

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

INFLUENCE OF CALCULATION AREA ON WAVE PREDICTION FOR MARINE WORKS IN THE PACIFIC OCEAN

琴浦毅¹・森屋陽一²・関本恒浩³
Tsuyoshi KOTOURA, Yoichi MORIYA and Tsunehiro SEKIMOTO

¹正会員 修(工) 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)
²正会員 博(工) 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)
³フェロー 博(工) 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)

In marine works, it is important to get the 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.

GPV wind data (GSMgl,GSMjp) from the Japan Meteorological Agency is inputted to the WAM model. The wave prediction results of some calculation areas in the Pacific Ocean are compared with the wave measurement results of NOWPHAS. The critical wave heights and periods for possible work condition are 1.0m and 7.0s in marine works. The influence on wave prediction of calculation area is clear for marine works in the Pacific Ocean.

Key Words : Wave prediction accuracy, WAM model, marine works, The Pacific Ocean

1. はじめに

海上作業を伴う海洋工事では、波浪条件が作業の安全性や可否判断に大きく影響するため、波浪観測網の整備やその活用が行われてきた¹⁾。また、高度化されつつある波浪推算モデルも作業可否判断に利用され始めつつあり、波浪推算結果をリアルタイムに配信するシステムも構築されている²⁾。

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て波高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³⁾。また、近年では現地観測値と波浪予測値を同化することで、波浪観測が行われていない地点に関しても、平常時も含めた予測精度の向上を図る取り組みがなされている⁴⁾。しかし、観測値が欠測するなどの事態を想定すると、モデル自体の精度向上を図るべきなのも疑いようがない事実である。

また、太平洋沿岸では遠方からのうねりが頻繁に来襲する海象条件であるため、可能な限り計算領域を広げることが望まれるが、計算領域の拡大は計算負荷の増加にもつながることなどから、予測システムや長期波浪データベース作成においても太平洋側

の計算領域について検討が十分になされていない⁵⁾~⁷⁾。一方、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、これからは計算領域を拡大した計算も実務的に可能になることが予想される。

そこで、本研究では、太平洋の計算領域に着目して、6時間毎の気象庁GPV (GSM全球, GSM日本域)の海上風データを入力としたWAMモデル⁸⁾を用いた波浪推算を実施し、GPS波浪計, NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網)の観測結果と比較することで、波浪の予測精度を明確にすることを目的とした。また、常陸那珂港での実際のケーソン据付工事の作業実施状況と波浪予測結果を比較し、波浪予測の作業可否判断への適用の可能性を検討した。

2. 波浪予測方法の概要

波浪推算モデルとしてはWAMモデルを用い、モデルの各パラメータを表-1、解析領域を図-1, 2に示した。解析は0.5°格子の気象庁GPV (GSM全球)の海上風データをWAMモデルの入力条件とし太平洋領域を計算し、約20km格子の気象庁GPV (GSM日本域)海上風データを約10km格子に線形補間した計算領域①に接続した。ただし、今回の検討では太平洋の計

表-1 WAMモデルのパラメータの設定

領域番号	①	②	③	④	⑤
計算領域 (北緯)	20° ~ 50°	0° ~ 60°	-40° ~ 60°	-70° ~ 60°	
計算領域 (東経)	120° ~ 150°	117° ~ 201°	117° ~ 295°		
最小周波数	0.042Hz				
周波数分割数	35				
方向分割数	16				
水深条件	深海				
空間間隔	0.1°	0.5°			
伝播計算時間刻み	300s	900s			
風データ時間間隔	3600s				

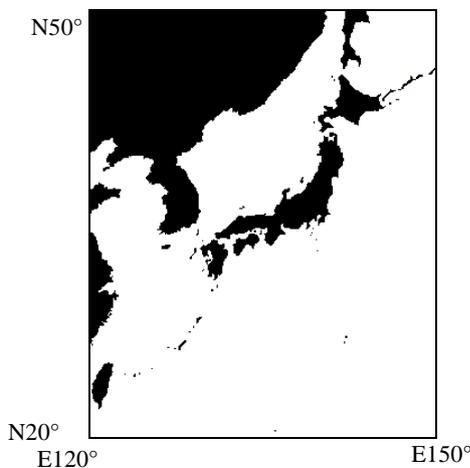


図-1 計算領域①領域図(10km格子)

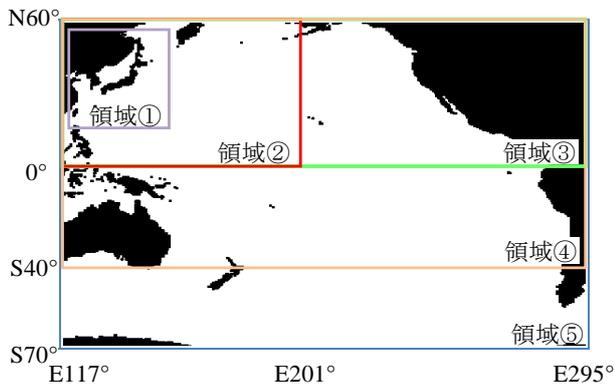


図-2 太平洋計算領域図(0.5° 格子)

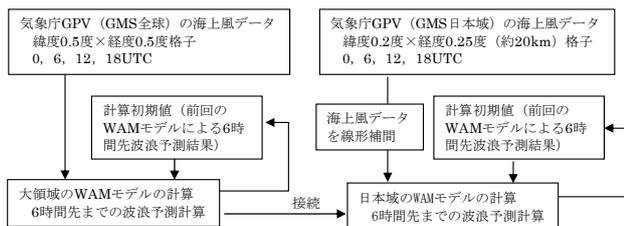


図-3 データ入力から予測までのフロー

表-2 検討対象地点とその整理番号

a	青森県東岸沖	e	宮城県北部沖	i	三重県沖
b	岩手県北部沖	f	宮城県中部沖	j	和歌山県沖
c	岩手県中部沖	g	福島県沖	k	高知県西部沖
d	岩手県南部沖	h	静岡県沖		

1	紋別(南)	9	石巻	17	御前崎
2	釧路	10	仙台新港	18	潮岬
3	十勝	11	相馬	19	室津
4	苫小牧	12	小名浜	20	高知
5	むつ小川原	13	常陸那珂	21	上川口
6	八戸	14	波浮	22	細島
7	久慈	15	下田	23	中城湾
8	釜石	16	清水		

算領域の相違による検証を行うために、太平洋の計算領域を4領域(領域②~領域⑤)設定した. このデータ入力から予測結果出力までのフローを図-3に示した. なお, 気象庁の全球波浪GPVは南緯75°までの範囲であるが, 球面座標系においては南緯70°~75°の専有面積が小さいこと, 経度の距離が小さくなるため時間刻みを小さくする必要があること, 領域⑤との比較から日本沿岸には有意な差は無いことを確認したことなどから, 最南端を領域⑤の南緯70°とした.

予測精度の検証は, 有義波高, 有義波周期および波向について, 表-2に示す太平洋側のGPS波浪計(2010年: 速報値)とナウファス波高計(2008年: 確定値)の観測値より行った.

3. 外洋の予測精度

(1) 領域別の時系列比較

外洋の代表的な地点として岩手県南部沖GPS波浪計の観測結果と予測結果の領域毎の比較を図-4に示している.

領域①を計算領域とした場合, 日本海側では良好な予測精度を有することを確認しているが³⁾, 岩手県南部沖では有義波高, 有義波周期とも観測値より過小評価している. これは, 日本海側の波浪は, この領域内で発生する気象擾乱に起因するため波浪が支配的であるのに対し, 太平洋側ではこの領域外から伝播する波が存在するためと考えられる.

領域②は北西太平洋に拡大した領域であり, 領域①と比較すると波高, 周期ともに精度が向上しており, 波高のみを対象とするのであればこの領域で十分であるといえる. しかし, 夏期の周期を見ると周期を過小評価していることから, この領域のさらに外からの波の伝播があることを示唆している.

領域③は北東太平洋領域に拡大した領域であるが, 領域②と比較して有意な差は認められない. このことから, 北東太平洋領域がわが国の太平洋側の波浪に及ぼす影響は小さいと考えられる.

領域④は南半球まで拡大した領域であり, この領

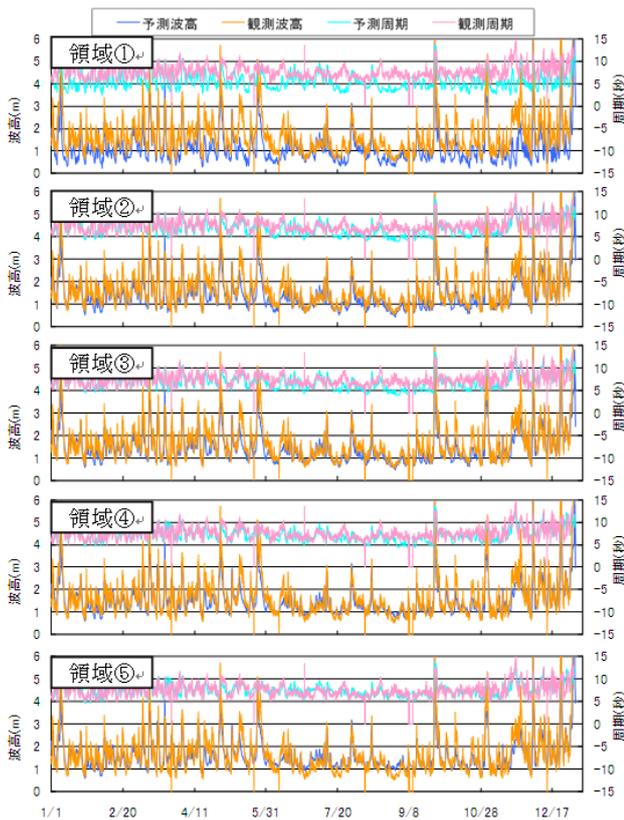


図-4 波高・周期時系列比較図
(GPS波浪計：岩手県南部沖(2010年))

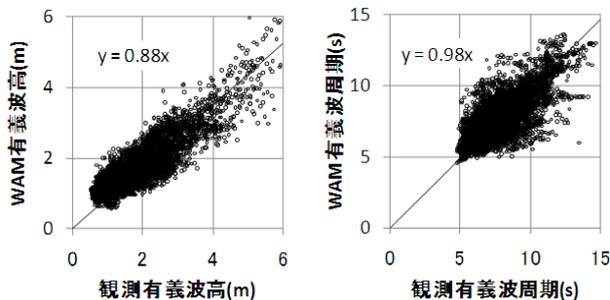


図-5 波高・周期相関図
(領域⑤, 岩手県南部沖)

域では夏期の周期予測精度の改善がみられる。また、南半球の南緯40°～70°の暴風域を含む領域⑤では周期については観測値と予測値がほぼ一致する結果が得られているものの、波高においては夏期に過大評価する傾向が認められる。これは、うねりの伝播計算に課題があることを示唆している。

(2) 領域別の相関比較

図-5に岩手県南部沖の有義波高、有義波周期の観測値と予測値の相関図を示した。観測値と予測値が一致すればその勾配(回帰係数)は1となるが、有義波高の回帰係数は0.87、有義波周期の回帰係数は0.98である。また、図-6、7に表-2のGPS波浪計の有義波高、有義波周期の回帰係数について領域毎に整理した。この図で領域①は全体的に0.8以下と過小評価であり、計算領域が広がるにつれて回帰係数

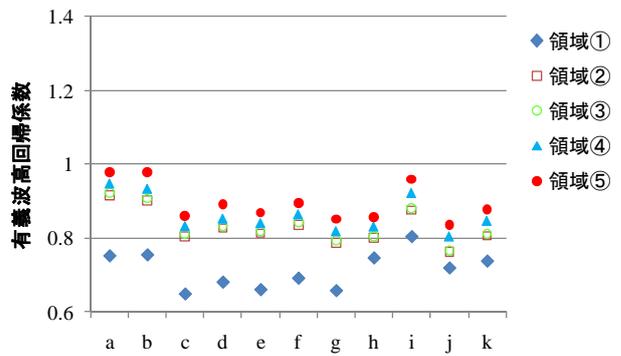


図-6 有義波高回帰係数

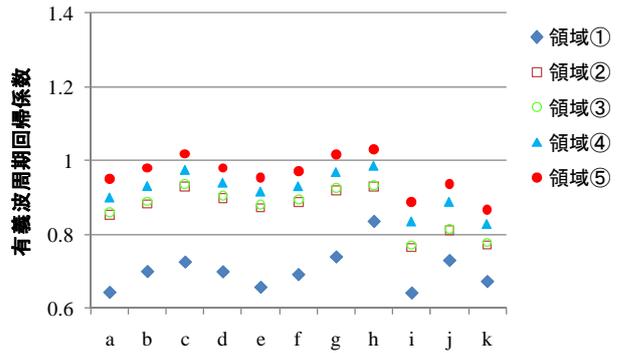


図-7 有義波周期回帰係数

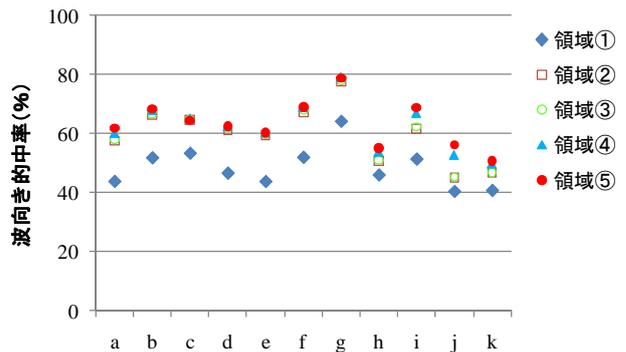


図-8 波向きの中率

が1.0に近づいている。また、領域②、③では顕著な相違が無く、このことから北東太平洋の影響は小さいと判断できる。領域④、⑤では特に周期で西日本の精度向上が顕著であることから、周期に関して領域②、③の南側領域の不足を示唆している。

また、図-8は観測値を基準に予測値が波向±22.5度の範囲内であれば中として算定した波向きの中率である。この図において領域②～⑤での中率が向上しているが、領域④、⑤では西日本で精度が一層向上していることから、西日本の波向きには南半球からのうねりが影響すると考えられる。

4. 沿岸域の予測精度

(1) 領域別の時系列比較

沿岸域の代表的な地点として常陸那珂(水深30.3m)の観測結果と予測結果の領域毎の比較を図-9

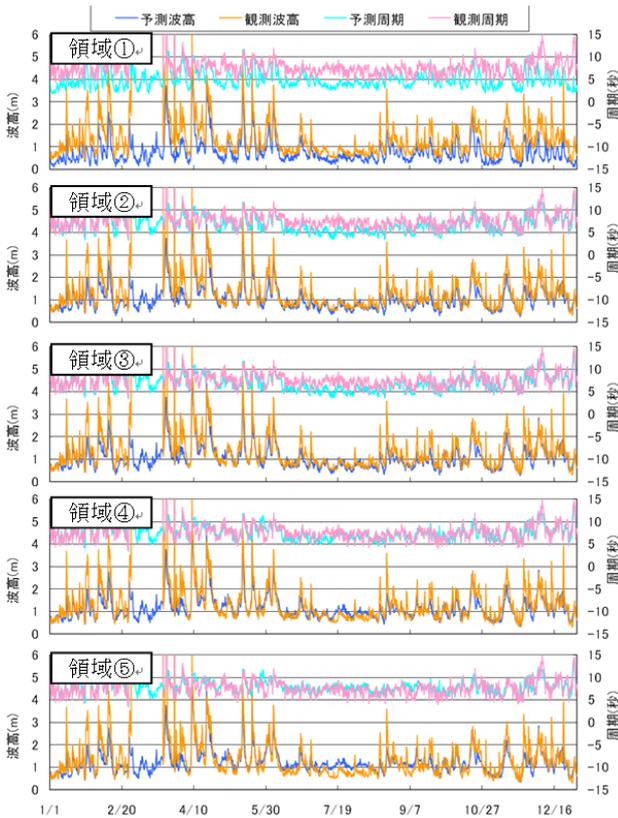


図-9 波高・周期時系列比較図
(ナウファス常陸那珂(2008年))

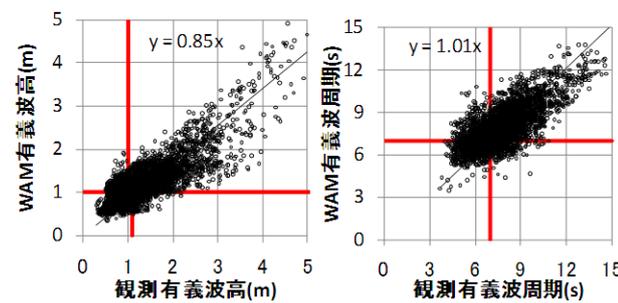


図-10 波高・周期相関図(領域⑤, 常陸那珂)

に示している。

領域①は有義波高, 有義波周期ともに観測値より過小評価しているのは岩手県南部沖GPS波浪計と同様であり, 計算領域が不十分であると考えられる。

領域②, ③では領域①と比較すると有義波高が改善し, 良好な一致がみられる。また, 有義波周期も精度の改善がみられるものの, 夏期の低波浪時期の周期が過小評価となっており, この地点でも南側の計算領域の不足が示唆される。

領域④, ⑤では夏期の有義波高が多少過大評価する傾向があるものの, 周期に関しては観測値と良く対応している。

(2) 領域別の相関比較

図-10は常陸那珂の有義波高, 有義波周期の観測値と予測値の相関図であり, 有義波高の回帰係数は0.85, 有義波周期の回帰係数は1.01と良く対応している。また, 図-11, 12は表-2のナウファス地点の

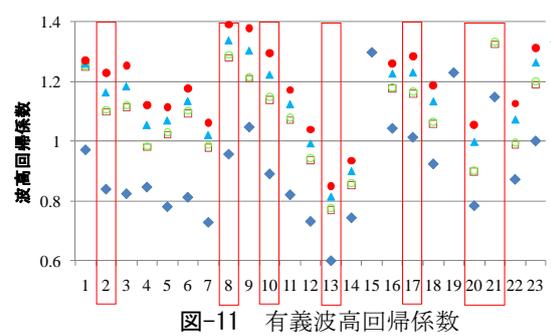


図-11 有義波高回帰係数

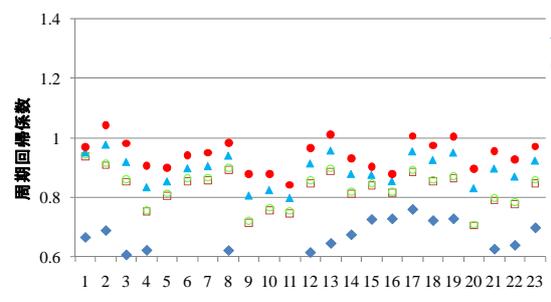


図-12 有義波周期回帰係数

有義波高, 有義波周期の回帰係数である。有義波高の回帰係数は領域の拡大につれて増加しているが, その値は地点によって1.0から大きく外れている。その一方で有義波周期の回帰係数は領域の拡大につれて増加し, 1.0に近づいている。

GPS波浪計では, 領域の拡大に伴い有義波高と有義波周期の回帰係数が1.0に近づき, 精度が向上したものの, 沿岸部では回帰係数の傾向は異なる。特に有義波高の回帰係数は釜石(No.8), 上川口(No.21)などで大きい。これは計算格子サイズ(約10km格子)がリアス式海岸などの複雑な地形についての再現性が不十分であることを示唆している。

また, これと同時に海底地形の影響が考えられる。日本海側では周期が短く, 水深波長比が大きいため, 海底地形の影響が小さいナウファス地点が多い。それに対し, たとえば, 常陸那珂で観測される平均的な有義波周期は8秒程度, 沖波波長は $L_0=99.84\text{m}$ となり, 波高計水深(30.3m)と水深波長比は0.30となることから観測値には海底地形の影響が含まれると考えられる。今回の予測計算では深海モデルのWAMを用いているため, 海底の影響を受けない結果が算出されたため, 有義波高の回帰係数に差異が出たと考えられる。

(3) 作業可否基準と誤差許容値

予測の的中率は作業可否の基準波高を1.0m, 7.0sとした場合, 図-13に示すように, 予測波高1.0m以下かつ観測波高1.1m以下は稼働中, 予測波高1.0mより大きくかつ観測波高1.0mより大きい場合は不稼働中となる。また, 周期については予測周期7.0s以下かつ観測周期7.0s以下は稼働中, 予測周期7.0sより大きくかつ観測周期7.0sより大きい場合は不稼働中となる。

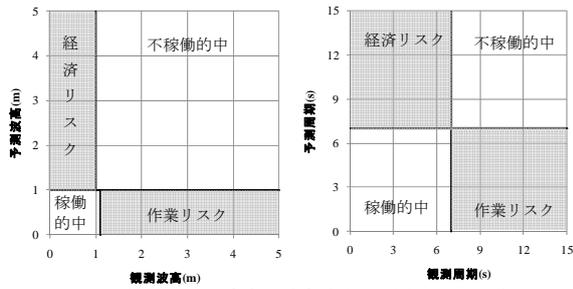


図-13 的の中率の定義 (波高許容誤差+10cm)

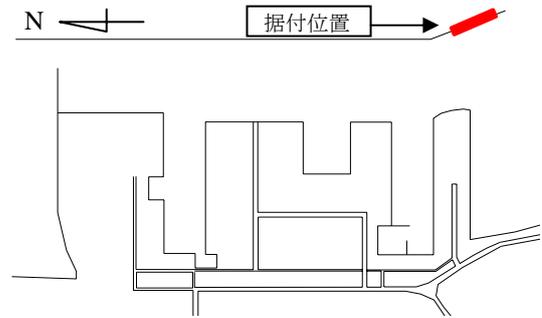


図-16 常陸那珂港の平面図とケーソン据付位置

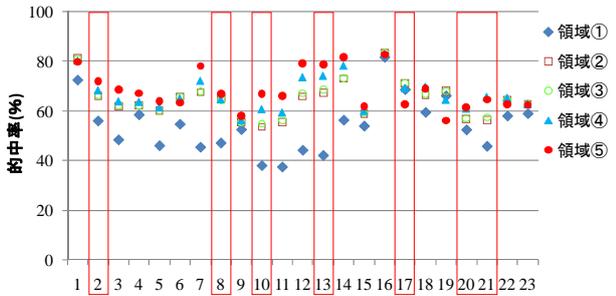


図-14 ナウファス地点の的の中率

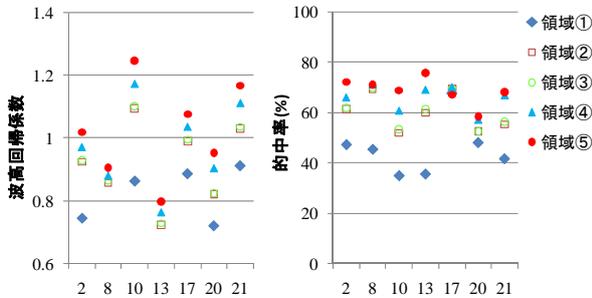


図-15 浅海域を考慮した波高回帰係数, 的の中率

また、予測値が基準値より大きく、観測値が基準値未満の場合は、作業ができる条件であるのに作業を中止することになるため、経済リスクとなり、逆に、予測値が基準値以下で観測値が基準値より大きい場合は、作業を行うという判断をしたのに、実際の波高は作業限界を超えているので、作業リスクとなる。

なお、データの整理は1時間毎に観測値と計算値を比較し、波高、周期のいずれもが基準値以下であった時を稼働可、いずれかが基準値を上回った場合を不稼働とし、的の中率は全データに対する的中データの比率で定義される。

(4) 稼働不稼働的中率

図-14に表-2のナウファス地点における稼働不稼働的の中率について整理した。前述したように計算には計算格子を下回る地形や海底地形の影響が波高に考慮されていない。そのため、波高に関しては経済リスクが増加して的中率が低下する。また、領域が狭いと周期を過小評価するため、周期作業リスクが増加して的中率が低下する。これらが総合的に影響した結果として、全体的には領域が広い方が的中率は高い。なお、西日本側は来襲する波浪周期が若干短く、周期NGの事例が少ないことが、領域②～⑤

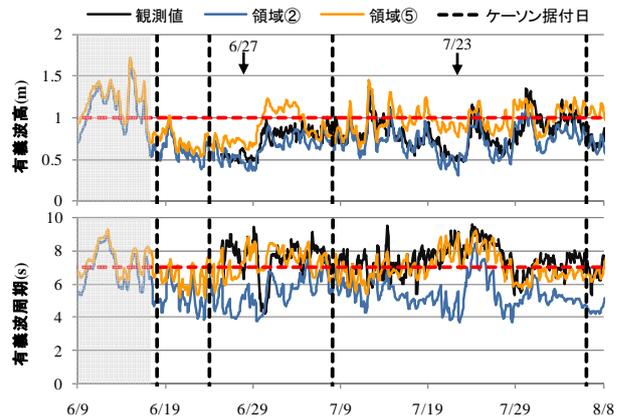


図-17 推算結果と実作業日との比較

に大きな差が出ない理由と考えられる。

(5) 浅海域の波浪変形の影響

図-11, 14において赤枠で囲った地点周辺の浅海域についてエネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算を行い、WAMの計算格子(0.1°格子)以下の地形の遮蔽や海底地形の効果を検討した波高回帰係数、的の中率を図-15に整理した。

波高回帰係数はほとんどの地点で1に近づき、図-11と比較すると精度が向上しており、これらの地点では浅海域の波浪変形の評価が不可欠であるといえる。その一方で、的の中率においては顕著な精度向上が確認できない。これは、太平洋側においては周期NGの港湾が多く、波高の精度の向上が的中率に影響しなかったためである。

5. 波浪予測の実務への適用

(1) 常陸那珂港ケーソン据付工事の概要

太平洋側の常陸那珂港のケーソン据付工事を例に、波高1.0m、周期7.0秒を作業可否の基準として、実際にケーソンを据え付けた日の海象条件と波浪予測結果との比較を行った。常陸那珂港の平面図とケーソン据付位置を図-16に示す。

検討対象期間はケーソン据付工事が行われていた2010年6月9日から2010年8月8日までの約2カ月間とした。

(2) 予測結果とケーソン据付期間の比較

図-17は領域②、⑤の有義波高と有義波周期について、浅海域の波浪変形を考慮した予測値、観測値の比較であり、実際のケーソン据付日(合計4日)もあわせて示している。

観測値において、有義波高は1.0mを下回る日が多いのに対し、有義波周期は7.0秒を上回る日が多く、作業可否は周期基準値が支配的である。

領域②の有義波高については観測値との対応は良いのに対し、有義波周期は高波浪時期を除いては5秒前後と過小評価しており、周期稼働可条件が多くなっている。ケーソン据付日は稼働可条件となり、的中しているといえるが、6月27日、7月23日では、観測値においては周期NGとなるのに対し、予測結果では作業可となり作業リスクとなっている。

領域⑤では高波浪期間の有義波高、有義波周期の予測精度は高いものの、周期が7.0秒を超える低波浪期間において有義波高を過大評価する傾向がみられ、波高稼働不可条件が観測値より多くなっている。その一方で、有義波周期については観測値と良く対応しており、周期稼働条件はほぼ対応している。また、ケーソン据付日で稼働可条件となり、6月27日、7月23日で周期NGとなるなど観測値と対応している。

(3) 計算領域の設定

これまでの検討から、波高値のみで稼働可否判定を行う場合は領域②で良いと考えられるが、周期を含めて作業可否を評価する場合は作業リスクが増大する可能性がある。したがって、周期を含めた稼働可否判定をする場合は領域⑤が領域②より適切であると判断できる。

領域②において領域外をソースとするうねりを入力できれば周期精度の向上が期待できるが、領域外の気象擾乱によるうねりを評価するのは困難であり、計算領域を広げる方が実務的であろう。領域⑤の夏期低波浪期間に波高を過大評価する傾向は、GPS波浪計においても確認されている。この要因は明確ではないが、南半球からのうねりが影響していることは明らかであり、非線形相互作用や数値分散などを検討し、波浪モデルの更なる高度化が必要である⁹⁾。

5. 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 気象庁 GPV (GSM 全球, 日本域) の海上風データを入力とした WAM モデルによる太平洋側の外洋の波浪予測精度は、計算領域を南半球まで広げることによって、波高、周期、波向きの精度向上が期待できる。
- ② 浅海域で地形の遮蔽と海底地形の影響を受けるような予測出力点の場合には、予測精度の及ぼす格子サイズと海底地形による波の変形の影響は大きく、

浅海域の波浪変形を評価することが期待される。

③ 常陸那珂港のケーソン据付工事を例に、波浪予測結果と据付日を比較したところ、稼働可条件と対応した。また、波高値のみで稼働可否判定を行う場合は領域②で良いが、周期を含めた稼働可否判定をする場合は領域⑤が領域②より適切である。

以上より、うねりの計算精度に課題はあるものの、太平洋沿岸において、海上作業の稼働を周期も含めて検討する場合、南半球の南緯 40° ~70° の暴風域を含んだ領域で検討することが望まれる。

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。五洋株式会社常陸那珂工事事務所の樋口慎一郎所長には、常陸那珂港のケーソン据付工事で施工の情報を提供していただきました。また、波浪予測結果の検証に利用したGPS波浪計、NOWPHASデータは港湾技術研究所海象情報研究室の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) 河合弘泰・佐藤真・川口浩二：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS2008)，港空研資料，No1209，93p，2010。
- 2) 辰巳賢一，安田誠宏，森信人，間瀬肇：リアルタイム気象・水象予測の Web 配信システムの開発，海洋開発論文集，第 25 巻，pp. 891-896，2009。
- 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) 水口幸司・大下善幸・室善一郎・高山知司・岡田弘三・宇都宮好博：「うねり性波浪」予測・監視モデルの可能性と的確性について，土木学会論文集B2(海岸工学) Vol. 66, No. 1, pp. 146-150, 2010
- 5) 小林智尚，佐々木博一，吉野純，安田孝志：ERA40 にもとづく日本列島周辺長期波浪データベースの構築：海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 141-145. 2007
- 6) 橋本典明，鈴木勝之，永井紀彦：ECMWF 風(Operational data, ERA15, ERA40)による長期波浪推算精度の検討，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 201-205, 2004
- 7) 山口正隆，大福学，畑田佳男，野中浩一，平塚敬樹：わが国周辺海域および沿岸における 2 種類の長期波浪資料の精度の比較，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 166-170, 2004
- 8) 橋本典明，川口浩二，真期俊行，永井紀彦：第 3 世代波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討，港湾技術研究所報告，第 38 巻，第 4 号，1999。
- 9) 橋本典明，川口浩二，鈴木勝之，山城賢，児玉充由：非線形相互作用の高精度化が波浪推算に及ぼす影響，土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. 65, No. 1, pp. 171-175, 2009