

港湾技術研究所 報告

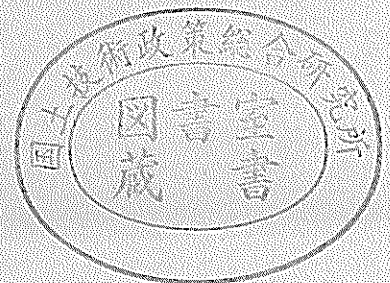
REPORT OF
THE PORE AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 32

NO. 3

Sept. 1993

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (Report of P. H. R. I.)

第32巻 第3号 (Vol.32, No.3) 1993年9月 (Sept. 1993)

目次 (CONTENTS)

1. Longshore current distribution on a bar-trough beach
— Field measurements at HORF and numerical model —
..... Yoshiaki KURIYAMA and Yasushi OZAKI3
(バー型海岸における沿岸流速分布
—波崎海洋研究施設における現地観測と数値モデルの開発—
.....栗山善昭・尾崎 靖)
2. 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・佐藤一央39
(Wave Prediction by Multiple Regression Model with Coastal Wave Observation Data
.....Toshio AONO, Chiaki GOTO and Kazuo SATO)
3. 陸上地形の影響を考慮した海上風推算
.....後藤智明・柴木秀之65
(A Hindcast of Maritime Surface Wind Including Effects of Land Topography
.....Chiaki GOTO and Hidenori SHIBAKI)

2. 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**・佐藤一央***

要 旨

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は, 現地で比較的簡便に運用できる波浪予測システムとして用いられている。

しかしながら, 気圧データの作成に人手がかかることや, 予測値が高波浪の立ち上がり時に観測波浪に対して時間的に遅れるという問題があった。

本研究では, これらの課題を克服するための研究の第1段階として, 手始めに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の構築に関して検討を行った。得られた結論は, 以下のとおりである。

- ①波浪観測地点相互の相関解析から, 日本沿岸における波浪の伝達時間は, 日本海側では九州から北海道までの時間がほぼ1日で, 冬期が速く夏期が遅いのに対し, 太平洋側では夏期を除いて1日半程度とはほぼ同じ速度であることが明かとなった。
- ②相関解析結果をもとに観測波高だけで24時間先までの波高および周期の予測が可能な重回帰モデルを開発した。本モデルは, 目的変数となる地点と説明変数となる地点との出現時間差を考慮した2段階の波高予測を行うことで, 重回帰モデル特有の予測値と観測値の間に見られる時間的遅れの問題を解消した。

キーワード：観測波浪, 相互相関, 出現時間差, 波浪予測, 2段階重回帰モデル

* 水工部 海洋エネルギー利用研究室 (科学技術庁特別研究員)
** 水工部 海洋エネルギー利用研究室長
*** 水工部 海洋エネルギー利用研究室

Wave Prediction by Multiple Regression Model with Coastal Wave Observation Data

Toshio AONO*
Chiaki GOTO**
Kazuo SATO***

Synopsis

One of the wave forecasting models applied relatively easily to port construction sites is a multiple regression model which uses the observation values of wave, wind velocity, and barometric distribution. However, this model involves the following problems: a) It requires too much man power for obtaining barometric distribution data; and b) It delays the estimation of high wave rising, because the observed wave height acquired at the objective point is used as an explanatory variable. This study, as a rudimentary study to solve the above problems, examined the multiple regression model only using the wave observation values acquired at non-objective points. Obtained results are as follows;

- ① From the results of cross correlation analysis for observed wave height, an appearance time difference of high wave is about one day from Kyushu to Hokkaido in Japan sea. In Pacific ocean side, phase difference is 1.5 days except summer.
- ② A wave prediction model to forecast the wave height accurately up to 24 hours after using observed wave height only. This model solves the problem of phase difference between forecasted and observed values by using the two-step multiple regression model.

Key Words: coastal observed wave height, cross correlation, lag time, wave forecasting, two-step multiple regression model

* Ocean Energy Utilization Laboratory, Hydraulic Engineering Division
(National Institute Post Doctoral Fellow)

** Chief, Ocean Energy Utilization Laboratory, Hydraulic Engineering Division

*** Ocean Energy Utilization Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

1	はじめに	43
2	波浪予測モデルに関する既往の研究	43
2.1	物理モデル	43
2.2	統計モデル	44
3	沿岸観測波浪の相互相関解析	44
3.1	解析対象地点と解析期間	44
3.2	相互相関解析方法	45
3.3	相互相関解析結果	46
4	重回帰波浪予測モデルの構築	46
4.1	重回帰波浪予測モデルの構築方法	51
4.2	2段階重回帰モデルの構築	52
4.3	2段階重回帰波浪予測モデルによる予測結果	54
4.4	観測波浪重回帰波浪予測モデルの適用性に関する考察	59
5	おわりに	63

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の提供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¹⁾、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²⁾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^{3), 4)}は、現地で比較的簡便に運用できる波浪予測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予測される高波浪の立ち上がりが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研究の第1段階として、気象データを用いずに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の構築に関して検討を行った。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的な波浪予測が可能であると考えられる。また本研究で得られた知見を、従来の重回帰モデルや物理因子重回帰モデルにフィードバックすることができれば、より高精度な予測モデルの構築が可能となる。

2. 波浪予測モデルに関する既往の研究

現在、波浪予測に用いられている手法としては図-1に示すように波浪推算モデルに代表される物理モデルと統計モデルおよび両者を組み込んだハイブリッド型の物理因子重回帰モデルが存在する。工学的な意味での波浪予測の始まりは1943年の第2次世界大戦にまでさかのぼる。前年の北アフリカの上陸作戦において、連合軍はしばしば大しけに遭遇し補給が充分に行われずそのため大苦戦を強いられた。この経験から波浪予測の必要性が指

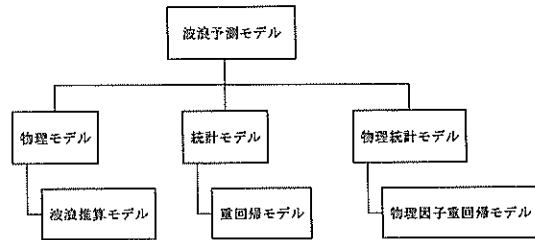


図-1 従来の波浪予測モデル

摘され、米国海軍水路部が中心となって波浪予測モデルの開発が行われた、いわゆる有義波法⁵⁾である。ここで開発された有義波法は、直ちにその年の秋に行われたノルマンディー上陸作戦で用いられ、作戦を成功に導く要因となった。

波浪予測モデルはその後も改良が続けられ、有義波法はSMB法⁶⁾へと発展しさらにスペクトルの概念に基づくPNJ法⁷⁾が提案され、現在はエネルギー平衡方程式に基づくスペクトル法⁸⁾による波浪推算手法が確立されつつある状況にある。一方、波浪観測の技術の進歩と観測データの蓄積が進んできたことから、近年統計的な手法を用いた波浪予測手法が提案されている。この統計的波浪予測手法では、適切な統計モデルを用いれば非常に精度の高い予測結果が得られ、しかも波浪推算モデルに比較して簡便に予測が行えるという利点がある。ここでは、波浪予測モデルを物理モデルと統計モデルにわけて概説する。なお物理因子重回帰モデルについては著者らによる文献²⁾を参照されたい。

2.1 物理モデル

物理モデルは、波浪の発生・発達、伝播、減衰を理論的な考察を基に定式化したモデルで、具体的には有義波法やスペクトル法などの波浪推算モデルである。特に、スペクトル法では用いた仮定や経験式の違いから様々なモデルが提案されている。波浪予測を目的とした手法として代表的なものには、気象庁の波浪予測業務で用いられているMRI法⁹⁾がある。また最近では、有義波法とスペクトル法を組み合わせたハイブリッド・パラメータ法が提案されている⁹⁾。

代表的なスペクトル法であるMRI法の基本式は、式(1)のエネルギー平衡方程式で表される。

$$\frac{\partial S(f, \theta)}{\partial t} + C_g \nabla S(f, \theta) = F_1 + F_2 \quad (1)$$

ここで、 $S(f, \theta)$ は波浪の方向スペクトル、 f は周波数、

θ は成分波の波向, C_g は成分波の群速度, F_1 は風から波へ供給されるエネルギー, F_2 はエネルギー消散である。物理モデルでは, このスペクトル法に代表されるように波浪の発達・伝播が理論的に定式化されており一般性の高い手法であることから, 波浪予測モデルとして最適な手法であるといえる。しかしながら, これらの物理モデルには風から波浪へのエネルギー輸送機構や碎波によるエネルギー消散などの未解明な問題が多く存在し, そのため多くの経験式や係数が用いられている。これらの経験式の検証は, 高波浪時を対象にして行われているため, 沿岸での波浪予測にとって最も重要となる1.0m前後の稼働限界波高に相当する低波高時での予測精度が著しく低下する。現状では, この問題を解決するのは困難である。

2. 2 統計モデル

統計モデルは, 波浪の発生に関する諸要因の影響が, 観測波浪自身に含まれると考え, 要因間の物理的な因果関係や定量化を決定論的に行わず, 波高値とその他の要因間の関係を統計的に解析し定式化するモデルである。

統計モデルを用いた波浪予測手法としては, これまでに種々の方法が提案されているが代表的なものとして, 重回帰式に基づく波浪予測手法がある。この手法は, 1次の簡単な重回帰式を用いて波浪予測を行うものであり, 説明変数の選択方法により種々のモデルの構築が可能である。本研究で開発を行う波浪予測モデルもこの重回帰式による統計モデルといえる。重回帰式を用いた波浪予測では, 重回帰係数さえ算定できれば容易かつ速やかに予測結果が求められる。また運用面でも作業が比較的軽度であることから, 現地での運用も行われている^{10) 11)}。

重回帰モデルによる波浪予測式は, 須田²⁾によって提案された基本式をもとに, 小舟ら³⁾によって予測精度を上げる式として式(2)が提案されている。

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

ここに, \hat{x}_1 は予測有義波高, x_i は予測対象地点の時刻 i における有義波高, y_i は予測対象地点の時刻 i における風速, z_{ij} は気圧読み取り地点 j の時刻 i の気圧値で, $i = 1, 2, 3$ はそれぞれ予測対象時刻, 現時刻, 12時間前を表す。また, a_i, b_i, c_{ij} は重回帰係数, ϵ は残差である。

式(2)は, 説明変数として現時刻と一定時間前の観測波高, 風速, 気圧を用いて定式化した1重回帰式で, 重回帰係数は3~4年程度の長期間における観測波高, 観測風速, 観測気圧から, 式(2)を用いて計算される予測波高と予測対象地点の観測波高との残差が最小とな

るように決定された係数である。ただし, 説明変数は予測対象地点に応じてAIC最小化¹²⁾によって選択されている。

したがって, 説明変数として与えられている気象・海象データを式(2)に代入することにより, 予測時刻の波高が簡便に得られることになる。

このように, 統計モデルである重回帰式を用いた波浪予測手法は, 特別な専門知識を必要とすることなく簡便に予測が行える利点を持っている。しかし, 予測精度に関しては問題があり特に現時刻の観測波浪に関する項の寄与率が際だって高いために, 予測波高がその影響を受けて高波浪時の立ち上がりが遅れて現れるという問題がある。

3. 沿岸観測波浪の相互相関解析

ここでは, 波浪予測モデルを構築するための基礎解析として沿岸波浪相互の相関特性について検討する。

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るとすると, 図-2の模式図に示すように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特性に時間遅れを伴った相関が存在する。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ことにより予測精度を向上させることができる。ここでは, 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, 各波浪観測地点間における波浪の出現時間差を求める。

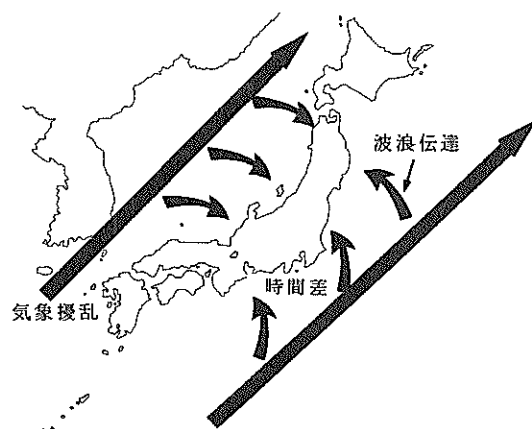


図-2 沿岸波浪の出現時間差の発生

3. 1 解析対象地点と解析期間

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-3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、全地点では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。また、表-1の中で観測期間が短い新潟沖・室津・御前崎・下田と、内湾である浜金谷・神戸の6地点は、解析対象地点から除外してある。

3.2 相互相関解析方法

相互相関解析は、2地点間の時間差を0時間から2時間ごとに順に増やし、おのおの時間差に対応する相関係数を式(3)から計算することにより行った。

$$R_{ij}(\tau) = \frac{C[H_i(t), H_j(t-\tau)]}{\sqrt{\sigma_i^2 \sigma_j^2}} \quad (3)$$

ここで、 σ_i と σ_j はそれぞれi地点とj地点の波高値の分散、 $C[H_i(t), H_j(t-\tau)]$ はi地点とj地点の波高値の共分散で式(4)で表される。

$$C[H_i(t), H_j(t-\tau)] = \sum_{n=1}^{N-1} [H_i(t_n) H_j(t_n - \tau)] / N \quad (4)$$

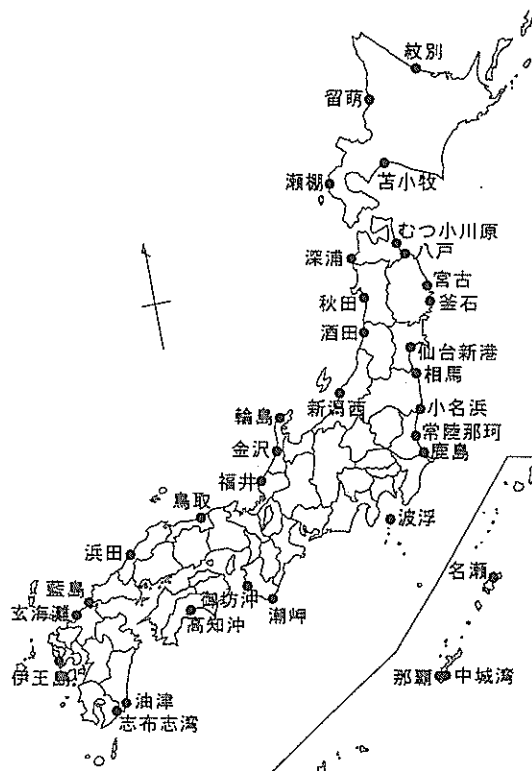


図-3 波浪観測地点

表-1 波浪観測地点と観測期間

紋別	1975年1月～1991年12月	油津	1975年3月～1990年12月
留萌	1970年1月～1991年12月	室津	1990年8月～1991年12月
瀬棚	1980年1月～1991年12月	神戸	1971年5月～1991年12月
深浦	1979年12月～1991年12月	高知沖	1980年9月～1989年12月
秋田	1981年10月～1991年12月	御坊沖	1983年12月～1991年12月
酒田	1970年1月～1991年12月	潮岬	1970年8月～1991年12月
新潟西	1982年9月～1991年12月	御前崎	1988年4月～1991年12月
新潟沖	1989年10月～1991年12月	下田	1988年4月～1991年12月
輪島	1979年1月～1991年12月	波浮	1973年4月～1991年12月
金沢	1970年1月～1991年12月	浜金谷	1972年9月～1990年12月
福井	1980年9月～1991年12月	鹿島	1972年4月～1991年12月
鳥取	1979年9月～1991年12月	常陸那珂	1979年12月～1991年12月
浜田	1974年3月～1991年12月	小名浜	1980年1月～1991年12月
藍島	1975年4月～1991年12月	相馬	1982年8月～1991年12月
玄海灘	1980年8月～1991年12月	仙台新港	1979年1月～1991年12月
伊王島	1974年12月～1991年12月	釜石	1978年3月～1991年12月
名瀬	1977年3月～1991年12月	宮古	1981年7月～1991年12月
那覇	1973年7月～1991年12月	八戸	1971年3月～1991年12月
中城湾	1973年11月～1991年12月	むつ小川原	1974年4月～1991年12月
志布志湾	1980年4月～1991年12月	苫小牧	1970年1月～1991年12月

ここで、Nはデータ数である。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。

相互相関解析は34地点全てを対象とし、各地点間の相関を総当たりに算定した。時間差については、相互相関係数が最初に極大となったときの時間差を2地点間の波浪の出現時間差と定義した。計算は、10年間のデータのうち、波浪の発達期の時間差を的確にとらえられるよう、対象地点の波高値が解析対象期間における平均波高値以上のものを対象とした。波浪の出現時間差は季節ごとに異なった傾向を示すと考えられることから、1月から12月について各月毎に相関係数を算定した。

3. 3 相互相関解析結果

図-4、5、6、7は深浦と日本海側の地点におけるそれぞれ1月、4月、7月、10月の相互相関解析結果を、また図-8~11はむつ小川原と太平洋側の各地点との相関解析結果を深浦と同様に示したものである。

各図の横軸は対象地点と比較地点との時間差、縦軸が相互相関係数を表す。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ているが、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-4~7の日本海側の相関特性を見ると、明確な相関係数のピークが現れており、平均的に見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-8~11の太平洋側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に比べ、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-12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、長いフェッチを有するうねり性の波浪が多く、波浪の発生位置が日本沿岸から離れた区域であることが多いことから出現時間差が短く現れている。

これらの沿岸観測波浪の相互相関解析結果から明らかに

なったことをまとめると以下のようになる。

- ①日本海側と太平洋側の観測地点間での相関はほとんど認められない。また、沖縄などの南西諸島と日本海側・太平洋側との相関も低い。
- ②日本海側の深浦の相互相関を見ると、明確な相関係数のピーク（2地点間の位相差）が存在し、しかも北東から南西に向かって位相差が大きくなっているのがわかる。これより、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伝達していくことが確認できる。
- ③太平洋側のむつ小川原と常陸那珂の相互相関を見ると、深浦ほど明確にピークは現れない。また、房総半島を境に、北東と南西の地点では波浪の出現の傾向が違ってくる。
- ④日本海側と太平洋側の相互相関の傾向が違うのは、日本海側では、海域が閉鎖しているため地点間で吹送距離と吹送時間に差が少なく、気象現象の移動に伴い同程度の波浪が南西から北東に向かって伝わりやすいことに対し、太平洋側では、海域が広いため沖側のあらゆる地点で発達した様々な波浪が独立して海岸に伝達し、結果として地点間の相関が低くなることがその原因として考えられる。この波浪の出現傾向の違いは、有義波高の平均値が、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、太平洋側では季節変動がみられないことにも現れている。
- ⑤波浪の伝達時間は、日本海側では九州から北海道までの時間がほぼ1日で、冬期が速く夏期が遅いのにに対し、太平洋側では夏期を除いて1日半程度とほぼ同じ速度である。太平洋側の夏期の移動速度が速いのは、地点間の相関がほとんどなく、見かけ上、速くなっているためである。

以上の結果を考慮すると、各波浪観測地点間に現れる時間差を重回帰モデルに組み込むことにより、観測値と予測値との間の時間遅れなどの問題を解決できる精度の高い予測が可能になると予想される。

4. 重回帰波浪予測モデルの構築

ここでは、前節で検討した沿岸観測波浪の相互相関解析結果を利用して、観測波浪のみを用いた重回帰波浪予測モデルの構築を行う。ここで得られるモデルは、当然気象データを含むことが可能であり、そのようなモデルを構築した方がより予測精度の向上を望むことができると思われる。しかし、本研究では観測波浪のみでどの程度予測が可能なのかを検証することが主要な目的の1つであることから、気象データに関しては考慮していない。

沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測

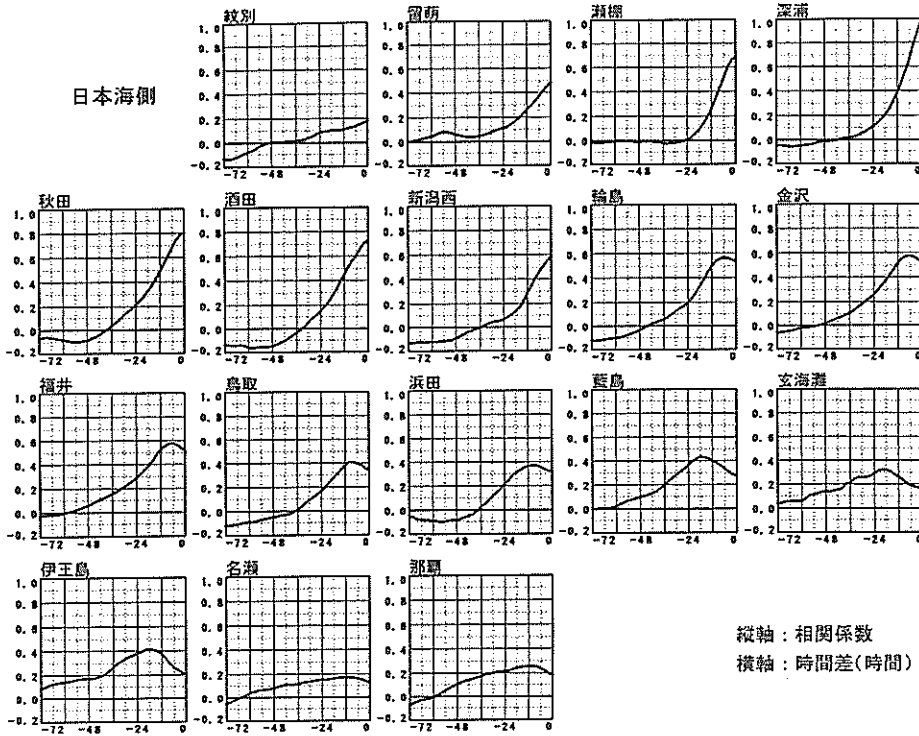


図-4 深浦と日本海側の波浪観測地点との1月の相互相関

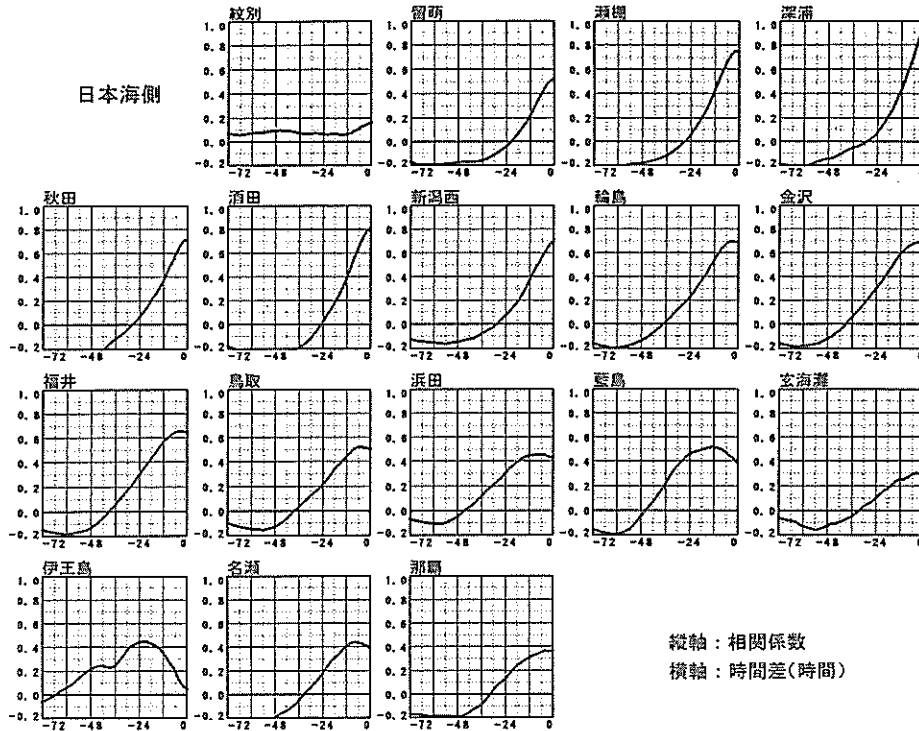


図-5 深浦と日本海側の波浪観測地点との4月の相互相関

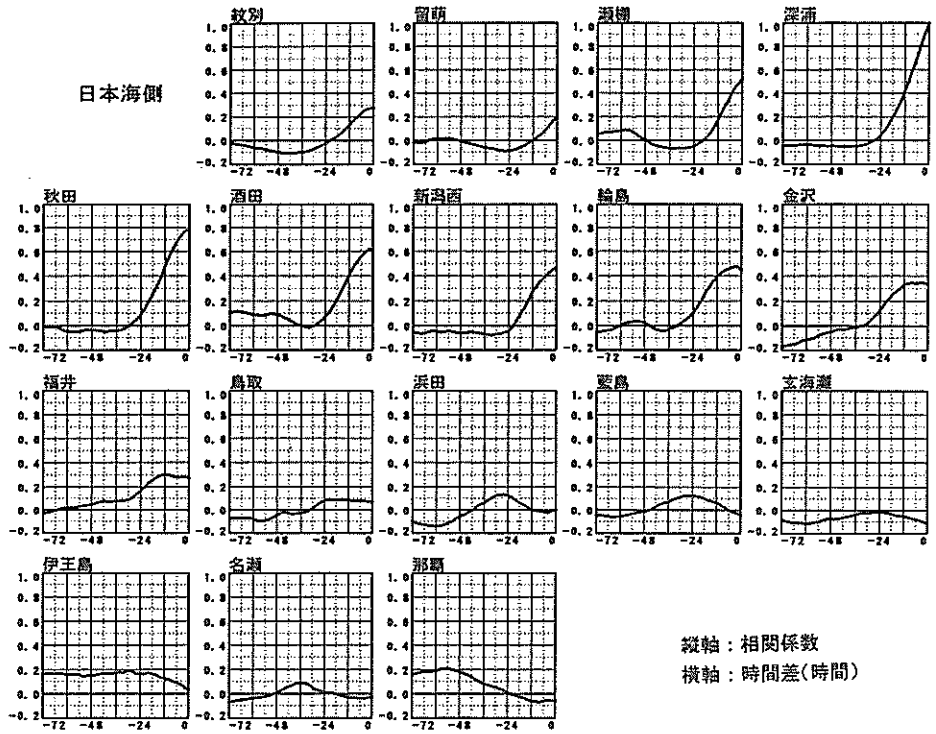


図-6 深浦と日本海側の波浪観測地点との7月の相互相関

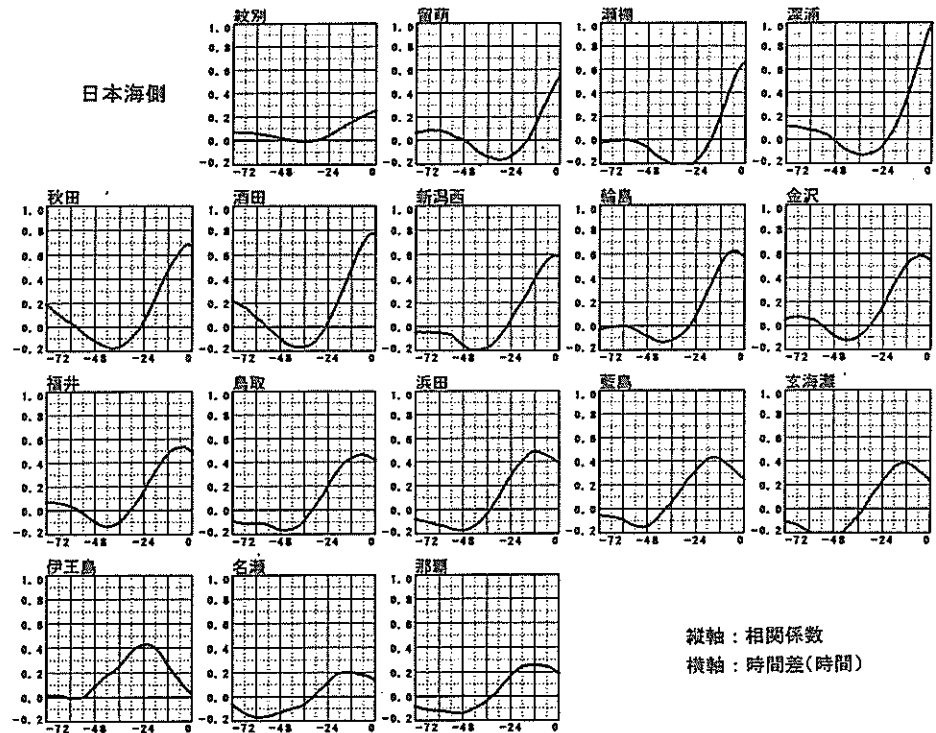


図-7 深浦と日本海側の波浪観測地点との10月の相互相関

沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測

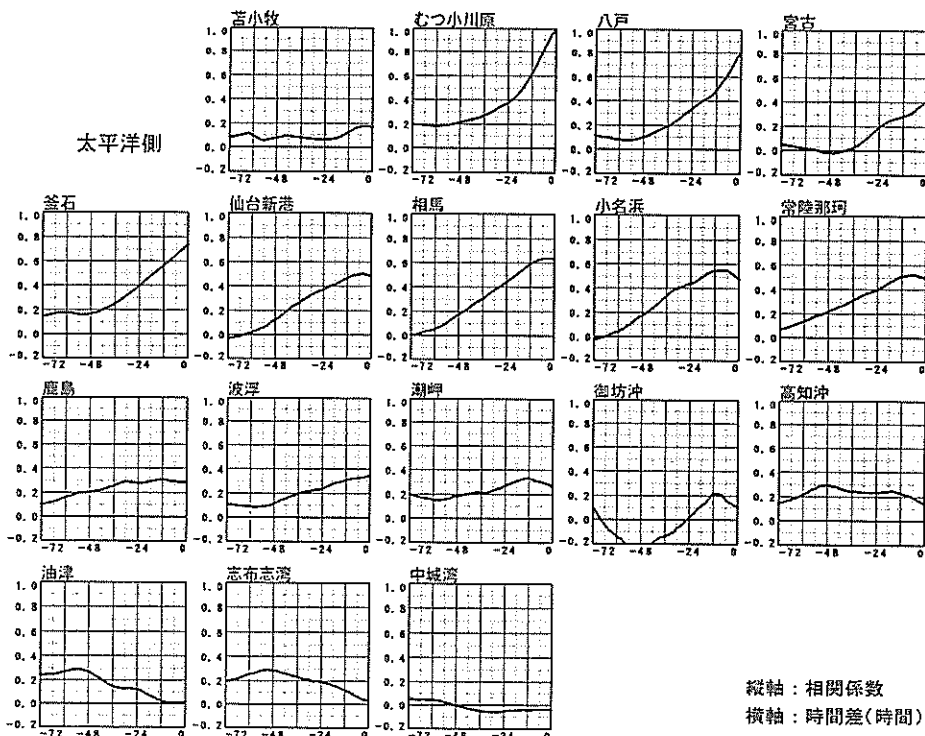


図-8 むつ小川原と日本海側の波浪観測地点との1月の相互相関

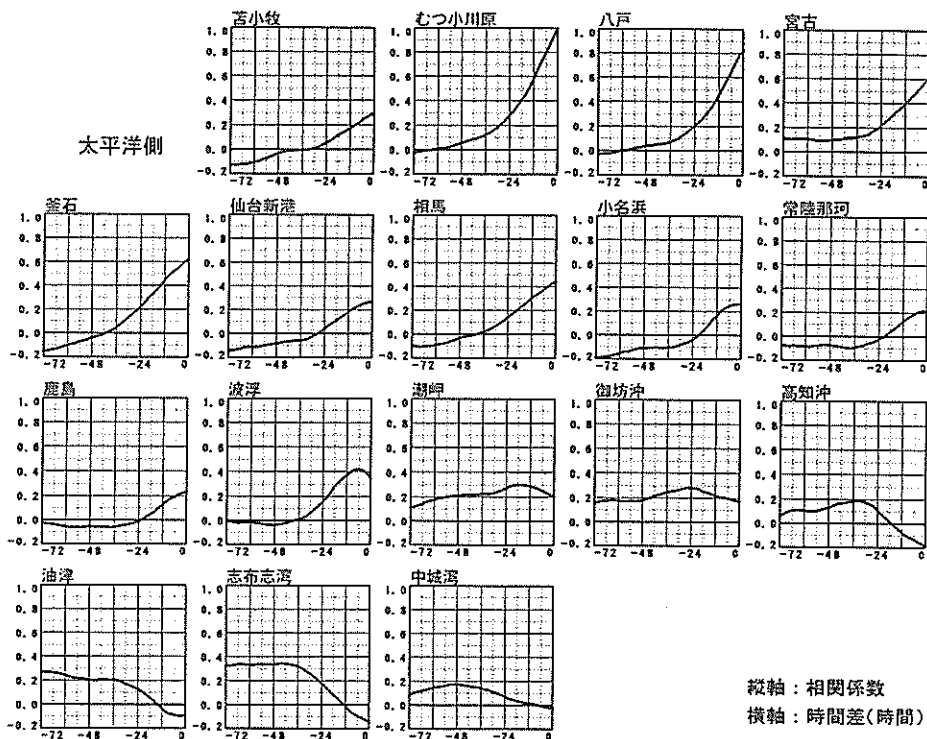


図-9 むつ小川原と日本海側の波浪観測地点との4月の相互相関

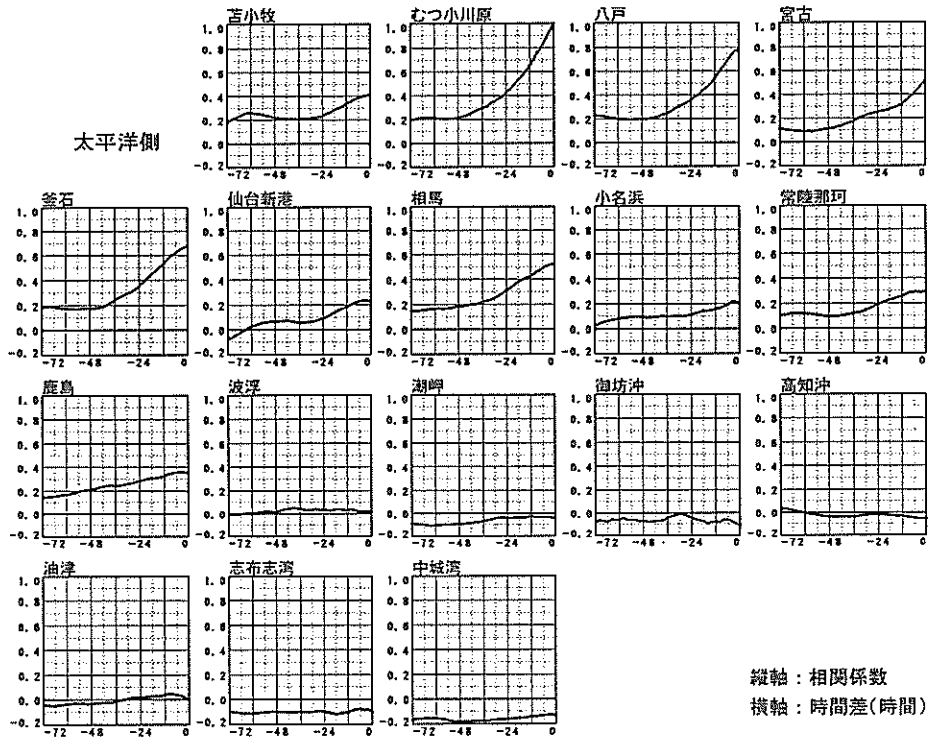


図-10 むつ小川原と日本海側の波浪観測地点との7月の相互相関

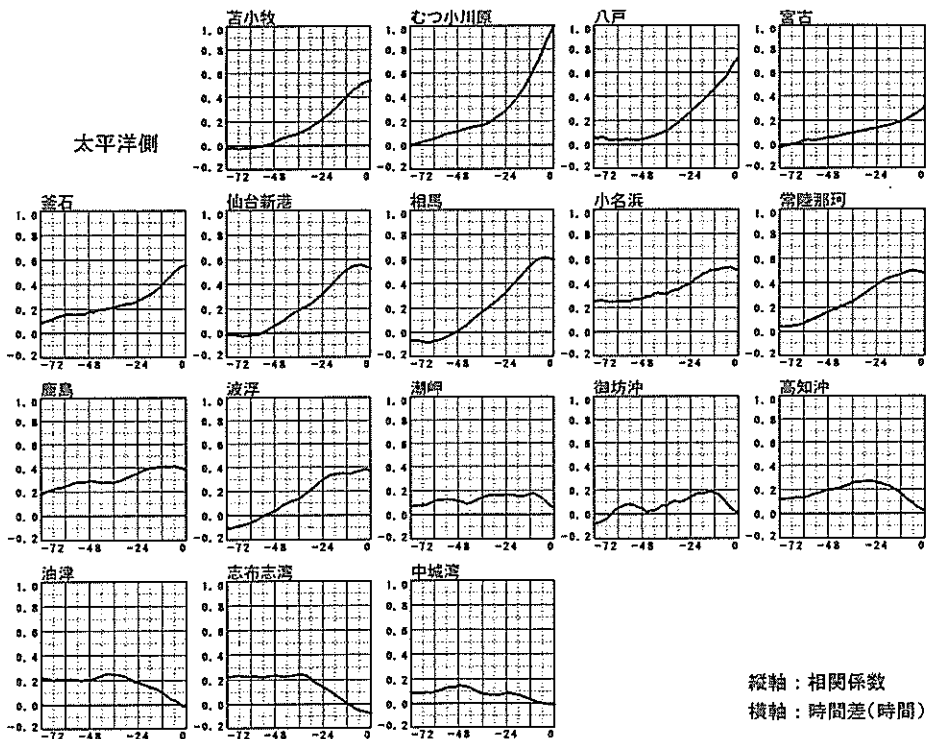


図-11 むつ小川原と日本海側の波浪観測地点との10月の相互相関

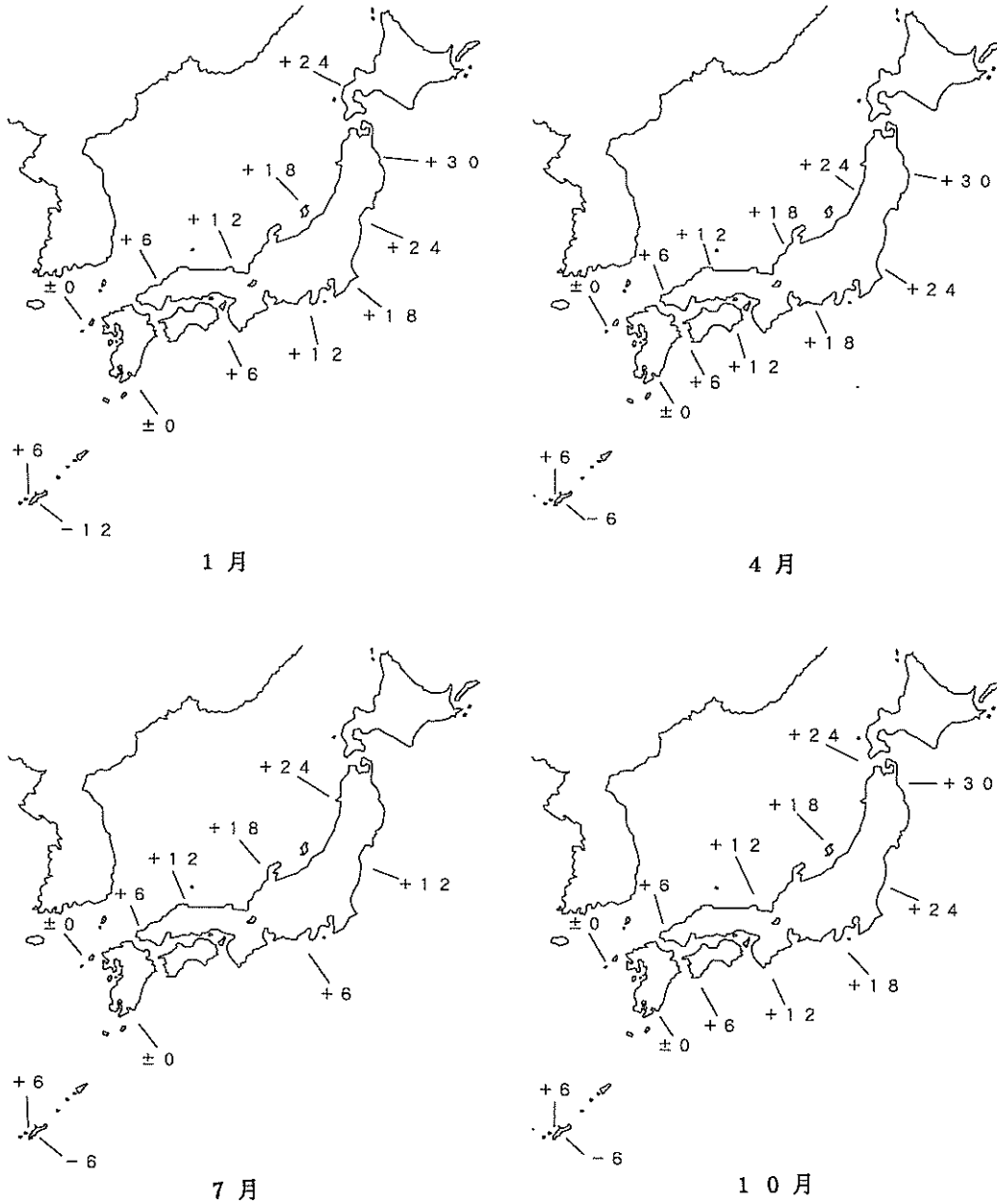


図-12 日本沿岸における波浪の出現時間差

4. 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。

$$H(t) = a_0 + \sum_{i=1}^n [a_i H_i(t - \Delta t_i)] + \epsilon(t) \quad (5)$$

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、 $\epsilon(t)$ は残差、 n は説明変数の数である。(5)式中の重回帰係数は、連立1次方程式

$$\begin{bmatrix} n & \sum H_{1k} & \cdots & \sum H_{nk} \\ \sum H_{1k} & \sum H_{1k}^2 & \cdots & \sum H_{1k}H_{nk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{nk} & \sum H_{nk}H_{1k} & \cdots & \sum H_{nk}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum H_k \\ \sum H_{1k}H_k \\ \vdots \\ \sum H_{nk}H_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

の解として得られる。ここに、 N はデータ数である。

相互相関解析結果から、日本海側の地点と太平洋側の地点では相関が無いことが判明したので、目的変数が日本海側の地点であれば説明変数は日本海側で目的変数の地点より南西にある地点から選択し、目的変数が太平洋側の地点であれば説明変数は太平洋側で目的変数の地点より南西にある地点から選択する。

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¹²⁾が用いられることが多い。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。

4. 2 2段階重回帰モデルの構築

波浪予測モデルの構築に当たって、まず説明変数の選択法として3種類の基礎的な方法を採用し、予測特性について検討した。

波浪予測モデルをそれぞれモデルA、モデルB、モデルCとすると、各モデルにおける説明変数の選択基準は以下のようになる。

モデルA：波浪の出現時間差を無視して、予測対象地点の波高値と最も相関の高い地点を説明変数とする。

モデルB：予測対象地点との出現時間差が、予測時間に対応した地点を説明変数とする。

モデルC：モデルBで選択した地点に加えて、予測値を補正するため相関値の高い地点を説明変数とする。

ただし、これらのモデルでは予測対象地点の波高値を説明変数に加えていない。2. 2で述べたように、予測対象地点の波高値を説明変数にするとその寄与率が圧倒的に高くなり、他の説明変数の影響が相対的に弱くなるからである。

図-13~図-15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)との比較結果である。

ここで、予測値の推定精度を判定するための基準として以下に示す中率を用いた。すなわち、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するものである。図-13から図-15の右側の図が予測値と観測値の相関を示しており、破線の内部が的中範囲を示す。

図-13(モデルA)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、予測される高波浪の立ち上がりが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-14(モデルB)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-13に比較して、的中率は下がるものの高波浪時の立ち上がりのずれは生じていない。図-15(モデルC)は、モデルBで用いた輪島と金沢に予測値を補正する目的で時間差を無視した秋田を説明変数として加えた予測モデルである。的中率が格段に上がり、時間差もモデルAと比べて少なくなっているが、補正の目的で加えた秋田のモデルに対する寄与率が高く、若干の時間差が生じている。

以上の3種類の基礎的モデルを用いた予測結果から、観測波浪のみを用いた重回帰波浪予測モデルの予測特性として以下の点が明かとなった。

- ①相関値の高い地点を用いると、予測精度は高くなるが、従来の重回帰モデルと同様に高波浪の立ち上がり時に予測値に時間的遅れが生じる。
- ②予測時間と等しい波浪の出現時間差を持つ地点を用いると、予測精度そのものは低下するが、予測値と観測値の時間的遅れの問題は殆ど解消される。
- ③相関値の高い地点と、出現時間差のある地点を同時に用いると、相関値の高い地点からの寄与率が高くなり、結果的に時間遅れが生じる。

以上の点を考慮すると、時間的な遅れの解消と予測精度の向上は別個に取り扱う必要があることがわかる。そこで、本研究では以下に示す2段階型の予測モデルを構築した。まず、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、(5)式

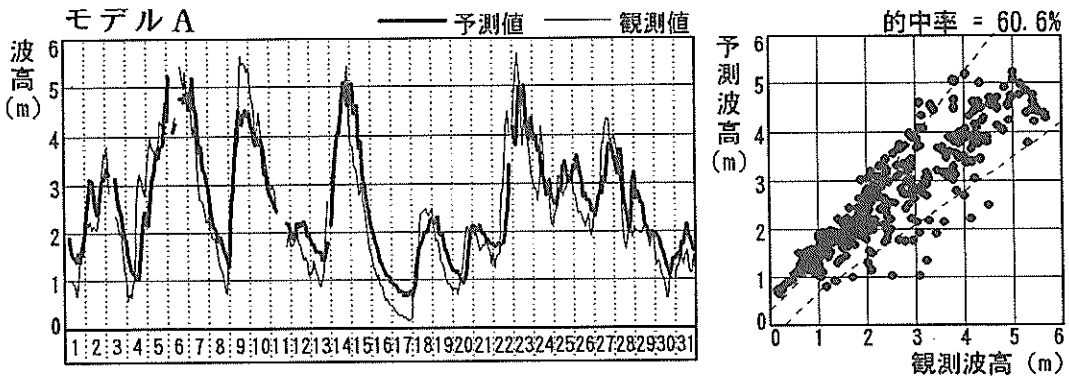


図-13 有義波高予測結果 (モデルA, 1月, 1986年)

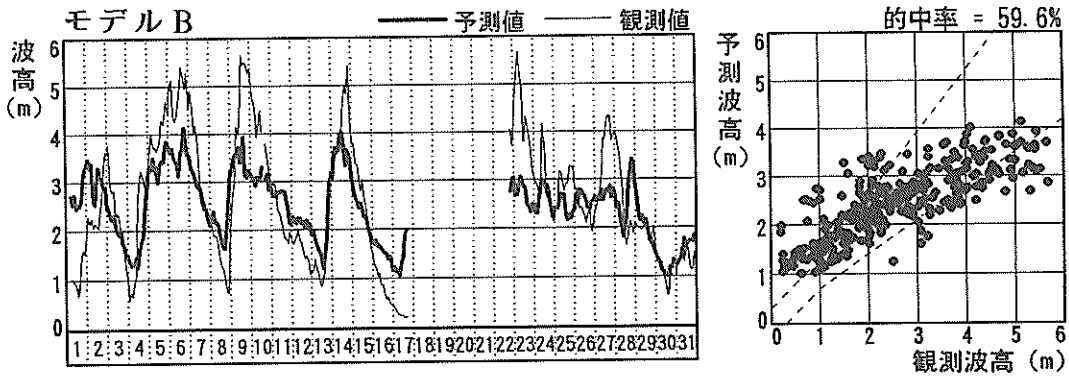


図-14 有義波高予測結果 (モデルB, 1月, 1986年)

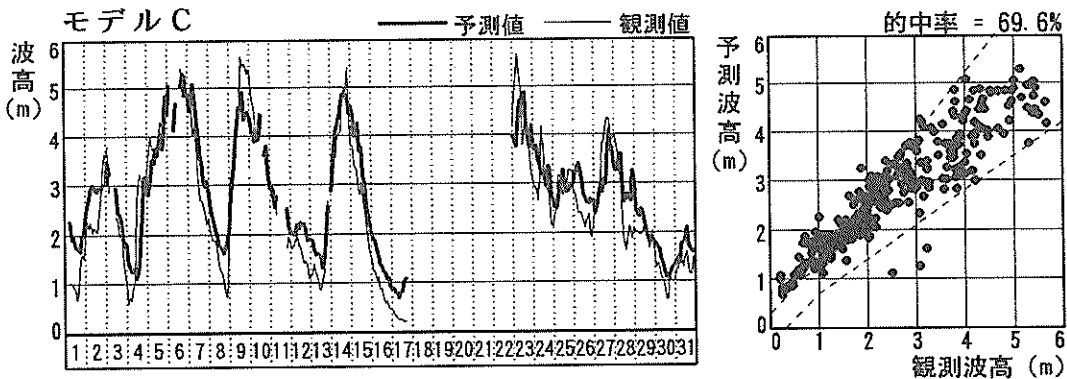


図-15 有義波高予測結果 (モデルC, 1月, 1986年)

に示す重回帰モデルを作成する (第1段階)。次に, (5) 式中の残差を目的変数とし, 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, (7) 式により重回帰モデルを作成する (第2段階)。

$$\varepsilon(t) = b_0 + \sum_{j=1}^m [b_j H_j(t - \Delta t_j)] + \delta(t) \quad (7)$$

ここに, b_0 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的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一

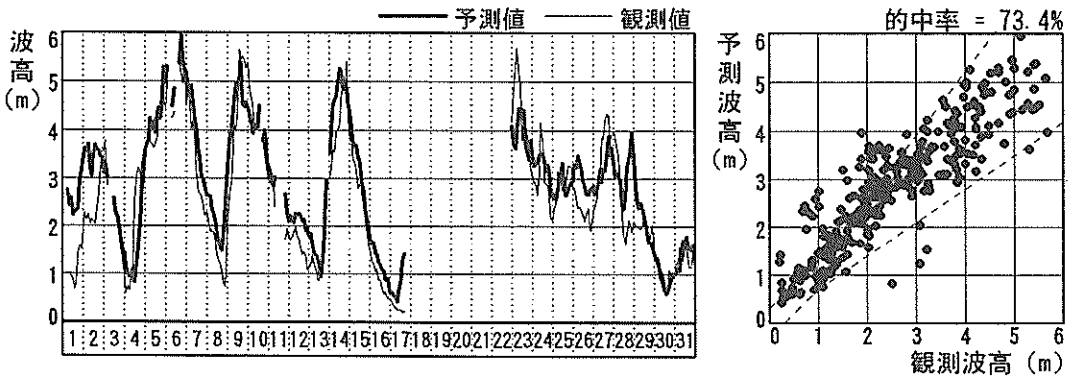


図-16 2段階予測による有義波高予測結果（1月，1986年）

16に示す。他の3種類の予測モデルに比較して、的中率が最も高くなっているのが認められる。また、観測値と予測値の高波浪時の立ち上がりの遅れもほとんど生じていないのが認められる。

4.3 2段階重回帰波浪予測モデルによる予測結果
本研究で提案した2段階型の重回帰波浪予測モデルについて、その予測特性、予測精度を検証する。本モデルでは、有義波高と同様の手順で有義波周期についても予測が可能であることから、ここでは有義波高と有義波周期の両者について波浪予測を行う。

4.3.1 有義波高

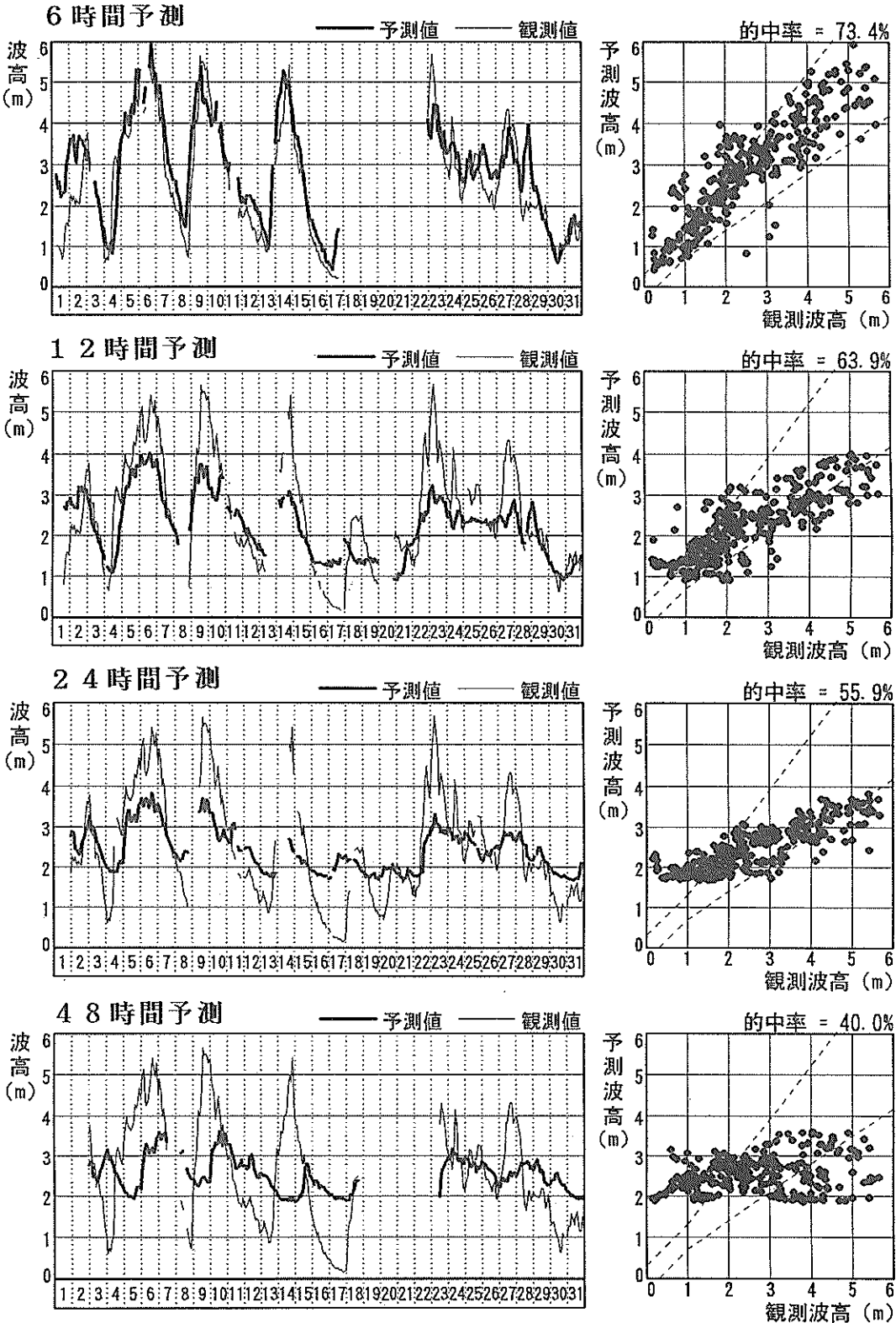
2段階重回帰波浪予測モデルを用いて、深浦・むつ小川原・常陸那珂の3地点で波浪予測を行い、予測モデルの評価を行った。重回帰係数の算定に用いた波浪データは、1981年～1990年の10年分のデータのうち、予測結果を評価する年度を除いた9年分である。予測モデルは、季節変動特性を明確にするため各地点の1月・4月・7月・10月の各月に対してそれぞれ6時間・12時間・24時間・48時間後予測の計16ケースを作成した。

予測結果の例として、1986年1月の有義波高の予測結果を図-17～図-19に示す。図は、経時変化と相関図から構成されており、経時変化の横軸は日を示し、図中の太実線が予測値で、細実線が観測値である。また、相関図には的中率の範囲が示されている。さらに、予測に用いた目的変数と9年分の観測波浪から得られた重回帰係数の一覧を、表-2～表-4に示す。図-17～図-19から3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、実用上は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。

これらの予測特性をさらに詳細に見ると、3地点とも6時間予測の精度が高いことが認められる。観測波高と予測波高の間には時間差も殆どなく、精度の高さは相関図からも認められる。12時間予測では、観測値と予測値の間に時間差はないものの、3m以上の高波浪期間（日本海側ではさらに1m以下の低波浪期間）での予測精度が低下しているのが認められる。24時間予測では、12時間予測と同様に時間差はないものの予測精度の低下する期間がさらに増大する傾向にある。48時間予測では観測値と予測値がほぼ無相関であることが相関図から認められる。また、海域毎の予測特性を見ると予測時間が長くなるにしたがって、太平洋側では高波浪に対する予測精度が低下するのに対して、日本海側では低波浪時と高波浪時の期間での予測精度が低下する。

表-5～表-7は、各地点で波浪予測を行った期間の的中率を示したものである。日本海側の深浦では、7月の適中率が高く10月が低い。これに対し、太平洋側の常陸那珂、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。図-20は、物理因子重回帰モデルによる的中率を示したもので、モデルIは観測波浪を用いない方法、モデルIIは予測対象地点の観測波浪を用いた方法である。図-20と比較すると、本研究で提案した重回帰モデルは月別による違いはあるものの、24時間程度の短期予測では物理因子重回帰モデルに対してほぼ同程度の的中率であることが認めら



図一七 深浦の有義波高予測結果 (1月, 1986年)

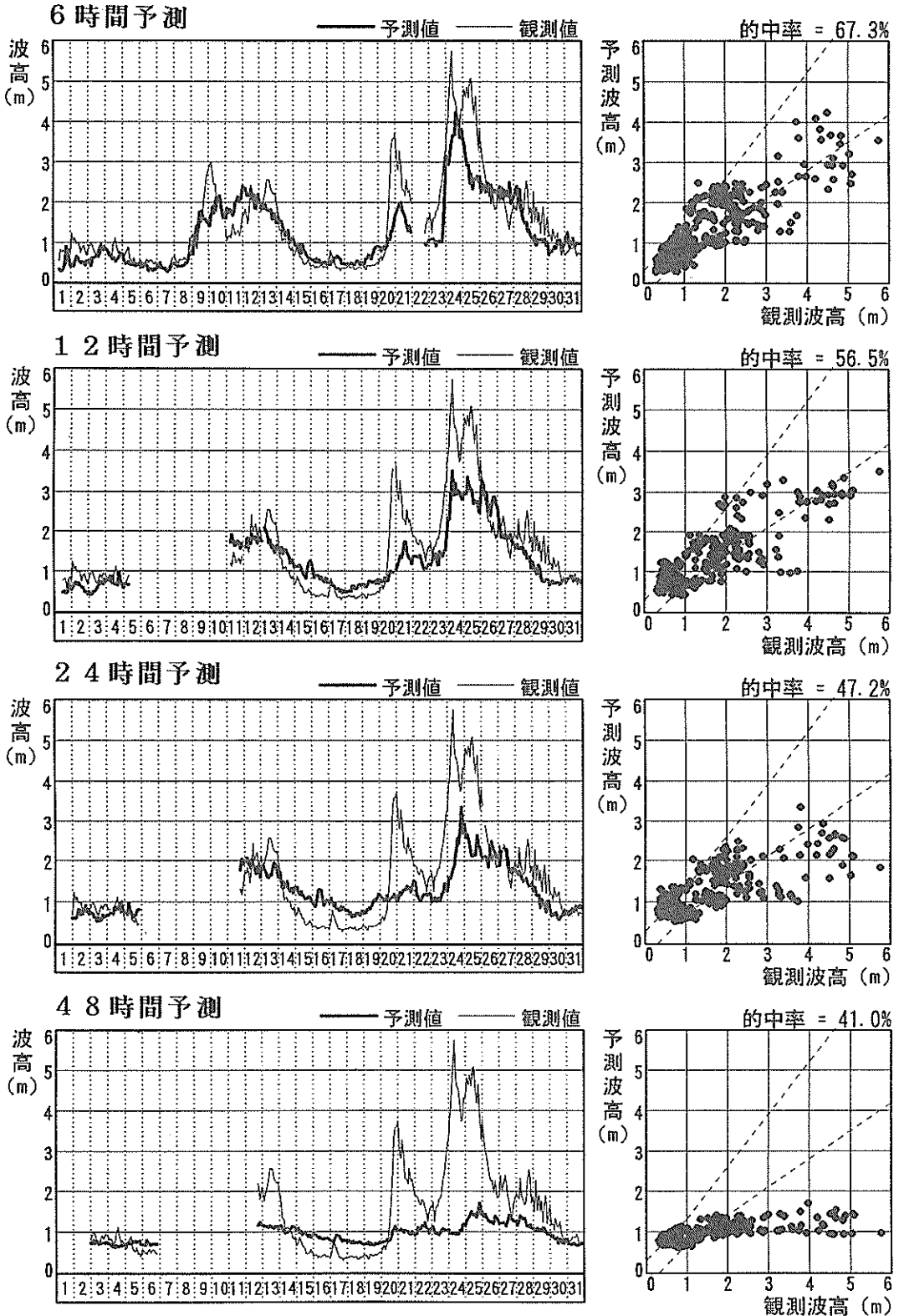


図-18 むつ小川原の有義波高予測結果 (1月, 1986年)

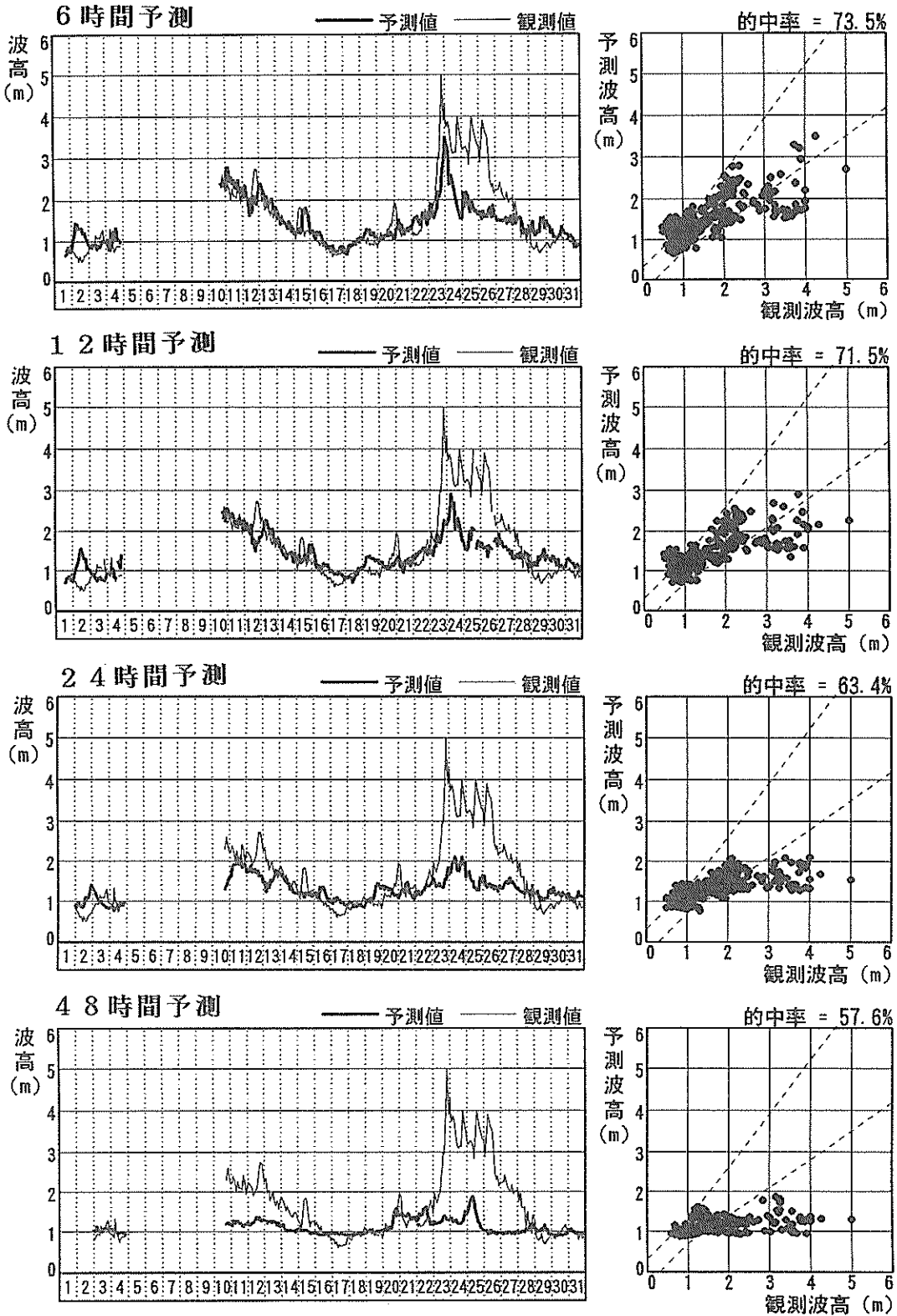


図-19 常陸那珂の有義波高予測結果 (1月, 1986年)

表一 2 説明変数と重回帰係数（深浦，1月）

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
鹿島	0.490	6	2	鹿島	0.454	12	2
波浮	0.106	6	1	高知沖	0.122	12	1
油津	0.376	16	1	油津	0.323	14	1
定数	-0.091		1+2	定数	0.099		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
鹿島	0.277	24	2	油津	0.131	48	2
油津	0.271	24	1	志布志湾	0.457	48	1
志布志湾	0.217	24	1				
定数	0.329		1+2	定数	0.676		1+2

表一 3 説明変数と重回帰係数（むつ小川原，1月）

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	油津	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

表一 4 説明変数と重回帰係数（常陸那珂，1月）

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	1	玄海灘	-0.141	48	1
伊王島	0.774	24	1	伊王島	0.624	48	
定数	1.490		1+2	定数	1.720		1+2

表一五 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%

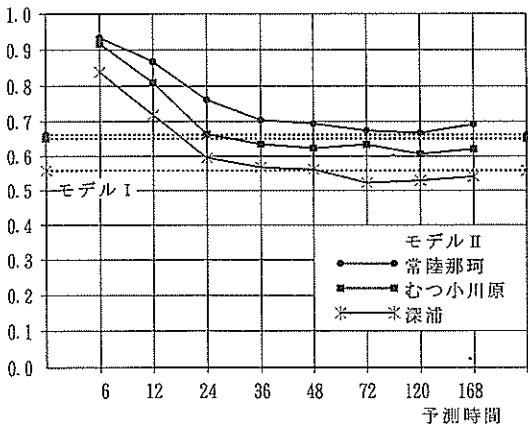
表一六 むつ小川原の予測波高の的中率

	6時間後	12時間後	24時間後	48時間後
1月	67.3%	56.5%	47.2%	41.9%
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%

表一七 常陸那珂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	73.5%	71.5%	63.4%	57.6%
4月	80.2%	85.5%	67.7%	51.4%
7月	97.0%	51.3%	48.2%	46.5%
10月	61.2%	62.1%	70.0%	50.1%

的中率



図一20 物理因子重回帰モデルの的中率

れる。本モデルでは、的中率を高くするために2段階重回帰の方法をとっているが、この方法は短期予測に関しては有効であることがこのことからわかる。ただし、48時間以上の予測では物理因子重回帰モデルと同程度の的中率を達成するためには気象データ等を組み込む必要があるかもしれない。

4.3.2 有義波周期

周期予測に関しては、従来型の重回帰モデル⁴⁾では取り扱って例が少ない。図一21~23は、波高値の場合と同一の地点、および期間に対する有義波周期の予測結果を示したもので、的中率の算定方法も波高の場合と同様に行っている。また、有義波周期の予測モデルで用いた説明変数と時間差は、有義波高予測と同一のものを用いている。

図一21~23を見ると、有義波周期の予測精度は、太平洋側のむつ小川原と常陸那珂では24時間予測、日本海側の深浦では12時間予測までは比較的良好であるが、それ以上の予測時間では予測周期の変化が弱くなり観測周期のほぼ平均値をとる傾向にある。この傾向は特に日本海側で顕著である。

有義波周期の全体的な予測精度に関しては、有義波高の場合と同程度であることから本予測モデルでは波高と周期の予測がほぼ同一の精度で行えることになる。また的中率は、どの予測時間でも70%以上を示すが、48時間予測の場合の予測周期と観測周期の経時変化特性を見ると、この的中率の数値はかなり許容範囲が広いことが認められる。周期の場合、波高値とは異なった的中率の算定を考慮する必要がある。

4.4 観測波浪重回帰波浪予測モデルの適用性に関する考察

本研究で構築した2段階重回帰波浪予測モデルは、沿岸観測波浪の相互相関解析から得られた日本沿岸における波浪の出現時間差を基礎にして、気象データを用いずに波浪観測値のみを説明変数として用いたモデルである。

本モデルの特性として、以下の点が上げられる。

- ①従来より、重回帰予測モデルの問題となっていた高波浪の立ち上がり時の遅れを他地点の観測波浪との出現時間差を考慮することにより解消した。
- ②重回帰モデルの説明変数として観測波浪のみが用いられているため、入力に多大な労力がかかる気象データを用いる予測モデルに比較してより簡便である。
- ③従来の重回帰モデルは波高値のみを予測対象としているが、本モデルでは波高と周期の予測が行える。
- ④予測時間に関しては、日本沿岸の波浪出現時間差が最大で30時間程度であるためその制約を受けて24時間予測までが限界である。
- ⑤的中率に関しては、24時間程度の短期予測では他の重回帰モデルや物理因子重回帰モデル等の予測モデルとほぼ同一の傾向にある。

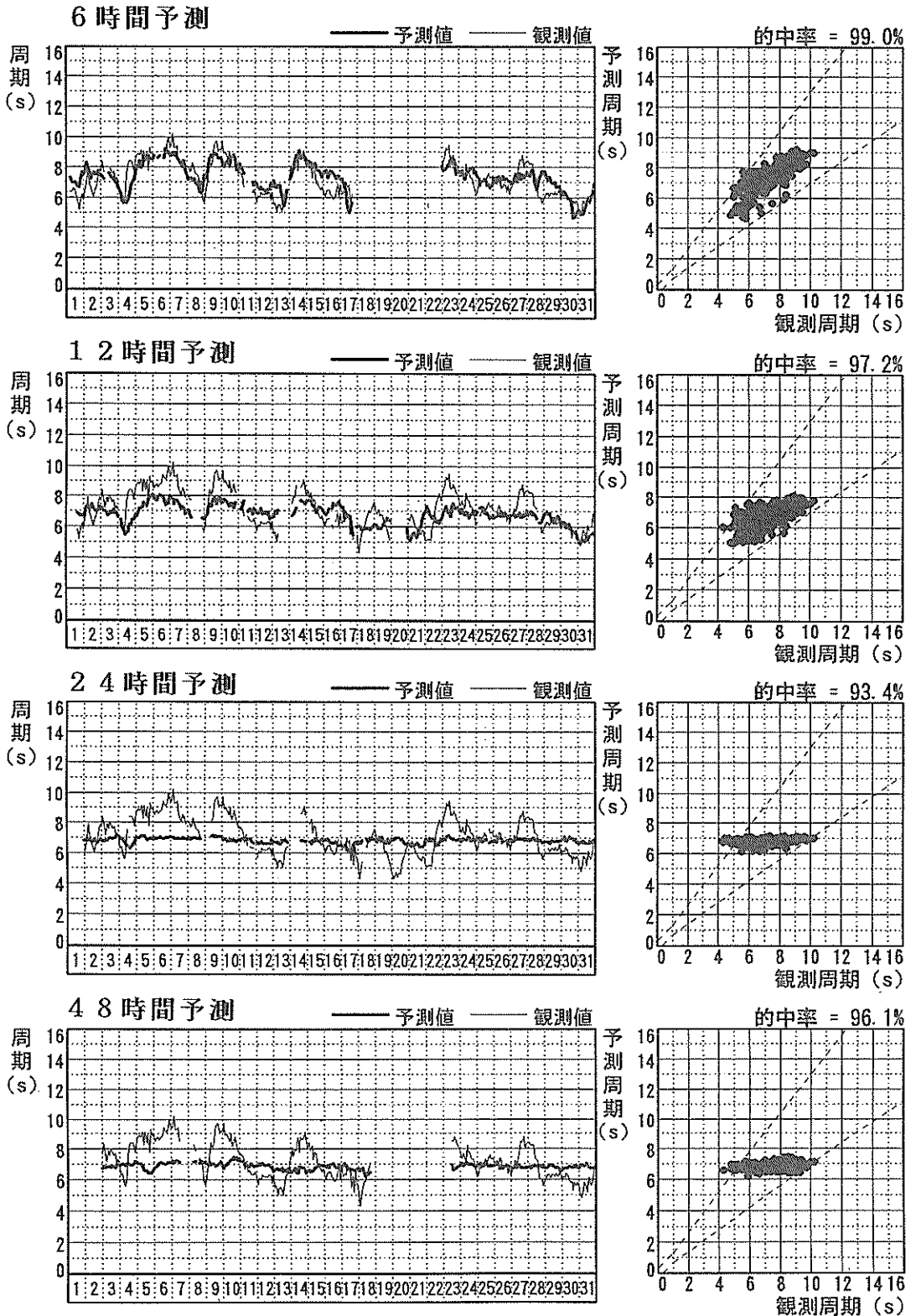


図-21 深浦の有義波周期予測結果 (1月, 1986年)

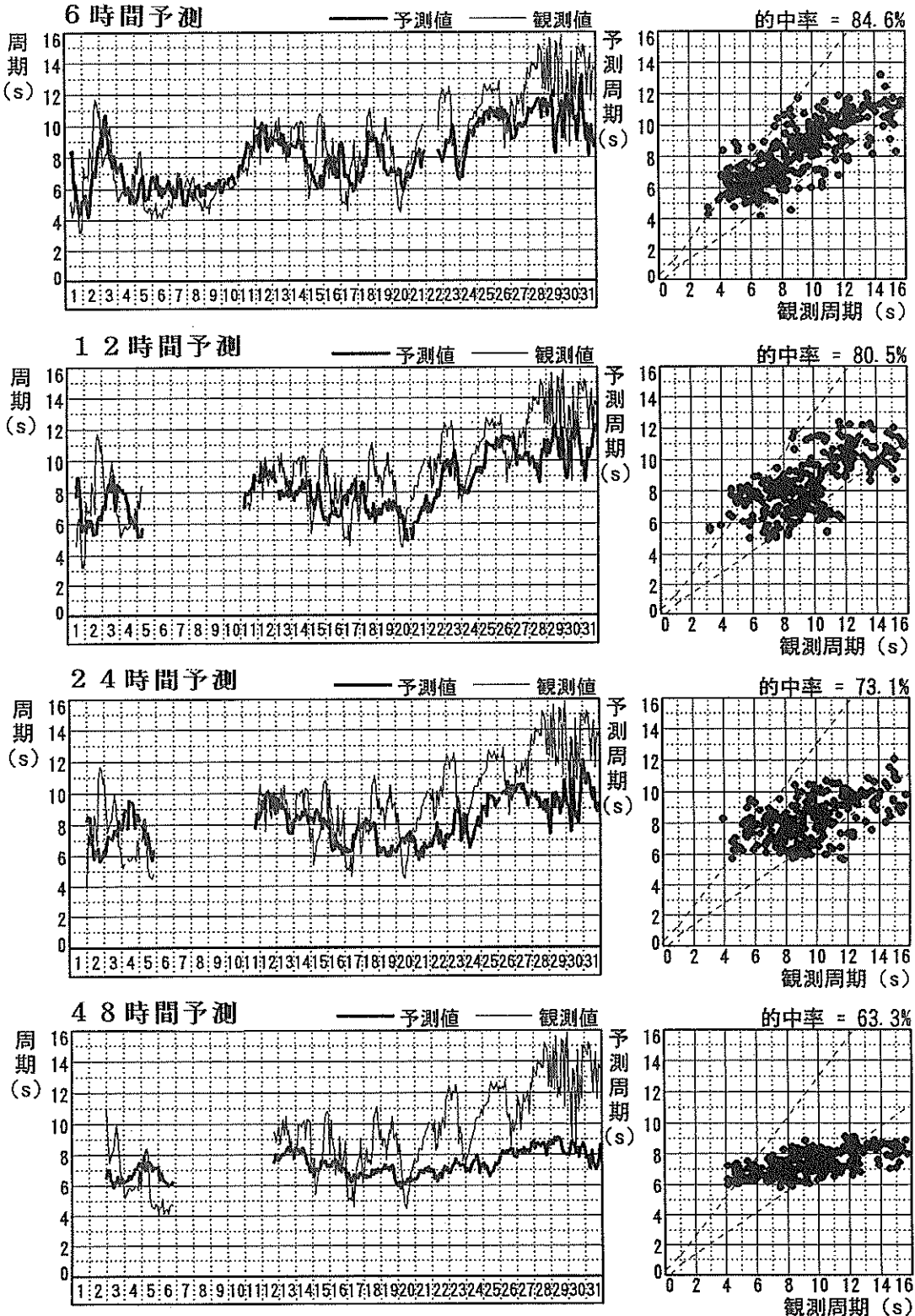
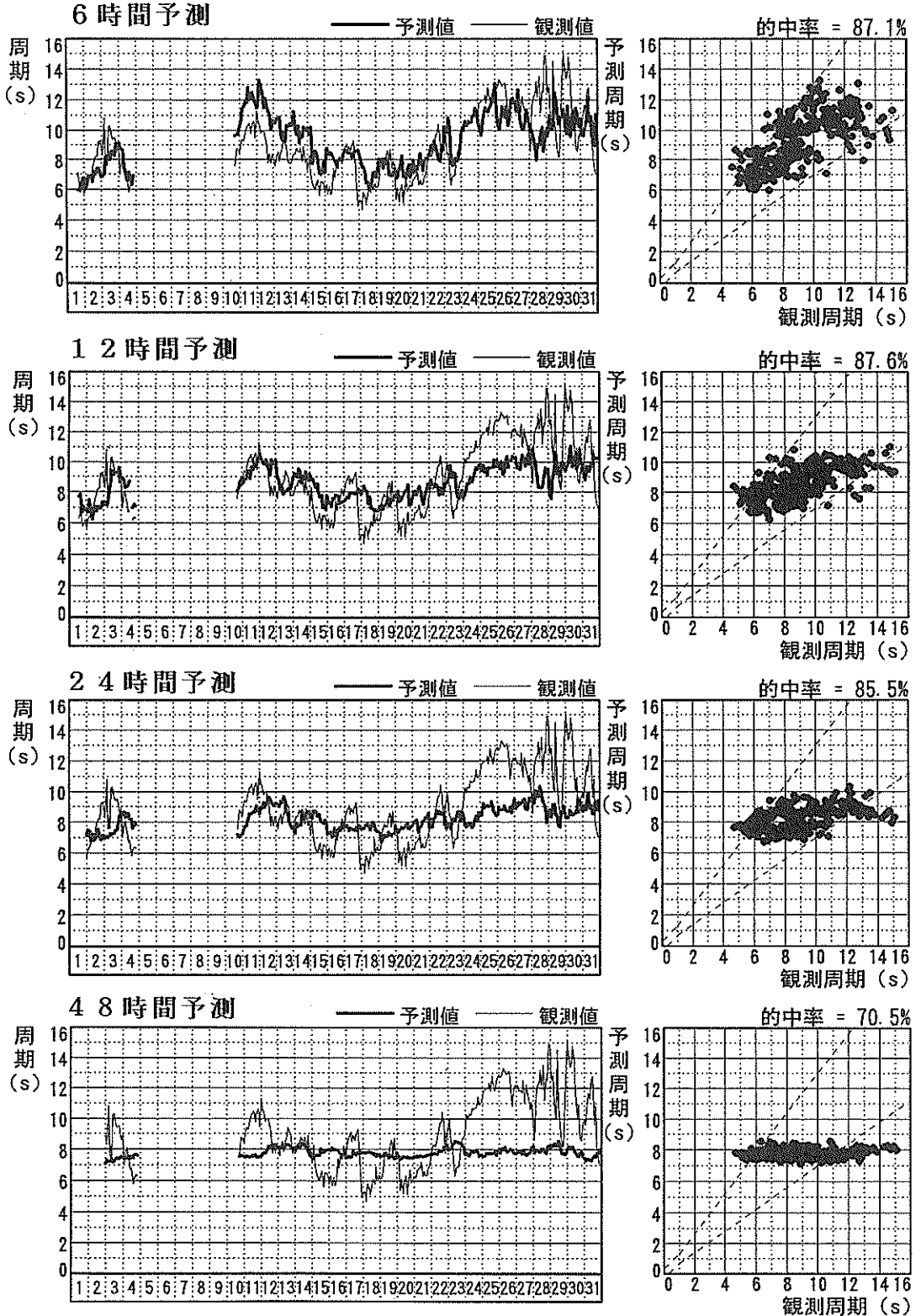


図-22 むつ小川原の有義波周期予測結果 (1月, 1986年)



図一23 常陸那珂の有義波周期予測結果 (1月, 1986年)

⑥本モデルの説明変数の選択基準からその適用範囲は、南西側に説明変数となる波浪観測地点が多数点得られる関東地方から、東北および北陸方面の地点に限られる。

現在、ケーソン据え付けなどの大規模な海上工事では、波浪予測期間として1週間程度が要求される。このような長期の波浪予測では、本モデルは有力な手法とは言えず物理因子重回帰モデルなどが主要な手法となる。本モデルが有力となるのは、上部工打設や消波工設置などの比較的工期の短い作業や、親水性護岸に対する警報データなどで、このような作業では気象データの入力作業を行う必要がなく、予測値に時間遅れもない本モデルが適用していると考えられる。

2段階重回帰モデルが有効となるのは、全ての波浪観測地点が回線で接続され、リアルタイムの波浪データが得られる場合である。現在の波浪観測状況はまだそのような状況にはなっていないが、将来的には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、本研究で提案した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、半自動的な波浪予測システムの運用が可能となる。

5. おわりに

重回帰型波浪予測モデルの問題点を解決するための基礎的検討として、観測波浪のみを用いた予測システムについて波浪の出現時間差などを考慮した解析を行った。その結果、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予測値の高波浪の立ち上がりが時間的に遅れる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、長期の予測では予測精度が低下する。また、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、当然ながら本方法での波浪予測が難しい。

(1993年6月30日受付)

謝辞

本研究で用いた波浪観測データは、各港湾建設局港湾工事事務所、港湾技術研究所海洋水理部海象調査研究室の好意により提供されたものである。また、本研究を行うにあたり、港湾技術研究所野田節男次長、堀江 毅海洋水理部長、高山知司水工部長、橋本典明海洋水理部主任研究官から御指導、御助言を、海洋エネルギー利用研究室研修生柴木秀之氏から有意義な討論を得た。さらに、東亜建設工業株式会社佐藤典之氏の助力を得た。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 後藤智明・青野利夫：単地点出力型スペクトル法による波浪推算システム、港湾技術研究所報告、Vol.31, No.2, pp.55-73, 1992.
- 2) 後藤智明・柴木秀之・青野利夫・片山 忠：波浪予測を目的とした物理因子重回帰モデル、土木学会論文報告集、No.473/II-24, pp.45-54, 1993.
- 3) 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.
- 4) 須田 熙・湯沢 昭：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, 1983.
- 5) Sverdrup, H.U. and W.H. Munk: Wind, sea and swell; Theory of relations for forecasting, Hydrographic Office Pub. 601, 1947.
- 6) Bretschneider, C. L.: Hurricane design wave practices, Proc. ASCE, Vol.83, WW2, pp. , 1957.
- 7) Pierson, W. J., G. Neumann and R. W. James: Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics, Hydrographic Office Pub.603, 1955.
- 8) 磯崎一郎・宇治豪：海上風数値モデルの波浪予測への応用、気象研究所報告、第25巻、第3号、pp.197-231, 1974.
- 9) 永井紀彦・後藤智明・小舟浩治：ハイブリッドパラメータ法による波浪推算モデル(第1報) - 東京湾における検討 -、港湾技術研究所報告、第29巻、第4号、pp.85-118, 1990.
- 10) 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、海岸工学論文集第38巻、pp.961-965, 1991.

- 11) 駒口友章・松岡道男・進藤信博・木村克俊・窪内篤：浜益漁港における波浪予測の運用について，海岸工学論文集第39巻，pp.1056-1060, 1992.
- 12) 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，pp.138-142.,1983.

主要記号表

a_0, a_i	: 重回帰係数 (第1段階)
b_0, b_j	: 重回帰係数 (第2段階)
$C(H_i, H_j)$: 観測波高間の共分散
C_g	: 群速度
c_{ij}	: 気圧値の重回帰係数
F_1	: 風から波へ供給されるエネルギーの項
F_2	: エネルギー消散項
f	: 周波数
H	: 有義波高
H_f	: 予測有義波高
N	: 波浪データの個数
n	: 説明変数の個数
R_{ij}	: 相互相関係数
$S(f, \theta)$: 方向スペクトル
T	: 有義波周期
z_{ij}	: 気圧値
$\varepsilon(t)$: 第1段階の重回帰式に現れる残差
$\delta(t)$: 第2段階の重回帰式に現れる残差
σ	: 観測波浪データの分散