

波浪推算モデルによる低波浪時の 有義波推算精度を低下させる要因の検討

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

第三世代波浪推算モデルである WAM は設計波の算定、波浪予測情報の提供など実務に適用されているものの、海上工事が可能である低波浪時における予測精度の検証は少ないため、著者らはこれまで WAM を海上工事に適用するための検証を進めてきた。これらの検討を通じて、特に低波浪時において波高を過大評価、周期を過小評価するケースがあることを確認していた。

本研究では低波浪時の波浪推算精度を低下させる要因を現地観測との比較を通じ検討した。その結果、周波数スペクトルを用いた比較検証から、WAM においては高周波数成分のエネルギーを過大に評価する場合があることを確認した。全体エネルギーが小さい低波浪時においては、過大評価したエネルギーが相対的に大きく、結果的に波高の過大評価、周期の過小評価につながっていると考えられ、この高周波数成分のエネルギーの評価改善が低波浪時の予測精度向上につながると推察した。

Key Words : Wave prediction accuracy, WAM model, Marine works, Observation

1. はじめに

建設工事においては風雨などの気象情報の入手は工程管理、安全管理上重要であるが、海上工事においては波、潮流という海象要因も加わることとなる。そのため、海上工事では、NOWPHAS¹⁾などの波浪観測情報や高度化された波浪予報情報²⁾を得ながら、これまでの経験を踏まえ作業の可否判断を行ってきた。しかし、海上工事では、工事により船舶が大型の場合や、船団の数が多い場合などは、使用船舶の移動、離脱に多くの時間が必要となる。そのため、海象条件の悪化が予想される場合は、時間的な余裕を持ってあらかじめ現場海域から待避することが多い。この場合、使用船舶の待避を半日以上前に判断することもあり、精度の高い波浪予測情報が得られるのであれば、効率的な待避が可能となり、工程管理、安全管理上、非常に有効になると考えられる。しかし、波浪推算モデルに関して施工可否判断への適用に着目している事例は少なく、また、低波浪時の予測精度低下要因について検討した事例は少ない。

著者らはこれまでも海上工事施工限界波高を 1m 程度として、いくつかの地点において波浪推算モデルの精度検証を行ってきた³⁾⁻⁶⁾。その結果、波浪推算モデルは施

工可否判断に活用できる精度を有していることを確認しているものの、低波浪時に波高を過大評価、周期を過小評価する事例があることを確認している。

そこで、本研究では施工可否判断海象条件(波高 1.0m 程度)を対象として、直江津港、鹿島港で実施した現地観測結果と波浪推算モデルの予測結果の比較を通じて、低波浪時の波浪推算モデルの予測精度低下発生要因について検討した。

2. 現地観測

(1) 直江津港

新潟県上越市直江津港において海底設置型波高計により観測した⁷⁾。観測期間は2009年12月9日~2010年1月8日であり、水深25mで0.5sの連続観測を実施した。表-1は観測条件、図-1は設置位置である。図-2はその時に観測された有義波高、有義波周期の時系列を示しており、最大で有義波高5m前後の高波浪が来襲するなど静穏な海象は少なく、海洋工事の施工可否判断波高を1.0mと設定すると、海上工事が可能となる日は非常に少ない。有義波周期は高波浪時には10秒程度となっているが、今回の対象

とする波高1m程度では5, 6秒程度となっている.

(2) 鹿島港

茨城県鹿島港の観測期間は2015年6月15日~7月8日であり, 水深20mで0.5sの連続観測を実施した. 表-1は観測条件, 図-1は設置位置である. 図-2はNOWPHASで観測された同時期の有義波高, 有義波周期の時系列を示しており, この期間是有義波高が1.0m程度の海象条件が多く, その時の有義波周期は8秒~12秒程度になっている.

なお, 本研究における現地観測位置は南防波堤からの距離が100m程度なので, 防波堤からの反射の影響も含まれていると考えられる. しかし, 概ね1波長程度以上は離れていることを考慮すると位相干渉の影響は小さく, 防波堤の反射率を考慮することで入射波エネルギーを推定することは可能であると考えられる.

表-1 現地観測緒元

項目	直江津港	鹿島港
観測期間	2009年12月	2015年6月
水深	25m	20m
観測モード	20分連続観測	
サンプリング間隔	0.5s	
観測成分	4成分(水位, 水圧, 流速(U, V))	

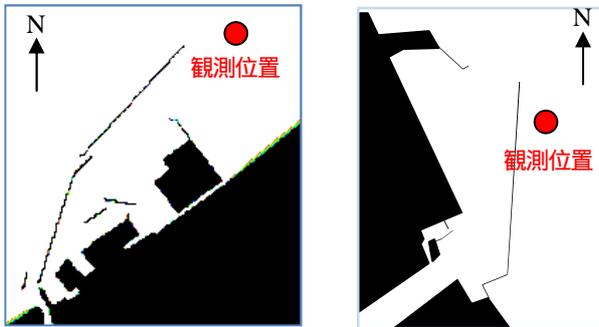


図-1 観測位置図(左:直江津港, 右:鹿島港)

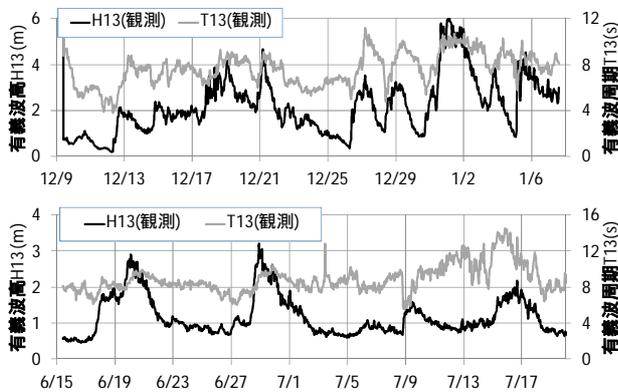


図-2 観測時系列(上:直江津港, 下:鹿島港)

3. 波浪推算モデル

波浪推算モデルは太平洋域を図-3 に示す領域の計算を行い, 図-4 に示す領域に接続した. 図-3 の太平洋領域では 0.5° 格子の気象庁 GPV (GSMgl), 図-4 の領域では約 20km 格子の気象庁 GPV (GSMjp) 海上風データを約 10km 格子に線形補間し, WAM モデルへの入力条件とした. なお, WAM の最小周波数は 0.0418Hz としているが, 高周波数側の影響を評価するために川口ら⁸⁾を参考に最大周波数を 1.174Hz とした(表-2).

ここで, WAM は深海モデルとしているため, 波長水深比が小さくなるケースでは実測値との乖離が発生することが予想される. 著者らは WAM の精度検証を太平洋側で実施した時に, NOWPHAS の沿岸波高計と比較をする場合, エネルギー平衡方程式を用いて, 海岸地形, 海底地形の影響を考慮するモデルを組み合わせることで, 検証を実施している⁴⁾.

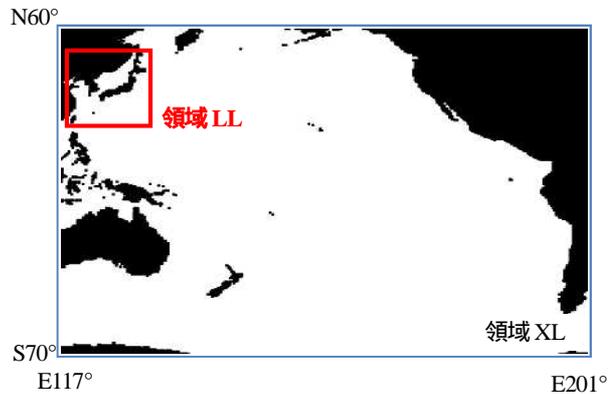


図-3 太平洋計算領域図(0.5° 格子:領域 XL)

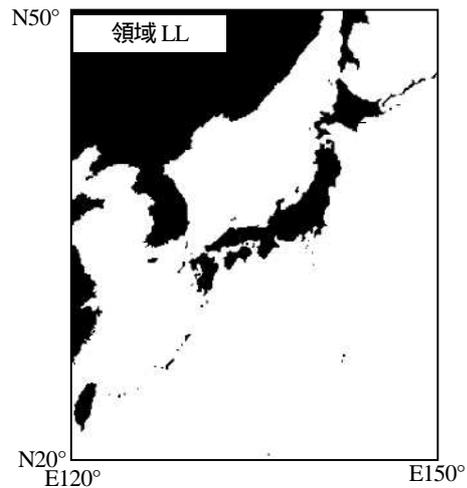


図-4 計算領域図(10km 格子:領域 LL)

表-2 WAM 計算諸元

領域番号	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	0.1°	0.5°
伝播計算時刻み	300s	900s
風使用データ	GSMjp	GSMgl
風データ時間間隔	3600s	

今回の観測においては直江津の波長は56m程度(水深25m, 周期6秒)であるため, 水深波長比は0.45程度となる. したがって, 海岸線に対して50°以上の角度を持って入射する場合は波向きが多少変化していると考えられるが, 16方位で分割した場合には影響がないと考えられる.

また, 鹿島港の波長水深比は0.22程度となり, 沖入射角度が50°, 70°の場合, 観測水深位置では43°, 53°程度となるため, 波向きによっては16方位分割において波向きが変化する可能性はあるが, 卓越波向きがESEであることを考慮すると影響は小さいと推察される.

ただし, 不規則に含まれる有義波周期よりも低周波数側のエネルギーについては必ずしも影響が小さいとはいえない可能性がある. そのあたりの検証も含めて, 施工可否判断の波高1m付近を対象とした本検討においては海底地形を考慮しない深海タイプのWAMを用いることとした.

4. 波浪推算モデルの推算精度低下要因の検証

(1) 直江津港

図-5は直江津港の観測値と波浪推算値の時系列である. 波高の時系列は波高1.0m以下の静穏な海象条件においてもWAMの再現性は良い. その一方で, WAMは周期については高波浪期間で1秒程度, 静穏期間では2秒程度過小評価している. この要因を検証するために, 高波浪として12月19日0時, 低波浪として12月25日17時, 22時の周波数スペクトルについて, 現地観測と波浪推算の比較を図-6に示した.

高波浪時は, スペクトルのピークが高周波側に少しシフトしていることや, WAM最小周波数: 0.0418Hz以下を評価できないことが周期を過小評価する要因になって

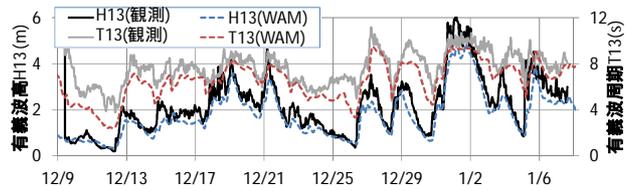


図-5 観測データとWAMの時系列(直江津)

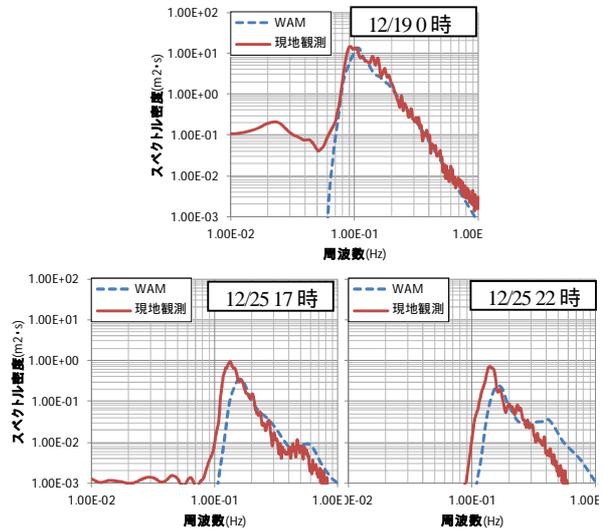


図-6 周波数スペクトルの比較(直江津)

いると考えられるが, 高低周波数のスペクトル形状やエネルギーについても良く対応しており, 高波浪時におけるWAMの推算精度の高さはあらためて確認されたといえる.

低波浪時は, 観測の17時, 22時ともに0.14Hz程度がピークであり, 17時には0.47Hzにもピークが存在する. しかし, 22時では0.47Hzのピークが無く, そこから0.14Hz程度のスペクトルピークまでの形状にはほとんど変化が無い. つまり, 現地観測においては, 0.47Hz付近のエネルギーは17時以降に消散したと考えられる. その一方で, WAMでは17時の時点ではスペクトル形状は概ね対応しているが, 全体的に高周波数側へシフトしている. また, 22時の時点でも現地観測では存在していない0.4Hz程度にもピークが存在しているなど, 観測スペクトルとは異なり高周波成分を過大評価している.

(2) 鹿島港

図-7は鹿島港の観測値と波浪推算値の時系列である. 6月16日の波高を0.3m程度の過大評価, 周期を2秒程度の過小評価している. また, 7月13日頃では現地観測の周期は増加しているのに対し, 波浪推算値では周期が低下するという逆の結果となっている.

図-8は6月16日6時~9時の1時間ごとの観測スペクトルとWAMスペクトルの比較である. この図を見ると, 0.07Hz程度の低周波数側のエネルギーは概ね観測と

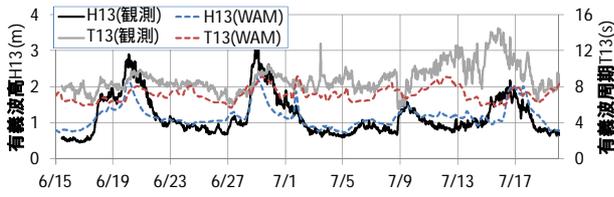


図-7 観測データと WAM の時系列 (鹿島)

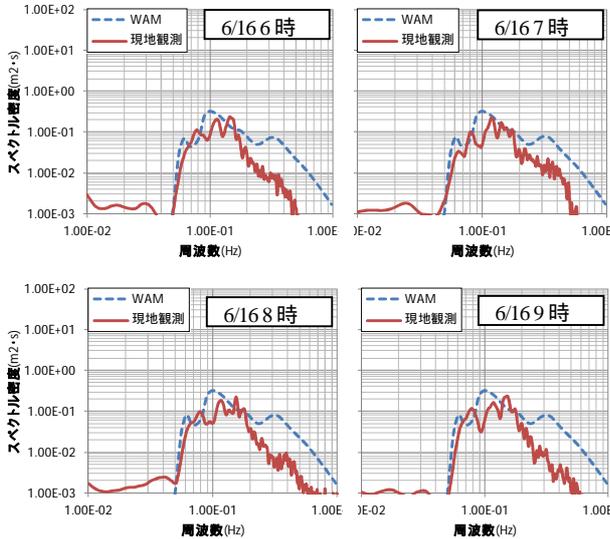


図-8 周波数スペクトル比較(鹿島港: 6/16)

WAM で概ね対応していることから, WAM においてはうねりの評価は概ねできていると考えられる. これは著者らの検証で得られた太平洋側の計算領域が広いことによる影響⁴⁾であると考えられるが, 太平洋側で遠方からのうねり成分を予測できることは海上工事においては非常に重要なことである.

その一方で, WAM では高周波数側を全体的に過大評価しており, 0.1Hz 付近のピークとは別に 0.3Hz 付近にピークがある. 現地観測では7時頃に一時的に 0.3Hz 程度のエネルギーが増大しているが, そのエネルギーは9時には減少しており, 6時と9時のスペクトル形状はほぼ等しい. つまり, 現地観測においては7時頃に生じている高周波数側のエネルギーが低周波数側に移動して保持されているわけではなく, 消散したと考えられる. しかし, WAM ではエネルギー減少は生じておらず, 高周波側のエネルギーが維持されているため, 現地観測との乖離が生じていると考えられる.

台風 1511 号が日本の南海上にいた観測期間後半では周期がさらに乖離している. 図-9 は台風 1511 号経路図を示しており, 丸の中の文字が日付を示している. つまり, この図は7月7日~7月17日の期間における, 各日午前3時時点の台風 1511 号の中心位置である. この経路図を見ると, 日本南海を7月7日から7月12日までは西進し, 7月12日以降は紀伊半島南側付近を北進している. つまり, 台風により発生する南寄りの波の鹿島港への影



図-9 台風 1511 号経路図 (内は7月の日付)

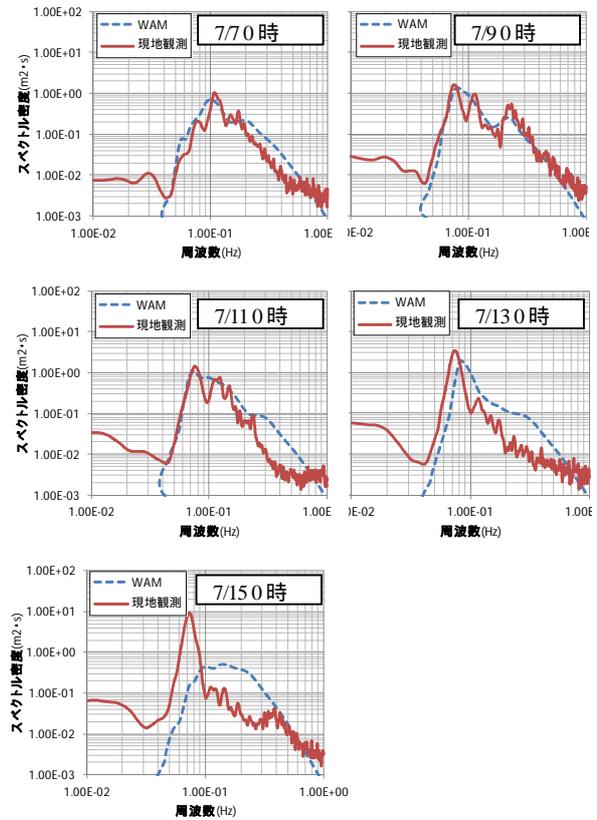


図-10 周波数スペクトルの比較(鹿島)

響は, 台風の位置により異なり, 鹿島港より東側に台風がある時期はその影響は大きく, 西側になるにつれて影響が変化してくることが予想される.

図-10 はこの期間の周波数スペクトルの現地観測と WAM の比較であるが, 7月7日では全体的なスペクトル形状は対応しており, 7月9日では 0.25Hz 付近に発生しているピークについても概ね対応していると考えられる. しかし, 7月11日では, 低周波数側の精度は良好であるものの, 現地観測は 0.3Hz 付近のエネルギーが減少しているのに対し, WAM はその付近のエネルギーが7月9日と顕著な差はないため過大評価している. 7月13日では WAM においても 0.15Hz 付近のエネルギーが減少

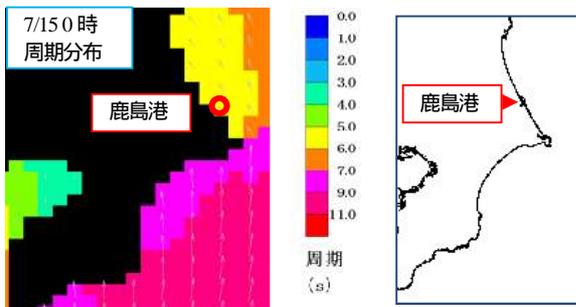


図-11 7/15 0時の関東周辺の周期分布，地形

するなど観測結果と一致する傾向にある一方で，0.3Hz付近ではWAMは過大評価しているのに加え，0.08Hz付近ピークを過小評価している。

7月15日になるとWAMではうねり成分が大幅に低下しているのに対し，現地観測では高周波数側のみがさらに低下し，低周波数成分のエネルギーは保持されている。この時の台風の位置は紀伊半島の南，鹿島港とすると南南西の位置にある。つまり，鹿島港は犬吠崎の遮蔽を受けることになるため，犬吠崎付近の地形による屈折，回折の影響が鹿島港では発生しており，現地観測では屈折，回折の影響を受けやすい低周波成分のエネルギーが維持されているのに対し，高周波成分のエネルギーが減少したと考えられる。

図-11は7月15日のWAMによる周期分布と地形図である。周期分布より犬吠崎の南側では10秒程度であるのに対し，犬吠崎の遮蔽を受ける鹿島港などにおいては周期が大幅に低下し6秒程度になっていることが分かる。これは，スペクトルからも明らかであるように，低周波数側の過小評価，高周波数側の過大評価が影響している。

また，この期間中のNOWPHAS鹿島の波向きは一律でESEであった。これは，犬吠崎の遮蔽の影響に加えて，台風の位置によっては海岸線に平行に入射した0.08Hz付近のうねり成分が，海底地形の影響を受けて屈折している影響もあると考えられる。

図-11の周期分布図中の矢印は波向きであるが，犬吠崎の背面に回りこむ波が存在しており，WAMの数値拡散による影響は評価できていないと考えられる。しかし，地形図との比較よりWAMの地形解像度が十分とはいえないこと，深海モデルを用いていることが課題であると示唆される。

(3) 検証結果

以上の検討より，WAMの推算精度が低下しているいずれのケースにおいても高周波側を過大評価していた。この過大評価をしているエネルギーは，高波浪時のエネルギーと比較すると相対的にエネルギーが小さいため精度への影響は小さいと考えられるが，全体エネルギーが小さい低波浪時には，その影響は大きく，精度低下

の要因となっていることが確認された。したがって，高周波数側の推算精度の向上を図ることが低波浪時における推算精度向上には重要であるといえる。

第3世代波浪推算モデルでは海上風外力項 S_{in} ，砕波散逸項 S_{ds} ，成分波間同士の非線形相互作用 S_{nl} の3つのソース項が平衡状態にあることが必要である。

$$S_{in} + S_{ds} + S_{nl} = 0 \quad (1)$$

そして，今回使用したWAMはいずれのソース項もデフォルトの値を用いているが，このソース項についての改良を進めることが精度向上になりえることが考えられる。すなわち，海上風から過剰にエネルギーを授与している，エネルギー散逸が不足しているなどが考えられる。

しかし，直江津の12月25日17時，鹿島の7月9日0時の高周波側のスペクトル形状は風による発達を再現しており，今回の現象については S_{in} を改善する必要はないと判断する。また，鹿島の6月16日6時～9時の検証から，現地では一時的に発生したエネルギーが S_{nl} の効果により低周波数側へ移動することなく，消散していると考えられるため，この現象の予測精度向上には S_{ds} の改善が必要であることが示唆される。

その一方で，短波重力波領域の検討ではスペクトル形状が改善を目的として S_{ds} に非線形散逸を導入した事例もあるが， S_{nl} の役割について重要であることを示している⁹⁾。 S_{nl} の厳密計算は膨大な時間が必要となるが，計算時間短縮を図れる高精度計算手法も提案されており，その手法を用いた S_{nl} の検証においても， S_{nl} の役割の重要性が示されている^{10), 11)}。

本研究ではWAMを海上工事における波浪予測として用いることが目的であるため，計算時間が非常に重要な要素となる。したがって，上記の研究を参考にしつつ精度向上に向けた取り組みを行い，実務的に有用な改善に取り組む必要がある。

5. まとめ

日本海側，太平洋側のそれぞれの現地観測との比較から，WAMは低波浪時に推算精度を低下させる要因は，高周波数領域におけるエネルギーの過大評価であることが確認された。その一方で，太平洋側の観測との比較から，低波浪時のうねり成分の推算精度が良好であることが結果として得られた。つまり，高周波成分の推算精度を向上させることで，日本海側はもちろん，太平洋側を含めた日本周辺全域で，うねり成分から高周波成分までスペクトル形状が一致する予測結果が得られる波浪推算モデルとなる。

鹿島港の検討からは地形解像度の不足，海底地形評価

の必要性などの課題も示唆された。これらの課題を改善することで実務的で高性能な波浪推算モデルの開発を進める予定である。

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, 猪股勉, 関克己, 藤木峻: 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2013), 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
- 2) 江口一平, 岡田弘三, 中田琢志, 内田洋平, 窪田和彦, 宇都宮 好博: 沿岸気象海象情報配信システムの高度化, pp.61-66, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 2014.
- 3) 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.
- 4) 琴浦毅, 森屋陽一, 関本恒浩: 波浪推算の計算領域が海上作業可否の判定精度に及ぼす影響, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp.I_880-I_885, 2011.
- 5) 琴浦毅, 森屋陽一, 関本恒浩: 瀬戸内海における波浪推算モデルを用いた海上作業可否の判定精度, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 68, No. 2, pp.I_959-I_964, 2012.
- 6) 琴浦毅, 片山裕之: リーフ地形周辺の海上作業可否に着目した波浪予測モデルの検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp.I_215-I_220, 2015.
- 7) 泉宮尊司, 小林雄一, 石橋邦彦, 関本恒浩, 高橋研也, 若松 厚, 石垣 順, 井上俊二, 干渉合成法を用いた長周期波の伝播・反射特性の解明および水位予測, 海岸工学論文集, 第 66 巻(1), pp. 176-180, 2010.
- 8) 川口浩二, 橋本典明, 杉本彰: 内湾域における波浪推算精度向上を目的とした第三世代波浪推算モデル WAM の改良, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.I_191-I_195, 2003.
- 9) 橋本典明, 山城賢, 横田雅紀, 児玉充由: 有限新水域における海洋波の非線形エネルギー輸送に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2 p. I_131-I_135, 2013.
- 10) 田村 仁, 早稲田卓爾, 宮澤泰正: 風波スペクトルの平衡領域における非線形相互作用の役割, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No. 2 p. I_121-I_125, 2013.
- 11) 田村 仁, William M. DRENNAN, Erik SAHLEE, Hans C. GRABER: 短波重力波領域におけるスペクトル形状とソースバランス, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 70, No. 2 p. I_111-I_115, 2014.

(2016.2.4 受付)

INVESTIGATION ON FACTORS AFFECTING ACCURACY OF WAM PREDICTION UNDER MILD WAVE CLIMATE

Tsuyoshi KOTOURA and Hitoshi TANAKA

For maritime constructions, it is highly important to obtain reliable wave predictions for safety operation and work executable judgment. Advanced wave prediction method based on WAM model has recently been utilized in many marine construction sites. However, accuracy of the wave prediction under mild wave climate is not clear. This study investigates accuracy reduction factors of the WAM model based on the comparison between hindcast calculation and field data, with special reference to low wave condition. From this comparison, it is found that spectra obtained from the WAM model gives overestimation at high frequency region (0.3-0.4Hz), which might be induced by overestimation of wave height and also by underestimation of wave period in this region. Thus model improvement is required for high-frequency waves in order to increase prediction accuracy for lower waves.