

沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測

青野利夫*・後藤智明**・佐藤典之***

1. はじめに

港湾構造物の施工・維持管理あるいは航路の安全確保を考慮する上で、的確な波浪予測情報が必要不可欠である。代表的な波浪予測モデルとしては、有義波法やスペクトル法などの波浪推算モデル、重回帰モデルなどの統計モデル、また波浪推算モデルと統計モデルを組み合わせた物理因子重回帰モデルなどがある。なかでも、観測波浪値、観測風速値、気圧分布値を説明変数とする重回帰モデル〔須田・湯沢 (1983), 小舟ら (1987)〕は、現地で比較的簡便に運用できるシステムとして用いられている。しかしながら、気圧分布データの作成に人手がかかることや、予測地点の現時刻の波高を説明変数としているため高波浪の立ち上がりが真値である観測波浪に対して遅れるといった問題があった。物理因子重回帰モデルは、この問題を解決しているが、気象データの作成と入力にかかる労力が重回帰モデルよりも大きく、現地で簡便に行うにはまだ問題がある。

本研究では、これらの課題を克服するための初歩的な研究として、予測対象地点を除いた日本沿岸において取得された観測波浪データだけを説明変数とする重回帰波浪予測モデルに関して検討した。これは、日本近傍で通常見られるような大気現象の南西から北東方向への移動と類似の傾向が波浪についても想定できるという考えが基礎となっている。したがって、各観測地点の波高値の経時変化から地点間の平均的な出現時刻のずれ（出現時間差）がわかれば、この出現時間差を重回帰モデルに取り入れることにより、気象データを用いずに比較的良好な波浪予測が可能であると考えられる。また、このモデルを用いることにより、天気図から気圧値を読みとる作業がなくなり、全国の波浪データを集中管理するシステムを構築すれば、半自動的な波浪予測システムの運用が可能となる。

2. 沿岸観測波浪の相互相関解析

高波浪の出現特性が、大気現象の南西から北東方向への移動と類似した傾向にあれば、太平洋側と日本海側でそれぞれ波浪観測地点間相互の波高変化に相関が存在する。したがって、沿岸波浪の出現時間差が算定できれば、この出現時間差を重回帰モデルに取り入れるることにより予測精度を向上させることができる。そこで、有義波高について波浪観測地点間で相互相関解析を行い、地点間の出現時間差を求めることにした。

(1) 相互相関解析方法

日本沿岸の34地点で2時間ごとに観測された有義波高を用い、相互相関解析を行った。解析対象地点を図1に、各地点の波浪データの得られている期間を表1に示す。解析対象期間は、全地点でほぼ共通にデータが得られている1981年～1990年の10年間とした。なお、高波浪の出現時間差を的確にとらえるため、解析には、各観測地点の有義波高データのうち10年間の平均値より大きい高波浪時のデータを用いた。

相互相関解析は、2地点間の時間差を0時間から2時

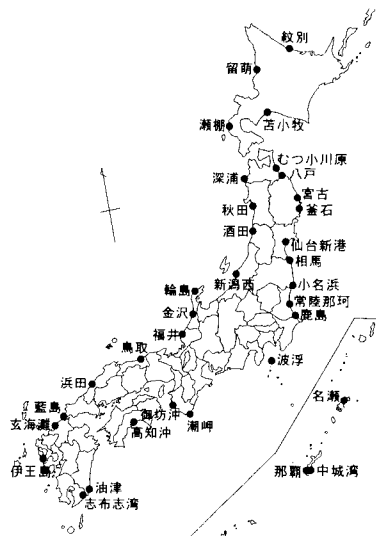


図1 波浪観測地点

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 海洋エネルギー利用研究室

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 海洋エネルギー利用研究室長

*** 正会員 工修 東亜建設工業(株) 土木本部 設計部

表一 波浪観測地点と観測期間

日本海側			太平洋側		
紋別	別	1975/1～1991/12	苫小牧	牧	1970/1～1991/12
留萌	萌	1970/1～1991/12	むつ小川原	原	1974/4～1991/12
瀬棚	棚	1980/1～1991/12	八戸	戸	1971/3～1991/12
深浦	浦	1979/12～1991/12	宮古	古	1981/7～1991/12
秋田	田	1981/10～1991/12	釜石	石	1978/3～1991/12
酒田	田	1970/1～1991/12	仙台南港	港	1979/1～1991/12
新潟	西	1982/9～1991/12	相馬	馬	1982/8～1991/12
輪島	島	1979/1～1991/12	小名浜	浜	1980/1～1991/12
金沢	沢	1970/1～1991/12	常陸那珂	珂	1979/12～1991/12
福井	井	1980/9～1991/12	鹿島	島	1972/4～1991/12
鳥取	取	1979/9～1991/12	波浮	浮	1973/4～1991/12
浜田	田	1974/3～1991/12	潮岬	岬	1970/8～1991/12
藍島	島	1975/4～1991/12	御坊沖	沖	1983/12～1991/12
玄海灘	灘	1980/8～1991/12	高知沖	沖	1980/9～1989/12
伊王島	島	1974/12～1991/12	油津	津	1975/3～1990/12
名瀬	瀬	1977/3～1991/12	志布志湾	湾	1980/4～1991/12
那覇	覇	1973/7～1991/12	中城湾	湾	1973/11～1991/12

間ごとに順に増やし、おのおのの時間差に対応する相関係数を計算することにより行った。この方法によれば、最大値が1となる正規化された相互相関係数が求められ、対象地点間での相関の比較も可能となる。

(2) 相互相関解析結果

相互相関解析は、34 地点全てを対象とし 2 地点間の総当たりで月ごとに行った。このうち、深浦と日本海側の地点との 4 月の相互相関を図-2 に、むつ小川原と太平洋側の地点との 4 月の相互相関を図-3 に示す。図の横軸が対象地点と比較地点との時間差、縦軸が相関係数を表す。なお、日本海側の地点と太平洋側の地点との相互

相関解析も行ったが、ほとんど相関が認められなかったためここには掲載していない。図-2 を見ると、明確な相関係数のピークが現れており、平均的にみるとある出現時間差を持って波浪が伝達していることがわかる。しかも、南西から北東に向かって出現時間差が小さくなっており、高波浪の出現が気象現象と同様に南西から北東に向かって移動していくことが確認できる。一方、図-3 では明確なピークが現れていない。これは、日本海側の海岸が南西から北東への気象現象の移動方向に面しているの 비해、太平洋側の海岸が移動方向の反対側に面しているため、南西から北東へ連続的に移動するような高波浪のケースが少ないためである。

全地点の相互相関解析結果をもとに、日本沿岸での平均的な波浪の移動速度を 1 月・4 月・7 月・10 月について求めたものを図-4～図-7 に示す。図中の数字は、日本海側、太平洋側それぞれについて ± 0 を基準とした波浪の出現時間差を時間単位で示したものである。日本海側の時間差は九州から北海道までがほぼ 1 日で、冬期が長く、春期・夏期が短いのにに対し、太平洋側では夏期を除いて 1 日半程度とほぼ同じである。なお、太平洋側の夏期に関しては、地点間の相関が小さく、出現時間差の精度が他のものに比べ多少劣っている可能性がある。

3. 重回帰波浪予測モデルの構築

(1) 重回帰波浪予測モデルの構築方法

地点間の出現時間差を考慮した重回帰式は次式で表される。

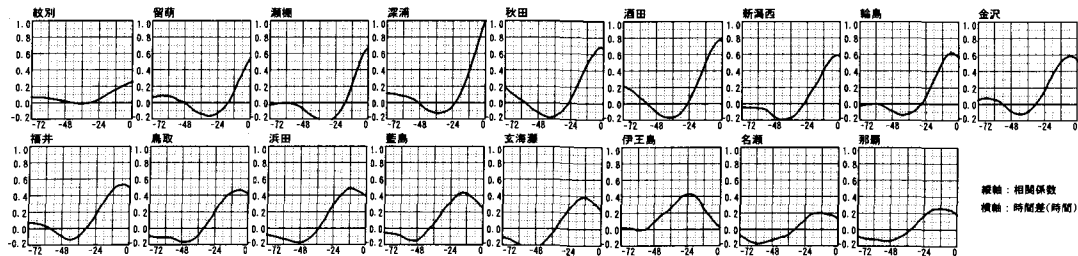


図-2 深浦と日本海側の波浪観測地点との 4 月の相互相関

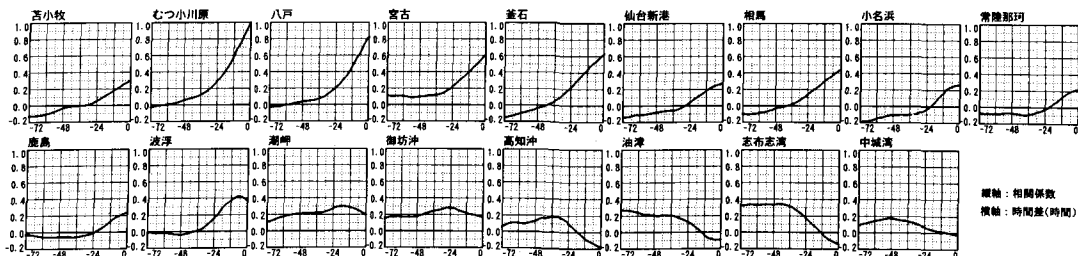


図-3 むつ小川原と太平洋側の波浪観測地点との 4 月の相互相関



図-4 1月の波浪出現時間差

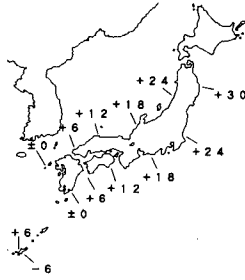


図-5 4月の波浪出現時間差

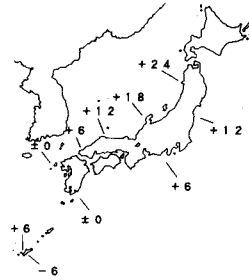


図-6 7月の波浪出現時間差

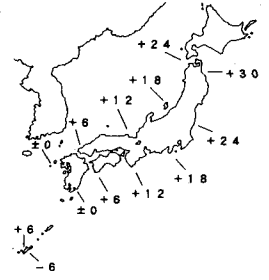


図-7 10月の波浪出現時間差

$$H(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n \{a_i H_i(t - \Delta t_i)\} + \varepsilon(t) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $H(t)$ は t 時刻の予測波高 (目的変数)、 $H_i(t - \Delta t_i)$ は t 時刻より Δt_i 時間前の i 地点の波高 (説明変数)、 a_0, a_i は重回帰係数、 $\varepsilon(t)$ は残差、 n は説明変数の数である。(1) 式中の重回帰係数は、連立1次方程式

$$\begin{bmatrix} \sum H_{1k} & \cdots & \sum H_{nk} \\ \sum H_{1k}^2 & \cdots & \sum H_{1k} H_{nk} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum H_{nk} & \sum H_{nk} H_{1k} & \cdots & \sum H_{nk}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum H_k \\ \sum H_{1k} H_k \\ \vdots \\ \sum H_{nk} H_k \end{bmatrix} \quad (k=1, 2, \cdots, N) \quad \cdots \cdots (2)$$

の解として得られる。ここに、 N はデータ数である。

重回帰モデルの場合には、モデルの予測精度は的確な説明変数の選択に左右されるが、説明変数の数とその組み合わせによって様々なモデルが考えられるため、一意的に決めることは難しい。説明変数の選択にはいくつかの方法があるが、一般には、AIC 最小化法が用いられる場合が多い。AIC 最小化法を用いれば、客観的な変数選択が可能になるが、今回説明変数として用いる波浪データには欠測が多く、組み合わせによってデータ数 N が大きく変動するため、説明変数として同一サンプル数のデータが必要となる AIC による変数選択は困難である。そこで、予測対象地点に近い地点の方が出現時間差が小さく相関が高いことは相互相関解析からも明らかであるので、本研究では、予測時間以上の出現時間差を持つ地点のうち相関係数の高い地点から順に数点を選ぶ方法を採用した。説明変数の数は、必要以上に用いるとモデルの安定性を欠くことから、1 ないし 2 とした。

図-8～図-10 は、深浦の1986年1月の有義波高の観測値(細線)と、1986年を除く1981年～1990年の9年分の1月のデータで作成した3種類の重回帰モデルによる6時間後予測値(太線)との比較である。ここで、予測値の推定精度を判定するためには何らかの基準が必要となる。そこで、予測値が、

$$\text{観測値} - 0.3 \text{ m} \leq \text{予測値} \leq \text{観測値} + 0.3 \text{ m}$$

(観測値 $\leq 1 \text{ m}$ の場合)

$$\text{観測値} \times 0.7 \leq \text{予測値} \leq \text{観測値} \times 1.3$$

(観測値 $> 1 \text{ m}$ の場合)

の範囲にある場合を的中とし、予測値に占める的中の割合(的中率)を計算して推定精度の基準とした。各図の右側の図が予測値と観測値の対応を示しており、破線の内部が的中範囲を示す。

図-8 は、出現時間差を無視し、相関係数の最も高い秋田と酒田の2地点を説明変数として用いた場合の予測結果である。的中率と相関係数は高いが、2地点の本来の出現時間差はともに0であるので、高波浪の立ち上がりが真値である観測波高に比べちょうど6時間だけずれているのがわかる。これに対し、図-9 は、出現時間差が6時間である輪島と金沢を説明変数とした場合の予測結果である。図-8と比べて、的中率は下がるものの高波浪の立ち上がりのずれは生じていない。

以上、2つのモデルによる予測結果をふまえ、本研究では、以下に示す2段階の予測を行うこととした。まず、

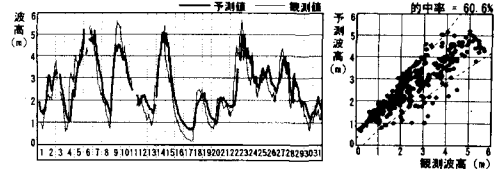


図-8 有義波高予測結果 (1月, 1986年)

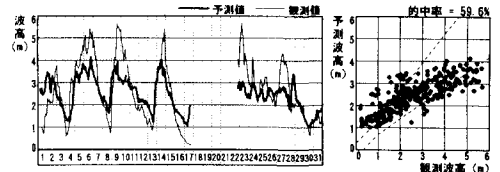


図-9 有義波高予測結果 (1月, 1986年)

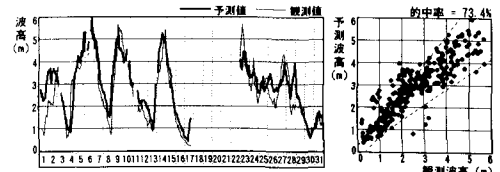


図-10 2段階予測による有義波高予測結果 (1月, 1986年)

予測時間以上の出現時間差を持つ地点のうち相関係数の高い順に1ないし2地点を選び、(1)式に示す重回帰モデルを作成する(第1段階)。次に、(1)式中の残差 $\varepsilon(t)$ を目的変数とし、予測時間より出現時間差の少ない地点を説明変数として、(3)式により重回帰モデルを作成する(第2段階)。

$$\varepsilon(t) = b_0 + \sum_{j=1}^m \{b_j H_j(t - \Delta t_j)\} + \delta(t) \quad \cdots \cdots (3)$$

表-2 深浦の予測波高の的中率

	6時間後	12時間後	24時間後	48時間後
1月	73.4%	63.9%	55.9%	40.0%
4月	68.5%	59.5%	57.2%	46.1%
7月	84.0%	83.0%	80.3%	54.6%
10月	57.6%	39.5%	35.6%	28.9%

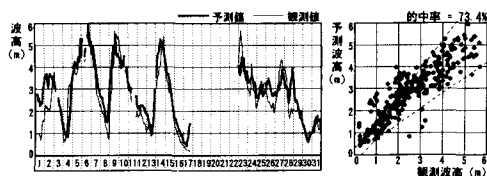


図-11 深浦の6時間後の有義波高予測結果(1月, 1986年)

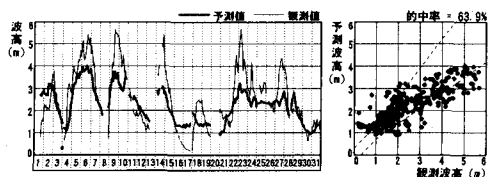


図-12 深浦の12時間後の有義波高予測結果(1月, 1986年)

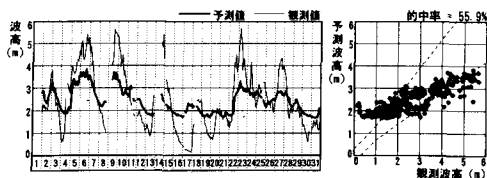


図-13 深浦の24時間後の有義波高予測結果(1月, 1986年)

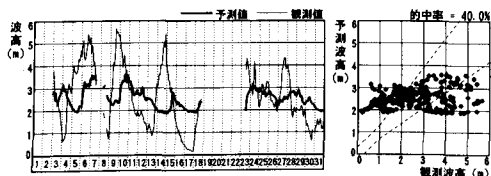


図-14 深浦の48時間後の有義波高予測結果(1月, 1986年)

ここに、 b_0, b_j は重回帰係数、 $\delta(t)$ は残差、 m は説明変数の数である。第2段階における変数選択には、予測時間より出現時間差の少ない地点の中から相関係数の低い順に1ないし2地点を順にモデルに組み込み、高波浪の立ち上がりのずれがなくの中率が最も高くなる地点を取る方法を採用した。2段階予測モデルによる予測結果を図-10に示す。他の2つの予測モデルと比べると、的中率が最も高く、立ち上がりのずれもほとんど生じていな

表-3 むつ小川原の予測波高の的中率

	6時間後	12時間後	24時間後	48時間後
1月	67.3%	56.5%	47.2%	41.0%
4月	46.9%	54.0%	55.3%	44.5%
7月	61.0%	60.7%	54.5%	53.2%
10月	68.3%	43.6%	41.9%	39.6%

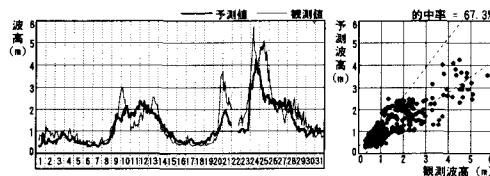


図-15 むつ小川原の6時間後の有義波高予測結果(1月, 1989年)

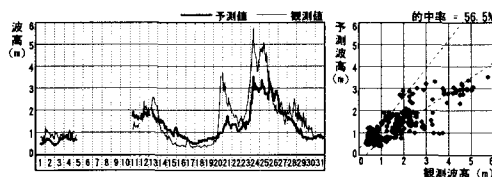


図-16 むつ小川原の12時間後の有義波高予測結果(1月, 1989年)

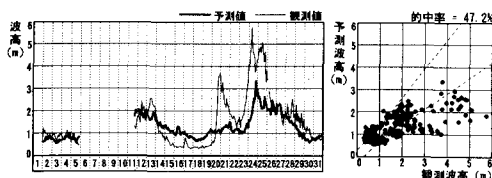


図-17 むつ小川原の24時間後の有義波高予測結果(1月, 1989年)

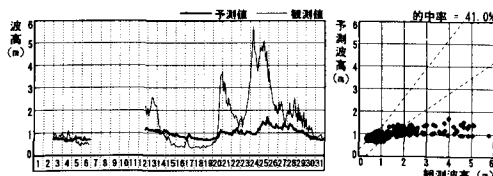


図-18 むつ小川原の48時間後の有義波高予測結果(1月, 1989年)

表-4 深浦の1月の重回帰係数

6時間後予測				12時間後予測			
地点名	係数	時間差	段階	地点名	係数	時間差	段階
秋田	0.371	6	2	輪島	0.290	12	2
輪島	0.588	6	1	浜田	0.330	12	1
金沢	0.248	6	1	藍島	0.335	16	1
定数	-0.208		1+2	定数	0.495		1+2
24時間後予測				48時間後予測			
地点名	係数	時間差	段階	地点名	係数	時間差	段階
浜田	0.007	24	2	藍島	0.374	48	2
藍島	0.232	24	2	玄海灘	-0.141	48	2
伊王島	0.774	24	1	伊王島	0.624	48	1
定数	1.490		1+2	定数	1.720		1+2

表-5 むつ小川原の1月の重回帰係数

6時間後予測				12時間後予測			
地点名	係数	時間差	段階	地点名	係数	時間差	段階
八戸	0.262	6	2	釜石	0.234	12	2
相馬	0.412	6	1	常陸那珂	0.578	12	1
小名浜	0.502	8	1	潮岬	0.093	12	1
定数	-0.198		1+2	定数	-0.036		1+2
24時間後予測				48時間後予測			
地点名	係数	時間差	段階	地点名	係数	時間差	段階
常陸那珂	0.542	24	2	常陸那珂	0.214	48	2
高知沖	0.290	24	1	志布志湾	0.324	48	1
志布志湾	0.089	24	1	油津	0.018	48	1
定数	0.105		1+2	定数	0.403		1+2

い。

(2) 2段階重回帰波浪予測モデルによる予測結果

2段階重回帰波浪予測モデルにより、深浦・むつ小川原の2地点の波浪予測を行い、モデルの評価を行った。重回帰係数の算定に用いた波浪データは、1981年～1990年の10年分のデータのうち、予測結果を評価する年度を除いた9年分である。予測モデルは、1地点につき、1月・4月・7月・10月それぞれに対し6・12・24・48時間後予測の計16ケースを作成した。全ケースの的中率を示したものが表-2と表-3である。深浦では、7月の的中率が高く10月が低い。これに対し、むつ小川原ではどの月もほぼ同じの中率である。これは、波高の平均値が日本海側では夏が低く冬が高いという季節変動が明確に現れるのに対し、太平洋側では明確に現れないことによるものと思われる。

予測結果のうち、1月の有義波高の予測結果を図-11～図-18に、予測に用いた目的変数と重回帰係数を表-4と表-5に示す。2地点とも、予測時間に相当する出現時間差を持った波浪観測地点があるため、24時間後までの予測では立ち上がりのずれがなく、実用上問題のない予測精度を確保できていることがわかる。しかし、予測時間が長くなるに従って目的変数と説明変数の相関が低くなるため、予測精度は低下している。特に、48時間後予測は、予測対象地点と48時間の出現時間差を持った波浪観測地点が無いため、予測が困難である。

なお、本論文には掲載していないが、有義周期についても同様に予測を行っており、有義波高と同程度以上の

精度の予測が可能であることを確認している。

4. おわりに

従来の重回帰波浪予測モデルのようにデータ入力に手間のかかる気圧や風速のデータを用いずに、予測対象地点を除いた観測波浪データだけを説明変数として、24時間先までの予測が可能な重回帰波浪予測モデルを開発した。本モデルは、地点間の高波浪の出現時間差を考慮して説明変数の選択を行っているため、従来の重回帰波浪予測モデルで問題となっていた高波浪の立ち上がりのずれの問題を解消している。さらに、第2段階で、出現時間差の小さい地点を説明変数として観測値と予測値の間の残差を予測しているため、全体としての予測の精度が向上している。

一方、説明変数の出現時間差が大きくなるに従って目的変数と説明変数の相関が低くなるため、長期に予測では予測精度が低下する。また、当然ながら南西に位置する地点の予測を行う場合には有意な出現時間差を持った波浪観測地点がないため、本方法での波浪予測が難しい。

参考文献

- 小舟浩治・橋本典明・亀山 豊・久高将信 (1987): 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.
- 坂本慶行・石黒真木夫・北川源四郎 (1983): 情報量統計学, 共立出版株式会社, pp. 138-142.
- 須田 熙・湯沢 昭 (1983): 波浪予測に基づく外海シーパ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.