

船舶の荷役可否判定を目的とした気象データに基づく 長周期波の統計的予測

橋本 典明* ・ 嶺 泰宏** ・ 永井 紀彦***
吉松 みゆき**** ・ 三原 正裕*****

1. はじめに

現在、我が国の多くの港湾において、係留船舶の動揺による係留索の切断事故等が数多く発生し、港湾荷役上大きな問題となっている。原因は、周期数十秒以上の長周期波による長周期動揺であり、各方面でその対策が検討されている。しかしながら、具体的かつ有効な対策方法はいまだ提案されておらず、急務の課題となっている。一方、港湾荷役業務等の工程管理を円滑に実施するためには、少なくとも数日先までの波浪予測が必要不可欠であるが、一般に行われている波浪予測は風波や周期 10 秒～15 秒程度のうねりを対象としたもので、現在問題になっている数十秒以上の長周期波を対象としたものではない。これは、このような長周期波の発生・発達の原因がいまだ明らかになっていないためである。

本研究では、周期数十秒以上の長周期波の発生・発達メカニズムをブラック・ボックスとして扱い、統計的予測手法を用いて、気圧、風速等の気象データから直接、周期数十秒以上の長周期波の発生を予測可能な手法を開発し、港湾荷役可否判定に資することを目的とする。

2. 主成分分析とカルマンフィルタによる波浪予測

本研究で用いた予測手法は図-1 のフローで波浪を予測する(橋本ら, 1995)。すなわち、最初にカルマンフィルタによるトレンドモデルによって気象データに含まれる長周期成分と短周期成分を分離する。さらに、これらの成分を予測対象期間以前のデータで主成分分析して得られるそれぞれの固有ベクトル上に展開し、別のデータに変換する。このときに固有ベクトルにかかる重みを説明変数とし、カルマンフィルタによる時変係数型波浪予測式を用いて波浪を予測する。

気象データを長周期成分と短周期成分に分離したの

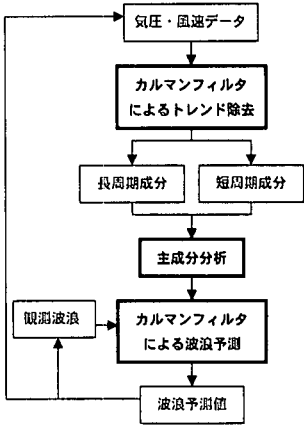


図-1 検討フロー

は、数日先を対象とする短期波浪予測式が、気象データの長周期成分の影響を強く受け、バイアスが生じるのを軽減するためである。気象データを主成分分析した固有ベクトル上に展開するのは、格子点上の気象データを直交する他の情報に変換することによって気象データ相互間の多重共線性(線形独立性が低い)の問題を軽減するためである。また、時変係数型波浪予測式としたのは、波浪場の季節変動等の緩やかな変化を予測誤差から検知し、この影響をモデルの中に組み込むためである。

(1) カルマンフィルタの概要

y_n を l 次元の観測ベクトルの時系列とし、この時系列を次のような状態空間モデルで表現する。

$$x_n = F_n x_{n-1} + G_n v_n \quad (\text{システム方程式}) \quad \cdots (1)$$

$$y_n = H_n x_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \quad \cdots (2)$$

ここに、 x_n は状態変数で k 次元のベクトル、 v_n はシステムノイズで平均ベクトル 0、分散共分散行列 Q_n に従う正規白色雑音、 w_n は観測ノイズで平均ベクトル 0、分散共分散行列 R_n に従う正規白色雑音、 F_n , G_n , H_n はそれぞれ $k \times k$, $k \times l$, $l \times k$ の行列である。

カルマンフィルタは、 y_n の観測値に基づいて状態 x_n の推定を行う逐次計算アルゴリズムで、以下に示す 1 期先予測とフィルタを交互に繰り返すことにより、状態 x_n が逐次求められる。

* 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所海洋水理研究室長
** (前)国土交通省九州地方整備局志布志港湾事務所長
*** 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所海象情報研究室長
**** 国土交通省近畿地方整備局
***** (株)エコー 環境水理部

(1) 期先予測)

$$\mathbf{x}_{n|n-1} = \mathbf{F}_n \mathbf{x}_{n-1|n-1} \dots\dots\dots (3)$$

$$\mathbf{V}_{n|n-1} = \mathbf{F}_n \mathbf{V}_{n-1|n-1} \mathbf{F}_n^t + \mathbf{G}_n \mathbf{Q}_n \mathbf{G}_n^t \dots\dots\dots (4)$$

(フィルタ)

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{V}_{n|n-1} \mathbf{H}_n^t (\mathbf{H}_n \mathbf{V}_{n|n-1} \mathbf{H}_n^t + \mathbf{R}_n)^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

$$\mathbf{x}_{n|n} = \mathbf{x}_{n|n-1} + \mathbf{K}_n (\mathbf{y}_n - \mathbf{H}_n \mathbf{x}_{n|n-1}) \dots\dots\dots (6)$$

$$\mathbf{V}_{n|n} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_n \mathbf{H}_n) \mathbf{V}_{n|n-1} \dots\dots\dots (7)$$

なお以下では、時系列 $\mathbf{y}_n$ の次元が $l=1$ であることから、 $\mathbf{R}_n = \sigma_w^2$ で一定とし、観測ノイズとシステムノイズを新たに $\hat{\mathbf{R}}=1$ 、 $\hat{\mathbf{Q}}_n = \sigma_b^2 / \sigma_w^2 \mathbf{I}$ としてトレードオフパラメータ σ_b^2 / σ_w^2 のみを制御パラメータとして解析した。

(2) カルマンフィルタを用いたトレンド成分の除去

いま観測値 y_n はトレンド成分 t_n に様々な変動成分 w_n が加わったものと仮定すれば、

$$y_n = t_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \dots\dots\dots (8)$$

と表される。ここに、 w_n は平均 0、分散 σ^2 の正規白色雑音である。トレンド成分 t_n は時間差分オペレータを Δ^k とすれば次式で表される。

$$\Delta^k t_n = v_n \quad (\text{システム方程式}) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 v_n は平均 0、分散 σ^2 の正規白色雑音である。時間差分オペレータには 2 次の差分オペレータを用いた。

(3) 主成分分析を用いた気象の時空間データの変換

気象データの時空間分布を平均値と標準偏差で正規化し、これを $P_{z,t} = P(x, y, t)$ と表す。また、 $P_{z,t}$ がある固有ベクトル $e_{n,z}$ 上で表されるとすると $P_{z,t}$ は次式で表される。

$$P_{z,t} = \sum C_{n,t} e_{n,z} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

$$\sum e_{m,z} e_{n,z} = \delta_{m,n} \dots\dots\dots (11)$$

である。気象データの時空間分布の共分散分散行列を $\mathbf{A}$ とすると、その i, j 成分は次式で表される。

$$a_{i,j} = \frac{1}{n_z n_t} \sum_{i=1}^{n_t} P_{i,t} P_{j,t} \dots\dots\dots (12)$$

このとき、式 (10) の固有ベクトル $e_{n,z}$ は、

$$\mathbf{A} = \lambda_n e_{n,z} \dots\dots\dots (13)$$

から求められる。ここに、 λ_n は固有値である。係数 $C_{n,t}$ は固有ベクトルの直交性を利用して次式で求められる。

$$C_{n,t} = \sum P_{z,t} e_{n,z} \dots\dots\dots (14)$$

以下に示すカルマンフィルタを用いた時変係数型波浪予測式では式 (14) の $C_{n,t}$ が説明変数として用いられる。ただしここでは、指定した範囲内の格子点上の気圧値 3 日分をまとめて行列 $P_{z,t}$ として主成分分析する。すなわち、指定範囲内の気象データの空間変動の 3 日分の変動を説明する固有ベクトル $e_{n,z}$ と係数 $C_{n,t}$ を求め、この係数 $C_{n,t}$ が説明変数として用いられる。

(4) カルマンフィルタを用いた時変係数型波浪予測式

代表波高 H を予測するための説明変数を z_i として、波高予測式を次式で与える。

$$\log_{10} H = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i z_i + \varepsilon \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 a_i は未知係数、 ε は予測誤差で平均 0、分散 σ^2 の正規白色雑音であると仮定する。なお、代表波高 H を対数変換して予測式を作成したのは、式 (15) の右辺は説明変数の線形結合で表現されており、中心極限定理により、正規分布に近い分布を示すと考えられ、また、代表波高 H は対数正規分布あるいはワイブル分布に近い分布であることを考慮したものである。ここで、 $y_n = \log_{10} H$ 、 $\mathbf{x}_n = (a_0, a_1, \dots, a_N)^t$ 、 $\mathbf{H}_n = (1, z_1, z_2, \dots, z_N)$ 、 $\omega_n = \varepsilon$ と置くと、式 (15) は次式で表される。

$$y_n = \mathbf{H}_n \mathbf{x}_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \dots\dots\dots (16)$$

また、波高予測式 (15) 中の係数 a_i が時間的に緩やかに変化するとすれば、

$$\Delta^k \mathbf{x}_n = \mathbf{v}_n \quad (\text{システム方程式}) \dots\dots\dots (17)$$

で表される。ここに、 $\mathbf{v}_n$ は平均 0、分散共分散行列 $\mathbf{Q}$ に従う正規白色雑音である。

ここでは、時間差分オペレータには 1 次の差分オペレータを用いた。また、トレードオフパラメータ σ_b^2 / σ_w^2 は、橋本ら (1995) の検討結果より $= 10^{-10}$ とした。

3. 気象・海象データ解析

(1) 気象データ

統計的波浪予測モデルを検討するため、1994 年～1998 年までの ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts) の気象データを利用した。対象範囲は、115°E～170°E、15°N～62.5°N で、図-2 に示す範囲である。今回の検討では、気圧データを用いて予測精度を検討すると併せて風速データを用いて同様の検討を行った。ただし、気圧データはスカラー量で与えられるのに対して、風速データは u, v 2 成分のベクトル量であり、取り扱いがやや複雑である。そこでここでは、図-3 に示すように、各格子点と予測対象地点とを結ぶ大圏コースに沿う風速成分を用い、気圧データと同様にスカラー量として計算した。

(2) 海象データ

本研究では、NOWPHAS 波浪観測データの内、現在、長周期波の発生が問題となっている志布志港を対象として、長周期波の予測を行った。ここでは特に周期 20 秒以上の長周期波を対象として 1994～1998 年の全波浪観測データをスペクトル解析し、周期 20 秒以上のスペクトル成分を抽出して解析に利用した。図-4 は志布志港における有義波と長周期波の時系列図である。

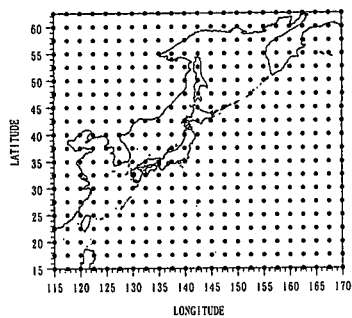


図-2 ECMWF の計算点

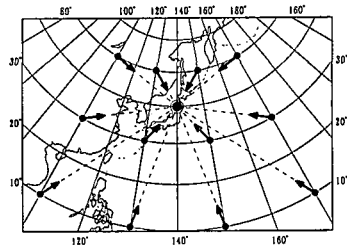


図-3 大圏コースを通る計算点と対象点の結び方

(3) トレンド成分の除去

統計的波浪予測モデルの作成に際しては、モデルと観測値とのバイアスを小さくするため、事前に気象データや波浪データに含まれるトレンドを除去する必要がある。ここでは約7日分と約14日分の移動平均値と同程度のトレンドが分離できるようにカルマンゲインを調整し、トレンド成分が除去されたそれぞれ2種類のデータに対して長周期波の予測を行い、精度を比較した。

(4) 相互相関解析

本研究で用いたカルマンフィルタは、線形回帰式によって波浪を統計的に予測する方法である。回帰式を作成する際の基礎となる量は、目的変数と説明変数間の相互相関係数である。そこでまず、志布志港の長周期波成分と各格子点上の気圧と風速データの相互相関解析を実施し、気象変動と長周期波の発生・発達の時空間的な相関を検討した。図-5(1)(2)は、約14日間のトレンド成分除去後の気圧と風速の相互相関解析の結果を影響線図

として整理した一例である。図-5(1)は、気圧の影響線図で、図中の点線は長周期波成分に対して負の相関を示す領域で、この領域で気圧が低い場合に長周期波が大きくなることを示している。逆に、実線は長周期波成分に対して正の相関を示す領域で、この領域で気圧が高い場合に長周期波が大きくなることを示している。例えば48時間前の気圧と長周期波高の相互相関の場合、負の相関の最も大きいところが20°N付近に見られる。これは、志布志で長周期波が発生する48時間前にその一帯で気圧が低くなっている傾向があることを示している。すなわち、この一帯に低気圧があると、48時間後に志布志港で長周期波が発生する可能性が高いと言える。一方、図-5(2)に示す風速の影響線図の場合、傾向の違いはあるものの、どの時刻においても志布志を中心にして正の相関の影響線が放射状に広がっているのが特徴である。特に24時間前の影響線図に明瞭に現れているが、東方向及び南東方向からの風が高い相関を示しており、志布志での長周期波発生要因として注目すべき結果を示している。

(5) 主成分分析

図-5では気圧と風速のそれぞれで影響線図のパターンは異なるものの、志布志港での長周期波の発生要因と考えられる気象データの影響範囲を確認することができた。そこで、これらの影響線図を参考にしながら、長周期波予測に用いる気象データ範囲を図-6に示す2ケース設定した。ケース1では格子間隔を5.0°とし、総計算点数は49個である。ケース2では格子間隔を2.5°とし、総計算点数は247個である。ケース2は、ケース1の範囲を15°東に広げ更に格子間隔を1/2倍したものである。なお、使用する気圧と風速データは共に約7日と約14日のトレンド成分を除去した2ケースで検討しており、上記の2種類のデータ範囲とあわせて、計4ケースの異なる条件で予測精度の検討を行った。

図-6(1)、(2)のような格子点上の気象の時系列データをそのまま説明変数として用いれば、それぞれのデータが相互に高い相関を有し、統計的な意味で妥当な予測式を立てることができない。そこで、前述のように気象の時空間データを主成分分析してそれぞれ直交する独立な成分に変換・分離し、その結果を用いて波浪予測を行う。カルマンフィルタによる時変係数型予測式では、主成分分析で算出された主成分の内、気圧変動と風速変動への寄与率が高い主成分から順に採用する。今回の検討では、図-6(1)、(2)に示す範囲の2日分の気象に関する時空間変動を主成分分析し、全変動の約95%を説明できる主成分を波浪予測式の説明変数として採用した。

気圧と風速のそれぞれを主成分分析した結果、全変動の約95%を説明できる気象データの主成分数は、気圧の方が長周期成分4個、短周期成分59個であるのに対し、

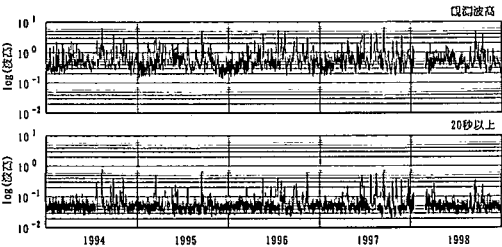


図-4 海象データ (上：観測有義波高，下：長周期波高)

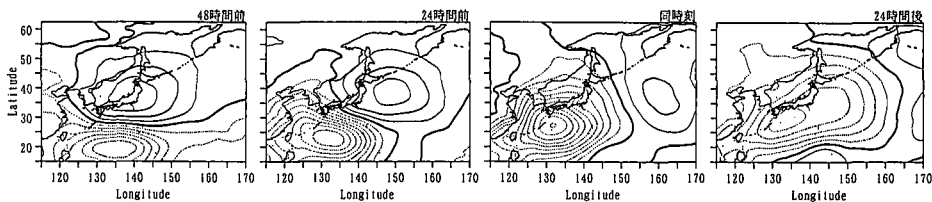


図-5(1) 気圧データと長周期波の相互相関解析結果の影響線図

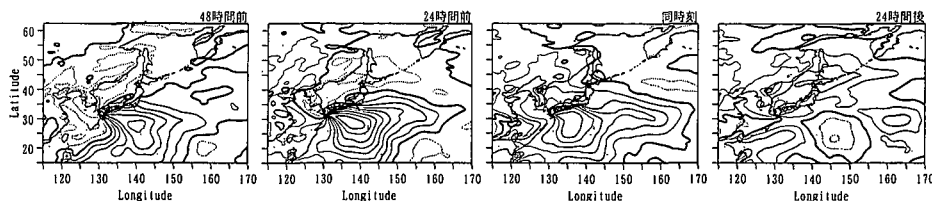


図-5(2) 風速データと長周期波の相互相関解析結果の影響線図

風速の場合は、長周期成分 22 個、短周期成分 292 個となった。このことから、長周期波の統計的予測モデルの入力となる気象データは、気圧の方が風速よりもより少ない主成分数を用いて、同程度の精度の統計的長周期波予測モデルを作成可能であることが分かった。この結果は、一般に風速よりも気圧の方が入手しやすいパラメータであることから、波浪予測モデルを構築する場合には都合がよい。そこで、以下の検討では、入力データとして気圧データを用いて長周期波の予測精度の検討を行った結果のみを述べることにする。

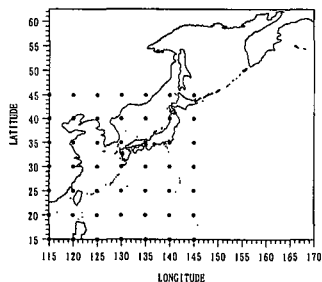


図-6(1) 気象データ読みとり地点 (ケース 1)

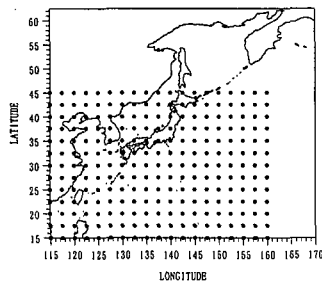


図-6(2) 気象データ読みとり地点 (ケース 2)

4. 予測精度の検討

1997～1998 年の 2 年間の観測波高と予測波高の相関解析を行い、予測精度の検討を行った。なお、長周期波の予測精度を検証する際の比較基準として、有義波高の予測も併せて行った。

図-7 は、1997 年 7 月の有義波と長周期波の 120 時間先の予測結果の一例を時系列図で示したものである。これを見ると有義波と長周期波共に全体的に精度よく予測できることが分かる。

図-8 は 120 時間先を予測した 2 年分の解析結果を散布図で示したものである。この計算は約 7 日分のトレンド成分を除去し、図-6(2) に示す気圧データを用いて計

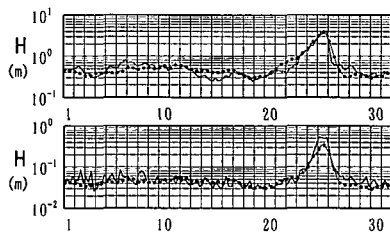


図-7 予測結果時系列の比較 (上: 有義波, 下: 長周期波)

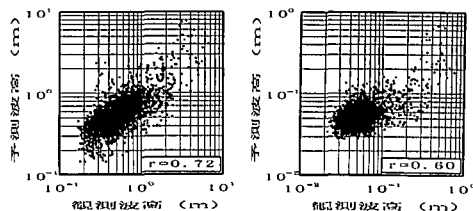
図-8 予測波高と観測波高の相関解析結果
(ケース 2, 左: 有義波, 右: 長周期波)

表-1 長周期波の発生した期間と気象要因

長周期波発生日	気象要因	長周期波発生日	気象要因
1996年		1997年	
05/19~05/20	台風9603号	08/17~08/19	台風9713号
07/09~07/10		09/13~09/18	台風9719号
07/17~07/17	台風9606号	10/20~10/22	台風9724号
07/27~08/01	台風9609号	11/04~11/07	台風9725号
08/13~08/15	台風9612号	1998年	
09/20~09/21	台風9617号	02/23~02/24	低気圧
09/29~10/01	台風9621号	04/29~05/01	低気圧
11/09~11/13	台風9624号	08/28~08/28	低気圧
1997年		09/15~09/16	台風9805号
04/22~04/23	台風9701号	09/18~09/18	台風9806号・
06/18~06/21	台風9707号	09/20~09/23	台風9807号
06/27~06/30	台風9708号	09/27~09/27	低気圧
07/23~07/28	台風9709号	10/15~10/19	台風9810号
08/06~08/08	台風9710号	11/07~11/07	低気圧
08/10~08/12	台風9713号		

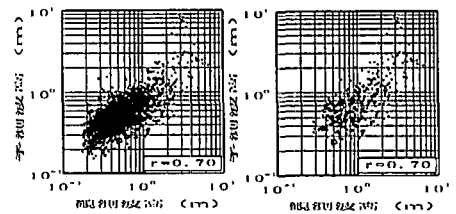
算した例である。相関係数は有義波高で0.72、長周期波高では0.60であった。相関係数から判断すると、有義波については過去の検討結果とほぼ同様の結果であったものの、長周期波は有義波に比べて低い精度であった。

図-8の結果と図-7の例を比べると、図-8の長周期波に対する相関係数の低さは、顕著な長周期波が発生していない全ての期間のデータを含めて解析したためであると考えられる。そこで、表-1に示す志布志港における長周期波の発生状況を参考に、長周期波発生期間を含む前後数日間のデータを用いて再解析を行った。

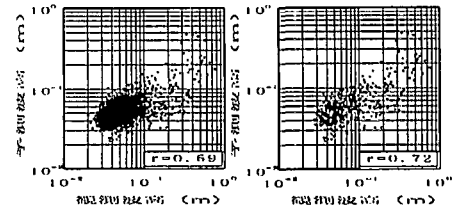
図-9は約14日間のトレンド成分を除去し、それぞれ図-6(1), (2)に示す気圧データを用いて120時間先予測を再計算した例である。図-9の左図は2年分の全データを用いた計算結果で、右図は長周期波が発生したと考えられる期間を含む数日間のデータを用いて再解析した結果である。図-9に示すように、有義波についてはデータ期間の相違による相関係数の変化は見られないが、長周期波については、それぞれの計算条件によらず全ての計算条件で相関係数が向上し、有義波の相関係数と同程度まで向上した。すなわち、本研究で用いた統計的予測手法は、長周期波のエネルギーレベルが低い場合には高精度の予測はできないが、長周期波が顕著な場合には実用的に予測可能であることを示している。

5. 終わりに

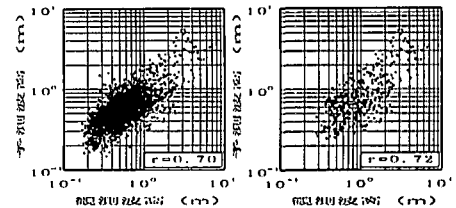
主成分分析とカルマンフィルタを組み合わせた統計的予測モデルにより、周期20秒以上の長周期波の予測可能性を検討した。その結果、特に高波浪時において波高は



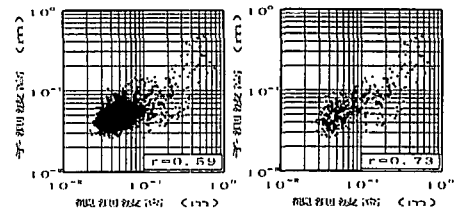
(1) 有義波高 (ケース1)



(2) 長周期波高 (ケース1)



(3) 有義波高 (ケース2)



(4) 長周期波高 (ケース2)

図-9 全期間の相関解析結果(左)と長周期波発生期間の相関解析結果

やや過小評価されるものの、荷役に影響を及ぼすと考えられる顕著な長周期波発生時については実用的に予測可能であることが分かった。

参考文献

- 橋本典明ら (1995): 主成分分析とカルマンフィルタを用いた統計的波浪予測手法の適用生について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 336-340.