

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 673      June 1990

統計モデルを用いた波浪予測手法の  
適用性に関する検討

小    舟    浩    治  
橋    本    典    明  
亀    山       豊

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	3
2. 気象・海象データを用いた統計解析 .....	4
2. 1 気象・海象データの収集・整理・作成 .....	4
2. 2 気象・海象データの統計解析 .....	5
3. 重回帰式を用いた波浪予測 .....	16
3. 1 重回帰型波浪予測式の作成 .....	16
3. 2 説明変数の選択と AIC .....	17
3. 3 重回帰式を用いた波浪予測結果 .....	19
3. 4 重回帰式を用いた波浪予測手法の精度の検討 .....	20
3. 5 重回帰式を用いた波浪予測式の作成に必要な波浪観測データの 期間に関する検討 .....	22
3. 6 重回帰型波浪予測モデルに関する考察 .....	22
4. 分割表を用いた波浪予測 .....	25
4. 1 分割表の作成 .....	25
4. 2 分割表による解析結果 .....	26
4. 3 分割表を用いた波浪予測手法に関する考察 .....	27
5. 多変量自己回帰式を用いた波浪予測 .....	28
5. 1 多変量自己回帰モデル .....	28
5. 2 多変量時系列の予測 .....	29
5. 3 多変量自己回帰式の作成 .....	29
5. 4 多変量自己回帰式を用いた波浪予測結果 .....	30
5. 5 多変量自己回帰式を用いた波浪予測手法の精度の検討 .....	37
5. 6 多変量自己回帰型波浪予測手法の考察 .....	37
6. あとがき .....	37
参考文献 .....	42

# On Reliability of Wave Forecasting by Empirical Wave Forecasting Models

Koji KOBUNE\*

Noriaki HASHIMOTO\*\*

Yutaka KAMEYAMA\*\*\*

## Synopsis

Wave forecast information is fundamental for the safety operation of working vessels for port construction. There are two distinct methods for wave forecasting. One is a numerical model of wind and wave interaction. The other is an empirical model based on a statistical relationship between the weather and the wave data obtained in the past. The former method has often been used for wave hindcasting. The reliability of the models have been also discussed to some extent. However, practical computation with these models requires a knowledge of meteorology in the numerical modeling of atmospheric pressure system and a large investment in the computation. The latter method utilizes simple regression equations or relationships and does not need sophisticated knowledge in the process of practical computation. However, because of the lack of continuous field wave data, detailed study on latter method has been difficult, and only few reports have been presented.

In this report, the reliability of the three kind of empirical forecasting models (multiple regression model, multichannel autoregressive model and the method with the use of contingency table) is examined through simulation based on 4-year wave data and weather maps. The AIC (Akaike's Information Criterion) is introduced to select vital variables to determine wave heights at specific locations. The examination shows that the reliability of short-term forecasts by these methods is satisfactory for practical use if errors are allowed to a certain extent.

**Key Words :** Wave Forecasting, Wave Observation, Wave Hindcasting

---

\* Chief, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

\*\* Senior Reserach Engineer, Marine Hydrodynamics Division.

\*\*\* Member, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

# 統計モデルを用いた波浪予測手法の 適用性に関する検討

小 舟 浩 治 \*  
橋 本 典 明 \*\*  
亀 山 豊 \*\*\*

## 要 旨

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。本資料では、より妥当な統計モデルを用いた波浪予測手法を開発し、実用化するために、特に取り扱いが簡便と思われる重回帰式を用いた波浪予測手法、分割表を用いた波浪予測手法、多変量自己回帰式を用いた波浪予測手法の3方法を対象として、それぞれの手法の推定精度や適用性、問題点等を検討することにより、将来の統計モデルを用いた実用的波浪予測手法の開発のための基礎資料を提示した。

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 重回帰式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。
- 2) 分割表を用いた波浪予測手法は回帰式を用いる波浪予測手法と異なり、有義波高の値そのものは推定できない。しかしながら、ある気象条件下での港湾工事等の作業限界波高以上の波高が生起する確率、あるいはそれ以下の波高が生起する確率等が過去のデータに基づいて与えられるため、何らかの判断を下さなければならないような状況においては、貴重な情報源になり得る。
- 3) 多変量自己回帰式を用いた波浪予測手法は、重回帰式を用いる方法に比べて、物理的な意味においてやや妥当な方法である。本方法により、気圧の時系列データを与えるべき測点の数を重回帰式の場合に比べて大幅に減らすことができ、かつ同程度の予測精度で波高を推定し得る。

キーワード：波浪予測，現地観測，波浪推算

## 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統計論的方法がある。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、特定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、

\* 海洋水理部 海象調査研究室長

\*\* 海洋水理部 主任研究官

\*\*\* 海洋水理部 海象調査研究室

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は、重回帰式、多変量自己回帰式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、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。さらに、特定の統計モデルに限定して考えても、そのモデルの説明変数の与え方は与えられたデータに依存しており、そもそもどのようなデータを与えるべきか、あるいは与えられたデータの中からどのような説明変数の組み合わせを選択すべきか等も明確ではない。

したがって、より妥当な統計モデルを用いた波浪予測手法を開発し、実用化するためには、多くの不明確な問題を詳細に検討し、解決して行く必要があるが、ここではその前段として、特に取り扱いが簡便と思われる重回帰式を用いた波浪予測手法、分割表を用いた波浪予測手

法、多変量自己回帰式を用いた波浪予測手法の3方法に限定し、それぞれの手法の推定精度や適用性、問題点等を検討することにより、将来の統計モデルを用いた実用的波浪予測手法の開発のための基礎資料を提示することとする。

## 2. 気象・海象データを用いた統計解析

### 2.1 気象・海象データの収集・整理・作成

統計モデルを用いた波浪予測手法の適用性を検討するため、日本沿岸の主要港湾の内、図-1に示す代表6地点(むつ小川原、弾崎、波浮、鳥取、油津、中城)を対象として、1980年～1984年の5年分の波浪観測結果および風速データを収集した。また、同上の期間の9時、21時の極東天気図を収集し、我が国を含む広い範囲を対象として、図-1に示す各測点の気圧値を読み取り、天気図と同一時刻の代表6地点の有義波高  $H_{1/3}$ 、風速  $u$  と共に MT に収録した。これらのデータは、種々の統計モデルを作成する場合の基本データとして使用される。

なお、統計モデルを用いた波浪予測手法の作成に際しては、もし広い範囲にわたる長期間の風向・風速データ

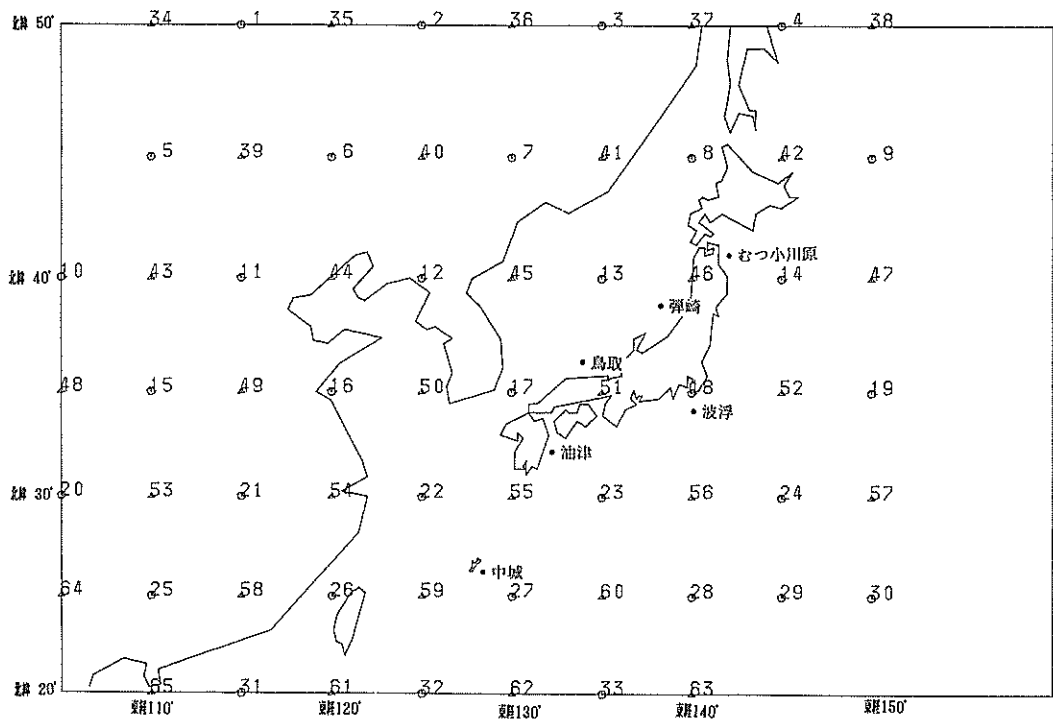


図-1 調査対象地点および気圧読み取り地点

が得られるならば、より妥当な統計モデルが作成可能と考えられるが、風向・風速データは一般に局所的な特性が強く、また、海上のデータを収集することが極めて困難なため、天気図から読み取ることが比較的容易な気圧値を代用することとした。

また、図-1に示す気圧値を読み取る測点の間隔は波浪推算法に比べてかなり粗いと思われるが、これは、統計モデルを用いた波浪予測手法の作成に際しては、互いに相関の強い説明変数をモデルに組み込むことによって多重共線性による悪影響の問題が生じるため、やや粗めに設定することとしたためである。

## 2. 2 気象・海象データの統計解析

統計モデルを用いた波浪予測手法を作成するに際しては、事前に各データの統計的特性や各データ間の相関等を調査しておく必要がある。

### (1) 気象・海象データの経時変化

図-2はむつ小川原(1983年)の有義波高、風速および気圧測点1および13の気圧値の経時変化を示したものである。図-2に見られるように、有義波高の分布は正規分布と異なり季節によりその変動特性が異なっている。また、波高増大時と減衰時の変動特性も

異なり、時間的に非対象な形状をしている。風速の経時変化にも有義波高と同様な非線型な特性が見られる。気圧の経時変化も季節により異なる特性を示しており、その特性は地点によりかなり異なっている。一般に、大陸上の気圧の長周期変動は海上のそれに比べて大きく、冬季に気圧が高く、逆に夏季に低い傾向が見られる。海上部では年間を通して長周期変化は小さいようである。

### (2) 有義波高の出現頻度分布

図-3および図-4は波浮および鳥取の有義波高の通年の出現頻度分布を示したものである。図に見られるように、両地点とも低有義波高の出現頻度が高く、高有義波高の出現頻度が低いという一般的特性は認められるものの、詳細には、低有義波高の出現特性は両地点で異なっている。この特性は、太平洋沿岸と日本海沿岸の波浪の出現特性の相違として報告されており、ワイブル分布によって近似的に表されることが報告されている<sup>1)</sup>。図-5および図-6は、図-3と図-4の有義波高の対数変換値の頻度分布を示したものである。図中の×印は正規分布を示したものである。図に見られるように、有義波高の出現頻度分布は大ま

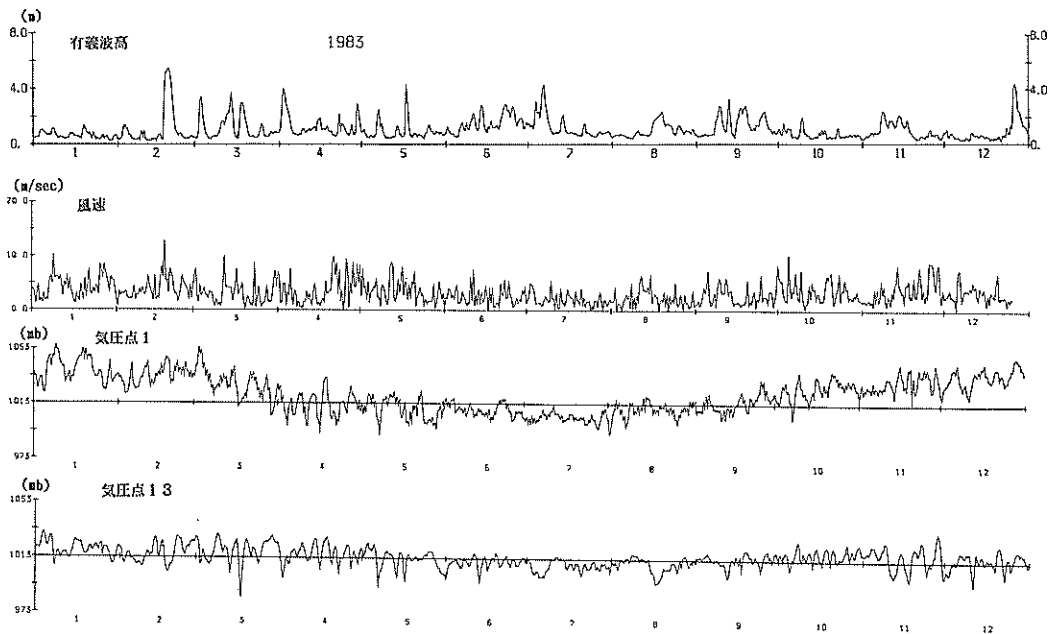


図-2 有義波高，風速，気圧値の時系列変動記録の一例







かに対数正規分布でも近似できるようである。

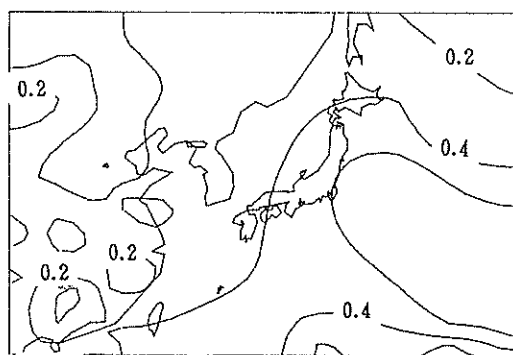
### (3) 気圧データの長周期トレンド

年最大有義波高などの観測値は各年によって異なるが有義波高の経年的な出現特性等の統計値は、年による変動が小さく、有意なトレンドは含まれていない。気圧値に対しても同様な特性が見られると思われるが、これを検証するため4年分の気圧データを用いてフーリエ解析を実施した。図-7は半年、1年、2年、4年周期のフーリエ係数の分布図を示したものである。図-7に見られるように、1年周期の変動が極端

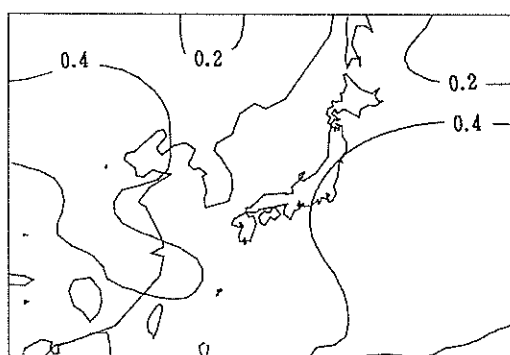
に大きく、次いで半年周期の変動が大きい。したがって、気圧値には季節毎にその特性が変動する1年周期のトレンド成分が顕著であり、他の長周期変動は無視し得るようである。また、1年周期のフーリエ係数の大きさの分布から、本州を挟む南北および東西でやや大きめの1年周期の変動が見られる。

### (4) 有義波高と気圧値の相関解析

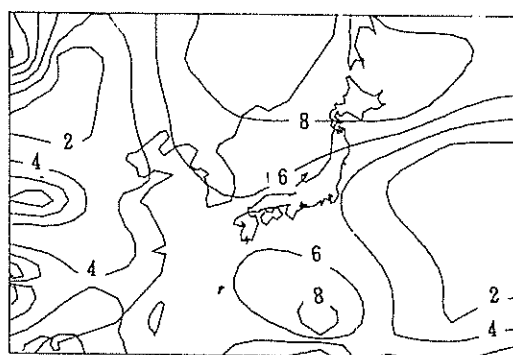
図-1に示す代表6地点の有義波高と各測点の気圧値の時系列的な相関特性を見るために、自己相関解析および相互相関解析を実施した。解析期間は対象月の



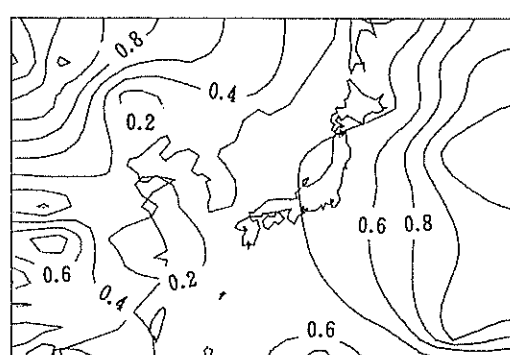
(4年周期)



(2年周期)



(1年周期)



(半年周期)

図-7 気圧データのフーリエ解析結果の平面分布

前後1か月を含む3か月分のデータを用いて月別に、また1年分の全データを用いても解析した。図-8は弾崎の有義波高および各測点の気圧値の1980年1月～3月のデータを用いて自己相関解析した結果の一例を示したものである。図-8ではそれぞれの気圧測点の位置関係が分かるように一枚の図にそれぞれの気圧測点に対応して配列している。図中、x軸は2.5日間隔で目印を記し、10日間分のラグを图示している。また、図-9は1980年の1年分の全データを用いて自己相関解析した結果を示したものである。ここには全てを示していないが、有義波高の月別の自己相関係数は数日で自己相関がほぼ1.0に近くなるものの、その長さは月によって異なり、特に秋季から冬季にかけてやや長い期間相関を持つ結果となっていた。気圧の自己相関は月別の相違が一層顕著であり、有義波高に比べてより長い期間、高い相関を示す結果であった。1年分の全データを用いた場合、この傾向は一層顕著となり、いつまでも高い相関を有する結果となっている。これは、気圧データに含まれる1年周期の長周期変動の影響によるものと思われる。有義波高の数日単位の予測のた

めには、この長周期変動を除去して取り扱う必要がある。

図-10は図-8と同じデータを用いて弾崎の有義波高と各測点の気圧値との月別の相互相関係数を示したものである。自己相関係数と同様に月別に相違が見られたが、いずれの図にも有義波高およびその観測地点に最も近い気圧測点の気圧値とは小さなタイム・ラグを持って負の相関が見られた。また、月別あるいは地点の相違により、ラグの大きさによらず正の相互相関だけを示すものや、負の相互相関だけを示すものがある。これは地点別あるいは月別の長周期変動のトレンドの影響の相違によるものと思われる。図-11は図-9と同じ1年間の全データを用いた場合の相互相関係数を示したものである。この場合、月別の場合と異なり、かなり平坦な相互相関を示している。これも自己相関係数の場合と同様に、1年周期の長周期変動が強く影響したためと思われる。

図-12は有義波高および気圧値の5日間毎の移動平均を行ない、もとのデータからこの移動平均を差し引いたデータをもとに、図-8と同様に月別の自己相

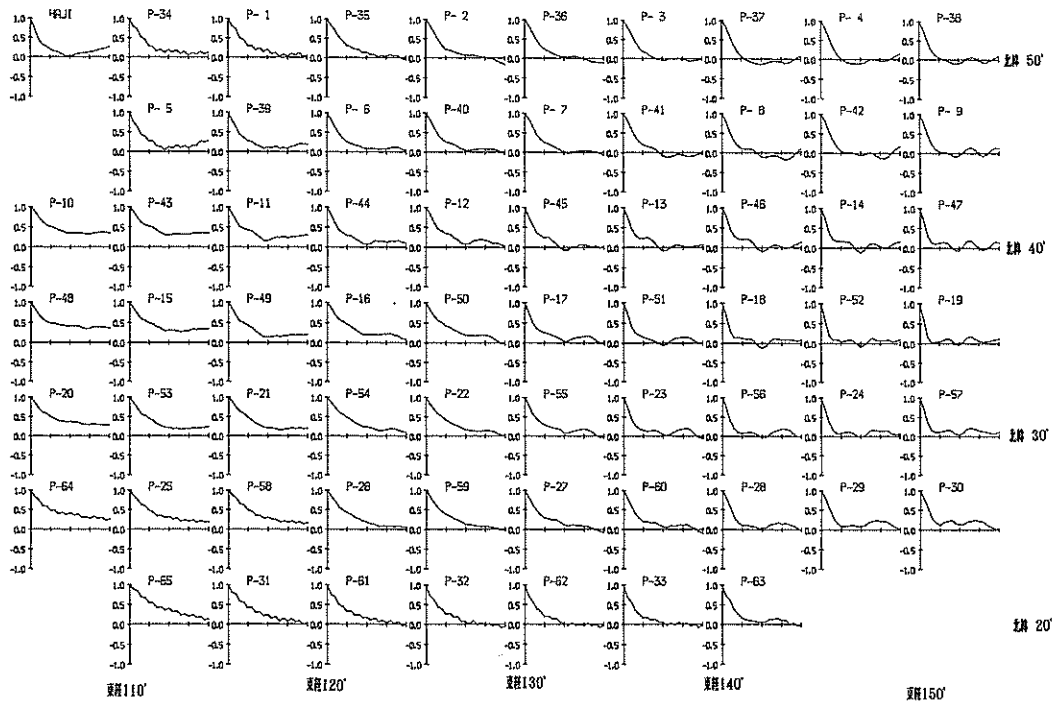


図-8 弾崎の有義波高および気圧の自己相関係数 (1980年1月～3月)

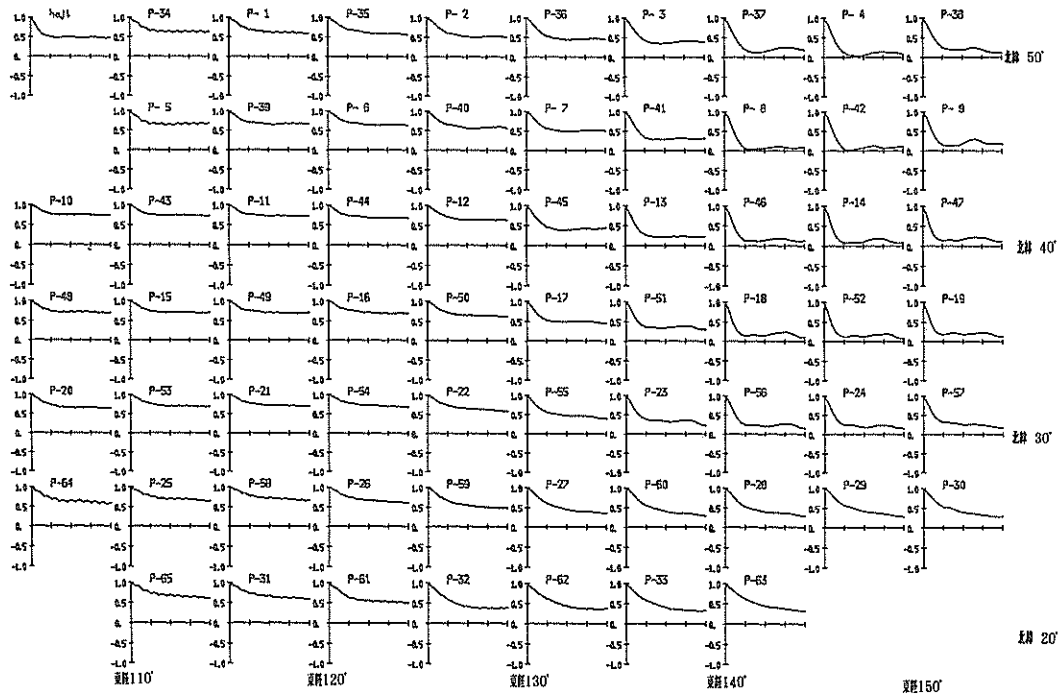


図-9 弾崎の有義波高および気圧の自己相関係数 (1980年1月~12月)

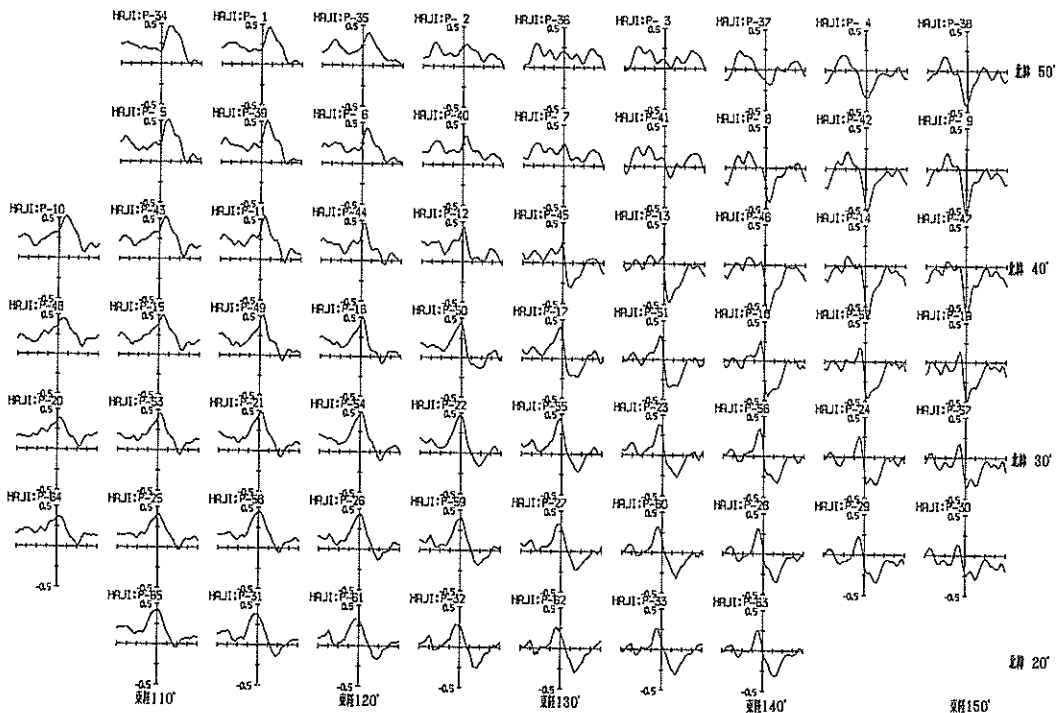


図-10 弾崎の波高と気圧の相互相関関数 (1980年1月~3月、生データ)

図-10 弾崎の有義波高と気圧との相互相関係数 (1980年1月~3月)

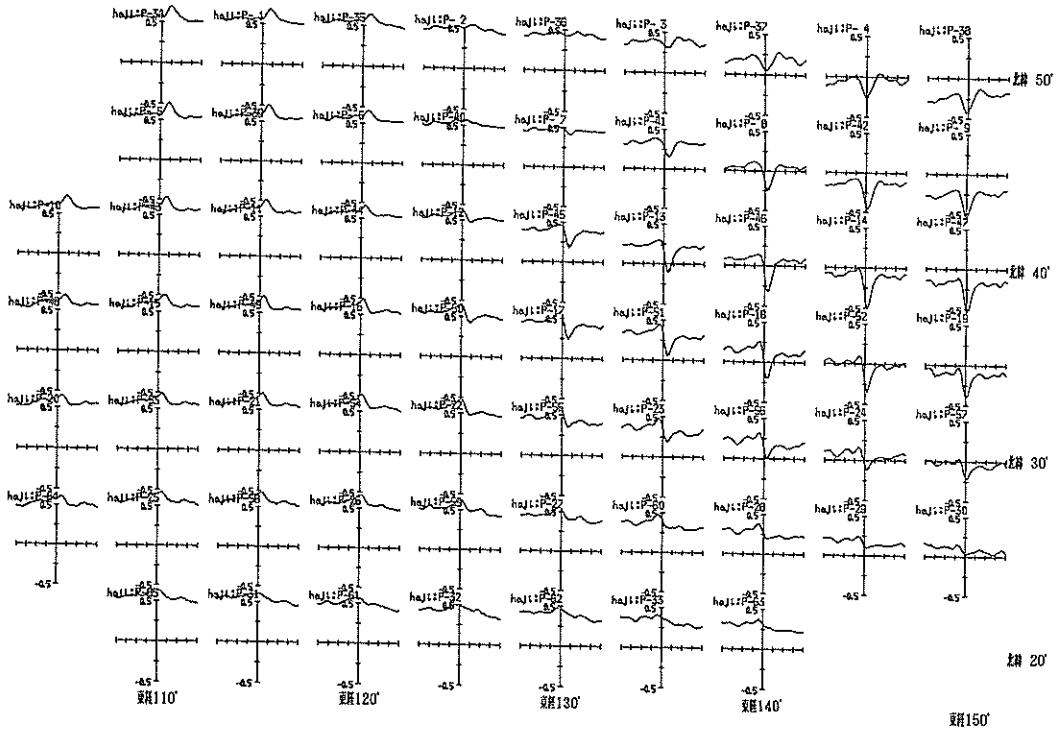


図-11 弾崎の有義波高と気圧との相互相関係数 (1980年1月~12月)

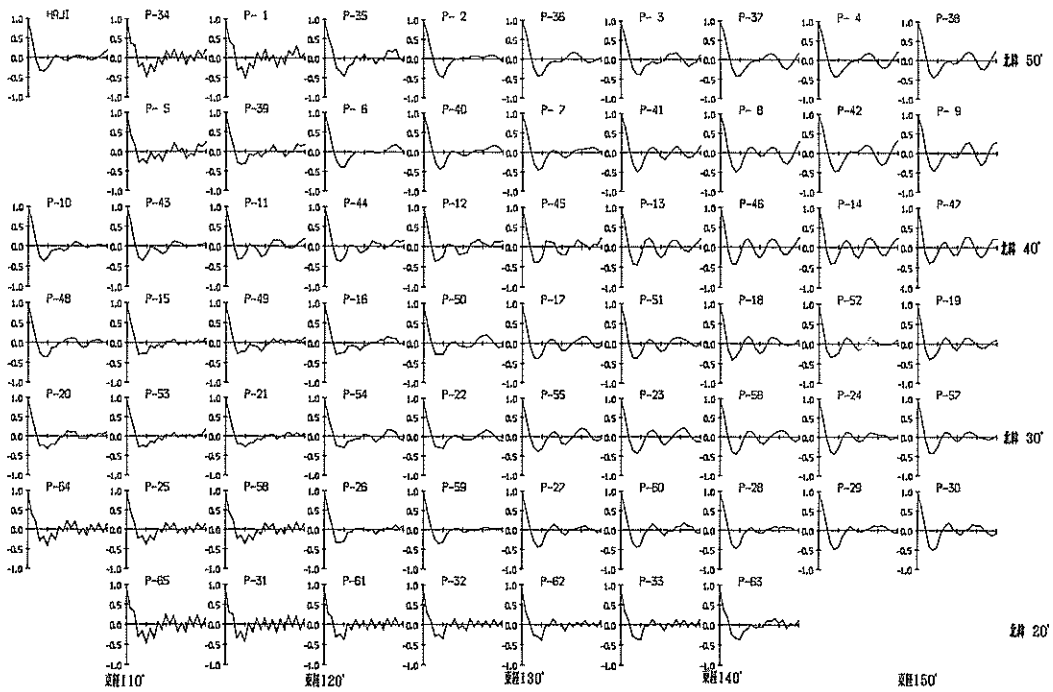


図-12 弾崎の有義波高および気圧の自己相関係数 (1980年1月~3月, トレンド除去)

関係数を示したものの一例である。図-8に比べて滑らかな減衰振動的な自己相関の特性が明確に現れている。しかしながら、図-13に示す同様のデータを用いた1年分の自己相関係数では、この特性はかなり弱まっている。図-14および図-15はそれぞれ図-12および図-13と同一のデータを用いて相互相関係数を算出したものである。この場合、波浪観測地点に近い気圧測定の気圧値と有義波高の相互相関はラグの小さい位置に負の大きな相関を持ち、ラグの増加とともに減衰振動的に相関が弱くなっている。しかしながら、波浪観測地点から遠く離れた地点の気圧との相互相関はこの傾向があまり明確ではない。

1年周期の長周期変動の影響を除去する方法として、気圧の時間変動、すなわち12時間ごとの気圧値の差を用いることにより波浪予測のための統計モデルを作成することも可能であろう。これを検討するために、有義波高および気圧値の時間変動値を用いて自己相関および相互相関を算出した。図-16はこの様な前処理を施した弾崎の有義波高および各測点の気圧値の時間変動値の月別の自己相関係数の一例を示したものである。この場合、西側の気圧値は異常な自己相関係数を

示しており、また、東側の気圧値は相関がラグの増加とともに急に減衰する形となっている。図-17に示す1年分の同じデータを用いた自己相関にも同様な傾向が見られる。

図-18および図-19は、有義波高と気圧値の時間変動値の相互相関係数を示している。図-14に比べて激しい変動を示しており、ラグの小さな領域を除いては、相互相関値はより0に近い値となっている。

以上の検討結果より、統計的な短期波浪予測手法を開発する場合、特に時系列的なデータを用いてモデルを作成する場合、気圧値を直接用いるよりも、移動平均により長周期成分を除去した気圧データを用いて統計モデルを作成する方が、より妥当なモデルが作成可能であろう。

#### (5) 有義波高と気圧値のクロススペクトル解析

クロススペクトル解析で得られる情報と(4)の相互相関解析で得られる情報は同じものであるが、周波数領域から現象を眺める方が、現象の理解に便利ことが多い。そこで、(4)で得られた相互相関値を用いてクロススペクトル解析を実施した。

図-20は図-14で用いた5日間毎の移動平均値除去

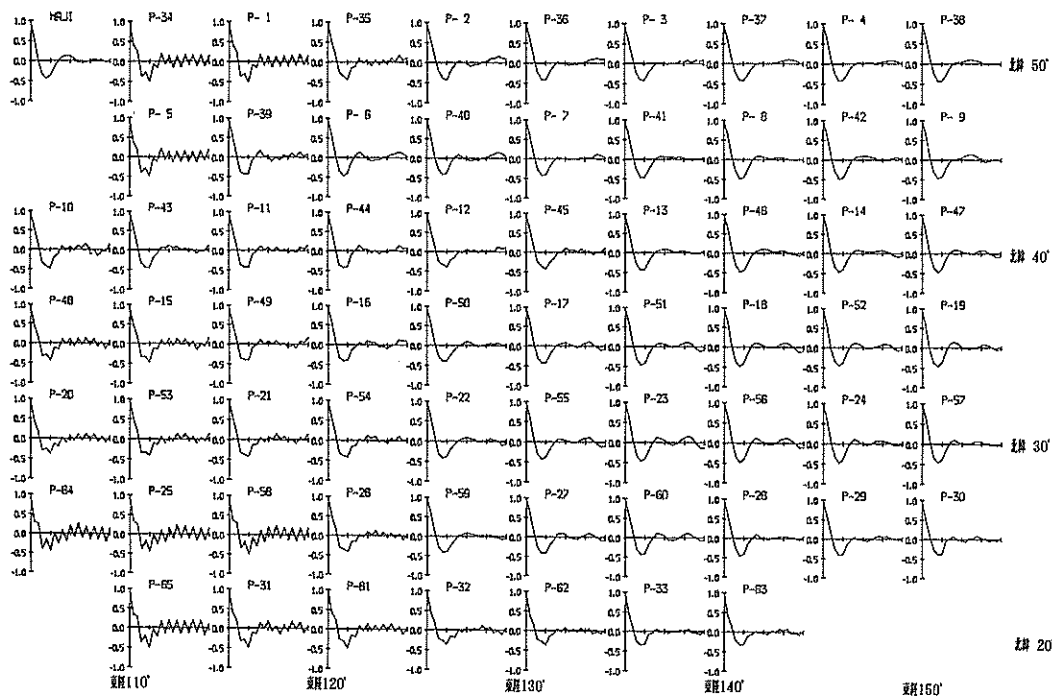


図-13 弾崎の有義波高および気圧の自己相関係数 (1980年1月~12月, トレンド除去)

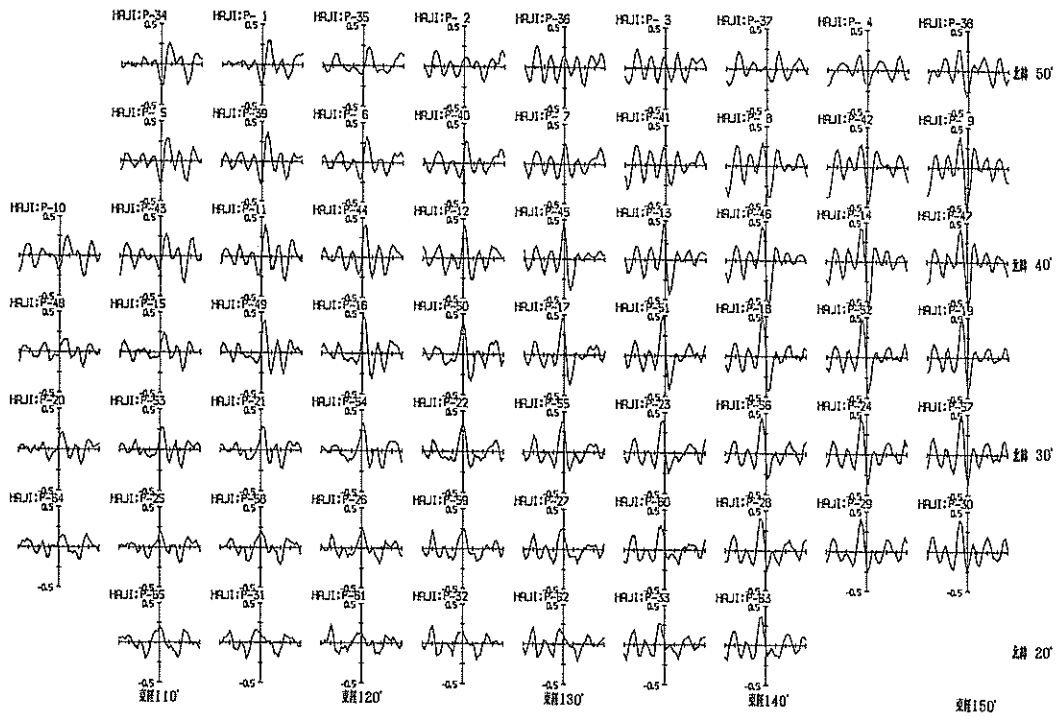


図-14 弾崎の有義波高と気圧との相互相関係数 (1980年1月～3月, トレンド除去)

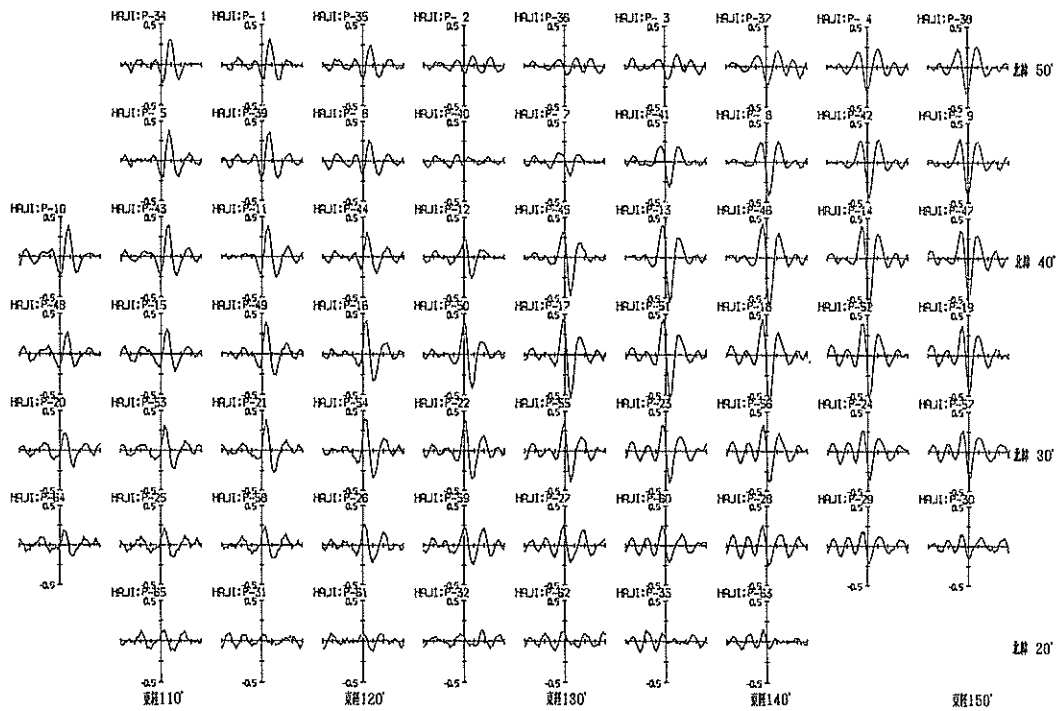


図-15 弾崎の有義波高と気圧との相互相関係数 (1980年1月～12月, トレンド除去)

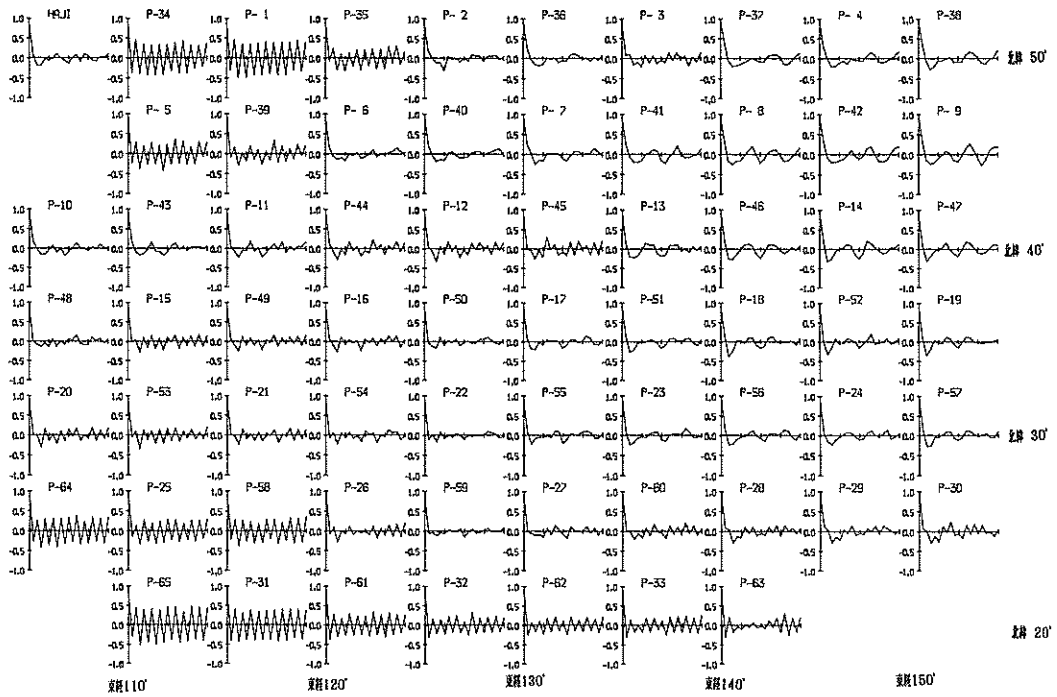


図-16 浜崎の有義波高の時間変動量および気圧の時間変動量の自己相関係数 (1980年1月～3月)

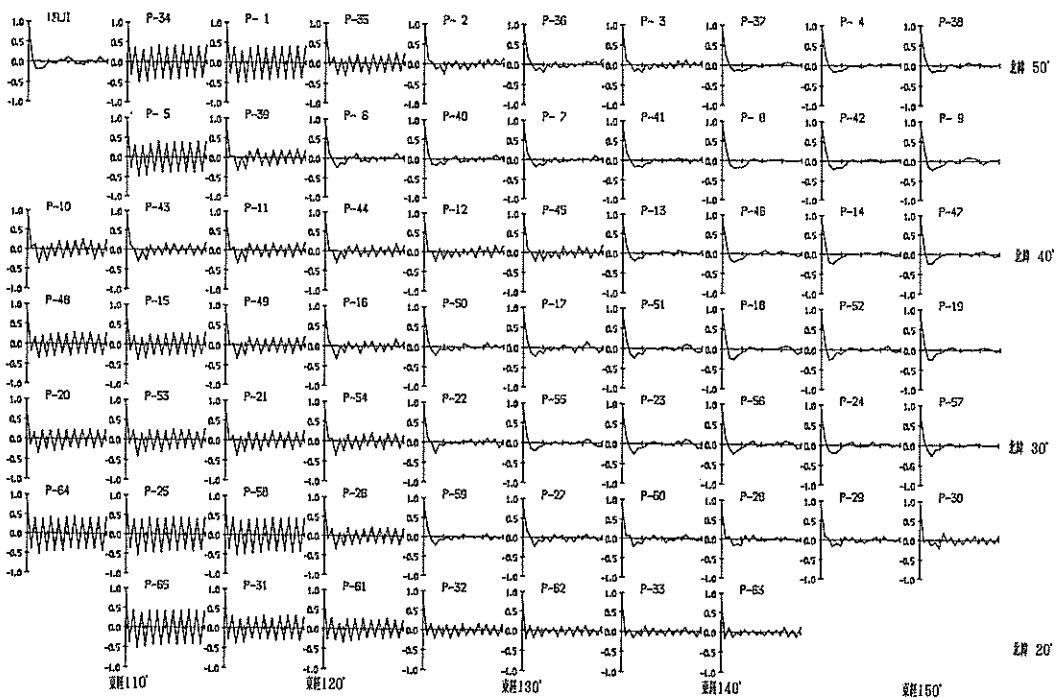


図-17 浜崎の有義波高の時間変動量および気圧の時間変動量の自己相関係数 (1980年1月～12月)

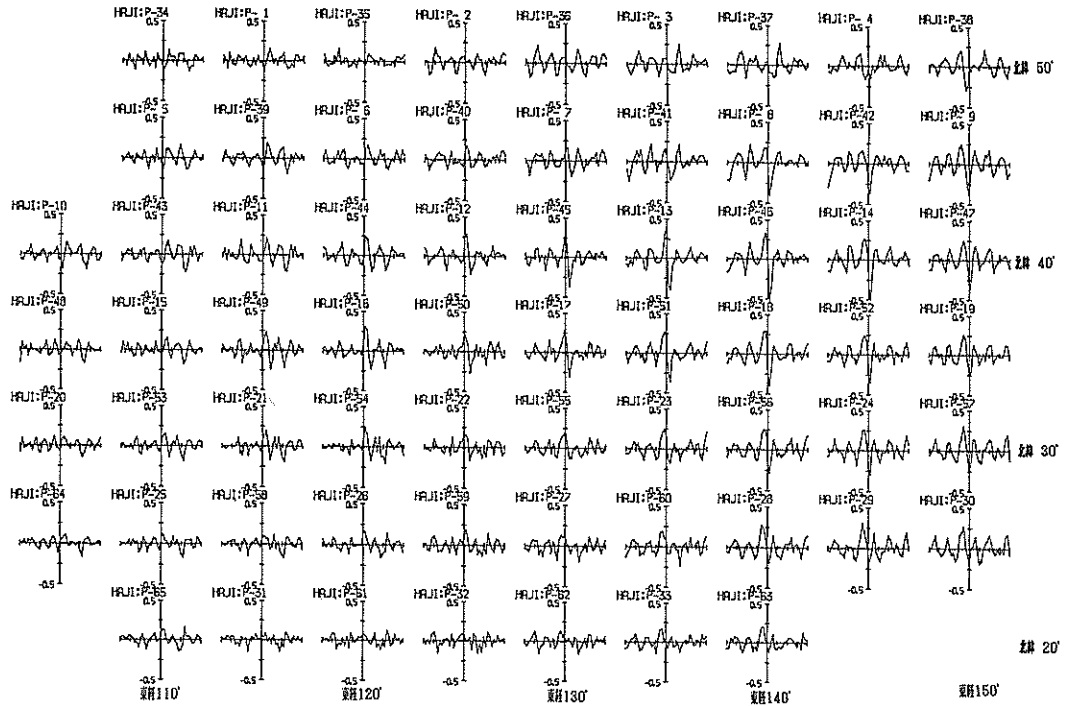


図-18 弾崎の有義波高の時間変動量と気圧の時間変動量との相互相関係数 (1980年1月～3月)

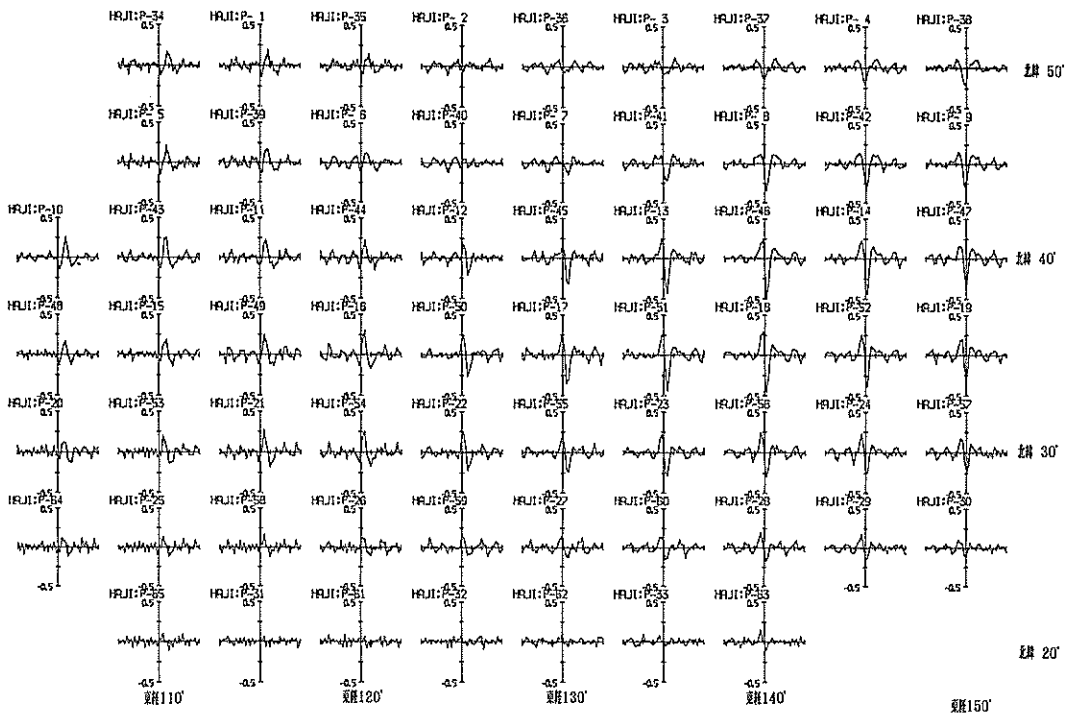


図-19 弾崎の有義波高の時間変動量と気圧の時間変動量との相互相関係数 (1980年1月～12月)



後の気圧値と弾崎の有義波高のコヒーレンスとフェイズの一例を示したものである。コヒーレンスは2つの波動量の線型性の強さを示す量であり、1に近い程線型性が強いことを示す。また、フェイズは2つの波動量の各周波数ごとの位相差を示す。コヒーレンスは5日周期に大きなピークを持ち、2.5日周期に第2ピークが見られるものの、一般に周期の短い程、コヒーレンスが小さくなる傾向が見られる。フェイズは気圧測点の位置によりその大きさに違いが見られるが、周期

の減少に伴って右下がりの傾向がある。大気の移動速度は波数の大きい程、移動速度が速いことが知られているが、この影響によるものかも知れない。

### 3. 重回帰式を用いた波浪予測<sup>2), 5), 6)</sup>

#### 3. 1 重回帰型波浪予測式の作成

##### (1) 波浪予測式

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、目的変数として図一

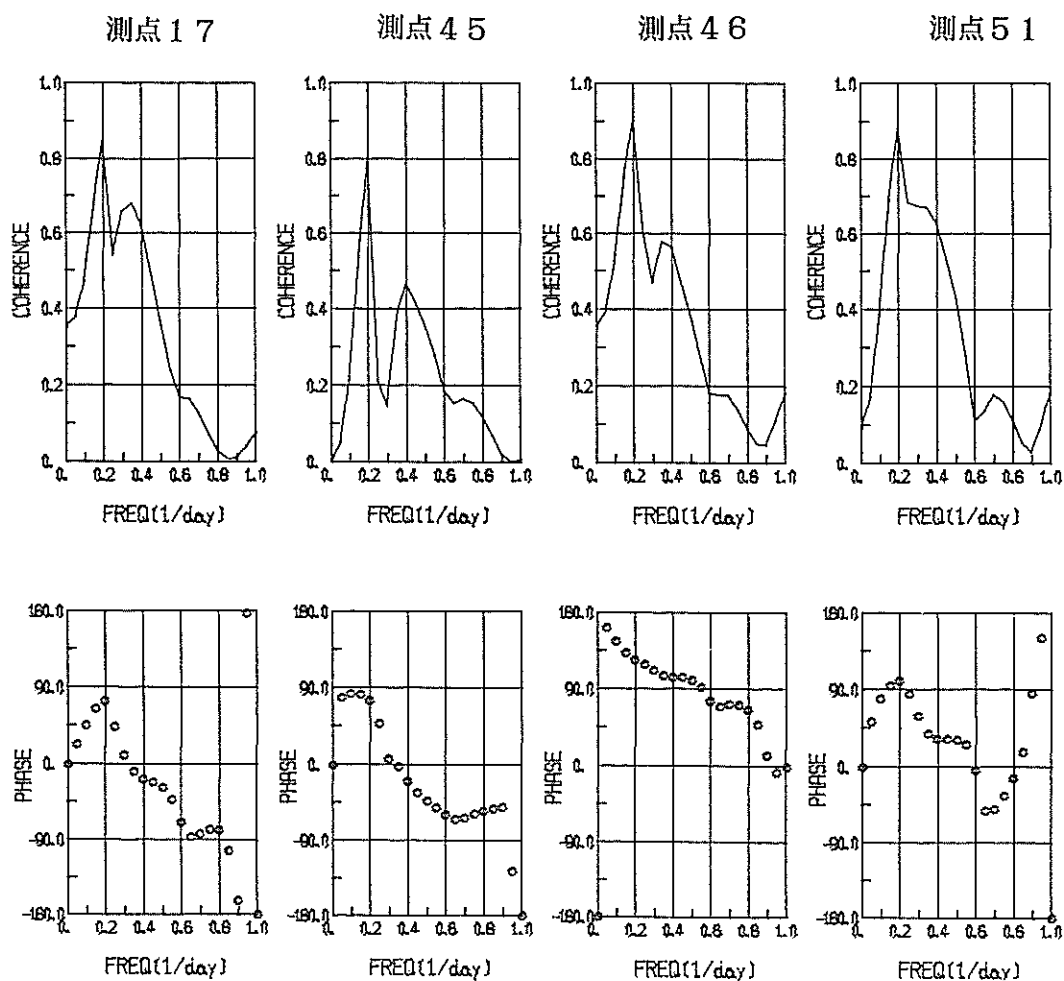


図-20 弾崎の有義波高と気圧とのクロススペクトル解析結果の一例 (1980年1月～3月, トレンド除去)

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時間前までの気圧データを用いて、次のような予測式を作成した。

$$\ln \hat{x}_1 = a_0 + \sum_{i=2}^3 (a_i \ln x_i + b_i y_i) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{32} c_{ij} z_{ij} + \varepsilon \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\hat{x}_1$ : 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、 $\varepsilon$ は残差である。なお、予測有義波高 $\hat{x}_1$ 、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る

(2) 説明変数の選択

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<sup>3)</sup>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。

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

重回帰式の場合には、AICは次式となる。

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

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、説明変数の組合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 $2^{100}$ 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なった。

- 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、上記の変数選択法が必ずしも最良の結果を与える必然性はない。これについては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なうこととした。

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る場合についても、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、港湾工事の工程管理などでは、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なった。

3. 2 説明変数の選択とAIC

図-21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-21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-21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しても、AIC はさらに緩やかに減少して明確な最小値を示さない場合が多い。これは、多くの場合には用いた統計モデルがあまり適切でないことを示しており、他にもっと良いモデルがある可能性を示唆しているものと思われる。なお、波浮港の秋季は他の季節に比べて、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唆している。

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な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 中に現われ

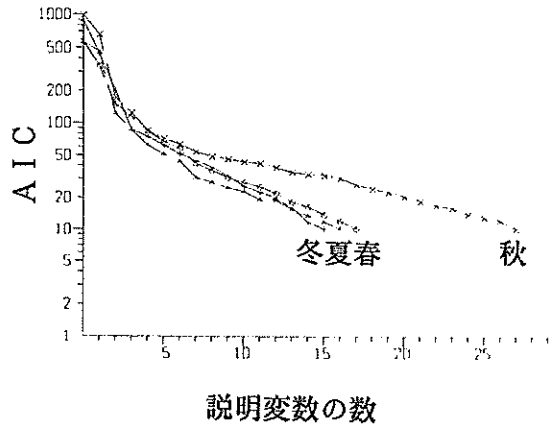


図-21 説明変数の選択と AIC の差

表-1 説明変数の選択と AIC

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	35.5	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	W2	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	P144	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	P218	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。

ているが、季節により必ずしも有効な説明変数ではないことが示されている。

図-22は3. 1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。実際に選択された気圧の説明変数は図-22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なうことにより、寄与パターンを図示したものである。図-22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

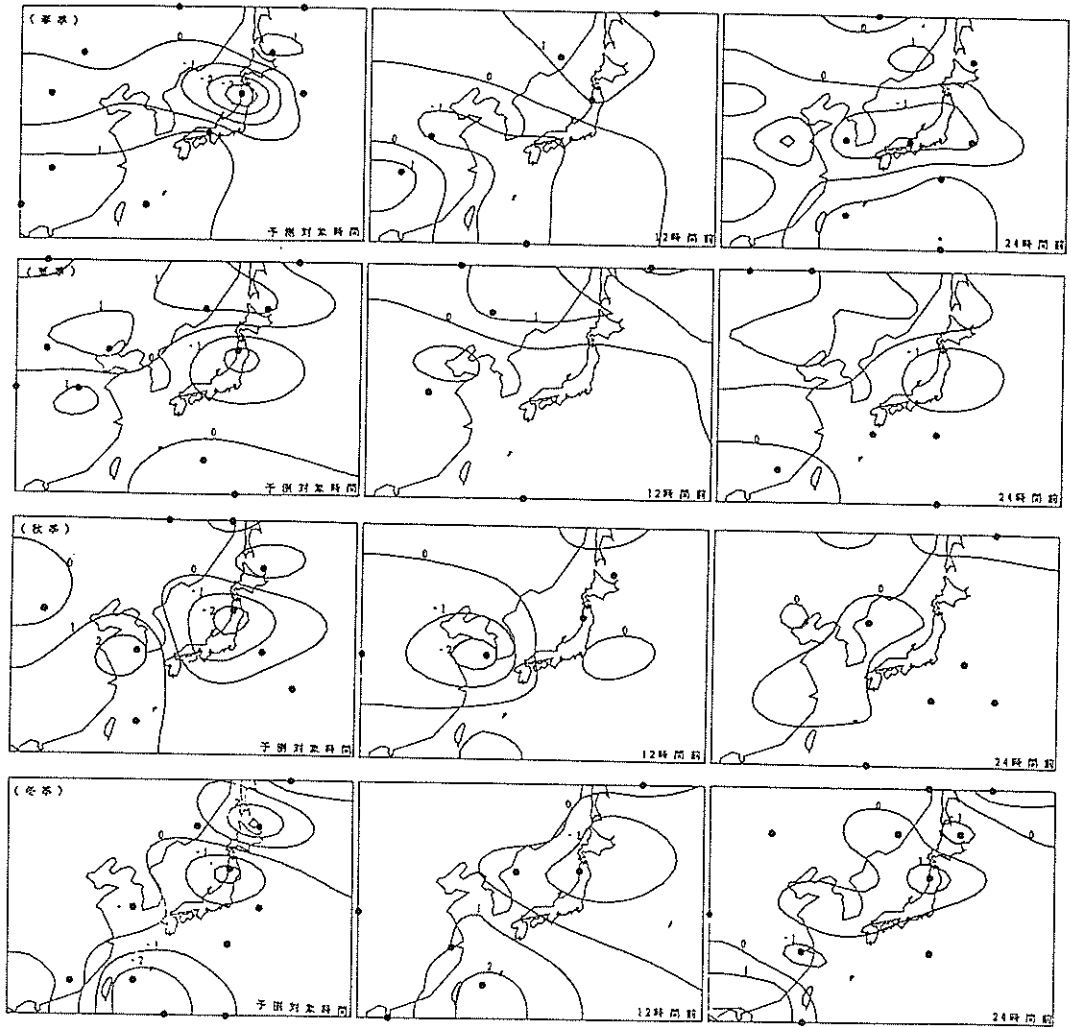


図-22 予測有義波高に対する気圧分布の寄与パターン

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-22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、データを持つ特徴を良くとらえていると言える。

### 3. 3 重回帰式を用いた波浪予測結果

3. 1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、3. 1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-23は図-1に示す6地点の2月の波浪予測値と実測有義波高を示したものである。実線は実測有義波高、破線は変数選択を行なった場合の波浪予測値、一点鎖線

は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-23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。また、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-24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-24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-23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。

### 3. 4 重回帰式を用いた波浪予測手法の精度の検討

図-25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-25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-25中のTYPE-1~TYPE-4は表-2に示す条件

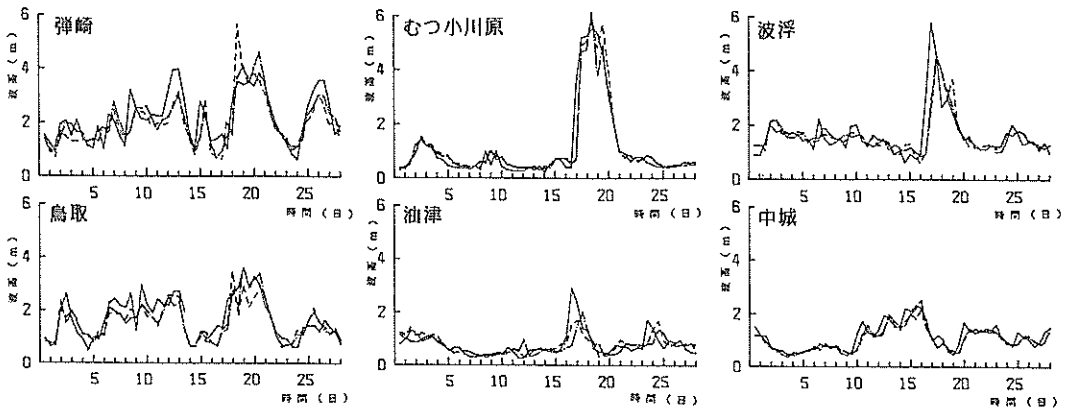


図-23 実測波高と予測波高の比較

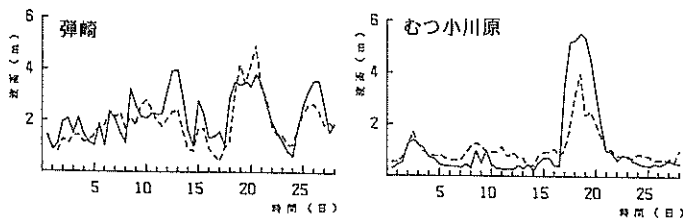


図-24 実測波高と予測波高の比較 (3日後予測)

で重回帰型波浪予測式を作成したことを示している。図-25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、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-25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

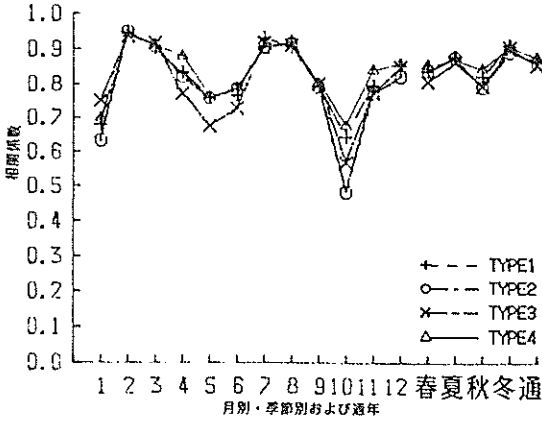


図-25 予測式別相関係数(むつ小川原)

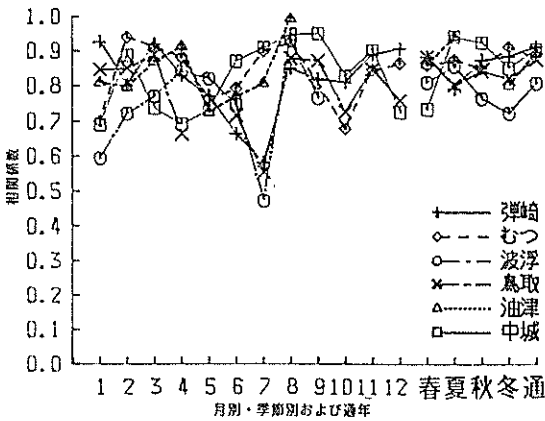


図-26 地点別相関係数

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-27および図-28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-27は、予測値と実測値の誤差が50cm以下の出現率を示したものであ

3. 3で検討した結果と一致している。

図-26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-26に見られるように、重回帰式による波浪予測値は、海域ごと、季節ごとに推定精度が異なり、例えば、沖縄近海では春先に、日本海沿岸では

表-2 予測式の作成条件

予測式型	波高		風速		気圧			
	12	24	12	24	0	12	24	36
TYPE-1	◎	◎	○	○	○	○	○	×
TYPE-2	○	○	○	○	○	○	○	×
TYPE-3	◎	◎	○	○	×	○	○	○
TYPE-4	◎	◎	○	○	○	○	○	×

0, 12, 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

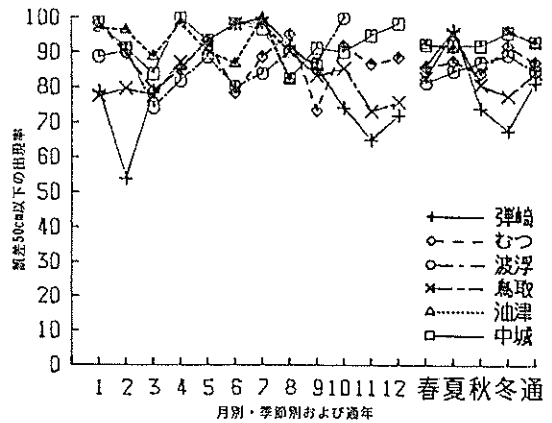


図-27 誤差50cm以下の的中率

り、図-28は港湾工事の施工管理等を考慮して、予測波高が1.0m以上、または1.0m以下と予測して、実際に実測波高が1.0mを基準として、それよりも大きいか、小さいかの中する確率を示したものである。図-27に見られるように、50cm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-28に示される1.0mを基準とした判別型的的中率は、中城で最高の中率(100%)と最低の中率(64%)を有しており、平均的には各地点とも80%を越える的中率を有しているようである。

図-29は、図-24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-26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

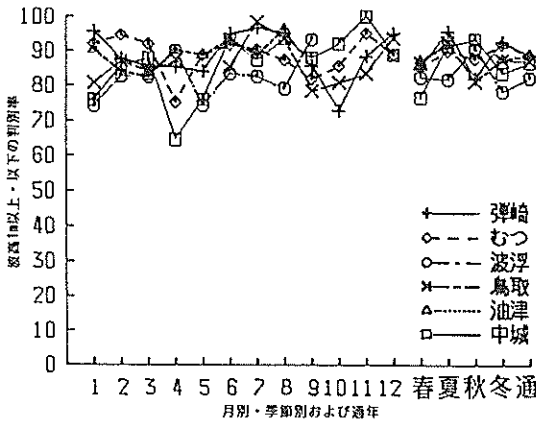


図-28 適中率(基準値1m)

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。

### 3.5 重回帰式を用いた波浪予測式の作成に必要な波浪観測データの期間に関する検討

統計モデルを用いた波浪予測手法は過去の波浪・気圧データ等に基づいて作成される。このため、所期の予測精度を得るために何年分のデータを観測、蓄積すべきかあるいは何年分のデータを用いれば安定した統計モデルが作成可能かを知っておく必要がある。この目的のため

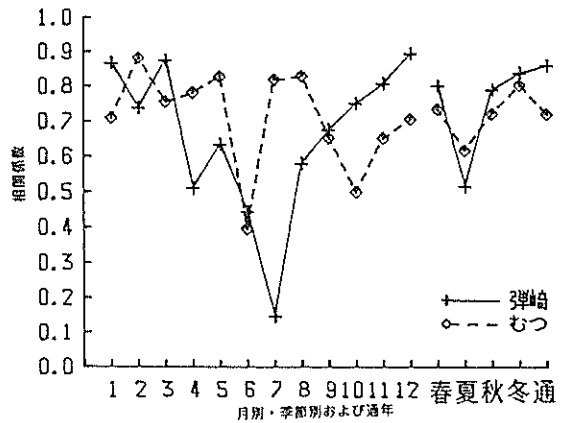


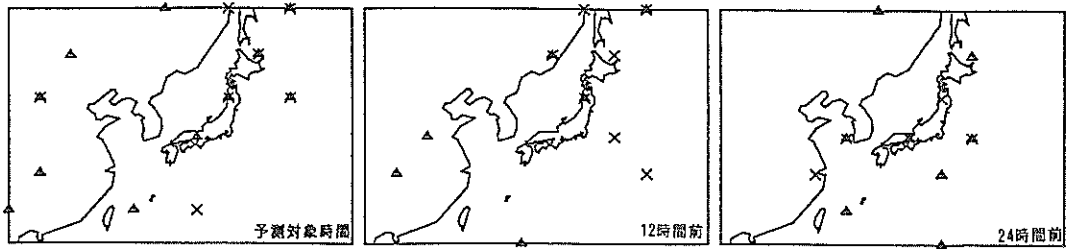
図-29 相関係数(波高, 風速を用いない場合)

に、3.1で用いたデータに更に1983年分の1年分のデータを追加して合計4年分のデータを用いて表-2のTYPE-4により予測式の作成を行った。また、1984年を対象として波浪予測を実施した。図-30はむつ小川原を対象として3年分のデータを用いた場合と4年分のデータを用いた場合の各季節別の選択された気圧測点の違いを示したものである。異なる期間のデータを用いることにより、選択された測点の数は若干異なるものの、両期間ともほぼ同様な測点を選択する傾向がある。図-31は3年分と4年分のデータを用いた場合のむつ小川原の波高予測結果の一例を示したものである。図中、破線は3年分、細破線は4年分のデータを用いた場合を示している。これによると両期間ともほぼ同様な推定結果となっている。図-32はむつ小川原を対象として1年分、3年分、4年分の季節別および4年分の全データを用いて波浪予測式を作成し、予測を実施した場合の実測値と予測値の相関係数を示したものである。図-32と図-25

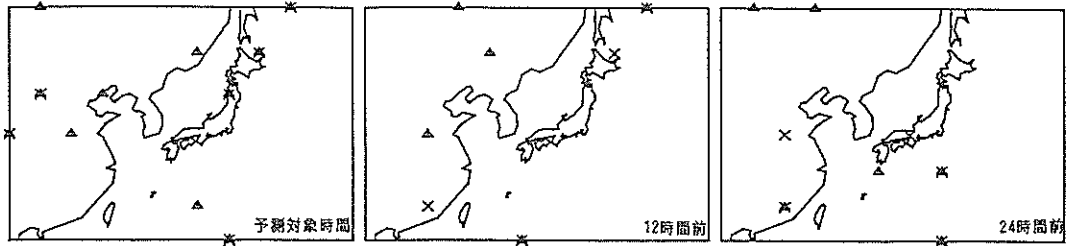
で相関係数が異なるのは、予測対象年が異なるためである。図-32に見られるように、1年分の各季節別のデータを用いて予測式を作成した場合、相関係数はかなり低く、また月毎の変動もかなり大きい。しかしながら、3年季別、4年季別、4年通年の結果はほぼ同程度の相関係数を示しており、季節により3年季別の予測精度が他に比べて若干低い傾向が見られる程度である。したがって、重回帰式を用いた波浪予測式を作成する場合には3年以上のデータが用いられるならばほぼ安定した予測式を作成可能であろう。

### 3.6 重回帰型波浪予測モデルに関する考察

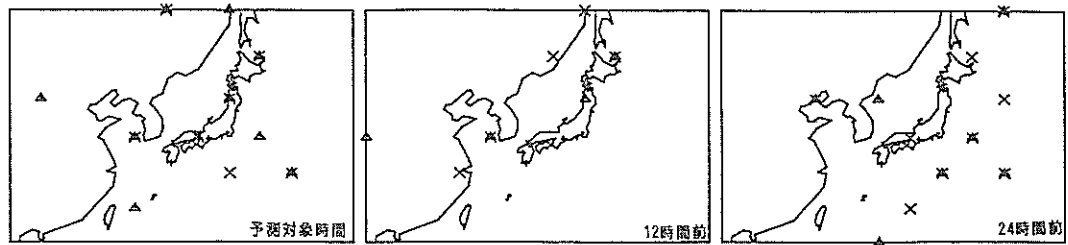
重回帰式を用いた波浪予測手法を、様々な海域、期間を対象として適用し、説明変数の選択等、種々の操作を導入して検討することにより、多くの知見が得られた。その結果、重回帰式を用いた波浪予測手法は、その適用対象、目的によっては、ある程度の誤差範囲内で有効な情報を提供し得るものであることが確かめられた。



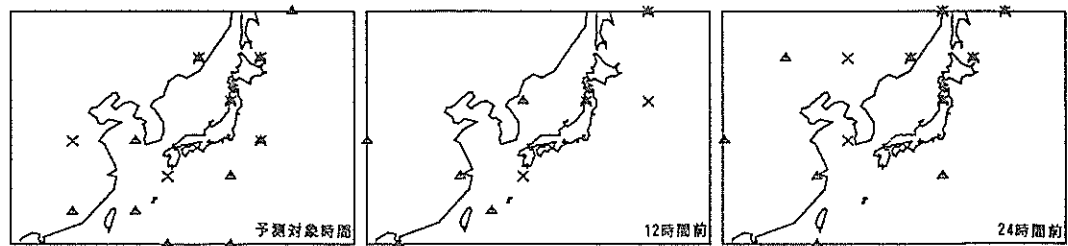
地点 <むつ(春)>



地点 <むつ(夏)>



地点 <むつ(秋)>



地点 <むつ(冬)>

統計年 3年	△
統計年 4年	×

図-30 AICによって選択された気圧測点(むつ小川原を対象として)



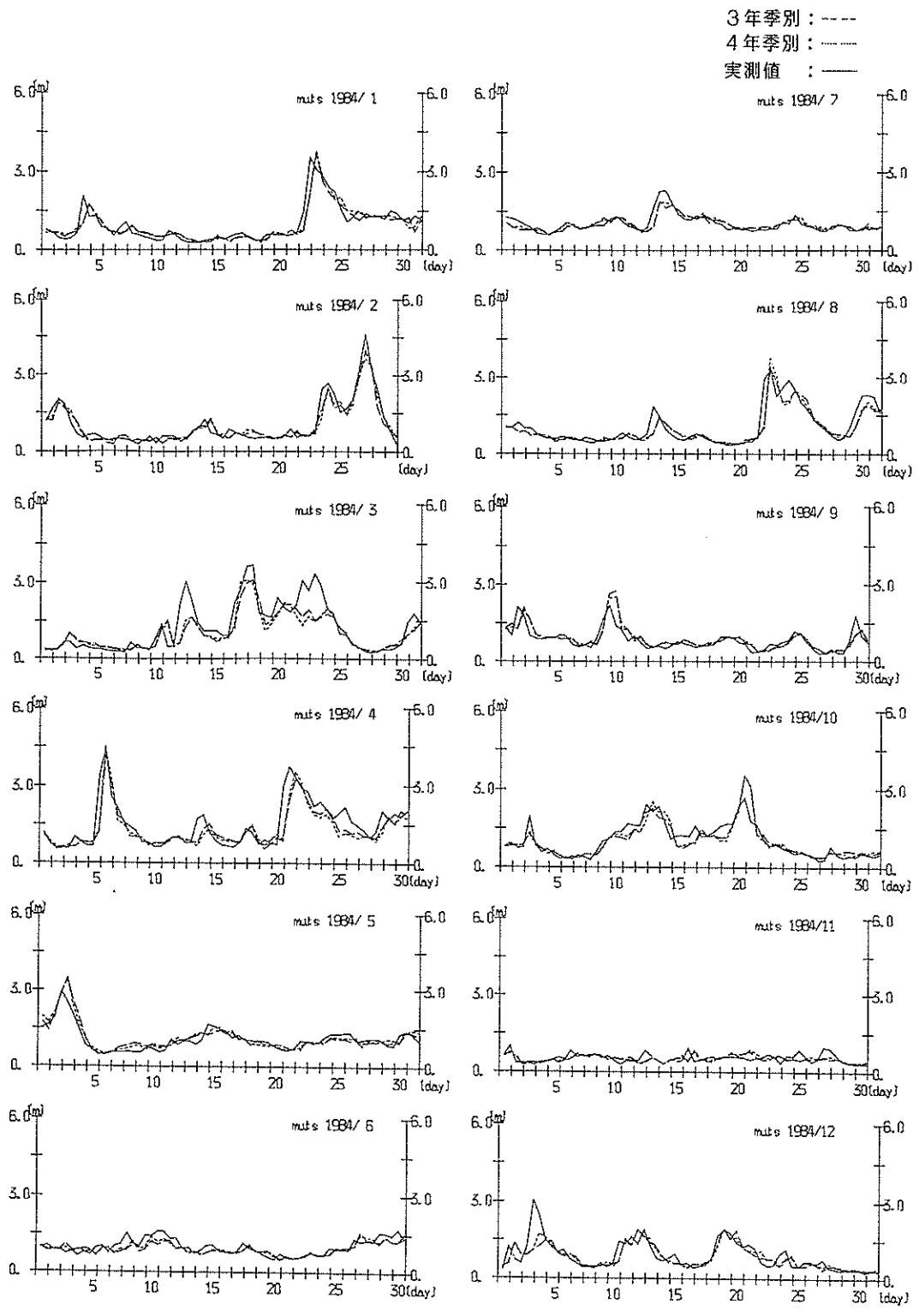


図-31 重回帰式の作成に用いたデータ期間の相違による波浪予測値の比較 (むつ小川原)

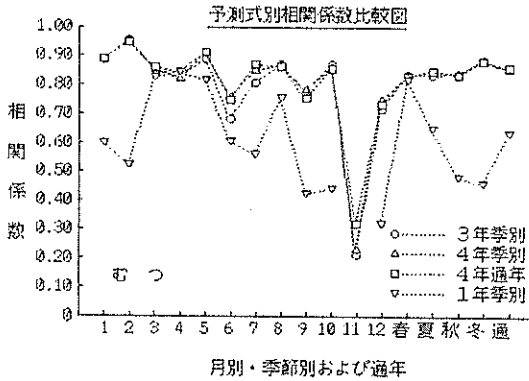


図-32 重回帰式の作成に用いたデータ期間の相違による予測精度の比較 (むつ小川原)

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ことが示唆されている。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・波浪間の物理量の時系列変動の特性を考慮した、より適切な統計モデルを模索する必要がある。

## 4. 分割表を用いた波浪予測

### 4.1 分割表の作成

母集団を2つ以上の特性についていくつかのカテゴリに分類し、各々のカテゴリについてその観測度数を求めたものを分割表と呼ぶ。分割表は当該特性間にもどのような関連があるのかを見るために作られる。有義波高や気圧値の時系列データのような連続型の変数も離散化することにより分割表の形に帰着させることができる。したがって、ここでは目的変数である有義波高が1.0m未満を「1」、1.0m以上を「2」と置くことにより2つのカテゴリに分類し、同様に複数の気圧測点の気圧値も各々適当な域値を設定することによりカテゴリ分けして分割表を作成し、両者の関連を見ることにより、波浪予測に利用することとした。

2つの特性についての観測度数を見たものを2次元分割表、3つ以上の特性についての観測度数を見たものを多次元分割表と呼ぶ。一般に所与のデータについて作られる分割表の次元が高くなる程そのデータの構造を詳し

く知ることができるが、与えられるデータは有限個であるから、説明変数の次数を高くすればする程推定された構造の不安定さも増す。そこで有効な予測を実施するためには与えられたデータの大きさを考慮した上で最適な次数を決定することが必要となる。また、予測の有効性は説明変数の組み合わせばかりでなく、説明変数のカテゴリの設定(域値の設定)の仕方にも強く依存する。したがってここでは、これらの問題点を考慮し、坂元により提案されたカテゴリカルデータのモデル分析法<sup>7)</sup>を利用して、有義波高および複数の気圧測点の気圧値を用いて、AIC最小化法により最適な分割表の自動作成を実施した。

坂元の方法による分割表の作成のための最適変数選択法の概略は以下のとおりである<sup>7)</sup>。

いま、目的変数を  $I_0$  とし、 $k$  個の説明変数  $I_1, I_2, \dots, I_k$  の候補が与えられた場合に目的変数と説明変数の組合せを考えると次のようなモデルで表される。

$$\begin{array}{l}
 \text{ブロック } k+1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{MODEL } (I_0 : I_1, \dots, I_k); \\ p(i_0 | i_1, \dots, i_k) = a(i_0 | i_1, \dots, i_k) \end{array} \right. \\
 \text{ブロック } k \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{MODEL } (I_0 : I_1, \dots, I_{k-1}); \\ p(i_0 | i_1, \dots, i_{k-1}) = a(i_0 | i_1, \dots, i_{k-1}) \\ \dots \dots \dots \\ \text{MODEL } (I_0 : I_2, \dots, I_k); \\ p(i_0 | i_1, \dots, i_k) = a(i_0 | i_2, \dots, i_k) \end{array} \right. \\
 \vdots \\
 \text{ブロック } 2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{MODEL } (I_0 : I_1); \\ p(i_0 | i_1, \dots, i_k) = a(i_0 | i_1) \\ \dots \dots \dots \\ \text{MODEL } (I_0 : I_k); \\ p(i_0 | i_1, \dots, i_k) = a(i_0 | i_k) \end{array} \right. \\
 \text{ブロック } 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{MODEL } (I_0 : \phi); \\ p(i_0 | i_1, \dots, i_k) = a(i_0) \end{array} \right.
 \end{array} \quad \dots (4)$$

ここに、 $i_j$  は変数  $I_j$  がとる値を示しており、 $p(\cdot | \cdot)$  は条件付確率、 $a(i_0 | i_1, \dots, i_k)$  は説明変数を  $i_1, \dots, i_k$ 、目的変数を  $i_0$  とするモデルである。分割表の場合にはモデルは多項式分布

$$\begin{aligned}
 M(n_1, \dots, n_c | p_1, \dots, p_c) &= \frac{n!}{n_1! \dots n_c!} p_1^{n_1} \dots p_c^{n_c} \\
 &= \frac{n!}{\prod_{j=1}^c n_j!} \prod_{j=1}^c p_j^{n_j} \dots \dots \dots (5)
 \end{aligned}$$

で与えられる。

式(4)のブロック  $k+1$  のモデルは最高次数  $k+1$  次のモデル、ブロック  $k$  に属するモデルは  $k$  個の説明変数か

ら1個を順に除去して得られる $k$ 次のモデルなどを意味する。また、ブロック2に属するモデルは2次元分割表の比較に用いられる2次のモデルであり、最後のブロックのMODEL ( $I_0; \phi$ ) はどの説明変数も採用せず目的変数に関する周辺分布だけで  $p(i_0 | i_1, \dots, i_k)$  を説明する1次のモデルである。したがって、これらのモデルの総数は  ${}_k C_k + {}_k C_{k-1} + \dots + {}_k C_0$ , すなわち  $2^k$  個である。

ところで、これらの説明変数の集合  $\{I_1, \dots, I_k\}$  を  $I$ , その任意の部分集合を  $J$  とおき、 $I$  と  $J$  のとる(格子点状の)値をそれぞれ  $i, j$  とおくと、式(4)に属するモデルは、

$$\text{MODEL}(I_0 | J); p(i_0 | i) = a(i_0 | j) \dots \dots \dots (6)$$

と表現できる。したがって、そのAICは、

$$\begin{aligned} \text{AIC}(I_0 : J) = & -2 \sum_{i_0, j} n(i_0, j) \ln \frac{n \cdot n(i_0, j)}{n(i_0) n(j)} \\ & + 2(c_0 - 1)(c_j - 1) \dots \dots \dots (7) \end{aligned}$$

で与えられる。ここで、

$n(i_0, j)$  : 変数  $I_0, J$  のとる値  $(i_0, j)$  に関する同時観測度数

$n(j)$  : 変数  $J$  に関する周辺度数

$c_j$  : 変数  $J$  の総カテゴリ数である。

また、 $n(\phi) = n, c_\phi = 1$  と規約する。坂元の方法とは式(4)で表される  $2^k$  個のモデルの族の中から式(7)で表されるAICを最小にするモデルを自動選択する方法である。

坂元の方法では、さらに上記の最適変数選択法に考察を加えて、分割表作成における最適なカテゴリー区分の選択も可能となっている。これは概念的には、つぎのように説明することができる。すなわち、坂元の方法では所与の説明変数によって作られ得る最多のカテゴリー・最高次の変数の組で定められる最も多い多重分割表を基礎におくが、説明変数の値の下での目的変数の条件付確率が同一と見なし得る限りで(説明変数のカテゴリーをプールして、したがって、場合によっては説明変数そのものもつぶして)パラメータ数の減少を図り、よってデータの無意味な統計的変動の影響を押しえて有意な構造を引き出すようになっている。明示的には2次元分割表であっても、明示されていない $k-1$ 個の説明変数の効果を無視した $k+1$ 次元分割表と見るのが坂元の方法の主眼点である。この見地からすれば、変数選択の問題も最適なカテゴリーの区分法の探索の問題も同等の問題と見なすことになる。坂元の方法の詳細については、文献7)

を参照されたい。

#### 4. 2 分割表による解析結果

3. に示した重回帰式を用いた波浪予測手法と同様に図-1に示す代表6地点を対象として1980年~1983年の4年分の有義波高および気圧データを用いて季節別に分割表を作成した。しかしながら、その結果はあまり芳しいものではなかったため、ここでは表-3にそれらの結果のうちの一例のみを示す。表-3はむつ小川原の春季の解析結果であり、以下ではこれを用いて説明する。表-3中、X(1)はむつ小川原の実測有義波高、X(2)は測点No.5の気圧値、X(3)は測点No.18の12時間前の気圧値を表す。また、RESPONSE VARIABLEは目的変数の意味であり、有義波高が1m未満を分類「1」、1m以上を分類「2」とし、また、気圧値に対しては右表のCLASS INTERVALにそれぞれの変数に対してその階級および域値を示している。これらの各々のカテゴリーについて観測度数を示したものが表-3の左表である。表-3よりX(2)は9個のカテゴリーに分類され、X(3)は3個のカテゴリーに分類されている。しかしながら、ほとんどの観測度数はX(2)のカテゴリー5~7に集中し

表-3 波浪予測のための分割表の作成例

RESPONSE VARIABLE					CLASS INTERVAL			
X(2)	X(3)	X(1)	1	2	観測度数	X(1):100 X(1):	1: 2:	1 2
1	1		0	0	0			
1	2		4	0	4	X(2):405	1:	978
1	3		0	0	0	X(2):	2:	985
2	1		0	0	0	X(2):	3:	992
2	2		4	1	5	X(2):	4:	999
2	3		0	0	0	X(2):	5:	1006
3	1		3	1	4	X(2):	6:	1013
3	2		9	4	13	X(2):	7:	1020
3	3		0	0	0	X(2):	8:	1027
4	1		5	1	6	X(2):	8:	1033
4	2		37	4	41			
4	3		1	0	1			
5	1		11	11	22	X(3):518	1:	1009
5	2		106	18	124	X(3):	2:	1025
5	3		6	0	6	X(3):	3:	1033
6	1		11	24	35			
6	2		122	46	168			
6	3		18	0	18			
7	1		2	24	26			
7	2		66	74	140			
7	3		15	0	15			
8	1		0	15	15			
8	2		2	46	48			
8	3		4	1	5			
9	1		0	1	1			
9	2		1	11	12			
9	3		0	0	0			
合計			427	282	709			

ており、X(2)は必要以上に細分化されているように思える。これは表-3の各カテゴリーを等間隔で分離したために生じた問題であり、表-3をもとにカテゴリーの再配分を実施する必要があるだろう。

表-3は次の様に利用できる。例えばいま、測点No.5で気圧値が1000mbであったとすると、X(2)のカテゴリー-5より、有義波高が1m未満の観測度数が123回、全観測度数が152回であることから、約80%で有義波高が1m未満であったことが分かる。さらに上記の条件に加えて、12時間前の測点No.18で1013mbであったとすると、X(2)がカテゴリー-5かつX(3)がカテゴリー-2で有義波高が1m未満の観測度数が106回、このカテゴリーに属する全観測度数が124回であることから、約85%が有義波高が1m未満であったことが分かる。これらの情報は予想天気図が与えられ、必要な気圧測点の気圧値が与えられるならば、波浪予測のための基礎資料として使用できよう。

特別な場合として、将来の気象予報が不確かであり、特定の測点の気圧が何mb以上、あるいは何mb以下のような情報しか与えられない場合には、次のような利用の仕方もある。まず、表-3の分割表の結果を整理し、X(2)あるいはX(3)の2測点の気圧値をパラメータとして、1m未満の有義波高の出現確率を求めると表-4が得られる。例えばいま、測点No.5で気圧値が1000mb以下であろうと予想すると、表-4より1000mbが属する階級値以下(1006mb以下)で有義波高が1m未満であった確率は82%程度であることが分かる。逆に1000mbが属する階級値以上(999mb以上)で有義波高が1m未満であった確率は60%程度であったことが分かる。同様に有義波高の予想時刻の12時間前の測点No.18で1013mb以下であろうと予想すると、その階級値以下での有義波高1m未満の出現確率は約58%、その階級値以上でのそれは約60%であることが分かる。さらに2つの気圧測点の情報を同時に使用すると、例えばX(2)が1006mb以下で、かつX(3)が1025mb以上と予想する場合には、この条件を満たす(X(2), X(3))の組合せは表-3から(1, 2), (1, 3), (2, 2), (2, 3), (3, 2), (3, 3), (4, 2), (4, 3)となる。この場合には観測度数の総和が64回に対して有義波高が1m未満となる度数は55回であり、この場合の有義波高1m未満となる出現確率は約86%であることが分かる。このように分割表を作成することにより、その利用の仕方によっては多様な状況下の波浪予測のための有用な情報を提供できる可能性がある。

表-4 波浪予測のための分割表の加工例

測点405

階級	階級値 (mb)	観測度数	波高1m以下の出現頻度	各階級値以下で判断した的中率(%)注1)	各階級値以上で判断した的中率(%)注1)
1	978	4	4	100(4/4)	60(427/709)
2	985	5	4	80(4/5)	60(423/705)
3	992	17	12	71(12/17)	60(419/700)
4	999	48	43	89(43/48)	60(407/683)
5	1006	152	123	81(123/152)	57(364/635)
6	1013	221	151	68(151/221)	52(251/483)
7	1020	181	83	46(83/181)	34(90/262)
8	1027	68	6	9(6/68)	0.09(7/81)
9	1033	13	1	8(1/13)	0.09(1/13)

測点518

階級	階級値 (mb)	観測度数	波高1m以下の出現頻度	各階級値以下で判断した的中率(%)注1)	各階級値以上で判断した的中率(%)注1)
1	1009	109	32	29(32/109)	60(427/709)
2	1025	555	351	58(353/604)	66(395/600)
3	1033	45	45	60(427/709)	60(27/709)

注1) 的中率は、その階級値までの累積観測度数に対して波高1m以下の出現度数の割合を求めたものである。すなわち、次式によって計算する。

$$\text{階級値以下で判別した場合の的中率} = \frac{\text{波高1m以下の累積出現頻度}}{\text{その階級以下の累積観測度数}}$$

#### 4.3 分割表を用いた波浪予測手法に関する考察

分割表を用いた波浪予測手法は、回帰式を用いる波浪予測手法と異なり、有義波高の値そのものは推定できない。しかしながら、ある気象条件下での港湾工事等の作業限界波高以上の波高が生起する確率、あるいはそれ以下の波高が生起する確率等が過去のデータに基づいて与えられるため、何らかの判断を下さなければならない状況においては、貴重な情報源である。しかしながら、分割表を作成するに際しては、説明変数の選択の仕方や、あるいは連続変量を説明変数として用いる場合にはそのカテゴリー分けの仕方等、多くの不明確な問題がある。ここではAIC最小化法を用いた坂元の方法により分割表を作成したが、その結果はあまり芳しくなかった。問題点の一つとしては、気圧値のカテゴリー分けの際のプールの形式として等間隔プールを用いたことがあげられる。坂元の方法では相隣るカテゴリーでの不等間隔プールの使用も可能であり、より良い分割表を作成するためには不等間隔プールを用いるべきであったように思われる。また、分割表を作成するに先立って、有義波高および気圧値に何らかの処理を施し、統計的な意味で性質の良い変数に変換した後、分割表を作成すべきであったかも知れない。分割表の作成に際しては、目的変数お

よび説明変数の分布に何ら制約はない。このため有義波高および気圧値は生のままの値を用いて分割表を作成した。分割表の作成は幾つかの変数の間に種々の形の条件付独立を想定することによって、種々の程度に単純化された構造を持つ確率分布の族を得ることであると言える。坂元の方法では、これらの分布の族の中からAIC最小化法によって現在のデータの特性を最もよく表現するものを選び出し、予測に有効な構造を得ることを期待して作成されたものである。しかしながら、与えられたデータの分布が不適切な偏りを持つ場合、この方法によっても適切な分割表は作成し得ないかも知れない。著者らは統計学の専門家ではないので、これらの考察には勘違いがあるかも知れない。何れにしても、これらの問題は今後、数値実験的に検討して行く予定である。

## 5. 多変量自己回帰式を用いた波浪予測

### 5.1 多変量自己回帰モデル

3. で述べた重回帰型の波浪予測式では、空間的に分布する種々の変数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。我々の所期の目的を達成するためには、その対象・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・波浪間の物理量の時系列変動の特性を考慮した、より適切な統計モデルを適用する必要がある。この要件を満たす最も単純な統計モデルとして多変量自己回帰式を用いる方法がある。

多変量の時系列  $X(n) = (x_1(n), \dots, x_k(n))'$  の現在の値を過去の値  $X(n-1), \dots, X(n-m)$  と白色雑音を用いて説明すると次のようなモデルが考えられる<sup>8),9)</sup>。

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) X(n-m) + U(n) \quad \dots\dots(8)$$

ここに、 $A(m)$  は  $k \times k$  行列で自己回帰係数行列と呼ばれる。 $U(n) = (u_1(n), \dots, u_k(n))'$  は  $k$  次元正規白色雑音で、 $E$  を期待値、 $'$  は転値を意味するものとする。このとき、

$$EU(n) = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad EU(n)U(n) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \dots & \sigma_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ \sigma_{k1} & \dots & \sigma_{kk} \end{pmatrix} = W \quad \dots\dots(9)$$

$$EU(s)U(t)' = [0] \quad (t \neq s \text{ のとき})$$

$$EU(n)X(n-m)' = [0] \quad (m \geq 1 \text{ のとき})$$

を満たす。 $W$  は正定値行列である。式(8)~(9)によって定まる多変量時系列モデルを多変量自己回帰モデルと呼

ぶ。

多変量時系列  $X(n)$  は平均値が0であるものとする。このとき時系列にエルゴード性を仮定すると、観測値  $X(1), X(2), \dots, X(N)$  が与えられた場合には相互共分散関数は

$$C(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=m+1}^N X(n)X(n-m)' \quad \dots\dots(10)$$

によって推定できる。各  $C(m)$  は  $k \times k$  行列で、その成分  $c_{ij}(m)$  は

$$c_{ij}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=m+1}^N x_i(n)x_j(n-m) \quad \dots\dots(11)$$

によって定義される。このとき、式(8)の自己回帰係数  $A(m)$  は次式の連立方程式の解として与えられる。

$$C(m) = \sum_{j=1}^M A(j)C(m-j) \quad (m=1, \dots, M) \quad \dots\dots(12)$$

また、白色雑音の共分散行列の推定値は次式で与えられる。

$$\bar{V}_m = C(0) - \sum_{j=1}^M \bar{A}(j)C(-j) \quad \dots\dots(13)$$

式(12)および式(13)で求められる自己回帰モデルのパラメータは Yule-Walker 推定値と呼ばれる。

多変量時系列モデルの場合も AIC によって最適な次数を決定することができる。AIC は一般に、式(2)で定義される。 $m$  次の多変量自己回帰モデルの最大対数尤度は

$$L = -\frac{N}{2} (\ln 2\pi | \bar{V}_m | + k) \quad \dots\dots(14)$$

によって与えられる。一方、 $m$  次の多変量自己回帰モデルのパラメータ数は

$$mk^2 + \frac{k(k+1)}{2} \quad \dots\dots(15)$$

であるので、AIC は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$AIC(m) = N \ln 2\pi | \bar{V}_m | + Nk + 2mk^2 + k(k+1) \quad \dots\dots(16)$$

なお、式(12)~(16)により多変量の時系列データを多変量自己回帰モデルにあてはめることができるが、自己回帰モデルのあてはめを行う最高次数  $M$  は高々  $N/5k$  程度にとどめる。一応の目安として  $2\sqrt{N}/k$  あるいは  $3\sqrt{N}/k$  とする。式(12)の連立方程式には  $mk^2$  個の未知パラメー

タが含まれている。また、次数  $m$  も未知であるので  $M$  を考慮する最大の次数として実際には  $m = 1, \dots, M$  のすべてについてこのような方程式を解かなければならない。この計算を効率よく行うための方法としてレビンソンの方法がある<sup>8),9)</sup>。

多変量時系列データに多変量自己回帰モデルをあてはめる他の方法としては、式(12)を用いず、直接に式(8)に最小自乗法を適用し、観測データから構成される行列を上三角行列に変換する Householder 変換と AIC 最小化法を組合せた方法がある<sup>4)</sup>。この方法によれば、観測データから構成される行列をいったん Householder 変換により上三角の行列に変換すれば、設定されたモデル次数の範囲内ですべての次数の AIC が容易に算出し得る。このため、プログラミングでの取り扱いが便利であり、観測データの追加、あるいは回帰係数の追加や削除が容易に行える等の利点がある。特に各変数ごとに異なるモデル次数を持つ多変量時系列データに多変量自己回帰モデルをあてはめる場合、この方法を用いることにより、さらに推定精度の良い回帰係数の組が得られる可能性がある<sup>10)</sup>。そこで、ここでは多変量時系列  $X(n)$  が各変数  $x_i(n)$  ごとに異なる最適モデル次数を持つ可能性があることを考慮して、後者の Householder 変換および AIC 最小化法を組合せた多変量自己回帰モデルのあてはめ法を採用することとした。

### 5. 2 多変量時系列の予測

多変量時系列  $X(n)$  に対して多変量自己回帰モデルが求められると、その1期先予測値は

$$\hat{X}(n+1) = \sum_{i=1}^m A(i) X(n+1-i) \dots\dots\dots (17)$$

によって求めることができる。また、1期以上の長期予測が必要な場合にはすでに求められた予測値を右辺に次々に代入することによって求められる。例えば2期先の予測は

$$\hat{X}(n+2) = A(1) \hat{X}(n+1) + \sum_{i=2}^m A(i) X(n+1-i) \dots\dots\dots (18)$$

で求められる<sup>9)</sup>。

### 5. 3 多変量自己回帰式の作成

多変量自己回帰式を多変量時系列データにあてはめる場合、すべてのデータが連続的な時系列データとして与えられる必要がある。そこで、図-1に示す代表6地点を対象として、1980年~1983年までの波浪観測記録の測得状況を検討し、欠測の少ない1年分のデータを用いて

多変量自己回帰式を作成することとした。また、欠測部には3. で述べた重回帰式を用いた波浪予測結果を用いてこれを補間した。表-5に多変量自己回帰式のあてはめに用いた期間(年)および予測精度の検討のための波浪予測期間(年)を示す。また、図-33は重回帰式を用いて欠測部を補間した結果の一例である。

すべての気圧測点の気圧値の時系列データを用いて多変量自己回帰式を作成すれば、プログラム・メモリーおよび計算時間も膨大となり、また有義波高の予測に何ら関係のない説明変数を導入することにより逆に予測値に悪い影響をもたらすことがある。そこで有義波高および気圧値の時系列データを多変量自己回帰式にあてはめるに際しては、図-14に示した有義波高と気圧値の相互相関係数を参考にして、説明変数として用いる気圧測点を選定した。この際、有義波高と気圧値の相互相関係数で北西部でかなり大きな相関を示す測点、あるいはタイ

表-5 波浪予測式の作成に用いた同定期間と予測期間

地点名	同 定 期 間	予 測 期 間
弾 崎	1980	1984
むつ小川原	1983	1984
波 浮	1982	1981
鳥 取	1982	1981
油 津	1981	1980
中 城	1982	1984

ム・ラグが大きく、かつ相関がやや大きめの測点等を気圧の説明変数として選定することとした。しかしながら、波浪予測対象地点から気圧測点間隔で4格子以上離れると、有義波高と気圧との相関は小さくなる。また、事前の検討結果によれば、説明変数として用いる気圧測点の数が4点の場合と5点を採用する場合とでは、点数を増やしても多変量自己回帰式の次数(あるいはパラメータ数)は変化せず、予測精度にもほとんど向上が見られなかった。そこで、予測対象地点から4格子を越さない範囲で4点の気圧測点を採用することとし、数回の試算によって説明変数としての気圧測点の選択を行った。なお、今回の検討では表-6に示す5種類の条件でそれぞれ波浪予測式を作成し、2. で述べた結果と併せて検討することとした。

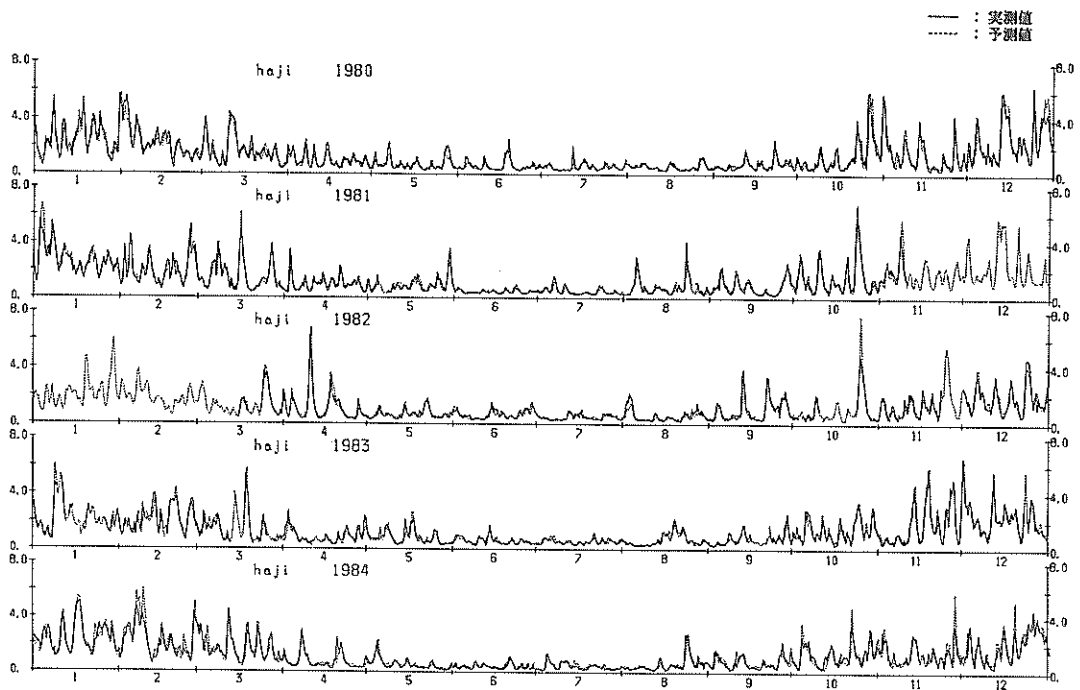


図-33 重回帰式を用いた有義波高の欠測部の補間例

#### 5. 4 多変量自己回帰式を用いた波浪予測結果

図-34に各波浪予測地点別に選択した気圧測点を示している。図中、■は表-6のType-1~Type-3で共通に選択された測点、□はType-2あるいはType-3で選択された測点、△はType-1でのみ選択された測点を示している。図-34より、各気圧測点はそれぞれの波浪予測対象地点の沖合で選択されており、鳥取と油津を除いた4地点ではType-1~Type-3とも同じ気圧測点を選択されている。なお、Type-4およびType-5ではType-3と同じ測点を採用して以下の解析を実施した。また、Type-5ではType-4と同じ自己回帰

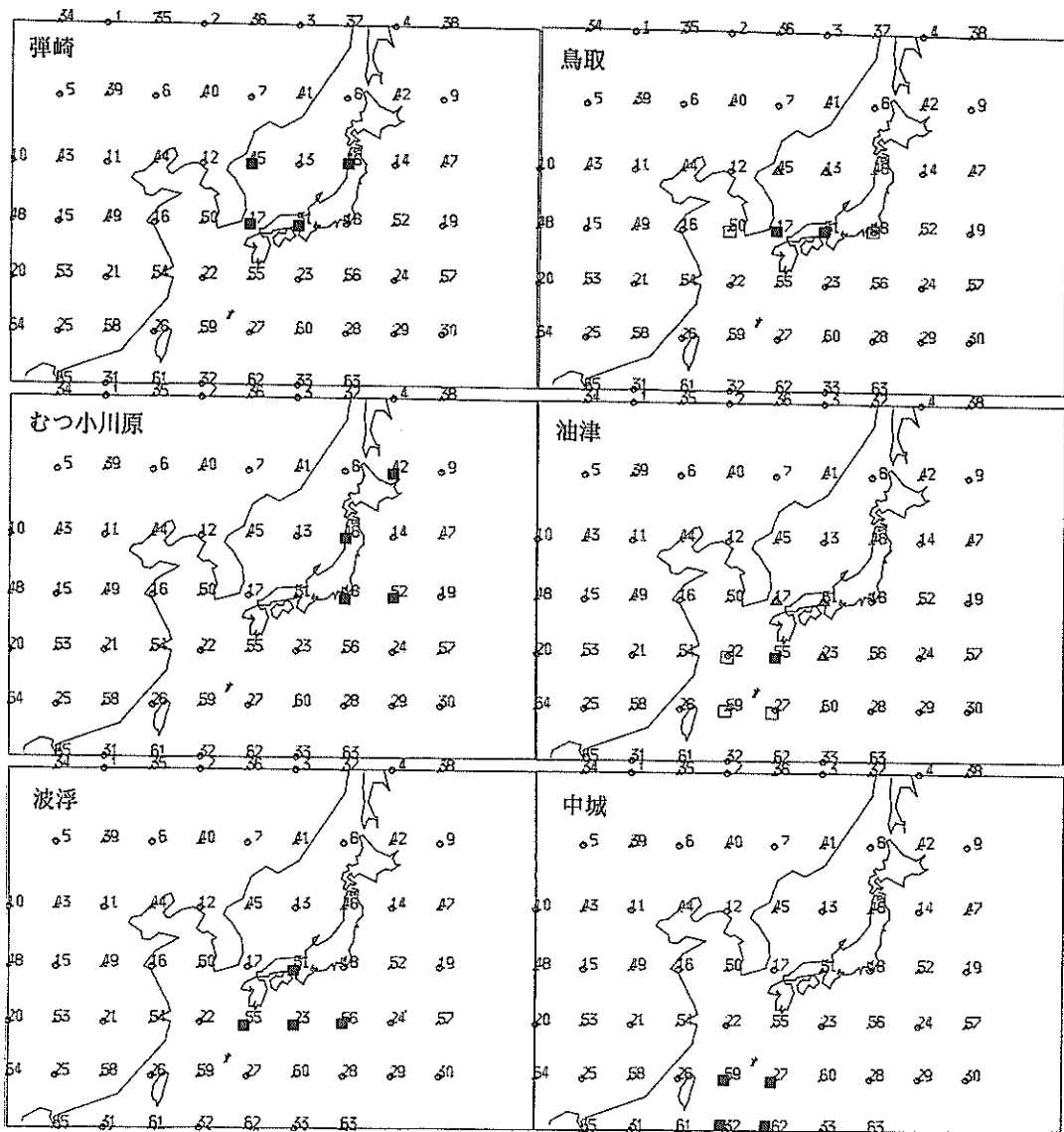
係数を用い、3日先までの予想天気図が与えられているものと想定して3日先までの気圧値を用い、有義波高は式(7)で予測された有義波高を逐次用いることにより3日先の波浪を予測したものである。

図-35~図-37に弾崎を対象として、それぞれType-1~Type-3の条件で波浪予測を実施した結果を示す。何れの条件でもあまり大差がないように見えるが、Type-1は他のケースに比べてやや推定精度が劣るように見受けられる。また、Type-2では予測値と実測値との時間的なズレが他のケースに比べて大きめのように思われる。したがって、Type-1~Type-3ではType-3がやや予測精度が高いように思われる。

図-38に示すType-4は図-37のType-3より予測値が滑らかに変化しており、特に1、2月の高波高はほぼ遅延なく予測し得ている。Type-1~Type-3では多変量自己回帰式の作成に1ヶ月分のデータのみを使用しており、安定した回帰係数を求めるにはデータが少な過ぎるため、予測値が不安定になる可能性がある。一方、Type-4では1年分のデータを使用しているため、データ数としては十分と思われるが、季節ごとの特性の相違は無視される。これがType-3とType-4の予測値の相違として現れているのであろう。

表-6 予測式の条件

予測式型	変換方法		係数算出期間	予想対象期間	予想天気図
	波高	気圧			
TYPE-1	対象変換	無変換	毎月	12時間後	無し
TYPE-2	変化量	変化量	毎月	12時間後	無し
TYPE-3	対象変換	トレンド除去	毎月	12時間後	無し
TYPE-4	対象変換	トレンド除去	年間	12時間後	無し
TYPE-5	対象変換	トレンド除去	年間	72時間後	72時間後



■：全タイプでの採用点  
□：生データ以外での採用点  
△：生データのみでの採用点

図-34 採用された気圧測点の分布（地点別）



— : 実測値  
 - - - : 予測値

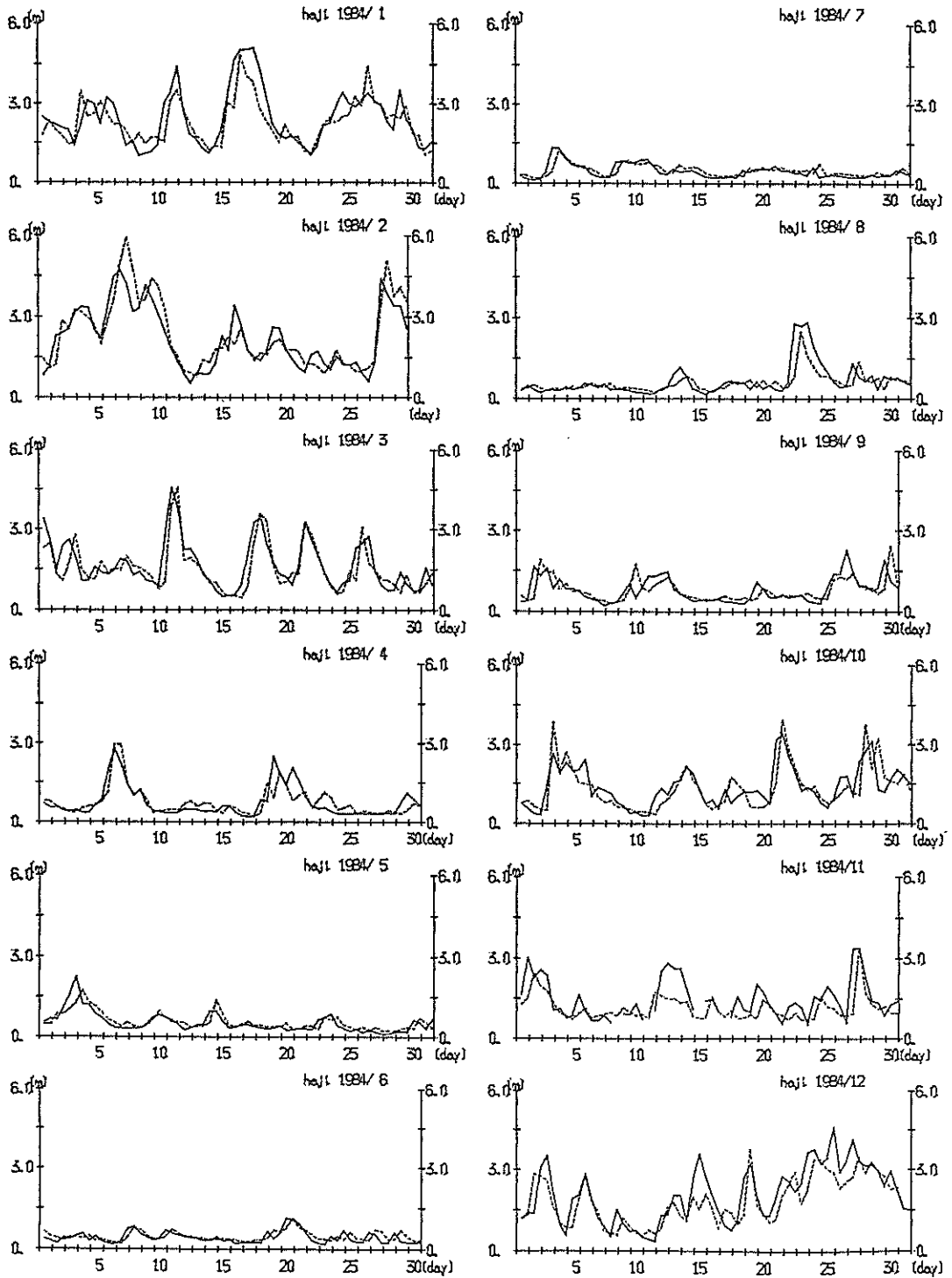


図-35 弾崎の波高予測結果 (TYPE-1)

— : 実測値  
 - - - : 予測値

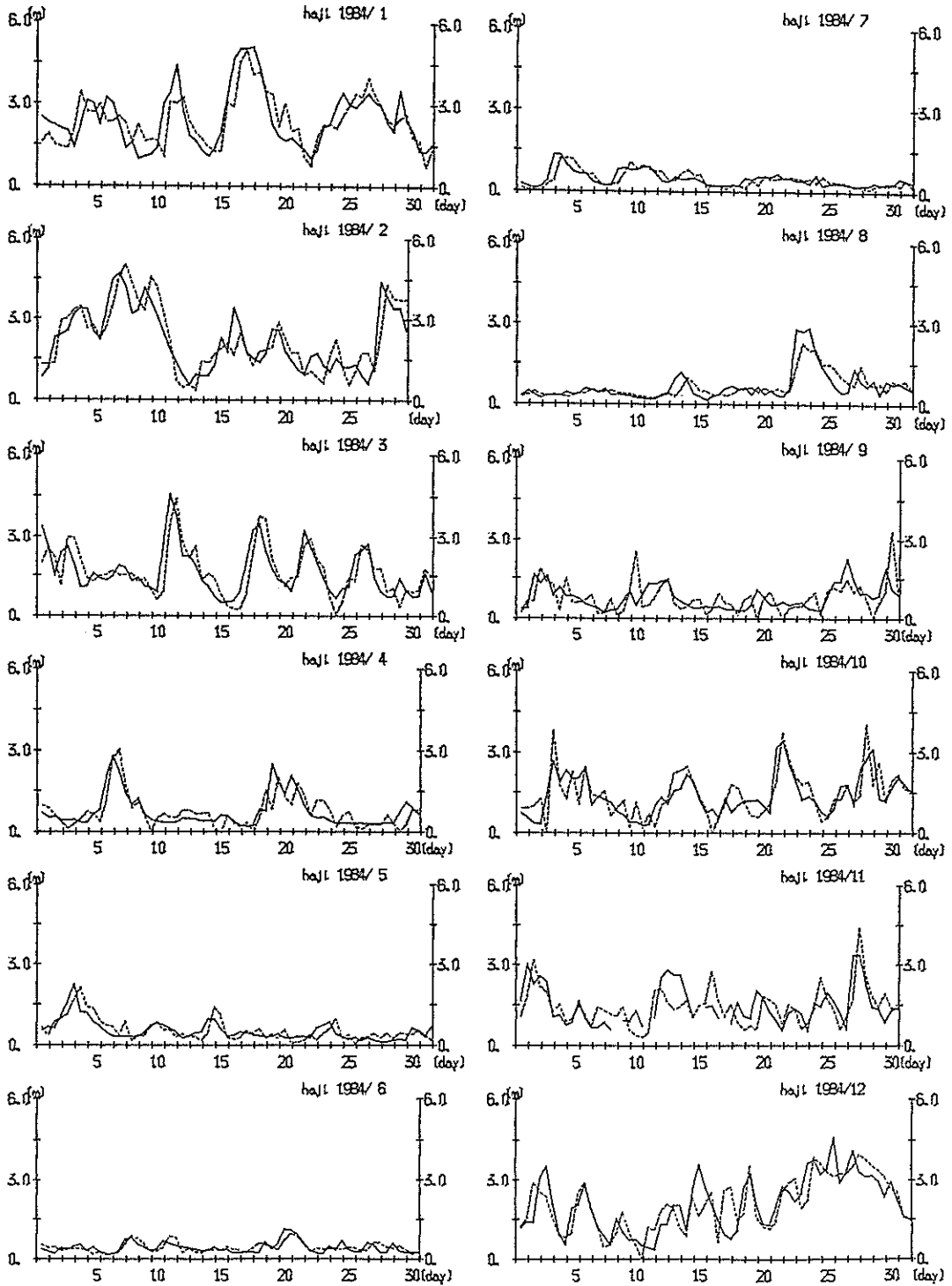


図-36 弾崎の波高予測結果 (TYPE-2)

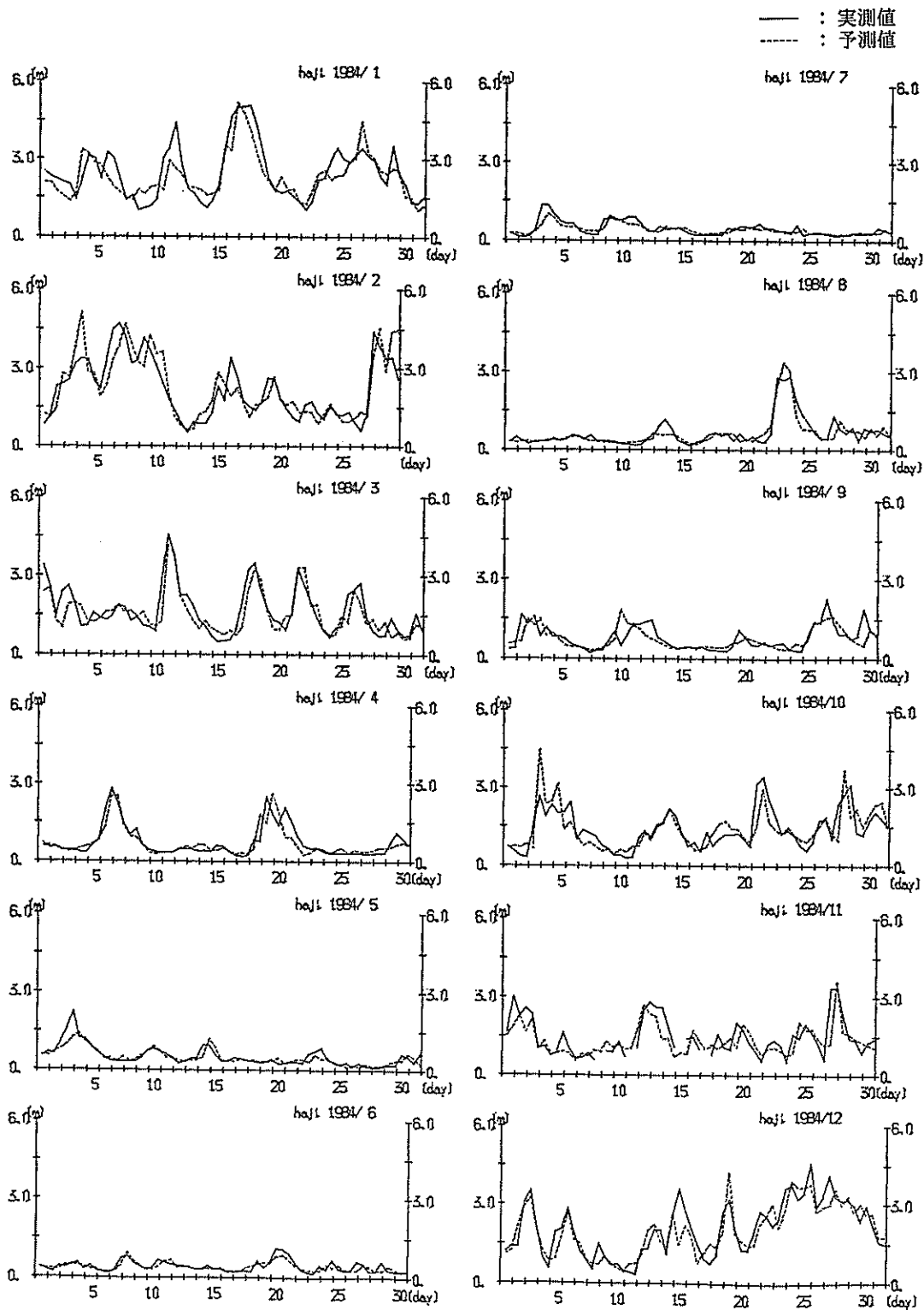


図-37 弾崎の波高予測結果 (TYPE-3)

— : 実測値  
 - - - : 予測値

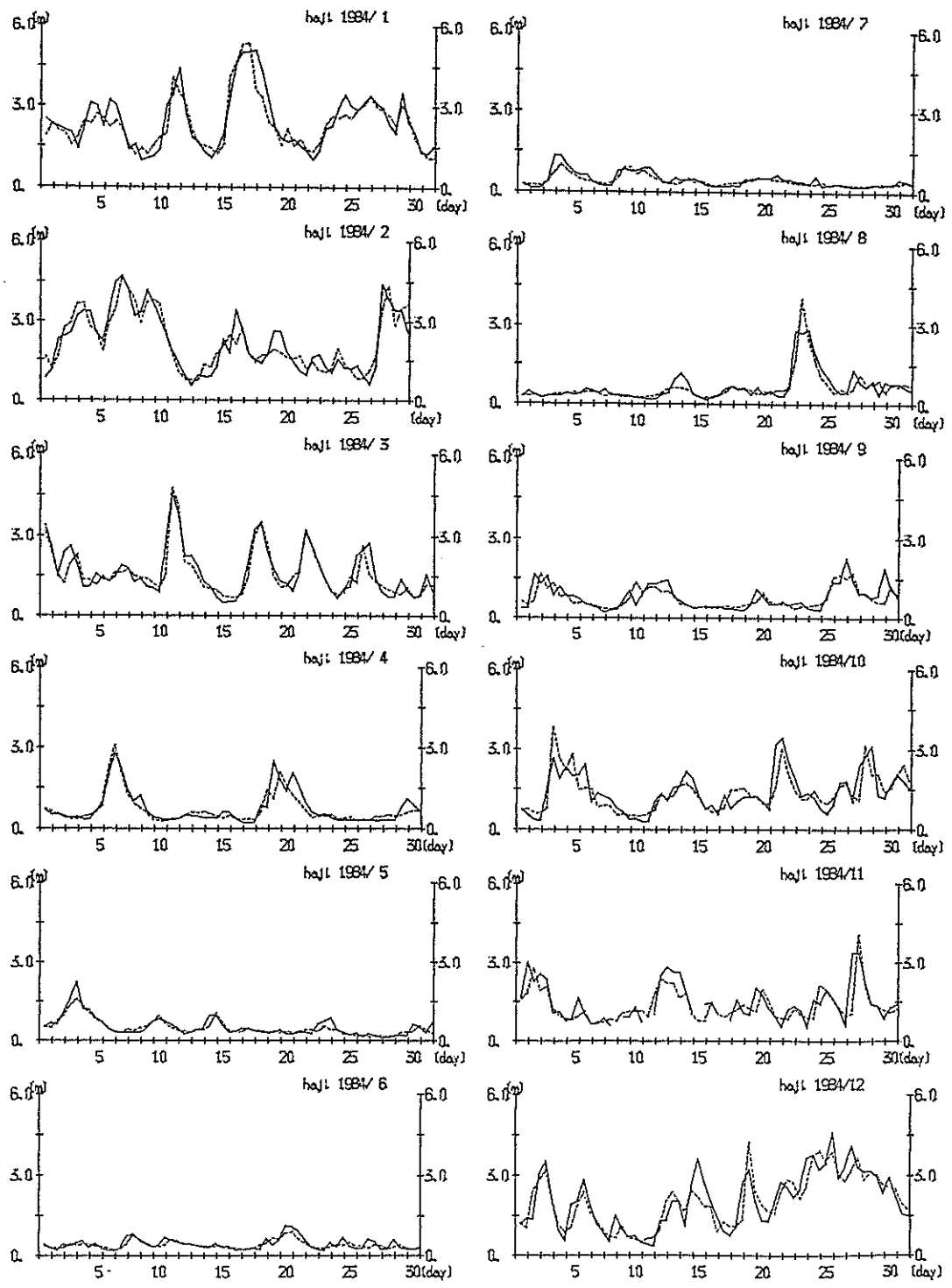


図-38 弾崎の波高予測結果 (TYPE-4)

—— : 実測値  
 - - - - : 予測値

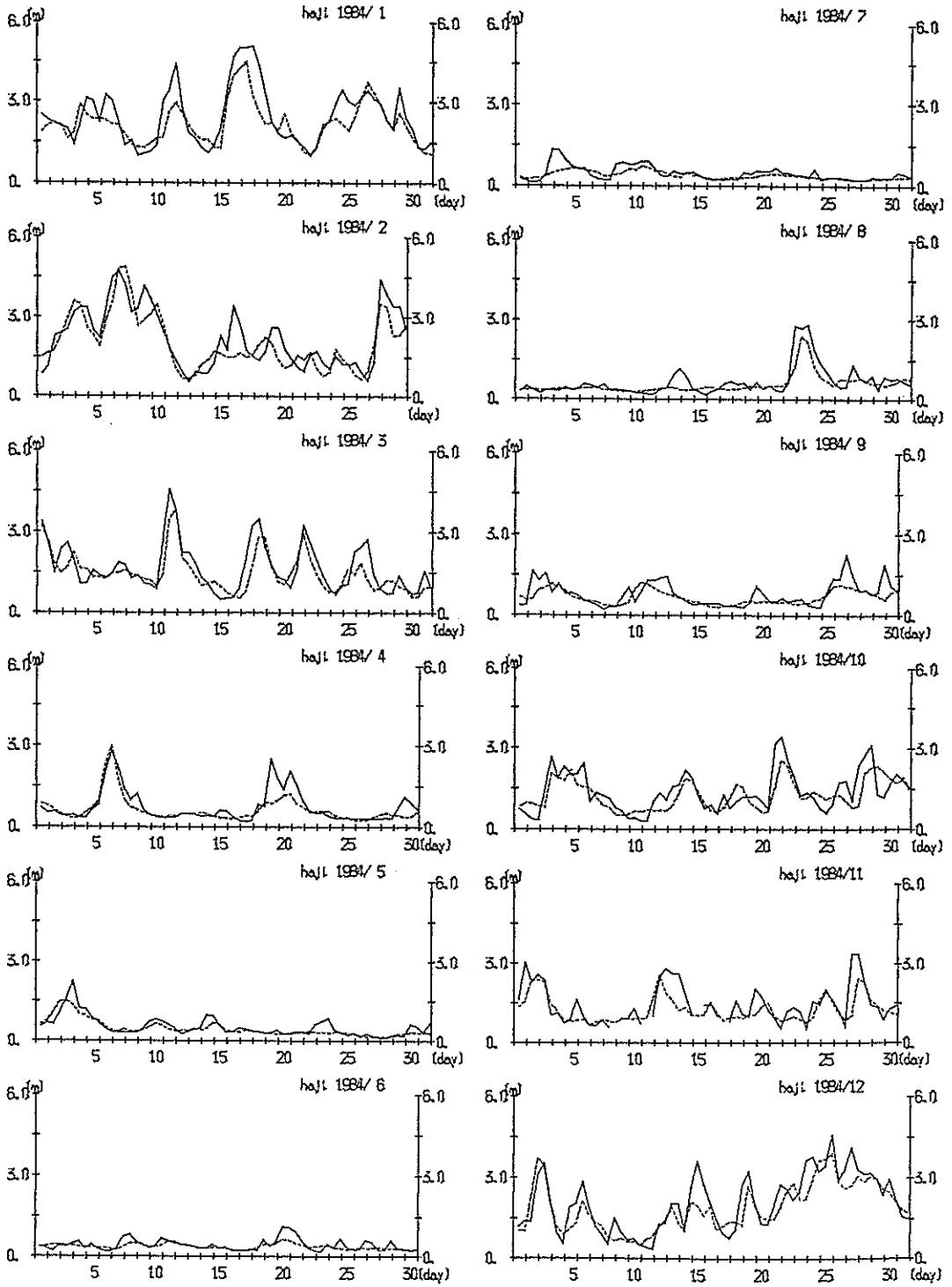


図-39 弾崎の波高予測結果 (TYPE-5)

図-39に示す Type-5 は予測値と実測値の値のずれは大きい、3日先の予測値であることを考えると、かなり良い推定値であると言える。この検討とは別に、重回帰式を用いた波浪予測手法により3日先までの波浪予測を実施しているが、その結果は芳しいものではなかった。多変量自己回帰式を用いた波浪予測手法では気圧値として3日先までの正しい気圧値を入力しているものの、同様な入力データを用いた重回帰式による方法に比べてやや良い予測値を推定し得ており、本方法の問題点をさらに検討して改良することにより、実用的な波浪予測手法を開発し得る可能性がある。

#### 5.5 多変量自己回帰式を用いた波浪予測手法の精度の検討

多変量自己回帰式を用いた波浪予測手法の精度を検討するため、予測値と実測値の誤差の標準偏差、変動係数、予測値と実測値の相関係数および予測値を1m以上と推定し、実際に1m以上の有義波高が観測された波高1m以上の適中率を算出し、予測地点別、月別および通年で各々のケースの予測精度を検討した。

図-40は各予測地点別に表-6の Type-1~Type-3の予測精度の月別、通年で比較を行ったものである。図-40から明らかなように、いずれの地点でも Type-3が予測精度が良く、月別の変動も小さいようである。地点別に見ると、変異係数では鳥取、弾崎は冬季に予測精度が良く、むつ小川原は初夏に予測精度が良く、油津では台風シーズンに予測精度が低下する等の特徴が現れている。しかしながら、波高1m以上の的中率は弾崎で月別の変動がやや大きめであるほかは、各地点とも90%前後で安定しているように思われる。

図-41は地点別に Type-3と Type-4、すなわち多変量自己回帰式のあてはめに用いたデータが1ヶ月分および1年分の場合の予測精度の比較を行ったものである。図-41に見られるように、いずれの地点でも通年の全データを用いた方が概ね予測精度が良い。しかしながら、月によってはむしろ Type-3の方が予測精度が良いところもある。これは5.4でも述べたが、Type-3では多変量自己回帰式の作成に1ヶ月分のデータのみを使用しており、安定した回帰係数を求めるにはデータが少な過ぎるため予測値が不安定になる可能性があり、一方、Type-4では1年分のデータを使用しているため、データ数としては十分と思われるが、季節ごとの特性の相違は無視されているためであろう。

図-42は12時間後予測と3日後予測の予測精度の比較を行ったものである。当然のことながら、各地点とも3日後予測の方が予測精度が低下するが、12時間後予測の

精度にはほぼ比例して予測精度が低下しており、地点別あるいは月別に極端な予測精度の低下は見られない。今後さらに改良を加えることにより、3日程度の実用的な短期波浪予測手法の一方法として開発し得る可能性がある。ただし、今回の検討では3日先までの気圧値として、あらかじめ与えられた地上天気図から読みとられた気圧値を用いており、実際の現場では予想天気図の気圧値を使うことになるので、予想天気図の予測精度を別途検討しておく必要がある。

#### 5.6 多変量自己回帰型波浪予測手法の考察

多変量自己回帰式を用いることにより、複数の気圧値の時間的な変動と有義波高の時間的な変動を簡単な線形式で結び付け、重回帰式を用いる場合よりもやや物理的な予測手法であるとして、予測手法の検討を行った。本方法を用いることにより、気圧測点の数を減らすことができ、より実用的ではあるが、安定した回帰係数を推定するためには、より長期間のデータを必要とする。また、データの欠測が大きな障害となる。さらに、今回の場合には思考錯誤的に気圧測点の選定を行ったが、著者らの考えでは気圧測点が近過ぎたように思われる。多くの気圧測点を採用すれば多重共線性の問題もあり、気圧測点の選定は注意深く行わなければならない。また、気圧の時系列データに含まれる長周期変動を除くため、移動平均を実施して生の気圧値から差し引いて使用したが、実際の子測作業の上では煩雑であろう。気圧値に含まれる長周期成分を除去する方法として、空間的な気圧勾配を説明変数として採用することも考えられる。単に多変量自己回帰モデルとは言っても、その説明変数に何を用いるのか、どの気圧測点を選択するのか、また、元のデータに何らかの統計的処理を施して用いるのか等、特定のモデルを作成する場合にはその選択の自由度が極めて大きい。今回の検討ではその中のほんの数例について検討しただけである。今後、さらに大気・波浪間の物理特性を考慮して、また、与えられたデータの統計的な特性を考慮して、より妥当な形が多変量自己回帰モデルを開発して行く必要がある。

## 6. あとがき

統計的波浪予測手法として単純な重回帰式、多変量自己回帰式、分割表を用いる方法の3方法を対象として、その適用性を検討した。前2者は共に有義波高の予測値を単純な回帰式を用いて推定する方法であり、回帰式の作成のために過去の観測データが使われる。分割表を用いる方法はそれら2つの方法とは異なり、予測値を推定するものではないが、過去の観測結果に基づいて、対象

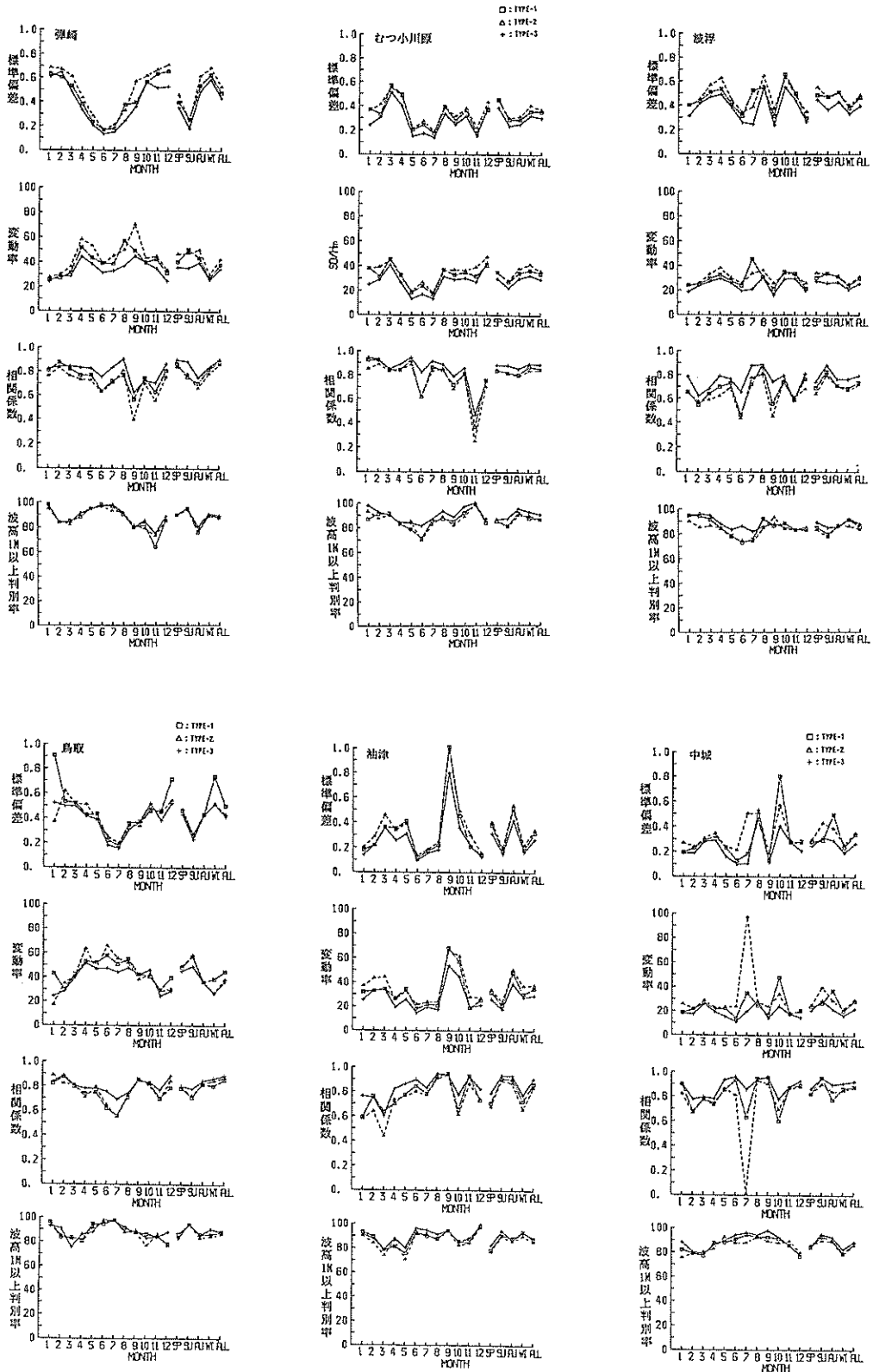


図-40 予測式の相違による予測精度の比較 (TYPE-1 ~TYPE-3)

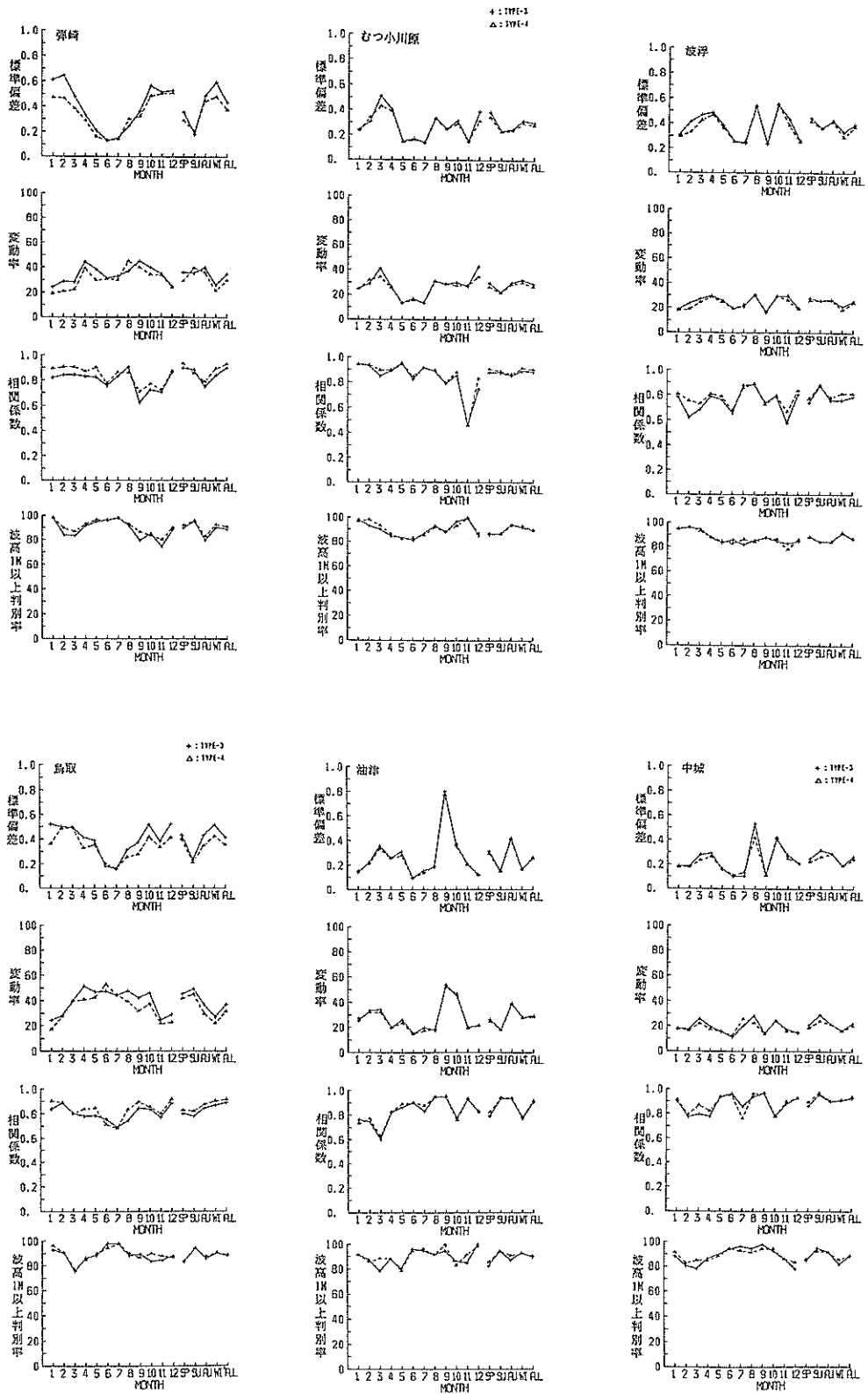


図-41 予測式の相違による予測精度の比較 (TYPE-3とTYPE-4)



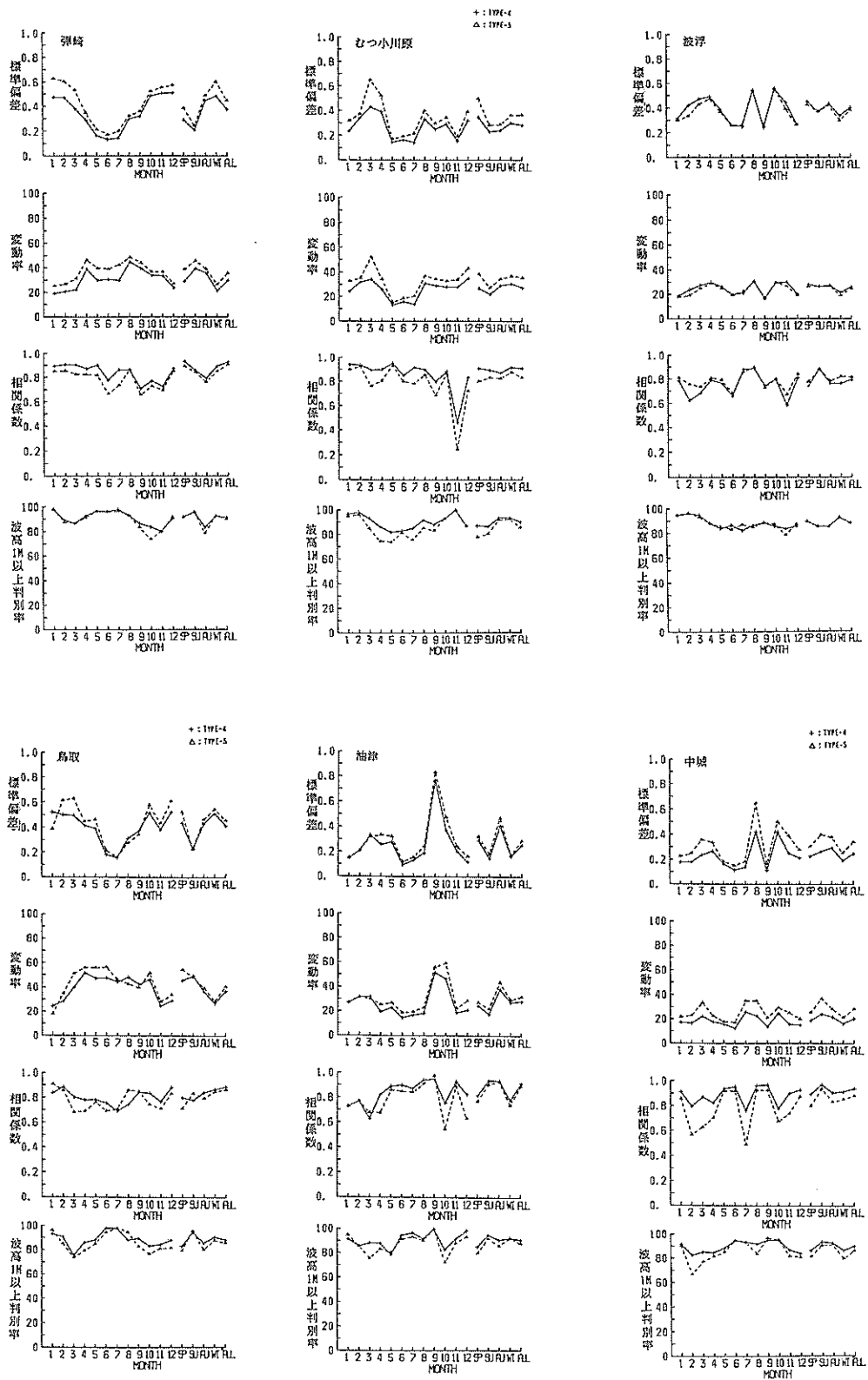


図-42 予測式の相違による予測精度の比較 (TYPE-4 とTYPE-5)

とする現象がどの程度の確率で生起する可能性があるのかを教えてくれる。回帰式を用いる方法と分割表を用いる方法は併用して用いることにより、より確かな情報を提供し得るものと思われる。しかしながら、今回の検討では、与えられたデータに単純な処理を施した説明変数を用いて統計モデルを作成した。説明変数の与え方や選択方法には他にも多くの方法があり、ここではそのほんの数例を検討したに過ぎない。また、本研究を実施した際にいくつかの知見が得られ、更なる改良の必要性も示唆された。

本研究で得られた知見および今後の指針は以下のとおりである。

- (1) 重回帰式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。
- (2) 分割表を用いた波浪予測手法は回帰式を用いる波浪予測手法と異なり、有義波高の値そのものは推定できない。しかしながら、ある気象条件下での港湾工事等の作業限界波高以上の波高が生起する確率、あるいはそれ以下の波高が生起する確率等が過去のデータに基づいて与えられるため、何らかの判断を下さなければならない状況においては、貴重な情報源になり得る。
- (3) 多変量自己回帰式を用いた波浪予測手法は、重回帰式を用いる方法に比べて、物理的な意味においてやや妥当な方法である。本方法により、気圧の時系列データを与えるべき測点の数を重回帰式の場合に比べて大幅に減らすことができ、かつ同程度の予測精度で有義波高を推定し得る。
- (4) 本研究では重回帰式をあてはめる際に有義波高のみを対数変換して用いたが、すべてのデータから季節的な長周期変動を除去した後、各変量の分布関数を検討し、必要ならば正規分布になるように変数変換して重回帰式をあてはめを実施すべきであろう。また変数の選択には多重共線性に注意して、要因増減法により最適変数を選択すべきであろう。
- (5) 波浪予測のための分割表を作成する際には、重回帰式の作成と同様に前もって長周期変動の除去ならびにその変量が正規分布になるように変数変換した後分割表を作成すべきかも知れない。また、気圧値をいくつかのカテゴリーに分割する際には不等間隔プールを利用し、各カテゴリーに含まれる観測度数に大きな開きが出ないようにすべきであろう。
- (6) 多変量自己回帰式をあてはめる際にも、重回帰式や分割表と同様に長周期変動の除去ならびにその変

量が正規分布になるように変数変換した後に回帰式をあてはめを実施すべきであろう。また、気圧測点の選択の際には多重共線性に注意して、要因増減法およびAIC最小化法により注意深く最適変数を選択すべきである。今回の検討では波浪予測地点の比較的近傍の気圧測点のデータを最適変数として選択したが、3日程度先の予測を精度良く実施するためには、なるべく広い範囲からの気圧測点を選択し得るようにモデルの作成を行うべきであろう。

- (7) 本研究では、季節的な長周期変動を除去するために移動平均分を差し引く方法および気圧値の時間変化を用いる方法の2つの方法を検討したが、他に気圧の空間的な勾配を説明変数として用いる方法がある。この方法により、ある程度の長周期変動は除去できるものと期待されるほか、波浪の予測にはより直接的な説明変数でもあり、今後検討する必要がある。
- (8) 重回帰式および多変量自己回帰式の説明変数の中には予想対象時刻前の有義波高も含まれている。この場合、有義波高の予測値とその前の時刻の有義波高は他の説明変数に比べてかなり高い相関を示すことからモデルの中で支配的な説明変数となり、予測値が過去の有義波高の値に強く依存してしまう。その結果として、波高が急に増大する場合などでは波高増大の予測が遅れることになり、港湾工事等の波浪予測に役立たない場合がある。しかしながら、このような場合にも気圧値には波高増大の兆候が前もって現れていることが一般である。そこで、予測精度の低下はある程度止むを得ないものとして、過去の時刻の有義波高を説明変数から除去して回帰式を作成し、今後の海況の傾向を予測するための統計モデルを作成する必要がある。
- (9) 本研究では回帰式に単純な線型モデルを用いたが、今後、気圧・波高間の物理特性を考慮して、必要ならば非線型モデルも考えなければならない。この場合にも、未知係数に関して線型であればモデル作成の手続きには大きな変更はない。これは今後の研究課題としたい。また、カルマン・フィルタのように新たなデータを入手する度に、回帰係数を自動的に変更し得る統計モデルも興味深い。

(1990年3月30日受付)

## 参考文献

- 1) 広瀬宗一・高橋智晴：観測結果に基づく沿岸波浪の出現特性, 昭和57年度港湾技術研究所講演会講演集, 1982年, pp. 1～55.
- 2) 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, 土木学会論文報告集, 第339号, 1983年, pp. 177～185.
- 3) Akaike, H. : Information theory and an extention of the maximum likelihood principle, 2nd Inter. Symp. on Information Theory (Petrov, B. N. and Csaki, F. eds.), Akademiai Kiado, Budapest, 1973, pp. 267～281.
- 4) 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎：情報量統計学, 共立出版株式会社, 1983年, p. 236.
- 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, 1987年, pp. 167～171.
- 6) 小舟浩治：わが国沿岸海域における波浪観測手法と出現波浪の特性に関する研究, 港湾技研資料, No. 668, 1990年3月, p.188.
- 7) 坂元慶行：カテゴリカルデータのモデル分析, 共立出版株式会社, 1985年, p. 221.
- 8) 赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 1972年, p. 189.
- 9) 尾崎 統：時系列論, 放送大学教材, 日本放送出版協会, 1988年, p. 165.
- 10) 橋本典明・小舟浩治：方向スペクトルの推定における多変量自己回帰モデルの適用, 第33回海岸工学講演会論文集, 1986年, pp. 164～168.

港湾技研資料 No.673

1990・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.