

内湾浅海域（周防灘）における 波浪推算手法の高度化

UPGRADE OF WAVE PREDICTION TECHNIQUE ON SHALLOW WATER REGION IN INNER BAY (SUO-NADA)

佐藤孝夫¹・神蘭文雄²・橋本典明³・市川雅史⁴・宇都宮好博⁵
Takao SATOU, Fumio KAMIZONO, Noriaki HASHIMOTO, Masafumi ICHIKAWA
and Yoshihiro UTSUNOMIYA

¹正会員 工修 国土交通省航空局飛行場部計画課地域航空施設計画官
(〒100-8989 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

(前) 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所長
(〒750-8504 山口県下関市竹崎町4-6-1)

²国土交通省九州地方整備局長崎港湾空港工事事務所
(〒850-0961 長崎県長崎市小ヶ倉町3-76-72)

(前) 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所 第四設計課長
(〒750-8504 山口県下関市竹崎町4-6-1)

³正会員 工博 独立行政法人 港湾空港技術研究所 海洋・水工部海洋水理研究室長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁴理修 (財) 日本気象協会首都圏支社 調査部専任主任技師
(〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 サンシャイン60 55F)
(前) (財) 日本気象協会九州支社 調査部長
(〒810-0052 福岡県福岡市中央区大濠1-6-33)

⁵正会員 工修 (財) 日本気象協会首都圏支社 調査部海洋調査課長
(〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1 サンシャイン60 55F)

We have upgraded from the 1st generation wave model to the 2nd generation wave model, and the 3rd one (in the Jurisdiction Waves Prediction Upgrade Investigation). In addition, we have also upgraded from the shallow water significant wave method to the shallow water TOHOKU- II model for inner bays like Suo-nada and Ariake-sea.

In this time, the 3rd generation wave prediction model is applied to the upgrade of the waves prediction technique in the inner bays, and various problems on the shallow water region in the inner bays are examined. It is necessary to consider the tidal change for the waves prediction by the model on the shallow water region in inner bays.

Key Words : inner bay, shallow water region, wave prediction technique, upgrade, storm surge

1. はじめに

WAMDI Group(1988年)¹⁾により第三世代波浪推算モデル(WAMモデル)が開発され, 各国で波浪予測や波浪追算調査に用いられている。また, 日本の気象庁においても1998年4月から第三世代波浪推算モデル(MRI-Ⅲ)が用いられるようになった。一方, 旧運輸省第四港湾建設局(現国土交通省九州地方整備局)では管内波浪推算高度化調査として, 従来の第

一世代波浪推算モデル(MRI)から第二世代波浪推算モデル, さらに第三世代波浪推算モデルへと高度化を行ってきた。さらに, 周防灘, 有明海等の内湾浅海域においては, 浅海有義波法から浅海東北Ⅱモデルへと高度化を行ってきたが, 今回, これらの内湾浅海域においても第三世代波浪推算モデルを適用し, 内湾浅海域における波浪推算手法の高度化を行うと共に内湾浅海域における諸問題を検討した。

2. 波浪推算手法の高度化

旧運輸省第四港湾建設局では、九州及び南西諸島沿岸において定期的に波浪推算を実施し、確率波浪を算出すると共に各格子点の波浪推算結果をデータベースとして保存・追加・活用してきた。また、内湾浅海域（周防灘、有明海・八代海、鹿児島湾）では、外洋の波浪推算値を境界条件とし、浅海波浪推算モデルによる波浪推算を実施し、外洋と同様なデータベース構築を行ってきた。これらの波浪推算において、表-1に示すように波浪推算手法の高度化を行い、波浪推算の精度向上を図っている。

この波浪推算高度化の流れの中で、外洋域においては、第1世代の波浪推算モデルから第2世代波浪推算モデル、さらには第3世代波浪推算モデルと波浪推算モデルの向上を行っている。また、内湾浅海域では、浅海有義波法から浅海東北IIモデル、さらには第3世代浅海波浪推算モデル²⁾と向上を図り、外洋域から内湾浅海域まで同一の波浪推算モデルで推算が可能となった。最新の手法は、第三世代波浪推算モデルを用いており、外洋深海域から内湾浅海域まで同一のモデルで計算できるようになっている。

表-1 旧運輸省第四港湾建設局における波浪推算手法の高度化

変遷	内湾浅海域		外洋
	内湾浅海域	外洋	
従来 ↓	浅海有義波法	第1世代 (MRI)	第1世代 (MRI)
	浅海東北II	〃	〃
	〃	〃	第2世代
H9年度	〃	第2世代	〃
H10年度	〃	〃	第3世代
H11年度 ～	浅海第3世代	第3世代	改良第3世代

3. 波浪推算手法の概要

(1) 風場推算手法

海上風の推算を図-1に示すように、2つの段階を経て行う。まず、天気図から作成した気圧・気温・水温を基に、Blackadar-Cardoneの方法により外洋海上風の推算を行う。このBlackadar-Cardoneの方法は、Blackadar(1965)が開発した大気成層が中立でバロクリニック（等圧面と等温面が互いに混じり合っている場）な条件での大気境界層の2層モデルを、Cardone(1969)が非中立である場合に拡張したものであり、気温と水温との差を用いて大気の安定度を考慮するもので、精度良く風場の推算を行うこ

とができる。ただし、台風中心付近の強風域については、マイヤーズの台風モデルを組み込んで海上風を推定する。次に、推定された外洋海上風を初期値として、地形変化の影響をマスコンモデルにより取り入れ、内湾海上風を推定する。

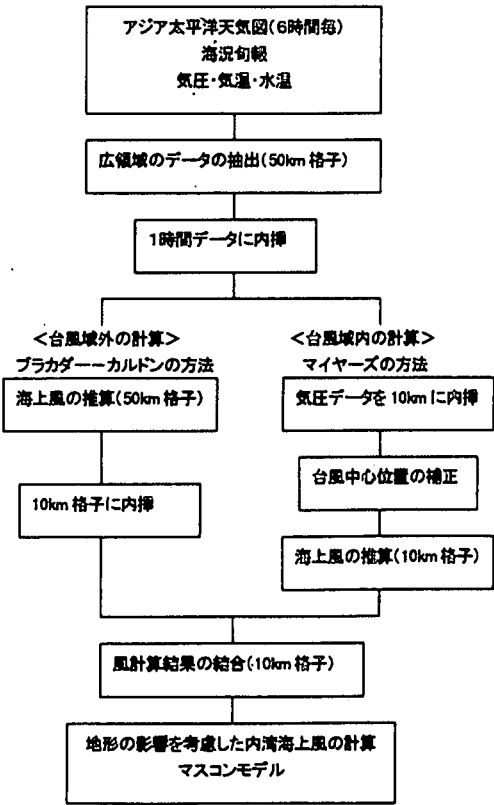


図-1 風場推算手法のフロー図

(2) 波浪推算手法

本調査で用いた第3世代波浪推算モデルは、球面座標系を用いた全球の第3世代波浪推算モデルを浅海域に適用可能なように改良したモデルである。

時間 t 、緯度 ϕ 、経度 λ 、波向 θ 、角周波数 ω 、とすると、一般的なエネルギー平衡方程式は式(1)のように表される。

$$\frac{\partial \hat{F}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi}(\phi \hat{F}) + \frac{\partial}{\partial \lambda}(\lambda \hat{F}) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\theta \hat{F}) + \frac{\partial}{\partial \omega}(\omega \hat{F}) = \hat{S} \quad (1)$$

ここに、 $\hat{F}$ は波浪のスペクトル密度を表し、 $\hat{S}$ はエネルギーソース関数を表す。 $\hat{F}$ は、デカルト座標系における標準的なスペクトル密度 F とは、次の関係式によって結びつけられる。

$$\begin{aligned} \iint \hat{F} d\phi d\lambda &= \iint F dx dy \\ dx dy &= R^2 \cos \phi d\phi d\lambda \\ \hat{F} &= F R^2 \cos \phi \\ \hat{S} &= S R^2 \cos \phi \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 R は地球の半径である。式(2)を式(1)に代入すれば、球面座標系におけるエネルギー平衡方程式 (3)が得られる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\dot{\phi} \cos \phi F) + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\dot{\lambda} F) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta} F) + \frac{\partial}{\partial \omega} (\dot{\omega} F) = S \quad (3)$$

また、式(3)中の $\dot{\phi}, \dot{\lambda}, \dot{\theta}, \dot{\omega}$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{C_g \cos \theta - \bar{U}|_{north}}{R} \\ \dot{\lambda} &= \frac{C_g \sin \theta - \bar{U}|_{east}}{R \cos \phi} \\ \dot{\theta} &= \frac{C_g \sin \theta \tan \phi}{R} + \dot{\theta}_h \\ \dot{\theta}_h &= \left(\sin \theta \frac{\partial \omega}{\partial \phi} - \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \right) / kR \\ \dot{\omega} &= \frac{\partial \omega}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 C_g は群速度であり、

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right), \quad k : \text{波数},$$

g : 重力加速度, h : 水深, $\bar{U}$: 流れ, である。

また、角周波数には次式の分散関係式がある。

$$\begin{aligned} \omega &= \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U} \\ \sigma &= \sqrt{gk \tanh kh} \end{aligned} \quad (5)$$

さらに、式(3)の右辺のエネルギーソース項は次式で表される。

$$S = S_{nei} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bf} \quad (6)$$

ここに、 S_{in} : 風から波へのエネルギー輸送項、

S_{nl} : 非線形エネルギー輸送項、 S_{ds} : エネルギー消散項、 S_{bf} : 海底摩擦項、である。

(3) モデルテスト

ここでは、図-2に示す矩形の領域(21×21, 格子間隔0.05°)に、 $U_{10}=20\text{m/s}$ の南風が一様に吹き続け、ほぼ定常状態に達した6時間後に $U_{10}=20\text{m/s}$ の西風に代わる場合のテスト計算を行い、モデルの妥当性を検討した。表-1に、テスト計算における計算諸条件を示す。

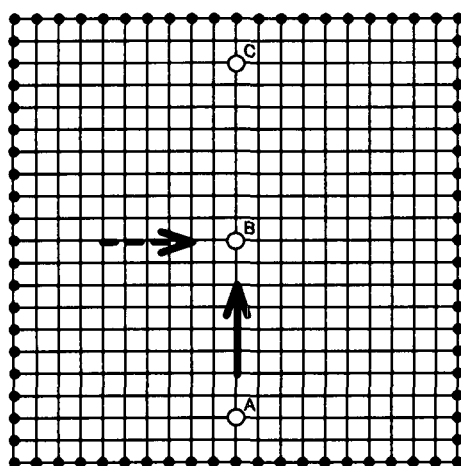


図-2 モデルテストの領域図

表-1 テスト計算条件

領域	狭領域 (格子間隔0.05°)
格子数	21×21
格子間隔	0.05度 (約5km)
方向分割数	36 (5° ~ 355度)
周波数分割数	40
周波数帯	0.035Hz ~ 1.009Hz
周期帯	28.6秒 ~ 1.0秒
成分数	1440成分
計算時間間隔	15秒
水深条件	深海

図-2において、モデル地形の境界は全て陸地(黒丸)とし、その内部は全て海(深海)として計算を行った。また、矢印は風向を表している。さらに、中央のラインの白丸は、計算結果の出力地点を表し、南風の場合は、下から上に行くに従ってフェッチが長くなっているが、6時間後に西風に代わった場合は、A~C地点とも同じフェッチとなっている。因みに、地点A及びCは岸から約10km沖合であり、地点Bは岸より50km沖合である。

このテスト計算の結果を方向スペクトルで表示したのが図-3である。図中左の列が地点A、中央の列が地点B、右の列が地点Cを表し、上から順番に5時間後から8時間後までの1時間毎の方向スペクトルを表している。方向スペクトルは、横軸を周波数(Hz)、縦軸を方向で表し、最大値で規格化した0.1~0.9の等値線で表している(等値線の太線は0.5)。なお、方向スペクトルの上側の図は周波数スペクトルを、右側の図は方向分布を示している。

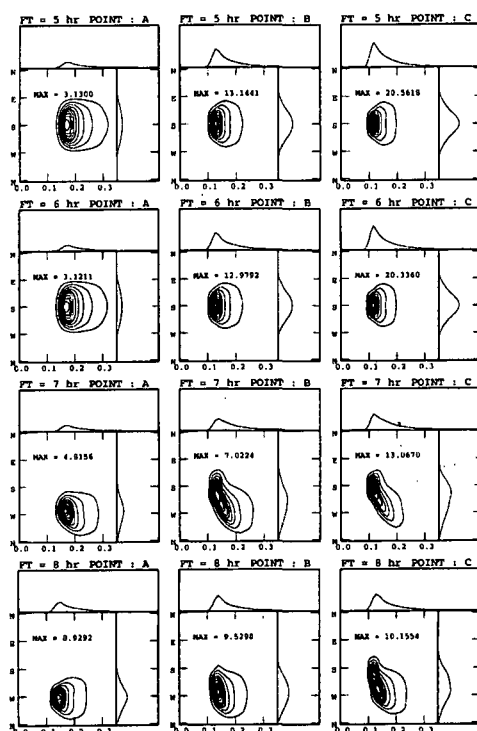


図-3 風向急変時の方向スペクトル図

これらの図を見ると、6時間までは理想発達状態であり、ほぼ定常状態に達している。フェッチの長い地点Cでは、よく発達しており、ピーク周波数も低周波側に移動しており、低周波側のエネルギーは高周波側のエネルギーに比べ方向が集中していることがわかる。一方、フェッチの短い地点Aでは、エネルギーは高周波側にあり、方向も集中せず多方向性を示している。

また、風向が急変した7時間以降を見ると、高周波側のエネルギーは新しい風向に即座に追従しているが、低周波側のエネルギーはうねりとして残り、時間をかけて新しい風向へと変化している。なお、新しい風向では3地点とも同じフェッチであるにもかかわらず、地点AとCとでは方向スペクトルの形状に違いが見られるが、これは側方境界（岸）の影響によりエネルギーの遮蔽効果が現れているためである。

以上の結果から、本調査で用いる波浪推算モデルは妥当なものと判断される。

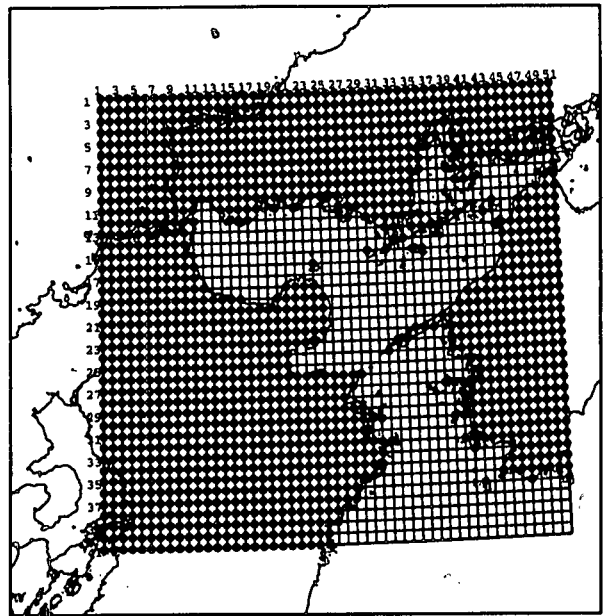


図-5 狭領域の計算領域図

4. 周防灘海域における波浪推算

(1) 計算条件

波浪推算は、まず外洋を対象とした広領域で推算を行い、その結果を時空間的に引き継ぐ形で内湾域の狭領域を計算する。広領域では深海モデルとして計算するが、狭領域では水深の影響を取り入れた浅海モデルとして計算を行う。計算領域図を図-4、5に示す。

広領域（図-4）では、格子間隔0.5度（約50km）とし、計算タイムステップは5分とした。

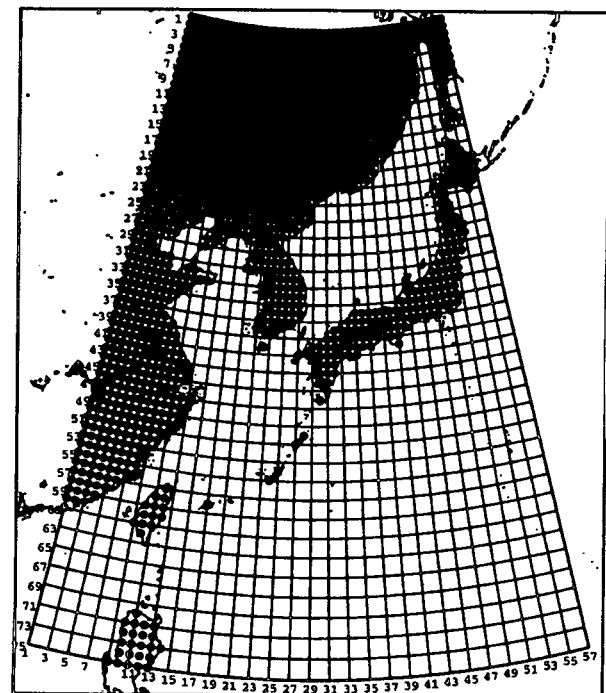


図-4 広領域の計算領域図

また、狭領域（図-5）では、格子間隔0.05度（約5km）、計算タイムステップは15秒とした。なお、広領域では計算対象周期を2秒までとしたが、狭領域では内湾の風浪成分を評価するため、計算対象周期を1秒まで拡張した。

さらに、計算対象とした台風9918号及び台風9119号の経路図を図-6に示す。

(2) 波浪推算結果

3. で記述した海上風及び波浪推算モデルを用い、(1)の条件で、台風9918号と台風9119号の波浪推算を実施した。

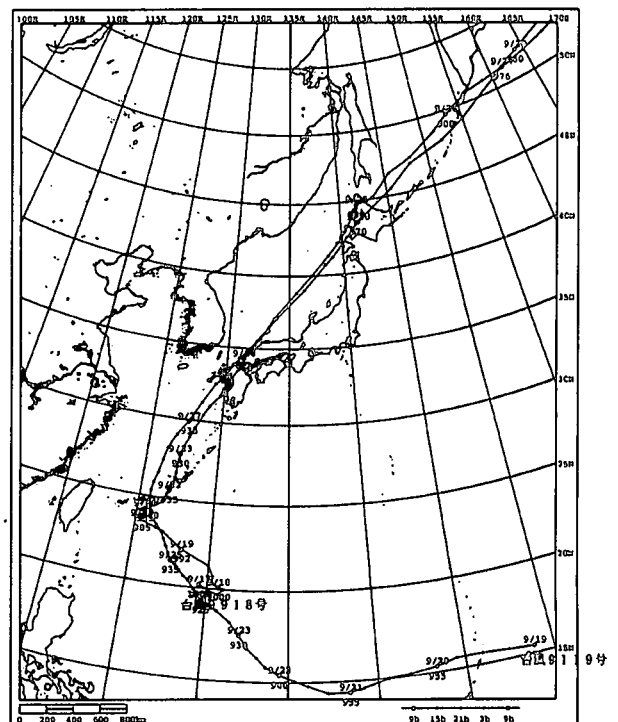


図-6 台風経路図 (T9918 & T9119)

まず、海上風の計算では、広領域ではカルドンの方法で計算し、狭領域ではカルドンの計算結果を初期値としてマスコンモデルにより地形の影響を取り入れた。

次いで、波浪の計算では、第3世代の深海波浪モデルを用いて広領域を深海として計算し、豊後水道入り口付近の波浪エネルギーを境界条件として、狭領域を浅海波として計算を行った。

図-7は台風9918号の風場計算結果と周防灘周辺の実測風とを比較したものである。この図を見ると、全体的な変化傾向は再現できているが、台風が接近してくる時までは過小に、台風通過後は過大に評価しており、台風中心の近くほどその傾向が顕著である。内湾海上風の問題点として、以下の事項が考えられる。

- ・ 外洋域等の開けた海域では、場の風と台風の移動等に伴う移流場の風を合成して海上風を算定し、非常に良い結果が得られていたが、内湾域では移流場の影響が過大に評価され、台風中心域の風を見直す必要がある。
- ・ マスコンモデルは質量保存の法則で地形の影響を取り入れているため、響灘から周防灘に抜けるような風は過大に収束される傾向がある。質量保存則だけではなく、運動量も保存されるような新たな手法の開発が必要である。

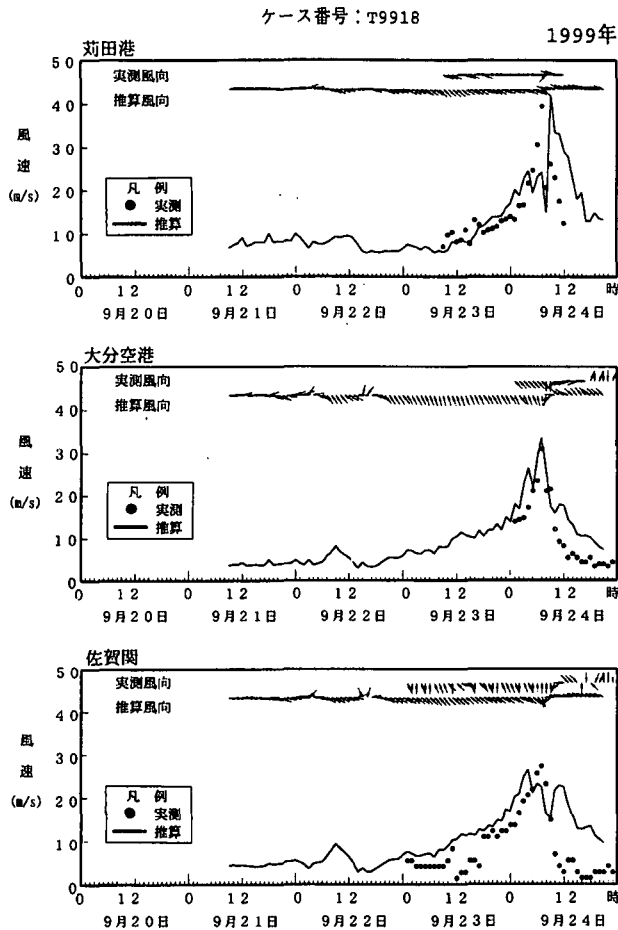


図-7 台風9918号時の風の経時変化図

また、図-8は台風9918号時の萩田港における波浪の経時変化図であるが、台風接近直前の高波高が再現できていない。これは風の再現性に問題があるも

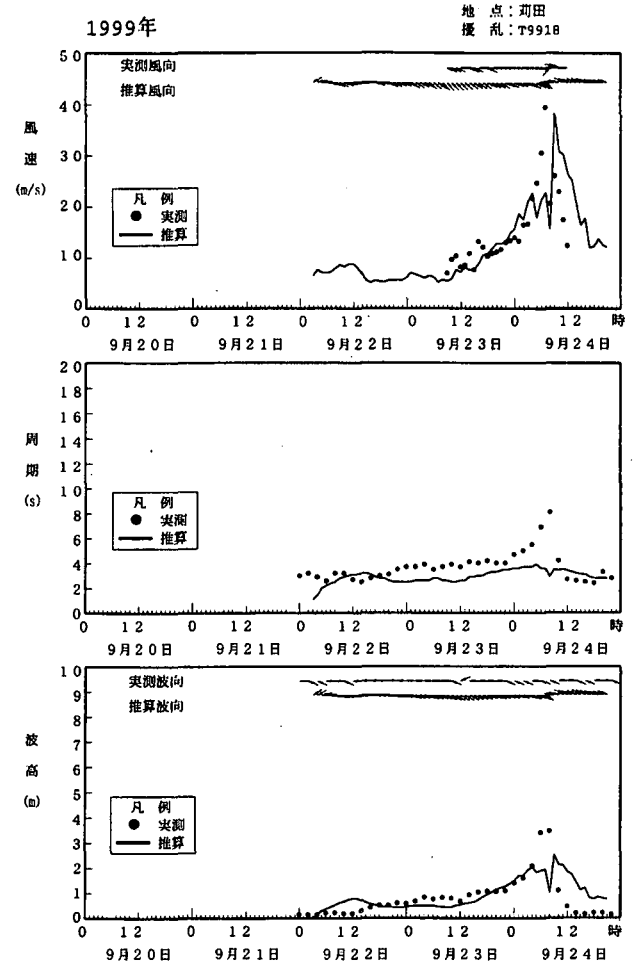


図-8 台風9918号時の萩田港における波浪

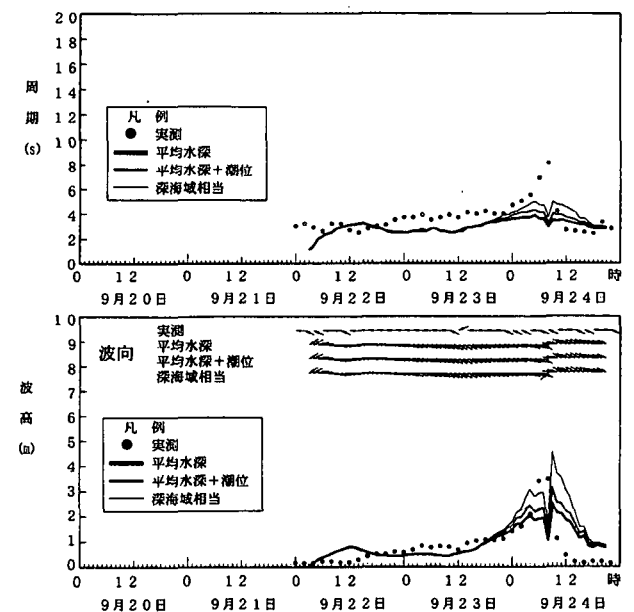


図-9 潮位変化が波浪推算に与える影響

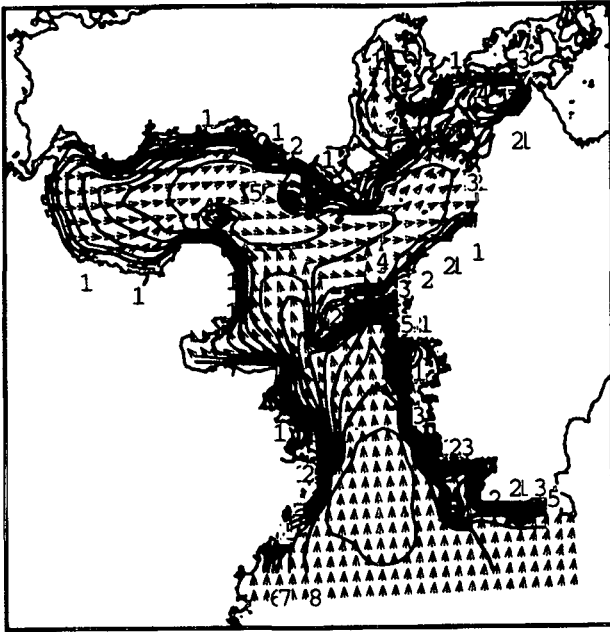


図-10 平均水深での計算結果

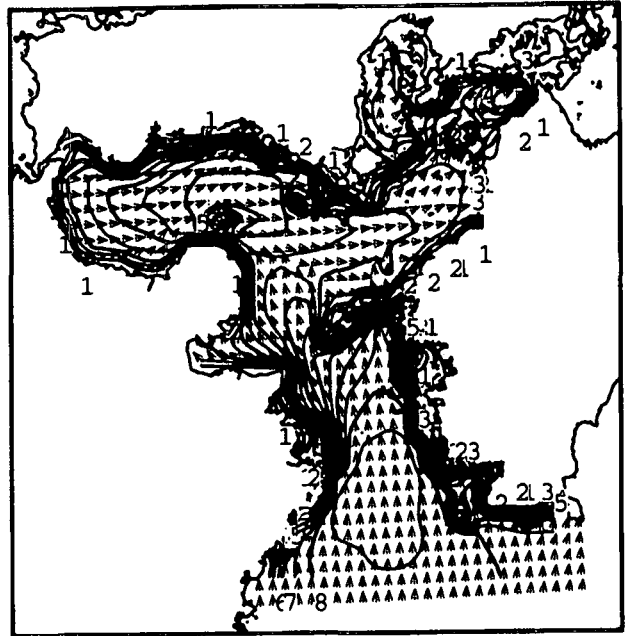


図-11 平均水深+4 mでの計算結果

のと思われる。また、高波高時における周期も再現性が悪いが、内湾域では僅かな風向の差でフェッチ等が著しく変わるため、波高・周期とも再現性を良くするためには、精度の良い風場推算が必要である。

(3) 潮位変化が波浪推算に及ぼす影響

台風9918号時の周防灘では、平均水面より約1.5 m高い満潮時に、高潮偏差約2 mを記録している。つまり、平均水面より3.5 m高い水面状態で台風が最接近したことになる。

そこで、潮位変化が波浪推算に及ぼす影響の程度を把握するため、通常の水深を用いて波浪推算を行った場合と、平均水深+4 mの水深で波浪推算を行った場合とを比較した。図-9は平均水深での計算、平均水深+4 mでの計算及び深海として計算した結果を比較したものである。この結果によると、潮位変化を考慮した場合、約70 cm波高が増大している。また、図-10は平均水深で計算した場合の各項視点の最大有義波高分布であり、図-11は平均水深+4 mでの同分布である。この図によると、水深の深い豊後水道や燧灘では波高に差は見られないが、周防灘においては差が見受けられる。

これらのことから、水深が30 m以浅の周防灘では、高潮等の潮位変化を考慮する必要があるものと思われる。

5. おわりに

今後の港湾施設のより信頼性の高い設計波算定資料の作成に役立てることを目的として、周防灘海域等の浅海域における波浪推算手法の精度向上を図ると共に、課題等について検討を行った。

主要な成果は以下のとおりである。

- ・ 第3世代波浪推算モデルを周防灘海域に適用し、浅海域の計算が可能のようにモデルのチューニングを行った。
- ・ チューニングしたモデルを用い、周防灘海域において台風9918号時の波浪推算を実施したが、内湾海上風の精度向上が早急に必要である。
- ・ 潮位変化が波浪推算に及ぼす影響を把握するため、潮位+高潮偏差を平均水深に加えたテスト計算を行った結果、荻田港における有義波高は最大約70 cm増加した。
- ・ 内湾浅海域における波浪推算では、潮位変動の影響を波浪推算モデルに取り入れる必要がある。

参考文献

- 1) The WAMDI Group: The WAM model - A third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., Vol. 18, pp.1775-1810, 1988.
- 2) 宇都宮好博・大西健二・鈴木靖：第三世代波浪推算モデルの浅海域への適用、海岸工学論文集、第46巻、pp.266-270, 1999.