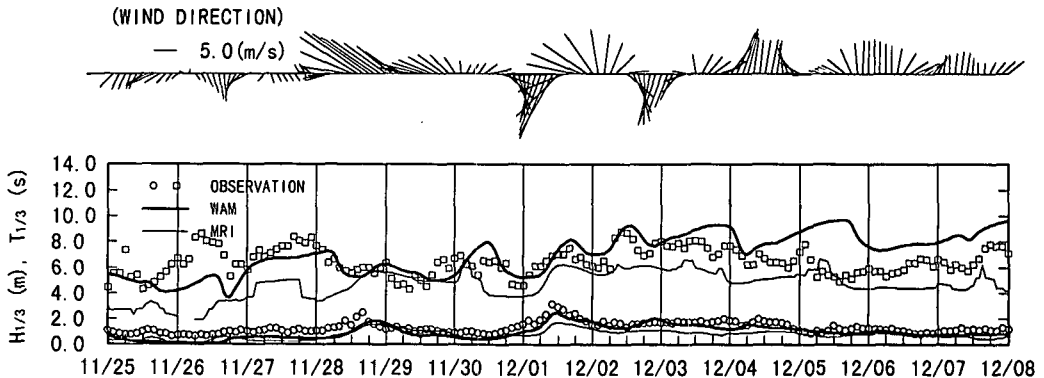


図-5 有義波諸元とECMWF風の時系列変化

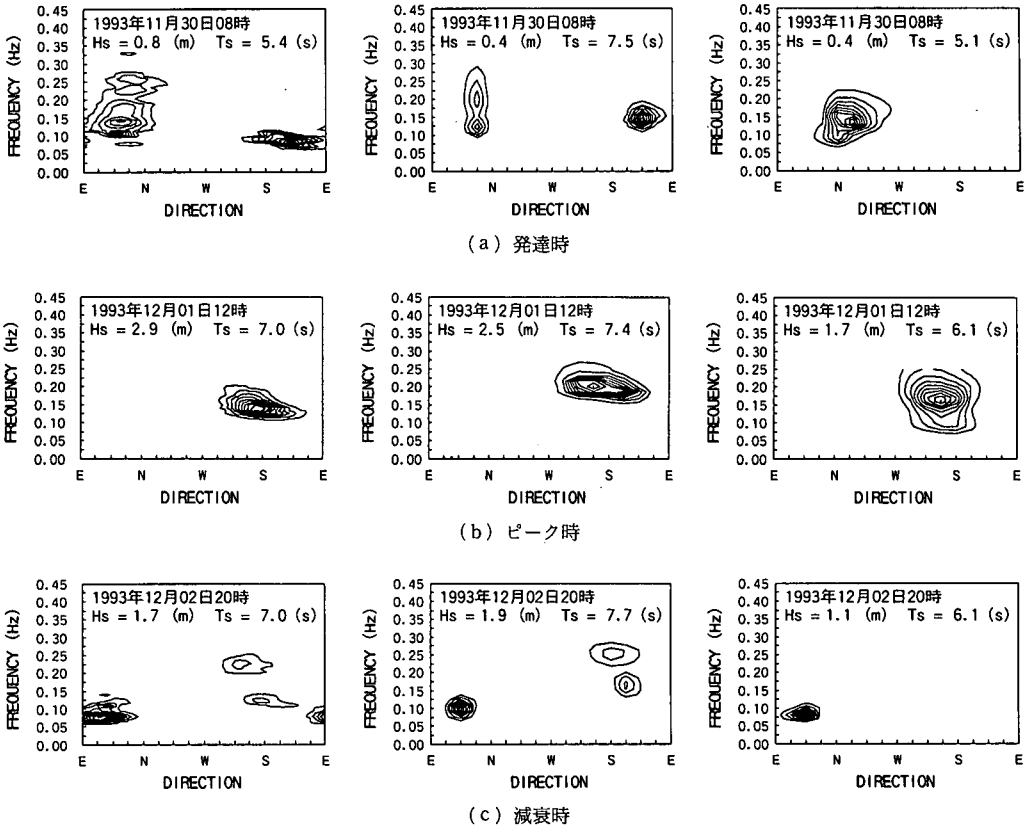


図-6 方向スペクトルの比較 (左: 観測値, 中央: WAM, 右: MRI)

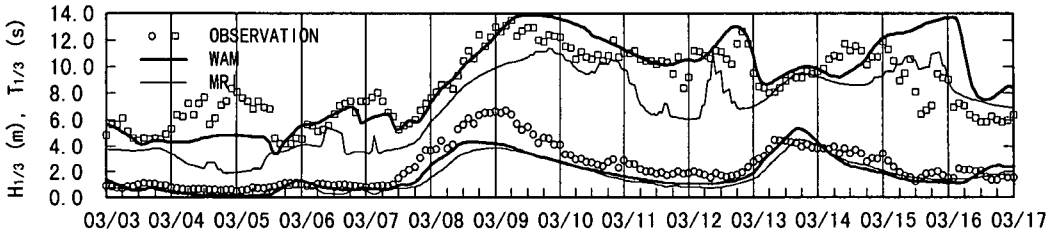
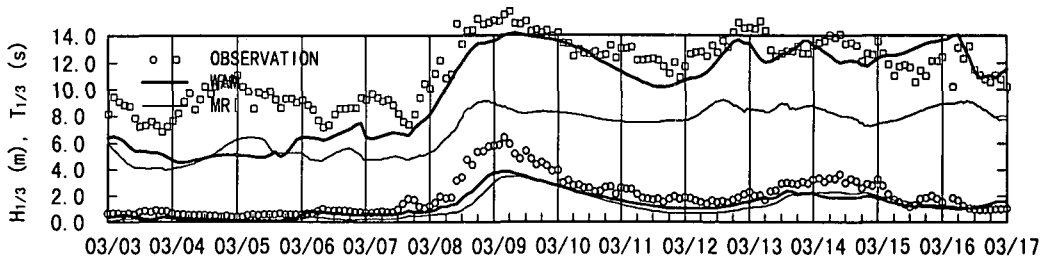


図-7 有義波諸元の時系列変化 (1993年3月3日~3月17日)

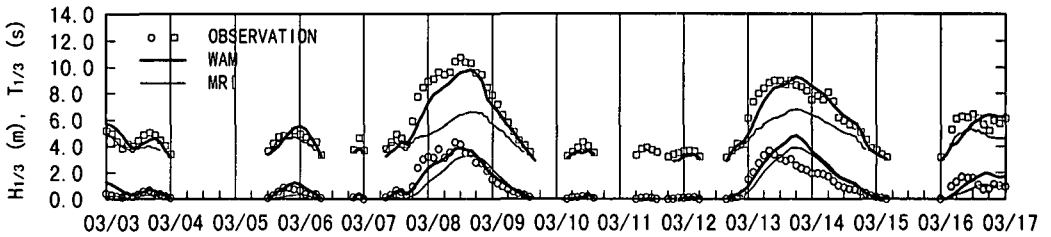
抜けた低気圧による高波を対象としたものである。この場合、3月9日0時付近のピーク前後の波浪を再現することができず、その差は波高にして2m以上となっている。図-8はこのケースについて風波成分とうねり成分に分離して比較したものである。これによると、ピーク出現付近の波浪を精度良く推算できなかったのはうねり成分を精度良く評価できなかったためであると考えられる。この原因としては以下のようなことが考えられる。すなわち、MRIでは風からのエネルギーの供給量と砕波による消散量とがバランスし、ある平衡スペクトルを形成するものと仮定し、式(4)で砕波による減衰を評価している。

$$S_{dis} = (A + B \cdot S)(S/S_{\infty})^2 \dots\dots\dots (4)$$

$S_{\infty}$ は平衡スペクトルであり、PMスペクトルを仮定している。このようにMRIではPMスペクトルによってスペクトル形が規定されており、うねりのようなエネルギーピーク付近の鋭いスペクトル形に対する適合性については精度に疑問がある。一方、WAMでも実際にはPMスペクトルに合うように種々のパラメーターがチューニングされている。また、計算時間ステップごとのエネルギーの増分に上限を設け、それ以上には発達しないようになっている。この他、エネルギーの伝播計算に1次の風上差分を用いていることから数値分散が大きい等の問題もある。このようなことが原因となりうねり成分が精度良く評価できなかったものと考えられる。



(a) うねり成分



(b) 風波成分

図-8 うねり成分と風波成分の時系列変化

## 5. おわりに

種々の気象擾乱を対象としてMRIおよびWAMによる推算結果と現地観測データとを比較した結果、MRIに比べてWAMの方が、有義波（とりわけ有義波周期）の値がより現地観測データに近い値であること、また方向スペクトルについても風場の変化に対する応答性も良く、二方向波浪場も含めて現地波浪場をより精度良く表現できるなど、WAMの優位性が明らかとなった。しかしながら、WAMにおいても波浪推算全般に言われているような高波浪時に波高を過小評価する傾向が依然として見られ、またWAMの長所と考えられていたうねりの評価が十分に出来ているとは言えないことなども明らかとなった。今後は、これらの問題点に関し、気象要因との関係も含め、更なる検討を行う予定である。

本研究を行うに際し、風解析値を提供して戴いたECMWFならびにパイロポット観測資料を提供して戴いた気象庁海務課に謝意を表します。

## 参考文献

- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃 (1993): 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港研報告, 第32巻第1号, pp. 3-25.
- Hasselmann, K. (1960): Grundgleichungen der Seegangsvorhersage, Schiffstechnik, 7, pp. 191-195.
- Hasselmann, K. (1962): On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part 1, General theory, J. Fluid Mech., 12, pp. 481-500.
- Hasselmann, S. and K. Hasselmann (1985): Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part 1: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral, J. Phys. Oceanogr., 15, pp. 1378-1391.
- Isozaki, I. and T. Uji (1973): Numerical Prediction of Ocean Wind Waves, Papers in Meteorology and Geophysics, Vol. 24, No. 2, pp. 207-231.
- Komen, G. J. and 5 authors (1994): Dynamics and Modelling of Ocean Waves, Cambridge University press.
- The WAMDI Group (1988): The WAM model-A third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., 18, pp. 1775-1810.