

重回帰式を用いた波浪予測手法の適用について

小舟浩治*・橋本典明**・亀山 豊***・久高将信****

1. ま え が き

港湾工事や荷役の安全確保、最適な施工管理、あるいは、航行船舶の安全確保などのためには的確な波浪予測が不可欠である。波浪予測手法としては、波浪推算法を用いる決定論的方法と、統計モデルを用いる確率論的な方法がある。この内、波浪推算法を用いる方法は、多くの研究によりその適用性が検討されているが、予測を実施するにあたっては、気象学等の専門的知識を要し、多くの時間と費用を要することが一般である。一方、統計モデルを用いる方法は、一般に、簡単な回帰式を用いて予測する方法であり、特別な専門的知識を必要とせず、容易に波浪予測を実施できる利点がある。また、用いる統計モデルによっては、対象とする海域、期間によって、波浪推算法と同程度の推定精度があることも報告されている。しかしながら、統計モデルを用いる方法は、これまで、適用対象地点での予測値の数値的な適合度の検討は行われているものの、必ずしも、その一般的な適用性は明らかにされていない。したがって、これらの方法を実用化するためには、これらの方法を様々な海域、期間に適用し、統計モデルを用いた予測手法の適用性、適用上の問題点等を明確にしておく必要がある。

統計モデルを用いて限られた個数の観測値から意味のある情報を引き出そうとする場合には、それぞれの対象、目的に応じて適切な統計モデルが利用されることが前提となっている。波浪予測に適用可能な統計モデルとしても、重回帰モデル、多変量時系列モデルなど、種々の統計モデルが考えられるが、適用対象によって必要とされる予測精度も様々であり、また、どのような統計モデルが適切であるのかも明確ではない。したがって、これらについても詳細に検討する必要があるが、ここではその前段として、須田ら¹⁾によって検討され、取り扱いが比較的簡単な重回帰モデルを用いた波浪予測手法を対象として、推定精度や適用性等について検討した結果を報告する。

2. 重回帰型波浪予測式の作成

地上天気図をもとに、わが国を含む広い範囲で作成された気圧読み取りデータ、および日本沿岸の主要港湾の波浪観測データ、風データ等を4年分(1980年～1983年)収集し、重回帰式による波浪予測を実施した。重回帰型波浪予測式の作成に際しては、1980年～1982年の3年分のデータを用い、目的変数として、図-1に示す予測対象地点の予測時刻における有義波高を、説明変数として予測対象地点の風速、有義波高のそれぞれの予測対象時刻の12時間前、24時間前の値、および図-1に示す気圧読み取り地点での予測対象時刻、12時間前、24時間前までのデータを用いて、次のような予測式を作成した。

$$\ln \hat{x}_i = a_0 + \sum_{i=2}^3 (a_i \ln x_i + b_i y_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{32} c_{ij} z_{ij} + \varepsilon \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $\hat{x}_i$: 予測有義波高、 x_i : 予測対象地点の時刻 i での有義波高、 y_i : 予測対象地点の時刻 i での風速、 z_{ij} : 気圧読み取り地点 j の時刻 i での気圧値であり、 $i = 1, 2, 3$ はそれぞれ予測対象時刻、12時間前、24時間前を表している。また、 a_i , b_i , c_{ij} は回帰係数であり ε は残差である。なお、予測有義波高 $\hat{x}_i$ 、および、予測対象地点の時刻 i での有義波高 x_i を対数変換しているのは、有義波高は、一般に、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

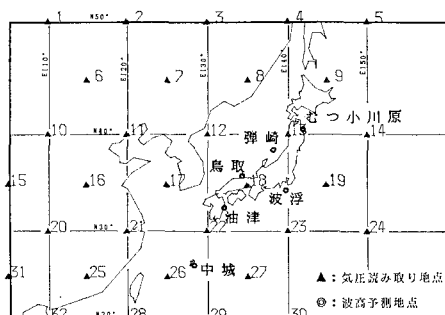


図-1 調査対象地点および気圧読み取り地点

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海象観測研究室長
 ** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官
 *** 運輸省港湾技術研究所 海象観測研究室
 **** 正会員 (株)エコー第一技術部 数理解析課

る。

式(1)では用いたデータのすべてを説明変数として記述しているが、与えられた説明変数のすべてが目的変数の予測に重要であるとは限らない。また、必要以上に多くの説明変数を用いたモデルは安定性を失う可能性がある。このため、何らかの客観的な規準によって変数選択を行い、より適切なモデルを作成する必要がある。

統計モデルの変数選択方法としては、赤池²⁾により提案された AIC 最小化法がある。このときに用いられる AIC (赤池の情報量規準) は次式で表される。

$$AIC = -2 \times (\text{モデルの最大対数尤数}) \\ + 2 \times (\text{モデルの自由パラメータ数}) \dots (2)$$

重回帰式の場合には、AIC は次式となる³⁾。

$$AIC = n(\ln 2\pi + 1) + n \ln \hat{\sigma}^2 \\ + 2(m+1) \dots (3)$$

ここに、 n : データのサンプル数、 $\hat{\sigma}^2$: 残差分散の推定値、 m : 説明変数の数である。

説明変数の選択方法としては、この他にも種々の方法が提案されている。しかしながら、重回帰式を対象とする場合、説明変数の組み合わせによっていろいろなモデルが考えられ、一般には、一意的に最適な説明変数を決め難いことが多い。例えば、上記の場合には²⁾通りの説明変数の組み合わせがあり、この中から最適な説明変数を選択することは一般に困難である。したがって、ここでは、便宜的に、要因増加法と AIC を組み合わせることにより、以下の方法により説明変数の選択を行った。

- ① 目的変数と説明変数 1 つの組み合わせの内、最小 AIC を示す説明変数を 1 つ選択する。
- ② ① で得られた説明変数と、残りの説明変数の内の 1 つの組み合わせの内、さらに AIC が小さくなる説明変数の内で最小 AIC を示す説明変数を 1 つ選択する。
- ③ 逐次上記の処理を繰り返し、AIC が減少した後、増大するか、あるいは AIC の減少率がある規準以下になったところで処理をやめ、それまでに選択された説明変数を用いて重回帰型波浪予測式を作成する。

AIC は適用するモデルが真の分布を表現し得るという仮定のもとで導かれたものであり、また、要因増加法はいったん説明変数として選択されれば、取り除かれることがないという点において、上記の変数選択が必ずしも最良の結果を生じる必然性はない。これについても別途検討する必要があるが、ここでの変数選択はすべて上記の方法により行うこととした。

なお、重回帰型波浪予測式は図-1 の 6 地点について各季節別に作成し、重回帰式を用いた波浪予測手法の海域別、期間別の一般的な適用性について検討した。また、式(1)では有義波高を対数変換して用いているが、有義波高をそのまま用いた場合についても、予測式を作成

し、両者の予測精度の相違を検討した。このほか、港湾工事の施工管理などでは、少なくとも 3 日先までの波浪予測値が必要なことを考慮し、あらかじめ 3 日先までの予想天気図が入手されている状況を想定して、気圧値のみを説明変数として予測式を作成し、予測精度の検討を行った。

3. 説明変数の選択と AIC

図-2 は波浮港を対象として重回帰型波浪予測式を作成した際の、説明変数の増加と AIC の関係を図示したものである。AIC は値そのものよりも AIC の差に意味があることから、図-2 中の各季節ごとの最小 AIC の値を 10 として相対的な値を示している。適切な統計モデルをデータにあてはめる場合、AIC は変数の増加とともに急速に減少し、最小値を示した後、勾配 2 程度で緩やかに増大するはずである。しかしながら、図-2 に見られるように、いずれの場合も説明変数が 5 個程度までは急速な減少が見られるものの、それ以上に説明変数を追加する場合にも、AIC は緩やかに減少し、明確な最小値を示さない。これは、多くの場合には、用いた統計モデルが適切でないことを意味しており、他にもっと良いモデルがある可能性を示しているものと思われる。なお、波浮港の秋季は、それぞれ他の季節に比べて、AIC の減少特性が異なっており、重回帰型波浪予測式の適合度が異なることを示している。

表-1 は波浮港を対象として、各季節ごとに説明変数の選択を行った結果を示したものである。表-1 に見られるように、いずれの季節も説明変数として予測対象時刻の 12 時間前の有義波高が最初に選択されており、24 時間前の有義波高は上位には選択されていない。また、予測対象地点の風速は春季を除いては表-1 に現われているが、季節により必ずしも有効な説明変数でないことが示されている。

図-3 は 2. で選択された気圧の説明変数の重回帰係数をもとに、むつ小川原港の予測有義波高に対する気圧分布の寄与パターンを図示したものである。実際に選択

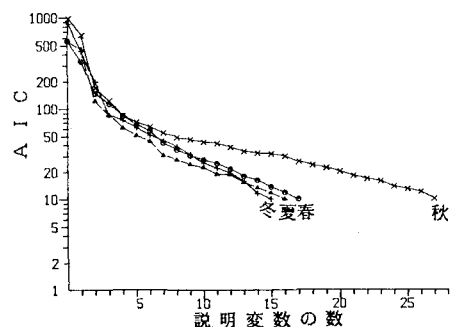


図-2 説明変数の選択と AIC の差

された気圧の説明変数は 図-3 中に黒丸で示す配置となっているが、選択された説明変数の重回帰係数の季節的な相違を検討するために、重回帰係数をもとに、便宜的にスプライン補間を行うことにより、寄与パターンを図示したものである。図-3 より、むつ小川原港の波高はむつ小川原港近海の波浪予測対象時刻の気圧による寄与が高く、各季節ごとに特徴的なパターンが現われていることがわかる。なお、すべての変数を説明変数として選択し、同様の処理を行なったが、この場合には気圧分布の寄与パターンの空間的変動がやや大きめに現われているほかは、ほぼ 図-3 と同様な傾向が現われており AIC により選択された説明変数は全変数の 1/3 以下であるにもかかわらず、データの持つ特徴を良くとらえていると言える。

4. 波浪予測結果

2. で作成した重回帰型波浪予測式を用いて波浪予測を実施した。波浪予測を実施するにあたっては、2. で用いたデータと重複しないように、1983 年を対象として実施し、実測有義波高と比較した。

図-4 は 図-1 に示す 6 地点の 2 月の波浪予測値と実

表-1 変数選択と AIC の差

個数	春 季		夏 季		秋 季		冬 季	
	変数名	AIC の差	変数名	AIC の差	変数名	AIC の差	変数名	AIC の差
1	H2	185.7	H2	333.2	H2	477.6	H2	231.8
2	P309	35.0	P123	35.8	P123	45.6	P218	114.2
3	P123	31.0	P319	24.5	P313	39.3	P313	10.8
4	P316	17.1	P222	11.0	W3	13.5	P226	13.7
5	P313	9.6	W2	7.2	P220	8.8	P332	9.9
6	P218	15.2	P209	13.0	P322	9.4	W2	7.4
7	P207	6.5	P223	2.9	P324	5.3	P305	5.5
8	P114	4.9	P206	3.0	P131	2.5	P109	6.9
9	P107	2.8	P203	2.0	P121	2.4	H3	6.1
10	P122	2.3	P115	3.4	P318	1.6	P119	2.8
11	P118	3.3	F218	0.3	P105	3.6	P219	2.7
12	P322	3.7	P212	3.3	P113	3.9	P114	3.7
13	P327	1.9	P219	1.9	P326	1.4	P322	4.3
14	P214	2.5	H3	1.8	P314	0.7	P130	1.6
15	P216	1.8	P318	1.7	P203	1.9	W3	0.0
16	P113	2.0	P312	0.2	P303	3.9	P331	-1.5
17	P329	0.3	P332	-2.0	P213	2.2		
18	P332	-1.4			P106	1.6		
19					P117	2.0		
20					P217	2.0		
21					P308	1.5		
22					P219	0.9		
23					P223	2.1		
24					P201	1.0		
25					P332	0.9		
26					P228	2.0		
27					P325	0.7		

H, W, P: それぞれ波高, 風速および気圧で、後の数字は時間と場所を表わす。

測有義波高を示したものである。実線は実測有義波高、一点鎖線は変数選択を行った場合の波浪予測値、破線は

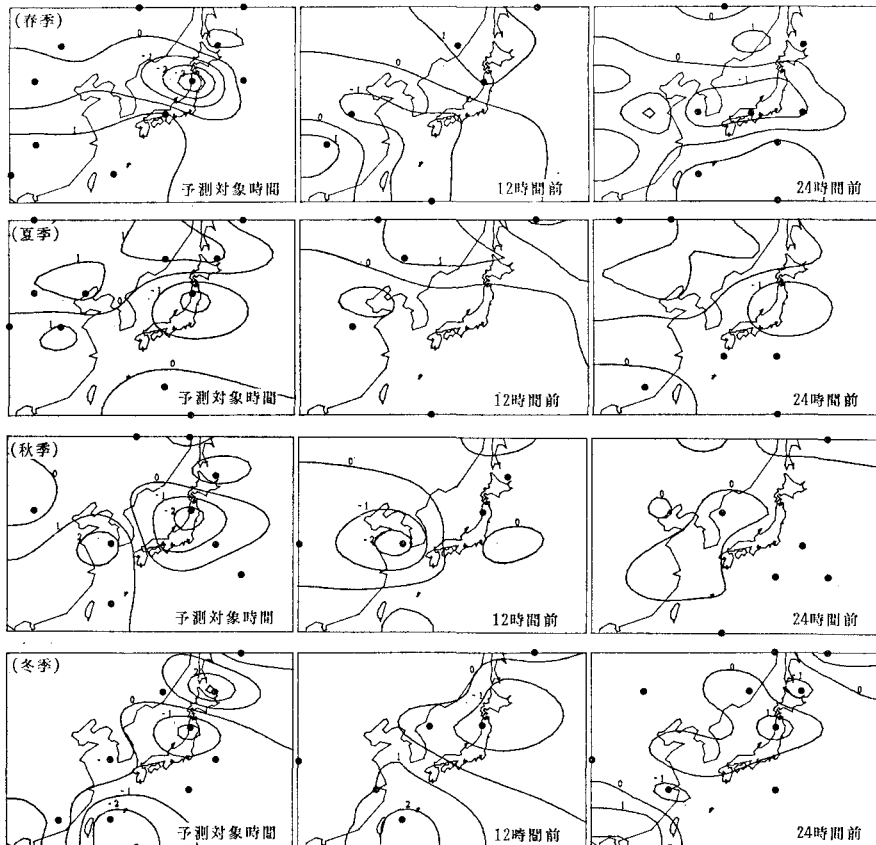
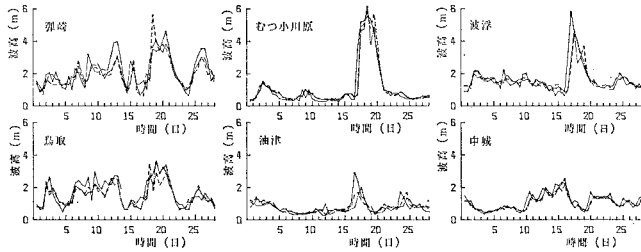


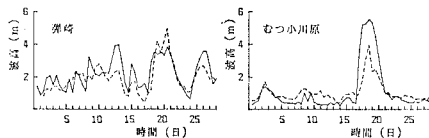
図-3 予測有義波高に対する気圧分布の寄与パターン



図—4 実測波高と予測波高の比較

全変数を説明変数として用いた場合の波浪予測値を示している。図—4に見られるように、全変数を説明変数として用いる場合には、変数選択を行なった場合に比べて、推定値の変動が大きく、やや不安定である。また、変数選択を行なった場合でも、地点ごとに推定精度は異なっており、やや過大に波高を推定している例もあればやや低めに推定している例もあり、地点ごとの予測誤差の特性はあまり明確ではない。しかしながら、実測有義波高の時系列的な変動は概ねとらえられており、波浪予測値の利用目的によっては、実用に耐え得る予測精度であると思われる。このほか、有義波高を対数変換して予測式を作成した場合と、有義波高をそのまま用いて予測式を作成した場合の相違については、対数変換した場合の方が、高波高時に変動が少なく、安定した予測値を推定し得るようである。予測精度も対数変換した場合の方がやや良いようである。

図—5は3日先までの予想天気図が入手されている状況を想定し、天気図から読み取られた気圧値のみを説明変数として波浪予測を実施した結果の内、弾崎、およびむつ小川原港の2月の例を示したものである。実際には予想天気図には相当の誤差が含まれていると考えられるが、これを検討することは今後の課題として、ここでは地上天気図から読み取られた気圧値のみを用いて波浪予測を実施している。図—5に見られるように、有義波高や風速も説明変数として用いた図—4の例と比較して、気圧値のみを用いる場合には、一般に、急激な有義波高の変動に対して追従が悪い。また、予測精度もやや低下しているようである。なお、有義波高を説明変数に用いない場合には、予測対象時刻の24時間前の気圧値の重回帰係数の寄与率が、有義波高を説明変数として用いる場合に比べて、全体的に大きくなる傾向があるようである。

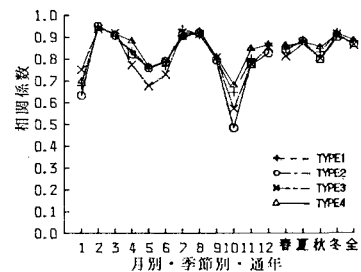


図—5 実測波高の比較(波高, 風速を用いない場合)

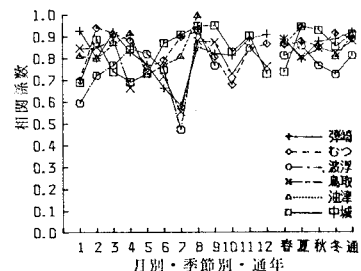
5. 予測精度の検討

図—6は、むつ小川原港を対象として、波浪予測式の作成方法の違いによる予測精度の相違を月別・季節別に示したものである。図—6では予測精度の指標として実測有義波高と予測波高の相関係数で示している。また、図—9中のTYPE-1~TYPE-4は表—2に示す条件で重回帰型波浪予測式を作成したことを示している。図—6に見られるように、波浪予測式の作成方法により推定精度は異なっており、特に、TYPE-2、TYPE-3が推定精度が低いようである。なお、有義波高を対数変換し、AICにより説明変数の選択を行なったTYPE-4は、月別、季節別によらず、図—6に示した4種類の内では概して最も良い推定精度を示しているようである。これらは4.で検討した結果と一致している。

図—7はTYPE-4の条件で作成した波浪予測式を用いて実施した波浪予測結果をもとに、各予測対象地点別に実測有義波高と予測波高の月別・季節別の相関係数を示したものである。図—7に見られるように、重回帰式



図—6 相関係数(予測式別)



図—7 相関係数(地点別)

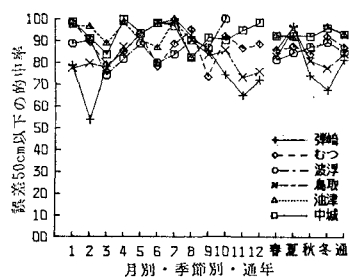


図-8 誤差 50 m 以下の出現率

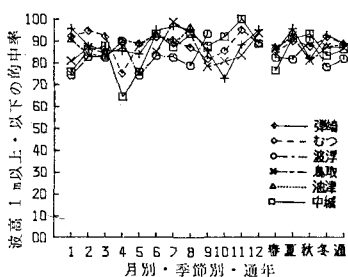


図-9 的中率 (基準値 1.0 m)

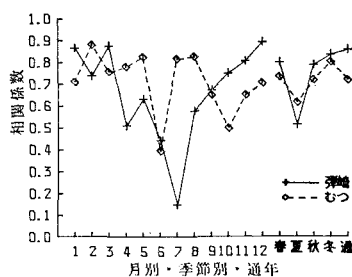


図-10 相関係数 (波高, 風速を用いない場合)

表-2 予測式の作成条件

予測式型	波 高		風 速		気 圧			
	12	24	12	25	0	12	24	36
TYPE-1	◎	◎	○	○	○	○	○	×
TYPE-2	○	○	○	○	○	○	○	×
TYPE-3	◎	◎	○	○	×	○	○	○
TYPE-4	◎	◎	○	○	○	○	○	×

0, 12, 24, 36: それぞれ予測対象時間までの時間

○: 採用した説明変数, ×: 不採用, ◎: 対数変換

による波浪予測値は、海域ごと、季節ごとに推算精度が異なり、例えば、沖縄近海では春先に、日本海沿岸では初夏に推定精度が低下する傾向が見られる。しかしながら、予測値と実測値の相関係数は、年平均 0.8 程度、あるいは予測対象地点により、それ以上である。

図-8、および 図-9 は各予測対象地点別に月別・季節別の波高的中率を示したものである。図-8 は、予測値と実測値の誤差が 50 cm 以下の出現率を示したものであり、図-9 は港湾工事の施工管理等を考慮して、予測波高が 1.0 m 以上、または 1.0 m 以下と予測して、実際に実測波高値が 1.0 m を基準として、それより大きい、小さいかが的中する確率を示したものである。図-8 に見られるように、50 cm の誤差を許容した的中率は冬季の日本海側が低いことを除けば、ほぼ 80% を越えているようである。また、図-9 に示される 1.0 m を基準とした判別型の的中率は、中城で最高の中率 (100%) と最低の中率 (64%) を有しており、平均的には各地とも 80% を越える的中率を有しているようである。

図-10 は、図-5 で一例を示したように予想天気図が与えられているものとして、実際には地上天気図から読み取られた気圧値のみを説明変数とした場合の、弾崎とむつ小川原港の実測値と予測値の相関係数を示したものである。図-7 に比べて予測精度は低下しており、弾崎では 4~7 月が、むつ小川原港では 10 月に、相関係数が

0.6 を下まわっている。しかしながら、年平均では弾崎で 0.86、むつ小川原港で 0.72 の相関係数であり、予想天気図の精度の問題を度外視すれば、波浪予測値の適用目的によっては、重回帰型波浪予測式による波浪予測値も有効な情報を提供し得るものと思われる。

6. あとがき

重回帰式を用いた波浪予測手法を、様々な海域、期間を対象として適用し、説明変数の選択等、種々の操作を導入して検討することにより、多くの知見が得られた。

その結果、重回帰モデルを用いた波浪予測手法は、その適用対象、目的によっては、ある程度の誤差範囲内で有効な情報を提供し得るものであることが示された。

しかしながら、重回帰型の波浪予測手法では、空間的に分布する種々の変量の時系列的な変動を無視し、時間的、空間的な変動を混同して取り扱っている点で、物理的ではない。AIC により変数選択を行なったものの、その挙動からは他にもっと良い統計モデルがある可能性が示されている。1. で述べたように我々の所期の目的を達成するためには、それぞれの対象、目的に応じて適切な統計モデルが利用されることが前提となっている。この意味では、大気・波浪間の物理的な時系列変動の物理特性を考慮した、より適切な統計モデルを模索する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 須田 照・湯沢 昭: 波浪予測に基づく外海ツーパースの待ち行列に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 339 号, pp. 177~185, 1983.
- 2) Akaike, H: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 2nd Inter. Symp. on Information Theory (Petrov, B. N. and Csaki, F. eds.), Akademiai Kiado, Budapest, pp. 267~281, 1973.
- 3) 坂本慶行・石黒真木夫・北川源四郎: 情報量統計学, 共立出版株式会社, p. 236, 1983.