

パーソナルコンピュータを利用した現場用波浪推算モデル

A PRACTICAL SPECTRAL MODEL FOR WAVE PREDICTION WITH
A PERSONAL COMPUTER

山口正隆*・畑田佳男**・早川 淳***・宇都宮好博****

By Masataka YAMAGUCHI, Yoshio HATADA, Jun HAYAKAWA and Yoshihiro UTSUNOMIYA

This paper presents a revised model for spectral wave prediction, in which the use of a personal computer is assumed for practical applications. The model is based on a decoupled propagation equation for deep water waves and is designed to give directional spectra at a single location. The numerical scheme of the old model has been altered to save computer processing time and to apply to wave forecasting as well as to wave hind-casting. Improvement of the numerical scheme and use of a high-speed computer permit the reduction of the computer processing time about 1/200 times compared to that of the old model. The applicability of the model was examined through twelve hour preceding computation of waves due to the Typhoon No. 8013.

Keywords: wave prediction model, personal computer, energy balance equation, decoupled propagation model

1. 緒 言

エネルギー平衡方程式に基づく波浪推算法の開発・実用化によって方向スペクトルの経時変化算出の精度が高められ、台風時波浪の推算技術は近年大いに進展した。しかし、その数値計算が大型計算機の長時間使用を前提とすることは、実用上の1つの問題点となっている。

一方、最近のパーソナルコンピュータ(以後、パソコンと呼ぶ)の性能の急激な向上を考慮するとき、台風接近時において台風経路などの予測値を入力し、数時間後に1注目地点でどの程度の波浪が来襲するかを現場でパソコンにより簡単かつ精度よく推算できるならば、災害対策などに対する貢献が非常に大きいと期待される。

こうした観点から、著者ら¹⁾はエネルギー平衡方程式に基づく波浪推算法のうち、成分波間の独立性を仮定するDP(Decoupled Propagation)モデル²⁾を特定の1地点に集中する波向線上で解き、方向スペクトルの経時変化を求めるといふ、いわゆる1点法によるパソコン用深海波浪推算モデルを開発した。しかし、このモデルは

大型計算機用波浪推算モデル³⁾をパソコン用に変換したものであったので、1つの台風時の波浪追算に40~50時間のパソコンの使用を必要とした。また、これはメモリの節約をはかるため、波浪追算専用モデルとして開発されており、波浪予測への適用が困難であった。

今回の研究は、著者らのパソコン用深海波浪推算モデル¹⁾に数値計算手法上の改良を加えて、計算時間の短縮と波浪予測モデルへの拡張をはかるものである。すなわち、まずsource functionの定式化および数値計算法について述べたのち、数値計算手順を波浪追算・予測両面を考慮して詳述する。ついで、台風8013号時の高知沖ブイ地点を対象として波浪追算、および台風データの予測値に基づく12時間後の波浪予測を試み、観測結果との比較から本手法の適用性を検討する。

2. 波浪推算モデル

(1) モデルの概要

深海におけるエネルギー平衡方程式は、1点法の適用にあわせて書き改めれば、次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E(f, \theta)}{\partial t} + C_g \frac{\partial E(f, \theta)}{\partial s} &= G(f, \theta) \\ \frac{dx}{ds} &= \cos \theta, \quad \frac{dy}{ds} = \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科
(〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部海洋工学科

*** 正会員 工修 東亜建設工業(株)

**** 正会員 工修 日本気象協会関西本部

ここに、 f ：周波数、 θ ：方向、 C_g ：群速度、 $E(f, \theta)$ ：方向スペクトル、 $G(f, \theta)$ ：source function、 s ：特定の成分波に対する波向線（直線）、である。右辺の source function は風からのエネルギー流入項、うねりに対するエネルギー減衰項、および逆風によるエネルギー減衰項から構成されると仮定すれば、波の (i) 発達段階、(ii) 順風減衰段階、および (iii) 逆風減衰段階、のそれぞれに対し、次のように与えられる¹⁾。

$$(i) \quad G(f, \theta) = \alpha_p + \beta_m E(f, \theta) \quad ; \quad |\phi| \leq \pi/2, \quad E(f, \theta) \leq E_\infty(f, \theta) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$(ii) \quad G(f, \theta) = -D_a \{E(f, \theta) - E_\infty(f, \theta)\} \quad ; \quad |\phi| \leq \pi/2, \quad E(f, \theta) > E_\infty(f, \theta) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$(iii) \quad G(f, \theta) = -D_w E(f, \theta); \quad |\phi| > \pi/2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $\alpha_p (= \alpha'_p \cos^5 \phi)$ ：Phillips 機構による波の発生項、 $\beta_m (= \beta'_m \cos \phi)$ ：Miles 機構による波の発達項、 D_a ：順風段階での減衰項、 $D_w (= D'_w |\cos \phi|)$ ：逆風段階での減衰項、 $\phi = \theta - \theta_w$ 、 θ_w ：風向、 $E_\infty(f, \theta)$ ：Pierson-Moskowitz スペクトル $E_\infty(f)$ と $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数 $D_\infty(\theta)$ の積で与えられる平衡方向スペクトル、である。また、発達段階における方向スペクトル $E(f, \theta)$ は碎波の影響により平衡方向スペクトル $E_\infty(f, \theta)$ を越えないと仮定し、 $E(f, \theta) \leq E_\infty(f, \theta)$ とする。

さて、式 (2)～式 (4) の各項は 1 点モデル^{1), 3)} に従えば、それぞれ次式のように表わされる。

$$\alpha'_p = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{9.8 \times 10^{-15} (26.7 u_*)^{1.75} \sigma^{5.25}}{\{(\sigma/26.7 u_*)^2/4 + (k \sin \phi)^2\}} \frac{1}{\{(\sigma/26.7 u_*)^{2.5}/9 + (k \cos \phi - \sigma/26.7 u_*)^2\}} d\phi \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta'_m = 0.3 (u_*/C)^{1.55} f \exp\{-2.63 \times 10^{-4} (C/u_*)^2\} \cdot \exp\{-0.5 (u_*/C)\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$D_a = 0.0625 (u_*/C)^2 f \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$D'_w = 0.25 (u_*/C)^2 f \exp\{-2.63 \times 10^{-4} (C/u_*)^2\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 k ：波数、 $\sigma (= 2\pi f)$ ：角振動数、 u_* ：摩擦速度、 C ：波速、である。また、Pierson-Moskowitz スペクトル $E_\infty(f)$ および $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数 $D_\infty(\theta)$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$E_\infty(f) = 0.0081 g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\{-1.25 (f/f_{PM})^{-4}\}, \quad f_{PM} = 0.0052 g/u_* \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$D_\infty(\theta) = \begin{cases} (8/3\pi) \cos^4 \phi; & |\phi| \leq \pi/2 \\ 0 & ; |\phi| > \pi/2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、旧モデルでは式 (5) および式 (9) の第 2 式において 19.5 m 高度における平均風速 $U_{19.5}$ が使用されていたが、本モデルでは摩擦速度による統一的定式化をはかるため、 $U_{19.5} = 26.7 u_*$ (海面の抵抗係数 $C_a =$

1.6×10^{-3}) の関係を用いて原式を変換した。

式 (5)～式 (9) における摩擦速度 u_* は、 $U_{10} \geq 8$ m/s の場合には C_a に関する Mitsuyasu らの関係式⁴⁾、

$$C_a = (0.581 + 0.063 U_{10}) \times 10^{-3}; \quad U_{10} \geq 8 \text{ m/s} \quad \dots\dots\dots (11)$$

により、一方、 $U_{10} < 8$ m/s の場合には $C_a = 1.085 \times 10^{-3}$ として、10 m 高度における平均風速 U_{10} から推定する。

境界条件としては、陸地境界で $E(f, \theta) = 0$ を、外洋流入境界では局所風速・風向に対応する平衡方向スペクトル $E_\infty(f, \theta)$ を与える。ただし、外洋からの過大なエネルギーの流入を避けるため、外洋境界では摩擦速度を $u_* \leq 0.6$ m/s とする。

(2) 数値計算法

本モデルの数値計算は式 (1) を分割して得られる伝播方程式と発達・減衰方程式を 1 タイムステップ内で交互に解く時間分割法による。まず、伝播計算は各成分波の波向線（直線）上における piecewise ray method の適用による。すなわち、Fig. 1 に示すように、波向線上の波格子点 i における方向スペクトル $\tilde{E}_i(f, \theta)$ は、波格子点 i から波格子点 $i-1$ 寄りに $C_g \Delta t$ だけ離れた位置での方向スペクトル $E_0(f, \theta)$ が Δt 時間後にエネルギーを失うことなく、 $C_g \Delta t$ だけ伝播して波格子点 i に到達する結果であると考え、これを $E_i(f, \theta)$ に対する一次元 3 次 Lagrange 補間式、

$$E_0(f, \theta) = a_1 E_{i-2}(f, \theta) + a_2 E_{i-1}(f, \theta) + a_3 E_i(f, \theta) + a_4 E_{i+1}(f, \theta) \quad \dots\dots\dots (12)$$

によって推定したのち、 $\tilde{E}_i(f, \theta) = E_0(f, \theta)$ とする。以上により 1 タイムステップ当たりの伝播計算が終了するが、流入境界の隣の格子点 ($i=2$) および流出境界 ($i=N+1$) では 3 次補間式が適用できないので、それぞれ 1 次および 2 次補間式を用いる。ここに、 $a_1 \sim a_4$ ： $r (= 1 - C_g \Delta t / \Delta s)$ の関数および Δs ：波格子間隔、である。一方、発達・減衰方程式は、計算時間の節約をはかるため、前進差分により解かれる。

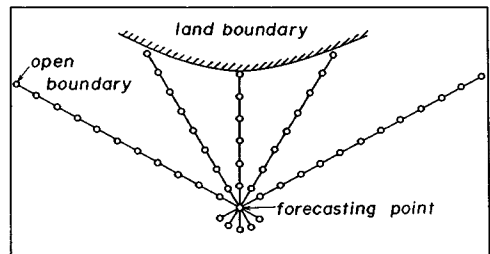


Fig. 1 Wave rays and computation of propagation.

$$E_i(f, \theta) = \begin{cases} \tilde{E}_i(f, \theta) + |\alpha_r + \beta_n \tilde{E}_i(f, \theta)| \Delta t & ; |\phi| \leq \pi/2, \tilde{E}_i(f, \theta) \leq E_\infty(f, \theta) \\ \tilde{E}_i(f, \theta) - |\tilde{E}_i(f, \theta) - E_\infty(f, \theta)| D_a \Delta t & ; |\phi| \leq \pi/2, \tilde{E}_i(f, \theta) > E_\infty(f, \theta) \\ \tilde{E}_i(f, \theta) [1 - D_w \Delta t]; |\phi| > \pi/2 & \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

ただし、式 (13) の第 1 式で表わされる発達段階で $E_i(f, \theta) > E_\infty(f, \theta)$ の場合には、 $E_i(f, \theta) = E_\infty(f, \theta)$ とする。

(3) 数値計算手順

波浪推算に先立ち、次の準備を行う。

- (i) 計算時間間隔および入力周波数を読み込む。
- (ii) $\alpha_r, \beta_n, D_a, D_w, E_\infty(f)$ はいずれも周波数 f と摩擦速度 u_* の関数であるので、 f を入力周波数、 u_* を 2~200 cm/s (2 cm/s きざみ) としてこれらを計算し、数表化する。また、 $\cos \theta$ および $\sin \theta$ についても 0~2 π (0.01 きざみ) の範囲で同様の数表を用意する。
- (iii) 水深格子データ (陸上部 0, 海上部 1), 格子間隔, 波浪推算点位置, および成分波の到達範囲を読み込み、入力方向値を作成する。

(iv) 入力方向値に対する波向線の長さ s を算出するか、あるいは地図から読み取って与えたのち、各波向線上に波格子点を設け、その位置を記憶させる。この結果、各波向線の長さは波格子間隔 Δs の整数倍で与えられ、実際の波向線長と若干異なる。この影響は特に短い波向線長に対する波浪成分に現われるが、こうした場合には波浪もあまり発達しないので、実用上無視されよう。

(v) 計算時間間隔, 波格子間隔および入力周波数から Lagrange 補間式の係数などを算出する。

ついで、波浪追算は次の順序で行う。

(vi) 天気図解析に基づいて作成した 3~6 時間ごとの台風データ (台風中心位置, 気圧深度および台風半径) を与え、内挿を通じてこれらを 1 時間ごとに求める。また、吹き込み角も緯度 10° ごとに与えた吹き込み角の値⁵⁾ から台風中心位置に応じて同様に求める。

(vii) 1 つの方向 θ に対する波向線上の全波格子点での風特性を台風モデル⁵⁾ (気圧分布を Myers 式で仮定して計算した中心対称傾度風と、場の移動に伴う風とをベクトル的に合成し、係数 ($C_1 = C_2 = 0.6$) を乗じて海上風に交換する) によって算出する。

(viii) 方向 θ , 周波数 f の成分波に対し、波向線上での伝播計算と発達・減衰計算を行い、波向線上の波格子点における方向スペクトルの計算結果をすべて記憶させる。この場合、発達・減衰方程式に含まれる source function の各項や正弦・余弦関数をそれぞれの数表から内挿して求める。また、開境界では、流入境界条件として局所風速・風向に対応する平衡方向スペクトル E_∞

(f, θ) を与える。

(ix) (viii) の計算を f について繰り返し、1 つの方向 θ に対する波向線上の全波格子点における方向スペクトルを全周波数について算出する。

(x) 全方向について (vii)~(ix) の計算を繰り返すことにより、1 つの時点での全波向線上の全波格子点における方向スペクトルを全周波数について求める。

(xi) 波浪推算点での方向スペクトルを方向・周波数について積分し、周波数スペクトルや有義波を求める¹⁾。

(xii) 全追算対象期間について (vi)~(xi) の計算を繰り返し、追算開始時点から現時点 (予測開始時点) までの波浪を追算する。

この段階で全波格子点における現時点の方向スペクトル値が確定するので、次に、予測計算に移る。

(xiii) 一定時間 (たとえば、12 時間) 後に予測される台風の中心位置, 気圧深度および台風半径を入力して、台風モデルから全波格子点上の風特性を 1 時間ごとに計算するとともに、(vii)~(xii) の計算を繰り返し、一定時間後の波浪変化を算出する。

(xiv) もし必要ならば、台風データの予測値を変更して、(xiii) の予測計算を行う。

(xv) 一定時間後の台風データの実況値を入力し、この時点での波浪特性を確定するとともに、全波格子点における方向スペクトルを改めて記憶させる。

(xvi) (xiii)~(xv) の計算を繰り返し、波浪予測を続ける。

3. 計算結果および考察

ここで計算対象とする台風 8013 号は九州を縦断し、高知沖ブイ地点においてわが国計器観測史上最大の高波高 (有義波高 $H_{1/3} = 10.9$ m) をもたらした。Fig. 2 は格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 80$ km をもつ 36×35 の水深格子網 (陸上部 0, 海上部 1) であり、台風経路および波浪の 12 時間予測で使用した台風位置も与えられている。計算に用いた周波数は 0.04~0.35 Hz 間を不等分割した 16 個、方向は 155°~260° を 18 に等分割した 19 個、波格子間隔は $\Delta s = 80$ km, 計算時間間隔は $\Delta t = 1$ h である。

まず、波浪追算は台風が南方海上にある 1980 年 9 月 7 日 9 時より九州南端に接近した 9 月 10 日 21 時までの期間について行った。次に、台風特性の予測値に基づく波浪の 12 時間予測と台風特性の実況値に基づく波浪追算からなる交互計算を台風が日本海に通過するまでの期間について実施した。ただし、本計算は一種の模擬実験であることから、台風特性の予測値のうち、台風位置のみを新聞に公表された台風予想進路図から与えることとし、気圧深度および台風半径としては時々刻々の実況値 (ただし、12 時間前) を用いた。

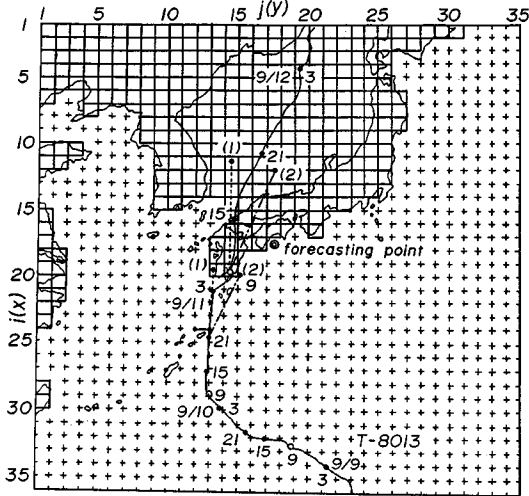


Fig. 2 Grid system, typhoon track and forecasting point.

Fig. 3 は高知沖ブイ地点における有義波の追算結果、12 時間予測結果、および観測結果を示したものである。この場合、台風の予想進路には幅があることから、台風進路予報円の周上の東西 2 地点をそれぞれ台風中心の予想位置として与える 2 種類の予測計算を行った。追算結果と観測結果を比較すると、前者においては波の発達および減衰がやや遅れる結果、発達期で若干過小に、減衰期で過大に評価する傾向があるが、経時変化の形そのものはピーク値を含めよく対応している。一方、2 種類の 12 時間予測結果と観測結果との対応もかなり良好である。これは高知沖ブイ地点が予測値および実況値によらず常に台風 8013 号の経路の右側に位置することや、台風半径が約 200 km と大きく、風特性の空間変化が相対的に少ないことによると考えられる。

MS-FORTRAN を使用した旧プログラムでは、 20×25 の正方形格子網、 $\Delta x = \Delta y = 80$ km、 $\Delta t = 1$ h、 $\Delta s \approx 80$ km、周波数個数 16、方向数 19 の条件のもとに 120 時間相当の計算をするために、愛媛大学情報処理センター M-360 AP で約 200 秒、PC-9801 m で約 46 時間の計算時間を必要としたが、本プログラムでは前者で約 27 秒、PC-9801 VX 21 (数値演算プロセッサ PC-98 XL-03 付き) で約 12 分であった。したがって、計算時間はプログラムの改良で約 1/7 に、計算機の変更で約 1/25 に、全体として約 1/200 に短縮されたことになる。また、12 時間後の波浪予測に要するパソコンの計算時間は約 70 秒であり、本モデルは現場における実際の波浪予測に十分使用し得ると判断される。

4. 結 語

本研究では、1 点法に基づくパソコン用深海波浪推算

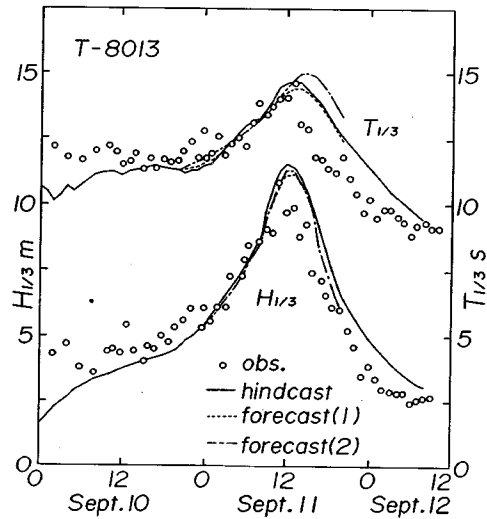


Fig. 3 Comparison between the computed and observed significant waves.

モデルにおける数値計算手法上の改良とパソコン機種の変更および数値演算プロセッサの導入により、大幅な計算時間の短縮を実現するとともに、波浪追算モデルを波浪予測モデルに拡張した。このモデルを台風 8013 号に対する波浪追算に適用したところ、旧方式に対して計算時間は約 1/200 に短縮されること、および 12 時間後の波浪予測がパソコンにより 1 分強の計算で可能であり、十分実用性を有することが明らかになった。

最後に、MS-FORTRAN の使用にあたり教示を賜った、愛媛大学工学部情報工学科 野田松太郎助教授に深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 山口正隆・畑田佳男・大福 学・宇都宮好博：パソコンを利用した深海波浪推算モデルとその適用性—エネルギー平衡方程式に基づく方法—, 自然災害科学, 6-3, pp. 1~10, 1987.
- 2) SWAMP Group: Ocean Wave Modeling, Plenum Press, 256p., 1985.
- 3) 山口正隆・畑田佳男・宇都宮好博：1 地点を対象とした浅海波浪推算モデルとその適用性, 土木学会論文集, 第 381 号/II-9, pp. 151~160, 1987.
- 4) Mitsuyasu, H. and Kusaba, T.: Drag coefficient over water surface under the action of strong wind, J. Natural Disas. Sci., Vol. 6, No. 2, pp. 43~50, 1984.
- 5) 佐藤昭二・合田良實：海岸・港湾, わかり易い土木講座 17, 彰国社, pp. 104~106, 1972.

(1988. 9. 19. 受付)