

波浪アンサンブル予測の 海上施工管理への適用について

琴浦 毅¹・田中 仁²

¹ 正会員 五洋建設(株)技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)
E-mail: tsuyoshi.kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

² フェロー会員 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
E-mail: hitoshi.tanaka.b7@tohoku.ac.jp

海上工事においては長期間の高精度気海象予測データの入手が望まれる。そこで、本研究では気象庁が2017年夏から提供を始めた1ヶ月気象アンサンブル(日本域高解像度)をWAMの入力風として波浪計算することで得られた1ヶ月波浪アンサンブルデータを用いて、海上工事における適用性について検討した。

摂動を与えないControl runと比較するとアンサンブル平均を用いた予測はRMSE, 的中率においても精度向上が期待できることが分かった。また、ブライアスキルスコアを用いた評価の結果、特に日本海側では気候学的予測と比較してアンサンブル予測を実施することは価値がある結果となった。さらに、船舶回避などが発生する高波浪の予測については、台風起因の予測は容易ではないのに対し、温帯低気圧起因については発生割合を示すことで有用な情報となる可能性が示された。

Key Words : WAM, ensemble, marine works

1. はじめに

海上工事においては大型作業船を用いた大型構造物の吊り作業や、潜水士の海中作業が必要となるため、雨や風が原因となり作業中止となる陸上の建設現場とは異なり、波浪条件による作業中止も発生する。そのため、これまでも波浪観測結果¹⁾や気海象予測情報の入手に努めるとともに、これまでの経験を踏まえ、作業の可否判断を行ってきた。近年では、波浪予報情報の元になる波浪推算モデルの高度化が進んでおり、波浪推算モデルによる予測結果をリアルタイムに配信するシステムも構築され、作業可否判断に利用され始めている。

筆者らも波浪推算モデルの施工可否判断への適用に着目して検討を進めた結果、低波浪時に波浪推算モデルの精度が低下する要因を検証し、高周波数側のエネルギー一過大評価が予測精度の低下要因であることを示し、その改善策の方向性を示した²⁾。その結果、波浪推算精度の向上を期待される結果となったが、施工現場においては精度の良い予測に加え、長期的な予測情報も求められる。長期予測情報を得られると、工程管理などへの活用が可能となるため、近年ではニューラルネットワークを活用した予報に関して研究がなされるなどしているが³⁾、一般的には長期予報の予測期間が延びるにつれ精度が低

下することが知られている⁴⁾。

この要因の一つは、波浪推算モデルの入力風データの精度が長期間になると低下することがあげられる。これは、気象モデルの解析手法や初期値の不確実性により予測が長期間になるとその誤差が拡大するためである。このような誤差の拡大を把握するために、長期予測では微小な摂動を加えた初期値を複数用意した予測を行い、その平均やばらつきなどの確率的な予測を行うアンサンブル予測が活用されている。計算機が発達した今日においては、気象アンサンブル予測は広く活用されており、気象庁は季節、1ヶ月、週間、台風の気象アンサンブルに加え、10日先までの波浪アンサンブルの提供を行っている。

ところで、気象庁はこれまで1週間に1回配信していた2.5度格子の1ヶ月アンサンブルに加え、2017年夏から1ヶ月アンサンブルGPV(高分解能日本域)の提供を開始した。この高分解能日本域のデータは日本周辺に限れば格子サイズが約50kmとなっており、これまでより詳細なアンサンブルデータを得ることができるようになった。森・平口⁵⁾はアンサンブルを活用した検証を実施しているが、当時のアンサンブルデータは格子サイズ2.5度で10日先限度であったのに対し、現在では計算機能力などの発達により、日本周辺では1ヶ月アンサンブルデータがより詳細に得られるようになっている。

本研究では、1ヶ月アンサンブルGPV（高分解能日本域）に含まれる風データに対して波浪計算を行い、アンサンブル波浪予測の精度や誤差に関して整理を行うとともに、施工管理への適用可能性や有効性について検討を行った。

2. 波浪アンサンブル計算

長期間の予測の基本データは 2017 年夏から気象庁が提供を開始した 1 か月アンサンブル数値予報モデル GPV（高分解能日本域）を用いた。この GPV は図-1 の範囲内で約 50 km格子の 50 メンバーの気象アンサンブルデータを 1 週間に 1 回提供するものである。50 メンバーの内訳は、配信日前々日 00UTC11 メンバー、12UTC13 メンバー、前日 00UTC13 メンバー、12UTC13 メンバーの合計 50 メンバーとなっており、異なる初期値に対して摂動を発生させた計算を実施して組み合わせる手法を採用している。ここで、最終の初期値からの経過時間を予測時間と扱うこととするため、50 メンバーには最も古い初期値のデータである 36 時間前の初期値が含まれていることになる。

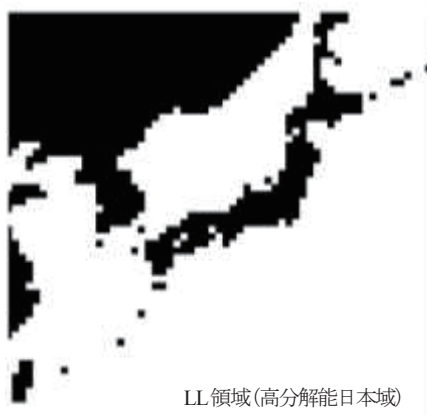
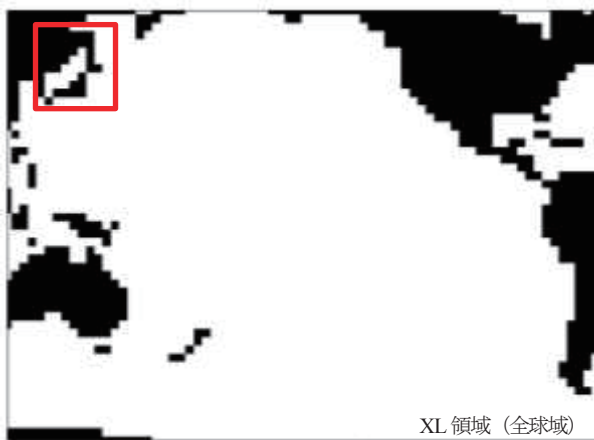


図-1 アンサンブル範囲

本研究では台風シーズンである 2017 年 6 月 29 日～11 月 2 日の 4 か月間期間に配信された合計 19 データセットの気象アンサンブルの風データを WAM へ入力することで、波浪推算計算を行った。表-1 はアンサンブル波浪データ計算に用いた WAM の計算条件である。日本域の外側については全球アンサンブルデータを用いて計算を行い日本域に接続している。また、アンサンブル波浪計算の初期波浪状況は、6 時間ごとに配信される GSM の風データで WAM を用いて計算した結果を用い、予測データは NOWPHAS 観測データと比較検証を実施した。

3. 波浪アンサンブルデータ検証指標

アンサンブル波浪計算のうち、最後の初期値 13 メンバーの中で摂動をかけない気象予測より得られる風データを用いた予測結果を決定論的波浪予測結果 (Control run) とする。この結果は、アンサンブル予測を用いない場合の単独予測に相当する。また、50 メンバーのアンサンブル平均は式(1)、各メンバーのばらつきを示す標準偏差は式(2)、観測値に対する RMSE は式(3)で計算される。

$$x_{ave} = \frac{1}{Me} \sum_{i=1}^{Me} x_{mi} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{Me} \sum_{i=1}^{Me} (x_{mi} - x_{ave})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{Me} \sum_{i=1}^{Me} (x_{mi} - x_{obs})^2} \quad (3)$$

ここで、 Me はアンサンブル予報のメンバー数、 x_{mi} は i 番目の予測値である。

次に、波高 1m 超えるかという現象の有無を予測と実況それぞれについて判定し、表-2 に示すカテゴリーに分類した事例数をもとに予測特性を検証するカテゴリー検

表-1 アンサンブル WAM モデル

領域名	LL	XL
計算領域 (北緯)	20°～50°	-70°～60°
計算領域 (東経)	120°～150°	117°～295°
最小周波数	0.042Hz～1.174Hz	
周波数分割数	35	
周波数間隔	倍率 1.1	
方向分割数	16	
水深条件	深海	
空間間隔	0.5625°	2.5°
伝播計算時間刻み	900s	900s
風使用データ (50 メンバー)	1 か月アンサンブル (高分解能日本域)	1 か月アンサンブル
風データ時間間隔	3600s	

証のうち、的中率は以下の式で算出される。

$$\text{的中率} = \frac{FO + XX}{N} \quad (4)$$

的中率は海上施工可否判断の基準を波高 1m とした場合に、施工可的中: FO (予測, 実測共に波高 1m 未満), 施工不可的中: XX (予測, 実測共に波高 1m 以上) の合計の, 標本数 N に対する比率として示される。

観測データから見積もられる対象期間中に波高 1m を下回る回数を M とすると, その平均的な確率 P_c は,

$$P_c \equiv \frac{M}{N} \quad (0 \leq P_c \leq 1.0) \quad (5)$$

で定義される。

アンサンブルを活用した確率予測の統計検証の基本的な指標であるブライアスコア(BS)は, ある現象の出現確率を対象とする予測について次式で定義される。

$$BS \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - a_i)^2 \quad (6)$$

ここで, p_i はアンサンブル 50 メンバーの内, 波高 1m を下回ると予測したメンバーの割合を示す確率予測値(0 から 1), a_i は実況値(観測波高が 1m を下回ると 1, 上回ると 0)である。BS は完全予測なら最小値の 0 となり, 0 に近いほど予測精度が高いことを示す。この BS と現象の気候学的出現率 P_c を常に確率予測値とする予測値のブライアスコア BSc を用いて, 通常の気候値予測を基準とした予測に対する改善度合いを示すブライアスキルスコアは式(7)で定義される。ブライアスキルスコアが 0 の場合は気候値予測と同じ精度であり, 0 を上回ると気候値予測より精度改善, 0 を下回ると気候値予測より精度改悪を示す。

$$BSS \equiv \frac{BS_c - BS}{BS_c} \quad (7)$$

4. 精度検証 (金沢)

日本海側の精度検証は金沢を対象として実施した。図-2 に対象期間における風速, 波高の標準偏差を示しており, 各日の標準偏差を 28 日後の標準偏差 σ_{28} で除している。この図において波高と比較すると風速の方が初期段階から分散が大きい。これは, 気象場に対しては初期

段階で摂動を与えていることと, 初期時間が異なることがあげられる。波浪場は GSM を用いて波浪計算した波浪場を共通の初期状態としているが, 12 時間ごとにずれた 4 つの初期波浪場が含まれているため, 波浪においても初期から分散が発生している。また, 分散は 7 日後までは単調に増加し, その後の変動は小さい。

図-2 は波浪観測値に対する RMSE, ブライアスキルスコア, 的中率を示している。RMSE のグラフには Control run とアンサンブル平均を示している。この図によると 7 日後まではいずれの値も単純増加しているが有意な差はない。一方, 10 日後以降についてはアンサンブル平均の方が小さくなっており, 単独予測である Control run と比較して平均して 9cm, 15%程度精度向上したことになる。

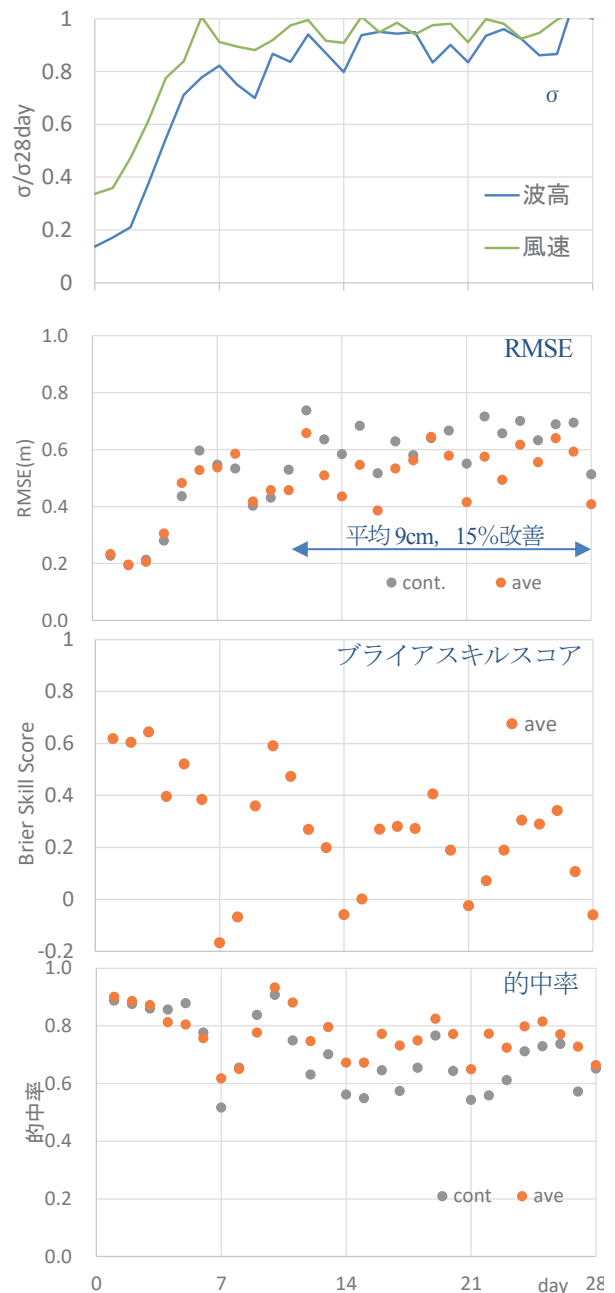


図-2 予測日別の検証指標 (金沢)

表-2 カテゴリー指標による分割表

		observe		Sum
		1m<	1m>	
Fore cast	1m<	FO	FX	FO+FX
	1m>	XO	XX	XO+XX
sum		M	X	N

検討期間中に観測波高が 1m を下回る確率 P_c は 6 割程度であるが、統計的中率を示すブライアスキルスコアは、予報の前半では 0.6 程度、後半でもおおよそ 0 を上回っており、気候学的予測と比較してアンサンブル予測を実施することは価値がある結果となった。また、基準波高を 1m とした時の施工可否的中率は、Control run と比較してアンサンブル平均値は 10%程度改善している結果となった。

これらの結果から、金沢の 1 ヶ月予測においては、アンサンブル予測を用いることで単独予測と比較して、施工可否判断への活用については精度向上が期待できることが分かった。

図-3 は観測値がアンサンブルメンバー統計値のどの範囲に相当するかを示したヒストグラムである。ここではアンサンブル最大値、最小値、アンサンブル平均値、 $\pm\sigma$ を閾値として、1 週間ごとのアンサンブルデータに対して整理をした。その結果、全体的にはアンサンブル平均値 $\pm\sigma$ の範囲に 6 割程度含まれることが分かった。この結果は、平均値 $\pm\sigma$ の範囲を示せば現象の 6 割程度

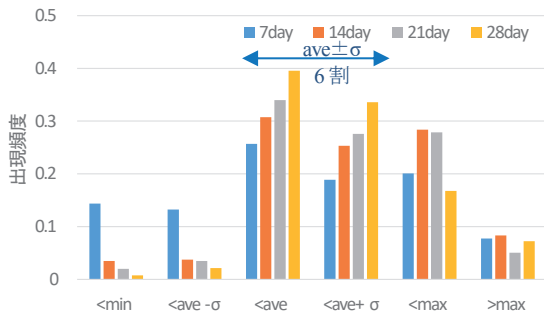


図-3 出現頻度(金沢)

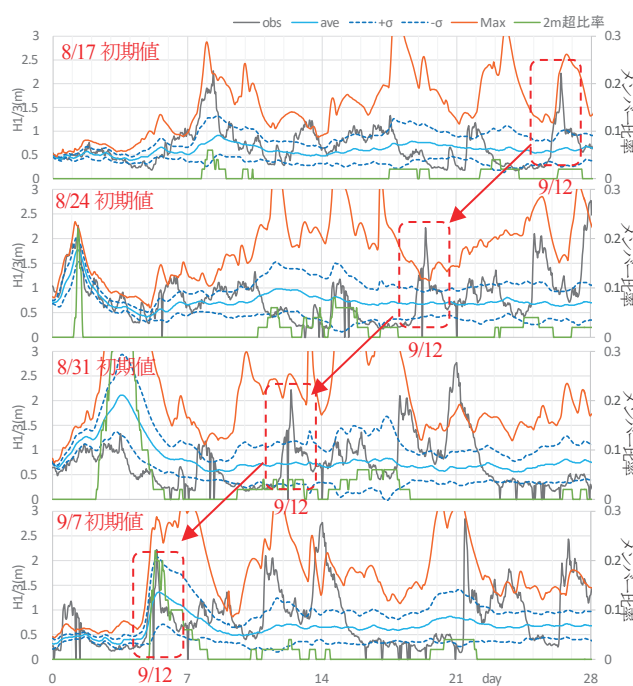


図-4 1~4 週先予測の変化(金沢)

を予測できることを示している。その一方で、平均値 $\pm\sigma$ を上回るケースも 3 割程度存在している。このケースについてはアンサンブル平均値より乖離していることが考えられ、高波浪の条件であると推定される。

海上工事においては施工不可の時に、ある程度以上の波高が来る場合には船舶退避や荒天養生が必要になる。大型作業船の退避には多くの時間が必要となるため可能な限り早期に高波浪の把握ができることが望まれる。そこで、高波浪に対する有効な情報提供について検証する。

図-4 は高波浪が発生した 9/12 の 4 週間前からの 1 週間ごとの予測を示している。この図には観測値と、アンサンブル最大値、アンサンブル平均値に加え、アンサンブル平均値 $\pm\sigma$ のラインに加え、波高 2m を上回ると予測したメンバーの比率も合わせて示している。波高 1m 以下の観測値はおおよそ平均値 $\pm\sigma$ の範囲に含まれており、通常の施工可否判断には平均値 $\pm\sigma$ を示すことでおおよそ傾向を把握することは可能であり、平均値 $\pm\sigma$ を上回るのは高波浪時であることが確認できる。

8/17, 9/7 初期値の予測では、7 日先までに発生する高波浪を予測しているメンバーの割合は 2 割程度となっており、高波浪の予測割合が高い。その一方で、8/31 初期値予測の 4 日先では高波浪を予測しているのは 3 割を上回っているが、実際の波高は 1m 程度である。これは、前者は温帯低気圧に伴う高波浪なのに対し、後者は台風起因する高波浪を予測している点で異なる。つまり、7 日先までに発生する高波浪については、台風起因の予測は進路予測が定まらない段階では容易ではないのに対し、温帯低気圧起因については発生割合を示すことで有用な情報となりえることが考えられる。

次に、9/12 の高波浪を対象として、温帯低気圧に起因する高波浪予測はいつから可能かを検討する。約 4 週間前である 8/17 初期値予測では 1 メンバーのみ 2m 越を予測しているが、約 3 週間前の予測になる 8/24 初期値で 2m 越を予測していない。しかし、2 週間前になると 2m 子を予測しているケースが存在し、1 週間前の 9/7 初期値では高波浪期間と 2m 越を予測したメンバー比率の変化はほぼ対応している。この結果によると、おおよそ 2 週間前から高波浪発生の可能性が把握されることが想定されるが、2m 越を予測するメンバーがいるにも関わらず超えないケースもあり、継続した検証が必要である。

5. 精度検証 (常陸那珂)

太平洋側の精度検証は常陸那珂を対象として実施した。図-5 は波浪観測値に対する RMSE, ブライアスキルスコア, 的中率を示しており、RMSE のグラフには Control run とアンサンブル平均を示している。この図に

よるとばらつきはあるものの10日後まではいずれの値も増加するが差異は小さく、また、10日後以降についてはアンサンブル平均の方が小さくなっている点は金沢と同じ傾向である。この時、単独予測であるControl runと比較して5cm, 10%程度の精度向上となった。

検討期間中に観測波高が1mを下回る割合 P_c は4割程度と金沢と比較して小さく、ブライアスキルスコアについて、予報の前半では0.4程度であるが、後半では平均して0程度となっており、アンサンブル予測は気候学的予測と同程度の精度という結果になった。また、基準波高を1mとした時の施工可否的中率はControl runとほぼ同程度の結果ではあるが、アンサンブル平均値を用いることで多少の改善がみられた。

図-6上は観測値がアンサンブルメンバー統計値のどの範囲に相当するかを示したヒストグラムである。その結果、全体的にはアンサンブル平均値 $\pm\sigma$ の範囲に5割程度含まれており、平均値 $\pm\sigma$ の範囲を示せば現象を5割程度予測できることを示している。その一方で、平均値 $+\sigma$ を上回るケースが2割程度、またアンサンブル最小値より小さい観測値となる例が特に7日予測では3割程度存在している。観測値がアンサンブル最小値よりも

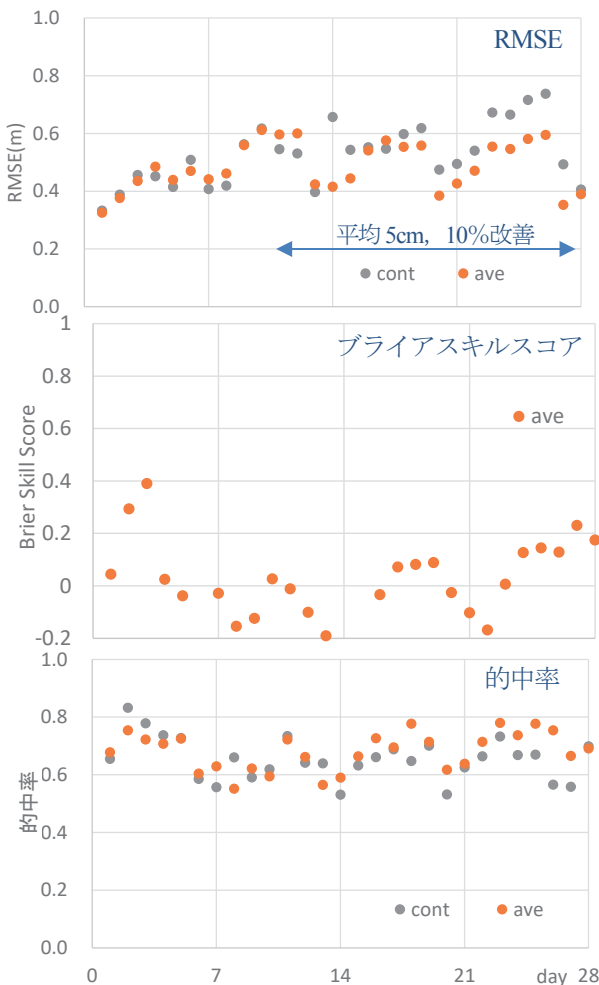


図-5 予測日別の検証指標(常陸那珂)

小さい結果であることは、波浪推算が過大評価傾向であることを示している。太平洋側の過大評価の要因、対策については消散項の改良によりある程度改善されることを既往の検討から確認しており²⁾、そのモデルを用いた場合のヒストグラムである図-6下では過大評価傾向が改善されることが確認できる。

これらの結果から、常陸那珂の1ヶ月予測においては、アンサンブル予測を用いることで単独予測と比較して、RMSEにおいては改善されるものの、施工可否判断への活用は金沢ほど期待するのは難しい結果となったが、消散項を改良したモデルを活用することで予測精度が向上する可能性が確認された。

次に常陸那珂における高波浪時の予測の可能性について検証する。図-7は9/18の高波浪の4週間前からの予測時系列を示している。まず、8/24, 9/7初期値のグラフにおいて、初期段階からアンサンブルが観測値に対して過大評価していることが分かる。これは、初期波浪場を作成する際の波浪モデルが過大評価していることが影響しており、初期波浪場を作成するモデルの精度向上がアンサンブル予測の精度確保に重要な要因であることを示している。

また、全体的に高波浪時を含む観測波高はアンサンブル最大値に包絡されており、9/18の高波浪については3週間前から高波浪を予測するメンバーが存在している。1週間前予測になる9/14初期値では、高波浪期間とメンバー割合の変化はほぼ対応している。予測期間によりその予測精度には差があるものの、アンサンブルメンバー比率を示すことで高波浪の可能性を早期に把握することが可能となり、施工現場においては有効な情報となりえると考えられる。

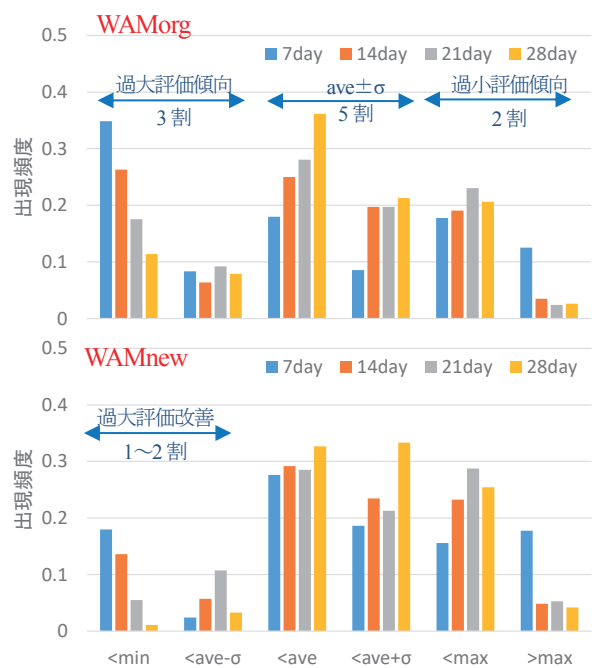


図-6 出現頻度(常陸那珂)

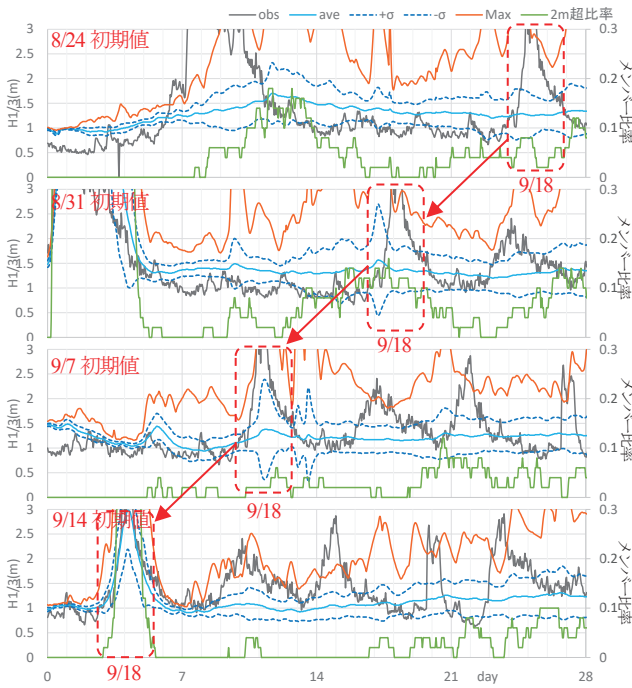


図-7 1~4週先予測の変化(常陸那珂)

6. おわりに

気象庁が新たに配信を始めた1ヶ月気象アンサンブル(日本域高解像度)を用いた1ヶ月波浪アンサンブル計算を実施し、海上施工工事における適用性について検討を実施した。その結果、摂動を与えないControl runと比較するとアンサンブル平均を用いた予測はRMSE、的中率においても精度向上が期待できることが分かった。また、ブライアスキルスコアを用いた評価の結果、特に日本海側では気候学的予測と比較してアンサンブル予測を実施することは価値がある結果となった。さらに、船舶退避などが発生する高波浪の予測については、台風起因の予測は容易ではないのに対し、温帯低気圧起因については発生割合を示すことで有用な情報となる可能性が示された。

以上より、1ヶ月アンサンブルデータの活用は、課題はあるものの海上施工現場においては有用情報を提供可能であると考えられる。しかし、アンサンブル計算の基礎となる波浪モデルの精度向上や、今回の検証は4か月間の19データを用いた検討結果であるため、今後は通年データを用いながら継続して検討することが今後の重要な課題である。

謝辞: 本研究を行うにあたり、九州大学大学院の橋本典明教授には、WAMモデルを用いた波浪予測について有益な助言をいただきました。また、波浪予測結果の検証に利用したNOWPHASデータは国立研究開発法人港湾空港技術研究所海象情報研究チームのHPより入手させていただきました。ここに記して関係者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 川口浩二, 櫻庭敏, 藤木峻, 田村仁: 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2015) 港湾空港技術研究所 資料 No.1319, pp.126, 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所, 2016.
- 2) 琴浦毅, 田中仁: 波浪推算モデルの低波浪時推算精度向上に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発) Vol. 73(2017) No.2 p.1_971-I_976, 2017.
- 3) 津田 宗男, 松見 吉晴, 金 洙列, 松田 信彦, 江口 三希子: 円滑な海上施工管理のための波浪と作業船の動揺のリアルタイム予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 73(2017) No.2 p.1_151-I_156, 2017.
- 4) 森屋陽一, 琴浦毅, 関本恒浩: 日本海における波浪推算モデルを用いた海上・潜水作業可否の予測精度, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.447-452, 2010.
- 5) 森 信人, 平口 博丸: アンサンブル波浪予測の精度と価値について, 土木学会論文集, 2004 巻(2004) 768 号 p. 167-177.

(2018.2.8 受付)

APPLICATION OF ENSEMBLE WAVE FORECAST TO MARITIME CONSTRUCTION MANAGEMENT

Tsuyoshi KOTOURA and Hitoshi TANAKA

In marine construction sites, it is important to obtain long-term wave forecast with sufficiently high accuracy. In this research, one-month weather ensemble provided by the Japan Meteorological Agency is used to forecast one-month wave climate by using WAM to examine applicability of the prediction to maritime construction management. As compared with control run which does not include any perturbation, prediction using ensemble average provides higher accuracy in terms of RMSE and hit rate. In addition, as a result of the evaluation using the Brier skill score, usefulness of the present ensemble prediction is shown as compared with climatological prediction, especially on the Sea of Japan side. Although prediction of high waves induced by a typhoon, which may result in ship evacuation, is less accurate, useful information can be obtained for extratropical cyclone by showing occurrence probability.