

アンサンブル波浪予測を用いた波浪予測特性について

森 信 人*・平 口 博 丸**

気象庁の週間アンサンブル予報資料を用いて予測時間 4 日のアンサンブル波浪予測を実施した。予測計算結果より、アンサンブル波浪予測の誤差や予測精度に関する検証を行い、アンサンブル波浪予測システムの特徴や有効性を調べた。その結果、 $H_{1/3}$ のアンサンブル平均値とアンサンブルメンバー間のばらつきを示す spread は、海上風 U_{10} 同様に高い相関を持ち、予測時間が長くなると spread の値は大きくなることを明らかにした。

1. はじめに

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。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 日予測が重要である。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 日の予測、大型船舶の運行スケジュールは、1 日から数日の予測が必要となる。一般的に、波浪予測・推算の精度は、物理モデルの精度だけでなく、外力である海上風にも大きく依存するため、物理モデルの改良が進む一方で海上風の影響についても様々な検討が行われている。

海上風を与える数値気象予測の予測誤差は、予測モデルの不完全さに起因する誤差と、計算初期の大気場に含まれる不確定性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。前者は予測モデルの改良により小さくなるものと期待される誤差である。しかし後者については、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、どれだけ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、初期値に含まれる誤差の空間分布や時間経過による誤差拡大の可能性を考慮したアンサンブル気象予測が最近注目されている（高野, 2002）。アンサンブル気象予測では、僅かに異なる複数の初期値から予測を行い、それら複数の予測結果を利用して確率的な予測を行う。気象庁でアンサンブル気象予測が実運用されたのは、1996 年 3 月から始まった 10 メンバーによる一ヶ月予測が最初であり、2001 年 3 月から T106L40 を用いて 25 メンバーによる週間予測が開始されている（経田, 2001）。

アンサンブル気象予測の波浪予測への利用方法としては、アンサンブル気象予測と同様に、波浪場の初期値推定誤差の成長を調べるために波浪の初期値に摂動を加える手法（Farina, 2002）とアンサンブル気象予測から得ら

れる海上風データを用いて、波浪については摂動を与えず波浪予測を行う方法（Janssen, 99）の 2 通りが考えられる。前者は、波浪場の初期値に含まれる誤差の成長をアンサンブル予測によって評価できるため、1, 2 日予測精度には有効であるが、数日予測に対しては波浪の初期値の影響よりも予測期間における気象変化の影響の方が大きくなるため、結果に対するインパクトは相対的に低くなる。これに対し、後者のアンサンブル気象予測の海上風をそのまま波浪モデルに用いるタイプのアンサンブル波浪予測では、1 週間程度の気象パターンの変化を波浪予測に取り入れることが可能であるため、数日単位の波浪予測精度の向上が期待できる。前者は第 1 種の予測可能性、後者は第 2 種の予測可能性として分類される。主要な外力が海上風である波浪予測においては、後者のタイプのアンサンブル予測が有用であると考えられる。アンサンブル波浪予測の精度やその評価についての研究はその端緒に着いたばかりであり、研究例・応用例共に非常に少ない（Saetra・Bidlot, 2002；森・平口, 2003）。

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を用いてアンサンブル波浪予測を 4 ヶ月間実施する。予測結果よりアンサンブル波浪予測の予測精度や予測誤差に関する検討を行い、アンサンブル波浪予測の特徴や有効性について調べる。

2. 計算手法

(1) アンサンブル気象予測

気象庁の週間アンサンブル気象予測モデルをもとにした気象予報資料を海上風データとして波浪の解析に用いた。気象庁の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 40 層、モデル最上層 0.4 hPa の全球スペクトルモデル（三角形切断 T106L40）である（経田, 2000）。気象庁の週間アンサンブル予測システムでは、成長モード育成法（Breeding of Growing Mode: BGM）を用いて 12 個の成長モードを 12 時間サイクルで育成している。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（以下では気象予測の control run

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 流体科学部 主任研究員

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 流体科学部部長 上席研究員

と表記)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 (UTC 12 時開始) 行われており、予測時間は 216 時間 (9 日間) までである。気象庁の気象予測システムでは、日本を含む中・高緯度域で重要な傾圧不安定波動の不確定性を捕らえることを主な目的として、北緯 20 度以北の北半球にのみ摂動を与えている。

上記の気象庁の週間アンサンブル気象予報資料のうち、海上 10 m 高度の東西・南北風速成分を海上風データとして解析に用いた。データ範囲は赤道以北の 2.5 度×2.5 度の格子データ、解析対象期間は 2001 年 3 月 1 日から 6 月 30 日までの 4 ヶ月間であり、毎日 12 時 (UTC) を初期値とする全 25 メンバーの予測値を用いた。本研究では出力時間が 6 時間間隔である予測 4 日目までの予測結果を用いた。予測モデルの最下層は地表面から数十メートル上空にあるため、上述した 10 m 高度の風速は粗度長を用いて対数則により外挿されたものであり、モデルの予測値そのものではない。

(2) 波浪予測モデル

波浪予測モデルは WAM モデル (1988) を用い、風からのエネルギー入力項として Snyder, スペクトル間のエネルギー移送項に Hasselmann, エネルギー散逸項として Komen らのモデルの標準的な組み合わせを用いた。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、格子解像度 0.5 度、深海条件で計算を実施した。時間分解能は 1200 秒、海上風の入力時間間隔は 6 時間とした。

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、毎日 12 時 (UTC) 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を 3 日実施したものをを用いた。海上風データの空間解像度が 2.5 度であるのに対し、波浪モデルの空間解像度を 0.5 度としたため、海上風については、3 次のスプライン関数を用いて空間内挿を行った。また以下では、アンサンブル波浪予測に対して摂動をかけない気象予報より得られる海上風を用いた決定論的波浪予測結果を control run、波浪予測結果を比較するための比較対象として、気象客観解析値の海上風データを用いた波浪推算結果 (厳密には違うが気象の客観解析値に相当) を reference run と表記する。

3. アンサンブル予測の結果とその特性

初期値に摂動が加えられている範囲が北緯 20 度以北であることから、海上風と波浪に関するアンサンブル予測結果の解析は、これ以北の範囲を対象とする。東西方向の解析範囲は、気象予測については東経 115 度から

165 度の範囲における海上風を、波浪予測については開境界の影響を考慮して東経 125 度から 155 度の範囲を解析対象とした。また、特に断らない限り“風速”は、海上 10 m 高度風速 U_{10} を指す。

(1) アンサンブル予測における誤差評価法

予測の統計的検証の基本スコアとして、2 乗平均平方根値誤差 (Root Mean Square Error: RMSE) がある。予測値を X_F 、参照値を X_R とすると、次式で定義される。

$$RMSE = \sqrt{(X_F - X_R)^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 X_F はアンサンブル平均予測値、 X_R は気象の客観解析値もしくは reference run を示す (Wilks, 1995)。

格子点毎におけるアンサンブル平均波高と reference run の波高の差については、両者の絶対誤差 $AE = |X_F - X_R|$ を用いて評価する。

アンサンブルメンバー間の予測値のばらつきを表すため、アンサンブルメンバー間のばらつきの代表値として、スプレッド (spread) を次式のように定義する。

$$X_{sprd} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_n - X_F)^2} \dots\dots\dots (2)$$

(2) アンサンブル気象予測における海上風の特性

波浪予測の主要な外力は海上風 U_{10} である。気圧・気温・高度場などのスカラー量と比較して、ベクトル量である風速成分 (もしくは風速・風向) の予測精度の評価を行う際には、少し注意が必要である。風速・風向の平均値やアンサンブル予測値を求める際に、成分毎の平均を取り、その後に平均風向・風速を求める方法 (成分平均) と、単に風速・風向の平均値を取る 2 通りの方法がある。平均値に対する 2 種類の操作は、予測時間が長くなり、メンバー間のばらつきが大きくなると異なる結果を与える。平口・森 (2003) は、成分平均操作による平均風速は、風速の平均値に比べて小さくなることを明らかにしている。ここでは、予測時間や風向のばらつきに依存しない平均的な風速の代表値として、メンバー n の海上風の風速ベクトル (u_n, v_n) に対して、アンサンブル風速および風向を風速平均で定義する。

図-1 に示すのは、対象領域における U_{10} に関するアンサンブル平均風速値、RMSE および spread の予測時間および月変化である。図中の横軸 Forecast day と Month は予測時間と月変化を示し、予測時間の 0 が予測開始時の値、1 は 1 日予測、4 は 4 日予測の予測結果を意味する。紙面の関係上掲載していないが、客観解析値の平均風速は、3 月から 6 月にかけて単調に減少しており、1 日予測のアンサンブル平均値とほぼ同じであった。アンサンブル平均値の予報時間長および月変化についても客観解析値とほぼ同様の傾向が見られるが、予測開始 1 日後からそれより先の予測時間におけるアンサンブル平均風速値にほとんど差がないのに対し、予測開始時 (0

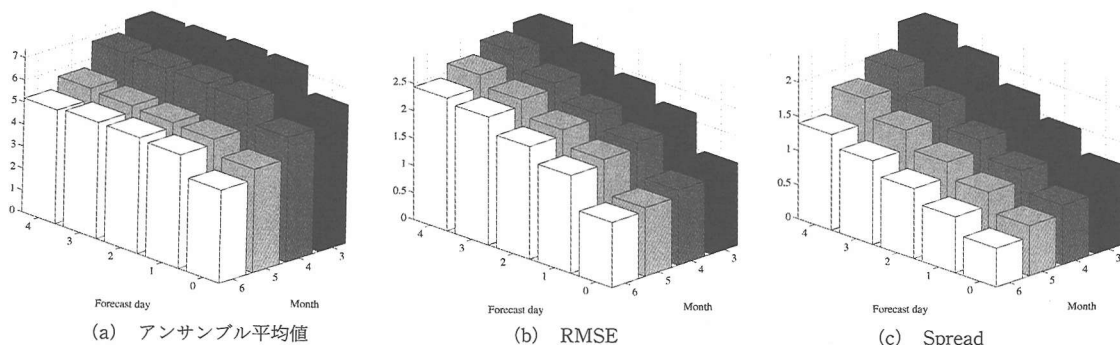


図-1 U_{10} に関するアンサンブル気象予測値の月変化および予報時間の関係 (単位 m/s)

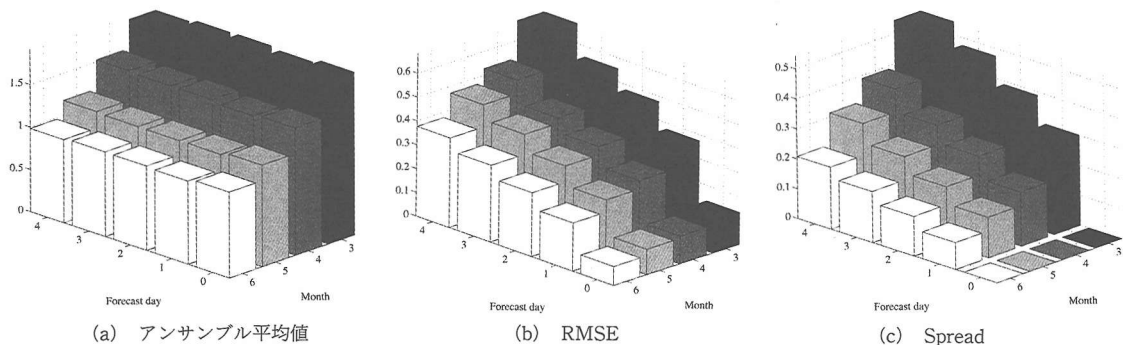


図-2 $H_{1/3}$ に関するアンサンブル気象予測値の月変化および予報時間の関係 (単位 m)

日)はこれらの値より若干小さな値になっている。これはモデルのバイアスというよりもアンサンブル予測の初期値にバイアス的な誤差が含まれている可能性がある(平口・森, 2003)。RMSEについて見ると、その値は予測開始より1日で極端に大きくなり、その後予測時間が長くなるに従い単調に増加している。RMSEの月変化については、客観解析値およびアンサンブル平均値同様に、3月が最も大きく、6月にかけて単調減少している。これに対し spread と予測時間長の関係は、予測開始時より予測時間長に対して単調増加していることがわかる。また、常に RMSE は spread より常に大きな値を示している(より詳細な U_{10} に関する解析結果は平口・森(2003)で行われている)。

(3) アンサンブル波浪予測結果の特性

図-1と同様の処理をアンサンブル波浪予測から得られた $H_{1/3}$ についても行った。図-2に示すのは、対象領域における $H_{1/3}$ に関するアンサンブル平均波高、RMSE および spread の予測時間および月変化である。図-1と同様に、図中の横軸 Forecast day と Month は月変化と予測時間を意味する。紙面の関係上掲載していないが、 U_{10} 同様に reference run の平均波高は、3月から6月にかけて単調に減少しており、1日予測のアンサンブル平均値とほぼ同じであった。大まかに言って、 $H_{1/3} \propto U_{10}^2$ の関

係が成り立つため、 $H_{1/3}$ の月変化は U_{10} の月変化よりも変動幅が大きくなっている。一方で、 $H_{1/3}$ では U_{10} において見られたアンサンブル平均の1日以降の予測値が予測開始時(0日予測)より若干大きい値になっている傾向は見られない。また、アンサンブル波浪予測では初期値を気象予測の control run により与え、摂動を加えていないため、 $H_{1/3}$ の spread は0日予測では0となっている。アンサンブル波浪予測の場合、RMSE は spread 同様に予測開始時に0であるべきは値であるが、0.1 m 程度の値となっている。これは、初期波浪場の再現の際に、予測開始前に客観解析値を用いて3日間のスピナップを行っているが、この初期波浪場の生成に伴う誤差であると考えられる。これらの点を除くと $H_{1/3}$ に関する平均統計量と予測時間および月変化の関係は、 U_{10} の場合とほぼ同様な傾向が見られる。注目すべきは、 U_{10} 同様に spread が予測時間が長くなるに従ってほぼ線形に増加する点と spread と RMSE の関係が同様な傾向を持つという2点にある。これらの特徴は、アンサンブル気象予測の結果と同じ傾向であり、アンサンブル波浪予測の誤差の程度を spread の値で推定できる可能性を示している。そこで以下では、定量的な議論を行うために時間・空間平均量ではなく計算格子点の予測値を直接扱い、アンサンブル波浪予測の結果を評価する。

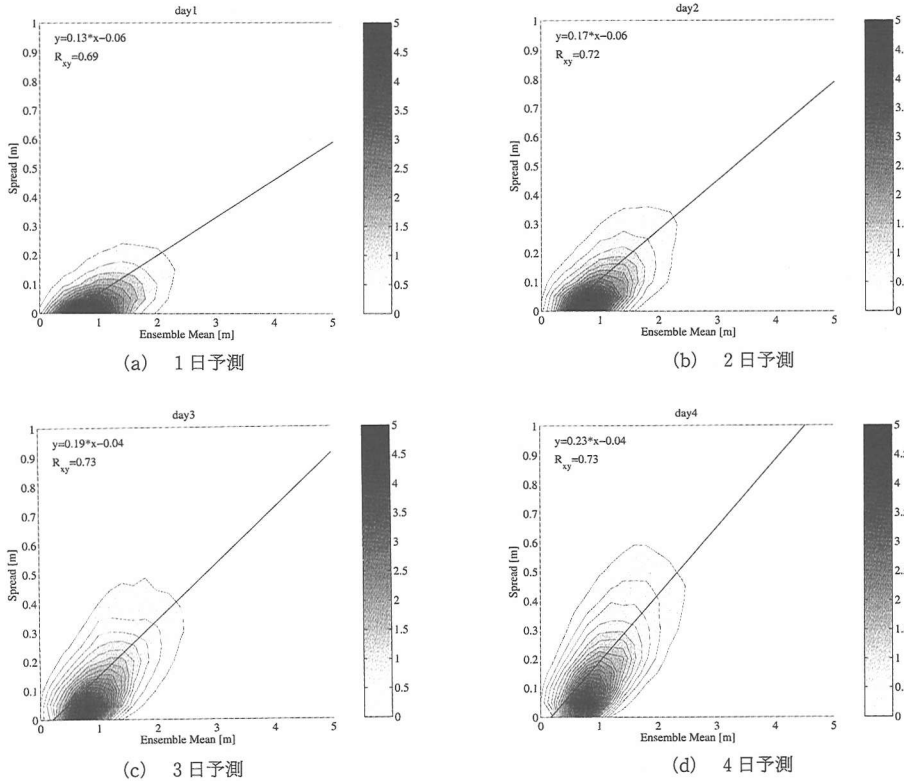


図-3 $H_{1/3}$ のアンサンブル平均値と spread の結合確率密度 (実線: 線形回帰式)

図-3は、 $H_{1/3}$ のアンサンブル平均値と spread の結合確率密度を予測時間毎にプロットしたものである。 $H_{1/3}$ のアンサンブル平均値と spread の相関は高いが、傾きは予報時間長により変化し、アンサンブル平均値が大きくなると spread の値も大きくなっている。予測時間の長さに関わらず、両者の相関係数は約 0.7 とほぼ一定であり、予測時間が長くなるに従い spread の値が増加するため、その傾きは大きくなる。これはアンサンブルメンバーが、予測時間の経過と共にばらつき、そのばらつきの度合いは予測時間長が長くなるに従い増加し、アンサンブル平均値に依存した一定の範囲に収まっていることを示している。

図-4は、 $H_{1/3}$ に対してアンサンブル波浪予測の spread と AE の結合確率密度を予測時間毎にプロットしたものである。図中の点線は、切片 0、傾き 1 の直線を示す。図の点線より上側の領域は、AE が spread より大きな値を持つ場合であり、reference run で再現された波高がアンサンブルメンバーで捕捉できていない領域である。アンサンブル予測の観点からは、AE は spread と同程度の値となる必要がある。図より spread と AE の結合確率密度は原点を中心とした扇形の分布形状となっており、spread の値が大きくなると AE の分布は幅広く分

布するようになる。このため、両者の相関は低いが、spread と AE の結合確率密度は予測時間に依らず、ほぼ同じ形状である。この結果より、予測の絶対誤差 AE は spread の値が増加すると分布範囲が広がる傾向があることがわかった。

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 4 ヶ月間のアンサンブル波浪予測を実施した。計算結果よりアンサンブル波浪予測の誤差や予測精度に関する検討を行い、アンサンブル波浪予測システムの特徴を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- アンサンブル波浪予測で予測された $H_{1/3}$ の RMSE と spread は、海上風 U_{10} 同様に高い相関を持ち、予測時間が長くなると spread の値は大きくなる。
- グリッド毎の $H_{1/3}$ のアンサンブル平均値と spread の相関は高く、アンサンブル平均値が大きくなると spread の値も大きくなっている。この関係は予測時間の長さに依存しておらず、両者の相関係数は約 0.7 である。
- Spread と AE の結合確率密度は原点を中心とした扇形の分布形状となっており、spread の値が大き

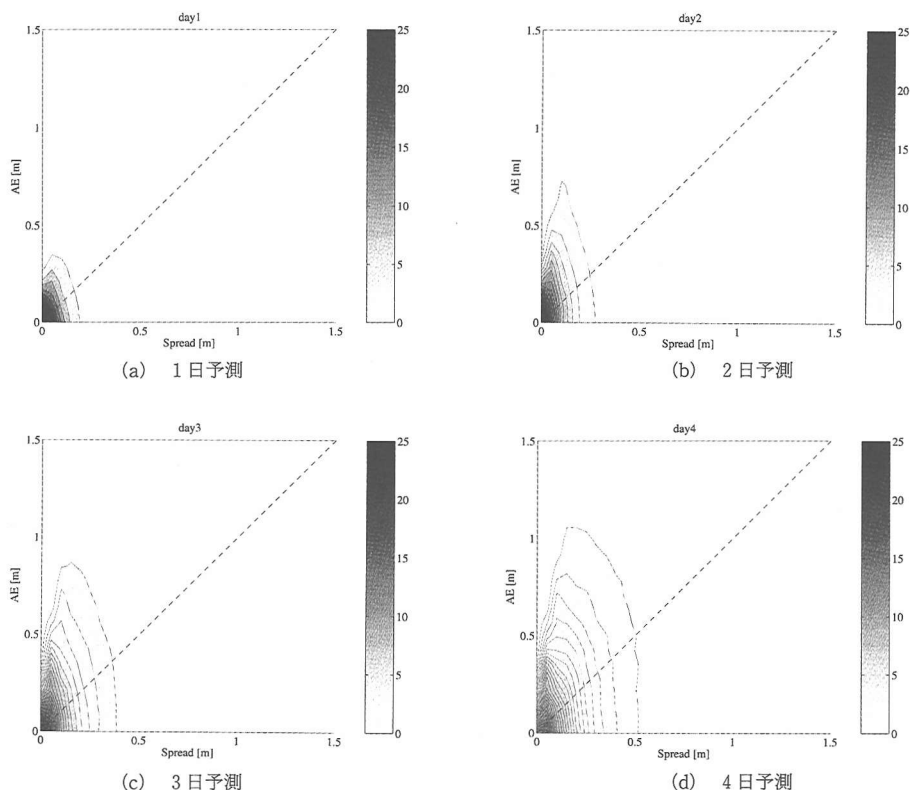


図-4 $H_{1/3}$ に関する spread と AE の結合確率密度 (点線: 傾き 1, 切片 0 の直線)

なると AE の分布は幅広く分布するようになる。また, spread と AE の結合確率密度は予測時間に依らず, ほぼ同じ分布形状であった。

今後, アンサンブル波浪予測結果の統計的特性についてより詳しく検討し, さらに経済的価値についても調べる予定である。

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, 国土交通省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

- 経田正幸 (2000): 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, 47, 数値予報課報告・別冊, 気象庁予報部, pp. 83-93.
 経田正幸 (2001): 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, 数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, pp. 38-41.

- 高野清治 (2002): 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, 201, 気象研究ノート, 日本気象協会, pp. 105-120.
 森 信人・平口博丸 (2003): アンサンブル気象予測を用いたアンサンブル波浪予測の予測精度について, 電力中央研究所報告書, 印刷中, 28 p.
 平口博丸・森 信人 (2003): 地上 10 m 風に関する週間アンサンブル気象予報の予報精度と確率分布関数の推定, 電力中央研究所報告書, U02029, 40 p.
 Farina, L. (2002): On ensemble prediction of ocean waves, *Tellus 54A*, pp. 148-158.
 Janssen, P. (1999): Progress with wind-wave interaction, 80, ECMWF Newsletter, pp. 84-89.
 Seatra, Ø. and J.-R. Bidlot (2002): Assessment of the ecmwf ensemble prediction system for waves and marine winds, ECMWF Technical Memorandum, 388, pp. 1-29.
 WAMDI-Group (1988): The WAM model—a third generation ocean wave prediction model, *J. Phys. Oceanogr.* 18, pp. 1775-1810.
 Wilks, D. S. (1995): Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic Press.