

有限風域場における波浪の数値予知法

山口正隆*・土屋義人**・小矢田 宏***・渡辺 健****

1. 結 言

近年、風から波へのエネルギーの入力項に風波の発生・発達理論の成果を取り入れたエネルギー平衡方程式を数値積分する、いわゆる波浪の数値予知法が開発され、まさに実用に供されようとしている。しかしながら、現在のところ、この方法による予測精度は必ずしも十分といえず、なお種々の基本的な問題を残している。この要因はエネルギーの流出入を表わす source function の表示が十分でないことや海上風の推定精度があまり良くないことである。また、これまで開発されてきた波浪の数値予知法は、主として広範囲で複雑な風の場合をもつ外洋を対象としたものであって、比較のための観測結果の取得が困難であることや海上風をはじめとする種々の誤差要因が混在していることなどから、数値予知法の適用性を究明するのに十分でないと考えられる。以上のことから、数値予知法の精度を向上させるためには、外洋を直接対象とするよりもむしろ海上風が精度よく推定される比較的単純な海域を対象とした波浪の数値計算を行い、詳細な観測結果との比較からその問題点を改良していく方法が適切な手段であろう。幸い、京都大学波浪観測グループは琵琶湖において多点波浪観測を実施し、風および波浪の詳細な資料を得ている¹⁾。そこで、本研究では波浪の数値予知法を確立するための1つの試みとして、従来無限吹送距離を対象としていた数値予知法を有限風域場に対しても適用しうるように拡張しようとするものである。そのため、提案したモデルに基づいて、有限かつ一様な風域場における波浪の発達・減衰特性を明らかにするとともに、琵琶湖における実際のストームに対してこの数値予知モデルを適用し、観測結果との比較から、その適用性を検討する。

2. 波浪の数値予知モデル

いま、エネルギーの流出入を表わす source function として Phillips および Miles による風波の発生・発達

項と碎波²⁾および逆風³⁾によるエネルギー逸散項を考慮することとし、また変動風速場で $E(f, \theta) > E_{\infty}(f, \theta)$ の場合には、波浪は自由伝播するとすれば、本研究で用いた数値予知モデルは次式で表わされる。

$$\frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} + c_g \cos \theta \frac{\partial E(f, \theta)}{\partial x} + c_g \sin \theta \frac{\partial E(f, \theta)}{\partial y} = \begin{cases} \{\alpha_P + \beta_M E(f, \theta)\} \left[1 - \left\{ \frac{E(f, \theta)}{E_{\infty}(f, \theta)} \right\}^2 \right] & ; \quad |\theta - \theta_0| \leq \frac{\pi}{2}, \quad E(f, \theta) \leq E_{\infty}(f, \theta) \\ 0 & ; \quad |\theta - \theta_0| \leq \frac{\pi}{2}, \quad E(f, \theta) > E_{\infty}(f, \theta) \\ -\beta_M E(f, \theta) & ; \quad |\theta - \theta_0| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 f : 周波数、 θ : 方位角、 c_g : 群速度、 θ_0 : 風の主方向、 $E(f, \theta)$: 方向スペクトル、 $E_{\infty}(f, \theta)$: 平衡方向スペクトル、 α_P : 線型増幅係数および β_M : 指数関数型増幅係数、である。

さて、式(1)に含まれる α_P および β_M は井上による提案式に従うこととしたが、本研究では碎波項の評価に平衡方向スペクトルを用いるので、前者に対しては $\pm\pi/2$ の範囲での積分を行わない $\alpha_P(U, f, \theta)$ を採用した。 α_P を種々の風速に対して数値計算すれば明らかのように、各風速によって励起される風波のピーク周波数はかなり低く、琵琶湖のように吹送距離の短い風域場における風波の発生項として必ずしも適切であるとはいいがたいけれども、ほかにより適切な表示式を見出せないの、ここではそのまま用いることにした。また、 α_P の θ に関する微分から、 α_P は任意の周波数に対して3つのピーク角をもつことがわかる。

つぎに、式(1)に含まれる平衡方向スペクトルとして、琵琶湖での観測結果の詳細な解析⁴⁾から得られた次式を用いることにする。すなわち、

$$E_{\infty}(f, \theta) = E_{\infty}(f) \cdot D_{\infty}(f, \theta) \quad (2)$$

とし、まず、平衡スペクトル $E_{\infty}(f)$ に対して JONSWAP 型スペクトルを採用するならば、peak enhancement parameter はそれぞれ、

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部海洋工学科

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

*** 工修 新日本製鉄株式会社相模原技術センター

**** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科

$$\gamma=1.78, \quad \sigma_a=0.0545; \quad f \leq f_m, \quad \sigma_b=0.0542; \quad f > f_m$$

$$\dots\dots\dots(3)$$

である。また、スペクトルの高周波側の平衡定数 α および無次元ピーク周波数 $\bar{f}_m$ は JONSWAP の関係式でほぼ表示される。一方、平衡方向分布関数 $D_\infty(f, \theta)$ として円正規分布を用いるならば、形状母数 a は次式になる。

$$\left. \begin{aligned} a &= 7.11(f/\bar{f}_m)^{-1.99} \exp \{-0.074(f/\bar{f}_m)^{-7.85}\} \\ &\quad \times \gamma_0 \exp \{-(f-\bar{f}_m)^2/2\sigma_0^2 \bar{f}_m^2\} \\ \gamma_0 &= 1.62, \quad \sigma_0 = 0.211 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、円正規分布は全平面上で定義されているが、本研究の数値計算では、琵琶湖での風波の発達特性を考慮して半平面で有限値をとる $\cos^n \theta$ 型関数を用いた。 a と n との関係は最小自乗法によるあてはめ結果から次式で与えられることが見出された。

$$n=1.01a-1.05; \quad n > 2 \dots\dots\dots(5)$$

しかし、 $n \leq 2$ では円正規分布と $\cos^n \theta$ 型関数の特性が異なるので、便宜的に一定値 $n=2$ を用いることにした。

3. 数値計算法

波浪の数値計算にあたって、通常、計算機の制約のため、水平格子間隔が波浪のスケールに比べて大きくなるので、式(1)を数値積分し、正確な解を得るためには、高精度の差分法が必要となる。しかし、右辺を含めた形での高精度の差分法はいまだ見出されていない。そこで、ここでは、1ステップ内でまず右辺で流入するエネルギーは全く伝播せず、すべて各格子点における風波の発生・発達に寄与し、つぎに発生・発達した波浪のエネルギーが同一タイムステップ内で式(1)の右辺をゼロとした移流方程式に従って伝播するものと仮定して数値計算を行った。すなわち、まず波浪の発生・発達計算は、無限吹送距離の場合に対して井上により導かれた解析解が本来的には移流項の影響の入る有限吹送距離の場合にも成立すると仮定して行う。また、逆風による減衰計算も同様である。つぎに式(1)の右辺を0とした場合の波浪エネルギーの伝播式の差分化には、Frommのゼロ平均位相誤差法⁵⁾を用いる。Frommの差分法は2次の正確度をもち、かつ位相誤差がRobertおよびWeissによる4次の差分法と同程度である特徴を有する。以上のように、1ステップ内で波浪の発生・発達計算と伝播計算を別個にかつ交互に行うことが妥当かどうかは明らかでないが、同様の手法はEwingによってすでに用いられており、また今回の計算結果にも特に問題は生じなかった。図-1 琵琶湖の湖の格子網(20×15)を示したものである。格子間隔および時間間隔は計算機の容量および計算時間を考慮してそれぞれ $\Delta x = \Delta y = 2.5 \text{ km}$ および $\Delta t = 5 \text{ min}$ とした。周波数の数は20

とし、滑らかなスペクトル図が得られるように、 $0.176 \text{ cps} \leq f \leq 0.617 \text{ cps}$ では $\Delta f = 0.0293 \text{ cps}$ とし、一方 $0.617 \text{ cps} < f \leq 1.0 \text{ cps}$ では不等分割とした。また、方向はそれぞれの場合の最大領域を考慮して19方向に等分割した。すなわち、風向が一方方向に限られている場合には、 $\Delta \theta = 10^\circ$ であり、風向が 90° 変化する場合には、 $\Delta \theta = 15^\circ$ である。

さらに、有義波高および有義波周期の計算は琵琶湖での観測資料から決定された係数をもつ

$$\left. \begin{aligned} H_{1/3} &= 3.90 \sqrt{\int_0^\infty E(f) df} \\ T_{1/3} &= 1.22 \sqrt{\int_0^\infty E(f) df / \int_0^\infty f^2 E(f) df} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(8)$$

により、また平均の波向の計算は

$$\bar{\theta} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \theta E(f, \theta) d\theta df / \int_0^\infty \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta df \dots\dots\dots(9)$$

により行った。

さて、プログラム作成にあたって留意した点はつぎのとおりである。

(i) 初期条件は $t=0$ においてすべての格子点で方向スペクトルが0という条件を、一方境界条件は陸上部で方向スペクトルが0という条件を用いる。

(ii) 各格子点での吹送距離はそれぞれの時刻での風向に対応する対岸距離とする。すなわち、湖上部で水深1、陸上部で水深0をあらかじめ与えておき、各格子点から風向と逆方向に $\Delta s = 500 \text{ m}$ ごとに1点をとる。つぎに、その点の周囲4点における水深が0かどうかを判定し、0であれば、各格子点からその点までの直線距離を吹送距離とする。また水深が0でなければ、水深が0になる点まで同様の走査を繰り返す。

(iii) ストームを対象とした数値計算に際して、各格子点の風速および風向は x 方向には一様であるが、 y 方向に対しては、安曇川、沖の白石および彦根愛西湖岸での風資料による直線内挿結果を用いる。

4. 一様風による風波の発達・減衰特性

ここでは、湖上全域にわたって一様風が連吹した場合の風波の発達特性、一様風がある程度連吹したのち、風速が急激にゼロになった場合の風波の減衰特性および風

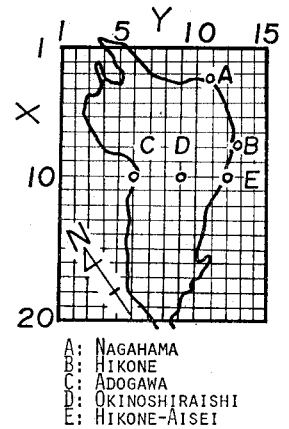
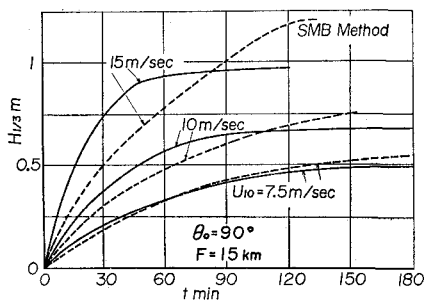
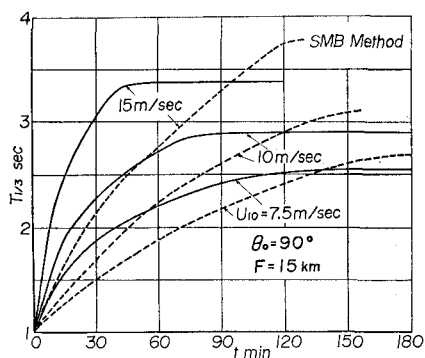


図-1 琵琶湖における格子網



(a)

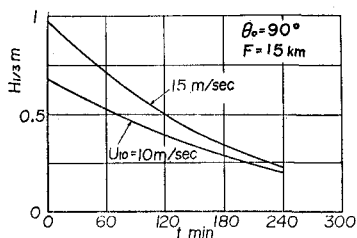


(b)

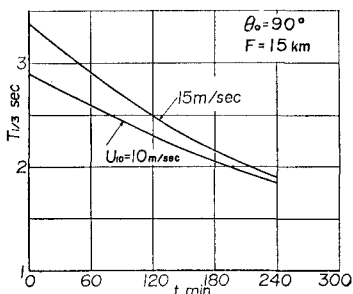
図-2 有義波の発達特性

速が一定の状態では風向がしだいに変わる場合の風波の変化特性を考察する。

図-2は $U_{10}=7.5$ m/sec, 10 m/sec および 15 m/sec, 風向 NW ($\theta_0=90^\circ$) の一様風による格子点 (10, 12) の



(a)



(b)

図-3 有義波の減衰特性

彦根愛西湖岸における有義波の時間的発達特性を示したものである。図から吹送時間の増大とともに、波高および周期が増加し、しだいに平衡状態に漸近していくことやエネルギー平衡方程式に基づく結果は図中の SMB 法によるものより急速に発達するが、いずれの平衡値も小さくなるのがわかる。一方、図-3 は同地点において各風速に対して平衡状態に達した有義波の減衰特性を示したものであり、平衡状態における波高および周期が大きいほど急激に減少する。

また、 $U_{10}=10$ m/sec の場合の周波数スペクトルの発達図を示したのが図-4である。この図において、発達の初期に低周波側でピークが現われるが、時間の経過とともに、高周波側に現われたピークが発達し、平衡スペクトルに漸近してゆくことが見出される。これらのピークのうち、第1のピークは Phillips 機構に基づく線型増幅項 α_F により、また第2のピークは Miles 機構に基づく指数関数型増幅項 β_M によって生じたものであるので、発達初期では、前者が卓越するが、波浪が発達するにつれて、次第に後者が支配的になっていく。このように、発達初期に低周波側でピークが現われるのは前述したように、井上による α_F が琵琶湖のように比較的短い吹送距離における表示式として適切でないためである。一方、図-5 は周波数スペクトルの減衰状況を示したものである。今回のモデルには、内部粘性などの減衰項が含まれていないので、図中のスペクトルの減衰は単に風からエネルギーを供給されない状態で波浪のエネルギーが伝播していくことに起因している。したがって、

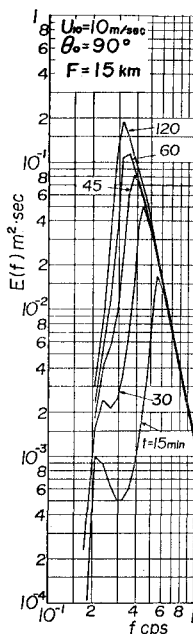


図-4 周波数スペクトルの発達特性

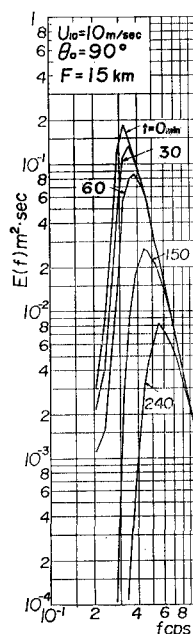


図-5 周波数スペクトルの減衰特性

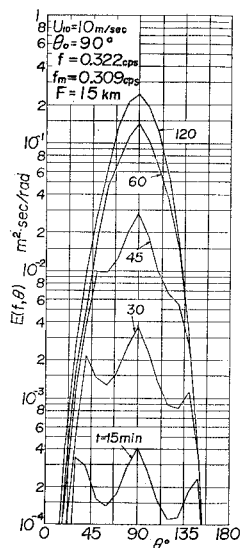


図-6 方向スペクトルの発達特性

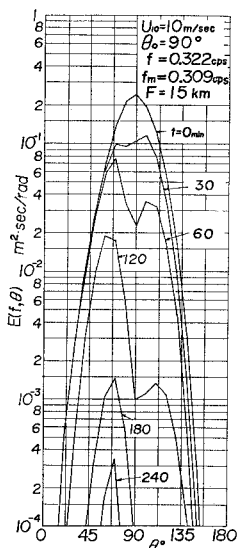


図-7 方向スペクトルの減衰特性

成分波の群速度が速い低周波側ほど減衰が著しく、高周波側ではほとんど減衰しない。この結果の妥当性を確かめるためには、実験結果あるいは観測結果との比較検討が必要であり、場合によっては、磯崎らによって導入された内部粘性の影響を考慮しなければならないであろう。

図-6 は彦根愛西湖岸での発達期の方向スペクトルの 1 例を示したものである。前述のように、 α_p は方向に対して 3 つのピークをもつので、発達段階にある低周波側での方向スペクトルも同様に 3 つのピークをもつことになる。一方、ピーク周波数より高周波側では、周波数が高いほど、風波の発達とともに急速に 1 つのピークをもつ方向スペクトル分布になる。また、図-7 は減衰期の方向スペクトルの変化の 1 例を示したものである。図から明らかなように、時間の経過とともに、方向スペクトルはしだいに非対称な形となり、 $\theta > 90^\circ$ での減衰が大きい。これは彦根愛西湖岸の東側領域が西側領域に比べて広く、かつ西側が一部しゃへい領域になっていると

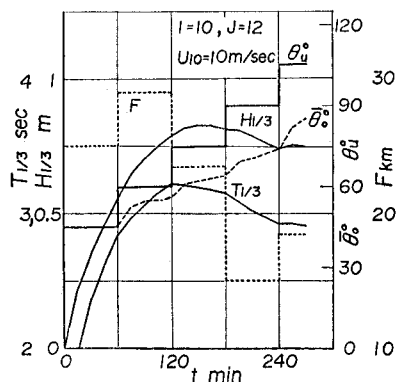


図-8 風向変動場における有義波の変化特性

いう地形特性によるものである。

つぎに、風速が一定 ($U_{10}=10$ m/sec) のまま、風向 θ_0 だけが $45^\circ \sim 105^\circ$ まで 1 時間おきに 15° ずつ変化した場合の彦根愛西湖岸における有義波および平均の波向の時間的変化を示したものが図-8 である。図中に示された吹送距離の変化から明らかなように、波高および周期はやや遅れて極大値をとったのち、減衰状態に入っている。一方、平均波向は風向の変化よりかなり位相が遅れて追隨している。図-9 は同様の条件に対する方向スペクトルの変化の 1 例を示したものである。この図から、風向きが変動する場合には、方向スペクトルの形が著しく変動し、場合によっては 2 ピークをもつ形状になることが見出される。

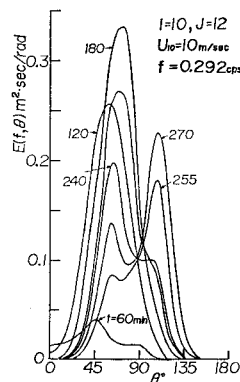


図-9 風向変動場における方向スペクトルの変化特性

5. 数値予知法の適用性

前節までの考察により、本研究で提案した波浪予知モデルの特性がかなり明確になったので、本節では、琵琶湖の安曇川、沖の白石および彦根愛西湖岸での風資料が得られている 1975 年 10 月 5 日～6 日のストーム時の波浪状況に対する適用性を検討する。図-10 および図-11 は彦根愛西湖岸における有義波および周波数スペクトルに対する計算結果と観測結果とを比較したものであり、これらの図から、有義波およびスペクトルのいずれに対しても相互にかなりよく一致していることがわかる。したがって、風の場合が適切に与えられるならば、本研究の数値予知モデルはかなりよい適用性をもつと考えられる。しかし、細部についてみると、両者に若干の差が見られ、とくに減衰状態での有義波の対応は若干悪い

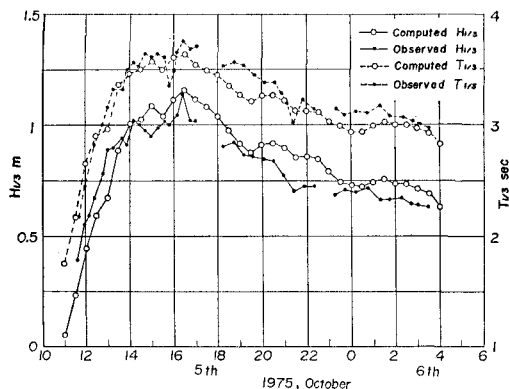


図-10 有義波に対する計算結果と観測結果との比較

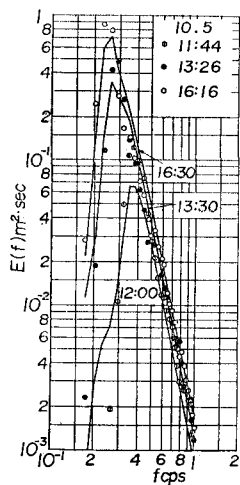


図-11 周波数スペクトルの比較

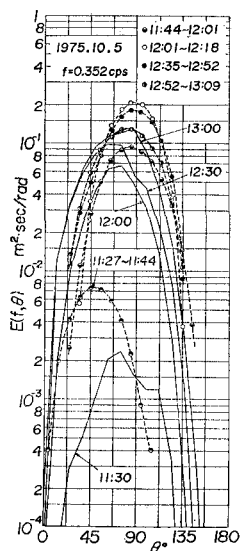


図-12 方向スペクトルの比較

ように思われる。また、図-12 は方向スペクトルに対する両者の比較を示したものであるが、発達のごく初期段階において、方向スペクトルがピークをとる方向に偏りがある点を除けば、定性的にはかなりよく一致しているといえよう。

6. 結 語

以上、本研究ではエネルギー平衡方程式に基づく有限風域場での波浪の数値予知モデルとその数値計算法を提

案した。そして、一様風による風波の変化特性を検討するとともに、現地への適用性を琵琶湖における詳細な観測結果との比較から明らかにした。今後、エネルギーの流出入項により詳細な検討を加えるとともに、複雑な風の場合に対するこのモデルの適用性を解明していく必要がある。

最後に、数値計算、資料の整理および図面の作成に助力戴いた愛媛大学工学部海洋工学科大福学技官に謝意を表明するとともに、本研究は文部省科学研究費自然災害特別研究による成果の一部であることを付記する。なお、本研究の数値計算には九大および京大大型計算機センターの FACOM M-190 および愛媛大学計算機センターの FACOM 230-28 を使用した。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・土屋義人・酒井哲郎・山口正隆ほか：琵琶湖における波浪観測について，京大防災研年報，第19号 B-2，pp. 361~379, 1976.
- 2) 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. Science Lab., TR-67-5, New York Univ., 1967.
- 3) Isozaki, I. and T. Uji: Numerical prediction of ocean wind waves, Paper in Meteorol. and Geophys., Vol. 24, No. 2, pp. 207~231, 1973.
- 4) 山口正隆・土屋義人：有限風域場における風波の統計的性質について，愛媛大学紀要，第Ⅲ部（工学），第9巻，第2号，pp. 349~367, 1979.
- 5) Fromm, J. E.: A method for reducing dispersion in convective difference scheme, Jour. Computational Phys., Vol. 3, pp. 176~189, 1968.