

波浪予知モデルの日本海への適用

平 口 博 丸*・ 山 口 正 隆**・ 土 屋 義 人***

1. 緒 言

沿岸・海洋開発に伴う構造物の設計や建設,あるいは波浪災害の防止や軽減のためには,波浪の的確な推定が不可欠であり,波浪の数値予知モデルに関する研究が近年盛んに行われている。たとえばわが国では,井上,気象庁(MRI)および鳥羽が予知モデルを提案しており,諸外国でもBMO, GONO, HYPAをはじめ多くのモデルが提案されている¹⁾。これらの予知モデルは,実測値との比較や他のモデルとの比較からその推算精度が検討され,また改良が加えられてきた結果,波浪の推算精度はかなり向上し, MRI, GONO および HYPA モデルは各々北西太平洋および日本近海, 北海, 西ドイツ近海での日常の波浪予報業務に使用されている。

著者ら^{2),3)}も, 平衡方向スペクトルを導入した波浪の数値予知モデルを提案し, これを大阪湾や日本海の波浪推算に適用し, その精度について検討してきた。その後の検討の結果, 風速が 20 m/s を越える強風時の推算結果は実測値を若干過大評価する傾向にあることが判明した。

そこで, 本研究ではこの従前モデルに修正を加えた新たな予知モデルを提案するとともに, そのモデルを強風時の日本海に適用する。その推算結果と日本海沿岸各地での観測結果および有義波法や従前のモデルによる推算結果とを比較することにより, その推算精度や適用性について検討する。

2. 数値予知モデル

2.1 予知モデル

(1) 改 良 点

以前に著者らが提案したモデル(以下では従前モデルと呼ぶ)は, 強風時に実測値と比べて過大な推算値を与える。その主な原因は, 波の主要な発達を表わす Miles 機構の評価式にあると考えられる。従前モデルには, 井上が提案した次式を用いている。

$$\beta_{MI} = [0.0834 \exp \{-7000(u_*/c - 0.031)^2\} + 43.5(u_*/c)^2 \exp \{-0.0004(c/u_*)^2\}] \times f \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに, f は周波数, u_* は摩擦速度, c は成分波の波速であり, β_{MI} の単位は min^{-1} である。ところで Miles 機構の評価式には種々の式があり, 例えば Barnett は次式を提案している。

$$\beta_{MB} = \begin{cases} 5(\rho_a/\rho_w)(u_{10} \cos \phi/c - 0.9)f & : u_{10} \cos \phi/c > 0.9 \\ 0 & : u_{10} \cos \phi/c \leq 0.9 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに, ρ_a と ρ_w は空気および海水の密度, ϕ は成分波の方向 θ と風向 θ_0 の成す角, u_{10} は海面上 10 m での風速である。

式(1)と式(2)の相違を図-1に示す。ただし, $u_{10} = 25u_*$ とする。同図によれば, 式(2)は $u_*/c = 0.036$ においてゼロとなるのに対し, 式(1)ではそれより大きな c , 即ち低周波側に局所的なピークが存在する。このピークは波の発達に大きく寄与している。そこで, 本研究に用いる Miles 機構の評価式としては Barnett の式(2)を使用する。

式(2)によると, $u_{10} \cos \phi/c = 0.9$ を満たす周波数 f_{or} を境にして, $f > f_{or}$ は風からのエネルギー流入の活発な領域に, $f \leq f_{or}$ は風の影響を受けない領域に対応すると予想される。そこで, 次式により風波領域とうねり領域とを判定する。

$$\left. \begin{aligned} u_{10}/c - 0.8 < 0 & ; \text{うねり領域} \\ u_{10}/c - 0.8 \geq 0 & ; \text{風波領域} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

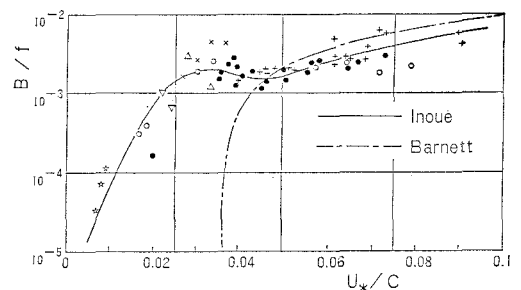


図-1 Miles 機構の評価式

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木研究所 環境部

** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科

*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

上式の定数 0.8 は、 $f < f_{cr}$ へのエネルギー流入が非線形干渉のみによることを考慮して便宜上定めた値である。

また、風向変化のために風波領域内に過剰なエネルギー成分が生ずることがあり、その減衰を表わす関数として次式を用いる。

$$S_{dis} = -Kf^4 E(f, \vartheta) \quad (4)$$

ここに、 $E(f, \vartheta)$ は方向スペクトル、 K は定数であり、分単位で計算する場合 $D=1.35$ とする。式 (4) の関数形の妥当性については、実測値との比較から今後検討すべきであろう。

(2) 基礎式

本研究に使用する波浪予知モデルの基礎式をまとめると、次式のようになる。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + C_g \cos \theta \frac{\partial E}{\partial x} + C_g \sin \theta \frac{\partial E}{\partial y} = \begin{cases} (\alpha_p D_\infty + \beta_{MB} E) \{1 - (E/E_\infty)^2\} + \Gamma - \tau E & ; |\vartheta - \vartheta_0| \leq \pi/2, u_{10}/c - 0.8 \geq 0, E \leq E_\infty \\ \Gamma - \tau E - 1.35 f^4 E & ; |\vartheta - \vartheta_0| \leq \pi/2, u_{10}/c - 0.8 \geq 0, E > E_\infty \\ \Gamma - \tau E & ; |\vartheta - \vartheta_0| \leq \pi/2, u_{10}/c - 0.8 < 0 \\ -\beta_{MI} D_\infty E + \Gamma - \tau E & ; |\vartheta - \vartheta_0| > \pi/2 \end{cases} \quad (5)$$

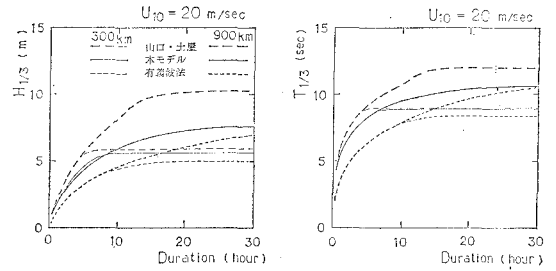
ここに、 f は周波数、 ϑ は方位角、 C_g は群速度、 ϑ_0 は風向、 E は方向スペクトル、 E_∞ は平衡方向スペクトル、 α_p は井上の表示による線形増幅係数、 β_{MB} は式 (2) の指数関数型増幅係数、 D_∞ は平衡方向分布関数、 Γ と τ は Barnett による非線形干渉項である。なお、逆風によるエネルギー減衰の評価に用いる β_M としては、全周波数帯で減衰を生じさせるために式 (1) の β_{MI} を用いる。また、 D_∞ および E_∞ については従前モデルと同一の表示式を用いる。

2.2 数値計算法

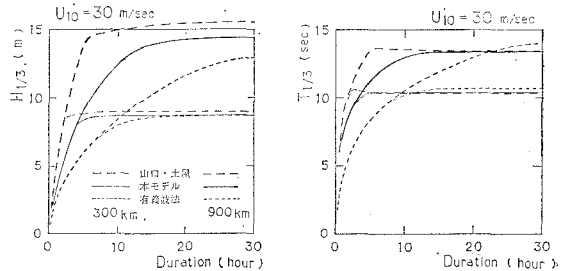
式 (5) の数値積分に当っては、従前モデルと同様、まず波浪場へのエネルギー流入のみを計算し、ついで同一タイムステップ内での伝播計算を行う。ただし、前者の計算では 1 ステップ前の方向スペクトル値を用いることにより方向スペクトル E を解析的に求め、演算時間の短縮を図ることとする。また、後者の計算には Fromm のゼロ平均位相誤差法を用いたが、陸域境界部分では第 1 次風上差分法を用い、流出境界とする。

3. 予知モデルの特性

一様風域場を対象とし、本モデル、従前モデルおよび有義波法（格子点法）のそれぞれについて波の発達特性を検討する。



(a) $u_{10} = 20$ m/s



(b) $u_{10} = 30$ m/s

図-2 一様風による波の発達特性

3.1 計算条件

無限に続く直線海岸を想定し、風が陸から海へ向かって一様に吹いたときの波の発達特性について検討する。計算条件は次のようである。格子間隔は $\Delta X = 50$ km, 時間間隔は $\Delta t = 30$ min, 方向分割は $\Delta \vartheta = 15^\circ$, 周波数分割は $0.05 \sim 1.0$ Hz の区間を対数軸上で 20 等分割とする。

3.2 計算結果

風速が 20, 30 m/s に対する計算結果の 1 例として有義波高・周期に関する時間的な発達状況を 図-1 に示す。図中の実線は本モデル、破線は従前モデル、点線は有義波法の結果であり、各々の太線は吹送距離 900 km, 細線は 300 km 地点での計算結果である。これらの図から、波高および周期の時間的な発達は従前モデルが最も大きく、ついで本モデル、最も発達率が小さいのは有義波法であることが分かる。特に、風速が 30 m/s では従前モデルによる波の発達率は著しく、吹送距離 900 km の地点でも 5 時間後にはほぼ定常な状態にまで発達している。

本モデルの 30 時間後の周波数スペクトルと従前モデルのそれとを比較すると、後者は完全に発達した平衡スペクトルとなっているのに対し、前者の方は低周波成分が未発達であり、非線形干渉による低周波側へのエネルギー移流が十分に行われていないことが分かった。

以上のように、従前モデルの最も大きな特徴は、波高および周期の時間的な発達率が高く、特に強風時にはその傾向が顕著になることである。この発達特性が推算波

高の過大評価の原因になっていると思われる。一方、本モデルは従前モデルと有義波法との中間的な波の発達特性を示す。ただし、非線形干渉項の効果には不十分な点が認められる。

4. 波浪推算結果および考察

4.1 計算条件

波浪の推算対象領域および計算格子を 図-3 に示す。同図はメルカトル図法により描かれた日本海地図であり、図中の太い実線は境界を表わす。格子間隔は北緯 40 度の緯線を基準とし、その緯線上の経度 5 度に相当する距離を 7 等分し、 $\Delta X = \Delta Y = 60.9 \text{ km}$ とする。また、計算時間間隔は $\Delta t = 45 \text{ min}$ とし、 Δg と Δf については前章で検討した計算条件と同一値を用いる。

海域の初期条件としては、全ての格子点上で方向スペクトルをゼロに設定する。境界はすべて陸地境界とする。また、計算によって得られた方向スペクトルの有義波諸量への変換は、従前モデルと同様に琵琶湖での観測結果から得られた関係式を用いる。

なお、海上風の推定は 3 時間毎の極東天気図から求めた気圧場を用い、Bijvoet の方法により行った。

4.2 1979 年 10 月の波浪

(1) 気象概況

10 月 6 日午後に発生した台風 20 号は、19 日朝に和歌山県白浜町付近に上陸し、中心気圧は 965 mb を示した。その後この台風は日本列島を縦断し、20 日 9 時には北海道の沖に達した。

天気図より計算された海上風の 1 例として 19 日 13 時の推算結果を 図-4 に示す。

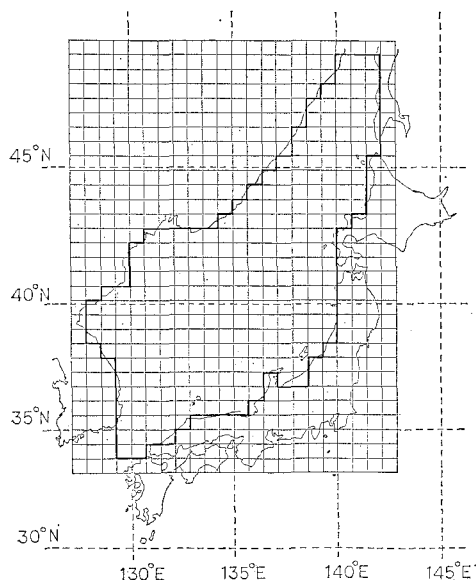


図-3 日本海の計算領域と計算格子

(2) 波浪の経時変化

波浪の推算結果の 1 例として弾崎および浜田港における有義波高・周期の実測値と推算値の経時変化の比較を 図-5 に示す。図中の太い実線は実測値、細い実線が本モデルによる推算値である。同図には比較のために、

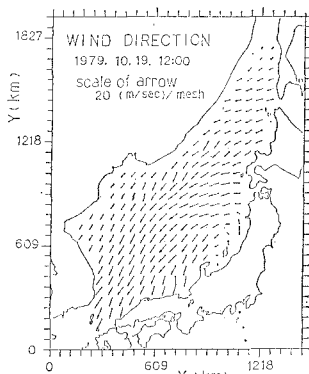


図-4 海上風の推算結果

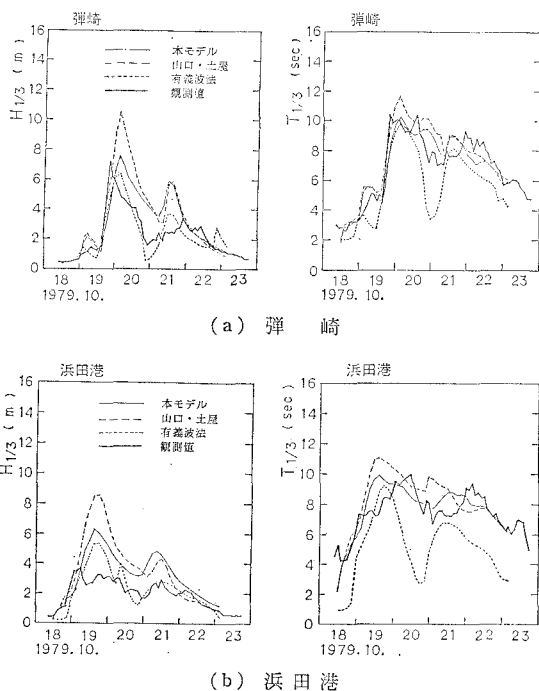


図-5 実測値と推算値の経時変化の比較

従前モデルおよび有義波法による計算値をそれぞれ破線および点線で示してある。一般に、最も推算値の大きいのは従前モデル、ついで本モデル、有義波法の順となっている。この結果は一樣風域場で得られたものと同じ傾向にある。

弾崎に関しては、推算風速のピーク値出現時刻が実測風のそれに比べ約 6 時間遅れているため、これと同様な時間的な遅れが波浪にも見られる。有義波法による推算波高は、実測値と比べて若干過小評価されているが、期間内の波高変化の様子はかなり良く再現されている。しかし、その推算周期には波の減衰期に急激な値の低下が見られることから、うねり成分が表現されていないことが分かる。これは不規則な波を単一の規則波で代表

し、成分波の分散性を無視したために生ずるものであり、有義波法の欠点と言える。一方、本モデルによる推算値は、ピーク波高の出現時刻の遅れを考慮するならば、波高・周期ともに実測値との対応は実用上十分であると言えよう。

浜田港に関しては、各モデルともに実測波浪との対応は良くない、この付近には適切な海上風検証地点がないため、その原因については明らかではない。

(3) 波 向

前掲した19日12時の風ベクトル図(図4)は台風が本土に上陸し、日本海に強い風が吹き始めた時点に相当し、本モデルおよび有義波法により計算される波浪のベクトル図もこの風ベクトル図と似かよった分布をしている。ところが、これらのモデルによる18時および20日0時の波浪のベクトル図は各々図6および図7のように変化している。これらの図によると、同一の風を入力して計算されているにもかかわらず、波向の結果には推算法によりかなりの相違が認められる。その原因は、本モデルでは風向変化に対して波浪は徐々にその波向を変えて行くのに対し、有義波法では波浪がうねりだと判断されない限り波向と風向は常に一致すると仮定していることによる。

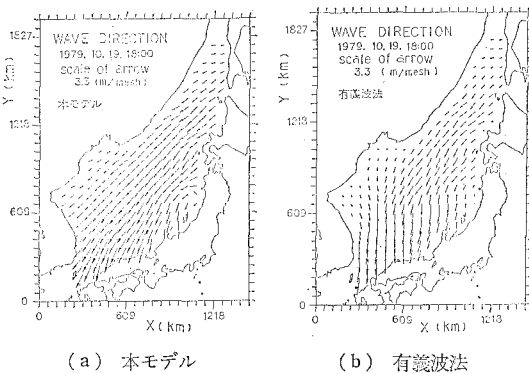


図-6 波浪ベクトルの比較(1979年10月19日18時)

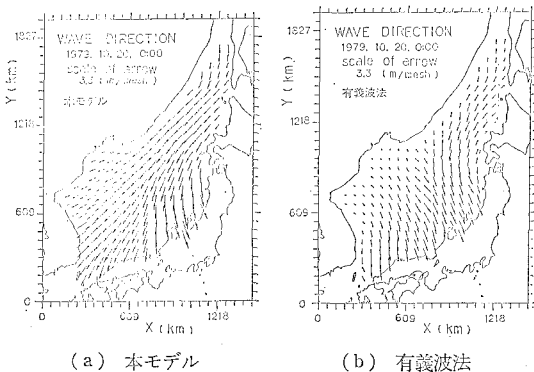


図-7 波浪ベクトルの比較(1979年10月20日0時)

以上のように、波浪の推算では波高や周期のみならず、波向に関する検討も重要となる。

4.3 1980年12月の波浪

(1) 気象概況

日本海を東進して来た低気圧は、日本列島の南岸にある低気圧と2つ玉を形成しながら発達し、24日昼前に能登半島の北方海上を通過した。その後もこの低気圧は東進を続けて太平洋へ抜け、南岸低気圧一体となって台風並みに発達した。

(2) 波浪の経時変化

弾崎、輪島港、浜田港における波浪の実測値と推算値の経時変化の比較を図-8に示す。図中の4種類の曲線

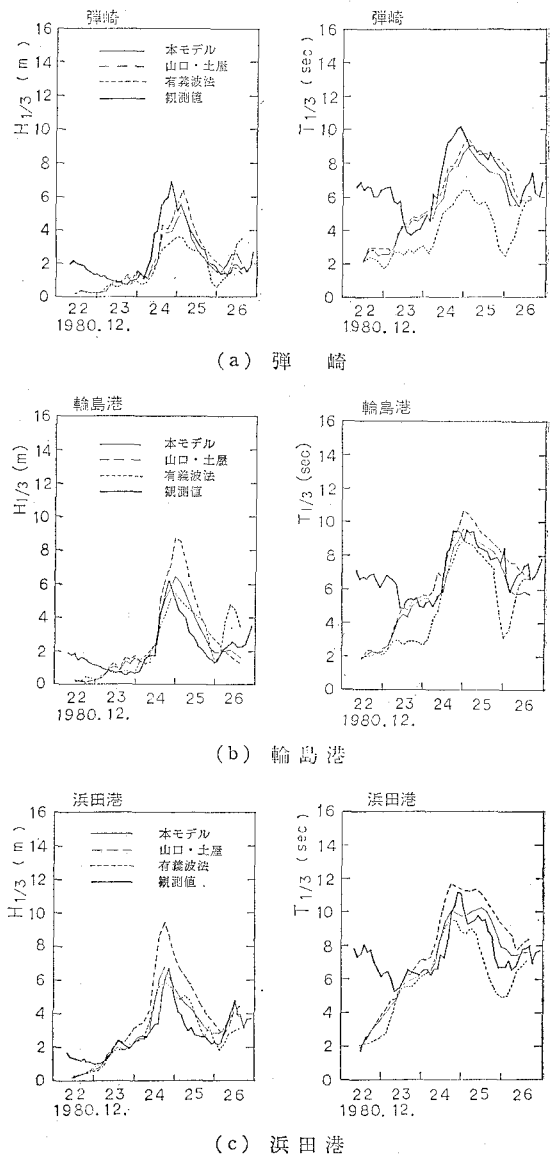


図-8 実測値と推算値の経時変化の比較

は図-5と同一である。輪島港、浜田港における本モデルの推算値は、波高・周期ともに実測値と良く対応している。なお、輪島の沖合約 50 km にある舢倉島での実測風はほぼ海上風を代表していると思われるが、この期間中の実測風と推算風の対応は非常に良く一致していた。一方、弾崎に関しては 24 日昼頃の風の推算値が過小であったため、その分だけ実測波高と推算波高の対応は低下している。

(3) 波 向

この検討ケースでは先のケースと異なり、本モデルと有義波法との波浪ベクトルにはほとんど差は見られない。今回の場合、低気圧が日本海を東進したために海域内での風向変化が激しく、多くの地点で風向きが 180° 以上も変化している。このため、本モデルでは逆風によるエネルギー逸散が大きいので、波浪場に取り残されるエネルギーが減少する結果、常に風向に沿うよう波が発達したものであると思われる。

5. 結 語

本研究では、風速が 20 m/s を越える強風時にも適切な推算値が得られるように、従前のモデルを改良するとともに、このモデルの特性や強風時の日本海への適用性を検討した。その結果、本モデルの波の発達率は有義波法と従前モデルとの中間にあり、推算風の精度が良好で

あれば適切な推算値が得られることが分った。

なお、今回の検討ケースの中には実測周期が 12~14 sec という長周期の風浪が 2 ケース含まれていた。いずれも低気圧が日本海を北上したケースであり、風および波浪の推算精度は良くなかった。したがってこの種の異常波浪についても、今後さらに検討する必要がある。

最後に、本研究は東京電力株式会社の協力による波浪予知研究会（代表者：土屋義人）の研究成果の一部であり、本研究に用いた海上風の推定は京都大学防災研究所 光田寧教授および京都産業大学 藤井健教授によるものであることを明記して謝意を表わす。数値計算に関しては開発計算センター 定森良夫氏の協力を得、また、本研究に用いた風および波浪の観測資料は、関係諸庁の御協力により提供していただいたものであることを明記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、The SWAMP Group: Sea Wave Modelling Project Part 2, A compilation of results, Publ. Koninkl. Nederl. Meteorol. Inst., No. 161, 1982.
- 2) 山口正隆・土屋義人・小矢田宏・渡辺 健：有限風域場における波浪の数値予知法，第 26 回海岸工学講演会論文集，pp. 96~100, 1979.
- 3) 土屋義人・山口正隆・平口博丸：日本海沿岸における異常波浪の数値予知，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 1~5, 1982.