

コスト・ロスモデルを用いたアンサンブル波浪予測の利用

森 信 人*・平 口 博 丸**

設定した波高を上回るイベントの予測について, コスト・ロスモデルを用いたアンサンブル波浪予測の利用方法についての検討を行った。予測に対する対策費用 C と損失 L との比であるコスト・ロス比 C/L と相対価値 V の関係から, アンサンブル波浪予測を利用する経済的メリットについての検討を実施した。常時波浪についての予測では, 決定論的波浪予測に対してアンサンブル波浪予測の経済的な優位性は, 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差は顕著になることを明らかにした。また, アンサンブル予測を利用することにより得られる相対価値 V は, C/L 比全域で決定論的予測の V を上回ることを確認した。

1. 緒 言

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。小型船舶などのレジャー目的の海域利用, 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。その他, ケーソン据え付けなどの主要な工程では 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, 2~3 日先の波浪情報が必要とされる。しかしながら, 1~2 日予測に比べて, 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。

波浪予測の主要な外力 (境界条件) は海上風であり, 気象予測の精度は波浪予測結果に直接的な影響を与える。近年, 数日先以上の波浪予測の精度向上を目指し, アンサンブル気象予測を利用したアンサンブル波浪予測が注目されている (Janssen, 1999; 森・平口, 2003)。著者らが以前に行ったアンサンブル波浪予測の精度検証では, 決定論的な予測に対してアンサンブル予測の有意性は予測開始 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 (森・平口, 2003)。しかしながら, これまでの議論ではアンサンブル波浪予測の誤差とその統計的特性についての議論が中心であり, アンサンブル予測の結果を実際に利用するユーザー側の観点からの検討は行われてこなかった。

実際に波浪予測結果を利用する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。それゆえ, 予測を利用するユーザーとしては, 予測誤差などの精度よりも予測情報を利用した結果, どのくらいの利益と損失が発生するのかといった観点からの評価が重要であり, 予測システムの特長と意思決定の結果得られる価値との関連性を明確にする必要がある。

本研究では, アンサンブル波浪予測で得られる確率予測の結果をユーザーが活用できるようにするため, コスト・ロスモデルを用いた波浪予測の利用について検討を行う。さらに, 確率予測にコスト・ロスモデルを用いる際に付随する問題点について議論を行い, 波浪予測と予測価値の関係について明らかにする。

2. 計算手法

本研究では, 気象庁の週間アンサンブル気象予報資料の海上 10 m 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 (詳細は森・平口, 2003 を参照)。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。波浪モデルと計算条件の概略は以下の様にまとめられる。

波浪予測には WAM モデル (WAMDI-Group, 1988) を用いた。波浪の計算範囲は, 北緯 10-60 度, 東経 115-165 度の日本を含む北太平洋西部を対象とし, 計算格子は球面座標系, 空間解像度 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 時間で実施した。側方境界は開境界, 試験計算期間は 2001 年 3 月 3 日から 6 月 30 日までの約 4 ヶ月間とし, 毎日 1200 UTC に予測を開始し, 96 時間後までアンサンブル 25 メンバー全てについて波浪予測を行った。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) を用いてスピナップを 3 日間実施したものを用いた。また, データ解析では, 外境界の影響を除くために北緯 20-50 度, 東経 125-155 度の深海領域のみの結果を対象とした。

波浪予測結果を評価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を別途実施し, その結果を実況値として取り扱う。以下では, 気象の決定論的予測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, アンサンブル波浪予測をアンサンブル予測と略記する。

* 正会員 博 (工) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科

** 正会員 工 博 (財) 電力中央研究所 流体科学領域上席研究員

表-1 予測および対策と対策費用Cおよび損害Lの関係

		occurs	
		no	yes
take action	no	0	L
	yes	C	C

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	

3. コスト・ロスモデルの概要

コスト・ロスモデルでは、イベントが起こると予想された場合の的中率と、起こらないと予想された場合の的中率を区別して考え、対象とするイベントが起こったときに生じる損害がL、それを防ぐために必要な対策費用をCとする(Richardson, 1998a)。期間内に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、

$$\frac{C}{L} < \frac{M}{N} \quad (1)$$

である必要がある。予測とCおよびLの関係は、表-1のようにまとめられる。

ここでは、予測イベントとして、波高が H_s mを上回るかどうかというイベントの生起を対象とする。ある期間における予測と実況の関係を表-2に示す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、

$$T_f = (c+d)C + bL \quad (2)$$

となる。これをイベント1回当たりの費用 t_f として表すと次式のようになる。

$$t_f = F_R \frac{C}{L} \left(1 - \frac{M}{N}\right) - H_R \frac{M}{N} \left(1 - \frac{C}{L}\right) + \frac{M}{N} \quad (3)$$

ここで F_R および H_R は予測と現況の発生頻度により定義される空振り率と適中率であり(高野, 2002)、表-2より両者は次式のように定義される。

$$H_R = \frac{d}{b+d} \quad (4)$$

$$F_R = \frac{c}{a+c} \quad (5)$$

これより、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(F_R)に比例して増加、的中率(H_R)に比例して減少することとなる。

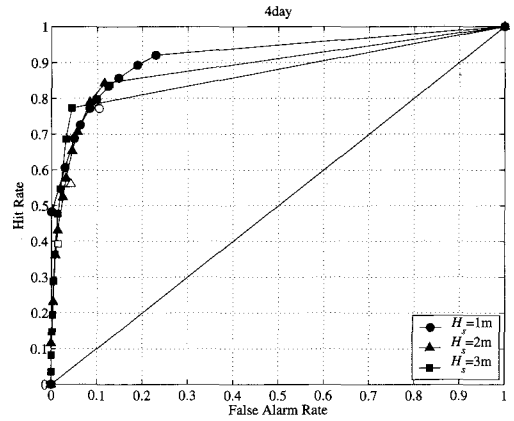


図-1 ROCに及ぼす設定波高 H_s の影響(4日後予測；●： $H_s=1$ m, ▲： $H_s=2$ m, ■： $H_s=3$ m；塗りつぶし記号：アンサンブル予測, 中空記号：決定論的予測)

一方、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条件は、

$$P > \frac{C}{L} \quad (6)$$

となる。予測とは無関係に、平均的な発生確率(例えば年平均値)に従った場合、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。

$$t_c = \min\left(\frac{C}{L}, \frac{M}{N}\right) \quad (7)$$

これに対し、予測に全くハズレがない完全予測の場合の費用 t_p は、

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

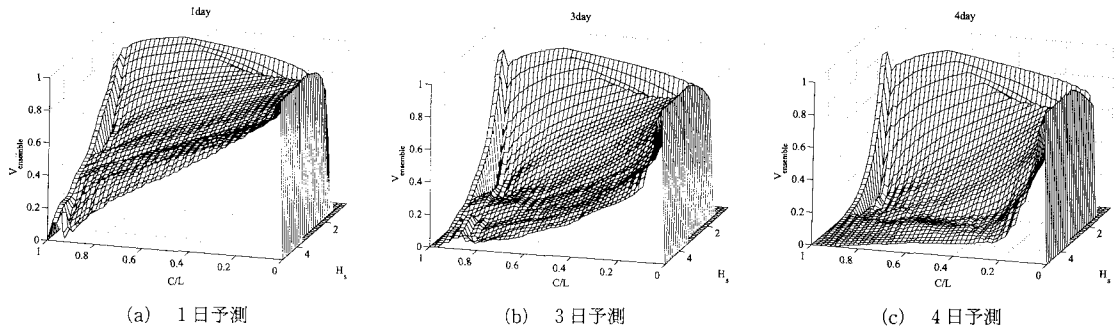
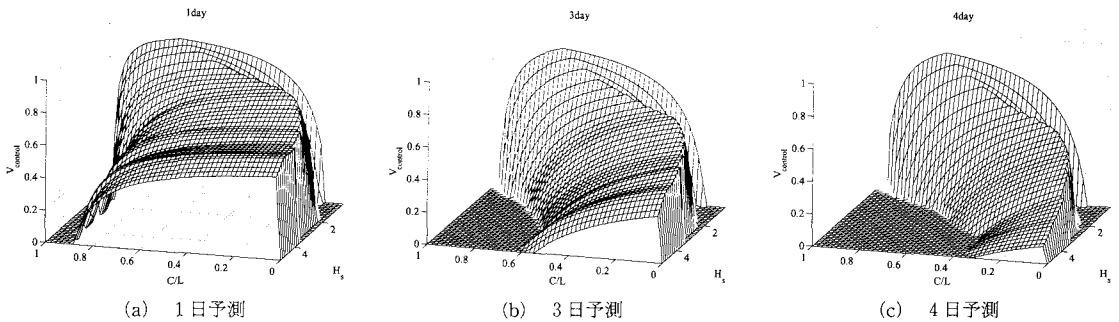
である。これらの関係より、予測を利用することにより得られる相対価値 V を次式のように定義する(Richardson, 1998a)。

$$V = \frac{t_c - t_f}{t_c - t_p} \quad (9)$$

V はRelative Economic Valueと呼ばれ(以下では相対価値と表記)、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。

4. コスト・ロスモデルを用いたアンサンブル波浪予測の利用

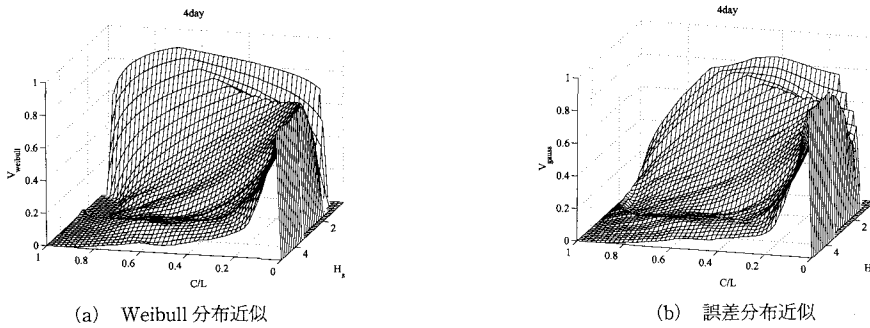
コスト・ロスモデルを用いて相対価値 V を算定する際に重要となるのは、式(3)における適中率と空振り率の関係である。図-1は、設定波高 H_s を1, 2, 3mとしたときの適中率と空振り率の関係(ROC図)である。決

図-2 アンサンブル波浪予測についての相対値 V と予測時間長の関係図-3 決定論的波浪予測についての相対値 V と予測時間長の関係

定論的予測結果は確率予測ではないため各波高について1点しか結果がないが、アンサンブル予測に比べてややパフォーマンスが悪いもののそれほど大きな違いがないことがわかる。一方、アンサンブル予測結果は、設定波高 H_s が高くなると、 F_R が非常に小さい領域でのパフォーマンスが上がる一方、 H_R の上限値は低くなる傾向がある。全般的に、 $H_{1/3}$ についてのアンサンブル波浪予測のROCは、降水に対するアンサンブル気象予測(Richardson, 1998b)に比べて、全体的に左上隅に片寄っており、確率予測の観点からすると波浪予測のパフォーマンスは比較的高いと言える。

図-2および3に示すのは、アンサンブル予測と決定論的予測をもとに、コスト・ロスモデルを用いて得られた相対値 V と設定波高 H_s の関係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 および設定波高 H_s であり、縦軸は相対値 V を示す。なお相対値 V が負となる場合には、対策として平均値を用いることと仮定して $V=0$ を与える。コスト・ロスモデルでは、平均発生確率をもとに1回あたりの費用 t_c を式(7)で与えるため、 V 曲面のピークは $C/L-H_s$ 平面上で $C/L=M/N$ となる曲線上に位置する。このため、アンサンブル予測、決定論的予測共に V のピークは同じ $C/L-H_s$ 平面上に位置することになる。但し、 H_R-F_R の関係より、両者の t_c 値そのものは異なるため、ピークの値

やピークからの減衰に違いが生じ、異なる V の形状を持つことになる。図2および3に示すいずれの予測時間においても、 $H_s=1\text{m}$ 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、設定波高 H_s が大きくなると H_s を越える波浪の生起確率が減少することに起因しており、対象とした予測期間・領域の波浪条件に対応している。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 $H_s>3\text{m}$ ではイベントの生起頻度が非常に少ないため、 V のピークは $C/L\approx 0$ に位置する。それゆえ、高波浪について波浪予測を利用して予防策をと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、今回の事例では、港湾工事などで作業基準となることの多い $H_s=1\text{m}$ 近傍では $C/L=0.5$ 付近に V のピークが位置している。それゆえ、対策のための費用 C と損害コスト L が同じ程度の場合に波浪予測を利用するメリットが大きく、 V の分布形状からもこれが確かめられる。アンサンブル予測と決定論的予測の違いについて見ると、 V の形状は両者で大きく異なっている。決定論的予測の V が予測時間が長くなると全体的に値が低下し、ピーク以外では0の領域が多くなるのに対し、

図-4 メンバー分布を近似した場合の相対値 V の分布（4日予測）

アンサンブル予測の V は、4日後の予測においては波高の大きい領域で多少減衰するものの全体的には優位な値を保っていることがわかる。特に、決定論的予測の V に比べてアンサンブル予測の V が有意な領域は、 H_s が1m近傍では C/L 比が0.5から離れた領域、 H_s が2mを超えると C/L 全領域であることがわかる。また、決定論的予測の V がピークから遠ざかるにしたがって、曲線的に急速に減少するのに対して、アンサンブル予測の V は線形的に減少するという特徴がある。 V の問題点としては、アンサンブル予測の V において、 C/L が0および1近傍で不連続な振動が見られることが挙げられる。これは $t_c - t_p$ が0に漸近する領域において、ROC曲線端部における微妙な振動が増幅されたためである。 H_s が3mを超えると V のピークが $C/L=0$ に漸近するため、この V の端部の振動の影響は大きい。

ROC曲線端部の不連続性に起因する V の振動を除去するため、アンサンブル予測のメンバー x の分布を2変数Weibull分布：

$$p(x) = \alpha \beta x^{\beta-1} \exp(-\alpha x^\beta) \dots\dots\dots (10)$$

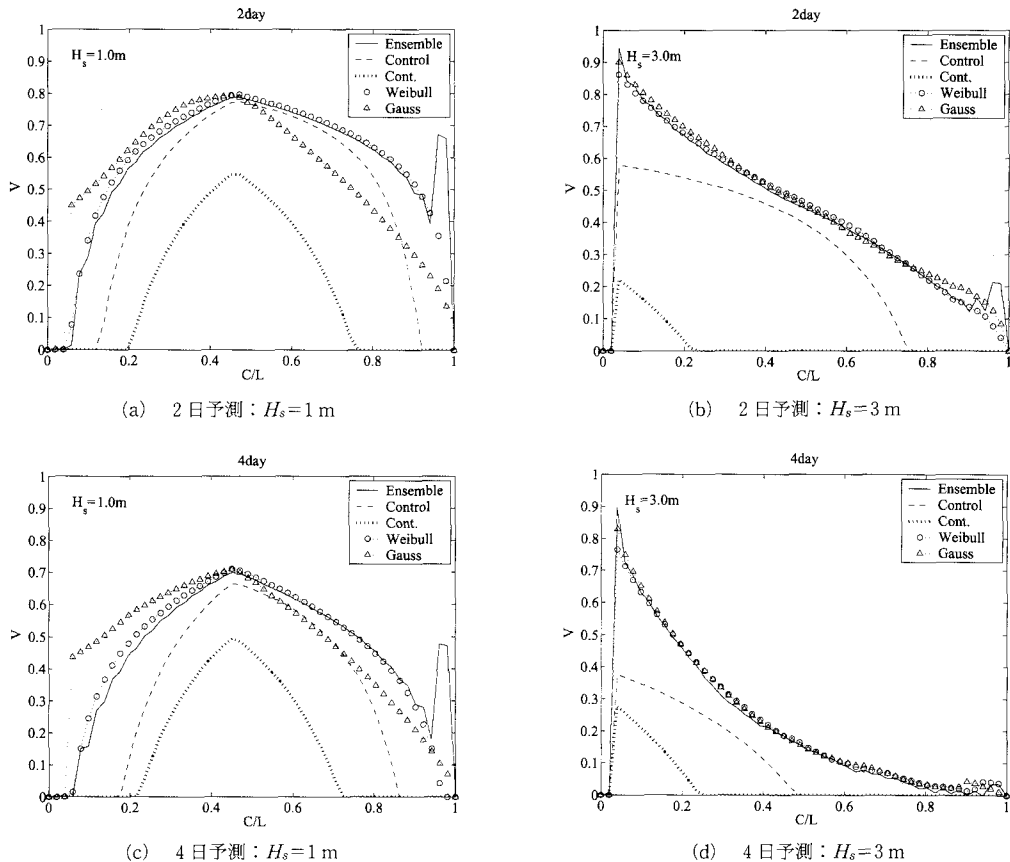
を用いて近似し、Weibull分布の集合よりROCおよび V を求めるを試みる。ここで、 α および β はWeibull分布の形状母数であり、メンバーより最尤法を用いて決定する（以下、Weibull分布近似と表記）。また、上記の手法と合わせて、気温の確率予測で用いられるように、アンサンブル予測の各メンバーが予測手法に起因する誤差 σ を持ち、アンサンブルメンバーの分布がこの重ねあわせで表す方法も検討する。この場合、誤差分布として正規分布

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] \dots\dots\dots (11)$$

を与える（以下、誤差分布近似と表記）。図-4はその結果であり、図-4(a)が式(10)を用いてメンバー分布を近似し得られた V 、(b)が式(11)を用いて各メンバーに誤差分の幅を考慮してメンバー分布を得た場合の V の

分布である。なお、誤差の広がりについては、これまでの知見より $\sigma=0.5$ mを与えている。同じ予測時間に対応するオリジナルの V の分布（図-2(c)）と比較すると、Weibull分布近似の結果は端部を除いてオリジナルの V とはほぼ同じで、 $C/L=0$ および1近傍に見られた不自然な振動のみがなくなっていることがわかる。これは、離散的なメンバーの分布をWeibull分布を用いて連続的に近似した結果、ROC曲線が滑らかに両端で0および1に接続されたためである。一方、各メンバーの誤差を考慮した結果は、 H_s が2mを越える場合についてはほぼ妥当な結果が得られているが、 $H_s<2$ mの領域ではオリジナルの分布に比べて値がかなり低下しており、あまり良い結果とは言えない。

予測モデルおよび近似手法の違いに対する相対値 V の影響をより詳細に検討するため、特定の H_s および予測時間についてのアンサンブル波浪予測および決定論的予測の V を比較したものを図-5に示す。図-5(a)および(b)は、2日予測について設定波高 $H_s=1$ mおよび3m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 V をプロットしたものである。まず、メンバー分布に対する近似については、 $C/L=0$ および1近傍でアンサンブル予測の V に不自然な振動が見られるが、Weibull分布近似では両端の振動は見られず、それ以外でオリジナルの分布にほぼ一致しており、Weibull分布近似は有効であることがわかる。誤差分布近似は $H_s=3$ mでは良好であるが、 $H_s=1$ mではかなり異なった分布形状を持っており、確率予測の結果そのものを歪める結果となっている。一方、予測モデル間の違いについて見ると、 $H_s=1$ mではアンサンブル予測と決定論的予測に V のピーク値についての大きな差はないが、 $H_s=3$ mになると2日予測で0.3、4日予測では0.4ほどの差が見られる。相対値 V の分布形状については、 $H_s=1$ mの場合、2日予測では $C/L<0.1$ および $C/L>0.9$ の端部を除いてアンサンブル予測と決定論的予測に大きな差異はないが、4日予測になるとその差は顕著に



図一五 相対価値 V に及ぼす予測手法とメンバーへの近似の影響(実線:アンサンブル予測, 破線:決定論的予測, 点線:持続予測, $\circ$: Weibull 分布近似, $\triangle$: 誤差分布近似)

なり, 特に $C/L < 0.3$ および $C/L > 0.8$ では有意な違いがみられる。さらに $H_s = 3\text{ m}$ の場合では, アンサンブル予測の V は, ほぼ全域の C/L の範囲では大きく決定論的予測の V を上回り, アンサンブル波浪予測の有効性が顕著に表れている。

5. 結 語

以上, 設定した波高 H_s を上回るイベントについて, 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, 決定論的予測との違いからアンサンブル波浪予測を利用するメリットについて検討を行った。コスト・ロスモデルを用いた場合, $H_s = 1\text{ m}$ 前後の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優位性は, C/L 比が 0.5 から外れるほど顕著であり, その特徴は予測時間が長くなると明確になることがわかった。また, H_s が大きくなると, V のピークは $C/L = 0$ に漸近し, 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ることを明らかにした。さらに, メンバー分布を

Weibull 分布で近似することにより, 利用しやすい連続的な V の分布形状が得られることを示した。

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数値予報課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

- 高野清治 (2002): アンサンブル予報の利用技術, アンサンブル予報, No. 201, 気象研究ノート, 日本気象学会, pp. 73-103.
- 森 信人・平口博丸 (2003): アンサンブル波浪予測の精度について, 土木学会論文集 747, II-65, pp. 155-171.
- Janssen, P. A. E. M. (1999): Progress with wind-wave interaction, ECMWF Newsletter, 90, pp. 84-89.
- Richardson, D. (1998a): Obtaining economic value from the EPS, ECMWF Newsletter, 262, pp. 8-12.
- Richardson, D. (1998b): Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system, ECMWF Technical Memorandum, 262, pp. 1-25.
- WAMDI-Group (1988): The WAM model-A third generation oceanwave prediction model, J. Phys. Oceanogr. 18, pp. 1775-1810.