

井上のスペクトル法波浪推算モデルによる風場推算法の検討

島田 敬*・池田秀文**・広瀬宗一***・鈴木善光****

1. はじめに

波浪推算法の適用にあたって、まず問題になるのが、海上風を精度よく推定することである。海上風の推定法として、台風モデルから推定する方法、天気図から推定する方法、また実測風に基づいて推定する方法などがある。内湾や水道部などでは、海上風は周辺の地形特性の影響を受けて複雑な平面分布を示すため、このような海域における波浪推算に用いるための風場としては、実測風に基づいて推定したものを使用の方が、より良好な推算結果を得ることができると考えられる。

本研究では、紀伊水道を対象領域として、同領域沿岸で取得されている風向風速計群による風データに基づく内挿計算から、台風時における海上風の平面分布を推定する。また、あわせて台風モデルおよび天気図から推定する方法等と比較し、各風場推定法の特徴および波浪推算結果に与える影響を明らかにするものである。

2. 風場推算方法

2.1 実測風の内挿による方法

a) 海上風の推定方法

紀伊水道周辺には、図-1に示すように多数の地点に風向風速計が設置されており、異常気象時等には1時間毎に風データが得られている。しかし、各地点の風速計は大部分陸上部に設置されている上に、設置高度および周囲の地形特性が相互に異なっているため、これらの記録をそのまま用いて海上風の推定を行うには問題がある。そこで、まず一般に強風時の高度補正に用いられる1/7乗則を用いて、各地点の風速を波浪の計算に用いる高度20mでの風速に変換することとした。次に、観測地点の海岸からの距離をパラメータとした4段階の風速比を乗ずることにより、海上風補正を行った。

b) 実測風による平面分布の推定法

波浪の数値計算を実施するにあたっては、以上のよう

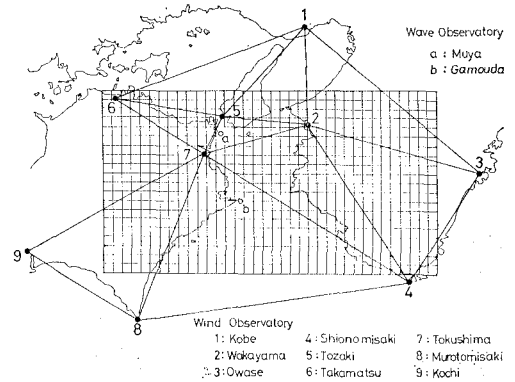


図-1 風向風速計の設置点および計算領域

に推定した海上風を各格子点上に内挿する必要がある。本研究では、以下の二つの方法により実測風の内挿を行い風場の比較を行った。

i) 平面近似補間法

平面近似補間法は、有限要素法においてよく用いられているもので、山口ら(1981)¹⁾により採用されている。領域を各風観測点による三角網でおおひ、風速成分毎に平面により直線内挿を行い、各格子点上の風向・風速を求めるものである。平面近似補間式は次式で表わされる。

$$u_x = \sum_{i=1}^3 N_i u_{xi}, \quad u_y = \sum_{i=1}^3 N_i u_{yi} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u_{xi} および u_{yi} : 観測点における x 方向および y 方向の風速、 N_i : 座標系の一次関数で表わされる形状関数である。

ii) 重みつき補間法

重みつき補間法は、沿岸波浪予報等に用いられているもので、各々の風観測点の風速成分を、求める格子点との距離の逆数によって重みづけ平均し、各格子点上の風向・風速を求める方法である。重みとしては、距離の逆数あるいはそのべき乗が採用されるが、簡単のため前者を用いると、重みづけ補間式は次式で表わされる。

* 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局企画課
 ** 正会員 工修 同 海域整備課
 *** 正会員 工修 同 神戸調査設計事務所
 **** 正会員 理修 (財)日本気象協会

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \sum_{i=1}^n r_i^{-1} u_{xi} / \sum_{i=1}^n r_i^{-1} \\ u_y &= \sum_{i=1}^n r_i^{-1} u_{yi} / \sum_{i=1}^n r_i^{-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 n : 観測地点数、 r_i : 格子点と観測点間の距離である。

2.2 台風モデルによる方法

これは、次式に示す Myers の台風モデル²⁾によって同心円上の気圧分布を与え、中心対称風と場の風から各格子点上の風向・風速を求める方法である。

$$P = P_c + \Delta P \cdot e^{-r_0/r} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 P_c : 台風の中心気圧、 ΔP : 台風中心の気圧深度、 r_0 : 台風の最大風速点までの距離、 r : 台風の中心から格子点までの距離である。

2.3 天気図による方法

アジア太平洋天気図から各格子点上の気圧値を読み取り、次の二種類の方法により各格子点上の風向・風速を求めた。

a) 傾度風モデル

傾度風は等圧線が曲率を持っているような気圧場で、気圧傾度力と転向力、遠心力が釣り合った状態で生ずる風であり、傾度風速は次式で表わされる。

$$V_{gr} = \pm r \left(\sqrt{\omega^2 \sin^2 \varphi \pm \frac{\partial P}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r}} - \omega \sin \varphi \right) \dots\dots (4)$$

ここに、 $+$: 低気圧性の曲率の場合、 $-$: 高気圧性の曲率の場合を表わし、 ω : 地球自転の角速度、 φ : 緯度、 P : 気圧、 ρ_a : 空気密度、 r : 曲率半径である。

b) Cardone モデル

Cardone (1969)³⁾ のモデルは、自由大気では傾度風がそのまま吹くとした仮定のもとに、この下層に存在するエクマン層、地表層を含めた大気境界層について、大気安定度を求め、次式の境界層方程式を満足する任意の高度の風速を求めるものである。

$$U_z = \frac{U_*}{K} \left(\ln \frac{z}{z_0} + \frac{\beta' z}{L'} \right) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 K : カルマン定数 (≈ 0.4)、 U_* : 摩擦速度、

Z_0 : 粗度定数、 L' : 安定度長さ、 β' : 定数である。

なお、大気安定度の計算にあたって、気温はアジア太平洋天気図に示された実測値、水温は全国海況旬報の等温線をもとに定めた。

3. 波浪推算手法

本研究の波浪推算には、井上のスペクトル法波浪推算モデル⁴⁾を用いた。井上モデルでは Hasselmann によるエネルギー平衡方程式のうち、エネルギーの授受に関する項として、Phillips と Miles による風波の発生・発達に関する項及び砕波によるエネルギー消散に関する項を考慮した次式を基本式としている。

$$\frac{dS}{dt} = -C_g \cdot \rho S + (A + BS) \left\{ 1 - \left(\frac{S}{S_m} \right)^2 \right\} \dots (6)$$

ここで、 S は時間 t 、位置 x での周波数 f の成分波のスペクトル、 C_g は成分波の群速度、 A は Phillips の共振理論における直線の成長率、 B は Miles の不安定理論における指数関数の成長率である。 S_m は Pierson-Moskowitz のスペクトルである。

4. 推算条件

4.1 計算領域およびタイムステップ

計算領域は紀伊水道を最終計算領域とし、日本南方から広、中、狭の三領域に分け、各領域の間でスペクトルの受け渡しを行いつつ計算を進めるように設定した。格子点間隔は各々 111 km, 20 km, 5 km とし、格子点数は 23×23 , 24×17 , 37×21 、タイムステップは、1.5 時間、15 分、3.75 分とした。また実測風を平面近似補間法により内挿する際の観測点による三角網は図-1に示す通りである。

4.2 対象台風

風場推算手法の比較・検討に用いる台風は、紀伊水道沿岸で実測波浪が多く取得され、比較的規模の大きな台風第 7916 号 (1979 年 9 月 27 日～10 月 1 日) とした。

4.3 検討ケース

各風場推算方法の特性および波浪推算に与える影響を

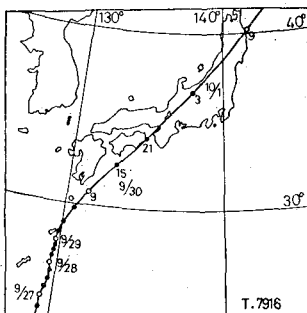


図-2 台風経路

表-1 検討ケース

条件 ケース	風 場 推 算 方 法			方向分布関数
	広領域	中領域	狭領域	
1	Myers モデル法	Myers モデル法	平面近似 補間法	$\cos^4 \theta$ 型, $\cos^2 \theta$ 型
2	Myers モデル法	Myers モデル法	重みつき 補間法	$\cos^4 \theta$ 型
3	Myers モデル法	Myers モデル法	Myers モデル法	$\cos^4 \theta$ 型
4	傾度風 モデル法	傾度風 モデル法	傾度風 モデル法	$\cos^4 \theta$ 型
5	Cardone モデル法	Cardone モデル法	Cardone モデル法	$\cos^4 \theta$ 型

検討するために、表-1 に示す5 ケースについて推算を行った。さらに波浪推算に際して波の方向分布関数として、 $\cos^2\theta$ 型と $\cos^4\theta$ 型の2種類を与えて波浪推算結果の比較を行った。

5. 推算結果

5.1 風場推算結果の比較

図-3 に中領域での風向風速経時変化図を、図-4 に同じく風場平面図を示す。足摺岬付近での風場を見ると Myers モデルによる風場では、台風移動に伴う流れの場による影響が風向によく再現されている。一方、傾度風モデル、Cardone モデルではこの影響を考慮して

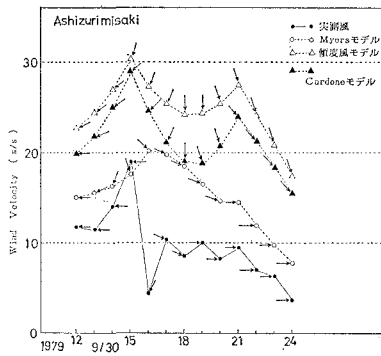


図-3 風向風速の経時変化

いないため、風向の再現性があまりよくない。風速については、いずれの方法も観測値に比べてやや大きいものの、傾度風モデル、Cardone モデルの方が、Myers モデルに比べ全般的に大きめに推算されている。これは台風中心で等圧線が密集しているため、天気図作成時あるいは読み取り時に、どうしても外側にふくらんだ等圧線分布になることが原因の一つであると考えられる。また傾度風モデルと Cardone モデルでは、両者の風場に大差がないことがわかる。

次に 図-5 に示す狭領域の風場分布を見ると、平面近似補間法による風場分布は、台風モデルによる方法と比べて、地形効果によると思われる風向分布の細かな変動が見られる。一方 Myers モデルでは、いわゆる危険半円と言われる強風域がよく再現されている。これは先にも述べたように、Myers モデルでは台風移動に伴う流れの場の影響を考慮しているためであると考えられる。重みつき補間法の場合には、対象海域での風の分布に関係しない地点でも距離の逆数による重みづけをして取り込んでしまうこと、及び風の分布に重要な影響を与える地点でも距離が離れているため重みが小さくなることなどのため、水道中央部での再現性はよくない。

なお今回天気図による方法では、狭領域についてはうまく風場を推定することができなかった。これは特に台風を対象とした場合、天気図から気圧を読みとって気圧傾度を推定する方法において、風場の推定精度は気圧の

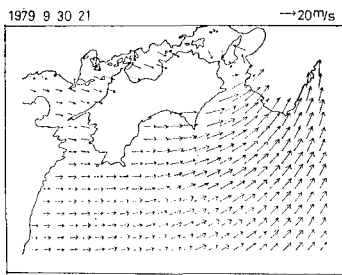


図 4-1 Myers モデルによる風場分布

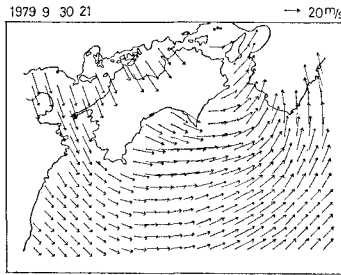


図 4-2 傾度風モデルによる風場分布

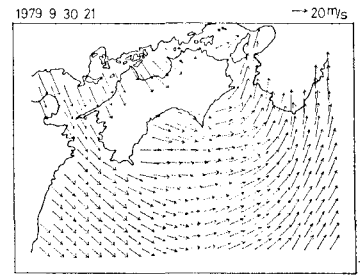


図 4-3 Cardone モデルによる風場分布

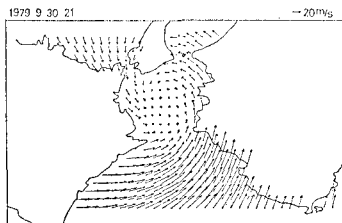


図 5-1 Myers モデルによる風場分布

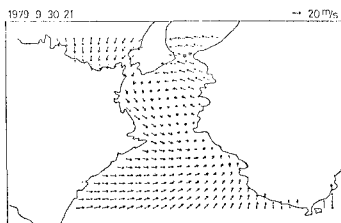


図 5-2 平面近似補間法による風場分布

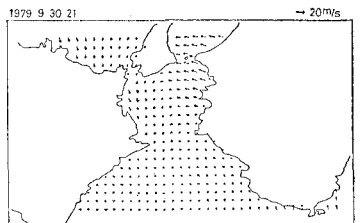


図 5-3 重みつき補間法による風場分布

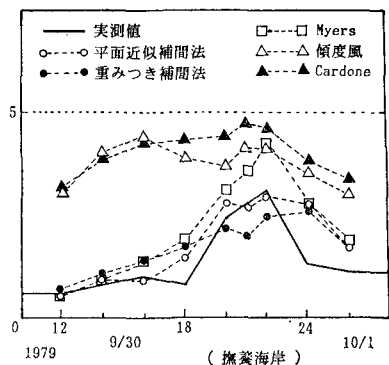


図-6 波高経時変化

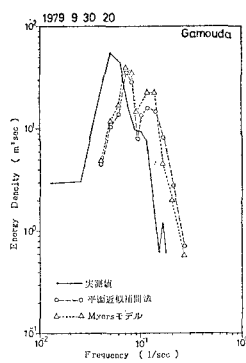


図-7 周波数スペクトル

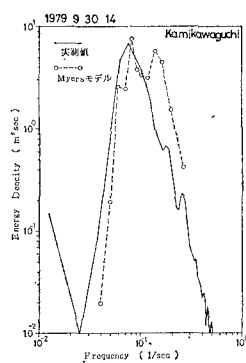


図-8 周波数スペクトル

読み取り精度に大きく依存するためであると考えられる。

5.2 波浪推算結果の比較

a) 波高の経時変化

図-6 に撫養海岸（水圧式波高計，設置水深 -15m）での波高の経時変化を示す。図によると今回比較した風場推算法の中では，実測風の平面近似補間法が波高ピークもパターンもよく再現されていることがわかる。傾度風モデル，Cardone モデルでは，地形の影響をうまく考慮することができず，大規模台風のように等圧線の間隔が計算上の格子点間隔に比べて小さい場合には気圧傾度のばらつきが大きくなるため，推算風速が全般的に大きく，波浪の発達の当初から波高は大きく推算されている。これらの方法では，天気図から直接気圧を読み取り，これをベースとするため，6時間という天気図時間々隔では台風のように移動速度の速い気象擾乱によりもたらされる風場の変化をうまく表現できないことも一因と考えられる。

重みつき補間法も波高のピークがうまく再現されていない。この理由としては，風場を内挿する際に，全ての観測点の風データを距離の逆数だけの重みづけで計算に用いているために，ピークが無条件に平滑化されたことが考えられる。Myers モデルは，波高経時変化のパターンはよく再現しているもののピーク値は高めである。

またどの推算値も，波浪ピークを迎えた後の波高減衰速度が実測値と比べて遅い傾向が見られる。これは井上モデルの推算式中の逆風による減衰項の取扱いおよび非線型相互作用項を特別に考慮していないことなどに起因するものと考えられる。

b) スペクトル

図-7 に蒲生田岬（水圧式波高計，設置水深 -16.5 m）での周波数スペクトルを示す。Myers モデルによる推算値，平面近似補間法による推算値のいずれも，スペクトルの形，大きさが実測値と概ね合っており，波高

の再現はできたと考えられる。推算スペクトルのピーク周期は，実測スペクトルのそれに比べて短い方にずれている。これは蒲生田岬の波高計設置点までの浅水変形及び水圧式波高計による計測が原因と考えられる他，非線型相互作用の取り扱いも一因として考えられる。

Myers モデルでは平面近似補間法に比べて，短周期のレンジでエネルギー密度が高くなっている。これは，Myers モデルの方が，平面近似補間法に比べ，蒲生田岬付近の局所的な風場を大きめに推算しているためであると考えられる。

図-8 に上川口港（高知県）でのスペクトルの実測値と推算値の比較を示す。これによると，両者は比較的よく合っていると判断される。

c) 波高分布

従来よりスペクトル法による波浪推算プログラムでは，方向分布関数として $\cos^2\theta$ 型が一般的に用いられているが，本研究では太平洋岸を対象としていることから， $\cos^4\theta$ 型についても計算し，どの程度の差が現れるかを知るために比較を行った。比較にあたっては平面近似補間法による風場を用いた。図-9 に各々の入射波の最大波高を1とした場合の波高比分布を示す。

図-9 によれば，方向分布関数による波浪推算値の差

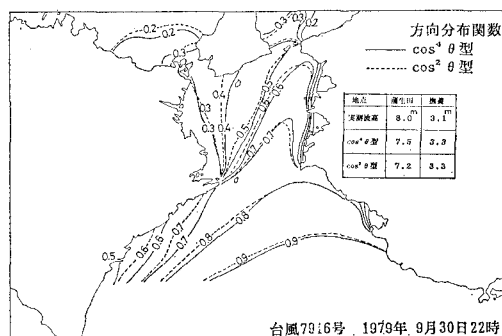


図-9 波高比分布

は少ないが、半島等の陰になる領域では $\cos^4\theta$ 型の波高が小さくなる。これは、エネルギーの方向集中度が異なることによる回折効果の差および方向分散効果の差に起因していると考えられる。

なお、実測値との比較によれば、太平洋沿岸における台風を対象とした波浪推算には、方向分布関数としては、 $\cos^4\theta$ 型の方が適していると考えられる。

6. おわりに

以上、本稿では、台風第 7916 号を対象に実測風の平面近似補間法による内挿、同じく重みつき補間法による内挿、Myers モデル、傾度風モデル、Cardone モデルの 5 種類の手法により風場推算を行うとともに、それらの推定風場を用いて井上モデルにより波浪推算を行い、推算結果の比較を行った。その結果得られた成果を要約すると次のようになる。

1) 実測風の平面近似補間による風場推算では、地形特性による風の集中、発散や台風に伴う渦などの状況が比較的推算値に加味された形で表現することができ、また波浪推算結果も実測値に近いものを与えることができる。

2) 実測値の距離の逆数による重みつき補間を用いた風場推算では、台風による風場をうまく表現できなかった。このため波高も実測値に比べ小さめである。

3) Myers モデルによる風場推算では、複雑な狭領域での地形特性の影響を表現することができないため、波浪の経時変化パターンはよく表現されるものの、波高は実測値に比べ大きめとなる。

4) 天気図を用いた傾度風モデル、Cardone モデル

は、狭領域での台風による風場表現には適さない。すなわち、両モデルとも風速、波高について、実測値及び他の推算方法に比べかなり大きく推算される。

5) 波浪推算の際の方向分布関数形は、太平洋岸での台風による推算では、 $\cos^2\theta$ 型より $\cos^4\theta$ 型の方が適している。

6) 井上のスペクトル法波浪推算モデルは、ピーク波高は概ね合うが、逆風による減衰効果および非線型相互作用の表現等に今後の改良の余地がある。

本研究では、気象擾乱を台風第 7916 号に、また海域は紀伊水道に限定して、風場・波浪の推算結果の比較を行ったが、今後他の台風、低気圧、他の海域についても同様の比較を行い、今回明らかになった点についてさらに詳細な検討を行いたい。

なお、本研究の計算は全て、運輸省港湾技術研究所計算センターの ACOS 1000/10 システムに依った。

参 考 文 献

- 1) 山口ら：大阪湾における海上風の平面分布特性について、第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 168~172, 1981.
- 2) Myers, V. A. and W. Malkin: Some properties of hurricane wind field as deduced from trajectories, U.S. Weather Bureau, National Hurricane Project, 1961.
- 3) Cardone, V. J.: Specification of the wind distribution in the marine boundary layer for wave forecasting, New York Univ. School of Engineering and Science, Report GSL-TR69-1, 131 p, 1969.
- 4) 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, Geophy. Sci. Lab. Report TR-67-5, New York Univ., 74 p, 1967.