

# 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

琴浦 毅<sup>1</sup>・森屋 陽一<sup>2</sup>・関本 恒浩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設株式会社 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

<sup>2</sup>E-mail: Yoichi.Moriya@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Tsunehiro.Sekimoto@mail.penta-ocean.co.jp

海上作業を伴う海洋工事では、高度化されつつある気象モデル、波浪推算モデルを用いた予測結果が作業可否判断に利用され始めている。しかし、波浪推算モデルの推算精度に関しては、外洋部での高波浪に着目して検討されたものが多く、海上作業の可否判断である波高1m程度の精度の検討は多くない。また、瀬戸内海は多くの島嶼が存在し、波周期が短いことから高精度モデルでの検討が望まれるが、高精度モデルは計算時間が多くかかり、作業可否判断予測に活用するには実務的とは言えない。

本研究では瀬戸内海を対象として、気象庁GPV海上風データを入力とし、波浪推算モデルとしてWAMモデルを用いた波浪予測を実施するとともに、海上作業可否に着目して風・波浪の予測精度を検討し、実務的に妥当な予測精度を得るために必要な条件を明らかにした。

**Key Words :** Wave prediction accuracy, WAM model, marine works, Seto Inland Sea

## 1. はじめに

海上作業を伴う海洋工事では、波や風などの気象条件が作業の可否判断に大きく影響することから、波浪観測網の整備やその活用が行われてきた<sup>1)</sup>。また、近年では計算機の性能向上や計算手法の高度化などが著しく、観測値と波浪予測値を同化することで予測精度の向上を図れる波浪推算システムや、短周期波ばかりでなく潮流や長周期波の予測システムなども構築されている<sup>2)~4)</sup>。

しかし、波浪推算モデルの推算精度に関しては、日本近海で発生する気象擾乱に起因する高波浪に着目して検討されたものが多く、海上工事の施工可否に着目した波高1m程度以下の波浪の予測精度に関して検討された例は少ない<sup>5)6)</sup>。

また、瀬戸内海は多くの島嶼が存在する地形条件に加え、波周期が短いことから詳細な地形を用いた気象モデルおよび高周波側に拡張し方向分割数を増加させた波浪推算モデルを用いた長期間の波浪検討が行われている<sup>7)</sup>。しかし、高精度モデルは計算時間が多くかかるため、予測データのリアルタイム性が低下することから、作業可否判断予測に活用するには実務的とは言えない。そのため、簡易な手法を用いて台風来襲時の瀬戸内海の風を

高精度に算定する手法が検討されているが<sup>9)</sup>、作業可否判断に影響する波高1m程度の波浪についての検討はなされていない。

そこで、本研究では瀬戸内海を対象として、実務的に妥当な波浪予測精度を得るために必要な条件を明らかにすることを目的に、気象庁GPV海上風データを入力とし、波浪推算モデルとしてWAMモデルを用いた波浪予測を実施し、海上作業可否に着目して風・波浪の予測精度を検討した。

## 2. 波浪予測方法の概要

### (1) 波浪予測モデル

波浪推算モデルとしてはWAMモデルを用い、モデルのパラメータを表-1, 2, 解析領域を図-1, 2に示した。case1は既往の検討<sup>6)</sup>による計算条件に等しく、太平洋領域XLを計算し、日本近海の計算領域LLに接続するネスティングを行った。この既往の手法における瀬戸内海領域の予測値は領域LLの結果から算出した。なお、予備検討により、瀬戸内海の波高は外海からの伝播波の影響は小さく、領域内における発生波が支配的であるこ

表-1 WAMモデルのパラメータの設定

領域	XL	LL	MM
計算領域 (北緯)	-70° ~ 60°	20° ~ 50°	32.69° ~ 34.85°
計算領域 (東経)	117° ~ 295°	120° ~ 150°	130.92° ~ 135.48°
最小周波数	0.042Hz		
周波数分割数	35		35, 42
方向分割数	16		16, 36
水深条件	深海		
空間間隔	0.5°	0.1°	0.03°, 0.01°
伝播計算時間刻み	900s	300s	120s, 40s
風データ時間間隔	3600s		

表-2 検討ケース一覧

	計算領域	瀬戸内海格子	風データ	方向分割数	周波数		
					分割数	上限値	
case1	XL, LL	10km	GSMgl.jp	16	35	1.157Hz	
case2-1	MM	3km	GSMjp	16	35	1.157Hz	
case2-2					42	2.255Hz	
case2-3					36	35	1.157Hz
case2-4						42	2.255Hz
case3-1			MSM	36	16	35	1.157Hz
case3-2						42	2.255Hz
case3-3					36	35	1.157Hz
case3-4						42	2.255Hz
case4-1	1km	16	GSMjp	35	1.157Hz		
case4-2			MSM				

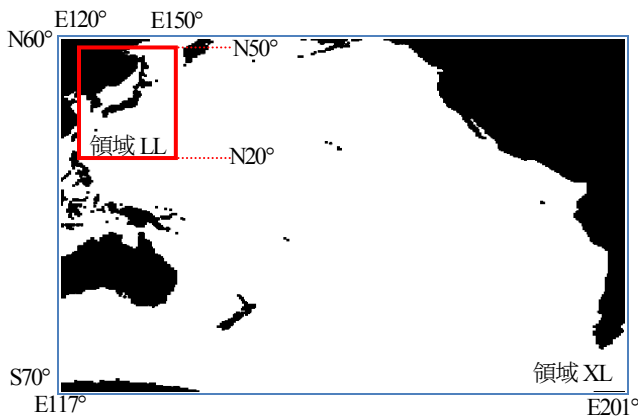


図-1 XL, LL 計算領域図



図-2 MM 計算領域図(3km 格子)

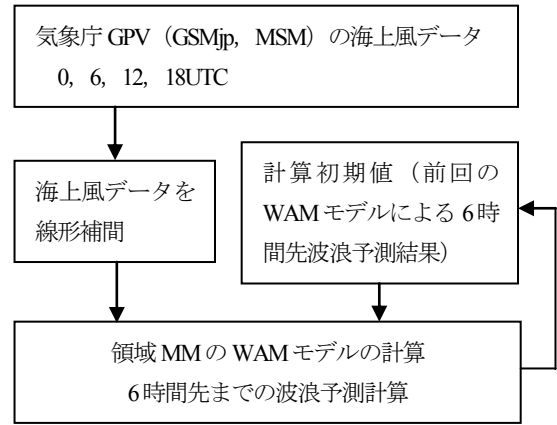


図-3 データ入力から予測までのフロー(case2~4)

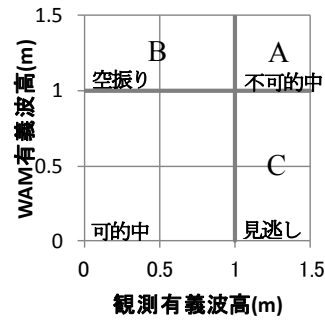


図-4 有義波高 1m とした場合の予測・観測分割図

とを確認している。

case2~4 は瀬戸内海領域のみを対象とし、計算格子サイズ(約 3km, 1km), 海上風データ(GSMjp(20km 格子), MSM(5km 格子)を計算格子サイズに補間), 周波数分割数・上限値(35 分割・1.157Hz, 42 分割・2.255Hz), 方向分割数(16 分割, 36 分割)を変化させた波浪推算を図-3 のフロー図に従い実施した。また、これらの検討条件を表-2 に整理した。

これらの結果を瀬戸内海周辺の観測地点(図-2 の 苅田, 神戸, 江井ヶ島, 引田)の 2010 年観測値で比較検討を行うとともに、海上作業可否判断への適用性を検討するために、2010 年に施工した高松港の実施工可否状況と予測値の比較を行った。

(2) 作業可否基準と的中率の判定

作業可否の基準波高は、既往の研究<sup>5)6)</sup>と同様に波高 1m とした。瀬戸内海では波高 1m を超える事象は稀であると考えられるが、その事象をいかに的確に予測できているかを検証するために、的中率はスレットスコアで評価することとした。

スレットスコアは発生することが少ないが、発生を予測することが意味の大きい現象の予測を評価するための手法であり、予測波高、観測波高の相関図である図-4 に示す事象領域内の個数を用い、式(1)で求められる。

$$\text{スレットスコア} = A / (A + B + C) \quad (1)$$

スレットスコアが 1 に近いほど予測精度が高いことを意味する。

### 3. 現状モデルの精度検証

#### (1) 苅田の比較検討

図-5は苅田の観測値とGPV風速, 風向, 推算波高の比較である。

最大風速値, 強風時の立ち上がりなどの時系列についてはMSMの方が観測値との対応は良く, GSMjipは最大風速を過小評価している。これは, 計算手法の相違に加え, MSMの方が計算格子が細かいことで地形の効果を的確に評価できているためと考えられる。風向は平穏時に精度が悪い時があるものの, 強風時の風向はGSMjip, MSMともに概ね観測値に対応している。

case1の波高は平穏時でも西寄りの風の時に波高を過大評価することが多いのに対し, 同じGSMjipを用いたcase2は平穏時でも対応が良いことから苅田周辺の検討は3km格子以下の地形解像度が必要であると考えられる。

case2, 3では平穏時の波高に有意な差は無いものの, 高波浪時はcase3の方が再現性が良く, 4/26の高波浪時は再現性に明確な差が生じている。これは, 波浪推算に用いている風データの精度が波高の精度にも影響していると考えられ, WAMに用いる風データは, 強風時の風速を精度良く予測できる詳細な気象モデルの利用が必要であると考えられる。

case4-1は高波浪時に波高を過小評価するなどcase2と同様の傾向となっている。また, case4-2はcase3と比較しても高波浪時の精度が良いなどの傾向は一致している。つまり, 苅田における波浪推算においては格子サイズ1kmと3kmでは有意な差が無いと言える。

周波数分割数の比較については, 高波浪時に顕著な差は生じていない。橋本ら<sup>9)</sup>は風が弱く低波浪時の推算においては高周波数帯を適切に拡張することの必要性を示している。しかし, 本研究のように作業可否判断の基準である1m程度の波高を対象とする場合には高周波数帯の拡張は必ずしも必要ではないと考えられる。

方向分割数の比較については有意な差が生じなかった。これは, 苅田の東側は島嶼が少なく海域が広いこと, 地形による遮蔽などの影響が発生しにくいことであると考えられる。つまり, 苅田を対象とする場合には方向分割数は16分割で実務的な精度を有していると判断できる。

しかし, 4/22, 5/23はMSMの風が観測値と良好な対応をしているものの, 細格子波浪計算であるcase4-2でも波高を過小評価している。この時の気象擾乱は, 風速が急激に増大した点が他の気象擾乱時と異なる。短時間の間に風速が急激に増加したために波浪発達を追従できなかったこと, また, 強風の持続時間が短く短時間で風速が低下したためWAMでの波浪が十分に発達する時間が無かったこと, などが結果的に波高を過小評価した要因であると考えられる。海上作業においてはこのような急激

に変化する海象条件を予測することが重要となるが, 高精度の気象計算を実施したとしても, 現状のWAMを用いた予測では急激な風速の変化時の波高予測精度に課題があることが示唆される。

#### (2) 引田の比較検討

図-6は引田の観測値とGPV風速, 風向, 推算波高の比較である。GPV風速は観測値と比較して過大評価していることが多い。これは観測値が陸上地形の影響を受けていることが要因と考えられるが, 強風時の発生時期, 風向などは概ね対応していると言える。また, GPV風速同士の間ではMSMの方が大きい風速値を示している。

case1の波高は10/30の北寄りの強風時の高波浪来襲時には過小評価傾向であるものの, 11/9の西寄りの強風時の高波浪来襲時には過大評価している。これは, 現地では西寄りの高波浪来襲時に北西部の半島(2km程度)の遮蔽を受けて波高が低下するものの, 10km格子であるcase1ではその半島の遮蔽を評価できないため, 波高を過大評価していると考えられる(図-7参照)。

case2では11/9の高波浪を過大評価しており, その波高値はcase1より多少小さい程度であり顕著な精度向上はみられない。その一方でcase4-1の北寄りの高波浪時はcase2と同様に過小評価傾向であるが, 11/9の高波浪時はcase2と比較して良い対応を示す。これは地形解像度がcase1の10倍, case2の3倍高解像度であるため, 半島の遮蔽を評価できていることが要因であると考えられる。つまり, 引田において地形の影響を評価するには格子サイズ3kmでは地形解像度が不十分であると言える。

case3では北寄りの強風時の波高の対応は良いものの, 西寄りの強風時には波高を過大評価していることから, case2と同様に格子解像度が不十分であると考えられる。case4-2は北寄りの高波浪時の精度が良く, 西寄りの高波浪である11/9の高波浪時も概ね観測値と対応している。この結果はcase4-1と同様であり, 引田では1km程度以下の計算格子が必要であると言える。

また, 苅田と同様に, 方向分割数, 高周波数側の拡張が高波浪時の波高精度に有意な相違を生じることは無い。しかし, 引田では格子サイズは1kmと3kmでは西寄りの強風時に顕著な差が発生した。また, 苅田と同様にMSMの方が高波浪時の推算精度が高いことから, 風データは強風時の風速を精度良く予測できる詳細な気象モデルの利用が必要であると考えられる。

#### (3) 現状モデルの課題整理

苅田, 引田における検討から, それぞれの地点で施工可否判断波高1mを予測するのに実務的な予測精度を有する計算条件を表-3に整理した。ここで, 苅田は周辺地形に比較的影響されにくい沖合い地点, 引田は周辺地形

に比較的影響される沿岸地点とみなしている。

いずれの地点でも風データはMSMで実務的な推算精度を有することが確認されたため、気象モデルとしては5km格子以下であれば良いと考えられる。また、波浪推算モデルにおいては方向分割数、周波数分割数は高精度である必要はないものの、計算格子サイズは周辺地形に影響されない波向きであれば3km格子が良いが、周辺地形を考慮する必要がある波向きの場合にはより高解像度格子(1km以下)が望まれる。

しかし、格子サイズが3倍になると、格子数が9倍、タイムステップが3倍となるため、30倍程度の計算時間が必要となる。高精度格子の計算が必要な波向きは限られていることを考慮すると、3km格子の計算結果を簡易的な手法を用いて精度向上させることが実務的には有効な手段であると考えられる。

#### 4. 簡易モデルを用いた検証

##### (1) 簡易モデルの概要

周辺地形を考慮するべき沿岸地域の予測においては、3km格子の沖側近接点の結果を沖波条件としたエネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算を行い、3km格子以下の地形の遮蔽の効果を考慮することとする。図-7は引田周辺地形の3km, 1km, 20m格子の比較であり、20m格子であれば十分に地形を考慮できることが確認できる。

実務的な予測システムにおいては、観測値、推算値を考慮して周期4秒を代表周期としたエネルギー平衡方程式(格子サイズ20m,  $S_{max}10$ )を用いて、沖波の波向き毎に当該地点の波高比データベースを作成し、3km格子の推算結果をそのデータベースを用いて換算することで計算負荷は3km格子計算と同程度になる。

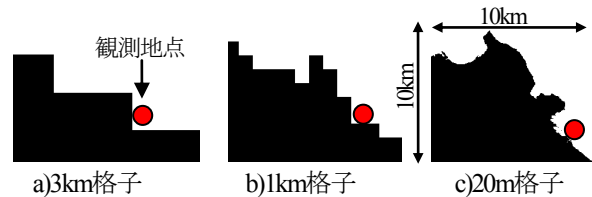


図-7 引田周辺の地形図

表-3 実務的な予測精度を有する計算条件

項目	荇田	引田
説明	沖合い地点	沿岸地点
海上風	MSM	
気象格子サイズ	5km	
波向き分割数	16	
周波数分割数	35	
波浪格子サイズ	3km	1km or 3km (波向きによる)

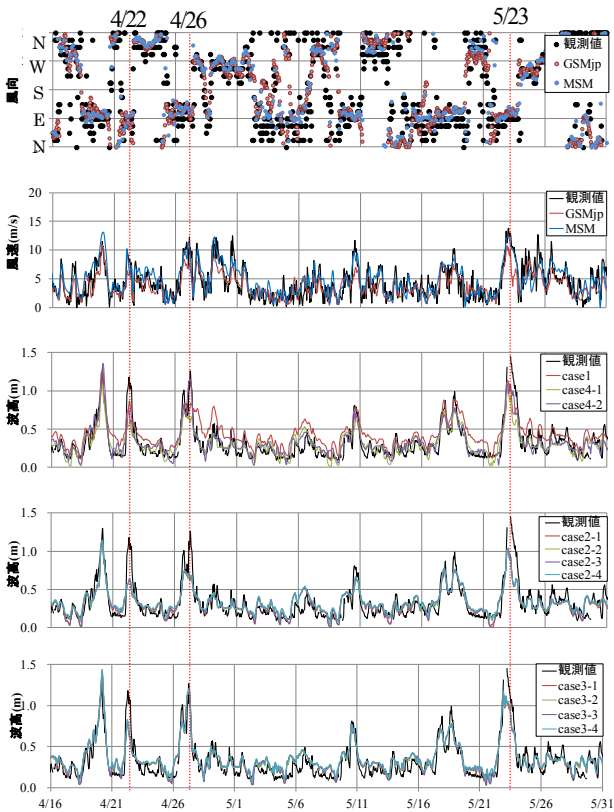


図-5 風速・波高時系列比較図  
(荇田 2010年4月～5月)

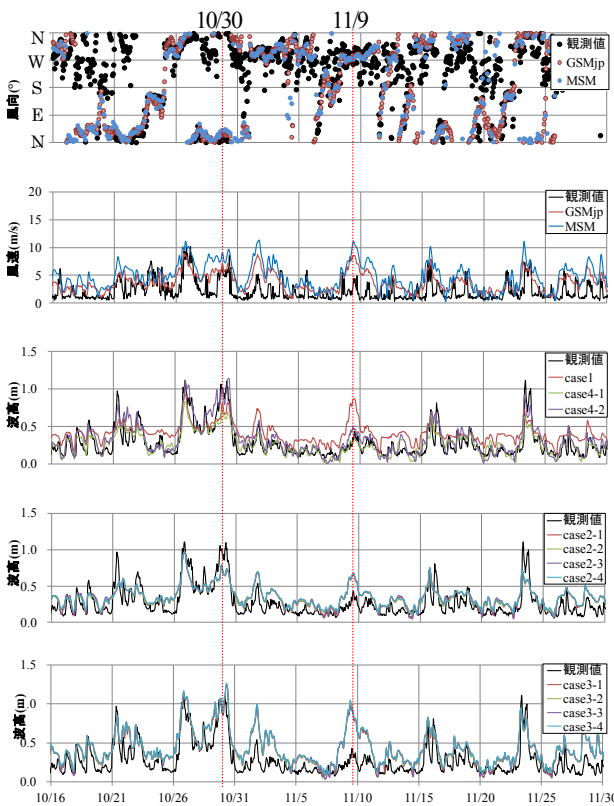


図-6 風速・波高時系列比較図  
(引田 2010年10月～11月)

(2) 簡易モデルの比較検討

図-8は引田とほぼ対岸に位置する江井ヶ島における観測値, case3-1, case3-1の結果を簡易モデルにより換算したcase3-1', case4-2の波高の比較である。

引田の11/9の強風時の波高をcase3-1では過大評価しているが, 簡易モデルを用いたcase3-1' は case4-2と同程度の波高レベルとなっており, 精度向上していることが確認できる。図-9の相関図からも, 簡易モデルを用いることで顕著な精度向上効果を有することが確認された。

江井ヶ島ではそれぞれのモデル間に大きな差は無い。これは江井ヶ島は南西側が開けた地形であり, ここに西寄りの強風により発達した波浪が来襲したことで地形の遮蔽などの影響が出なかったためである。

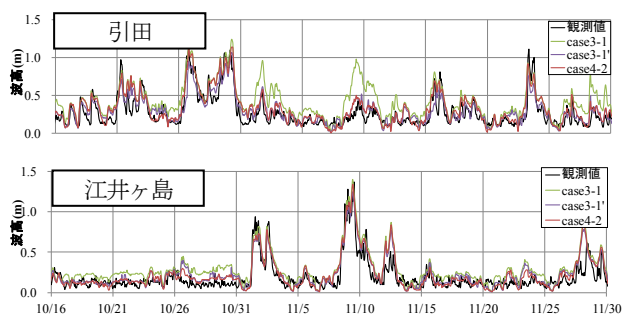


図-8 簡易手法による波高時系列比較図 (引田, 江井ヶ島 2010年10月~11月)

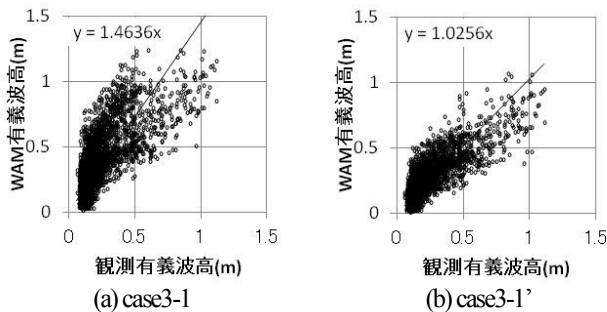


図-9 波高相関図(引田)

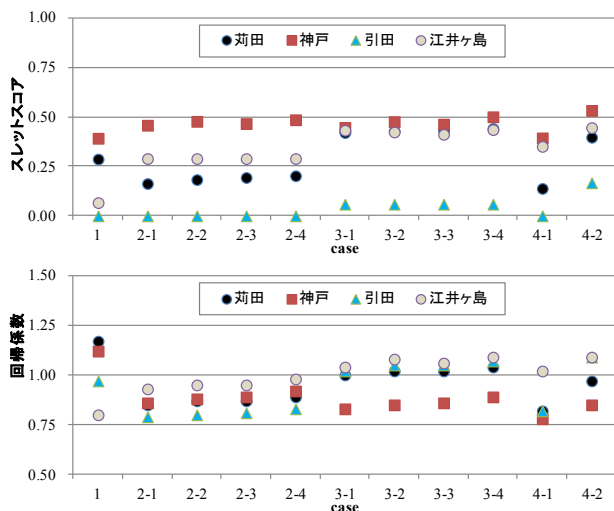


図-10 地点別スレットスコアと回帰係数

図-10は観測地点毎のスレットスコア, 観測・予測波高相関図の回帰係数を整理したグラフであり, 引田, 江井ヶ島のcase1~3については簡易モデルを用いた値となっている。これによると, 精度が最も高いのは高解像度計算をしているcase4-2であるが, case3はこれと同程度の精度を有しており, 簡易モデルの有効性が確認された。

しかし, スレットスコアは0.5程度以下となっており, 実務で活用するには十分な精度を有しているとは言い難い。風データはMSMを用いることで概ね良好な精度が得られることから, WAMにおける推算に課題が示唆される。これまでのWAMは超強風下に注目されて精度検証されされてきたため, 波高1m程度の条件への適用性は明らかではない。本研究では既往の検討<sup>9)</sup>を参考にしして波へのエネルギー輸送項にWuのモデルを用いているが, 更なる精度向上には輸送項を再検討するなどの必要があると考えられる。

5. 実務への適用

高松港の岸壁築造工事を例に, 有義波高 1.0m を作業可否の基準として, 実際の不稼働日の風速・波高について簡易モデルを用いて検討した。なお, 検討対象期間は岸壁築造工事が行われていた 2010年11月1日から2010年12月11日までの約1カ月間とした。

図-11は風速と case2-1, case3-1, case4-2の波高の時系列であり, 不稼働日(11/9, 12/3)を合わせて示している。

風速は平常時, 強風時ともに GSMjip, MSM に有意な差は無く, 不稼働日においてはともに 10m/s を上回っている。通常の工事では平均風速 10m/s を上回ると作業中止となるため, いずれの風データを用いたとしても作業中止の判断が可能となる。

一方, 波高値は GSMjip を用いた case2-1 は 1m に満たない波高であるが, MSM を用いた case3-1, case4-2 は 1m 程度の波高となっている。したがって, 波高を用いて不稼働を判断する場合, MSM を用いた波高の方が現地状況に近いと言える。

ただし, 収集したデータからは実際の不稼働日は2回しかなく, より多くの不稼働状況での検証が必要である。

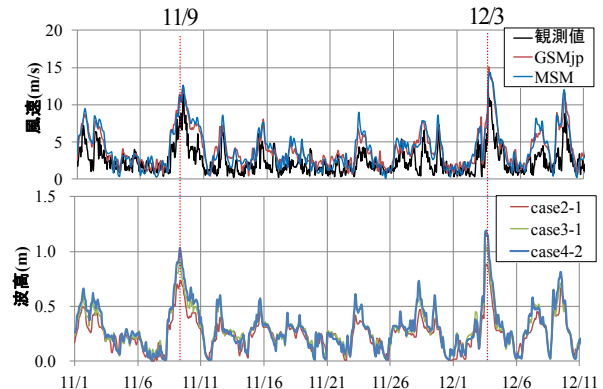


図-11 推算結果と実作業日との比較 (香川県高松港 2010年11月~12月)

## 6. おわりに

本研究により、得られた結論をまとめると以下となる。

① WAM モデルによる瀬戸内海の波浪予測精度は、入力風に格子サイズ 5km 程度の MSM を用いることで実測値と良好な対応をしたが、急激に風速が増大する気象条件では過小評価することがあった。

② 方向分割数の増加、高周波数側の拡張は、施工可否判断を判定する波高 1m 程度の波高推算精度に顕著な影響を及ぼさなかった。

③ WAM モデルの計算格子は 3km 格子では波向きによっては地形解像度不足になる可能性があるものの、エネルギー平衡方程式による波高比を活用した簡易モデルにより精度向上が望める。

④ このモデルと高松岸壁工事の不稼働日と比較したところ、MSM を用いたモデルであれば現地に近い状況を再現できたと考えられる。

以上より、瀬戸内海において海上作業の稼働を風・波高で判断する場合の検討条件を確認できた。しかし、MSM は最長 33 時間予測しかなく、1 週間先までの予測データがある GSMjp は風を過小評価することから、長期の予測が必要な場合にはメソ気象モデルの活用が必要となる。また、予測波高の精度向上には WAM のエネルギー輸送項を見直すなどの検討が今後の課題であると考えられる。なお、瀬戸内海は地形や時間帯によっては潮流が速くなることもあり、これらの影響についても今後の検討課題である。

**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波浪データは港湾技術研究所海象情報研究室、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室、国土交通省近畿地方整備局姫路河川国道事務所、香川県土木部に提供いただきました。ここに記して関係者に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 河合弘泰, 佐藤真, 川口浩二, 関克己: 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS2009), 港空研資料, No1226, 120p, 2010.
- 2) 江口一平, 松浦邦明, 松藤絵理子, 本橋昌志, 三嶋宣明, 岡田弘三: NOWPHAS 沿岸波浪観測値の沿岸波浪予報へのリアルタイム同化による予報精度の向上—沿岸気象海象情報配信システム(COMEINS)の高度化—, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.885-890, 2009.
- 3) 三村 正樹, 石本 真憲, 菊地 洋二, 宇都宮 好博: 「高知港長周期波予測システム」の構築について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp.161-165 2011.
- 4) 高橋吉弘, 森田真治, 木村誠, 柴木秀之, 高尾敏幸, 古泉統義: 松山港周辺海域の流況特性の解析と潮流予測システムの構築, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp.1691-1696, 2011.
- 5) 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.
- 6) 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.1880-1885, 2011.
- 7) 山口 正隆, 畑田 佳男, 大福 学, 野中 浩一, 日野 幹雄: SDP 風資料を用いた内湾・内海における波浪の長期推算システムの適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp.151-155 2010.
- 8) 橋本典明, 松本英雄, 川口浩二, 松本絵理子, 松浦邦明: 局地気象モデルと第三代波浪推算法による瀬戸内海を対象とした海象情報数値データベースの構築, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp.839-844, 2004.
- 9) 井上省吾, 西野博史, 関克己, 川口浩二, 河合弘泰: 局地気象モデルとの相関解析に基づく簡易で高精度な瀬戸内海の風場モデルの開発, 土木学会第 66 回年次学術講演会, pp.493-494, 2011.
- 10) 松永康司, 川内清光, 野村茂, 河合弘泰, 橋本典明: 局地気象モデルを導入した台風時の瀬戸内海の海上風・高潮・波浪の推算, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.301-302, 2008.

## EXAMINATION OF WAVE PREDICTION ACCURACY FOR MARINE WORKS IN SETO INLAND SEA

Tsuyoshi KOTOURA, Yoichi MORIYA and Tsunehiro SEKIMOTO

In marine works, it is important to get wave prediction results for safety operation and work executable judgment. Recently, the advanced wave prediction method using the WAM model has been utilized generally in marine works. However, the accuracy of the wave prediction results is not clear in marine work conditions.

In this study, from the comparison with the WAM model prediction results and the wave measurement results, we discuss the accuracy of the wave prediction results for marine works in the SETO Inland Sea. As a result, the optimum conditions for the WAM model prediction is clear.