

波浪推算モデルと統計的手法による沿岸波浪予測

小林 智 尚*・足 立 忠 行**・安 田 孝 志***

第三世代波浪推算モデル WAM と統計手法を組合せ、地形などの局所的影響のある沿岸域での波浪予測モデルを構築した。モデルではまず海上風実況データと WAM で対象域の沖波を算定し、これを主成分分析で分解、各成分と対象域での波浪観測値をカルマンフィルタで関連づける。次に、海上風予報データで沖波を予報し、先の主成分とカルマンフィルタ係数で予報沖波を分解・再合成して対象域での予測波浪を得る。本モデルは主成分分析とカルマンフィルタを用いることにより波浪成分波間での多重共線性を抑え、緩やかな季節変動などにも対応している。局所海岸地形による遮蔽効果のある海域に本モデルを適用し、良好な予測結果を得た。

1. はじめに

波浪予測は海上・港湾工事や荷役での安全確保や効率的な管理、航行船舶の安全確保などに必要な情報である。なかでも人間活動の活発な沿岸域での波浪予測は必要性が高い。しかしながら一方、この沿岸域の波浪は地形などの局所的な影響を受けやすく、適切な波浪予測にはさまざまな問題がある。

波浪予測手法は波浪推算モデルを用いる方法と統計モデルを用いる方法に大別できる。近年、WAM をはじめとする第三世代波浪推算モデルや局所気象情報が比較的容易に入手・活用できるようになり、これらを用いた波浪予測が可能となっている（例えば、研究現況レビュー小委員会, 2001）。一方、統計モデルによる波浪予測では多変量自己回帰式やカルマンフィルタを用いたモデルが提案されている（例えば、橋本ら, 2001）。これらのモデルでは各種統計手法を用いることにより、沿岸域波浪の地形・海上風などの局所的影響を陰的に取り込み再現している。

本研究では、高精度の推算が可能になりつつある第三世代波浪推算モデルと、地形や海上風などの局所的な影響を陰的に再現できる統計手法とを組合せ、沿岸域での確な波浪予測が可能な予測モデルの開発を試みる。

2. 沿岸波浪予測手法

(1) 予測モデルの構成

本研究では波浪予測対象地点周辺の海上風の実況値と予報値そして対象地点での波浪観測値が現在入手可能であることを考慮し、これらのデータを用いて沿岸波浪予測モデルを構成した。ただし、波浪観測値については有義波高と有義波周期の二つの値を用いた。

沿岸波浪予測モデルの構成を図-1 に示す。図に示す

ように、モデルは解析部と予測部に大きく分けられる。解析部では逐次得られる海上風の実況値を用いて波浪推算モデルにより予測対象地点の沖波波浪の方向スペクトルを推算する。ここでは推算モデルに波浪推算モデル WAM を用いた。次に推算された沖波の方向スペクトルを予測対象期間以前データで主成分分析し固有ベクトルを得る。そしてこの固有ベクトルで現時点での沖波波浪方向スペクトルを分解する。最後に分解された各成分スペクトルの予測地点への伝達率を説明変数として、これに対象地点での波浪観測値を用いてカルマンフィルタで求めた。

一方、予測部では解析部で得られた値を用いて対象地点での波浪を予測する。まず海上風の予測値を用いて予測時刻における対象地点の沖波波浪方向スペクトルを波浪推算モデル WAM で推算する。つぎに解析部の主成分分析で得られて固有ベクトルを用いて予測された沖波の方向スペクトルを互いに直交する成分スペクトルに分解する。そして解析部のカルマンフィルタで得られている各成分スペクトルの予測地点への伝達率を用いて、予測対象地点での波浪を算出する。

このモデルで主成分分析を用いたのは波浪スペクトル成分間での多重共線性を除去し、予測精度を向上させるためである。また、カルマンフィルタには時変係数型波浪予測式を用いて季節変動等のゆるやかな変化をモデル

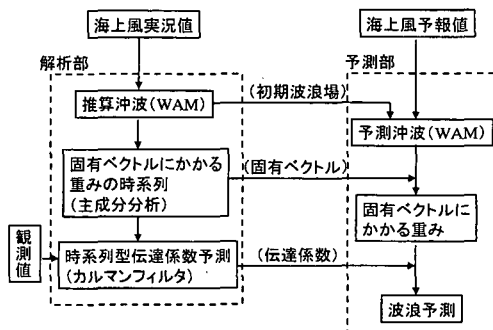


図-1 沿岸波浪予測モデルの構成

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻
** 工修 応用技術(株)
*** 正会員 工博 岐阜大学教授 大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

に組み込んでいる(橋本ら, 2001)。

(2) 波浪統計量の表現

本研究では予測地点での観測値を有義波高と有義波周期とし、これらと波浪方向スペクトルの関係を波浪推算モデル WAM に従って表した。すなわち、波浪方向スペクトルを周波数方向に不等間隔 Δf_i に n_f 分割された周波数 f_i と、方向角方向に等間隔 $\Delta\theta$ に n_θ 分割された方向角 θ_j に分解し、 f_i, θ_j に対するスペクトルの成分を $F_{i,j}$ とする。この方向スペクトル成分 $F_{i,j}$ と有義波高 H_s 、有義波周期 T_s との関係は次式のように表される。

$$\left(\frac{H_s}{4}\right)^2 = \sum_i \sum_j \frac{n_f}{n_\theta} F_{i,j} \Delta\theta \Delta f_i + \frac{f_{n_f}}{4} \left(\sum_j F_{n_f,j}\right) \Delta\theta \quad (1)$$

$$T_s \left(\frac{H_s}{4}\right)^2 = \sum_i \sum_j \frac{F_{i,j}}{f_i} \Delta\theta \Delta f_i \quad (2)$$

これらの式から、波浪統計量から求められる変量 $(H_s/4)^2$ と $T_s(H_s/4)^2$ は方向スペクトルの成分 $F_{i,j}$ の線形和で表されることがわかる。

(3) 主成分分析による沖波波浪方向スペクトルの分解

つぎに波浪推算モデルで得られた沖波の波浪方向スペクトルを主成分分析により固有ベクトルに分解する。

時刻 t における波浪の方向スペクトル $F_{i,j}$ をベクトル形式 F_t と表す。ここで F_t は $(n_f n_\theta)$ の次元を持ち、その要素は $F_{i,j}$ である。ある期間の方向スペクトルの共分散行列を用い主成分分析すると、方向スペクトル F_t は

$$F_t = \sum_k c_{k,t} e_k \quad (3)$$

と表すことができる。ここで $c_{k,t}$ 、 e_k は第 k 主成分の固有値(係数)と固有ベクトルである。ただし $|e_k| = 1$ とする。また n_k は主成分数である。主成分分析で各主成分の固有ベクトルが求められている場合、各主成分の係数 $c_{k,t}$ は

$$c_{k,t} = F_t^T e_k \quad (4)$$

より求めることができる。ここで $()^T$ は転置行列を表す。

(4) カルマンフィルタによる伝達率の算出

カルマンフィルタでは観測ベクトル y_n の時系列を次に示すシステム方程式と観測方程式で表現する。

$$x_n = F_n x_{n-1} + G_n v_n \quad (\text{システム方程式}) \quad \cdots (5)$$

$$y_n = H_n x_n + w_n \quad (\text{観測方程式}) \quad \cdots (6)$$

ここで x_n は状態変数、 F_n 、 G_n 、 H_n は変換行列である。また v_n および w は平均ベクトル 0、共分散行列 Q_n または R_n に従うシステムノイズまたは観測ノイズである。ここでは式(1)、式(2)を参考に観測ベクトル y_n を以下のような 2 次元ベクトルとした。

$$y_n = \left(\frac{H_s}{4}\right)^2 \begin{pmatrix} 1 \\ T_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

主成分分析で得られた各主成分のうちカルマンフィルタには寄与率の高い、すなわち重みの大きい第 n_k 成分までを用いることとする。ただし、 $n_k \leq (n_f n_\theta)$ である。状態変数 x_n は主成分分析で分解された沖波波浪方向スペクトルの各成分スペクトル $c_{k,t} e_k$ の、予測対象地点の波浪への伝達率 b_k を要素とするベクトルとする。この伝達率が緩やかに変化するとすればシステム方程式(5)中の変換行列 F_n は $n_k \times n_k$ の単位行列となる。また H_n は

$$H_n = A E_n C_n \quad (8)$$

ここで A は式(1)および式(2)から導かれる 2 行 $(n_f n_\theta)$ 列の係数行列、 E_n は主成分分析で分解された固有ベクトル $e_{k,t}$ による係数行列で、それぞれ

$$A = \begin{pmatrix} \cdots & \Delta\theta \Delta f_i & \cdots \\ \cdots & \frac{1}{f_i} \Delta\theta \Delta f_i & \cdots \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$E_n = (\cdots \quad e_{k,t=n} \quad \cdots) \quad (10)$$

そして C_n は各主成分の重み $c_{k,t}$ を要素とする n_k 次元の対角行列である。

システムノイズ v_n と観測ノイズ w_n は橋本ら(2001)と同様に扱った。ここでは観測ベクトル y_n が 2 次元であるため、観測ノイズ w_n は $w_n = (\sigma_{w1}^2 \sigma_{w2}^2)^T$ と表される。そこでシステムノイズと観測ノイズを σ_{w1}^2 で基準化し、これらのノイズを新たに

$$\tilde{R}_n = \begin{pmatrix} 1 \\ \sigma_{w2}^2 / \sigma_{w1}^2 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\tilde{Q}_n = (\sigma_v^2 / \sigma_{w1}^2) I \quad (12)$$

として、パラメータ $\sigma_{w2}^2 / \sigma_{w1}^2$ と $\sigma_v^2 / \sigma_{w1}^2$ をノイズ制御パラメータとして解析した。

3. 沿岸波浪予測

(1) 予測条件

ここでは予測対象地点を松前観測所とした。松前観測所は図-2 に示すように、北海道日本海沿岸で南に開けた海岸に位置している。このため、特に北東からの波浪成分は地形によって遮蔽されやすい特徴を有している。しかしこの海岸地形は局所的で、波浪推算の計算格子スケール 0.5° 程度では再現できない。

計算は 1994 年 1 月 1 日から約 2 ヶ月間をカルマンフィルタの学習など、予測モデルのスピンアップ期間として、その後 1997 年 12 月 31 日までを予測期間とした。

予測対象地点の沖波を推算するために必要な海上風データには ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) の再解析気象データを用いた。本研究の予測モデルでは図-1 に示すように海上風データの予報値も必要とするが、今回は便宜的にこの予

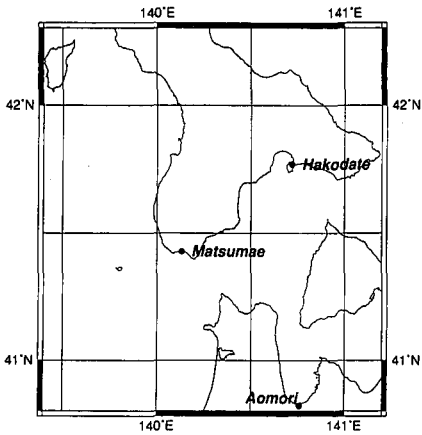


図-2 松前観測所

報値にも ECMWF の再解析気象データを用いた。

海象データには対象地点である松前観測所で得られた有義波高と有義波周期の値を用いた。

波浪予測地点の沖波波浪方向スペクトルの実況値および予測値は、日本海全域を含む東経 $128^{\circ} \sim 142^{\circ}$ 、北緯 $33^{\circ} \sim 47^{\circ}$ の領域で、波浪推算モデル WAM によって推算した。計算格子間隔は経度・緯度方向ともに 0.5° である。

本研究では 72 時間先の波浪を予測するものとし、使用する主成分数やカルマンフィルタのノイズ制御パラメータを変化させて、モデルによる予測値の精度等を検証した。以下では主成分分析に用いる沖波波浪方向スペクトル数を 336 時間分、カルマンフィルタで用いる主成分数 n_k を 8、カルマンフィルタのノイズ制御パラメータ $\sigma_{w2}^2/\sigma_{w1}^2$ と σ_v^2/σ_{w1}^2 を 10^4 と 10^{-6} を基準としてこれらのパラメータに対するモデルの感度を調べた。

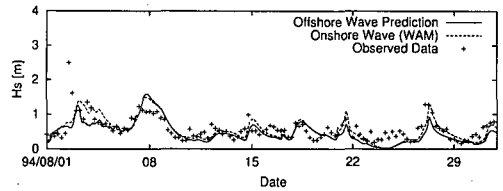
(2) 予測結果

解析結果の一例として波高の予測値の時系列結果を、観測値および推算沖波波浪の有義波高とともに図-3 に示す。また観測値に対する、予測値と推算沖波の有義波高の相関図を図-4 に示す。これらの図から、観測波高に比べて推算沖波波高が大きくなる傾向が見られ、特にこの傾向は冬期に顕著であることが分かる。これに対して予測モデルによる有義波高予測値は夏期・冬期を問わず、ほぼ観測値を再現していることが分かる。このことから、ここで提案する予測モデルは地形などの局所的な影響を受ける沿岸域での波浪予測に有効であると言える。

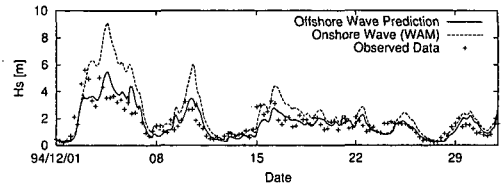
推算沖波波高が観測波高に対して特に冬期に過大になるのは、日本海季節風による北東からの波浪が卓越するが、この波浪が松前観測所周辺の局所地形(図-2)により遮蔽されているためと考えられる。このことは、次に示す主成分分析の結果からも説明される。

(3) 主成分分析による沖波波浪の分解

図-5 に主成分分析で得られた各主成分の固有ベクトルを示す。主成分分析の次段であるカルマンフィルタで算定される、各固有値に対する観測地点への伝達率 b_i のうち、図-5 に示される各成分波のものを表-1 に示す。また予測期間における、第 1 主成分から第 8 主成分までの固有値に対する伝達率 b_i を平均した値の時系列変化を図-6 に示す。図-5 より、冬期では季節風による北東からの波浪成分が卓越していることが分かる。また表-1

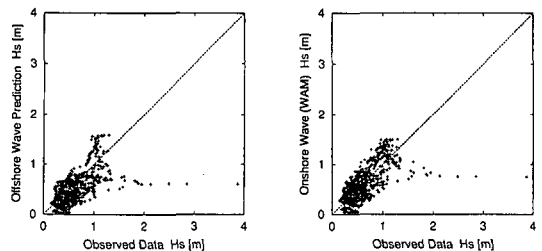


(a) 夏期 (1994 年 8 月 1 日～8 月 31 日)

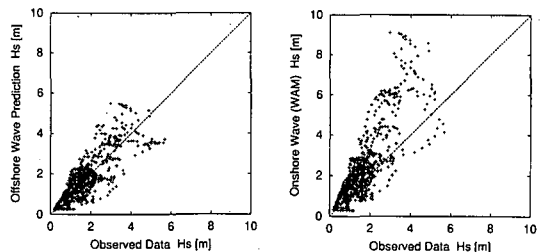


(b) 冬期 (1994 年 12 月 1 日～12 月 31 日)

図-3 有義波高の 72 時間先予測結果



(a) 夏期 (1994 年 8 月 1 日～8 月 31 日)



(b) 冬期 (1994 年 12 月 1 日～12 月 31 日)

図-4 有義波高の観測値と予測値・沖波推算値との相関

表一 図-5の固有ベクトルに対する観測地点への伝達率 b_i

	観測地点への伝達率			
	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
(a) 夏期 (1994年8月10日)	0.97	0.57	1.38	0.56
(b) 冬期 (1994年1月10日)	0.38	1.30	0.62	0.42

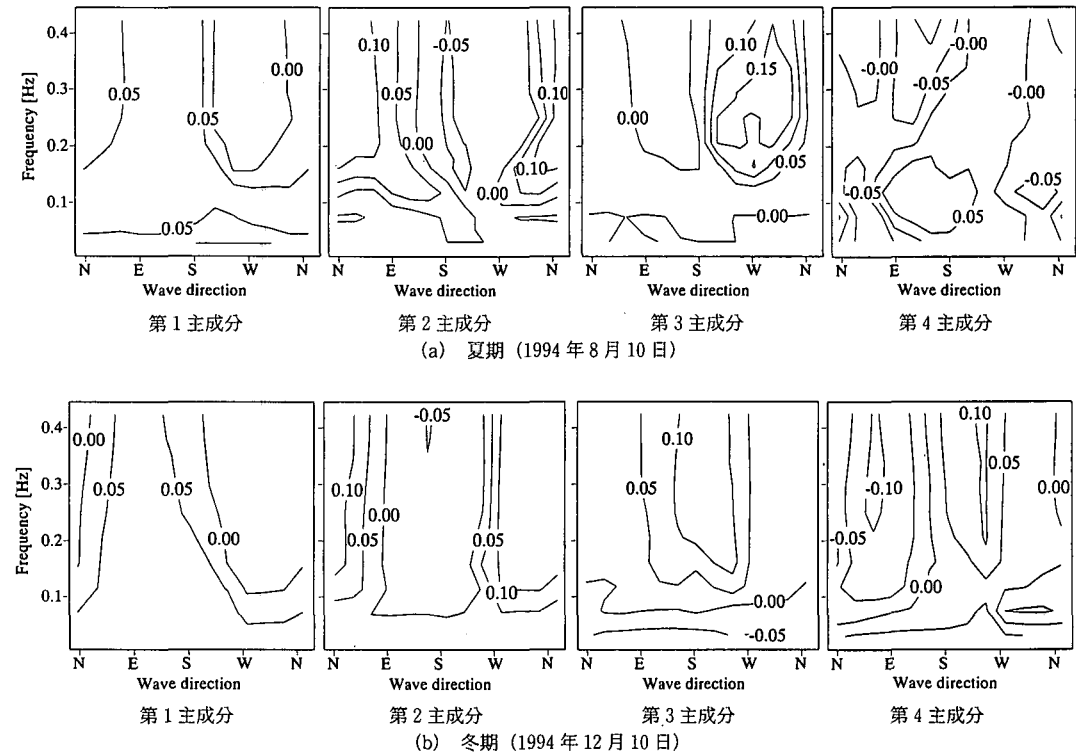


図-5 沖波波浪方向スペクトルの固有ベクトルの一例

からこの卓越した波浪成分の、観測地点への伝達率、特に第1主成分の伝達率が低いことが分かる。これは前節でも述べた、松前観測所周辺の局所地形が冬期に卓越する北東からの波浪成分を遮蔽していることを説明している。

図-3などでは沖波波浪は冬期に大きい、図-6よりこの沖波波浪の観測地点への伝達率はむしろ夏期の方が大きいことが分かる。そしてこの伝達率が低下するのはほぼ11月であることから冬期日本海の主波向がこの伝達率に大きく関係していることが分かる。

(4) カルマンフィルタのノイズ制御パラメータ

ここではカルマンフィルタのノイズ制御パラメータ $\sigma_{w2}^2/\sigma_{w1}^2$ と σ_v^2/σ_{w1}^2 を変化させ、予測結果との関係について検討する。ノイズ制御パラメータ $\sigma_{w2}^2/\sigma_{w1}^2$ または σ_v^2/σ_{w1}^2 を変化させた時の、波浪予測全期間での有義波高予測誤差 $r.m.s.(H_{err})$ をそれぞれ図-7、図-8に示す。

ここで H_{err} は有義波高 H_s の予測値と観測値の差であ

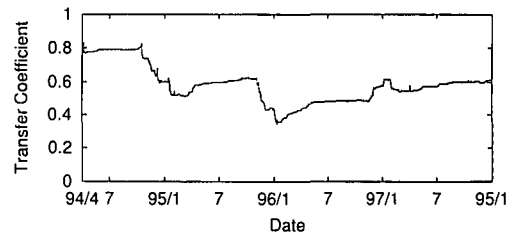


図-6 各主成分の固有ベクトルに対する観測地点の伝達率の時系列変化

る。これらの結果からノイズ制御パラメータ $\sigma_{w2}^2/\sigma_{w1}^2$ と σ_v^2/σ_{w1}^2 の最適値はそれぞれほぼ 10^4 、 10^{-5} であることが分かる。ただし予測モデルの構成から、この値は予測対象地点の地形条件や予測条件などにより多少変化するとされる。

ここでカルマンフィルタの観測ベクトル y_n の要素間でのノイズの割合を示すパラメータ $\sigma_{w2}^2/\sigma_{w1}^2$ の最適値

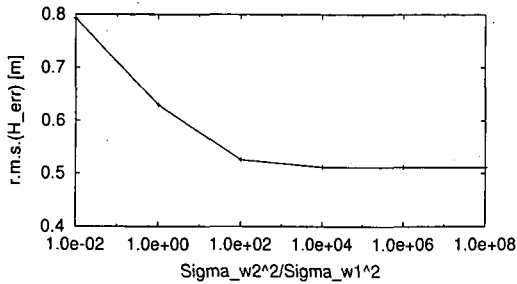


図-7 ノイズ制御パラメータ $\sigma_{w2}^2/\sigma_{w1}^2$ 変化時の予測誤差 ($\sigma_v^2/\sigma_{w1}^2=10^{-5}$)

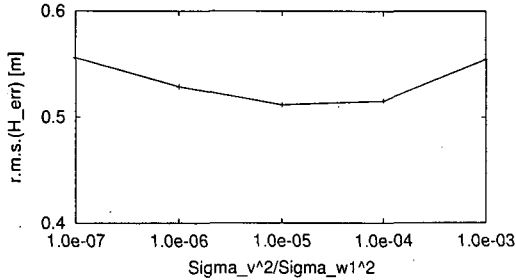


図-8 ノイズ制御パラメータ σ_v^2/σ_{w1}^2 変化時の予測誤差 ($\sigma_{w2}^2/\sigma_{w1}^2=10^4$)

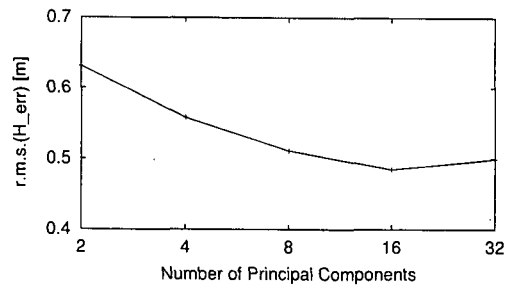


図-9 カルマンフィルタに用いる主成分数と波浪予測誤差

るものの、主成分数が16以上では逆にわずかに増加していることが分かる。これより、カルマンフィルタに入力する主成分分析の成分数は16程度で十分であることが分かる。

4. おわりに

本研究では、波浪推算手法と統計手法を組み合わせ、沿岸域での波浪を予測するモデルを提案した。統計手法を用いることにより、このモデルでは沿岸域での地形などの局所的な影響を考慮することができた。また統計手法に主成分分析とカルマンフィルタを採用することにより入力条件となる沖波波浪方向スペクトルの多重共線性の問題を軽減することができ、また季節変動などの緩やかな変動もモデルで再現可能となった。

そしてこの予測モデルの各パラメータについて感度分析を行い、このモデルで妥当な波浪情報を予測できることを示した。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究助成金基盤研究(B)(2)(課題番号10093329, 代表 安田孝志)によって行われました。ここに謝辞を表します。また解析にはECMWFより提供されました再解析気象データを活用しました。

参 考 文 献

- 研究現況レビュー小委員会 (2001): 新しい波浪算定法とこれからの海域施設の設計法, 土木学会, 256 p.
- 橋本典明・嶺 泰宏・永井紀彦・吉松みゆき・三原正裕 (2001): 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期波浪の統計的予測, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.246-250.

が約 10^4 と極めて大きくなっている。これは、カルマンフィルタの観測方程式(6)から有義波高・有義波周期の予測誤差の観測ベクトル y_n 各要素への誤差伝播を考えた場合、有義波高に比べて有義波周期の予測精度が極端に低いことを表している。これには有義波周期の観測精度が不十分であったか、式(2)で示される波浪統計量と方向スペクトルとの関係式が適切でなかったなどの原因が考えられる。このようにノイズ制御パラメータ $\sigma_{w2}^2/\sigma_{w1}^2$ の値が極端に大きいことから、波浪予測モデルに対する有義波周期の寄与は極めて小さく、したがってカルマンフィルタの観測方程式(6)では有義波高のみを考慮した式のみでもよいことが分かる。

(5) カルマンフィルタに用いる主成分数

カルマンフィルタの入力となる主成分分析の成分数 n_k と波浪予測誤差 $r.m.s.(H_{err})$ との関係を図-9に示す。この図から予測誤差は主成分数を増やすとともに減少す