

# アンサンブル波浪予測の精度と価値について

森 信人<sup>1</sup>・平口博丸<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 大阪市立大学大学院講師 工学研究科都市系専攻 (〒 558-8585 大阪市住吉区杉本町 3-3-138)

<sup>2</sup>正会員 工博(財) 電力中央研究所 地球工学研究所 上席研究員 (〒 270-1194 我孫子市我孫子 1646)

気象庁の週間アンサンブル予報資料を用いて実施したアンサンブル波浪予測シミュレーション結果について解析を行い、予測の精度検証および予測価値について検討を行った。アンサンブル波浪予測の結果を様々な設定波高  $H_s$  を越える波高の出現について幾つかの評価指標を用いて評価し、決定論的波浪予測と比較して1日予測で20～25%、4日予測で30～35%予測精度が改善されることを示した。さらに、コスト・ロスモデルを用いて、アンサンブル波浪予測を利用する際の経済的メリットについて検討を行った。決定論的波浪予測と比較して、アンサンブル波浪予測は波高1mを越えるか否かという常時波浪の出現について有効な予測を与え、その効果は対策コスト/損害比が0.5から外れるほど、予測時間が長くなるほど顕著であることを明らかにした。

**Key Words** : ensemble prediction, forecast score, skill score, cost-loss model, relative economic value

## 1. 緒言

海面における波高や周期を予測する波浪予測は、船舶の運航や海岸・海洋工事の施工管理、漁業、海岸レジャーの運営など様々な目的で利用されている。一般に波浪予測は、利用形態に応じて様々な予測期間が要求される。例えば、レジャーや小型船舶などの海域利用、海岸・海洋工事の大部分の工程に対しては、1日先の波浪予測が重要である。一方、ケーソン据え付けなどの主要な海岸・海洋工事の工程では3日から4日、沈埋トンネル敷設では1週間、大型船舶の運行スケジュール作成には、1日から数日先の波浪予測が必要とされる。しかしながら、数日から1週間先の波浪予測の精度は高いとは言えず、サイト毎の技術者の経験に頼るところが大きい。

数値予測における予測誤差は、予測モデルの不完全さに起因する誤差(モデルに起因する誤差と数値解法に起因する誤差の和)と、計算初期に含まれる不確定性(初期値誤差)が時間と共に増大するために生じる誤差とに大別できる。予測モデルの改良により予測誤差を小さくするための努力が続けられる一方で、初期値に含まれるわずかな誤差(観測誤差程度)が予測時間と共に指数関数的に増大するため、いくらず予測モデルと初期値の推定精度を上げても、ただ一つの初期値から出発する従来の決定論的な予測には限界があることが認識されるようになってきた。そこで気象予測では、初期値に含まれる誤差の空間分布と時間経過による誤差拡大を推定するアンサンブル気象予測法<sup>1)</sup>が行われるようになってきた。アンサンブル気象予測では、僅かに異なる複数の初期値(メンバー)から予測を行い、それら複数の計算結

果を利用して確率的な予測を行う。ECMWF(ヨーロッパ中期気象予報センター)では、T63L19(水平解像度約210km,鉛直19層)、33メンバーのアンサンブル気象予報が1992年12月から開始され、その後、解像度やメンバー数が増強されている<sup>2),3)</sup>。日本の気象庁でアンサンブル気象予報が実運用されたのは、1996年3月から始まった10メンバーによる1ヶ月予報が最初であり、2001年3月からT106L40(水平解像度約110km,鉛直40層)を用いて25メンバーによる週間予報が開始され、確率予報の配信が開始されている<sup>4)</sup>。

波浪予測の主要な外力(境界条件)は海上風であるため、気象予測の精度は波浪予測に大きな影響を与える。そこで、アンサンブル気象予測により予測される海上風データを用いたアンサンブル波浪予測が注目されている<sup>5),6)</sup>。気象と波浪が結合されたECMWFのアンサンブル波浪予測モデルでは、数日後のうねりの推算精度が向上することが明らかにされている<sup>5)</sup>。著者らが行ったアンサンブル波浪予測の精度検証結果<sup>6)</sup>では、決定論的な予測に対しアンサンブル予測の有意性は、予測開始後2～3日後から現れ、平均予測結果の誤差の大きさをメンバーのばらつき(Spread)より推定できることを明らかにしている。しかしながら、前報ではアンサンブル波浪予測の誤差とその統計的分布特性について議論を行っており、確率予測のパフォーマンスについての検証や使用するユーザー側の観点からの検証は行わなかった。

気象についてのアンサンブル予測システムの精度検証を行う場合、著者らが前報で行ったような平均予測結果の誤差やメンバーのばらつき(Spread)についての検討<sup>6)</sup>の他、Relative Operating Characteristics<sup>7)</sup>、

Brier Score<sup>8)</sup>, Ranked Probability Score<sup>9)</sup>, Relative Operating Characteristics<sup>10)</sup>等の評価指標を用いてパフォーマンスが調べられることが多い。また、アンサンブル予測を利用することにより得られる経済的なパフォーマンスについては、コスト・ロスモデルを用いて評価が行われる<sup>11)</sup>。いずれにしても、アンサンブル予測から得られる膨大な予測結果から有益な情報をいかに抽出するかが大きな課題であり<sup>12),13)</sup>、特に予測結果を利用する一般のユーザーにとっては、従来の決定論的な予測とは異なる確率的な予測情報を適切かつ有効に利用する技術が必要となる<sup>14),15)</sup>。それ故、アンサンブル予測の情報に基づいて何らかの行動(意思決定)を行う場合、個別の事情に応じた意思決定のためのルール作り(リスクマネージメント)が必要となる。予測を利用するユーザーとしては、予測誤差などの評価よりも予測情報を利用した意思決定によりどのような利益・損失が発生するのかといった観点からの定量的な評価が重要であり、アンサンブル波浪予測の不確実性と意思決定との関連性を明確にする必要がある。

本研究では、2001年3月から本格運用された気象庁の週間アンサンブル予報資料の海上風データを用いて得られた4ヶ月間のアンサンブル波浪予測シミュレーション結果より、確率予測評価の観点からアンサンブル波浪予測の精度検証を実施する。まず始めに、設定したある波高を上回るイベントを対象にBrier Scoreを用いた評価を行う。ついで、同様なイベントを対象とし、Relative Operating Characteristicsを用いてより詳細な予測評価についての解析を行う。最後に、確率予測結果をユーザーが活用できるようにするため、コスト・ロスモデルを用いて、アンサンブル波浪予測を利用することにより得られる価値についての検証を行う。

## 2. 計算方法

本研究では、前報で実施した気象庁の週間アンサンブル気象予報資料の海上10m高度風速を用いたアンサンブル波浪予測結果を使用した<sup>6)</sup>。気象庁の週間アンサンブル気象予報資料と元となる週間アンサンブル気象予測モデルは水平格子間隔1.125度、水平格子数320×160、鉛直層数40層、モデル最上層0.4hPaの全球スペクトルモデル(T106L40)である<sup>16),17)</sup>。この気象予測モデルは、決定論的な予報に用いられる高解像度全球モデル(T213L40; 水平解像度約60km、鉛直40層)と同じものであるが、計算量を考慮して水平解像度が全球モデルの半分に抑えられている。気象庁の週間アンサンブル予報システムでは、成長モード育成法(Breeding of Growing Mode: BGM)を用いており、1つの成長モードに対して振幅が正と負の2種類の摂動を考慮す

ると共に、摂動を加えない単独予測(決定論的予測)も加えて、合計25個のメンバーによるアンサンブル予測が毎日1回UTC1200より216時間先まで実施されている。アンサンブル予測および決定論的予測の比較対象として、全球モデルによる客観解析値も使用した。

波浪予測はWAMモデル<sup>18)</sup>を用いた。北緯10-60度、東経115-165度の日本を含む北太平洋西部を計算範囲対象とし、計算格子は球面座標系、空間解像度は0.5度、深海条件で計算を実施した。時間解像度は1200秒、海上風の入力時間間隔は6時間とした。側方境界は開境界、方向スペクトルの周波数および空間は25および12分割の下で計算を行った。

波浪予測の計算期間は2001年3月3日から6月30日までの約4ヶ月間とし、毎日UTC1200に予測を開始し、4日後(96時間)までの波浪予測を行った。波浪場の初期値には気象庁の全球客観解析値の海上風データ(解像度1.25度、以下では客観解析値と表記)を用いてスピナップ(初期値生成)を3日実施したのを用いた。データ解析にあたり、外境界の影響を除くため北緯20-50度、東経125-155度の深海領域のみを対象とした。

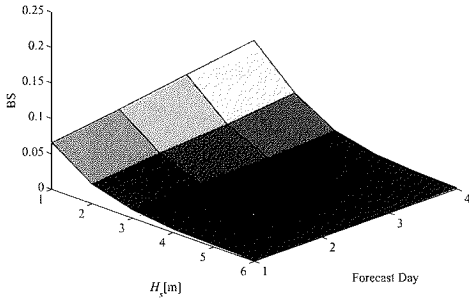
以下では、アンサンブル波浪予測に対して、気象の決定論的予報の海上風を用いた決定論的波浪予測結果を決定論的予測もしくはControl Run、波浪予測結果を比較するための比較対象として、気象の客観解析値の海上風データを用いた波浪推算結果をReference Runと表記する。計算手法の詳細やReference Runの精度については、前報<sup>6)</sup>を参照されたい。

## 3. アンサンブル波浪予測結果の検証

アンサンブル波浪予測における結果は確率予測として与えられる。確率予測は、決定論的予測に比べて情報量が飛躍的に増大するだけでなく、予測値をどのように活用するのかという取り扱いが必要となる。さらに、降水の有無などの離散的な予測対象と異なり、波高や周期など連続的な値を持つ現象を予測対象とした場合、予測の検証に工夫が必要となる。気温や降水量などの連続値に対する確率値別の出現確率の評価法は、様々な方法が提案されている<sup>10),12)</sup>。以下では波高を予測対象とし、ある設定した波高の閾値 $H_s$ m(以下では設定波高ないし $H_s$ と略記する)を越えるかどうかを予測対象イベントとし、アンサンブル波浪予測の特性と決定論的予測結果の比較を行い、評価を行う。

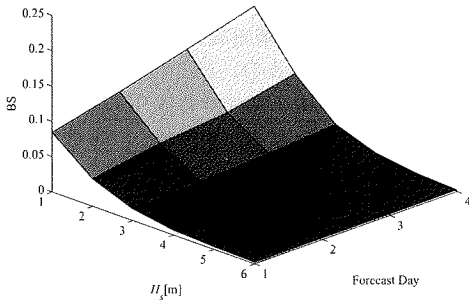
### (1) Brier Scoreによる検証

対象とする現象が2分されるような場合の確率予測値については、Brier Score (BS) が最も広く用いられ



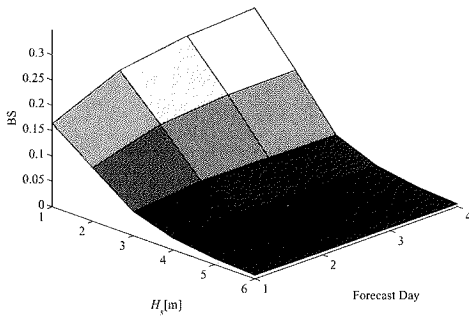
(a) アンサンブル予測

Control Forecast



(b) 決定論的予測

Persistence Forecast



(c) 持続予報

図-1 アンサンブル予測、決定論的予測および持続予測の  $H_{1/3}$  についての Brier Score

る<sup>19)</sup>。Brier Score は、予測確率値の平均 2 乗誤差として次式のように定義される (Murphy による定義<sup>19)</sup>)。

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - o_i)^2, 0 \leq y_i \leq 1, o_i \in \{0, 1\} \quad (1)$$

表-1 対象期間内における設定波高  $H_s$  以上の波浪の出現頻度

$H_s$	1m	2m	3m	4m	5m
出現頻度	46.2%	11.8%	3.9%	1.4%	0.6%

ここで、 $N$  は総サンプル数、 $y_i$  は予測確率値、 $o_i$  は観測値ないし解析値であり、予測した現象が出現したとき 1、出現しなかったときは 0 を与える。本研究では、解析対象範囲内で Reference Run の値が設定した波高値  $H_s$  を越える場合に  $o_i = 1$ 、越えなかった場合を 0 とする。Brier Score は完全予測 (すべての中) の時に 0、最悪予測 (全てはずれ) のとき最大値 1 となる。さらに、Brier Score を用いた Skill Score (BSS) を次式のように定義する。

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (2)$$

ここで  $BS_{ref}$  は、参照予測についての Brier Score を意味する。アンサンブル予測以外に、参照する予測として決定論的予測と実況値がそのまま続くと仮定した持続予測の 2 種類を用い、それぞれの Brier Score を求め、これらの結果からも Brier Score と Skill Score を求めた。以下では、 $BS_{ref}$  に決定論的予測を用いた場合の BSS を  $BSS_c$ 、持続予測を用いた場合の BSS を  $BSS_j$  と表記する。

図-1 に示すのは、 $H_{1/3}$  についてアンサンブル予測値、決定論的予測および持続予測より求めた Brier Score である。図の横軸は Brier Score を求める際の設定波高と予測時間長であり、縦軸は Brier Score の値を示す。Brier Score の値が小さいほど予測の適中率が高いことになる。全体的に設定波高  $H_s$  が大きいほど Brier Score の値は小さく、その値は予測手法に依らず予測時間に対して単調増加であり、 $H_s$  に対して単調減少となっている。Brier Score が予測時間長に対して単調減少なのは、先の予測ほど精度が悪くなるためであるが、設定波高  $H_s$  が大きいほど Brier Score の値が小さくなるのは  $H_s$  の値が大きくなると想定したイベントの出現頻度 (波高  $H_{s,m}$  を越える事象) が大幅に減少することによるものである。表-1 に予測を行った期間中に解析対象領域内で設定波高  $H_s$  を上回るイベントが出現した確率を示す。表より、対象期間中に 1m を越える波高の出現確率は 46.2% とほぼ半々の割合で波高が 1m を越えるイベントが生じているが、2m 以上になるとその出現頻度は 11.8%、 $H_s=3m$  で 3.9% まで急速に低下する。式 (1) に示した定義より、Brier Score は予測したイベントの出現について予測と実況の差の 2 乗平均値であり、予測したい現象の生起確率が 50% から極端に離れる場合には、現象が生じないか常に生じているという状況の寄与が支配的になるため、予測手法単体の

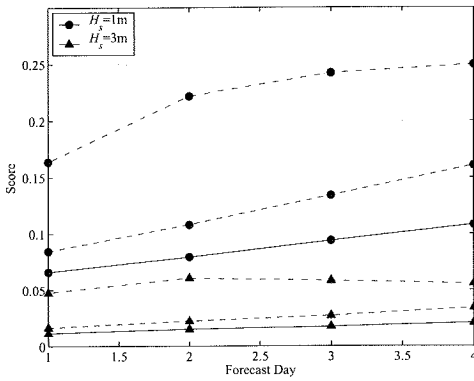


図-2 Brier Score に及ぼす予測時間長の影響 (●:  $H_s=1m$ , ▲:  $H_s=3m$ ; 実線: アンサンブル予測, 破線: 決定論的予測, 1点鎖線: 持続予測)

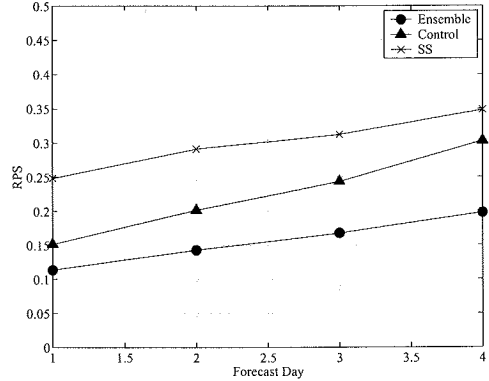


図-4 RPS と予測時間長の関係 (●: アンサンブル予測, ▲: 決定論的予測, ×: SS)

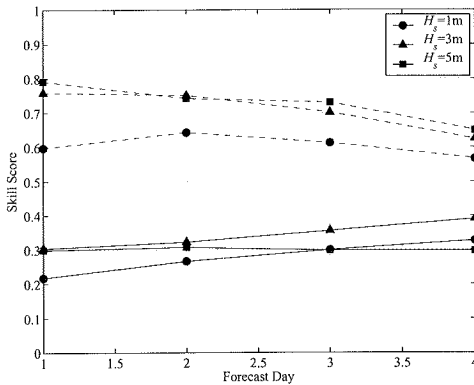


図-3 BSS と予測時間長の関係 (●:  $H_s=1m$ , ▲:  $H_s=3m$ , ■:  $H_s=5m$ ; 実線:  $BSS_c$ , 破線:  $BSS_j$ )

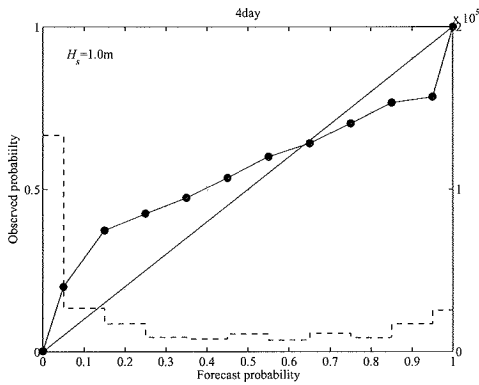
精度検証には向かない。ただし、以下で検討するように、異なる予測手法間の精度検証を BSS を用いて行うことは可能である。

アンサンブル波浪予測値、決定論的予測および持続予測の予測結果を直接比較するため、 $H_s=1, 3, 5m$  の場合の Brier Score および BSS と予測時間の関係を図-2 および図-3 に示す (図-2 の Brier Score については複雑になるため、 $H_s=5m$  についての結果はプロットしていない)。図-2 より、設定波高  $H_s=1m$  とした場合の 1 日予測の Brier Score は、アンサンブル波浪予測で 0.07、決定論的予測で約 0.08、持続予測で 0.16 であり、4 日予測ではそれぞれ 0.11、0.16 および 0.25 まで増加する。また、Brier Score の値は予測時間に対してほぼ単調に増加しており、 $BSS_c$  の値も  $H_s=1$  および 3m の場合は同様な傾向が見られる。これは、予測時間長に対する持

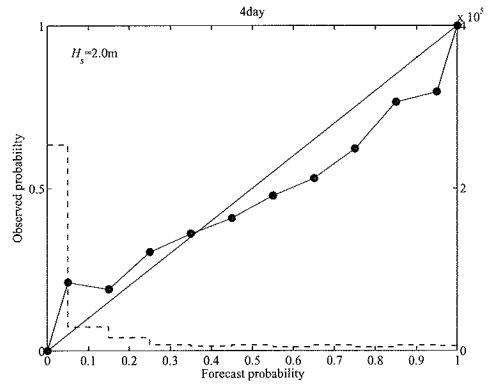
続予測の Brier Score の増加率が、アンサンブル波浪予測よりも大きいためであり、決定論的予測に対するアンサンブル波浪予測の改善率である  $BSS_c$  は、 $H_s=1m$  の場合、1 日予測で 0.21 が 4 日予測では 0.33 まで増加し、 $BSS_j$  は、 $H_s=1m$  の場合、1 日予測では 0.60 が 4 日予測では 0.57 とやや減少する。 $BSS_j$  は、予測時間に対してやや単調減少の傾向があるものの、改善率自体は 0.6 から 0.8 と非常に高い値となっている。 $H_s=1m$  の場合の 4 日予測の  $BSS_c$  は 0.33 であり、 $H_s=3m$  の場合 0.39 まで改善される。これに対し、4 日予測の  $BSS_j$  は、 $H_s=1m$  で 0.57、 $H_s=3m$  で 0.62 と 2 倍近い改善率を示している。持続予測のスコアは非常に悪く、これが Skill Score に表れている。

上記の結果から、アンサンブル波浪予測の結果を Brier Score で評価した場合、設定波高を  $H_{1/3}=1m$  とした波浪の出現予測精度は、決定論的予測と比較して 4 日予測で約 30%、持続予測と比較して約 60% 改善されることがわかった。但し、 $H_{1/3}$  についての確率予測に対して Brier Score を用いて評価を行うと、設定波高  $H_s$  が大きくなるに従って現象の生起確率が減少するため、見掛け上値が小さくなる。このため、生起確率が 50% より極端に低い現象 (ここでは高波浪) についての出現予測などに Brier Score を用いて予測結果を評価する場合は注意が必要である。

Brier Score は 1 つのイベントの生起についての評価指標であるため、先に  $H_s$  毎に評価を行ったが、Brier Score を複数のカテゴリーに展開されるイベントに拡張した評価法として Ranked Probability Score (RPS) がある<sup>20),21)</sup>。RPS は Brier Score と同様に予測値と観測結果の 2 乗誤差で定義されるが、対象とするイベントを離散化し、その累積確率を用いて定義される。各イベント毎の予測と観測の出現確率を  $y_j$  および  $o_j$  とす



(a)  $H_s = 1m$



(b)  $H_s = 2m$

図-5 設定波高  $H_s$  を越える確率の Reliability Diagram (4日予測の結果；実線：確率値，点線：サンプリング数)

ると、累積確率  $Y_m$  および  $O_m$  は次式のようになる。

$$Y_m = \sum_{j=1}^m y_j, \quad m = 1, \dots, J \quad (3)$$

$$O_m = \sum_{j=1}^m o_j, \quad m = 1, \dots, J \quad (4)$$

この累積確率  $Y_m$  と  $O_m$  より、RPS は次式のように定義される<sup>21)</sup>。

$$RPS = \sum_{m=1}^J (Y_m - O_m)^2 \quad (5)$$

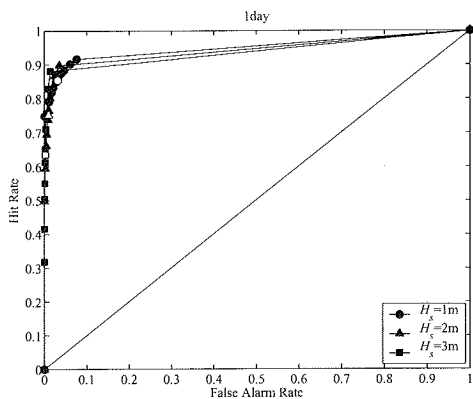
Brier Score 同様に、RPS は完全予測の場合 0、最悪予測のとき最大値 1 となる。図-4 に示すのは、アンサンブル波浪予測および決定論的予測について、波高 1m 以下、1~2m、2~3m、3~4m、4~5m、5m 以上のカテゴリーに分割し、計算した RPS とその Skill Score (SS) である。アンサンブル波浪予測および決定論的予測に対する RPS の値は、Brier Score よりやや大きく 0.1~0.3 となっている。両者の RPS は予測時間に対してほぼ線形に増加し、決定論的予測の RPS の方がその増加率が高いため、RPS の Skill Score も予測時間に比例して増加 (改善) している。RPS を用いて予測結果を評価すると、決定論的予測と比較してアンサンブル予測の改善率は 1 日予測で 25%、4 日予測で 35% であり、予測時間長に対して単調増加することがわかる。

## (2) Relative Operating Characteristics による検証

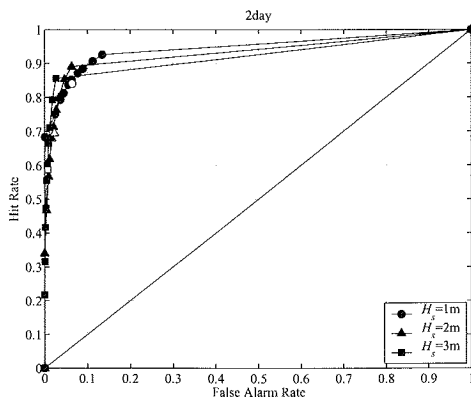
Brier Score や RPS は単純で理解し易く、予測結果を提供する側には便利であるが、確率予測の持つ情報のほんの一部を利用しているのに過ぎない。確率予測の信頼性を検証する方法として、Reliability Diagram<sup>10)</sup> がある。Reliability Diagram は、確率予測で与えられる予測値と

実際にイベントが発生した頻度が対応しているのかを調べるものである。図-5 に示すのは、設定波高  $H_s = 1 \sim 2m$  を越えるイベントについての Reliability Diagram である。図の横軸は予測確率、左側の縦軸は Reference Run において観測された生起確率、右側の縦軸はサンプリング数であり、図中の実線は完全予測、点線はサンプリング数を示す。4 日予測における  $H_s=1$  および  $2m$  についての Brier Score は、0.11 および 0.06 であった。図より、設定波高  $H_s=1m$  の Reliability Diagram は、完全予測を意味する図中の直線からややはずれているが、 $H_s=2m$  では完全予測に近く、予測した確率に近い頻度でイベントの出現が Reference Run でも観測されていることがわかる。紙面の関係に掲載しないが、 $H_s=2m$  と同様な傾向は  $H_s=3$  および  $4m$  でも見られた。設定波高  $H_s=1m$  についての Reliability Diagram が、完全予測からのずれが大きい原因としては予測モデルのバイアス等が考えられる。いずれにせよ、イベントの発生確率の予測という点から見ると、今回利用しているアンサンブル波浪予測結果の信頼度は比較的高いと言える。但し、Reliability Diagram による検討では、確率予測と実際の発生確率が同じであるかどうかはチェックできるが、その確率予測が適切なタイミングで与えられているかどうかは不明である。

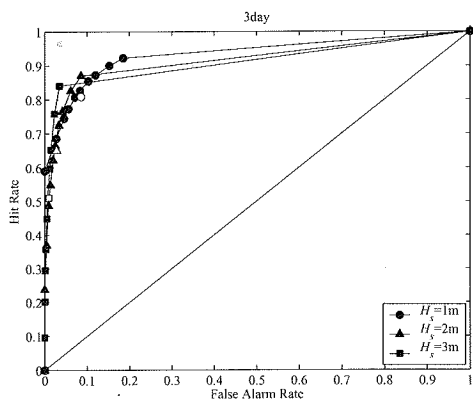
確率予測の特徴についてより詳しく調べるため、Relative Operating Characteristics (ROC) を用いて予測結果の評価を試みる。予測確率毎の予測が的中する割合とはずれる割合を調べるには、イベントの生起 (実況) について、表-2 に示すように分類して行う方法が多く用いられる。適中率 (Hit Rate :  $HR$ ) はイベントが起こると正しく予測した数と実際イベントの起こった回数との比であり、空振り率 (False Alarm Rate :  $FR$ ) はその逆である。表-2 の定義を用いて、両者は次式のよ



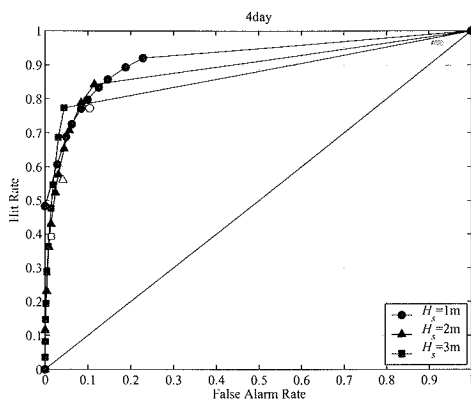
(a) 1日予測



(b) 2日予測



(c) 3日予測



(d) 4日予測

図-6 ROCにおよぼす予測時間および設定波高  $H_s$  の関係 (●:  $H_s = 1\text{m}$ , ▲:  $H_s = 2\text{m}$ , ×:  $H_s = 3\text{m}$ )

表-2 予測と実況の対応表

		observed		sum
		no	yes	
forecast	no	a	b	a+b
	yes	c	d	c+d
sum		a+c	b+d	

うに表される。

$$HR = \frac{d}{b+d} \quad (6)$$

$$FR = \frac{c}{a+c} \quad (7)$$

ROCに関する図は、適中率・空振り率共に1の点を始めとし、確率予測値毎に両者をプロットすることにより得られる。適中率が高く、空振り率が低ければROC曲線は図の左上に近づき、ROC曲線の右下の面積 (ROCA)

は1に近づく。適中率=空振り率となる場合は、意味のない予測であり、ROC曲線は図中に示す勾配1の直線に一致し、この時のROC領域の面積は0.5となる。図-6は、設定波高  $H_s=1, 2, 3\text{m}$  としたときのROCを予測時間長さ毎に示したものである。図より、同じ予測時間では設定波高  $H_s$  が高くなると、FRが非常に小さい領域でのパフォーマンスは増す一方、HRの上限値は低くなる傾向がある。また、同一の設定波高  $H_s$  では、予報時間が長くなるとパフォーマンスは明らかに低下している。 $H_{1/3}$  についてのアンサンブル波浪予測のROCは、ECMWFが行った降水に対するアンサンブル気象予測結果<sup>22)</sup>に比べて、全体的にROC曲線が左上隅に片寄っており、アンサンブル波浪予測のパフォーマンスは比較的高いと言える。

対象とするイベントの出現確率についてROC曲線を用いて評価する場合、ROC曲線が上に膨らむほど良い予測であるから、ROC曲線の右下の面積 (ROCA) は上記の結果を1つのパラメータに集約することができ

表-3 予測および対策と  $C$  および  $L$  の関係

		occurs	
		no	yes
take action	no	0	$L$
	yes	$C$	$C$

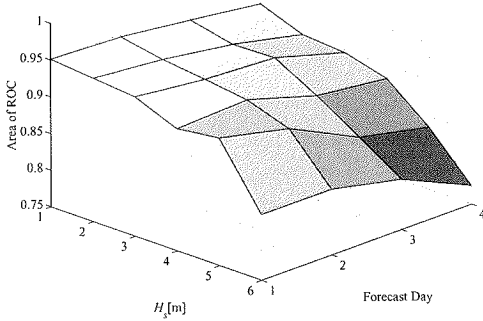


図-7 ROCA と予測時間および設定波高  $H_s$  の関係

る。さらに、ROCA では Brier Score と異なり、予測精度の絶対評価となる。図-7 は、ROCA を予測時間長と設定波高  $H_s$  について求めた結果である。図の横軸は設定波高  $H_s$  と予報時間長であり、縦軸は ROCA を示す。多少のこぼこはあるものの、ROCA は設定波高  $H_s$  と予測時間に対して単調に減少している。 $H_s=1\text{m}$  に対する 1 日予測では、ROCA が 0.95 であるのに比べ、 $H_s=6\text{m}$  に対する 4 日予測では、ROCA は 0.77 まで低下する。この結果は、図-6 で示したように、予測時間長が長くなるか波高が大きくなるとアンサンブル波浪予測のパフォーマンスが減る傾向を定量的に表している。但し、値として ROCA=0.77 はかなり大きく、アンサンブル波浪予測は高波高時についても依然として意味のある予測値を提供可能であると考えられる。

### (3) コスト・ロスモデルによる検証

前節で用いた Brier Score や ROCA は、予測精度の信頼性のチェックとして予測を提供する側には便利な指標であるが、予測結果を利用するユーザーにとっては有用な情報であるとは限らない。様々な目的を持ったユーザーにとっては、予測結果の信頼性だけでなく、予測結果に従って行動(対策)をとった場合にどのような結果を得ることができるのかをあらかじめ知ることが重要となる。そこでコスト・ロスモデルを用いて、アンサンブル波浪予測の結果に従って行動を起こした場合に得られる価値と予測の関係について簡単な検討を行う。

コスト・ロスモデルでは、あるイベントが生じた場合に生じる損害が  $L$ 、それを防ぐために必要な対策費用を  $C$  とし、あるイベントが起こると予想した場合の的中率と、起こらないと予想した場合の的中率を区別して考える<sup>10),15)</sup>。予測対象とするイベントが起こる回数を  $M$ 、予測の総数を  $N$  回とすると、全く対策をと

らない場合の損害額は  $L \times M$  であり、いつも対策をとる場合の費用は  $C \times N$  である。従って、予測結果を利用して対策をとることにより便益を得るためには

$$\frac{C}{L} < \frac{M}{N} \quad (8)$$

である必要がある。予測と  $C$  および  $L$  の関係は、表-3 のようにまとめられる。

波高が  $H_s\text{m}$  を上回るかどうかなどのイベントの生起(実況)について、表-2 に示したように分類した場合、対策にかかる費用と損害の総額  $T_f$  は、

$$T_f = (c + d)C + bL \quad (9)$$

となる。これをイベント 1 回当たりの対策費用  $t_f$  として表すと次式のようなになる。

$$t_f = FR \frac{C}{L} \left(1 - \frac{M}{N}\right) - HR \frac{M}{N} \left(1 - \frac{C}{L}\right) + \frac{M}{N} \quad (10)$$

ここで  $FR$  および  $HR$  は ROC を求める際に定義した空振り率と適中率である。つまり、コスト・ロスモデルでは、予測に対応して行動を起こすことによりトータルでかかる費用は、予測の空振り率 ( $FR$ )、的中率 ( $HR$ )、コスト・ロス比 ( $C/L$ ) および生起確率  $M/N$  に依存する。コスト・ロス比 ( $C/L$ ) および生起確率  $M/N$  を固定して考えると、予測に対応して行動を起こすことによりトータルでかかる費用は、予測の空振り率 ( $FR$ ) に比例して増加、的中率 ( $HR$ ) に比例して減少することとなる。

一方、確率予測結果と経済価値に基づきイベントに対して意思決定に利用する場合、イベントが起こる確率を  $P$  とすると、対策をとらなかった場合の損害は  $LNP$  となる。よって、予測結果に従って対策をとる方が経済的であるためには

$$P > \frac{C}{L} \quad (11)$$

条件を満たさなければならない。つまり、予測確率  $P$  がコスト・ロス比  $C/L$  以上である場合に対策をとれば、トータルの費用が軽減される。但し、この議論では実際にどれくらいの費用が軽減されるかは定量的にわからない。そこで、Richardson<sup>11)</sup> や Palmer ら<sup>23)</sup> が行ったコスト・ロス比と費用の改善率のモデルを用いて、アンサンブル波浪予測の結果を整理する。平均的な発生確率(例えば気候値)を用いた場合に、対策にかかる費用の 1 回当たりの損害に対する割合は、常に対策をと

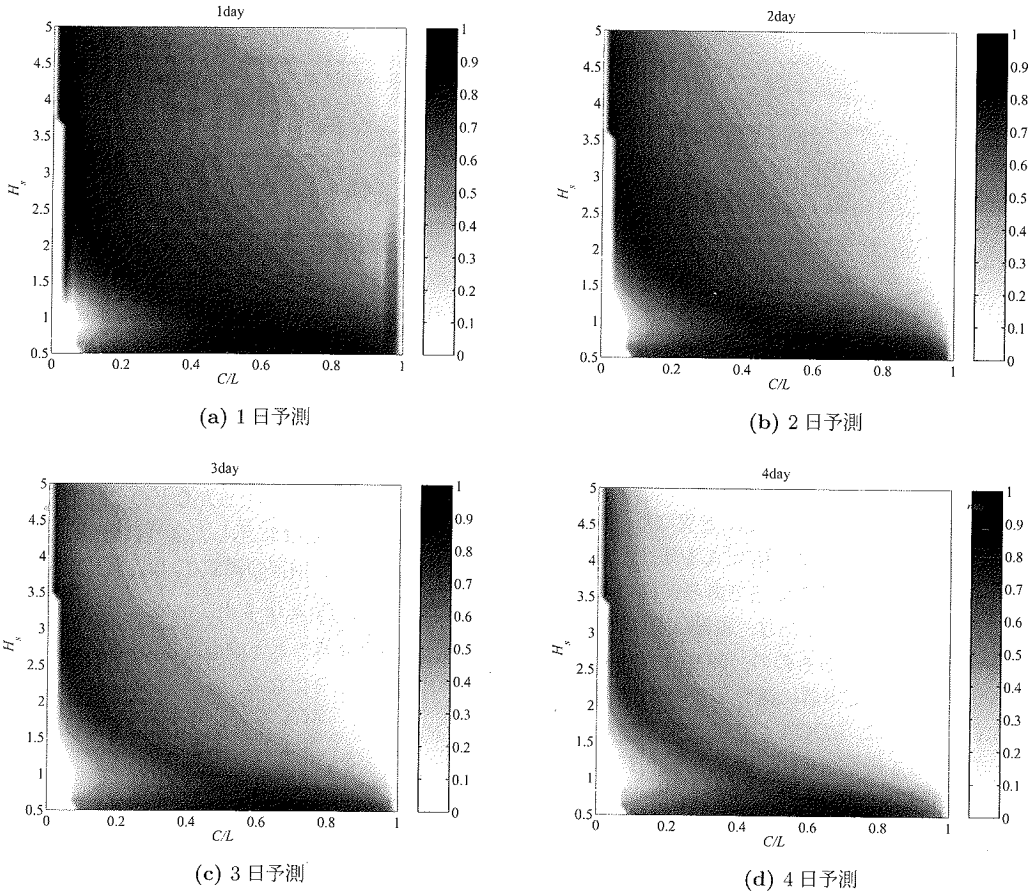


図-8 コスト・ロスモデルにより得られる相対価値  $V$  に対する設定波高  $H_s$  および予測時間長の影響

るか、常に対策をとらない場合の値の小さい方となる。この場合のイベント1回当たりの対策費用  $t_c$  は次式のようになる。

$$t_c = \min\left(\frac{C}{L}, \frac{M}{N}\right) \quad (12)$$

一方、予測に全くハズレがない完全予測の場合の費用  $t_p$  は、

$$t_p = \frac{M}{N} \frac{C}{L} \quad (13)$$

である。これらの値を用いて、予測を利用することにより得られる相対価値  $V$  を次式のように定義する。

$$V = \frac{t_c - t_f}{t_c - t_p} \quad (14)$$

$V$  は Relative Economic Value と呼ばれ<sup>11)</sup> (以下では相対価値と表記)、確率予測が完全である場合1、平均的な発生確率と同じである場合0となる。なお、相対価値  $V$  は分母が  $t_c - t_p$  であるため、この値が非常に小さくなる  $C/L = 0$  もしくは1付近でやや値が不安定になり易い。

図-8に示すのは、上記のコスト・ロスモデルを用いて得られた相対価値  $V$  と設定波高  $H_s$  を予測時間毎にプロットしたものである。図の横軸はコストロス比  $C/L$ 、縦軸が設定波高  $H_s$  であり、コンター濃度が  $V$  の値を意味する。なお相対価値  $V$  が負となる場合には、対策として平均値を用いたこととして  $V=0$  を与えた。図-8に示すいずれの条件でも、 $H_s=1\text{m}$  では  $C/L=0.5$  付近にピークを持ち、 $H_s$  の値が大きくなるに従って、ピーク位置は  $C/L=0$  に漸近している。これは、 $t_c$  や  $t_p$  の値が  $\min(M/N, C/L)$  や  $M/N$  に従い変化するためであり、表-1に示したように設定波高  $H_s$  が高くなると  $H_s$  を越える波浪の生起確率が極端に減少することに対応している。大まかに言って、常時波浪の予測と高波の予測では想定する波高により現象の生起確率が極端に異なるため、意思決定を行う場合の基準値  $C/L$  も大きく変化することになる。特に設定波高  $H_s \geq 3\text{m}$  ではイベントの生起頻度が非常に減少するため、 $V$  のピークは  $C/L \ll 0.1$  に位置する。それゆえ、高波浪につ



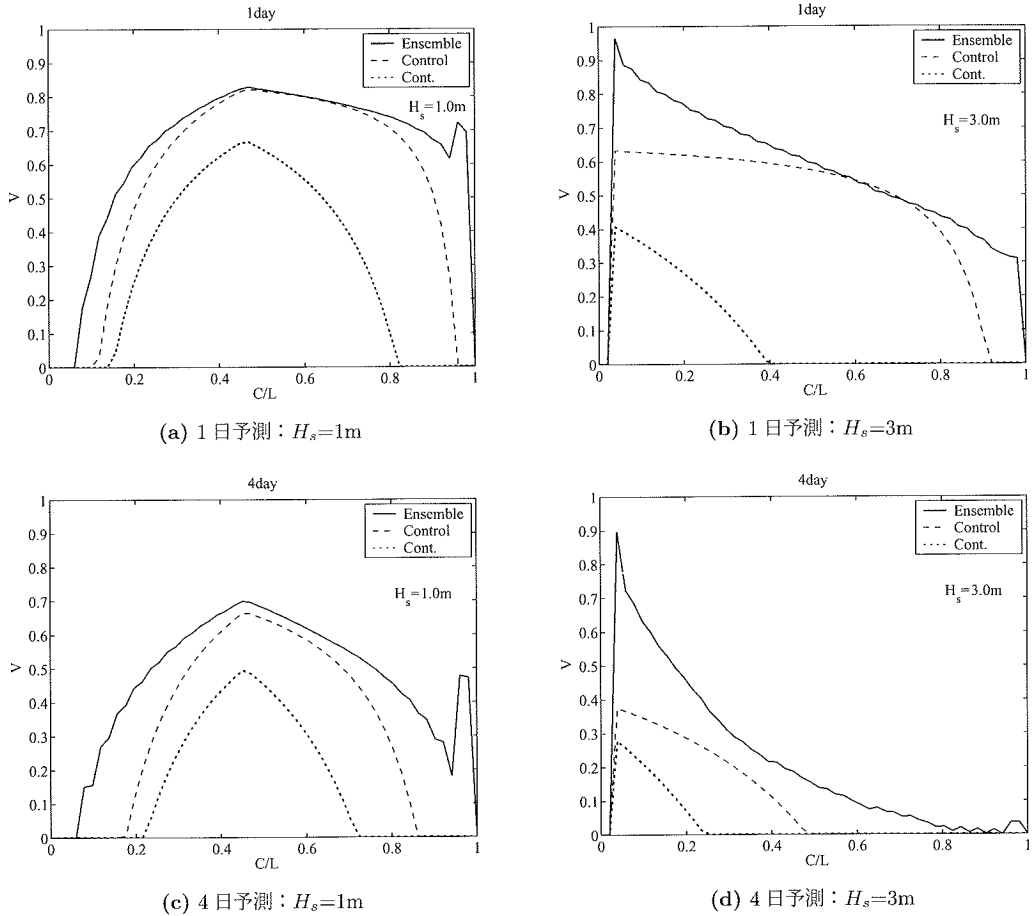


図-9 コスト・ロスモデルにより得られる相対値  $V$  の予測手法による違い (実線：アンサンブル予測, 破線：決定論的予測, 点線：持続予測)

いて波浪予測を利用して予防策を取ることのメリットは、損害コスト  $L$  に比べて対策のための費用  $C$  がかなり少なくないと得られないことがわかる。一方、港湾工事などで作業基準となることの多い  $H_s=1\text{m}$  前後では、 $C/L=0.5$  付近にピークが位置し、この程度の波高を予測対象イベントとする場合は、損害コスト  $L$  と対策のための費用  $C$  が同じ程度の場合にアンサンブル波浪予測を利用するメリットが最も大きくなる。一方、相対値  $V$  に対する予測時間長さの影響は顕著であり、1日予測では  $H_s$  の値によらずほぼ全ての  $C/L$  で相対値  $V$  が有意な値となっているが、予測時間が長くなると設定波高  $H_s$  の高い領域において相対値  $V$  の値は急激に減少する。これは、先に図-7 に示した ROC 面積の結果と同じく、 $H_s$  が  $1\text{m}$  付近での予測精度が比較的良いのに対し、 $H_s$  が大きくなると予測精度が予測時間とともに悪くなることに対応していると思われる。

予測モデル間における相対値  $V$  の変化を詳細に検

討するため、アンサンブル波浪予測、決定論的予測および持続予測についての相対値  $V$  を比較したものを図-9 に示す。図-9(a) および (b) は、1日予測について設定波高  $H_s=1\text{m}$  および  $3\text{m}$  の場合の相対値  $V$  を、(c) および (d) は同様の設定波高について4日予測の結果をプロットしたものである。 $C/L$  が 0 および 1 近くで、アンサンブル波浪予測の  $V$  に不連続な振動が見られるが、これは  $t_c - t_p$  が 0 に小さくなる領域における不安定性であり、本研究では無視する。当然ではあるが、設定波高値と予測時間が同じ場合にすべての予測法で  $V$  のピーク出現位置は同じであるが、その絶対値は異なる値を取る。全般的に、決定論的予測結果と比較してアンサンブル予測による  $V$  は  $H_s=3\text{m}$  のケースが  $H_s=1\text{m}$  に比べて値が大きい。さらに、1日予測では決定論的予測とアンサンブル予測の差異は小さいが、4日予測では予測手法間で顕著な差が見られ、アンサンブル波浪予測の相対値  $V$  は決定論的予測の  $V$  を大きく

上回る。  $H_s=1\text{m}$  の場合について、アンサンブル予測と決定論的予測の相対価値  $V$  そのものの値を比較すると、1日予測では  $C/L < 0.2$  および  $C/L > 0.9$  の端部を除きそれほど大きな差異はないが、4日予測ではその差は顕著となっている。4日予測における両者の  $V$  の差は、 $C/L$  の値によっては20~40% 近くあり、アンサンブル波浪予測の有効性が顕著に表れている。 $H_s=1\text{m}$  といった常時波浪についてのアンサンブル波浪予測の決定論的波浪予測に対する経済的な優位性は、 $C/L$  比が0.5から外れるほど顕著であり、また予測時間が長くなるとその特徴は明確になることがわかる。一方、 $H_s=3\text{m}$  の場合では  $V$  のピークが  $C/L=0.04$  付近に位置し、アンサンブル予測と決定論的予測では  $V$  の分布形状がかなり異なっている。注目すべきは、 $H_s=3\text{m}$  についての決定論的予測の  $V$  が  $C/L > 0.5$  で0であるのに対し、アンサンブル波浪予測の4日予測の  $V$  が  $0 < C/L < 1$  の広域で0以上である点で、アンサンブル波浪予測により意思決定した場合、ほとんどの場合にメリットがあることを示している。

以上、アンサンブル波浪予測結果に簡便なコスト・ロスモデルを用いて予測に対する対策費用  $C$  と損失  $L$  との比である  $C/L$  と相対価値  $V$  の関係を求め、アンサンブル波浪予測を利用する経済的メリットと決定論的予測に対する特徴を確認することができた。相対価値  $V$  は、アンサンブル波浪予測の予測特性 (ROC) を変換することにより得られ、 $V$  の分布形状が事前にわかっていたらば、ユーザーは客観的に意思を決定することができることがわかった。さらに、アンサンブル予測の相対費用比  $V$  は、全域で決定論的予測の  $V$  を上回っており、アンサンブル波浪予測の利用価値は大きいと言える。

#### 4. 結語

本研究では、気象庁の週間アンサンブル予報資料を用いて得られた4ヶ月間のアンサンブル波浪予測結果について詳細な解析を実施した。特に、ある設定波高  $H_s$  を越える波高の出現について着目し、アンサンブル波浪予測の精度検証および予測価値についての検討を行った。その結果、利用した予測システム特有の現象と一般的な結論として以下の知見が得られた。

利用した予測システムおよび計算条件に依存する結論としては以下の2点が挙げられる。

- アンサンブル波浪予測の結果を Brier Score で評価した場合、 $H_{1/3}=1\text{m}$  を越える波高の出現についての予測精度は、決定論的波浪予測に対して4日予測で約30%改善される。
- RPSを用いて、決定論的波浪予測に対するアンサ

ンブル予測の改善率は、1日予測で約25%、4日予測で約35%であった。また、改善率は予測時間長に対して単調増加する傾向がある。

一般的な結論としては以下のようにまとめられる。

- コスト・ロスモデルを用いて、予測に対する対策費用  $C$  と、実際に波高が高くなることによる損失  $L$  の比  $C/L$  と相対価値  $V$  の関係から、アンサンブル波浪予測のメリットを確認した。
- $H_s=1\text{m}$  といった常時波浪については、決定論的波浪予測と比較して、アンサンブル波浪予測の優位性は  $C/L$  比が0.5から外れるほど顕著であり、また予測時間が長くなるとその差は鮮明になることがわかった。

今後、実際の港湾の施工工事を対象とし、アンサンブル波浪予測の経済的価値についてより詳しく検討する予定である。また、予測結果と実際の観測値との比較も併せて行う予定である。

謝辞：本研究で用いた週間アンサンブル予報資料および客観解析資料は、気象庁から提供して頂いた。データ提供に当たっては、気象庁予報部数値予報課経田正幸氏をはじめとする予報部数値予報課および気候・海洋気象部海洋気象情報室の方々の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 高野清治: 各国におけるアンサンブル予報の現状と将来, アンサンブル予報, No. 201, 日本気象学会, pp. 105-120, 2002.
- 2) Buizza, R.: Weather risk management with the ECMWF ensemble prediction system, *ECMWF Newsletter*, No. 92, pp. 7-12, 2001.
- 3) Buizza, R., Richardson, D. S. and Palmer, T. N.: The new 80-km high-resolution ECMWF EPS, *ECMWF Newsletter*, No. 90, pp. 2-9, 2001.
- 4) 経田正幸: 週間アンサンブル予報, 新しい数値解析予報システムの検証, 気象庁予報部, pp. 38-41, 2001.
- 5) Janssen, P. A. E. M.: Progress with wind-wave interaction, *ECMWF Newsletter*, No. 90, pp. 84-89, 1999.
- 6) 森 信人, 平口博丸: アンサンブル波浪予測の精度について, 土木学会論文集, No. 747/II-65, pp. 155-171, 2003.
- 7) Katz, R. and Murphy, A.: Economic value of weather and climate forecasts, *Monthly Weather Review*, Vol. 125, pp. 1312-1327, 1997.
- 8) Brier, G.: Verification of forecasts expressed in term of probabilities, *Monthly Weather Review*, Vol. 78, pp. 1-3, 1950.
- 9) Murphy, A. H. and Daan, H.: Forecast evaluation, *Probability, Statistics, and Decision Making in the Atmospheric Science* (Murphy, A. and Katz, R.(eds.)), Westview, Boulder, CO, pp. 379-437, 1985.
- 10) Wilks, D. S.: *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Academic Press, 464 p., 1995.
- 11) Richardson, D.: Obtaining economic value from the EPS, *ECMWF Newsletter*, No. 262, pp. 8-12, 1998.

- 12) 中三川浩: 確率予報の評価, 平成 11 年度季節予報研修テキスト: 季節予報の確率表現の普及に向けて, 気象庁, pp. 30-43, 1999.
- 13) 木村吉宏: 確率予報の利用法, 平成 11 年度季節予報研修テキスト: 季節予報の確率表現の普及に向けて, 気象庁, pp. 44-53, 1999.
- 14) 立平良三: 気象予報による意思決定, 東京堂出版, 90 p., 1999.
- 15) 高野清治: アンサンブル予報の利用技術, アンサンブル予報, No. 201, 日本気象学会, pp. 73-103, 2002.
- 16) 経田正幸: 週間アンサンブル予報システムの性能, 新しい数値解析予報システム, No.47, 気象庁予報部, pp. 83-93, 2000.
- 17) 松村崇行: 全球モデル, 新しい数値解析予報システム, No. 47, 気象庁予報部, pp. 17-22, 2000.
- 18) WAMDI-Group : The WAM model - A third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 18, pp. 1775-1810, 1988.
- 19) Murphy, A. H. : A new vector partition of the probability score, *J. Appl. Met.*, Vol. 12, pp. 595-600, 1973.
- 20) Epstein, E. : The role of initial uncertainties in prediction, *J. App. Meteorol.*, Vol. 8, pp. 190-198, 1969.
- 21) Murphy, A. H. : A note on the ranked probability score, *J. Appl. Met.*, Vol. 10, pp. 155-156, 1971.
- 22) Richardson, D.: Skill and relative economic value of the ECMWF Ensemble Prediction System, *ECMWF Technical Memorandum*, No. 262, pp. 1-25, 1998.
- 23) Palmer, T., Brankovic, C. and Richardson, D. : A probability and discision model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations, *Bull. American Meteorol. Soc.*, Vol. 126, pp. 2013-2034, 2000.

(2004. 1. 22 受付)

## SKILL AND RELATIVE ECONOMIC VALUE OF ENSEMBLE OCEAN WAVE PREDICTION

Nobuhito MORI and Hiromaru HIRAKUCHI

The accuracy and economic value of the ensemble wave prediction (EWPS) using Japan Meteorological Agency operational ensemble weather prediction system (EPS) are assessed relative to the value of wave hindcast and deterministic wave forecast. Reliability of probability forecasts by EWPS were tested by analyzing Brier Score and Ranked Probability Score for different threshold levels for wave height. The probability forecasts derived from EWPS give 20 ~ 25% better performance for 1 day and 30 ~ 35% better performance for 4 days forecasts than the deterministic forecast. Using a cost-loss model for the decision making, relative economic value for EWPS was investigated. EWPS performs better than the deterministic forecast in terms of relative economic value for the wave event that exceeds 1m height. The relative economic value of EWPS shows significantly improvement from the deterministic wave forecast when the cost-loss ratio is apart from 0.5 and the forecast time length becomes longer.