

波浪予測を目的とした物理因子重回帰モデル

後藤智明*・柴木秀之**・青野利夫***・
片山 忠****

波浪予測手法として用いられている波浪推算モデルと統計モデルは、それぞれ低波浪時の予測精度、波浪発達期の予測遅れの問題が残されてきた。これらの問題を解決する目的で物理因子重回帰モデルを開発した。モデルの予測式は、物理過程を記述した代数方程式で表され、予測結果を風波とうねりの各成分に分離することが可能である。また、本予測モデルは、現地波浪への適用性、予測精度ともに良好な手法である。

Key Words : wave forecast model, multiple regression method, physical parameter

1. はじめに

港湾建設の施工管理から船舶の航行、海洋性レクリエーションに至る幅広い海洋活動における安全性の確保には、的確な波浪予測情報の提供が不可欠である。

従来より、波浪予測を目的として用いられてきた手法に波浪推算モデル^{1)~3)}がある。しかしながら、波浪推算モデルは、主に高波浪を対象として理論構成がなされていることから、低波浪の推算精度が高波浪と比較して相対的に低く、また波浪推算の外力条件となる風推算の精度も不十分な場合が多い。このような点から、波浪推算結果をそのまま予測値とすることには、波浪予測の精度上の問題があった。

波浪推算モデルにかわる手法として、統計モデル（例えば重回帰波浪予測モデル）を用いた波浪予測手法^{4)~6)}が提案された。統計モデルは、予測波浪に関する因子として現時刻の観測波浪、風速、気圧を選択し、これらを説明変数とする回帰式を波浪予測の基礎式としたモデルである。この手法の利点は、専門知識を必要とすることなく、容易に波浪予測を実施できるところにある。しかしながら、予測式中の観測波浪に関する項の寄与率が高くなるため、予測値が観測値に強く依存し、観測値に引きずられる形で、予測波高の立ち上がりが遅れるという問題点があった。さらに、長期予測になるほど予測精度が低下するなどの難点もあり、実用化を考える上で多くの課題が残された手法であった。

本研究では、これらの問題を克服するための新たな手

法として、波浪推算モデルと統計モデルのそれぞれの長所を組み合わせた物理因子重回帰モデルを提案し、その予測理論を述べるとともに、現地へ適用した結果と予測精度に関する考察を行う。

物理因子重回帰モデルとして、観測波浪を説明変数として用いないモデルⅠと観測波浪を用いるモデルⅡの2種類を提案した。モデルⅠは、波浪の発達、伝播、減衰に関する物理的な理論に基づいた波浪推算モデルに類似したモデルである。波浪推算モデルと異なる点は、波浪推算モデルの理論式が微分方程式で表されるのに対し、線形の代数方程式で表されるところにある。予測式を線形の代数方程式で表すことにより、風推算を含む予測誤差を小さくするように予測式中の係数を観測値と推算値との重回帰解析から決めることができる。

モデルⅡは、モデルⅠで説明できない誤差が、時々刻々の推算値と観測値との差、推算エネルギーの増加量等に依存すると考え、これらの因子を用いて予測誤差を小さく抑えるように工夫したモデルである。

なお、モデルⅠ、モデルⅡとともに、重回帰モデルに比べると、説明変数の物理的な解釈が可能な方法である。また、予測結果の出力諸元として、有義波高、有義波周期のみならず、波向別に計算されたエネルギー分布から推定される代表波向、さらには、風波とうねりそれぞれの相当有義波高と相当有義波周期、成分波向などが算出可能である。

2. 波浪予測理論

(1) モデルの仮定

物理因子重回帰モデルの構築を行うにあたり、波浪の発達、伝播、減衰に関して、次のような仮定を行った。

波浪の発達は、無次元波高と無次元フェッチの1/2乗則および無次元周期と無次元フェッチの1/3乗則⁷⁾で記述できるものと仮定する。さらに、図-1に示すように、

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋エネルギー利用研究室長 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋エネルギー利用研究室 (研修生)

*** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋エネルギー利用研究室 (科学技術庁特別研究員)

**** 前運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所長 (現運輸省第二港湾建設局東京空港工事事務所長)

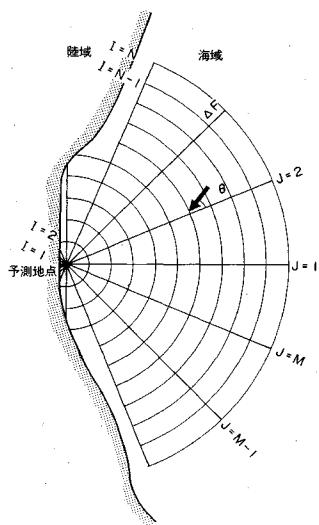


図-1 波浪予測地点と計算格子

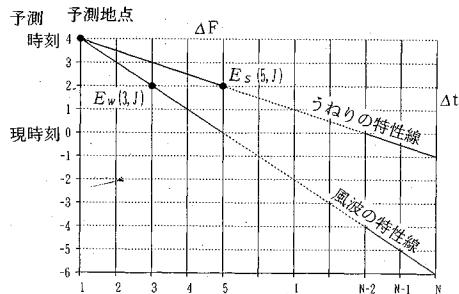


図-2 波浪の伝播特性線

予測地点を中心とした 16 方向の波向線を放射状に設定し、それぞれの方向について波浪が独立に発達するものと仮定する。また、図の各波向線上に、100 km 間隔（図中 ΔF を表す）に計算格子点を設定し、この格子点において波の発達を計算する。

波浪の伝播に関しては、次に示すような仮定を置いた。本来、波浪の伝播速度は波浪の発達に伴い時間的に変化するものであるが、本モデルでは、波浪を風波とうねりの 2 成分に分離し、それぞれ成分について代表的な伝播速度を定め、しかもこの伝播速度を一定と仮定する。このことは、風波とうねりの伝播が、図-2 に示すような一定勾配の 2 本の伝播特性線で表せることに相当する。図は、横軸に予測地点を原点とした空間座標をとり、縦軸に予測時刻を上端の点とした時間座標を採用したものであり、図-1 に示した任意方向の波向線における波浪の伝播を表したものである。風波とうねりの伝播特性線は勾配の異なる直線で表され、風波が 6 時間で 100 km の伝播、うねりが 6 時間で 200 km 伝播すると仮定した。これは、外力条件となる海上風の推算値が 6 時間毎に与えられること、さらに波浪予測が高速な演算を要求され

ることから、伝播特性線が 6 時間毎に波向線上の計算格子点（格子間隔は 100 km）を通過するように設定したことを意味する。また、風波とうねりの伝播速度を相当する周期で表すと、風波で平均波周期 5.9 s（有義波周期に換算すると 6.9 s）、うねりで平均波周期 11.9 s（有義波周期 13.8 s）となる。なお、図-2 の風波の伝播特性線上に示した $E_w(3, J)$ は、予測時刻より 12 時間前の、予測地点から 200 km 離れた洋上の格子点における J 方向の風波成分エネルギーを表し、うねりの伝播特性線上に示した $E_s(5, J)$ は、予測時刻より 12 時間前の、予測地点から 400 km 離れた洋上の格子点における J 方向のうねり成分エネルギーを表している。本モデルでは、最大 2000 km の波向線を仮定するため、風波の伝播特性線が 2000 km 離れた格子を通過する時刻は、予測時刻より 120 時間前となる。すなわち、波浪予測を行うためには、予測時刻より 120 時間前の海上風の情報が必要となる。

波浪の減衰に関しては、プレッド・シュナイダーの式⁸⁾と類似なモデルを仮定した。すなわち、波浪が発達する風域内では、エネルギー平衡状態になるまで減衰は生じないものとし、波浪がその風域から離れた場合、または逆風域に入った場合に、波浪エネルギーは伝播距離に反比例して減衰し、周期は伝播距離に比例して長くなると仮定する。なお、本モデルにおいては、このような減衰過程にある波浪をうねりと定義する。

(2) モデル I

a) 有義波高に関する計算理論

前節の仮定から、風波の発達に関する式は、次式に示す無次元波高と無次元フェッチの 1/2 乗則、

$$\left[\frac{gH_{1/3}}{U^2} \right] = a' \left[\frac{gF}{U^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

で表される。ここに、 $H_{1/3}$ は有義波高、 U は海面上 10 m 高度の風速、 F は吹送距離、 g は重力加速度である。式 (1) の両辺を 2 乗し、無次元エネルギーと無次元フェッチの関係で表すと、

$$\left[\frac{g^2 \epsilon}{U^4} \right] = a \left[\frac{gF}{U^2} \right] \quad (2)$$

となる。ここに、 ϵ は風波のエネルギーである。この風波のエネルギーの方向分布は常に相似形を保つと仮定すると、次式が成立する。

$$\epsilon = \int_0^{2\pi} E(\theta) d\theta, \quad E(\theta) = \epsilon \lambda(\theta) \quad (3)$$

ここで、 $E(\theta)$ は方向別エネルギー、 $\lambda(\theta)$ は、

$$\lambda(\theta) = \begin{cases} \lambda_0 \cos^4 \theta & (-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2 \text{ のとき}) \\ 0 & (\text{それ以外のとき}) \end{cases} \quad (4)$$

で定義されるエネルギーの方向分布関数である。なお、 λ_0 は、

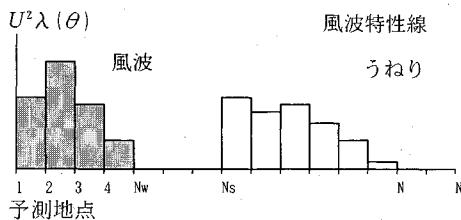


図-3 風波の伝播特性線上の風エネルギー分布の模式図

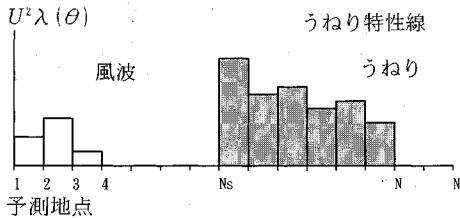


図-4 うねりの伝播特性線上の風エネルギー分布の模式図

$$\int_0^{2\pi} \lambda(\theta) d\theta = 1 \quad (5)$$

を満たす正規化係数である。

式(2)を、式(3)を用いて書き換えると、風波の波向別エネルギーが、

$$E(\theta) = \epsilon \lambda(\theta) = AFU^2 \lambda(\theta), \quad A = a/g \quad (6)$$

と表される。本モデルでは、この式(6)が風波エネルギーの発達の基本式となる。

いま、任意方向に関して、風波の伝播特性線上の風エネルギー $U^2 \lambda(\theta)$ 分布が、図-3 のように表されると仮定する。すなわち、任意の方向 J において、特性線上の計算格子 $I=1$ から $I=N$ のうち、 $I=1$ から $I=N_w$ までの区間で風波が発達する場合、風波のエネルギーは式(6)から次のように表される。

風波の境界点 $I=N_w$ における J 方向の風波のエネルギーは $E(N_w, J)=0$ であるため、 $I=N_w-1$ 地点の風波エネルギー $E(N_w-1, J)$ は、

$$E(N_w-1, J) = A\Delta F U(N_w-1, J)^2 \lambda(N_w-1, J) \quad (7)$$

と表される。ここに、 ΔF は格子点間の距離（風波の発達区間のフェッチ）である。同様に、 $I=N_w-2$ 地点の風波のエネルギーは、

$$E(N_w-2, J) = A(F_r + \Delta F) U(N_w-2, J)^2 \lambda(N_w-2, J) \quad (8)$$

と表される。ここに、 F_r は、風エネルギー $U(N_w-2, J)^2 \lambda(N_w-2, J)$ の条件下において、 $I=N_w-1$ 地点の風波のエネルギーが、 $E(N_w-1, J)$ となるための等価フェッチを意味し、

$$F_r = \frac{E(N_w-1, J)}{AU(N_w-2, J)^2 \lambda(N_w-2, J)} \quad (9)$$

と表される。この等価フェッチを式(8)に代入すると、

$$\begin{aligned} E(N_w-2, J) &= E(N_w-1, J) \\ &+ A\Delta F U(N_w-2, J)^2 \lambda(N_w-2, J) \\ &= A\Delta F U(N_w-1, J)^2 \lambda(N_w-1, J) \\ &+ A\Delta F U(N_w-2, J)^2 \lambda(N_w-2, J) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。同様な操作を、波浪予測地点である $I=1$ まで繰り返し行うと、 J 方向から来襲する風波のエネルギーは、

$$[E_w(J)] = A\Delta F \sum_{I=1}^{N_w-1} U(I, J)^2 \lambda(I, J) \quad (11)$$

となり、各方向の総和は、

$$\begin{aligned} [\epsilon]_w &= \sum_{J=1}^{16} [E_w(J)] \\ &= B_w \sum_{I=1}^{16} \sum_{J=1}^{N_w-1} U(I, J)^2 \lambda(I, J) \end{aligned} \quad (12)$$

と表される。ここに、 $B_w = A\Delta F$ である。

次に、うねりの伝播特性線上において、図-4 に示すような風のエネルギー分布を仮定する。この特性線上の $I=N_s$ から $I=N_E$ までの区間で発達した風波がうねりとして伝播してくる場合、うねりの初期エネルギーは、 $I=N_s$ 地点の風波エネルギーとなり、

$$E_w(N_s, J) = A\Delta F \sum_{I=N_s}^{N_E} U(I, J)^2 \lambda(I, J) \quad (13)$$

と表される。波浪の減衰に関する仮定より、うねりのエネルギーは伝播距離に反比例することから、波浪予測地点 $I=1$ に到達するうねりの J 方向のエネルギーは、

$$[E_s(J)] = A'\Delta F \frac{E_w(N_s, J)}{(N_s-1)} \quad (14)$$

となる。ここに、係数 A' は、うねりのエネルギーの減衰に関する係数である。これより、各方向から来襲するうねりのエネルギーの総和は、

$$[\epsilon]_s = B_s \sum_{J=1}^{16} [E_s(J)] \quad (15)$$

と表される。ここに、 $B_s = A'\Delta F$ である。

式(12)と式(15)から、波浪予測地点における風波とうねりを合成した全推算波浪エネルギーは、

$$[\epsilon]_f = [\epsilon]_w + [\epsilon]_s$$

$$= B_w \sum_{J=1}^{16} [E_w(J)] + B_s \sum_{J=1}^{16} [E_s(J)] \quad (16)$$

と表される。ここに、 $[\epsilon]_f$ は予測時刻の波浪エネルギーを意味する。係数 B_w と B_s は、それぞれ $A\Delta F$ や $A'\Delta F$ を意味するが、最終的には推算波浪エネルギーと同時に観測波浪エネルギーとの重回帰解析により、両者の差を最小とする回帰係数として決められる。なお、波浪エネルギーから有義波高への換算は、

$$H_{1/3} = 3.83 \sqrt{[\epsilon]_f} \quad (17)$$

により行う。

b) 有義波周期に関する計算理論

有義波高と同様、波浪の発達に関する仮定より、風波の周期の発達は、次式で表される無次元周期と無次元フェッチの1/3乗則、

$$\left[\frac{g T_{1/3}}{U} \right] = c' \left[\frac{g F}{U^2} \right]^{1/3} \quad (18)$$

で表される。式(18)の両辺を3乗すると、

$$\left[\frac{g^3 \tau}{U^3} \right] = \left[\frac{g T_{1/3}}{U} \right]^3 = c \left[\frac{g F}{U^2} \right] \quad (19)$$

となる。ここに、 τ は有義波周期の3乗値を表し、ここでは周期特性量として定義する。また、有義波高と同様に、式(4)の方向分布関数 $\lambda(\theta)$ を導入する。これらの仮定より、式(19)は、

$$T(\theta) = \tau \lambda(\theta) = C F U \lambda(\theta), \quad C = c/g^2 \quad (20)$$

と表される。式(20)が方向別周期特性量の発達に関する基本式となる。

有義波高の場合と同様な展開を行うと、風波の周期特性量の全方向の総和は、

$$\begin{aligned} [\tau]_W &= D_W \sum_{j=1}^{16} [T_W(j)] \\ &= D_W \sum_{j=1}^{16} \sum_{I=1}^{N_W} U(I, j) \lambda(I, j) \end{aligned} \quad (21)$$

となる。ここに、 $D_W = C \Delta F$ である。

うねりの周期に関する式は、波浪の減衰に関する仮定より、伝播距離に比例して大きくなることから、

$$\begin{aligned} [\tau]_S &= D_S \sum_{j=1}^{16} [T_S(j)] \\ &= D_S \sum_{j=1}^{16} \sum_{I=N_S}^{N_E} U(I, j) \lambda(I, j) (N_S - 1) \end{aligned} \quad (22)$$

と表される。ここに、 D_S はうねりの周期特性量の係数である。

式(21)と式(22)から、波浪予測地点における風波とうねりを合成した全推算周期特性量は、方向別エネルギーの重み付き平均値として、

$$[\tau]_f = \frac{D_W \sum_{j=1}^{16} [E_W(j)] [T_W(j)] + D_S \sum_{j=1}^{16} [E_S(j)] [T_S(j)]}{D_W \sum_{j=1}^{16} [E_W(j)] + D_S \sum_{j=1}^{16} [E_S(j)]} \quad (23)$$

で表される。ここに、 $[\tau]_f$ は、予測時刻の周期特性量を表す。 D_W および D_S は、有義波高の予測式(16)の係数と同様に、推算値と観測値との重回帰解析により求められる回帰係数である。なお、周期特性量から有義波周期への換算は、

$$T_{1/3} = [\tau]_f^{1/3} \quad (24)$$

により行う。

(3) モデルII

モデルIIは、モデルIの予測誤差が、完全にランダムではなく、何らかの物理量に関係していると考えたもの

である。いま、予測誤差に関係する因子として、現時刻の予測誤差、すなわち現時刻の推算波浪エネルギーと観測波浪エネルギーの差と、風波とうねりそれぞれの推算エネルギーの時間変化量を仮定すると、モデルIの予測誤差 E_f は、

$$\begin{aligned} E_f &= C_1 [\epsilon]_{Mb} - C_2 \sum_{j=1}^{16} [E_{Wb}(j)] - C_3 \sum_{j=1}^{16} [E_{Sb}(j)] \\ &\quad + C_4 \sum_{j=1}^{16} [E_W(j)] + C_5 \sum_{j=1}^{16} [E_S(j)] \\ &\quad - C_6 \sum_{j=1}^{16} [E_{Wb}(j)] - C_7 \sum_{j=1}^{16} [E_{Sb}(j)] + E'_f \end{aligned} \quad (25)$$

と表される。ここに、 $E_W(j)$, $E_S(j)$ は、予測時刻の風波とうねりの推算エネルギー、 $E_{Wb}(j)$, $E_{Sb}(j)$ は、現時刻の風波とうねりの推算エネルギー、 $[\epsilon]_{Mb}$ は現時刻の観測波浪エネルギー、 C_1 から C_7 は各項に係る係数、 E'_f はこの考え方だけで表現できない誤差である。式(25)を式(16)に考慮し、予測時刻の波浪エネルギーに関して定式化すると、式(16)のモデルIに対応するモデルIIの有義波高予測式として、

$$\begin{aligned} [\epsilon]_f &= B_M [\epsilon]_{Mb} + B_W \sum_{j=1}^{16} [E_W(j)] + B_S \sum_{j=1}^{16} [E_S(j)] \\ &\quad + B_{Wb} \sum_{j=1}^{16} [E_{Wb}(j)] + B_{Sb} \sum_{j=1}^{16} [E_{Sb}(j)] \end{aligned} \quad (26)$$

が得られる。式(26)の各係数は、モデルIと同様、重回帰解析により、推算値と観測値との差を最小とする回帰係数として求められる。

同様に、有義波周期についても、モデルIの予測誤差に関係する因子として、現時刻の推算周期特性量と観測周期特性量の差と、風波とうねりそれぞれの推算周期特性量の時間変化量を用いると、有義波周期の予測式は、

$$\begin{aligned} [\tau]_f &= D_M [\tau]_{Mb} \\ &\quad + \frac{D_W \sum_{j=1}^{16} [E_W(j)] [T_W(j)] + D_S \sum_{j=1}^{16} [E_S(j)] [T_S(j)]}{B_W \sum_{j=1}^{16} [E_W(j)] + B_S \sum_{j=1}^{16} [E_S(j)]} \\ &\quad + \frac{D_{Wb} \sum_{j=1}^{16} [E_{Wb}(j)] [T_{Wb}(j)] + D_{Sb} \sum_{j=1}^{16} [E_{Sb}(j)] [T_{Sb}(j)]}{B_{Wb} \sum_{j=1}^{16} [E_{Wb}(j)] + B_{Sb} \sum_{j=1}^{16} [E_{Sb}(j)]} \end{aligned} \quad (27)$$

で表される。ここに、 $T_W(j)$, $T_S(j)$ は、予測時刻の風波とうねりの推算周期特性量、 $T_{Wb}(j)$, $T_{Sb}(j)$ は、現時刻の風波とうねりの推算周期特性量、 $[\tau]_{Mb}$ は現時刻の観測周期特性量であり、各係数は、推算値と観測値の重回帰解析より求められる回帰係数である。

(4) 地形による遮蔽効果

沿岸に位置する地点の波浪予測を行う場合に、周辺の陸地による遮蔽効果を考慮することが重要となる。地形による遮蔽効果は、方向毎に異なるのが一般的である。しかし、提案した波浪予測式においては、各方向成分に

関して、同一の回帰係数を用いているため、別の方針によって遮蔽効果を取り入れる必要がある。そこで、本モデルでは、風波の推算エネルギー $E_w(J)$ とうねりの推算エネルギー $E_s(J)$ に予測地点の各方向に応じた遮蔽率を乗じ、この値を予測式に代入する方法を採用している。さらに、陸側方向の波向においても波浪が発達することから、図-1に示すように陸側方向にも計算格子を設け、フェッヂが 100 km 以下となる場合には、波浪推算地点の離岸距離に応じた補正率を乗じてエネルギーを計算している。

3. 波浪予測の試算

(1) 波浪予測地点

物理因子重回帰モデルを波浪予測に適用する地点は、回帰係数の同定を行う必要上、観測波浪が得られている地点でなければならない。本研究では、太平洋側の常陸那珂港（茨城県）とむつ小川原港（青森県）、日本海側の深浦港（青森県）の 3 地点を波浪予測対象港湾とした。

(2) 重回帰解析の解析期間

波浪予測式中の回帰係数の同定を行う解析期間は、1983 年 2 月 1 日～28 日、5 月 1 日～31 日、8 月 1 日～31 日、11 月 1 日～30 日と 1989 年 1 月 17 日～2 月 28 日、4 月 17 日～5 月 16 日、8 月 1 日～31 日、9 月 27 日～10 月 24 日のそれぞれ四季を代表する計 8 ヶ月間、日数にして 252 日とした。

(3) 海上風の推算

波浪エネルギー計算の入力データとなる海上風（海面上 10 m 高度）は、前節の回帰係数の同定を行う全期間について計算する必要がある。本研究では、気象図から求まる気圧分布をもとに、傾度風・台風のハイブリッドモデルを用いて理想大気の風を推算し、これを、境界層モデルによって海上風に変換する方法⁹⁾を採用した。なお、風推算に用いる気圧データはすべて地上天気図から得た。

(4) 回帰係数の同定

常陸那珂港、むつ小川原港、深浦港の 3 港湾を対象として、推算波浪エネルギーならびに周期特性量を計算し、有義波高と有義波周期の予測式に当てはめ、この推算値と観測値との重回帰解析を行った。この解析により、推算値と観測値の差を最小とする回帰係数が同定される。回帰係数の同定は、1983 年 2 月、5 月、8 月、11 月と 1989 年 1 月～2 月、4 月～5 月、8 月、9 月～10 月の 1 ヶ月間毎と、それぞれ 1983 年の 4 ヶ月間、1989 年の 4 ヶ月間、さらに、1983 年と 1989 年を合わせた全 8 ヶ月に分けて行い、11 の異なる同定期間それぞれにおいて、11 種類の異なる回帰係数を求めた。

図-5 は、常陸那珂港における有義波高予測モデル I の風波とうねりエネルギーそれに係る回帰係数の同

回帰係数 モデル I (常陸那珂港)

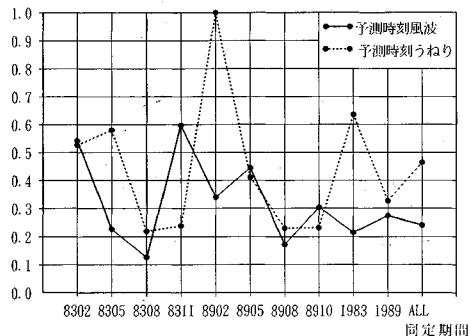


図-5 有義波高予測モデル I の回帰係数と同定期間の関係
(常陸那珂港)

回帰係数 モデル II (常陸那珂港)

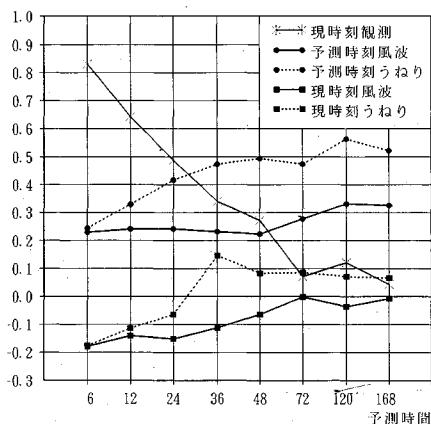


図-6 有義波高予測モデル II の回帰係数と予測時間の関係
(常陸那珂港)

定結果と、11 の異なる係数同定期間との関係を示したものである。同定期間が 1 ヶ月間の場合、求められる回帰係数は期間の違いによりかなりの変動幅を持つが、同定期間が 1983 年と 1989 年のそれぞれ 4 ヶ月間の場合は、各年の 1 ヶ月間の係数の中間値となる。さらに、全 8 ヶ月の同定期間の場合は、1983 年と 1989 年のそれぞれ 4 ヶ月間の係数のはば平均値となる。これより、同定期間が長いほど、回帰係数は期間平均値に近づく傾向がわかる。また、4 ヶ月間の解析から求めた回帰係数と全 8 ヶ月間の解析から求めた回帰係数の差が小さいことから、さらに同定期間を長くしても、図-5 に示した 8 ヶ月間の値と大きな差はないものと予想される。従来の重回帰モデルが、係数の同定期間として 3～4 年程度必要であるのに比べて、物理因子重回帰モデルの係数同定期間は、比較的短期間でもよいことがわかる。

図-6 は、常陸那珂港における有義波高予測モデル II の 5 種類の回帰係数と、予測時間を 6 時間、12 時間、24 時間、36 時間、48 時間、72 時間、120 時間（5 日），

168時間（1週間）とした場合の関係を示したものである。回帰係数の同定期間は、すべて8ヶ月とした。短期予測において、現時刻の観測有義波高に係る係数は、0.6~0.8程度の値となる。これは、予測波高の6割から8割程度が現時刻の有義波高に依存することを示している。また、予測時刻の風波とうねりの推算エネルギーに係る係数は正の値となり、現時刻の推算エネルギーに係る係数は、負の値となる。それに対し、予測時間が長期になるとともに、現時刻の観測波浪に係る係数値は減少し、逆に、予測時刻の風波とうねりに係る係数値が増加する。これは、短期予測における予測波高が、現時刻の観測波浪に強く依存するのに対し、長期予測において、現時刻の観測波浪への依存度は低下し、他の説明変数への依存度が強くなることを意味している。そして、予測時間を168時間とした場合、その回帰係数は、モデルIの係数に近い値となることが、図-5の同定期間8ヶ月の係数との比較からわかる。

(5) 有義波の予測結果

係数同定されたモデルIとモデルIIの有義波高、有義波周期の予測式により、係数同定期間の有義波高と有義波周期の予測を行った。ここに、本研究では、予測モデルの特性を明らかにすることを目的としていることから、予測計算は係数同定を行った期間と同じ期間において行ったが、先に示したように、回帰係数がほぼ収束する傾向にあることから、同定期間以外について予測計算を行っても同程度の予測精度が得られるものと期待できる。また、海上風の推算は過去の確定した気象図により行い、予報気象図は用いていない。そのため、予測時刻の波浪エネルギーのみを必要とするモデルIの波浪予測は、予測時間の違いによる予測結果の違いはない。ここでは、モデルIの予測を仮に12時間予測として、以下に引用した。

図-7、図-8および図-9は、それぞれモデルIの12時間とモデルIIの12時間、168時間の予測式を用いて、1983年2月の常陸那珂港の波浪を予測した結果である。予測結果として、予測波向、予測有義波高と観測値の経時変化の比較、予測有義波周期と観測値の経時変化の比較を示している。

モデルIの予測有義波高と観測値とを比較すると、気象擾乱通過時に発生した高波浪のピーク値に多少の差異は見られるが、低波浪と高波浪とともに両者は良い一致を示す。また、予測有義波周期と観測値を比較すると、観測周期に現れる短期変動に対して、予測値は十分に追従しているとは言えないものの、長期的な変動に対しては良く追従している。モデルIIの12時間予測では、モデルIの結果と比較して、短期の波高・周期の変動にも良く追従しており、高波浪のピーク値も良い一致を示している。また、モデルIIの168時間予測は、モデルIの予

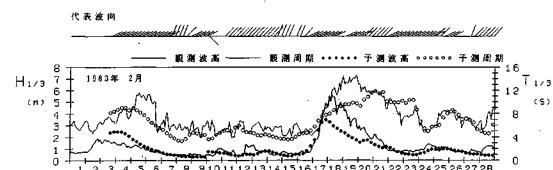


図-7 モデルIによる常陸那珂港の12時間波浪予測結果

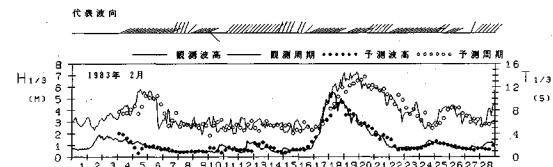


図-8 モデルIIによる常陸那珂港の12時間波浪予測結果

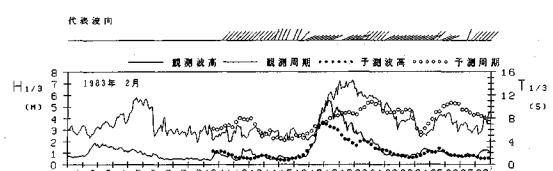


図-9 モデルIIによる常陸那珂港の168時間波浪予測結果



図-10 重回帰モデルによるむつ小川原港の12時間波浪予測結果

測結果とよく似た結果となっている。すなわち、モデルIIの予測結果は、予測時間が長くなるとともに、現時刻の観測波浪への依存度が低下し、その結果、モデルIの予測結果に近づいていく傾向があることを示している。

モデルI、IIの予測結果と、従来の重回帰波浪予測モデルを比較するために、むつ小川原港における重回帰波浪予測の例を図-10に示した。図は、12時間予測に関するものである。先に述べたように3月20日から21日にかけての波浪発達期の予測値は、観測値に比べて波高の立ち上がりが遅れており、この時間差は予測時間とほぼ一致したものとなっている。これに対して、図-7から図-9に示した物理因子重回帰モデルの予測値は、波浪が急激に増大する時期についても良い一致を示している。

図-11および図-12は、モデルIIの12時間予測式を用いて、1983年2月のむつ小川原港と深浦港の波浪を予測した結果を示したものである。それぞれ予測値と観測値とを比較すると、むつ小川原港の予測値は、常陸那珂港の例と同様に、観測値と良い一致を示しているが、深浦港に関しては幾分予測精度が低い結果となっている。深浦港の例は、日本海低気圧が周期的に多数通過す

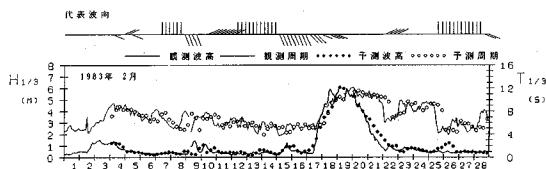


図-11 モデルⅡによるむつ小川原港の12時間波浪予測結果

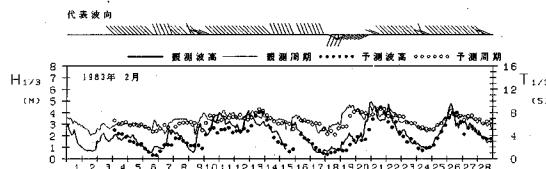


図-12 モデルⅡによる深浦港の12時間波浪予測結果

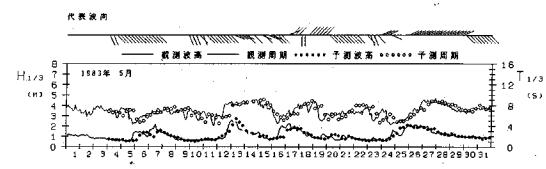


図-13 モデルⅡによる常陸那珂港の12時間波浪予測結果(低波浪期)

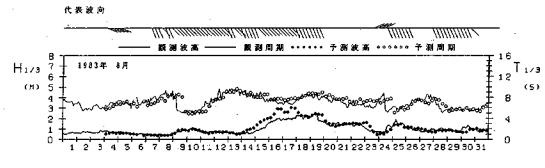


図-14 モデルⅡによるむつ小川原港の12時間波浪予測結果(低波浪期)

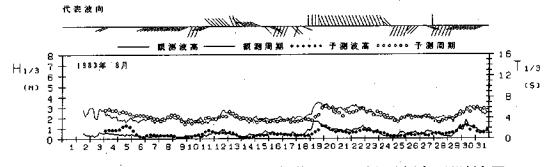


図-15 モデルⅡによる深浦港の12時間波浪予測結果(低波浪期)

る期間の予測結果であり、これは、冬季日本海沿岸の代表的な特性でもある。このような時期に出現する高波浪は、風波が主体となっている。本モデルの風波は、モデルの仮定から考えて、予測地点近傍の風場に強い影響を受ける。深浦港のような日本海沿岸の波浪予測精度をさらに向上させるためには、周期的に来襲する日本海低気圧に伴う風場の推算精度を改善することが必要である。

図-13、図-14および図-15は、モデルⅡの12時間予測式を用いて、常陸那珂港、むつ小川原港、深浦港の低波浪期の予測を行った結果である。先に示した各地点の高波浪期の予測結果と同様に、予測値は観測値と良く一致している。高波浪期に予測精度が幾分低めであった

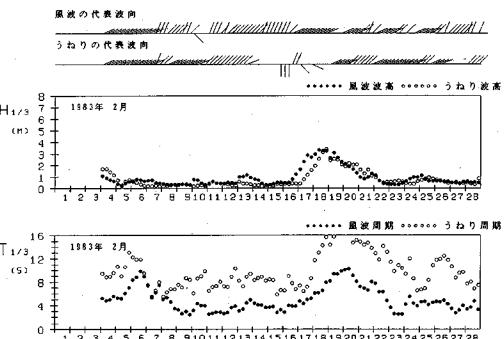
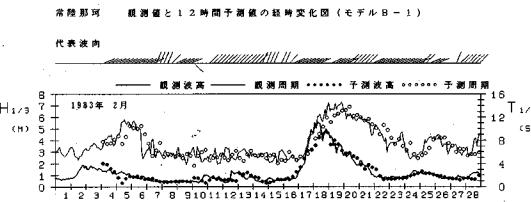


図-16 風波とうねりの分離出力結果

深浦港も、良好な予測結果となっている。このように、物理因子重回帰波浪予測モデルは、高波浪期にも低波浪期にも共通して、良い予測値を得ることが可能な手法であることが確認できる。

図-16は、1983年2月の常陸那珂港における予測波浪について、風波とうねりの各成分をモデル上分離して出力した結果である。上から順に、風波とうねりの合成波の予測波向、予測有義波高と観測値の経時変化比較、予測有義波周期と観測値の経時変化比較、風波とうねりそれぞれの成分波波向、風波とうねりそれぞれの相当有義波高と相当有義波周期の経時変化である。現時点の既往研究成果では、観測波浪を風波とうねりに分離する手法が開発されていないことから、2成分の予測結果と観測値とを定量的に比較検討することはできない。ここでは定性的な評価にとどまるが、波向について見ると、波浪発達期に、合成波の波向は風波の波向と一致するのに対し、波浪減衰期に、合成波の波向はうねりの波向と一致する。また、風波とうねりそれぞれの相当有義波高を見ると、予測期間中、最大の高波浪が発達した2月17日は、風波成分が卓越するのに対し、20日～21日にかけての波浪減衰期は、うねりが卓越している。さらに、風波とうねりそれぞれの相当有義波周期を見ると、期間を通じてうねりの周期が風波の周期よりも大きく、波浪の発達期に、両者はほぼ同じ周期となることがわかる。

4. 予測精度の検討

予測精度を定量的に評価する方法としては、種々の方法が考えられるが、本研究では次に示す方法を用いた。有義波高に関しては、観測波高0.0m～1.0mの階級における予測値と観測値との許容誤差を±0.3mとし、そ

的中率

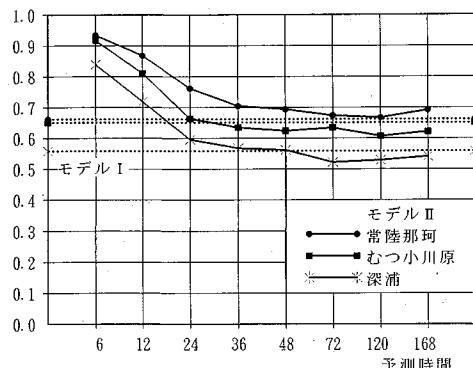


図-17 物理因子重回帰モデルの有義波高予測の的中率

的中率

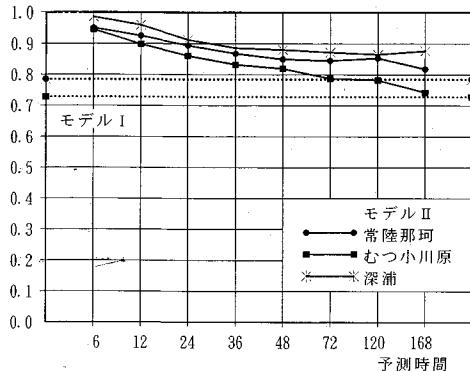


図-18 物理因子重回帰モデルの有義波周期予測の的中率

れ以上の波高階級における許容誤差を、観測波高の土30%とする。予測値がこの許容誤差の範囲にある場合は、予測が的中したものと評価し、的中範囲に入る予測個数が、全予測個数の何%になるかを計算する。この比率を的中率と定義し、的中率が高いほど予測精度は良いと判断する。また、有義波周期は、全周期階級において、観測周期の土30%を許容誤差の範囲とし、この範囲に入る予測個数が、全予測個数の何%になるかを計算して的中率を求める。

図-17は、常陸那珂港、むつ小川原港、深浦港の3地点において、モデルIの有義波予測とモデルIIの6時間から168時間までの8種類の有義波高予測を行い、それぞれの予測結果から計算される的中率をまとめたものである。地点間の的中率の差は、予測時間が長期になってしまっても変化せず、短期予測精度の水準が高いほど、長期予測精度の水準は高い。また、各地点とも、モデルIIの6時間予測から36時間予測にかけての的中率は、次第に低下する傾向にあるが、36時間予測より長期の場合には、図に破線で示した予測モデルIの的中率と同水準に収束している。同様に、図-18は、有義波周期の予測的中

率をまとめたものである。有義波高の予測結果と比較すると、的中率の水準は高く、モデルIIの36時間より長期の予測的中率も、次第に低下する傾向にある。しかしながら、168時間予測の的中率が、モデルIの的中率と同水準に収束する傾向は見られる。

このような予測精度の特性は、回帰係数同定の章においても述べたように、予測時間が長くなるとともに、現時刻の観測波浪への依存度が減少し、モデルIの予測式に近づくことから説明できる。このことから、長期波浪予測の精度は、モデルIの予測精度に左右されるものと考えられ、モデルIの予測精度が改善されるとともに、モデルIIの長期予測精度も向上するものと推察される。

5. おわりに

本研究では、新たな波浪予測手法として、物理因子重回帰モデルを提案した。このモデルでは、波浪を風波とうねりに分離し、それぞれの成分の伝播速度を一定とすることにより、本来なら微分方程式で記述される波浪の発達、伝播、減衰を、代数方程式に書き換え、これを波浪予測式としている。この代数方程式の係数は、重回帰解析により、予測値と観測値との差を最小にする回帰係数として求められる。また、方向別の風波とうねりのエネルギーを説明変数としており、予測される諸元は、有義波高、有義波周期のみならず、波向、風波とうねりそれぞれの相当有義波高、相当有義波周期、成分波向である。

以上のように物理因子重回帰モデルは、従来の波浪予測手法である波浪推算モデルと重回帰モデルの長所を合わせ持ったモデルであり、予測精度、予測結果の出力諸元、実用性などに多くの優れた特徴を有するモデルである。以下に、主要な結論をまとめる。

① 常陸那珂港、むつ小川原港、深浦港の3地点を対象に、予測式中の回帰係数の同定を行い、係数の特性を検討した。予測モデルIの係数は、定期期間の違いにより変化するものの、期間が長いほど次第に平均的な値になる傾向を有する。また、モデルIIの短期予測式の5係数の中で、観測波浪に係る係数が大きく、予測値は観測波浪に強く依存する傾向を持つが、長期予測では、観測波浪に係る係数値が小さくなり、次第に観測波浪への依存度は低下する。

② 物理因子重回帰モデルは、波浪推算モデルや重回帰モデルに比べ良好な予測精度を有し、重回帰モデルの大きな欠点であった高波浪の立ち上がり時に現れる予測値の時間遅れの問題を解決している。長期予測についても、予測精度の低下は一定水準に抑えられ、重回帰モデルのように著しく予測精度が低下する問題もない。さらに、物理因子重回帰モデルは、有義波高、有義波周期の予測のみではなく、波向予測、さらに風波とうねりの分

離出力まで行うことが可能である。

なお、本論文における波浪予測特性の考察では、過去の確定した気圧情報を利用している。したがって、実用化を考える際には、予報気象情報を用いたモデル係数の同定を行わなければならない。また、予測精度に関しても再度検討する必要がある。

参考文献

- 1) Wilson, B. W. : Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, Deut. Hydrgr., Vol.18, pp.114~130, 1965.
- 2) Isozaki, I. and T. Uji : Numerical prediction of ocean wind waves, Papers in Met. and Geophys., Vol.23(4), pp.347~359, 1973.
- 3) 山口正隆・土屋義人：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.
- 4) 須田 熙・湯沢 昭：波浪予測に基づく外海シーバースの待ち行列に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 339 号, pp.177~185, 1983.
- 5) 小舟浩治・橋本典明・亀山 豊・久高将信：重回帰式を用いた波浪予測手法の適用について, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.167~171, 1987.
- 6) 駒口友章・進藤信博・川合紀章・木村克俊：海上工事の施工管理における波浪予測の運用について, 第 38 回海岸工学講演会論文集, pp.961~965, 1991.
- 7) 後藤智明・末次広児・小舟浩治：海上風の抵抗則と風波の発達則, 第 37 回海岸工学講演会論文集, pp.170~174, 1990.
- 8) Bretschneider, C. L. : Decay of wind generated waves to ocean swell by significant wave method, Fundamental of Ocean Engineering, 8, Ocean Industry, 1968.
- 9) 柴木秀之・後藤智明：内湾海上風の地形依存性について, 第 39 回海岸工学講演会論文集, pp. 141~145, 1992.

(1992.9.22 受付)

MULTIPLE REGRESSION MODELS DESCRIBED IN PHYSICAL PARAMETERS FOR THE PURPOSE OF WAVE FORECASTING

Chiaki GOTO, Hidenori SHIBAKI, Toshio AONO and Tadashi KATAYAMA

As new models supersede the conventional wave forecast methods, the multiple regression wave forecast models described in physical parameters are developed. In the models, ocean wave separated into wind waves and swells, and assumed that propagation speed of each wave component is constant. From this assumption, the governing equations of the models are expressed as linear algebraic equations. For the verification of models, wave forecast is carried out.

It is clarified that the models show good accuracy and solve the difficulties of the existing wave forecasting models.