

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 970 Dec. 2000

波浪推算法による台風9918号の異常波浪の再現計算

橋 本 典 明  
真 期 俊 行  
吉 松 み ゆ き

運輸省港湾技術研究所



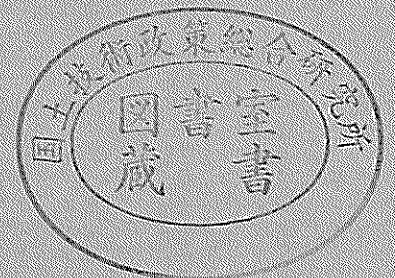
# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

台風9918号高潮災害関連 Dec. 2000

- No. 969 台風9918号による西日本沿岸の波浪と潮位の出現特性
- No. 970 波浪推算法による台風9918号の異常波浪の再現計算
- No. 971 台風9918号による高潮の現地調査と追算
- No. 972 台風9918号による越波災害に関する一考察
- No. 973 台風9918号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験
- No. 974 台風9918号による虹ヶ浜海岸の高潮災害

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 海上風の推算	4
2.1 台風モデル	4
2.2 マスコンモデル	5
2.3 海上風の推算結果の検討	5
3. 波浪推算	8
3.1 MRI（第1世代波浪推算法）の概要	8
3.2 WAM（第3世代波浪推算法）の概要	9
3.3 波浪推算条件	10
3.4 波浪推算結果の検討	11
4. 結 論	32
5. あとがき	33
参考文献	33

# Investigation of Storm Waves Caused by Typhoon 9918 with Wave Hindcasting Methods, WAM and MRI

Noriaki HASHIMOTO\*  
Toshiyuki MAKI\*\*  
Miyuki YOSHIMATSU\*\*\*

## Synopsis

Typhoon 9918 hit the Kyushu-Yamaguchi area early in the morning on September 24, 1999. This caused the serious damage and casualties in the area with strong wind, storm surge and high waves. The wave observation has been carried out at Kanda offshore wave observation station where the typhoon center passed nearby. Water surface elevation, pressure and water particle velocities were measured at the station during the typhoon passing. The wave data analyses as well as the directional wave analyses were carried out for the records. The record of the maximum significant wave height observed at the station was updated by this typhoon.

In this paper, we investigated the severe sea conditions around the Kyushu-Yamaguchi area caused by the typhoon 9918 by using the wave hindcasting method. At the beginning of the investigation, the wind field was simulated by using the typhoon model (Myers' model) with appropriate parameters. Especially, the wind field on the Sea of Suou surrounded by the lands was carefully examined with the measured wind data, and was corrected in consideration of the influence of the lands. Based on the simulated wind field data, we simulated the sea conditions by using the third generation wave hindcasting model, WAM. As a results of the simulations, some characteristics of the sea conditions caused by the typhoon was clarified. In addition to the simulations with WAM, we also simulated the sea conditions by using the first generation wave hindcasting model, MRI, since it has so far been practically used for design of port and harbor structures in Japan. This paper discussed the accuracy and applicability of the WAM and MRI models based on the observed records such as wave heights and periods as well as the directional wave spectra.

**Key Words:** WAM, MRI, typhoon 9918, wave hindcasting, directional spectrum

---

\* Chief of Hydrodynamics Lab., Marine Environment Div.

\*\* Trainee of Hydrodynamics Lab., Marine Environment Div. (NEWJEC Inc.)

\*\*\* Member of Hydrodynamics Lab., Marine Environment Div.

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445016 Fax : +81-468-441274 e-mail:hashimoto@cc.phri.go.jp

# 波浪推算法による台風 9918 号の異常波浪の再現計算

橋 本 典 明\*  
真 期 俊 行\*\*  
吉 松 みゆき\*\*\*

## 要 旨

平成 11 年 9 月 24 日早朝、九州に上陸した台風 9918 号によって、九州・山口地方では多数の死傷者を出すなどの甚大な被害を被った。台風の中心付近が通過した萩田沖では波浪観測が実施されているが、台風 9918 号によってこれまでに観測された既往最大有義波高の記録が更新された。

本研究では、波浪推算法を用いて、台風 9918 号による異常波浪の再現計算を行った。再現計算に際しては、最初に台風モデル (Myers の方法) を用いて風場の推算を行い、特に、内湾海上風を対象とした風観測値の再現性を検討した。その結果、内湾海上風については陸上地形の影響を考慮した修正を行い、その妥当性を確認した。その後で、この風推算値に基づいて第 3 世代波浪推算モデル (WAM) を用いて波浪場の再現計算を行い、台風 9918 号による沿岸波浪の出現特性を検討した。また、我が国で長年用いられてきた実績のある第 1 世代波浪推算モデル (MRI) を用いて同様の再現計算を行い、両モデルによる波浪場の再現性の比較を行った。推算結果の評価に際しては、有義波高などの有義波諸元および方向スペクトル観測値との比較を行うことにより、これら既往の波浪推算法の推算精度や適用性および問題点等について検討した。

キーワード：WAM, MRI, 台風 9918 号, 波浪推算, 方向スペクトル

---

\* 海洋環境部水理研究室長

\*\* 海洋環境部水理研究室受託研修生 (株式会社ニュージェック)

\*\*\* 海洋環境部水理研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

電話：0468-44-5016 Fax：0468-44-1274 e-mail:hashimoto@cc.phri.go.jp

## 1. まえがき

台風9918号は平成11年9月19日に宮古島付近で発生し、その勢力を増大させながら北東進し、24日早朝、熊本県北部に上陸した。その後、九州を通過し周防灘に抜けた後、24日9時前に山口県宇部市付近に再上陸した。その後は日本海に抜け北海道に再々上陸した後、オホーツク海で温帯低気圧になった。台風の通過に伴い、熊本県不知火町では高潮により死者12人を出すなど、各地で甚大な被害をもたらした。また、熊本県牛深市で最大瞬間風速66.2m(牛深測候所における観測史上最大)を観測するなど、九州・山口地方全域を風速25m以上の暴風が吹き荒れた。

図-1は台風9918号の経路を図示したものである。この台風の中心付近が通過した荊田沖では、有義波高 $H_{1/3}=3.46\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=8.1\text{s}$ の波浪が観測されており、これまでに観測された既往最大有義波高を更新した。また、荊田沖では波浪観測に加えて波向観測も実施されており、台風9918号通過時の方向スペクトルが観測されている<sup>1)</sup>。

本研究では、波浪推算法により台風9918号通過時の波浪場の再現計算を行った。再現計算に際しては、最初に台風モデル(Myersの方法)を用いて風場の推算を行い、特に、内湾海上風を対象とした風観測値の再現性を検討した。その結果、内湾海上風については陸上地形の影響を考慮した修正を行い、その妥当性を確認した。その後で、この風推算値に基づいて第3世代波浪推算モデル(WAM)を用いて波浪場の再現計算を行い、台風9918号による沿岸波浪の出現特性を検討した。また、我が国で長年用いられてきた実績のある第1世代波浪推算モデル(MRI)を用いて同様の再現計算を行い、両モデルによる波浪場の再現性の比較を行った。推算結果の評価に際しては、有義波高などの有義波諸元および方向スペクトル観測値との比較を行うことにより、これら既往の波浪推算法の推算精度や適用性および問題点等について検討した。

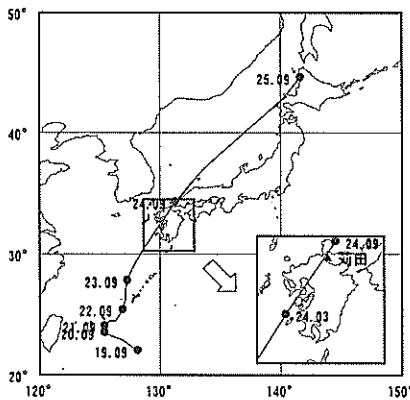


図-1 台風9918号の経路図

## 2. 海上風の推算

波浪推算を実施するためには、最初に入力条件としての海上風を推算する必要がある。台風による風場を推算する場合、一般に台風モデルが用いられる。また、内湾海上風を推算する場合には、陸上地形の影響を考慮するために、しばしばマスコンモデルが用いられる。ここではまず、台風モデルについて概説し、次いでマスコンモデルについて概説する。その後で、特に内湾海上風を対象として、これらの推算法を用いて推算された風推算値と風観測値を比較した結果について述べる。

### 2.1 台風モデル

台風モデルを用いた風推算では、台風の中心位置、中心気圧と台風の規模を表現する台風半径をパラメータとして計算される。台風の気圧分布の推定式は、次式で表されるMyersの式が有名であり、波浪推算や高潮計算でしばしば用いられる。

$$P = P_c + \Delta P \exp(-r_0 / r) \quad (1)$$

ここに、 $P$ は台風中心から距離 $r$ における気圧、 $P_c$ は台風中心気圧、 $\Delta P$ は中心示度( $\Delta P = P_\infty - P_c$ )、 $P_\infty$ は台風から遠く離れた地点での気圧で、通常1013hPa、 $r_0$ は台風半径であり、台風中心から最大風速発生地点までの距離に相当する。式中の $\Delta P$ および $r_0$ は、実測台風の気圧分布に対するあてはめによって定める。Myersの式の場合には、台風中心からの距離の逆数を横軸にとり、その地点の気圧の値を対数目盛で縦軸にとって直線のあてはめを行うことによって定めることができる。

台風内の風の分布 $U(r)$ は、台風内の傾度風 $F(r)$ をMyersの式(1)を用いて求め、風速の低減係数 $C_1$ および海上風と等圧線のなす角 $\alpha$ を考慮し、さらに台風の移動によって生ずる場の風を考慮して次式で与えられる。

$$U(r) = C_1 F(r) \sqrt{1 + M^2 - M(\sin \theta_0 - \sqrt{3} \cos \theta_0)} \quad (2)$$

ここに、

$$F(r) = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_a} \frac{r_0}{r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) + \left(\frac{f}{2r}\right)^2} - \frac{f}{2} r \quad (3)$$

$$M = V / F(r_0) \quad (4)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left\{ (\sqrt{3} + 2M \cos \theta) / (1 - 2M \sin \theta) \right\} \quad (5)$$

であり、 $C_1$ は定数で、0.6~0.7の値が用いられることが多い。 $F(r)$ は台風が静止した状態における傾度風速、 $\theta_0$ は台風中心から対象とする地点への方向と台風の進行方向と直角方向のなす角、 $V$ は台風の進行速度、 $f$ はコリオリ係



数 ( $f = 2\omega \sin\theta$ ),  $\omega$  は地球自転の角速度,  $\theta$  は緯度,  $\beta$  は対象地点の風向とその点と台風中心への方向とのなす角である。

以上のように, 台風内の風は, 中心へ向かって対称に吹き込む傾度風と, 台風の移動に伴って生じる場の風とのベクトル和で与えられる。場の風の影響で, 台風の進行方向の右半分は風が強いので危険半径と呼ばれ, 左半分は風がやや弱いので可航半径と呼ばれる。

## 2.2 マスコンモデル

マスコンモデルは, 風速の3次元空間分布の初期値を与え, 陸上地形の影響を考慮して次式で表される質量保存則を満たすように初期風場を修正する方法である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

すなわち, マスコンモデルでは, 式(6)を束縛条件として初期風場と修正される風場の差の分散を最小にする風場を変分法を用いて推定する方法で, その元となる積分関数は式(7)で表される。

$$E(u, v, w, \lambda) = \int \left[ \alpha_1^2 (u - u_0)^2 + \alpha_1^2 (v - v_0)^2 + \alpha_2^2 (w - w_0)^2 + \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] dx dy dz \quad (7)$$

ここに,  $u, v, w$  は質量保存則を満たすように修正される風速,  $u_0, v_0, w_0$  は初期風速,  $\lambda$  はラグランジュの未定乗数,  $\alpha_1, \alpha_2$  はガウスの精度係数である。

初期風場が真の解のよい近似値であると仮定すると, 式(7)で表される調整量ができるだけ小さくなることが望ましい。そこで, ラグランジュの未定乗数法を用いると, 式(7)が最小解を持つための条件は, 式(8)~式(11)で与えられる。

$$u = u_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (8)$$

$$v = v_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \quad (9)$$

$$w = w_0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

式(8)~式(10)をそれぞれの方向で微分し, 式(11)に代入すると次式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 = -2\alpha_1^2 \left( \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right) \quad (12)$$

式(12)より  $\lambda$  を求め, 式(8)~式(10)に代入すると, 質量保存則を満たすように修正された各風速成分が求められる。なお, 底面, 側面の境界条件は次式で表される。

$$\frac{\partial \lambda}{\partial n} = 0 \quad (13)$$

ここで,  $n$  はそれぞれの方向の単位法線ベクトルである。

## 2.3 海上風の推算結果の検討

ここでは, いくつかの海上風の推算方法を用いた場合の風推算結果について述べる。

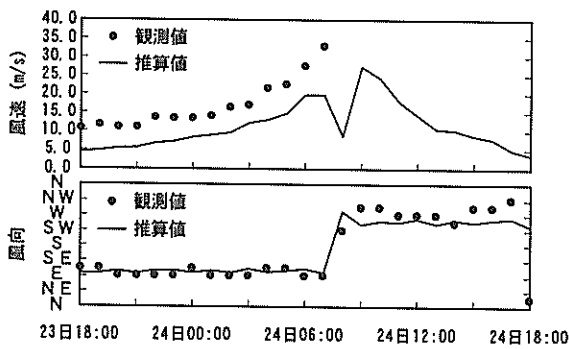
### (1) 台風モデルによる海上風の推算結果

まず台風モデルによる風推算結果について述べる。本研究では, 台風中心位置, 台風半径などの台風パラメータを1時間間隔で与え, 1時間毎に風向・風速を推算した。ただし, 傾度風から海上風へ変換する風速の低減係数は, 日本近海で一般に用いられる  $C = 0.6$  とし, 風向の偏向角は  $30^\circ$  とした。

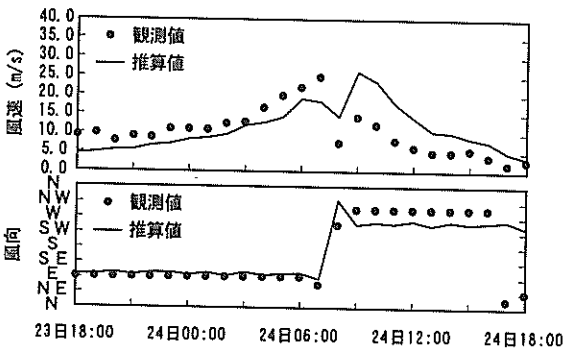
図-2 は荻田沖および新門司の風推算値と風観測値の時系列図を示したものである。図中の●が観測値, 実線が推算値である。荻田では台風の接近・通過に伴い風速が増大し, 9月24日7時に最大風速 33(m/s)が記録されており, 以降は計器の故障のため欠測となっている。なお, 荻田の風観測データは荻田沖約6kmの位置に設置された海象観測塔で観測されたものであり, 台風9918号による周防灘における内湾海上風を直接計測している唯一の観測データである。新門司の風観測データは陸上で観測されたデータであるが, 観測地点周辺に山や構造物が少なく, 比較的海上風に近い特性を示しているものと考えられる。この他にも, アメダスの観測点等いくつかの風観測データが得られていたが, いずれも陸上地形の影響を強く受けた観測データであったため, 本研究では風推算値の検証データとして用いるのはやめた。

図-2に示すように, 台風接近時の風推算値は観測値に比べて風速が小さく推算されている。その後, 台風通過後に風向が変わり, 風が陸から吹いてくると, 風速はかなり大きく推算されている。

このように, 台風モデルを用いて推算された海上風は, 陸上地形の影響を強く受ける内湾域では観測値とかなり異なる傾向を示し, 台風モデルによる推算風をそのまま用いることはできない。陸上地形の影響を考慮した何らかの修正が必要である。



(1) 荻田



(2) 新門司

図-2 台風モデルによる風推算結果

(2) マスコンモデルによる内湾海上風の推算結果

周防灘を対象として台風モデルを用いて風推算を行った結果、風が海から吹く場合は風速が小さく、陸から吹く場合は大きく推算され、観測値と異なる傾向を示した。この原因の1つは、陸上地形の影響が考慮されていないことによるものであると考えられる。そこで、マスコンモデルを用いて台風モデルで計算された風場の修正を行った。

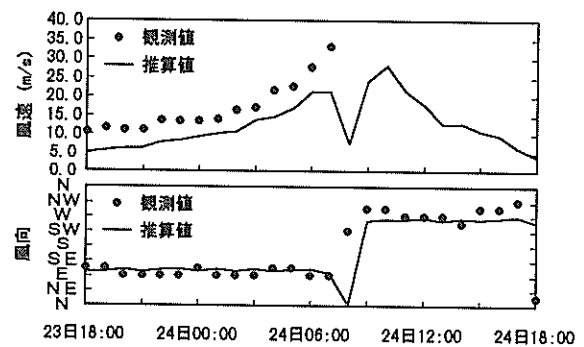
マスコンモデルで海上風の修正を行った風推算結果を図-3に示す。なお、マスコンモデルで海上風の修正を行う場合、図-2に示す風場を初期風としてそのまま用いれば、マスコンモデルによって推算される海上風は図-2の結果よりもさらに小さい風速が推算されることが予想される。そこで、マスコンモデルに用いる初期風は、台風モデルの海上風への風速の低減係数を0.9として大きめの初期風を用いて計算した。ただし、風向の偏向角は図-2の場合と同様に30°を用いている。

また、マスコンモデルは3次元空間で風速を修正する方法である。一方、台風モデルは、風速の水平成分  $u$ 、 $v$  を推算する方法で、風速の鉛直成分  $w$  は台風モデルからは推算されない。そこで、ここでは、より適切な初期風場を与えるために、海上風には上記の計算値を用い、上空の自由

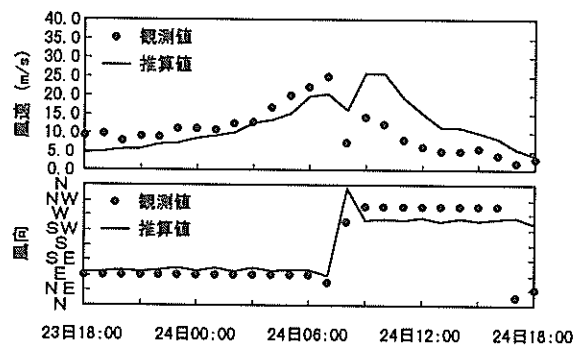
大気の場合は、風速の低減係数を1.0とし、偏向角を0°とした風場を与え、風速の水平成分  $u$ 、 $v$  の鉛直分布を海上風と自由大気の間で線形内挿して与え、さらに連続式を用いて風速の鉛直成分  $w$  を各層毎に計算して求め、これらの値を初期風場としてマスコンモデルを適用した。

図-3はマスコンモデルで修正された風推算値と観測値の時系列図である。図-3に示すように、海上風の初期風に大きめの値を用いてマスコンモデルを適用したにもかかわらず、風推算値の風速は海から風が吹く場合、観測値よりも過小に推算されており、観測値をうまく再現することはできなかった。

マスコンモデルは前述のように、3次元空間の風場を対象として、初期風が真の解のよい近似値であるという仮定の下で風速を修正する方法であり、推算精度は初期風の精度に大きく依存する。一方、台風モデルでは、陸上地形の影響を受けない海上で風速の水平成分  $u$ 、 $v$  を近似的に推算する方法で、例えば台風中心付近の上昇流などの台風固有の3次元構造を表現するモデルではない。今回の検討では、この点で便宜的な工夫を導入して検討したが、満足できる結果は得られなかった。今後、陸上地形の影響を考慮し、より適切な内湾海上風の推算を行うためにマスコンモデルを適用する場合には、より適切な3次元構造を有する初期風場を与える工夫が必要であると考えられる。



(1) 荻田



(2) 新門司

図-3 マスコンモデルによる風推算結果



(3) 陸上地形の影響を考慮した海上風の推算結果

上記のように、マスコンモデルを用いた場合でも、内湾域の風観測値を適切に再現することはできなかった。そこで、ここでは風向の偏向角を30°とし、風速については風が吹いてくる方向の陸上地形の影響を考慮して、風速の低減係数を0.3~0.9まで適宜変化させることにより海上風を推算した。すなわち、図-4に示すように、対象とする格子点から風が吹いてくる方向5km地点周辺の格子点(25個の格子)の状況により、風速の低減係数を式(14)により算出するものである。ここで、 $N$ は海の格子数である。なお、この方法により低減係数を変化させて風場を推算するのは、後述する小領域の内、陸上地形の影響が大きいと考えられる周防灘周辺海域のみとし、その他の領域については、風速の低減係数は0.6、偏向角は30°として推算した。また、周防灘周辺海域の風推算で、台風が荻田沖を通過した後(24日8時以降)については、吹き返しの風が大きく推算されてしまうため、式(14)により計算された低減係数が0.55を越えた場合は便宜的に低減係数を0.55として計算することとした。

$$C = \frac{N}{25}(0.9 - 0.3) + 0.3 \quad (14)$$

図-5は、以上の方法により推算した風場の平面分布を示したものである。この図より陸地の影響を受けている領域では風速が小さくなっていることがわかる。

図-6は、荻田および新門司の風推算値と風観測値を時系列図で比較したものである。新門司では、台風中心が通過した24日8時の風速の減少や風向の変化など、推算値は観測値をよく再現していることが分かる。荻田においても、24日7時の風速30m/s以上の風が再現されている。その他、アメダスの観測地点等、他の風観測値についても推算風による観測風の再現性は概ね良好であったため、この推算風を用いて以後の波浪推算を実施することとした。

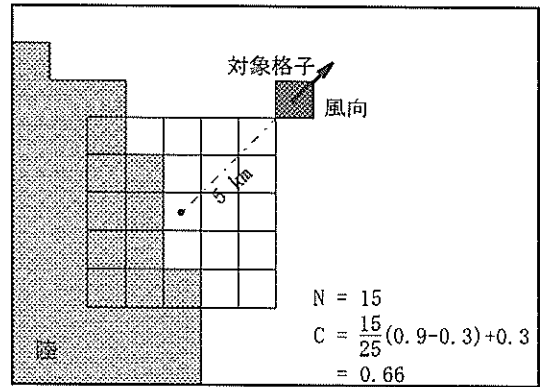
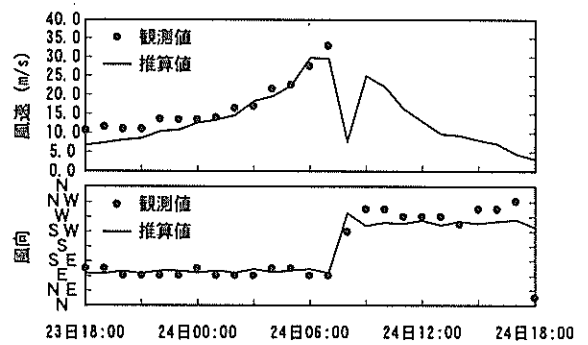
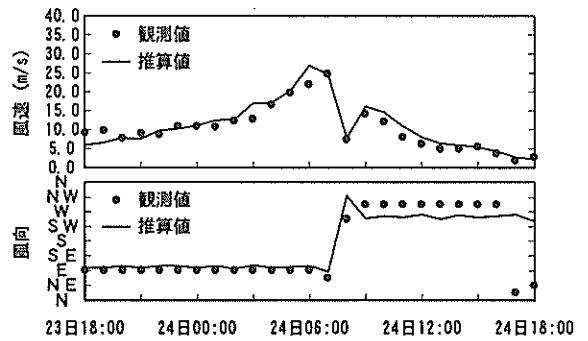


図-4 風速低減係数の概念図



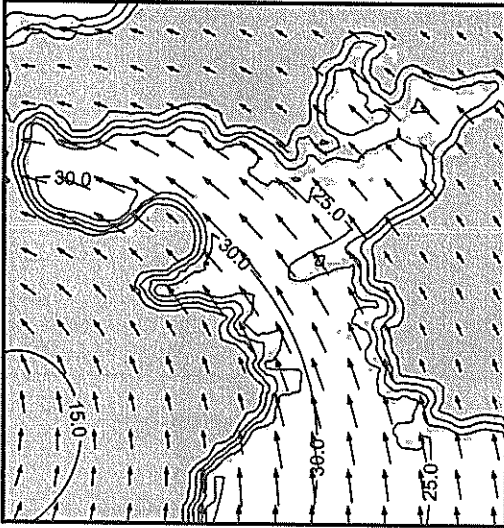
(1) 荻田



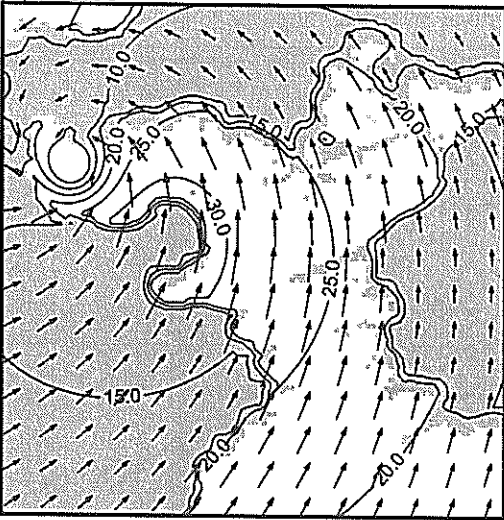
(2) 新門司

図-6 推算風と観測風との比較

9/24 6:00



9/24 8:00



9/24 10:00

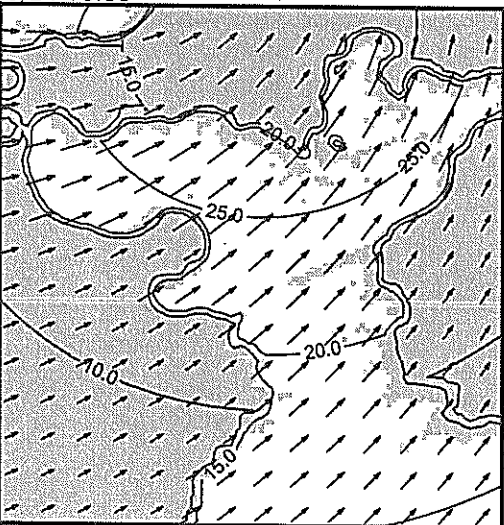


図-5 風推算結果 (単位: m/s)

### 3. 波浪推算

我が国では、港湾構造物の設計等の実務に気象庁で開発されたMRI<sup>2)</sup>が標準的な波浪推算法として長年にわたって用いられてきた。しかしながら、諸外国では既にWAMに代表される第3世代波浪推算モデルが標準的に用いられ始めている。そこで本研究では、最新のWAM Cycle-4を用いて台風9918号による波浪場の再現計算を行い、波浪の出現特性を検討した。また、我が国で長年用いられてきた実績のあるMRIを用いて同様の計算を行い、両モデルの推算精度や特性を比較することにより、今後、より高精度かつ信頼性の高い波浪推算法を開発するための基礎資料として資することとした。

#### 3.1 MRI (第1世代波浪推算法) の概要

MRIは第1世代の波浪推算法に属するモデルで、波浪スペクトルを構成する各成分波は互いに独立であると仮定されている。すなわち、非線形相互作用によるエネルギー輸送項は無視されており、個々の成分波は独立に発達・伝播および減衰する。また、最盛時の波浪スペクトルがPierson-Moskowitzスペクトル (PMスペクトル) に漸近するように、スペクトルのエネルギー分布形に便宜的な仮定が導入されている。

MRIにより波浪スペクトルの時間的・空間的な発達・減衰を計算するための基礎方程式は、深海条件でかつ流れのない場合には次式で表される。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + C_g \cdot \nabla E = S$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$$
(15)

ここに、 $E = E(f, \theta)$ は周波数 $f$ 、方向角 $\theta$ の方向スペクトル、 $C_g$ は成分波の群速度である。また、 $S$ はエネルギーソース関数と呼ばれるもので、次式で表される。

$$S = S_{in} + S_{dis}$$
(16)

ここに、 $S_{in}$ は風から波へ輸送されるエネルギー輸送項、 $S_{dis}$ はエネルギー消散項である。

風から波へのエネルギー輸送項 $S_{in}$ は一般に次式で与えられる。

$$S_{in} = A + B \cdot E$$
(17)

ここに、 $A$ および $B$ は、風波の発生・発達を支配するPhillipsの共鳴機構およびMilesの不安定機構に関する係数で、MRIではInoue<sup>3)</sup>が過去の観測結果を用いて検討・提案した式を用いている。ただし、これらの提案式は観測値に基づいて係数が決定されているため、風から波へのエネルギー輸送項の中には、他の物理機構、例えば非線形相互

作用の効果などが不完全ながら間接的に含まれている。

MRI で用いられているエネルギー消散項では次式の3つの効果が考慮されている。

$$S_{dis} = S_b + S_d + S_w \quad (18)$$

ここに、 $S_b$  は砕波によるエネルギー消散項、 $S_d$  は内部摩擦によるエネルギー消散項、 $S_w$  は逆風によるエネルギー消散項であり、それぞれ次式で表される。

$$S_b = -(A + BE) \left( \frac{E}{E_\infty} \right)^2 \quad (19)$$

$$S_d = -D_1 \cdot f^4 \cdot E \quad (20)$$

$$S_w = -(B + D_2 \cdot f^4) E \quad (21)$$

ここに、 $E_\infty$  は平衡スペクトルであり、MRI では前述のように PM スペクトルを仮定している。また、 $D_1$  はエネルギー供給がなければ周期3秒以下の波が1時間で消滅してしまうように経験的に定められた定数で、 $D_1 = 3$ 、 $D_2 = 3$ としている。

式(19)に示されているように、波のエネルギーは PM スペクトルにより規定されるため、例えば、波の発達時にスペクトルピークが平衡スペクトルよりも大きくなるオーバーシュート現象を再現することはできない。

また、式(21)で示される逆風によるエネルギー消散は波の発達と逆の過程をたどるものと仮定されている。

### 3.2 WAM (第3世代波浪推算法) の概要

WAM<sup>4, 5)</sup> は K.Hasselmann や G.J.Komen らが中心となって世界各国の波浪を研究している物理学者らを集めて結成した WAMDI グループによって開発された第3世代波浪推算モデルである。WAM はその後も改良が重ねられ、現在では WAM Cycle-4 と呼ばれるモデルが最新のモデルである。WAM では、直角座標系と球面座標系の2つの基礎方程式が用意されている。深海条件で流れのない場合、球面座標系で表した基礎方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\phi} \cos \phi E) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} E) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} E) = S \quad (22)$$

ここに、

$$\dot{\phi} = \frac{C_g \cos \theta}{R} \quad (23)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{C_g \sin \theta}{R \cos \phi} \quad (24)$$

$$\dot{\theta} = \frac{C_g \sin \theta \tan \phi}{R} \quad (25)$$

であり、 $\phi$ 、 $\lambda$  および  $\theta$  はそれぞれ緯度、経度および波向、 $R$  は地球の半径である。WAM のエネルギーソース関数には、次の3つの項が考慮されている。

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} \quad (26)$$

ここに、 $S_{nl}$  は非線形相互作用によるエネルギー輸送項であり、この項を陽的に考慮している点が WAM の特徴である。それぞれのソース項は以下のように表される。

$$S_{in} = B \cdot E \quad (27)$$

$$S_{dis} = -\gamma_d \cdot E \quad (28)$$

$$S_{nl}(\mathbf{k}_4) = \omega_4 \int \int \int Q(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) \times \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \cdot \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \times \{n_1 n_2 (n_3 + n) - n_3 n (n_1 + n_2)\} d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 d\mathbf{k}_3 \quad (29)$$

ここに、 $n_i = n(\mathbf{k}_i) = E(\mathbf{k}_i) / \omega_i$ 、( $i=1,2,3$ ) は波の作用密度 (Wave action) で、積分の核関数  $Q$  はスペクトル成分の結合係数、 $\delta$  はデルタ関数を表す。デルタ関数は非線形相互作用の共鳴条件を表しており、以下の2つの関係を満足する4つの成分波間でエネルギー輸送が生じる。

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 &= \mathbf{k}_a = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 \\ \omega_1 + \omega_2 &= \omega_a = \omega_3 + \omega_4 \end{aligned} \quad (30)$$

ここに、 $\mathbf{k}$  は波数ベクトル、 $\omega$  は角周波数、添え字は4つの成分波を示す。

式(27)に示すように、WAM のエネルギー入力項では、Phillips の共鳴機構に該当する項は無視されている。また、係数  $B$  については、Janssen が提案した quasi-linear 理論<sup>6, 7)</sup> が用いられている。この理論の採用により、同じ風場が与えられた場合でも、海面の状態に依存して風から波へのエネルギー輸送量が異なり、波齢の若い波ほど風から波へのエネルギー輸送が活発に行われるなど、より現実に近い物理現象を表現できるように改良された。

WAM のエネルギー消散項では、式(28)に示すように、MRI のような平衡スペクトルが仮定されていないことも大きな特徴である。

なお、式(29)に示す非線形相互作用項は、Hasselmann<sup>8)</sup> により1962年に理論的に導かれたもので、これを厳密に計算するためには多大な計算時間を要する。そこで、WAM では非線形相互作用項の計算には、S.Hasselmann and K.Hasselmann が開発した離散相互作用近似 (Discrete Interaction Approximation; DIA)<sup>9)</sup> を用いている。これは、無数の4波共鳴に伴う非線形エネルギー輸送をたった1組の組合せで代表させて計算する近似法である。

### 3.3 波浪推算条件

波浪推算に用いる計算格子は、大・中・小の多重格子を用いて推算することとし、波浪観測値と推算値との比較による推算精度の検討は、小領域の推算結果を用いることとした。

図-7に示すように、大領域は東シナ海から西日本周辺海域、中領域は九州沿岸海域を対象とし、小領域については苅田沖を対象とした周防灘周辺海域および九州南部周辺海域の2つの領域について推算を実施した。

表-3.1は計算格子の条件を示したものである。また、表-3.2は計算条件を示している。波浪推算を実施する際の諸条件は、WAMとMRIとでなるべく同じ条件を設定したが、プログラム上の問題で、計算時間ステップなど、完全に同じ条件を設定することはできなかった。すなわち、WAMでは各格子の大きさ毎に計算条件を設定し、それぞれ独立して個別に計算するのに対し、MRIでは大・中・小領域を一括して計算するためである。このため、WAMでは計算格子の大きさによって計算時間ステップを変えて計算できるが、MRIの計算時間ステップは各格子の大きさによって変えることができず、全ての計算時間ステップを小格子の計算時間ステップに合わせ、同一の計算時間ステップで計算したためである。なお、波浪推算を実施する際の入力条件となる風場は、前述の方法により推算した1時間間隔の風推算値を用い、小領域の周防灘周辺海域を対象とする場合のみ陸上地形の影響を考慮して修正した風推算値を用いることとした。

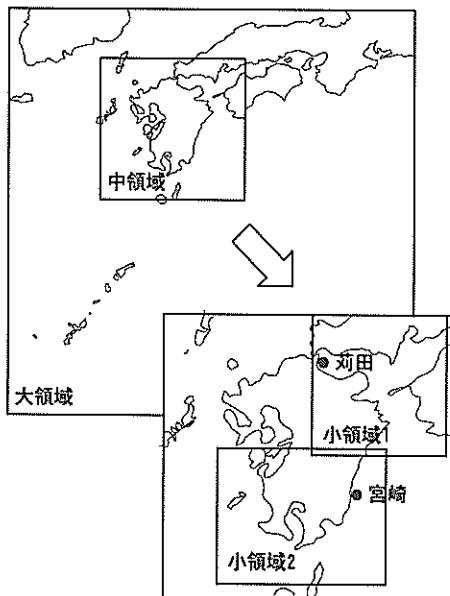


図-7 波浪推算計算格子

表-3.1 格子条件

	大領域	中領域	小領域1	小領域2
対象海域	東シナ海から西日本周辺	九州沿岸	周防灘周辺	九州南部沿岸
緯度範囲(北緯)	24.0° ～ 36.0°	30.3° ～ 34.7°	32.4° ～ 34.5°	30.5° ～ 32.5°
経度範囲(東経)	126.0° ～ 138.0°	128.7° ～ 133.0°	130.9° ～ 132.9°	129.5° ～ 132.0°
格子間隔	1/6°	1/18°	1/54°	1/54°

表-3.2 計算条件

		WAM	MRI
計算時間ステップ	大領域	300s	60s
	中領域	120s	60s
	小領域1	60s	60s
	小領域2	60s	60s
入力風の時間ステップ		1時間	
スペクトル分割	周波数領域 (Hz)	0.042～0.453	0.04～0.25
	周波数分割数	25	22
	周波数間隔	対数間隔(倍率 1.1)	等間隔(0.01Hz)
	方向分割数	16 ( $\Delta\theta = 22.5^\circ$ )	



### 3.4 波浪推算結果の検討

まず、入力風の違いにより波浪推算結果がどのように変化するか確認するために、陸上地形の影響を考慮して推算した推算風を用いた場合と、風速の補正係数を  $C = 0.6$  として推算した海上風を用いた場合について、WAM を用いて波浪推算を実施した。図-8 に苅田沖における波浪推算結果を比較したものを示す。図-8 より陸上地形の影響を考慮した推算風を用いた場合は、観測値を良好に再現していることがわかる。しかし、風速の補正係数を一律  $0.6$  として推算した海上風を用いた場合は、波高・周期とも観測値を再現できず過小評価している。推算風と観測風の比較図（図-2、図-6）をみると、陸上地形を考慮した場合は観測風を良好に再現しているのに対し、補正係数を  $0.6$  とした場合は台風が苅田沖を通過する 24 日 8 時以前の風速が過小評価されている。したがって、風速の補正係数を  $0.6$  とした場合には、波浪の発達段階における風速が小さいことが原因となり、波浪の発達を十分に再現できなかったものと考えられる。

そこで、ここでは陸上地形の影響を考慮した推算風を用いて波浪推算を実施し、その推算結果について検討をするものとする。

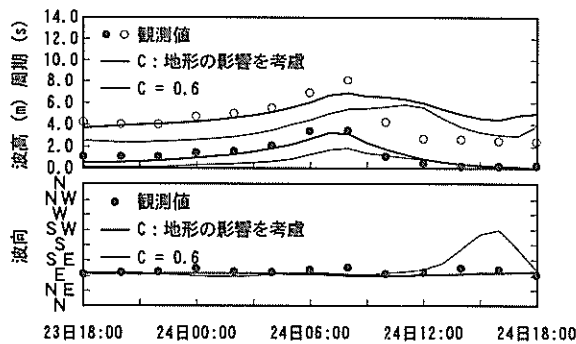


図-8 波浪推算結果の比較

#### (1) 大領域の波浪推算結果

図-9 は 9 月 23 日 14 時～9 月 24 日 12 時の WAM による波浪推算結果で、大領域における有義波高と有義波周期の平面分布図を示したものである。波浪推算に際しては実際には 1 時間毎の推算結果を保存しているが、ここでは 2 時間毎の推算結果を示している。図-9 の左図は有義波高の平面分布図、右図は有義波周期の平面分布図である。図中の矢印は波向を示している。なお、図では矢印による波向を見やすくするため、5 格子毎に波浪推算結果を抽出して図示している。

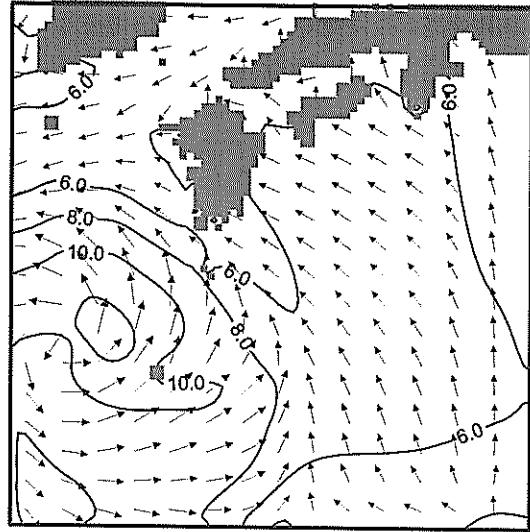
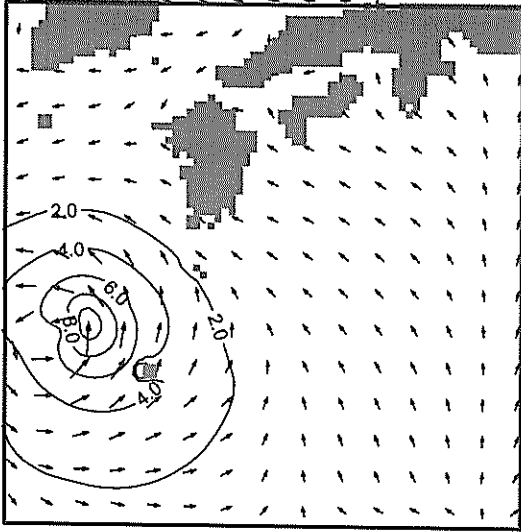
図-9 の左図に見られるように、高波浪の領域中央部の有義波高は、9 月 23 日 14 時には既に 10m を越える高波浪と

なっており、9 月 23 日 22 時には 12m を越える高波浪が推算されている。また、2 m 以上の波浪の影響は、9 月 23 日 18 時には九州南西部に及んでおり、時間の経過と共に、九州南部を取り囲むようにして通過している。特に、波高の高い領域は、九州南西海域から薩摩半島西部に向かって進行しており、9 月 24 日 2 時～4 時には 12m の高波浪が薩摩半島西部に來襲している。その後、24 日 8 時には豊後水道に、10 時～12 時には伊予灘周辺に高波浪の領域が移動していることが分かる。

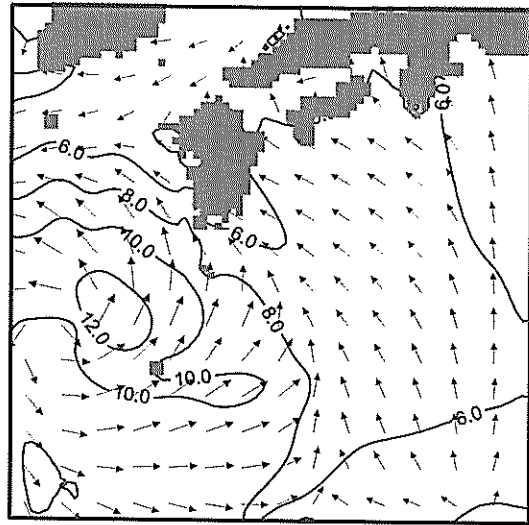
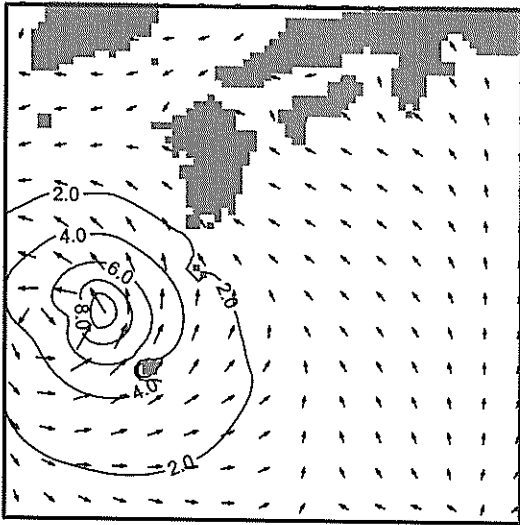
一方、図-9 の右図の有義波周期の平面分布図を見ると、9 月 23 日 14 時～23 日 18 時までには波高が大きい領域ほど周期も長くなっており、波高の平面分布に似た分布形状となっている。台風が九州に上陸した後（24 日 2 時以降）、九州東岸から四国沿岸にかけての領域では、波高は最大でも 6 m 程度であるのに対し、周期は 10 秒以上となっており、非常に周期の長いうねり性波浪が來襲していることが分かる。一方、台風の強風による波浪が直接來襲する九州西岸では、14 秒以上の非常に長い周期の波浪が來襲し、台風が通過した後、波高が小さくなるとともに周期も短くなっている。

なお、本研究では、前述のように、風速の低減係数  $C = 0.6$  を採用している。本研究の初期の段階では、実際には風速の低減係数を種々変えて波浪推算の試算を行った。例えば、低減係数  $C = 0.7$  を採用すると、九州南西部や豊後水道では予想以上に大きな波浪が推算され、特に九州南西部では最大有義波高が 18m を越える高波浪が推算される。このようなことから、種々の試算による検討の結果、本研究では低減係数  $C = 0.6$  を採用している。このように、低減係数を少し変えただけでも、推算結果が大幅に変化することから、本研究の推算結果を評価する際には、この点にも留意しておく必要がある。

9/23 14:00



9/23 16:00



9/23 18:00

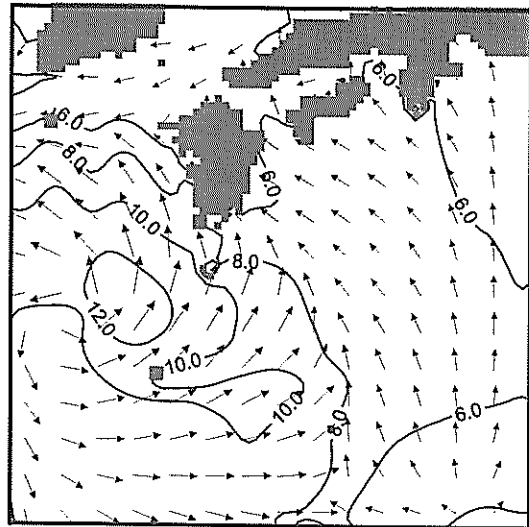
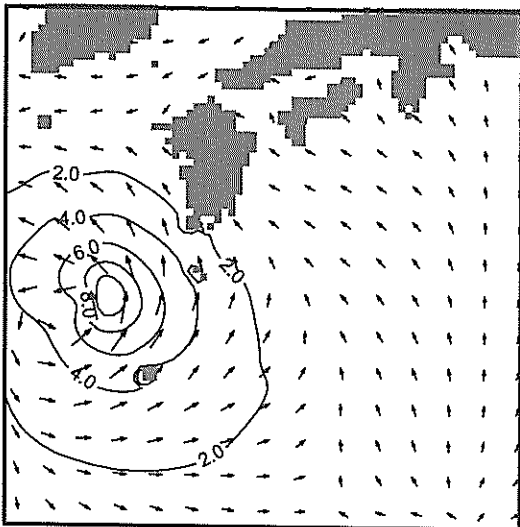
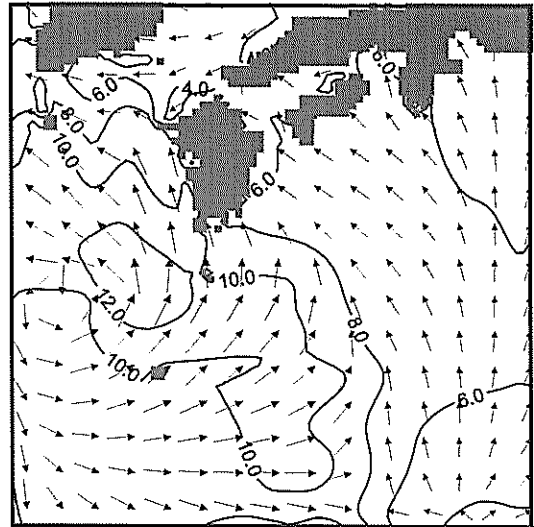
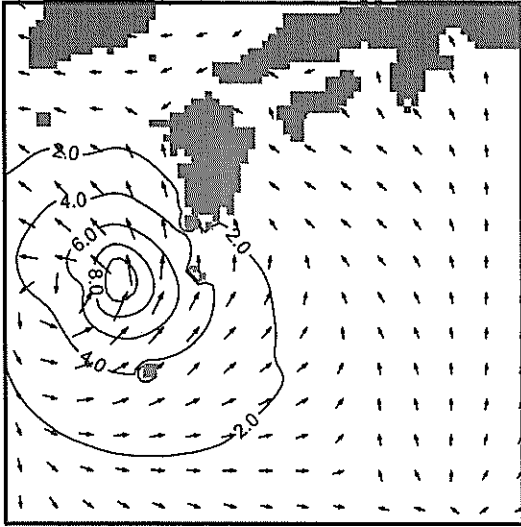
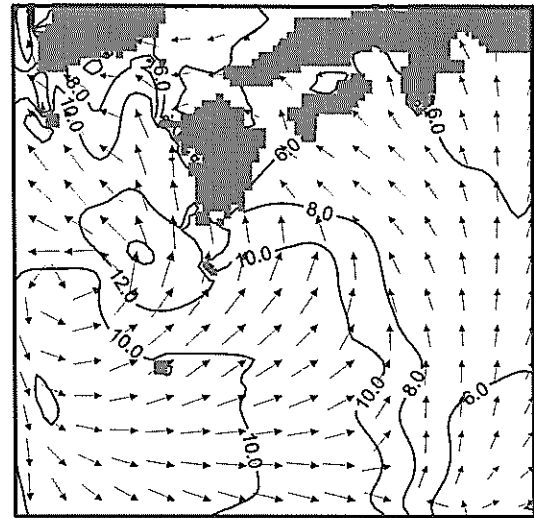
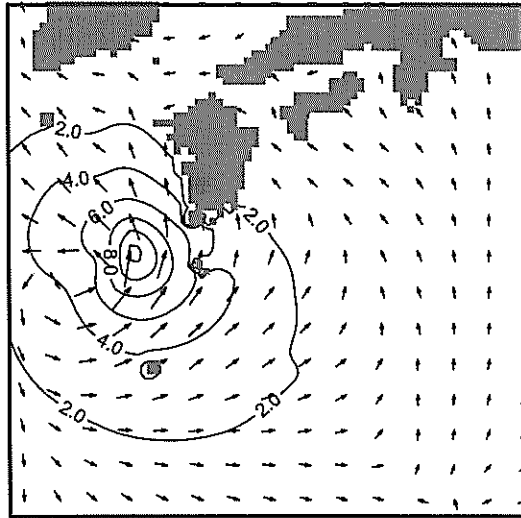


圖-9(1) 波浪推算結果 (WAM, 大領域, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

9/23 20:00



9/23 22:00



9/24 0:00

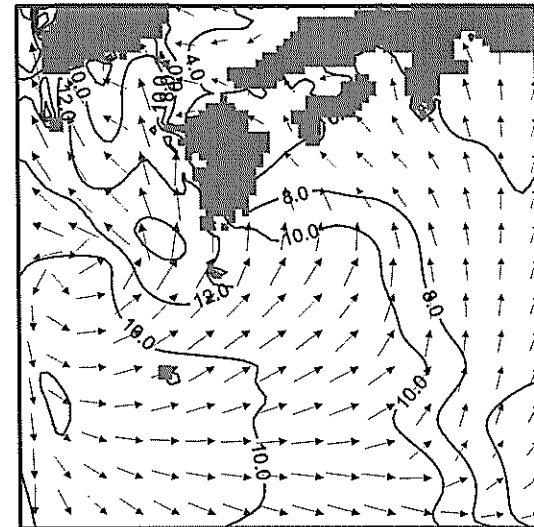
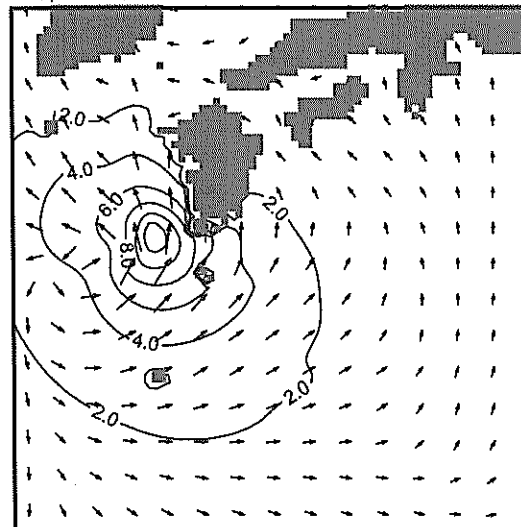
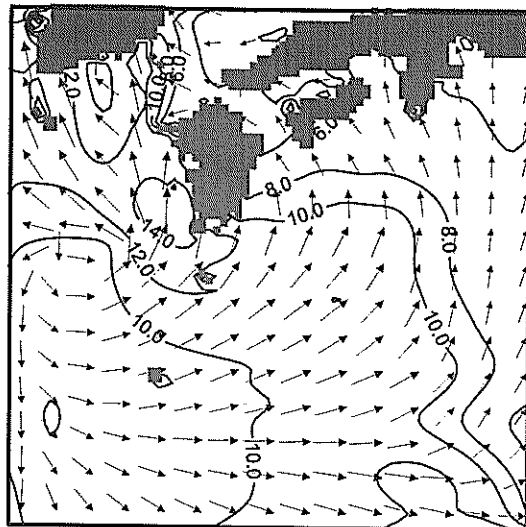
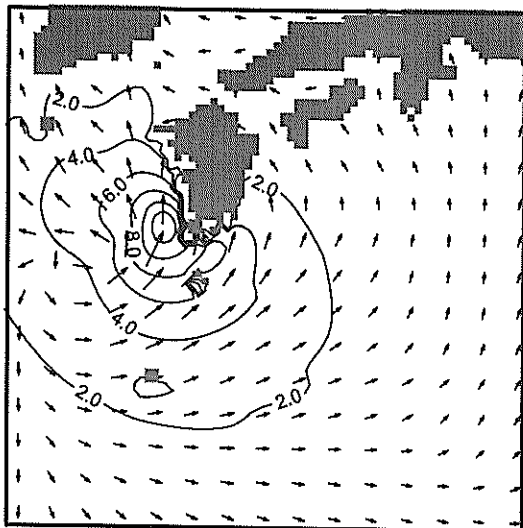
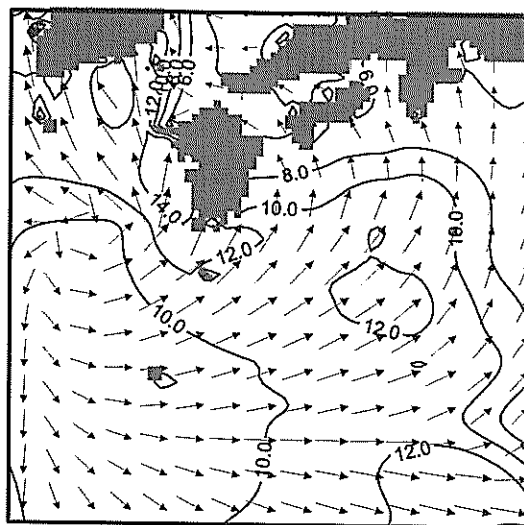
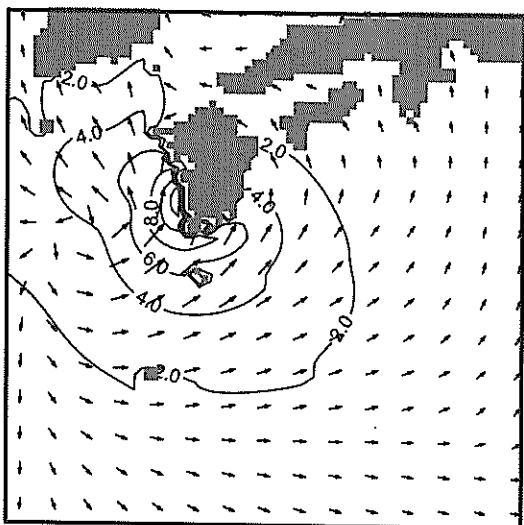


圖-9(2) 波浪推算結果 (WAM, 大領域, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

9/24 2:00



9/24 4:00



9/24 6:00

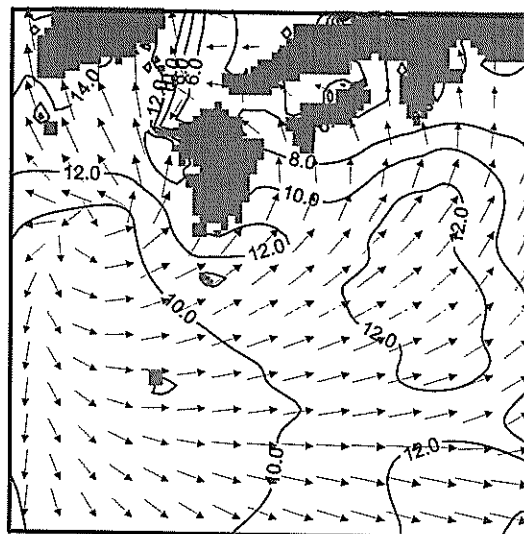
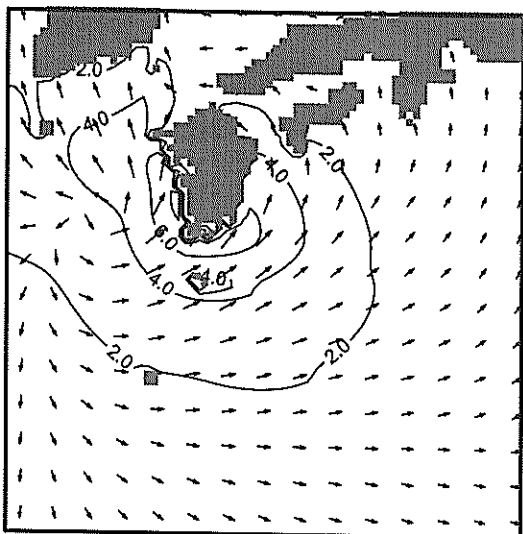
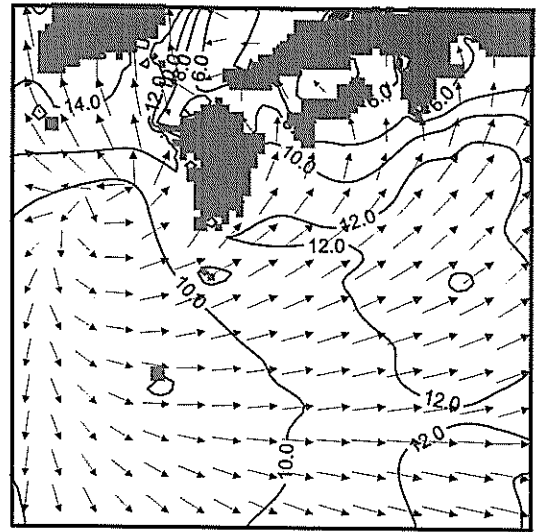
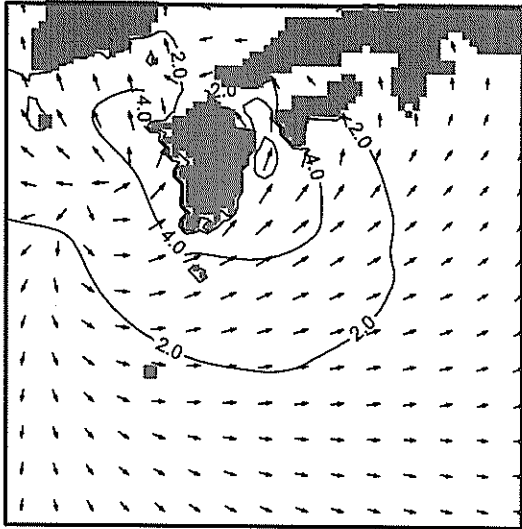


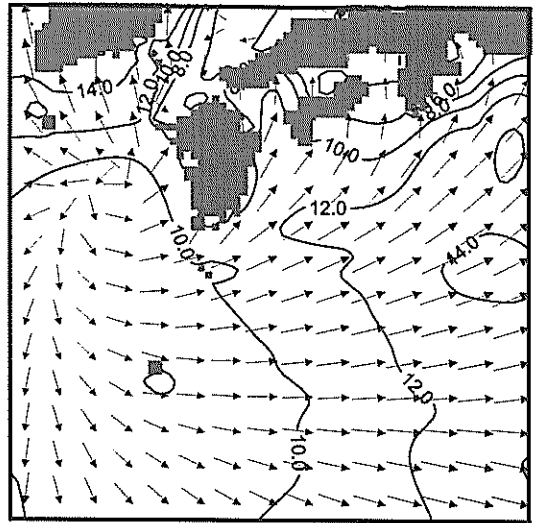
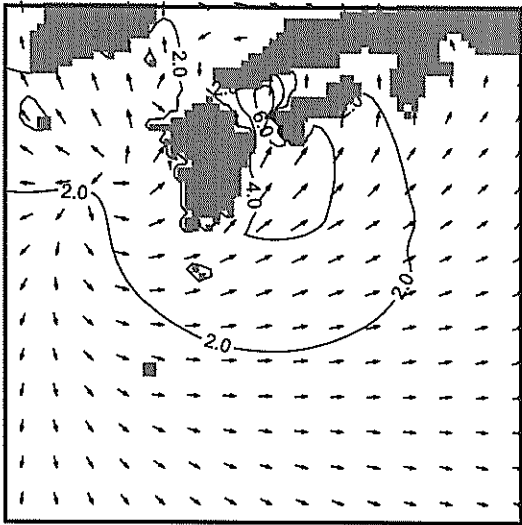
圖-9(3) 波浪推算結果 (WAM, 大領域, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)



9/24 8:00



9/24 10:00



9/24 12:00

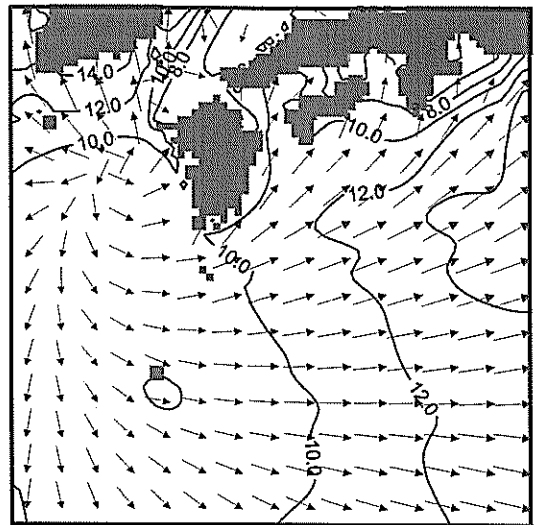
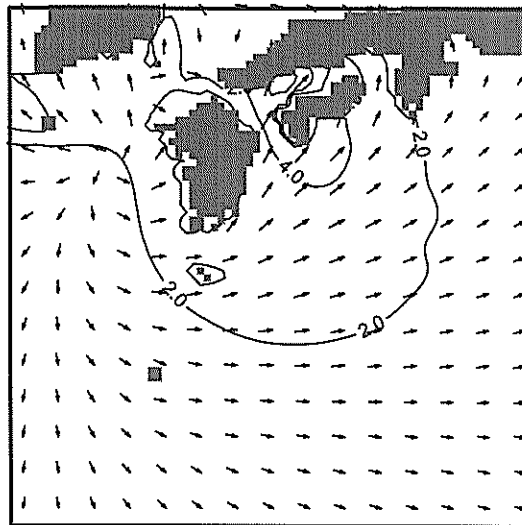


圖-9(4) 波浪推算結果 (WAM, 大領域, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

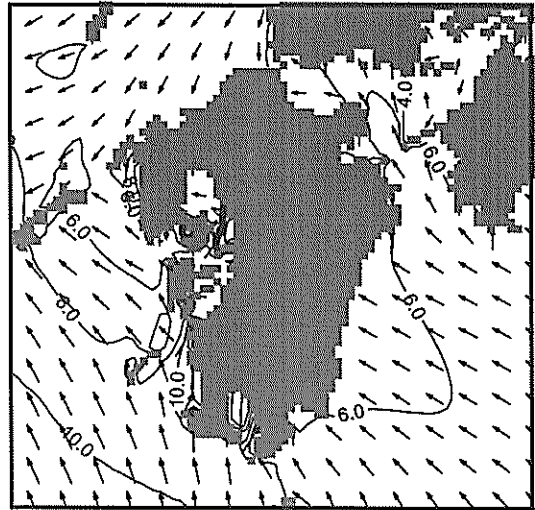
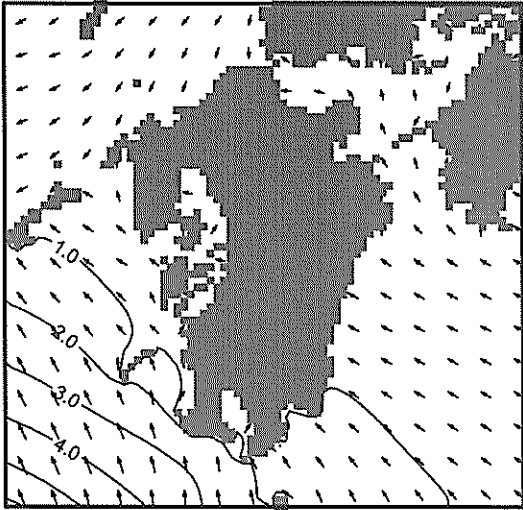
## (2) 中領域の波浪推算結果

図-10 は9月23日18時～9月24日10時のWAMによる波浪推算結果の内、中領域における有義波高と有義波周期の平面分布図を示したものである。23日18時～24日2時の間と24日8時～10時の間は2時間毎の平面分布図を、24日2時～8時の間は1時間毎の平面分布図を示している。図-10の左図は有義波高の平面分布図、右図は有義波周期の平面分布図である。図中の矢印は波向を示している。なお、図-10では、図-9と同様に、矢印による波向を見やすくするため、5格子毎に波浪推算結果を抽出して図示している。

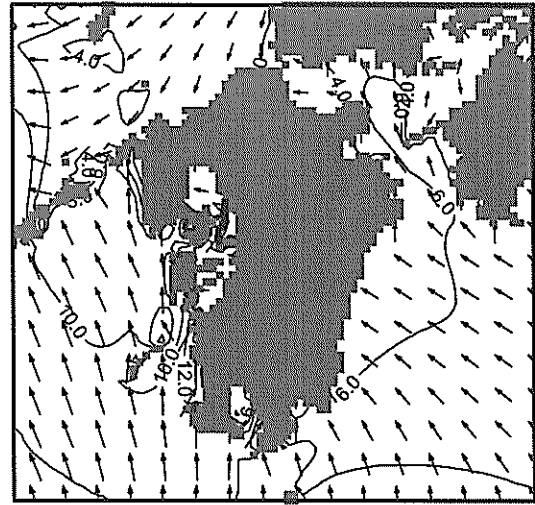
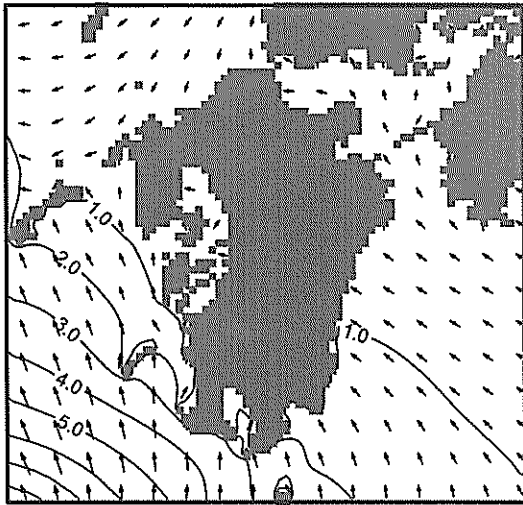
図-10の左図に見られるように、2m以上の波浪は9月23日18時には既に九州南部に達しており、その領域は急速に北部に移動している。24日2時には鹿児島湾口付近では8m以上の波が来襲しており、4時には10m以上の波が来襲している。台風9918号で甚大な被害を被った八代海の外海では24日4時～5時に最大有義波高が生じており、10m近い波が推算されている。豊後水道では図-9と同様に、24日8時に6m以上の高波浪が推算されている。

一方、図-10の右図の有義波周期の平面分布図を見ると、台風の接近に伴い、薩摩半島周辺に14秒以上の非常に長い周期の波が来襲していることがわかる。また、八代海の外海では、最大有義波高が発生した24日4時～5時にかけて、14～16秒の周期の波浪が来襲していることがわかる。一方、豊後水道では、24日8時に台風が九州地方を通過した後、大領域の計算結果と同様に、うねりとみられる周期10秒以上の波が来襲している。

9/23 18:00



9/23 20:00



9/23 22:00

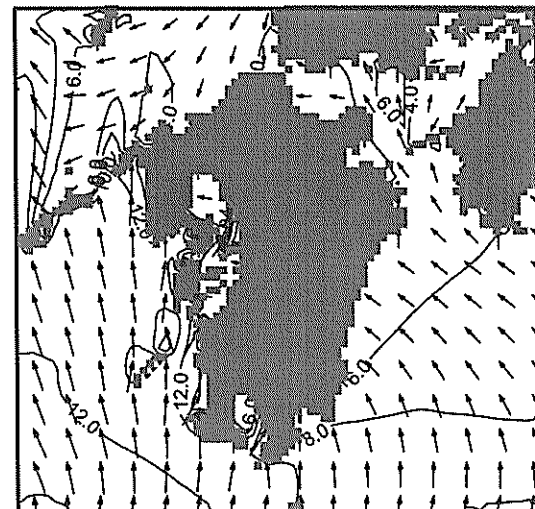
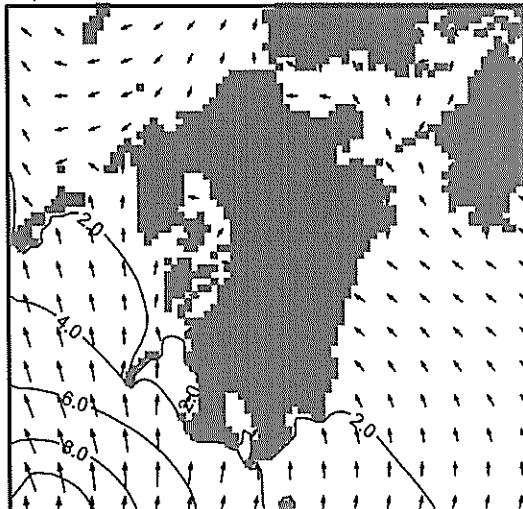
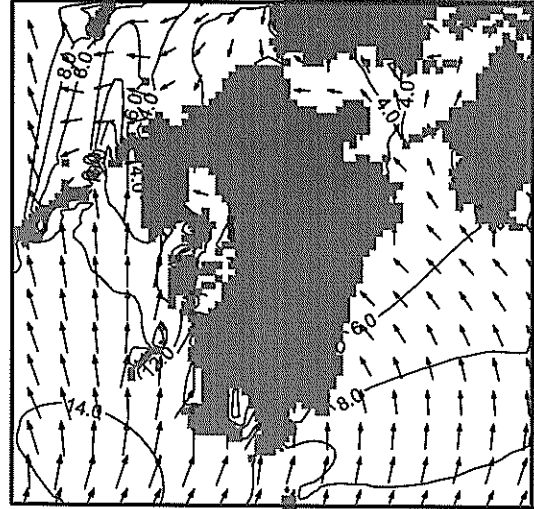
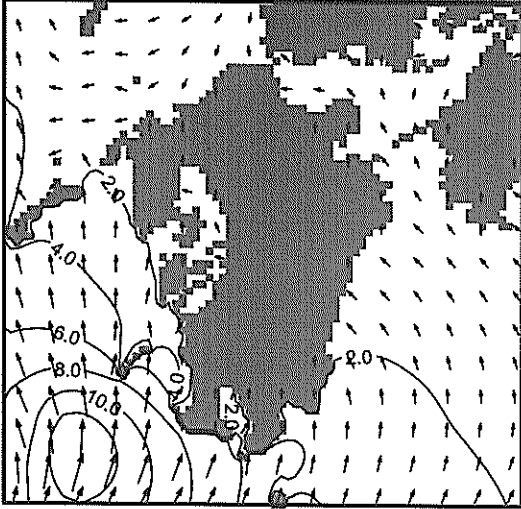
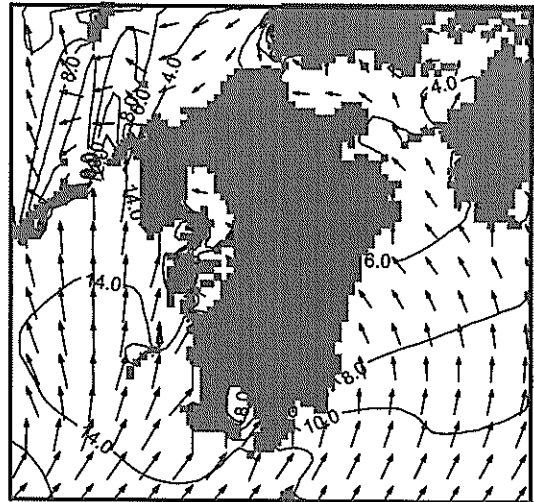
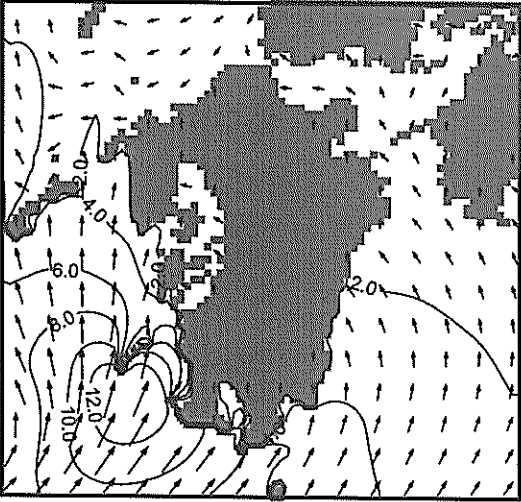


圖-10(1) 波浪推算結果 (WAM, 中領域, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

9/24 0:00



9/24 2:00



9/24 3:00

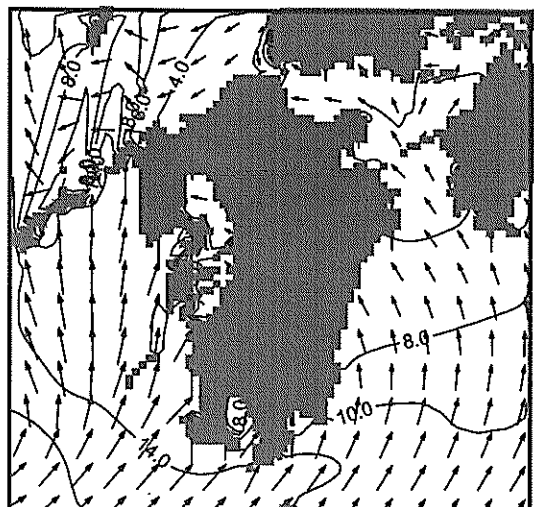
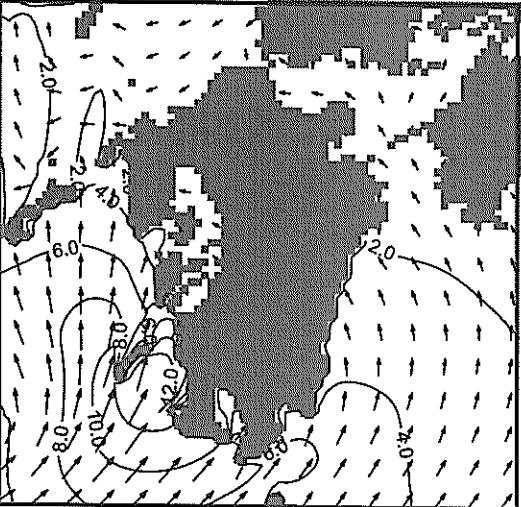
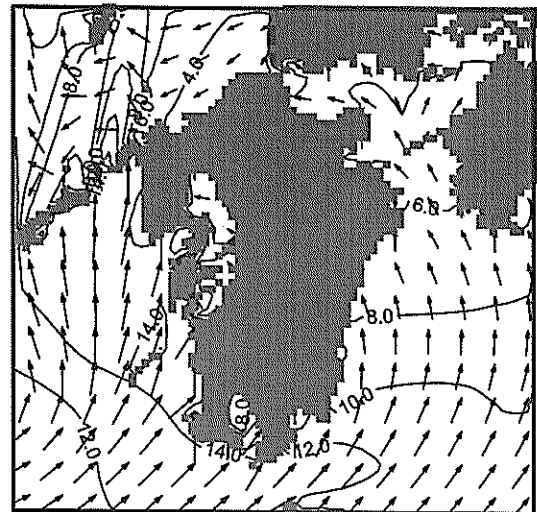
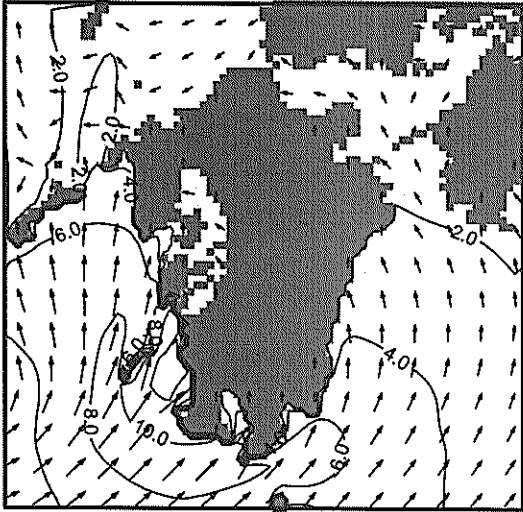


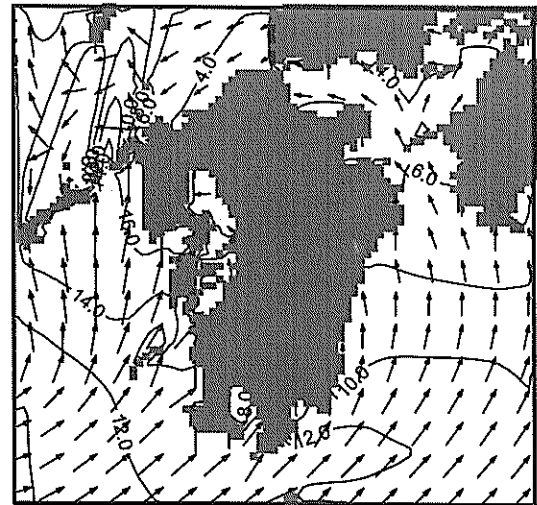
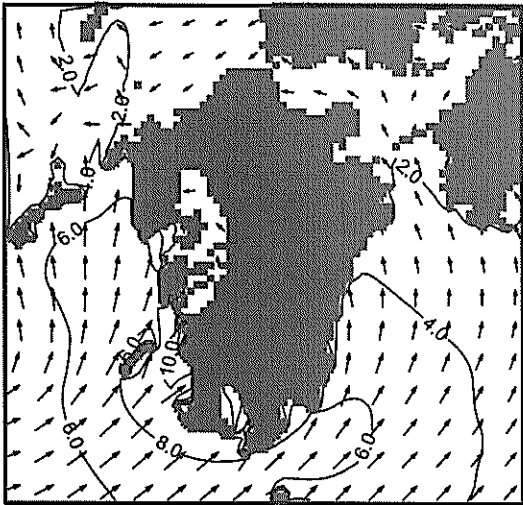
圖-10(2) 波浪推算結果 (WAM, 中領域, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)



9/24 4:00



9/24 5:00



9/24 6:00

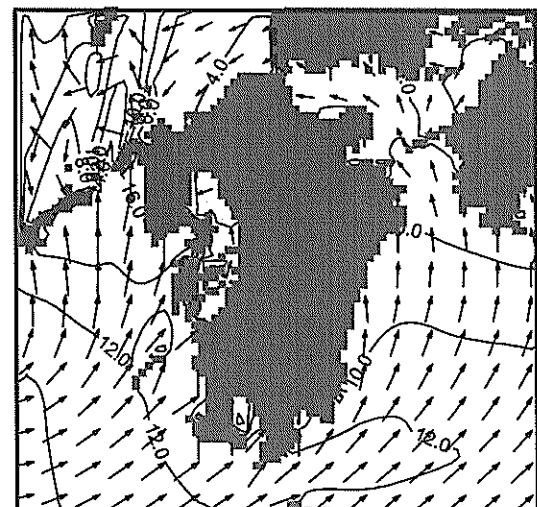
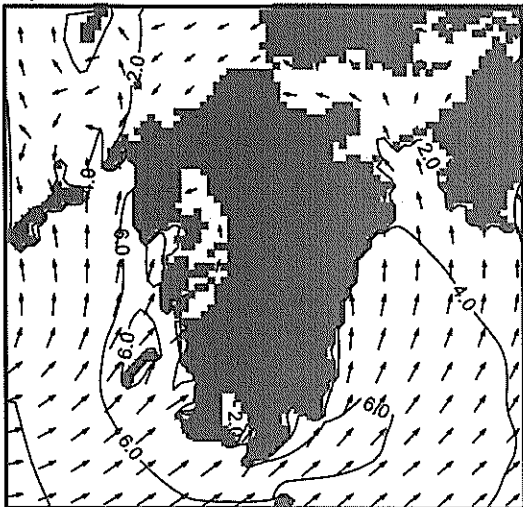
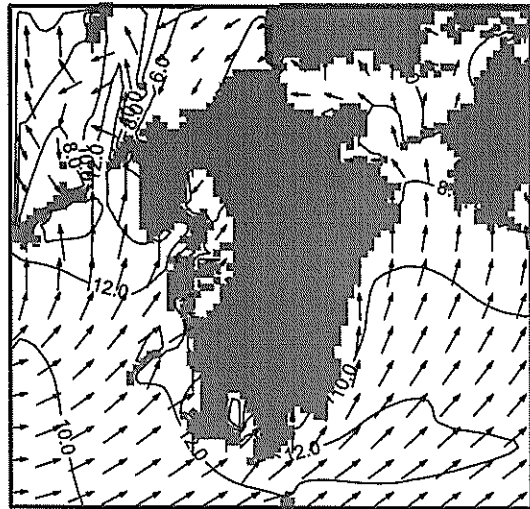
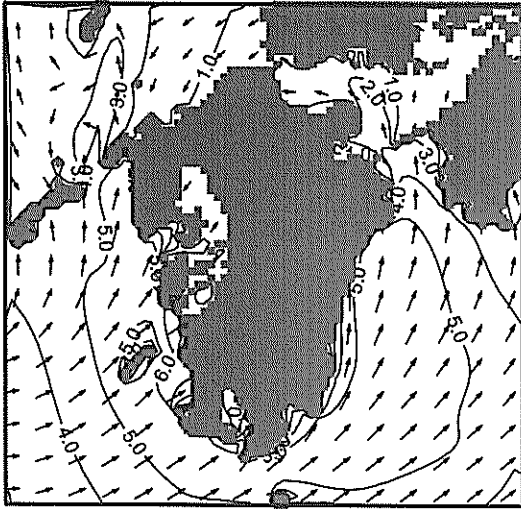
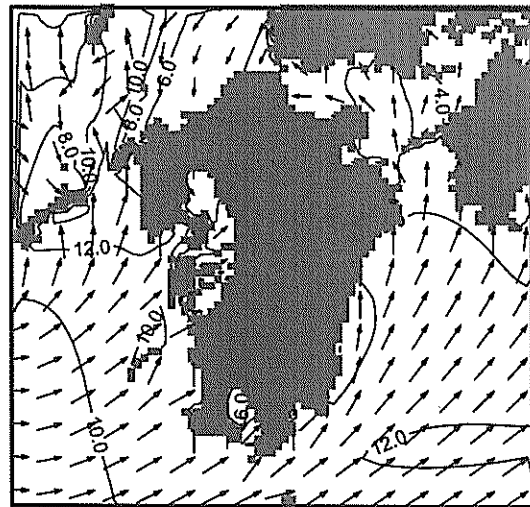
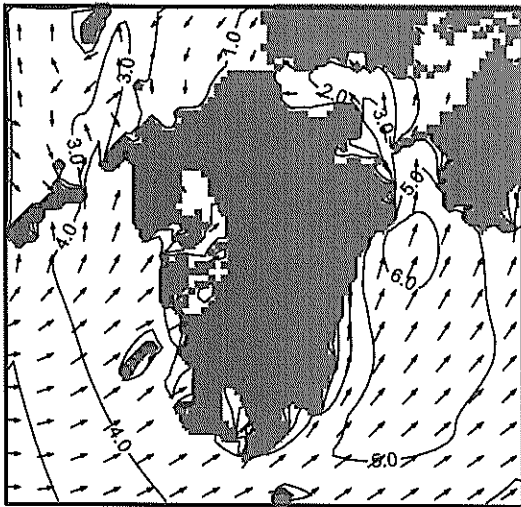


圖-10(3) 波浪推算結果 (WAM, 中領域, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

9/24 7:00



9/24 8:00



9/24 10:00

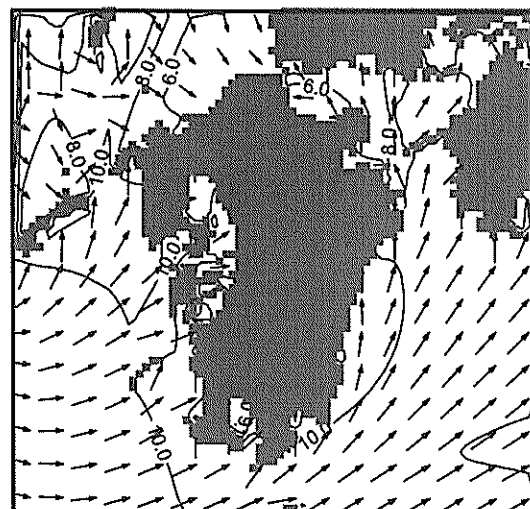
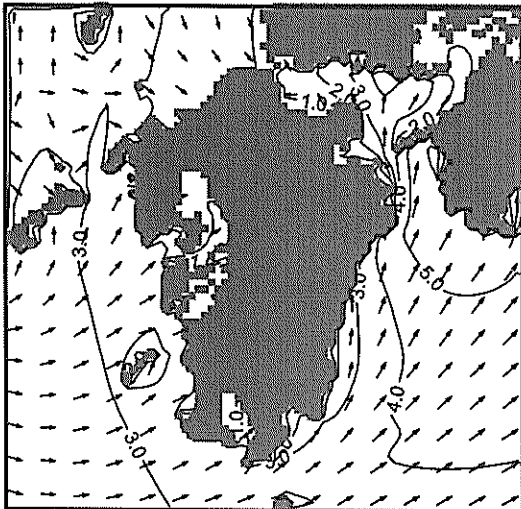


圖-10(4) 波浪推算結果 (WAM, 中領域, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

(3) 小領域1 (周防灘周辺海域) の波浪推算結果

a) WAM と MRI による周防灘周辺海域の波浪推算

図-11 は周防灘周辺海域を対象とした小領域1の波浪推算結果の内、有義波高の平面分布図を示したものである。

図-11 では、WAM と MRI の推算結果を比較して示しており、左図が WAM、右図が MRI の推算結果である。図-11 に見られるように、WAM と MRI のいずれも台風の進行にともない、波高の大きい領域が移動している。この波高の大きい領域と台風経路を参照すると、この領域は台風中心の南東部に位置しており、一般に言われている台風の危険半径に一致する。

WAM と MRI の推算結果を比較すると、両者とも類似した波高分布を示しているが、全体的に WAM の方がやや高い波高が推算されている。波高分布の時間的な変化を見ると、WAM の方が広い範囲で発達が早く、逆に、減衰は遅い傾向が見られる。例えば、9月24日5時では、WAM では波高が2m以上と3m以上の領域は MRI に比べてかなり広い範囲に現れている。逆に、9月24日の9時と10時の平面分布図では、WAM では5m以上の高波高の領域が残っているが、MRI では既に減衰しており、WAM に比べて波高が小さくなっている。

WAM と MRI の推算結果の特徴的な差違は、9月24日9時～10時の周防灘西部の推算結果に見られる。この時間帯では、WAM では佐田岬の方から侵入してくる波浪がまだ卓越しているのに対し、MRI の推算結果では東向きの波浪が卓越しており、波高の平面分布がやや異なっている。図-5の風推算結果の平面分布図では、この時間帯の風向は既に東よりの風となっており、MRI の推算結果は東よりの強風による波浪の発達を示していることがわかる。

図-12(a) は最大有義波高の平面分布図であり、(b) は最大有義波高が生じた時刻の有義波周期の平面分布図を示したものである。周防灘や伊予灘の最大有義波高の分布形状は、WAM と MRI の推算結果は概ね類似しているが、WAM では新南陽沖の大津島西部で5m以上の波高が推算され、MRI に比べてやや高めの波高を示している。また、豊後水道では最大有義波高の分布形状はかなり異なっており、WAM は MRI に比べてかなり高めの波高を示している。一方、最大有義波高が生じた時刻の有義波周期の分布を見ると、その分布パターンは WAM と MRI とでかなり異なっており、MRI の周期は WAM に比べて長めの周期が推算されていることが分かる。MRI で長めの周期が推算された理由については、後で再検討している。

b) 有義波高・周期の時系列図による推算精度の検討

図-13 は、荻田沖における波浪観測値と推算値の有義波

高と有義波周期の時系列図を示したものである。図-13 に見られるように、波高に関しては WAM と MRI とともに荻田の観測波高をほぼ再現している。しかしながら詳細に見れば、WAM で推算される波高は観測波高に比べて波高の発達がやや緩やかで、減衰時にも観測値に比べてやや緩やかに減衰している。

一方、周期については、MRI では波高の発達・減衰に対応して周期も変化しているが、変化の大きさが過大であり、発達時・減衰時のいずれの場合にも観測値に比べてやや長めの周期が推算されている。WAM では波高発達時には観測値に比べて周期がやや短めに推算されているが、減衰時の周期の減少の程度が小さく、観測値に比べて周期が過大に推算されている。

波向に関しては、WAM と MRI とで推算結果が大きく異なっている。WAM では9月23日18時～9月24日18時の間はE方向でほぼ一定の波向が推算され、波向の観測値とよく一致している。一方、MRI では9月24日8時～9月24日10時の間にE方向からW方向に波向が大きく変化しており、観測値を再現できていない。図-6の推算風と観測風との比較図を見ると、推算風と観測風の風向はいずれも9月24日7時～9月24日8時の間に風向がE方向からW～NW方向に大きく変化しており、MRI の波向の変化は風向の変化に伴う風波の発生・発達により生じたものであろうと推察される。

波高減衰時に WAM の周期が過大に推算される理由の一つとして、WAM では逆風の影響による波浪の減衰効果が陽的には考慮されていないことが一因と考えられる。

一方、MRI で周期が過大に推算される理由および波向が風向の変化に対して過敏に反応する理由については、風から波へのエネルギー入力項に含まれる Phillips 機構と Miles 機構の内、Phillips 機構が過大に作用した結果、生じたものと考えられる。これについては、方向スペクトルによる推算精度の検討の際に再考する。

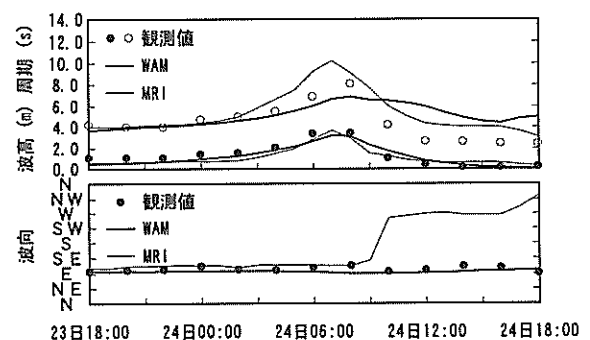
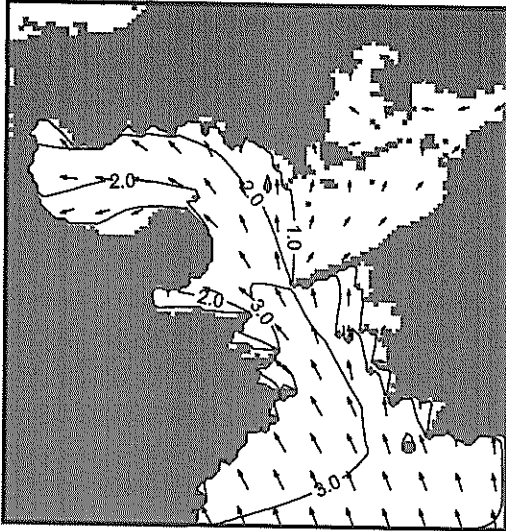
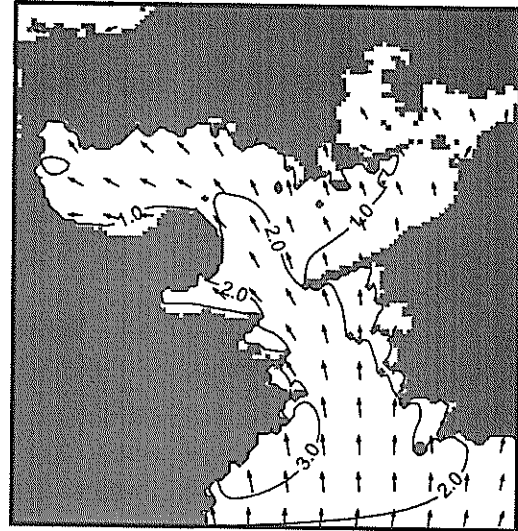


図-13 有義波高と周期の時系列図

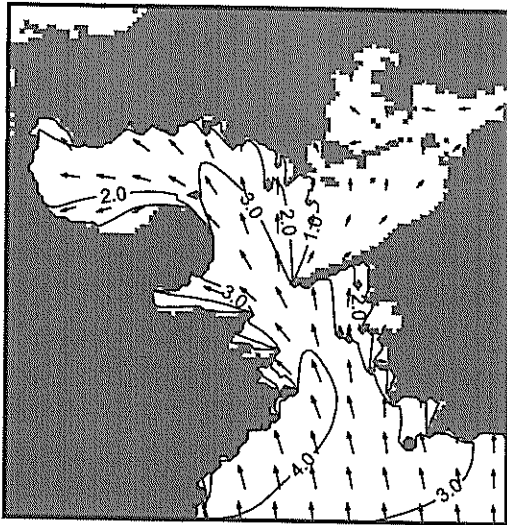
(WAM) 9/24 5:00



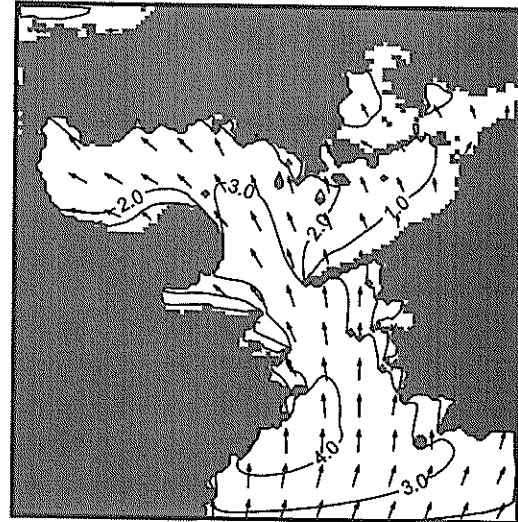
(MRI) 9/24 5:00



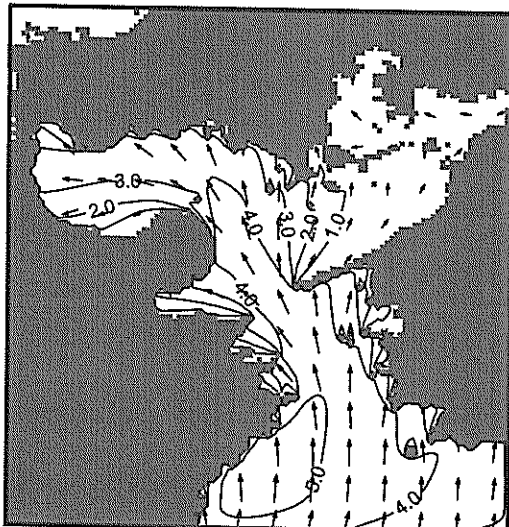
(WAM) 9/24 6:00



(MRI) 9/24 6:00



(WAM) 9/24 7:00



(MRI) 9/24 7:00

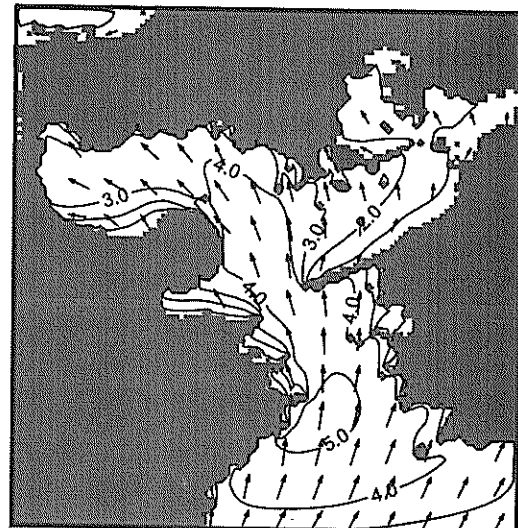
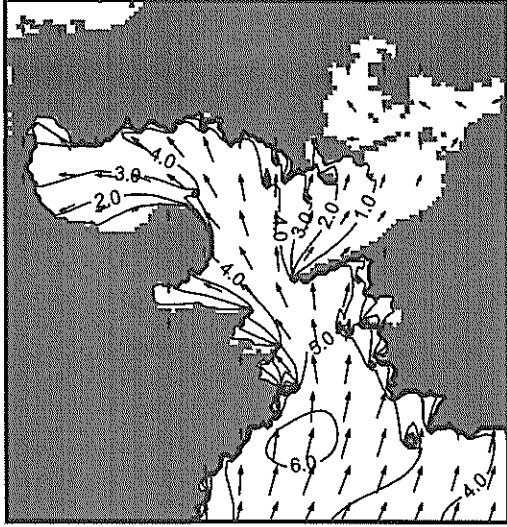


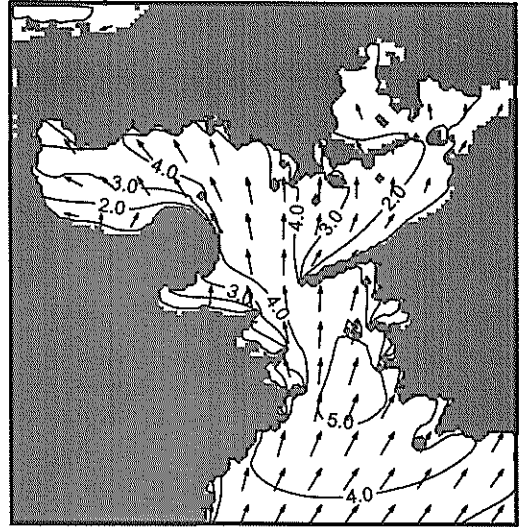
图-11(1) 推算波高平面分布图 (小領域1, 周防灘周辺海域)



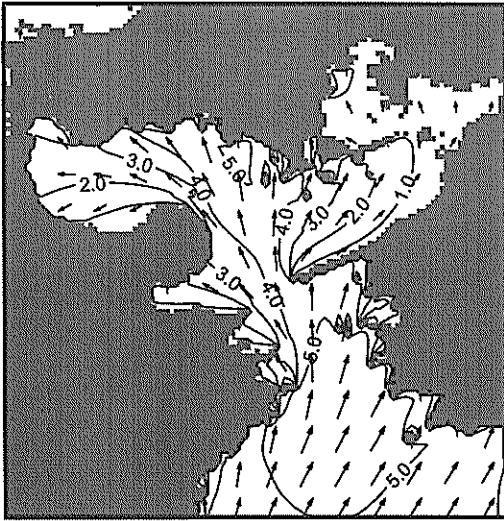
(WAM) 9/24 8:00



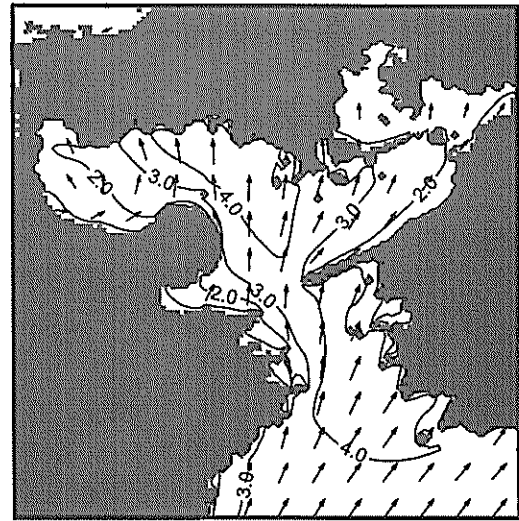
(MRI) 9/24 8:00



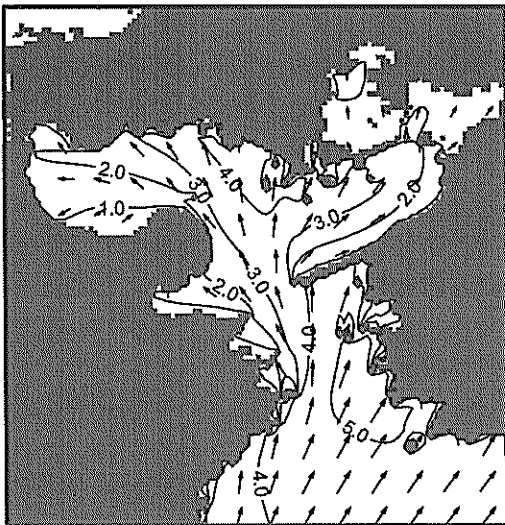
(WAM) 9/24 9:00



(MRI) 9/24 9:00



(WAM) 9/24 10:00



(MRI) 9/24 10:00

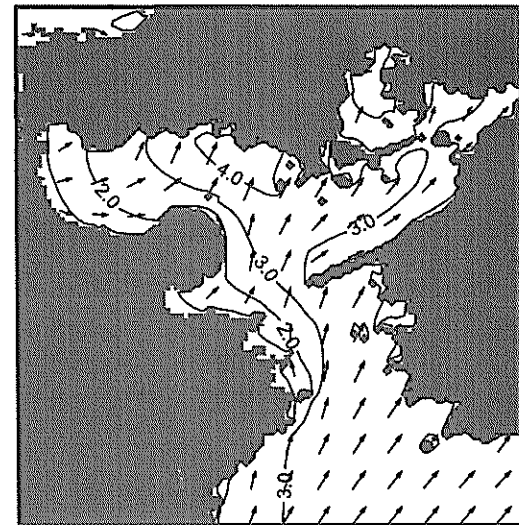
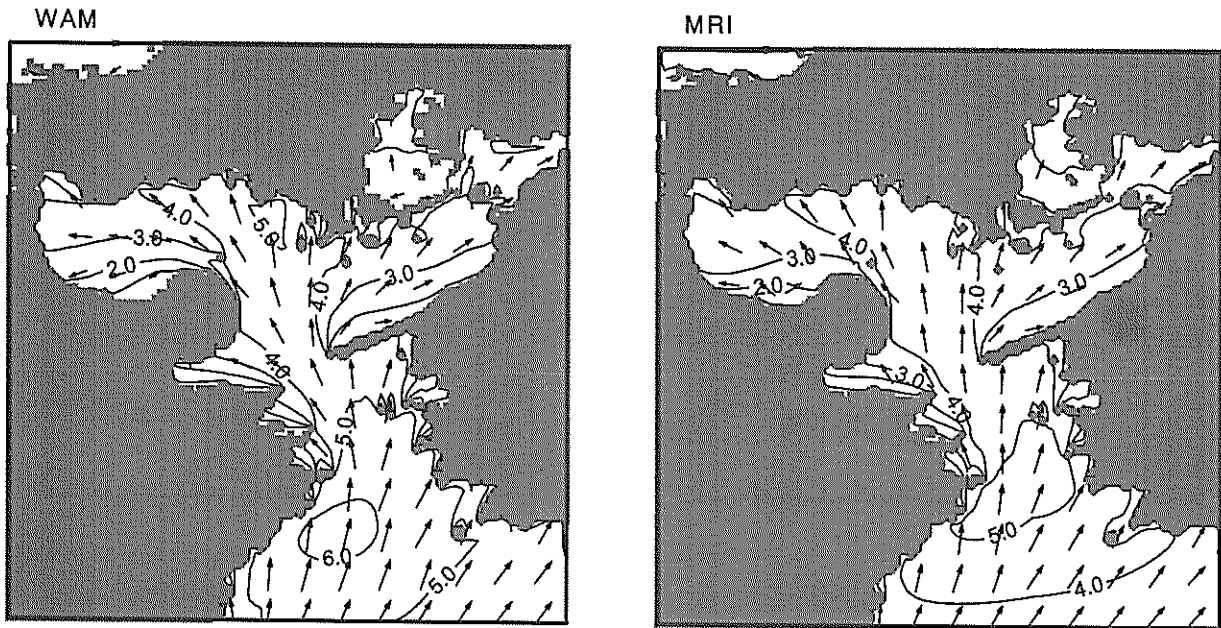
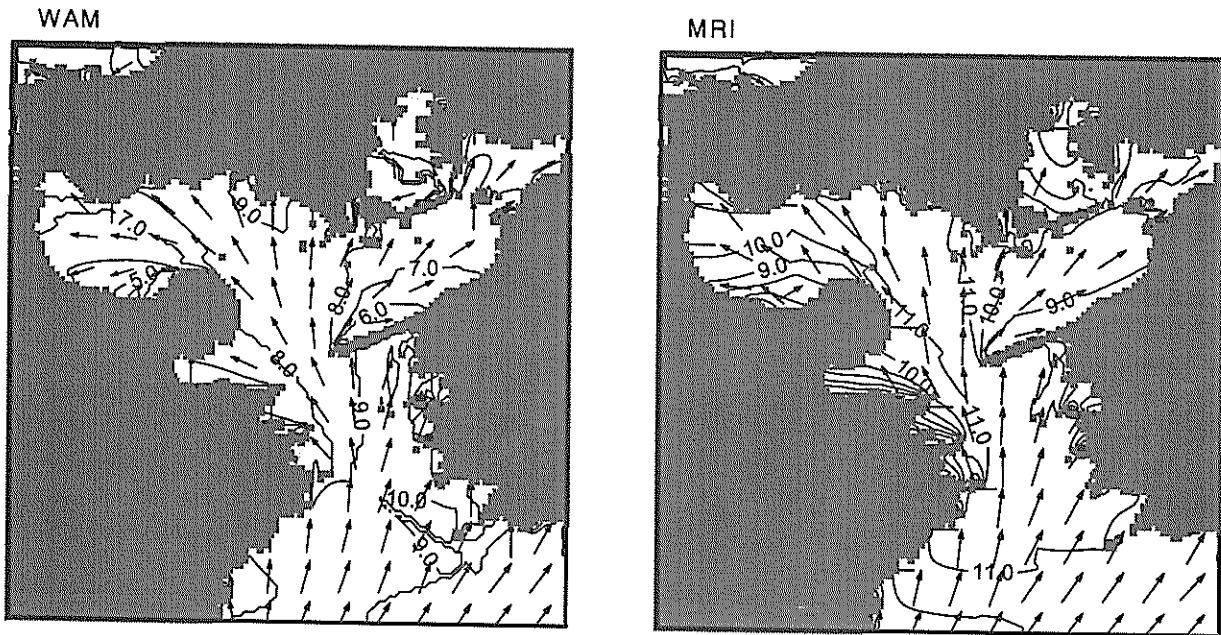


图-11(2) 推算波高平面分布图 (小領域 1, 周防灘周辺海域)



(a) 最大有義波高分布



(b) 最大有義波高が生じた時刻の周期分布

図-12 波浪推算結果（小領域1，周防灘周辺海域）

c) 方向スペクトルによる推算精度の検討

図-14 は、苅田における波高最盛時前後の9月24日2時～10時の方向スペクトル観測値と推算値とを明示したものである。図-14の左図は方向スペクトルの観測値、中図はWAMによる推算値、右図はMRIによる推算値を示している。なお、各図の等高線は各図のエネルギー最大値で各々の方向スペクトルを正規化し、等エネルギー線を等間隔で与えて図示している。

図-14によると、WAMとMRIともに波浪最盛時の9月24日8時のESE方向からの卓越した波浪が再現されている。しかしながら、観測値に比べてWAMとMRIのエネルギー集中度はやや低く、周波数および方向角に関してエネルギー分布がやや幅広く推算されている。

台風が通過することにより風向が変化した24日10時には、方向スペクトルの観測値にはESE方向からのうねりとNW方向からの風波による2つのエネルギーピークが見られる。しかしながら、MRIではW方向からの卓越した波浪が推算されており、WAMではESE方向の波浪のみが推算されている。これは、WAMの場合には、台風の通過に伴う風向の変化に対する波浪場への応答が遅れたためで、逆に、MRIでは風向の変化に対する波浪場への応答が過敏であったためと考えられる。これは以下の理由により説明される。

すなわち、MRIでは風から波へのエネルギー入力項にPhillips機構とMiles機構の両方を考慮しているが、WAMではMiles機構のみを考慮している。Phillips機構は波浪の発生に寄与する物理機構である。一方、Miles機構は、波浪のエネルギー成分が無いところではその機構は発生しない。したがって、MRIでは、風向が変化するとPhillips機構によりその風向に新たな波浪成分が発生する。一旦その波浪成分が発生すると、後はMiles機構によってその波浪成分は指数関数的に発達する。このようにしてW方向の風波成分が過大に推算され、風向の変化に伴ってその風向の波浪成分が鋭敏に応答したものと考えられる。一方、WAMではNW方向の風波成分をうまく再現できておらず、風速と風向の急変に対する波浪場の応答性は必ずしも良いとは言えない。WAMにおいてもPhillips機構に対応するような初期波の発生機構に関する何らかの改良の余地が残されていると考えられる。

また、MRIの推算結果を見ると、MRIでは風波のピークよりも低周波数側に観測値にはみられない小さなエネルギーピークが認められる。したがって、MRIで有義波周期が長めに推算されたのは、低周波数側（長周期側）に異常なエネルギーが推算されたためであると考えられる。これも前述のPhillips機構の影響によるものである。図-15はこれ

を確認するために推算した結果の一例である。図-15の左図はMRIのエネルギー入力項でPhillips機構とMiles機構の両方を考慮した推算結果、右図はPhillips機構のみを用いた場合の結果である。この図によると、左図に見られる周波数が0.05Hz付近のスペクトルのピークは、右図と比較して分かるように明らかにPhillips機構の影響によるものである。すなわち、波浪の発生初期においては、Phillips機構により初期波が発生するが、MRIで用いられているPhillips機構の定式化では、風波のピーク周波数よりも低周波数側にもエネルギーピークを有する波浪成分を発生させる定式化になっているためである。この定式化は既往の研究に基づいてInoue<sup>3)</sup>が定式化したものであるが、この定式化の妥当性については再検討の必要がある。

なお、WAMでは前述のようにPhillips機構は無視されている。しかしながら、WAMに含まれる非線形相互作用項が風場の変動におけるPhillips機構の働きを補う働きをすることが分かっている<sup>10)</sup>。この作用については現在検討中であるが、非線形相互作用の計算精度を高めることにより、風場の変動に対する波浪場の応答特性を向上できる可能性がある<sup>10)</sup>。

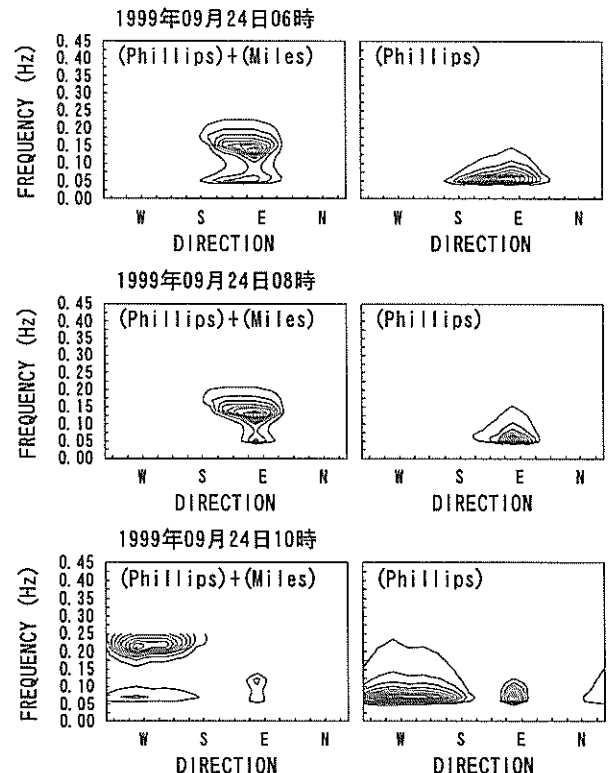


図-15 MRIにおけるPhillips機構の影響

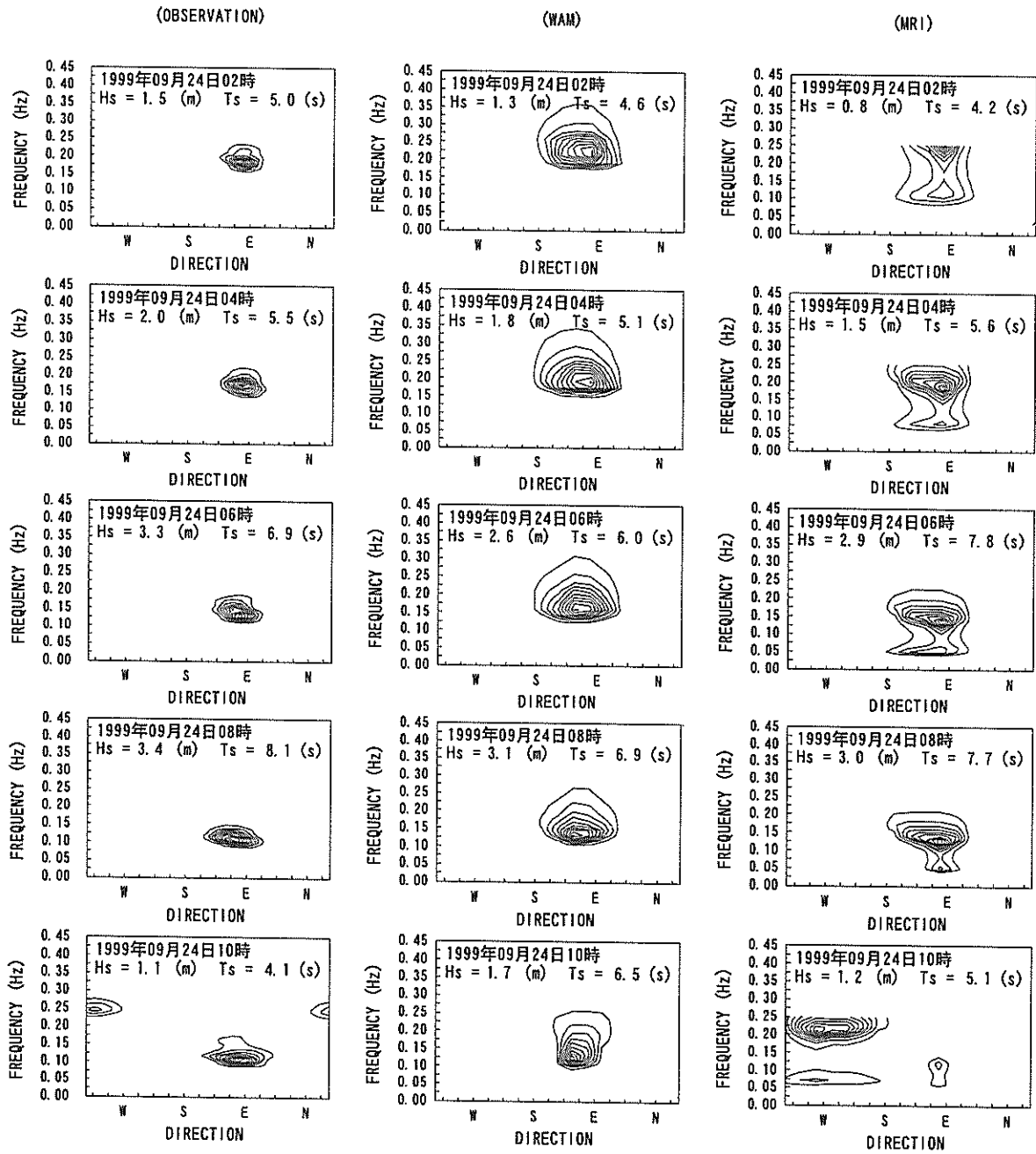


図-14 方向スペクトルによる波浪推算精度の比較

(4) 小領域2 (九州南部周辺海域) の波浪推算結果

図-16 は九州南部周辺海域を対象とした小領域2のWAMによる波浪推算結果の内、有義波高と有義波周期の平面分布図を示したものである。左図が有義波高、右図が有義波周期の推算結果である。

図-16の左図に見られるように、台風の進行にともない、高波浪の領域が九州南西部から北東方向に九州南部を取り囲むように広がっている。鹿児島湾の湾口では、24日2時には8mの波浪が、4時には10m近い波浪が来襲している。台風9918号で甚大な被害を被った八代海の外海では24日4時～5時に最大有義波高が生じ、10m近い波が来襲しており、その波向は薩摩半島とその西部の甌島列島の間を天草諸島に向かう方向であったため、甌島列島による遮蔽の影響をあまり受けずに、大きな波浪が来襲している。

一方、図-16の右図の有義波周期の平面分布図をみると、八代海外海で14秒以上の非常に周期の長い波浪が来襲していることがわかる。また、宮崎など九州東部沿岸には大隅半島、種子島、日南海岸による遮蔽の影響により、周期が減衰した波浪が来襲していることがわかる。

図-17は、図-16の推算結果に基づいて作成された最大有義波高の平面分布図である。図-17に見られるように、九州南部の最大有義波高は薩摩半島西部で発生し、12m以上の高波浪が推算されている。また、鹿児島湾の湾口では8m以上の有義波高が推算されているが、薩摩半島および大隅半島による遮蔽の影響を受けて、鹿児島湾内では波高はかなり減衰している。宮崎周辺海域でも、宮崎の沖合では5m以上の最大有義波高が推算されているが、宮崎の沿岸近くでは日南海岸による遮蔽の影響のため4m～5mの最大有義波高となっている。

図-18は、宮崎の波浪観測値と推算値を時系列図で比較したものである。波浪観測値では、9月24日6時に最大有義波高5.39m、有義波周期9.2秒が観測されている。一方、波浪推算値の最大有義波高は、観測値と同一時刻の6時に推算されているが、最大有義波高は4.69m、有義波周期は9.7秒となっており、観測結果に比べて、低く推算されている。

前述のように、台風を対象として波浪推算を行う場合、風速の低減係数を少し変えただけでも、推算結果は大幅に変化する。また、陸岸近くでは、等圧線に対する風の吹き込み角を少し変えただけでも、推算結果は大幅に変化する。したがって、逆に、波浪推算値が図-18に示す観測結果に適合するように台風パラメータを調節することも可能である。実際のところ、試算の初期の段階では種々のパラメータ値を用いて観測値に適合するような計算も行った。しかしながら、前述のように、今回の検討では種々の試算の結

果、広い範囲でほぼ妥当な推算結果が推算されるように、一般的に用いられているパラメータ値を設定して用いており、敢えて宮崎の観測結果に適合するようにパラメータを便宜的に調整した推算結果を掲載することをやめた次第である。もちろん、より細かな計算格子を用い、水深の影響を考慮した屈折計算や浅水変形計算等の合理的な修正を行えば、より観測結果に適合する波浪推算を行うことは可能であろう。本研究の波浪推算結果を評価する際には、このような点にも留意しておく必要がある。

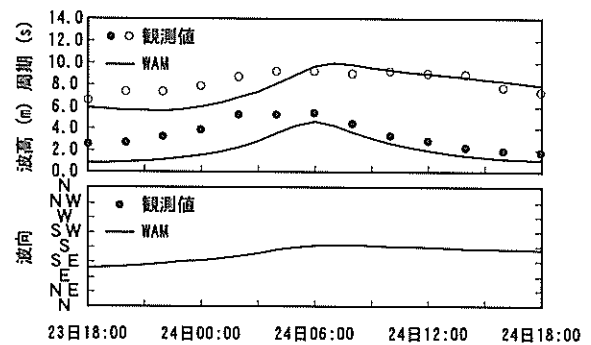
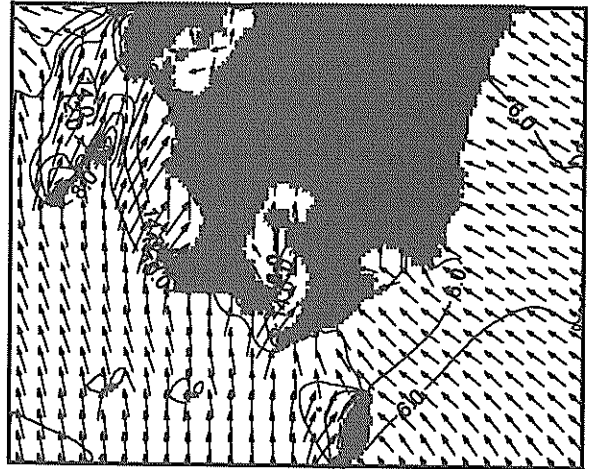
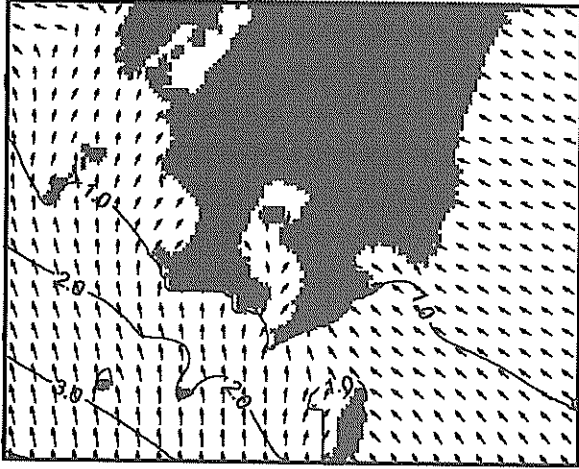


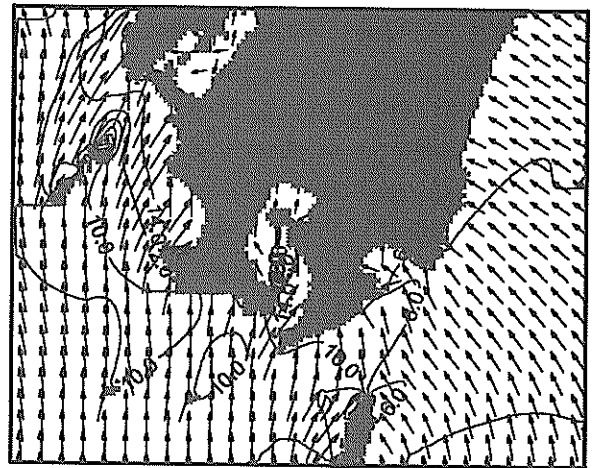
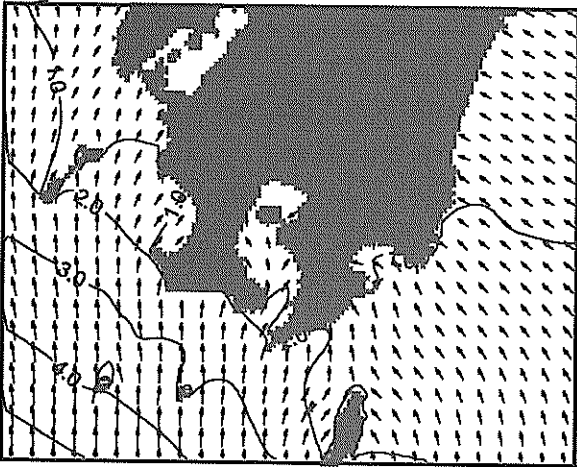
図-18 推算値と観測値の比較 (宮崎)



9/23 18:00



9/23 20:00



9/23 22:00

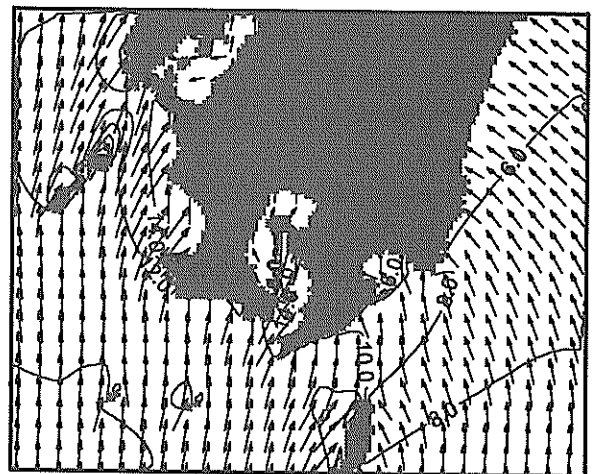
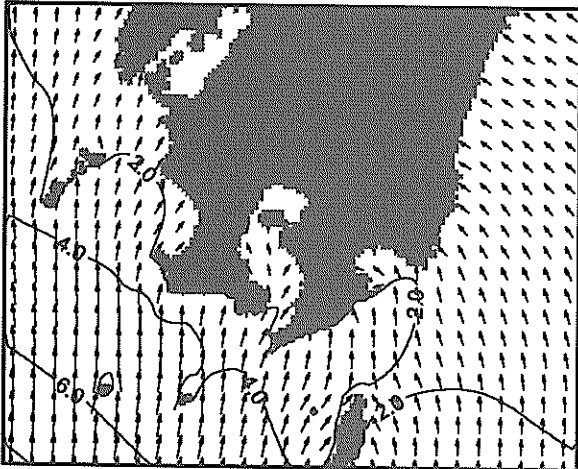
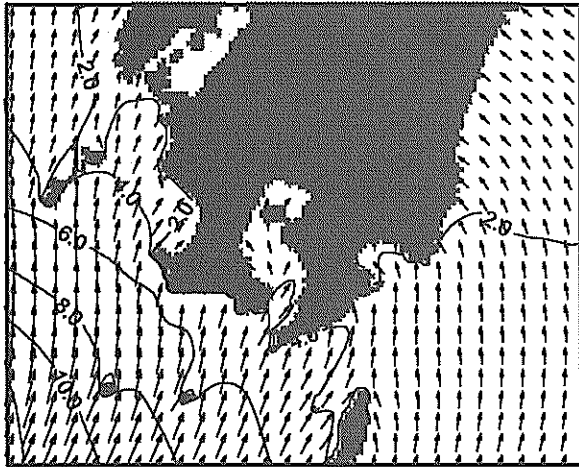
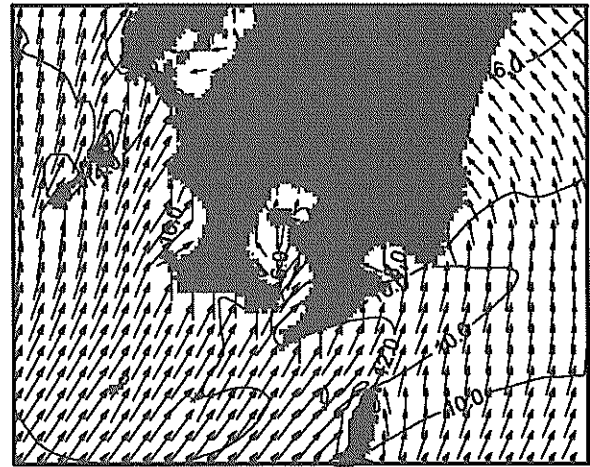
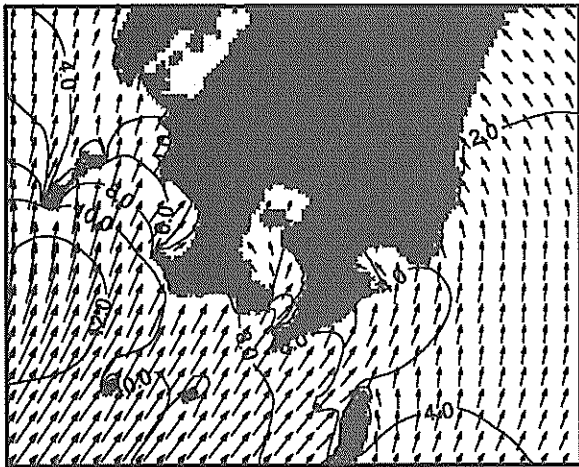


圖-16(1) 波浪推算結果 (WAM, 小領域 2, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

9/24 0:00



9/24 2:00



9/24 3:00

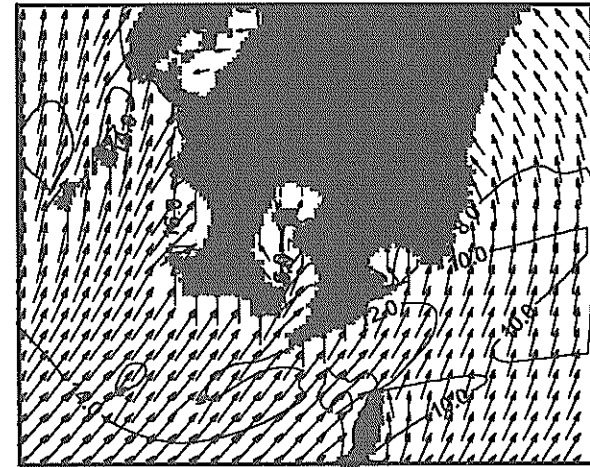
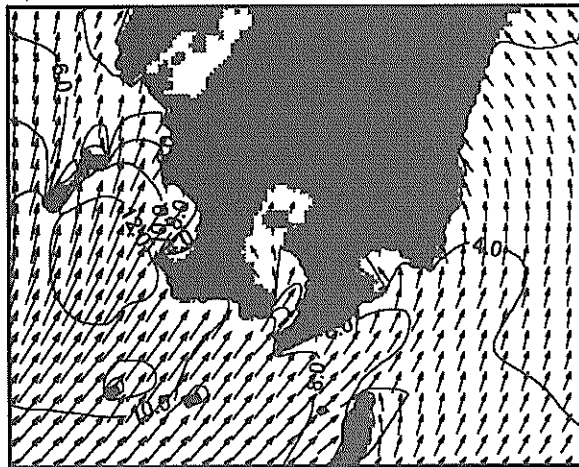
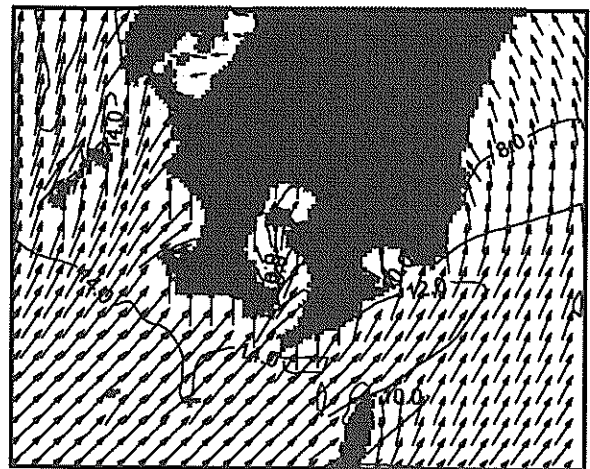
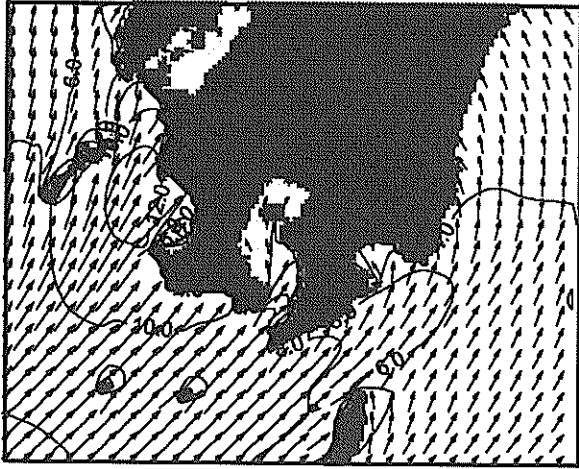


圖-16 (2) 波浪推算結果 (WAM, 小領域 2, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

9/24 4:00



9/24 5:00



9/24 6:00

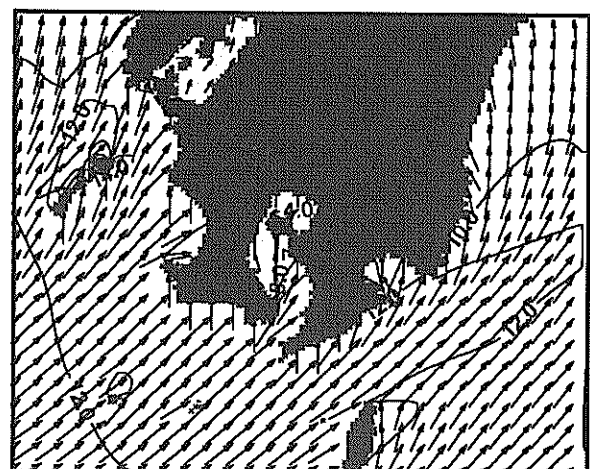
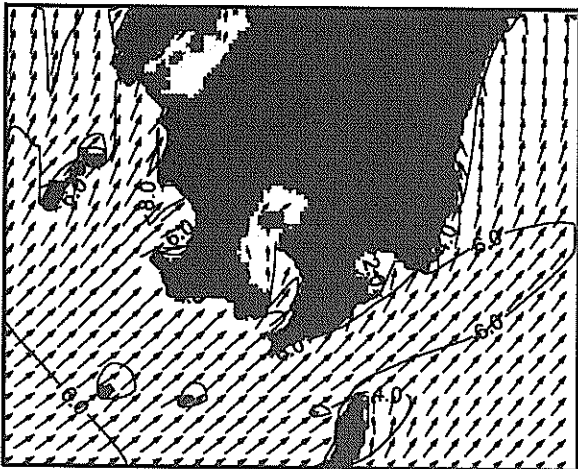
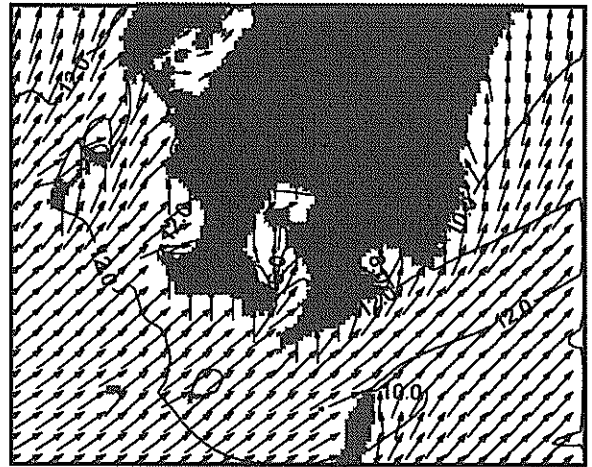
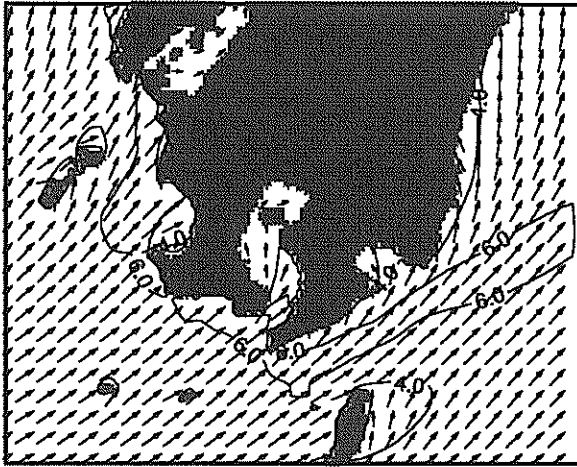
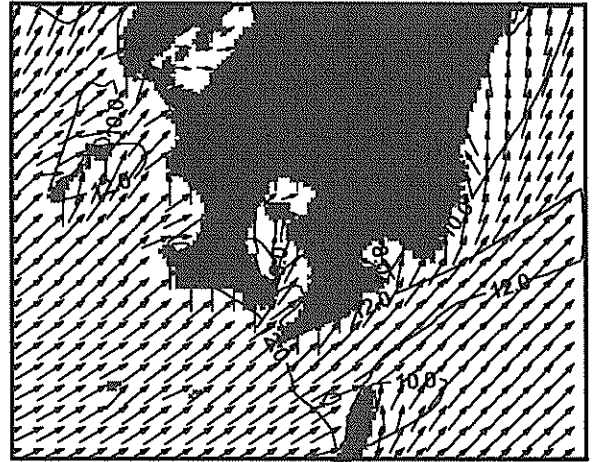
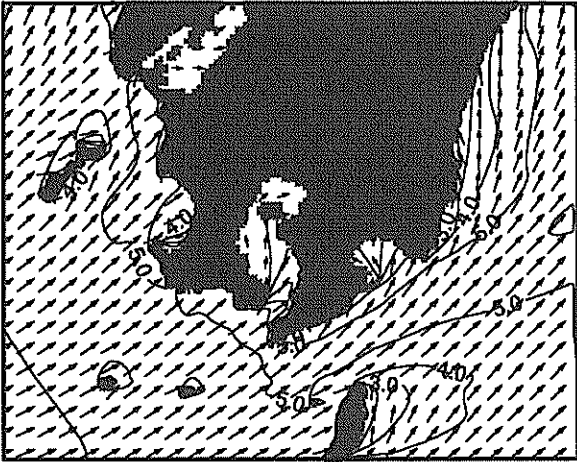


圖-16(3) 波浪推算結果 (WAM, 小領域 2, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

9/24 7:00



9/24 8:00



9/24 10:00

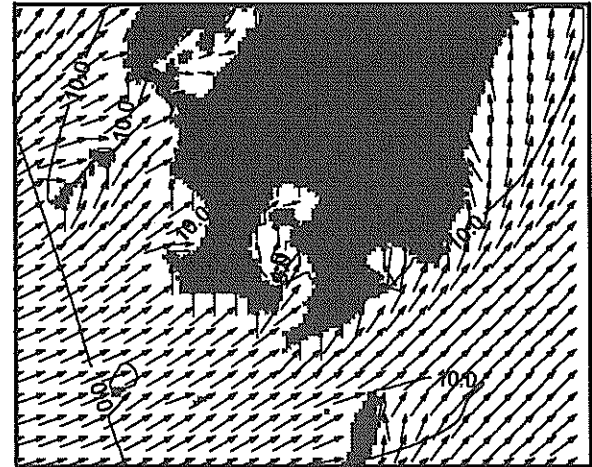
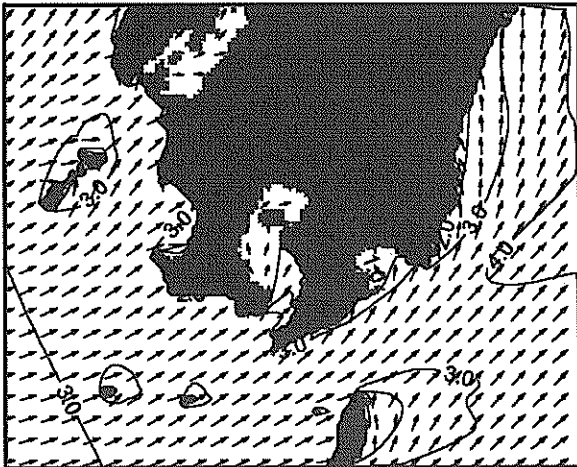


圖-16(4) 波浪推算結果 (WAM, 小領域 2, 左: 有義波高分布, 右: 有義波周期分布)

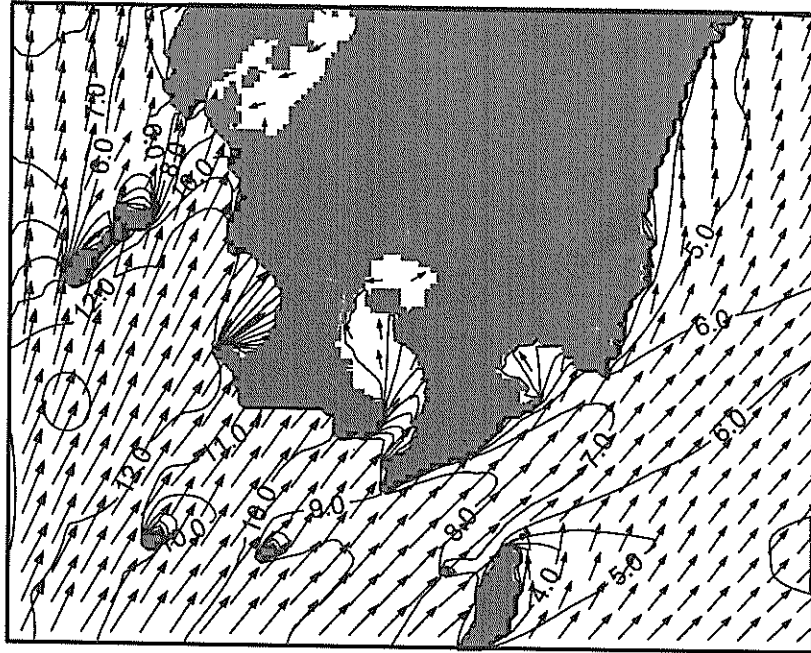


図-17 最大有義波高分布 (WAM)

#### 4. 結論

九州・山口地方で甚大な被害を出した台風 9918 号を対象として、海上風の推算および波浪推算を実施した。海上風の推算に際しては、Myers の台風モデルを用い、特に周防灘周辺海域では陸上地形の影響を考慮して海上風の補正を行った。波浪推算に際しては、最新の第 3 世代波浪推算モデルである WAM Cycle-4 を用いて推算を行い、台風 9918 号による沿岸波浪の出現特性を調査した。また、我が国で長年用いられてきた実績のある第 1 世代波浪推算モデルの MRI を用いて推算を行い、これらの波浪推算モデルの適用性や改良すべき問題点についても検討した。

本研究の主要な結論は以下のとおりである。

- ① Myers の台風モデルを用いて海上風の推算を行った。本研究では、風速の低減係数は 0.6、風向の偏向角は  $30^\circ$  としたが、外洋の波浪推算結果を検討した結果、ほぼ妥当なパラメータ設定であったと思われる。
- ② 当初、内湾海上風の推算にマスコンモデルを用いたが、台風域の風場の 3 次元構造をうまく再現できず、全体的にやや小さ目の海上風速が推算された。マスコンモデルの精度は風場の初期値の精度に強く依存することから、初期値の与え方について再検討する必要がある。

る。

- ③ 周防灘周辺海域のような内湾域を対象として海上風を推算する場合、陸上地形の影響を考慮する必要がある。本研究では、陸上地形の影響を考慮するため、風速の低減係数を簡便な式を用いて変化させて海上風の推算を行ったが、風観測値を概ね再現することができた。
- ④ 台風 9918 号により発生した高波は薩摩半島の西部で最大有義波高が発生し、12m 以上の高波が推算された。また、豊後水道でも 6m 以上の高波が推算された。
- ⑤ 荻田の波浪推算結果は、波高に関しては観測値をほぼ再現できた。しかしながら、WAM については波高減衰時の周期を過大に評価する傾向があり、MRI については風場が急変した際の波向を妥当に推算することができなかった。この原因としては、WAM については減衰項、MRI についてはエネルギー入力項の取り扱いに問題があると考えられる。



## 5. あとがき

本研究では、台風 9918 号を対象として海上風の推算および波浪推算を行った。検討に際しては、いくつかの不確定な要素をなるべく明らかにするため、種々の試算を行い、多くの検討を繰り返した。結果として、いくつかの便宜的な工夫や独断的なパラメータ設定を導入して推算せざるを得なかった。今回の検討により、解決して行かなければならない課題が多く残されていることが分かった。海上風の推算、陸上地形の影響を考慮した内湾海上風の修正、波浪推算、いずれの技術もまだまだ改良すべき多くの課題が残されている。今後、本研究で得られたいくつかの知見をもとに、さらに高精度かつ信頼性の高い波浪推算技術を構築していく必要がある。

最後に、本研究を行うに際し、波浪および風の定常観測を担当された運輸省第四港湾建設局の関係各機関に謝意を表します。また、本研究の取りまとめ際しては、港湾技術研究所加藤一正水工部長には、種々適切な助言、御指導を頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

(2000年8月31日受付)

## 参考文献

- 1) 永井紀彦・橋本典明・佐藤和敏・鈴木勝之・久高将信：台風9918号における我国沿岸波浪の出現特性，第47回海岸工学講演会論文集，2000年，pp.286～290
- 2) Isozaki, I. and Uji, T. : Numerical prediction of ocean wind waves, *Paper Meteorol. Geophys.*, 24, 1973, pp.207-231.
- 3) Inoue, T. : On the growth of the spectrum of a wind-generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanism and its application to wave forecasting, *Geophys. Sci. Lab. Rep.*
- 4) The WAMDI Group : The WAM model – A third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1988, pp.1775-1810.
- 5) Komen, G.j. and 5 authors : Dynamics and modelling of ocean Waves, *Cambridge University press*, 1994.
- 6) Janssen, P.A.E.M. : Wave-induced stress and the drag of air flow over sea wave, *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 1989, pp.745-754.
- 7) Janssen, P.A.E.M. : Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting, *J. Phys. Oceanogr.*, 21, 1991, pp.1631-1642.
- 8) Hasselmann, K. : On the non-linear energy transfer

in a gravity-wave spectrum, Part.1, Geoneral theory, *J. Fluid Mech.*, 12, 1962, pp.481-500.

- 9) Hasselmann, S. and Hasselmann, K. : 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, 1985, pp.1369-1377.
- 10) 川口浩二・橋本典明・永井紀彦：波浪推算における非線形相互作用の働きとその推算精度が及ぼす影響，第47回海岸工学講演会論文集，2000年，pp.251～255

港湾技研資料 台風9918号高潮災害関連

No.969~974

2000.12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 昭和情報プロセス(株)

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright ©(2000) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。