

海上施工管理における高解像度 全球アンサンブル予報の活用について

板垣 侑理恵¹・西 広人²・吉野 純³・琴浦 毅²

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 土木技術開発部
(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail: yurie.itagaki@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 土木技術開発部
(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

³ 正会員 岐阜大学工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: yoshino.jun.d2@f.gifu-u.ac.jp

海上施工管理においては、気海象予測に基づいた判断が重要視されているが現在の技術では気海象状況を完全に予測することが難しく、気象現象を確率的に捉えるアンサンブル予報が活用され始めている。気象庁は令和4年3月より週間アンサンブル数値予報モデルGPV(日本域)の空間解像度を0.5625度から0.375度の高解像度化した。本研究では、週間アンサンブルGPV(日本域)に含まれる海上風データを入力条件として波浪推算モデルWAMによる波浪計算を行い、風と波浪予測に関して高解像度化の影響度合いの評価する事により、海上施工管理における活用について検討を行った。その結果、高解像度化後の予測値には特に気象擾乱近傍の風速に増減がみられ、アンサンブル平均波高データの変化率は増加傾向が確認された。施工可否や退避判断に活用した際には的中率の向上がみられた。

Key Words : WAM, ensembleforecasts, marineworks

1. はじめに

大型作業船を用いた海上作業や潜水士による海中作業を伴う海上工事では、降雨や風といった気象要素に加え、波浪条件が作業に大きな影響を与える。施工期間中に台風や低気圧等の気象擾乱に起因する高波浪が来襲する場合には基地港への退避判断が必要となることもあり、安全性や経済性の観点から迅速かつ的確な判断が求められる。従来、これらの判断は波浪観測結果^{注1)}や気海象予測情報²⁾を利用しつつ²⁾³⁾、施工者の経験を踏まえ行なわれてきた。一方、海上工事の施工区域は沿岸域が主であったが、近年では洋上風力発電事業が活発化していることから、国内では施工実績が少なく経験に頼れない沖合での作業も増加することが想定される。したがって、施工可否や船舶退避の気海象予測に基づいた判断が改めて重要視されている⁴⁾。

現在の技術では気海象状況を完全に予測することは大気のもつカオス性により難しく、初期値に微小な摂動を与えてわずかに異なる数値予報を行い、その結果を平均やばらつきの程度といった統計的な処理をすることで不確定さを考慮し気象現象を確率的に捉えるアンサンブル予報^{注2)}が海上施工管理でも活用され始めている⁵⁾⁶⁾。気

象庁は令和4年3月より週間アンサンブル数値予報モデルGPV(日本域)(以下、週間アンサンブルGPV)の空間解像度を0.5625度(約56km)から0.375度(約38km)に高解像度化しており^{注3)}、活用が期待される。気象に関する数値予報モデルで予測できる気象現象の規模は空間解像度に大きく依存しているとされ^{注4)}、例として空間解像度が約13kmの全球数値予報モデルGPV(GSM:Global Spectral Model)は、高・低気圧や前線、台風の発達等水平規模が100km前後およびそれ以上の気象現象の予測に用いられ、空間解像度が5kmのメソ数値予報モデルGPV(MSM:Meso Scale Model)は、局地的な低気圧や集中豪雨など水平規模が数10km程度の現象の予測が可能である。一方で、規模の小さな現象に対して空間解像度が低いモデルで予測を試みた場合、メソスケールの気象擾乱の持つ急な気圧勾配の表現の不備により特に風速においてモデルバイアス発生^{注5)}の懸念がある。

したがって、週間アンサンブルGPVの高解像度化により気象擾乱の平滑化の緩和が期待され、これに伴い週間アンサンブルGPVを入力値とする波浪推算の結果にも好影響を与える可能性がある。

前述した施工可否や船舶退避判断に週間アンサンブルGPVを使用する際は、メンバー毎の値を統計的に処理し

て活用しているが、高解像度化により波浪推算の結果に影響がある場合、統計処理の方法を見直す必要があると考える。そこで本研究では、計算機性能の向上により今後も高解像度化が進むことを念頭に、週間アンサンブルGPV（日本域）に含まれる風データを入力条件として波浪推算モデル WAM による計算を行い、風予測と波浪予測に関して高解像度化の影響度合いの評価をすることにより、海上施工管理における活用について検討した。

2. 波浪推算

波浪推算の基本データは気象庁が提供を行っている週間アンサンブルGPV（日本域）を用いた。週間アンサンブルGPVの高解像度化以前は 0.5625° （約56km）格子（日本域1）、高解像度化後は 0.375° （約37km）格子（日本域2）の51メンバーの気象アンサンブルデータを1日2回提供するものである。

本研究では高解像度化前後の週間アンサンブル GPV データが並行配信されていた期間のうち、2022 年 4 月 27 日～12 月 31 日までに配信されたデータの各日 00UTC の風データを WAM の入力値とした。風データは 264 時間先までの予報データを使用して、表-1 に示す計算条件で波浪推算を実施し、24 時間毎に予報値を更新した。日本域の外側については、気象庁が提供を行っている週間アンサンブル数値予報モデル GPV（全球域）を用いて計算を行い日本域に接続している。

3. 高解像度化における影響評価

まず、アンサンブルデータの高解像度化による影響度確認のため事例解析を行った。影響度の確認を行う事例解析の対象とした海域と気象擾乱(起因)を表-2に示す。対象海域は、全国港湾海洋波浪情報網(以下、NOWPHAS)で沿岸域と沖合の両地点で観測が行われていた海域を選定した。起因擾乱は、前述した対象期間かつ選定した NOWPHAS 地点において、有義波高が出現頻度上位0.5%以上に該当するものを対象とした。また、影響度確認は次式で示す変化率を算出して評価した。

$$\text{変化率} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0.375i}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{0.5625i}} \quad (1)$$

ここで、 N は対象のデータ数、 $x_{0.375i}$ は空間解像度 0.375° の週間アンサンブルGPVを用いた i 番目の予測値、 $x_{0.5625}$ は空間解像度 0.5626° の週間アンサンブルGPVを用いた i 番目の予測値である。変化率は全対象期間の予測

表-1 アンサンブルWAMモデル計算設定

領域	日本域1	日本域2	全球域
計算領域 $[\circ]$ (北緯)	20～50		-70～60
計算領域 $[\circ]$ (東経)	120～150		117.5～295
周波数領域[Hz]	0.042 ～ 1.067		
周波数分解数	35		
周波数間隔	倍率1.1		
方向分解数	16		
水深条件	深海		
空間間隔 $[\circ]$	0.25		1.25
伝搬計算 時間刻み[s]	900		
風使用データ (51メンバー)	週間 アンサンブル GPV（日本域）		週間 アンサンブル GPV（全球域）
風_解像度 $[\circ]$	0.5625	0.375	1.25
風_時間間隔[s]	10,800		21,600

表-2 対象海域と起因擾乱

起因 擾乱	NOWPHAS 最大有義波高 観測日時	NOWPHAS 最大有義 波高[m]	NOWPHAS 地点	海域	
T2208号	8/13 12:00	3.34	御前崎	沿岸域	東日本太平洋側
	8/13 12:00	5.51	静岡御前崎沖	沖合	
T2214号	9/18 14:00	7.38	細島	沿岸域	西日本太平洋側
	9/18 22:00	11.07	宮崎日向沖	沖合	
	9/18 22:00	3.65	御前崎	沿岸域	東日本太平洋側
	9/19 2:00	5.31	静岡御前崎沖	沖合	
低気圧①	6/6 18:00	3.58	御前崎	沿岸域	東日本太平洋側
	6/6 14:00	4.99	静岡御前崎沖	沖合	
	6/7 6:00	4.04	小名浜	沿岸域	北日本太平洋側
	6/7 6:00	6.33	福島県沖	沖合	
	6/7 14:00	3.96	久慈	沿岸域	
	6/7 14:00	4.1	岩手県北部沖	沖合	
低気圧②	6/13 22:00	4.2	久慈	沿岸域	北日本太平洋側
	6/13 22:00	5.06	岩手県北部沖	沖合	
低気圧③	10/26 16:00	3.66	小名浜	沿岸域	北日本太平洋側
	10/26 16:00	5.24	福島県沖	沖合	
低気圧④	11/23 6:00	3.76	小名浜	沿岸域	北日本太平洋側
	11/24 2:00	5.35	福島県沖	沖合	

値に加え、各起因擾乱に関してNOWPHASで最大有義波高を観測した日と前後1日の計3日間を抽出した予測値の2通りで算出した。

前述した変化率をWAMの入力値である風データと波高データの単独予報とアンサンブル平均でそれぞれ算出し、影響度確認を行った。

(1) 風速データ

風速データは、NOWPHAS地点の最近傍海格子点におけるメソ数値予報モデルGPV（MSM，解像度： $0.05^\circ \times 0.0625^\circ$ ）の初期値と高解像度化前後の週間アンサンブルGPVの3日先予報の単独予報と統計値を用いて検証を行った。風の強さによる傾向の違いを確認するため、各海域においてMSMの風速が0～10 m/s、10 m/s以上となる風の2種類に分類し、変化率の整理を行った（表-3）。宮崎日向沖と岩手県北部沖でのアンサンブル平均の風速散布図を図-1に示す。

アンサンブルデータのうち摂動を与えずに予測した決定論的予測結果(Control Run)を単独予測とした。表-3が示すように、単独予報、アンサンブル平均ともに高解像度化により風速の増減が見られ、沖合地点の方が沿岸域地点より変化率が大きく表れる傾向がみられた。これは低解像度データでは地形表現が悪く、沿岸でも沖合でも地形の影響を受けてしまっていたが、高解像度データでは地形表現が改善して、沖合で地形の影響が弱まったため、沿岸よりも沖合で変化率が大きくなったと考えられる。高解像度化による風の強さによる変化率の傾向は沿岸域、沖合ともに同程度であった。また、図-1における

台風を対象とした宮崎日向沖と、低気圧を対象とした岩手県北部沖の風速変化率は同程度であり、起因擾乱による変化率の差は小さかった。

また、NOWPHASの最大有義波高発生時におけるアンサンブルメンバーのヒストグラムと累積分布関数を重ねた図を全NOWPHAS地点で作成し、擾乱時の風速メンバーの分布の確認を行った。図-2にT2214号時の宮崎日向沖、T2208号時の御前崎、低気圧①の岩手県北部沖における擾乱時の風速メンバーの分布を示す。累積分布関数に関しては、高解像度化前と比較し高解像度化後の方が風速のメンバー分布が大きい値に推移する傾向が全地点で見られ、高解像度化により風速の増加が確認された。

表-3 高解像度化前後の風速変化率

期間	MSM 風速 [m/s]	高解像度化前後の変化率			
		単独予報		アンサンブル平均	
		沿岸域	沖合	沿岸域	沖合
全期間	0～10	0.91～1.12	1.07～1.39	0.91～1.12	1.04～1.34
	10～	1.01～1.16	1.04～1.36	0.99～1.16	1.04～1.33
擾乱期間	0～10	0.94～1.10	0.84～1.38	0.94～1.11	1.07～1.39
	10～	0.98～1.14	0.84～1.38	1.01～1.16	1.04～1.36

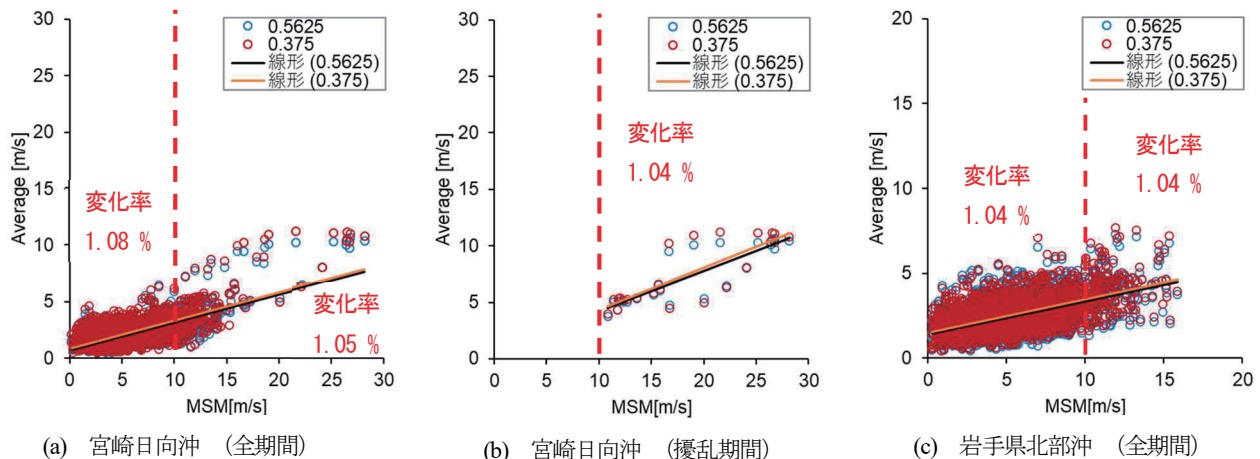


図-1 3日先予報風速散布図（アンサンブル平均）

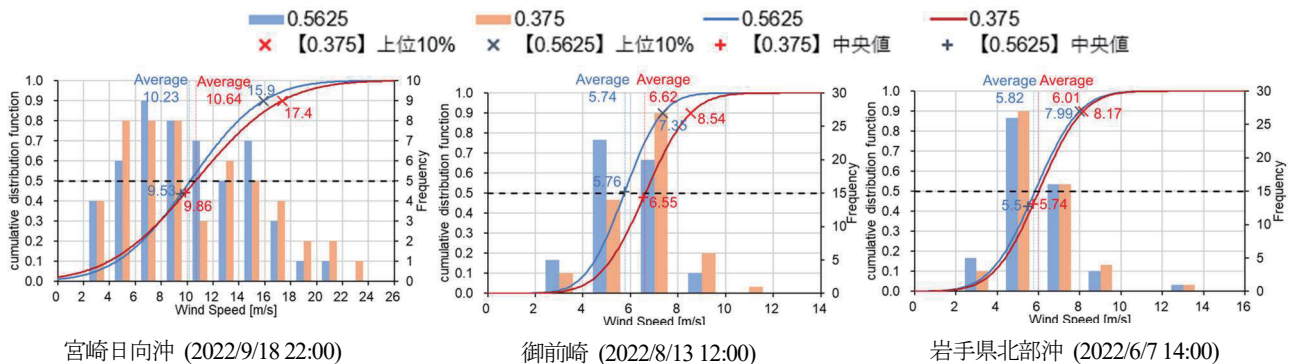


図-2 アンサンブルメンバー風速の累積分布関数とヒストグラム図

(2) 波高データ

波高データは、NOWPHAS の観測値と高解像度化前後のアンサンブル波浪計算の 3 日先予報の解析値を用いて、表-4 に示す各海域の変化率の整理を行った。宮崎日向沖と岩手県北部沖でのアンサンブル平均の波高散布図を図-3 に示す。

表-4 に示すように、単独予報、アンサンブル平均ともに高解像度化前後における波高の変化率は 1.02~1.06 程度であり、前述した風速の変化率より微小ではあるものの増加傾向が見られた。また図-3 より、WAM への入力値である風データで起因擾乱の違いが見られなかった為、波高に関しても同様の傾向となっていた。

対象海域における週間アンサンブル GPV の高解像度化による影響として、高解像度化以前に波高 5.0 m 程度の高波浪が来襲する場合を仮定すると、高解像度化前後

で波高の予測値は 10~30 cm 程度増加する可能性があり、空間解像度が高くなったことで気象擾乱の平滑化が緩和された可能性が示された。

また、高波浪時のアンサンブル波浪計算への高解像度化の影響把握のため、NOWPHAS 観測の最大有義波高とアンサンブル平均の最大有義波高の比較を行った結果を図-4 に示す。大部分で同程度の値となったが T2214 号の細島港、宮崎日向沖のように改善が見られるケースもあり同程度以上の予測精度となることが期待される。

4. 施工可否・船舶退避判断への活用

宮崎日向沖と静岡御前崎地点において 2022/5/1 ~ 2022/12/31 の期間を対象に、作業限界を 1 m、船舶の退避基準を波高 4 m と仮定して高解像度化前後のアンサンブル予報値を用いた施工可否判断と船舶退避判断を疑似的に実施した。船舶退避判断の場合には退避行動を選択してから基地港に退避するまでのリードタイムが必要となるため、退避の判断を行うタイミングを 3 日前として 3 日先予報値で検証を行った。

表-4 高解像度化前後の波高変化率

期間	高解像度化前後の変化率			
	単独予報		アンサンブル平均	
	沿岸域	沖合	沿岸域	沖合
全期間	1.02~1.06	1.03~1.06	1.02~1.06	1.03~1.06
擾乱期間	1.03~1.04	1.03~1.06	1.02~1.04	1.02~1.06

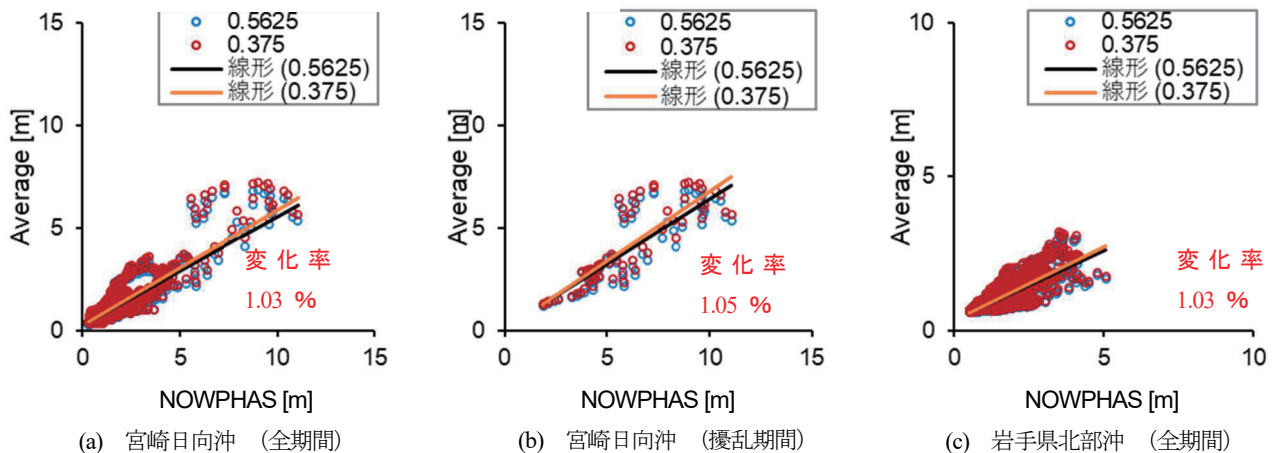


図-3 3日先予報波高散布図（アンサンブル平均）

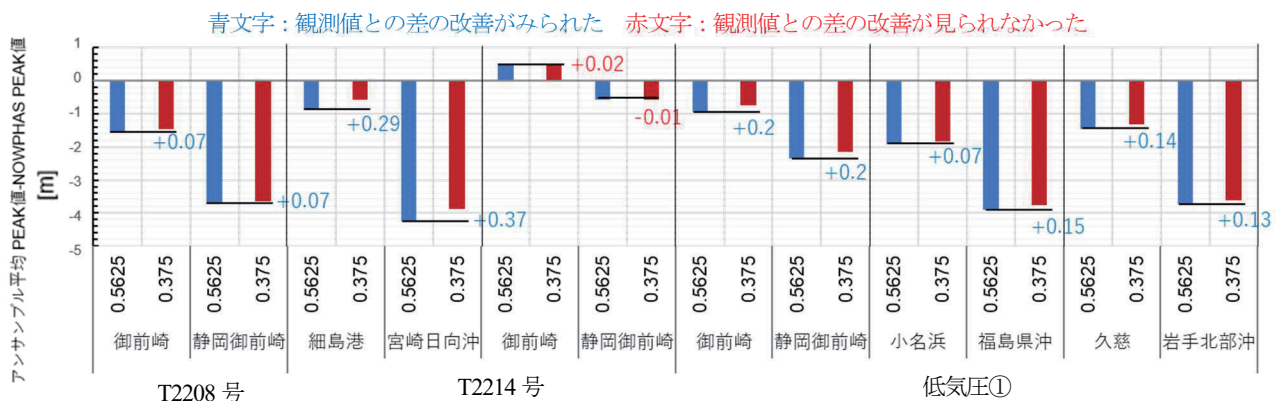


図-4 観測の最大波高値とアンサンブル平均の最大波高値の比較（青：0.5625°，赤：0.375°）

(1) アンサンブル統計処理方法

51 メンバーのアンサンブル平均値（以下、AVE）とメンバーのバラツキを示す標準偏差（ σ ）を用いて統計処理を行う。本検討においては、上位 15.8 % となる“AVE+ σ ”，上位 6.7 % となる“AVE+1.5 σ ”，上位 2.3 % となる“AVE+2.0 σ ”でアンサンブル統計処理を行った。

(2) 検証指標

基準波高の超過の有無を予測と観測値それぞれについて判定し、表-5 に示すカテゴリーに分類した事例数を元に予測特性を検証するカテゴリー検証を行った。なお、的中率，見逃し率，空振り率を次式で算出した。

$$\text{的中率} = FO / (FO + FX + XO) \quad (2)$$

$$\text{見逃し率} = XO / (FO + FX + XO) \quad (3)$$

$$\text{空振り率} = FX / (FO + FX + XO) \quad (4)$$

ここで、FO、FX、XO はそれぞれの頻度数を表す。

(3) 検証結果

宮崎日向沖における全期間のNOWPHASで観測された有義波高とAVE+ σ の波高の時系列図を図-5に示す。対象期間で観測値が4mを超えた擾乱は3イベントであった。

a) 施工可否判断

全期間での的中率を図-6に，見逃し率を図-7に，空振り率を図-8に示す。基準波高を1mとした場合，空振り率が微小に増加しているものの，的中率と見逃し率は高解像度化により精度が向上する傾向がみられた。

図-9に宮崎日向沖における，図-10に静岡御前崎沖における月別の的中率と高解像度化前後での的中率差分を示す。宮崎日向沖では，台風の影響を受けない6月，7月に関してはアンサンブル統計処理方法による的中率のバラ

ツキが小さい傾向が見られ，台風が来襲する8～10月，冬季の低気圧の影響を受ける11月12月に関してはアンサンブル統計処理方法による的中率のバラツキが大きくなる傾向がみられた。静岡御前崎でも，台風や低気圧の影響を受ける月に前述と同様の傾向がみられる。

また，アンサンブル平均に着目すると，高解像度化前後の的中率差分は宮崎日向沖では2.3～6.8 %間を推移しており高解像度化前と同程度以上の精度がみられ，静岡御前崎では-1.9～15.5 %間を推移しており8月から12月にかけて精度が向上する傾向がみられた。

b) 船舶の退避判断

基準波高を4mとした場合，図-6に示す的中率は高解像度化により精度向上が全体的に確認できるが，基準波高を4mとした場合，AVE+2.0 σ で評価する場合は的中率の低下がみられる。これは図-7の見逃し率が改善しているのに対し，図-8の空振り率が増加していることが影響している。このことは船舶退避判断において安全側の判断に繋がる一方で，施工機会を逃すことで経済損失が大きくなる結果である。

c) まとめ

本検証で実施した施工可否判断と船舶の退避判断においては，週間アンサンブル GPV の高解像度化によりの中率の向上が見られ，アンサンブル数値予報が高解像度化されることは海上施工管理の際にアンサンブル予報を活用する上でより有用な予測に繋がることが示唆された。

しかし，空振り率に着目をする経済性においては損失が大きくなる結果となっており，予測精度の向上が必要である。そのためには，アンサンブル計算の基礎となる波浪推算の精度向上や海上施工管理へアンサンブル予報の活用を行う際に，最適なアンサンブル統計処理方法やアンサンブル統計値以外での評価手法に関しても今後検討をしていくことが必要であると考えられる。

表-5 カテゴリー指標による分割表

		NOWPHAS		計
		$\geq 1\text{m}$	$< 1\text{m}$	
Forecast	$\geq 1\text{m}$	FO	FX	FO+FX
	$< 1\text{m}$	XO	XX	XO+XX
計		M	X	N

5. おわりに

本検討では，気象庁が令和4年3月より空間解像度を0.5625度から0.375度の高解像度化させた週間アンサン

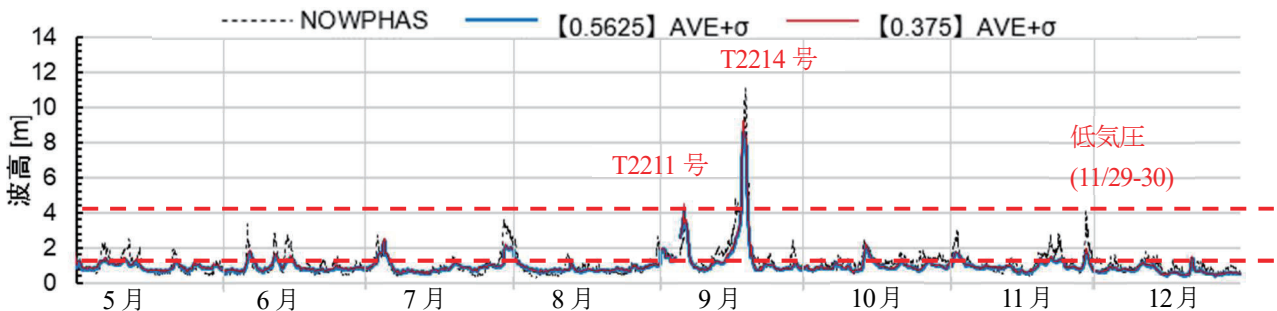


図-5 全期間のNOWPHASとアンサンブル平均+ σ の波高時系列図（宮崎日向沖）

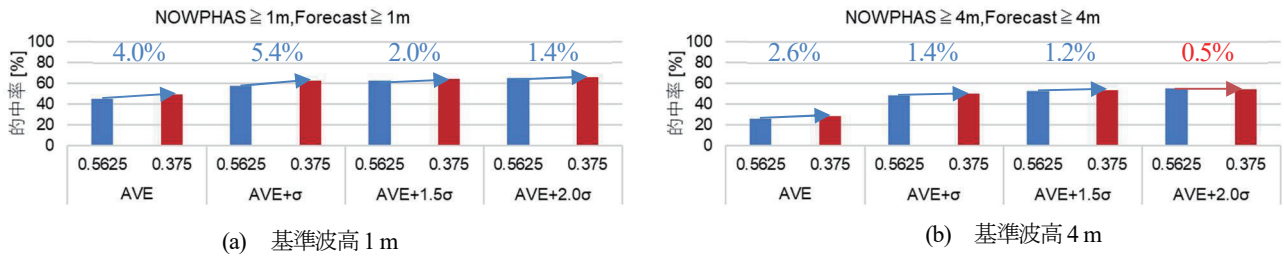


図-6 全期間の的中率 (宮崎日向沖)

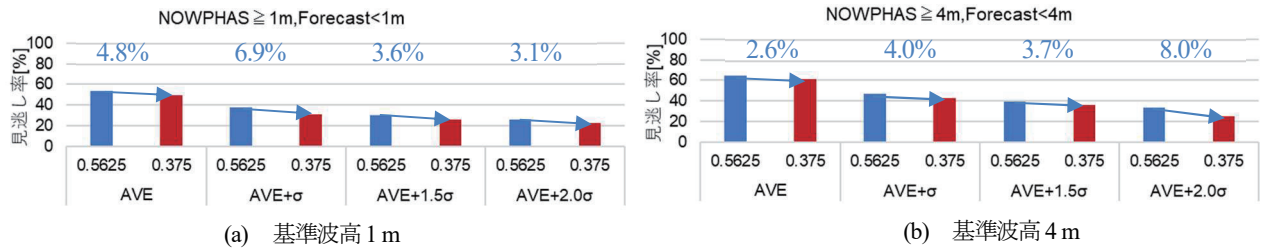


図-7 全期間の見逃し率 (宮崎日向沖)

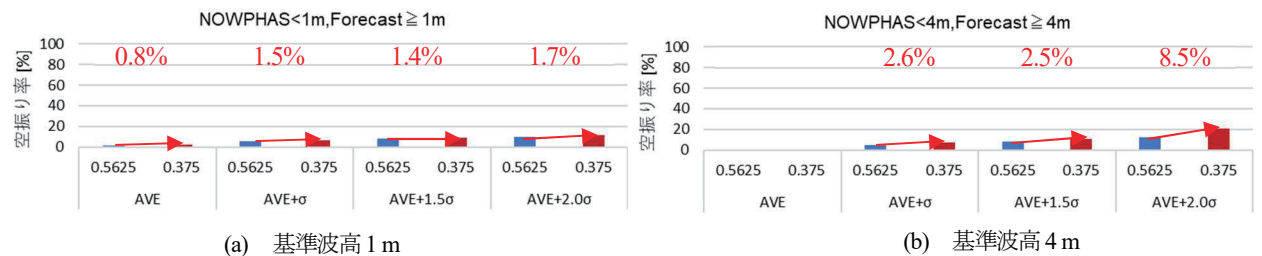


図-8 全期間の空振り率 (宮崎日向沖)

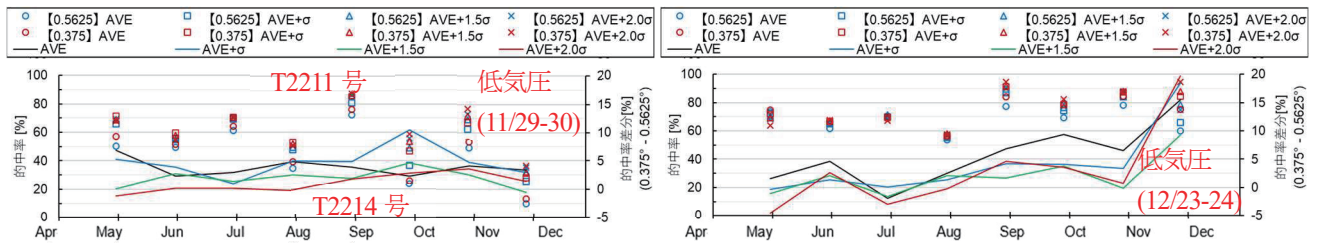


図-9 基準波高 1 m の月別の的中率と的中率差分 (宮崎日向沖)

図-10 基準波高 1 m の月別の的中率と的中率差分 (静岡御前崎沖)

ブル数値予報モデル GPV (日本域) の風データを用いて波浪推算モデル WAM による波浪推算を行い、週間アンサンブル GPV の風速予報と波浪予測に関して高解像度化の影響度合いの評価を実施した。また、高解像度化前後のデータを用いて海上施工管理における活用方法について検討を実施した。その結果、対象とした事例においては週間アンサンブル GPV の高解像度化後の風速データは高解像度化により変化がみられ、特に気象擾乱時の風速アンサンブルメンバーの分布は大きい値側に推移する傾向がみられた。アンサンブル平均波高の変化率は増加傾向であることが示唆された。また、台風や低気圧に起因する高波浪の予測精度は高解像度化以前と比較して同程度以上となることを確認した。さらに、海上施工管理における施工可否判断と船舶の退避判断に活用した際

には的中率の向上が見られアンサンブル数値予報が高解像度化されることは海上施工管理の際にアンサンブル予報を活用する上でより有用な予測に繋がることが考えられる。今回の検証は 8 か月間のデータを用いた検討結果であるため、通年データを用いながら継続的な検討が今後の重要な課題である。

NOTES

- 注1) 国立研究開発法人港湾空港技術研究所：全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS), 2022
- 注2) 気象庁数値予報課：令和 5 年数値予報解説資料集, pp 79-80, 2023
- 注3) 気象庁情報基盤部：配信資料に関する技術情報 No.572, 2021.12
- 注4) 気象庁数値予報課：令和 5 年数値予報解説資料集, pp 99, 2023

REFERENCES

- 1) 山本浩之, 栗山善昭: 沿岸防災技術研究所の活動について(令和4年度), 沿岸技術研究センター論文集, No. 23, pp. 55-60, 2023. [Yamamoto, H., Kuriyama, Y.: Activities of Coast development institute technology(Reiwa 4th year), Report of the Coastal Development Institute of Technology, No. 23, pp. 55-60, 2023]
- 2) 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, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 第26巻, pp.447-452, 2010. [Moriya, Y., Kotoura, T and Sekimoto, T.: Examination of Wave Prediction Accuracy For Marine Works in The Sea of Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 26, pp. 447-452, 2010.]
- 3) 琴浦毅, 森屋陽一, 関本恒浩: 波浪推算の計算領域が海上施工可否の判定制度に及ぼす影響, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 67巻2号, pp. I_880-I_885, 2011. [Kotoura, T., Moriya, Y. and Sekimoto, T: Influence of Calculation Area on Wave Prediction for Marine Works in the Pacific Ocean, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 67, Issue 2, pp. I_880-I_885, 2011.]
- 4) 島谷学, 力石大彦, 佐々木慎, 中井崇斉, 山口祐一郎: 洋上風力発電施設の施工管理について, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 69巻2号, pp. I_114-I_119, 2013. [Shimaya M., Chikaraishi M., Sasaki M., Nakai T., and Yamaguchi Y.: Construction Management for Offshore Wind Power Facilities, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 69, Issue 2, pp. I_114-I_119, 2013.]
- 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768号, pp. I_167-I_177, 2004. [Mori N. and Hirakuchi H.: Skill and Relative Economic Value of Ensemble Ocean Wave Prediction, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 2004, Issue 768, pp. I_167-I_177, 2004.]
- 6) 琴浦毅, 田中仁: 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, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 74巻2号, pp. I_629-I_634, 2018. [Kotoura, T. and Tanaka, H.: Application of Ensemble Wave Forecast to Marine Construction Management, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 74, Issue 2, pp. I_629-I_634, 2018.]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

UTILIZATION OF HIGH RESOLUTION GLOBAL ENSEMBLE PREDICTION SYSTEM TO MARITIME CONSTRUCTION MANAGEMENT

Yurie ITAGAKI, Hirohito NISHI, Jun YOSHINO and Tsuyoshi KOTOURA

In maritime construction management, judgment based on weather and sea condition forecasts is highly valued, but it is currently difficult to predict weather and sea conditions completely using existing technology. Therefore, ensemble forecasts, which capture meteorological phenomena probabilistically, have started to be utilized. The Japan Meteorological Agency increased the spatial resolution of the Weekly Ensemble Numerical Weather Prediction Model GPV (Japan) from 0.5625 degrees to 0.375 degrees since March 2022. In this study, we conducted wave calculations using the wind data included in the Weekly Ensemble Numerical Weather Prediction Model GPV (Japan). By evaluating the impact of high-resolution forecasting on wind and wave predictions, we examined the application of this high-resolution forecasting in maritime construction management. As a result, there were fluctuations in wind speed after the increase in resolution, and an increasing trend was observed in the rate of change of ensemble-averaged wave height data. When utilized for construction feasibility and ship evacuation decisions, an improvement in accuracy was observed.