

WAVEWATCH III のカムインズ波浪予測への導入について

山本 浩之*・鈴木 善光*・吉永 泰祐**・高山 知司***
窪田 和彦****・宇都宮 好博****・内田 洋平****・畑 美菜代****

* (一財) 沿岸技術研究センター 波浪情報部

** (一財) 沿岸技術研究センター 審議役

*** (一財) 沿岸技術研究センター 沿岸防災技術研究所長

**** (一財) 日本気象協会事業本部防災ソリューション事業部

沿岸技術研究センターでは従来からカムインズの波浪予測はWAMベースのモデルを利用してきたが、これに替わって予測精度の高い WAVEWATCH III を平成 29 年度中途に導入することを計画している。平成 27 年度に WAVEWATCH III の波浪予測モデルとしての適用性について検討を開始し、現在はカムインズ波浪予測の本運用と並行して WAVEWATCH III による試験運用を行っている。本稿では、これまでの検討の結果と試験運用で明らかになった課題について説明するとともに、課題解決の方法についても紹介する。

キーワード：波浪予測モデル、波浪追算、波浪予測、予測精度向上

1. はじめに

現在カムインズで運用されている波浪予測モデルは、1988 年に開発されその後バージョンアップされていった WAM(Cycle4)をベースに改良を加えたモデルである。WAM モデルは、開発当時は最先端のものであったが、近年はヨーロッパ中期予報センター(以下、ECMWF と呼ぶ)が行っている WAM モデルの改良成果が公開されていない状況にある。また、カムインズによる波浪予測値の予測精度についても、台風や発達した低気圧に伴う「うねり性波浪」の波高を低く予測する傾向があることなど、モデル改善の必要性が高まっている。

この改善の具体化のために、平成 27 年度から沿岸技術研究センターでは、以下の二つのフェーズからなる開発計画を策定して実行している。

第 1 フェーズ：新たな波浪予測モデルとして注目されている WAVEWATCH III (以下、WW3 と呼ぶ) について、その推算値の特性を WAM の推算値と比較することによって明らかにし、カムインズの波浪予測モデルとして WW3 を導入することの検討を行う。

第 2 フェーズ：WW3 を導入することの方向性を確認した上で、予測計算仕様等の具体的な方法を検討し 1 年間の試験運用を行いながら、平成 29 年度中途に予定している本運用までに課題解決を図る。

現在、当初計画の第 2 フェーズ後半に入っており、本稿ではここまでの検討結果と本運用に向けて残された課題とその解決方法について紹介する。

2. WW3 の導入検討 (第 1 フェーズ)

入力風の誤差の小さい状況で WW3 の波浪の計算精度を WAM の計算精度と比較するために、入力風に解析値(観測値により補正されており、現象を精度良く再現した格子点値)を利用した波浪追算を実施した。ここで行った波浪追算の詳細については、鈴木ら(2016)¹⁾に報告されているので、以下では概要を説明する。

2.1 WW3 と WAM の波浪追算の方法

WW3 と WAM の波浪追算の共通の計算条件を表-1～表-2 に、一方、モデル間で異なる計算条件を表-3 に示す。また、両モデルの比較検証を行った対象擾乱について表-4 に示す。

表-1 波浪追算の入力風 (両モデル共通)

領域	GPV の種類
全球 (領域 1)	NCEP の Re-analysis (2.5 度格子)
日本近海 (領域 2~4)	毎時大気解析値 (5km 格子)

表-2 波浪追算の計算領域 (両モデル共通)

	領域 2	領域 3	領域 4	領域 5
計算領域	N 20~50 E 120~150	4 領域	22 領域	内湾域等
格子間隔	12' (約 20km)	6' (約 10km)	2' (約 3.7km)	1' (約 1.85km)
計算時間間隔	10 分 (600 秒)	5 分 (300 秒)	1 分 40 秒 (100 秒)	50 秒
方向・周波数分割数	32×25	32×25	32×25	32×35
周波数分割	$f(1) \times 1.10^{(i-1)}$ ($f(1)=0.04177248$)			
方向分割	$(2\pi/\text{方向分割数}) \times (i-1) - (2\pi/\text{方向分割数})/2$			
深海/浅海	深海	深海	深海	浅海

表-3 モデル間で異なる計算条件

	WAM (修正版)	WW3
領域1	北太平洋 (緯度経度36分間隔)	全球 (緯度経度30分間隔)
ネスティング	1 way	2 way
伝播計算	1 次上流差分	3 次の高精度差分
物理過程	S_{in}	本多・光易を改良 Janssen
	S_{ds}	$S_{in}+S_{nl}+S_{ds}$ がバランスするよう調整 Saturation based dissipation
	S_{nl}	DIA DIA

表-4 比較検証の対象擾乱

推算ケース	気象擾乱名	推算対象期間ほか
異常時波浪	1 台風1511号 (特徴)九州、四国、近畿、東海に高波浪	2015/07/13/09 ~ 07/18/09
	2 台風1418号 (特徴)奄美、九州～関東にうねり性波浪及び高波浪	2014/09/28/09 ~ 10/07/09
	3 台風1326号 (特徴)東海、関東、東北にうねり波浪および高波浪	2013/10/08/09 ~ 10/18/09
	4 寄り廻り波 (特徴)富山湾～佐渡ヶ島沿岸で被災	2008/02/21/09 ~ 02/26/09
	5 冬季風浪 (特徴)唐津沖の風力・潮流発電装置が沈没	2014/12/15/09 ~ 12/20/09
	6 顕著低気圧 (特徴)西日本～北日本で高波浪	2012/04/01/09 ~ 04/07/09
	7 常時波浪 (夏季)	2015/07/01/01 ~ 07/31/23
	8 常時波浪 (冬季)	2014/12/01/01 ~ 12/31/23

2.2 WW3 と WAM による波浪追算の精度比較結果

WW3 と WAM による波浪追算の結果について、GPS 波浪計と沿岸波浪計を利用して比較検証を行った結果を以下にまとめた。

- ・風浪の高波浪時においては、WW3 は WAM と比較して波高のピークと周期の全体的な再現性が高い。
- ・うねり性の高波浪時においては、全体的に WW3 は WAM と比較して波高・周期ともに実測値により近い値を示しており、特に波高のピークと周期の再現性が高い。
- ・常時波浪については、WW3 は WAM と比較して、波高は高く、周期は長い傾向がある。

以上のように、WW3 の追算結果は、うねり性波浪は WAM よりも精度が高く、常時波浪を含めた全体の精度も WAM 同等かそれ以上の結果であり、カムインズの波浪予測モデルを WW3 に変更することは適切であると考えられる。

3. WW3 の試験運用 (第2フェーズ)

第1フェーズの検討を経て平成28年6月から WW3 による波浪予測の試験運用 (第2フェーズ) を開始した。ここでは、試験運用中の WW3 の波浪予測と本運用している WAM の波浪予測を比較検証した結果を述べる。

3.1 試験運用の方法

試験運用中の予測風は表-5 のように設定し、本運用と基本的には同一の条件とした。計算領域の設定も本運用と概ね同様であり、例として日本海沿岸域のネスティング計算の説明を図-1 と表-6 に示す。本運用と異なる

計算条件は表-3 と同様だが、その中でネスティングについては試験運用も本運用と同じ 1 way で行った。

表-5 試験運用中の予測風

領域	GPVの種類	範囲	格子間隔	予測時間
全球 (領域1)	気象庁 GSM	全球	約 50km	0~84 時間 96~264 時間
	台風情報	N0°~90° E100°~180°	Myers モデルで海上風を作成し GSM と合成する。	
日本近海 (領域2~5)	GSM 日本域	N20°~50° E120°~150°	約 20km	0~84 時間 96~264 時間
	MSM	N22.4°~47.6° E120°~150°	約 5km	0~39 時間
	毎時大気解析	N22.4°~47.6° E120°~150°	約 5km	—

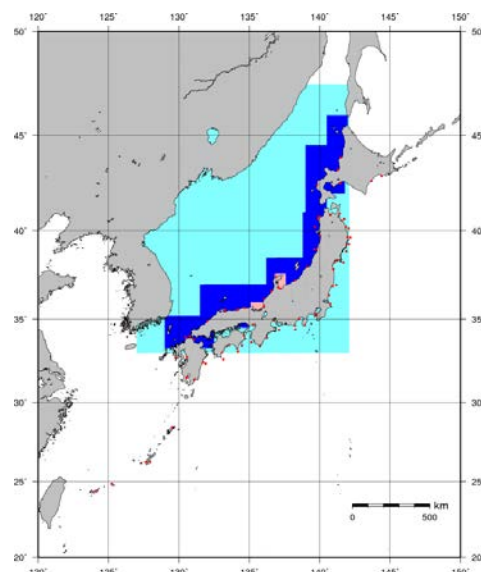


図-1 試験運用の領域図 (日本海沿岸の例)

表-6 試験運用の領域 (日本海沿岸の例)

領域	領域の範囲	格子間隔
1	南緯 75.0°~北緯 75.0 度 東経 0.0°~359.5 度	30 分
2	北緯 20.0°~50.0 度 東経 120.0°~150.0 度	12 分
3	図1の■内	6 分
4	図1の■内	2 分
5	図1の■内	1 分

3.2 予測計算の検証

(1) 異常時波浪

試験運用中の異常時波浪として表-7 のように以下の 11 擾乱を抽出した。また各擾乱で検証に利用した波浪観測点を表-8 に示す。

表-7 異常時波浪の比較検証の対象擾乱

台風事例	冬季(冬型、低気圧)事例
T1609(台風第9号:2016/8/21~8/23)	L1223(冬型:2016/12/22~12/24)
T1610(台風第10号:2016/8/28~8/30)	L0120(冬型:2017/1/20~1/22)
T1616(台風第16号:2016/9/19~9/20)	L0202(冬型:2017/2/1~2/3)
T1617(台風第17号:2016/9/25~9/27)	L0220(日本海 L:2017/2/20~2/21)
T1618(台風第18号:2016/10/3~10/5)	L0224(日本海 L:2017/2/23~2/24)
	L0314(南岸 L:2017/3/14~3/15)

表-8 異常時波浪の比較検証に利用した観測点

気象擾乱	台風				冬季気圧配置				低気圧		
	T1609	T1610	T1616	T1617	T1618	L1223	L0120	L0202	L0220	L0224	L0314
留前	○	○				○	○	○			
酒田	○	○				○	○	○			
輪島					○	○	○	○			
浜田			○		○	○	○	○			
玄界灘					○	○	○	○			
釧路	○	○						○			
釜石	○	○						○			○
常陸那珂	○	○						○		○	
鹿島	○	○			○			○		○	
下田	○	○			○			○		○	
御前崎			○		○					○	○
相模			○		○					○	○
富津					○					○	○
細島			○		○					○	○
中城湾			○		○					○	○
平良港					○					○	○
青森湾岸沖	○	○									
青森東岸沖	○	○									
岩手北部沖	○	○									
岩手中部沖	○	○	○								
岩手南部沖	○	○									
宮城北部沖	○	○									
宮城中部沖	○	○									
福島県沖	○	○									
静岡御前崎沖	○	○									
三度尻湾沖			○								
伊勢湾口沖			○								
秋田県沖	○	○				○					
山形県沖	○	○									
和歌山県南西沖			○								
徳島海陽沖			○								
高知西部沖			○								
宮崎日向沖			○								
高知平戸沖			○								

擾乱毎の波浪予測の GPS 波浪計地点の経時変化図の例を図-2 に示す。また、台風事例と冬季事例に分類して集計した波高ピーク値と周期ピーク値の各地点分を累積した散布図を図-3 に示す。

以上の比較検証の結果、次のことがわかった。

- ・台風事例では、ピーク時に WW3 の波高が過大となる場合が多く、特に西日本太平洋側で顕著である。
- ・台風時の周期の予測は、WW3 の方が実測値とよく整合しており、台風が遠方にあるときに到達するうねりの精度は WW3 が高いといえる。
- ・冬季気圧配置による高波や、台風以外の低気圧によってもたらされる高波高については、波高、周期ともに WW3 の方が精度は高い。

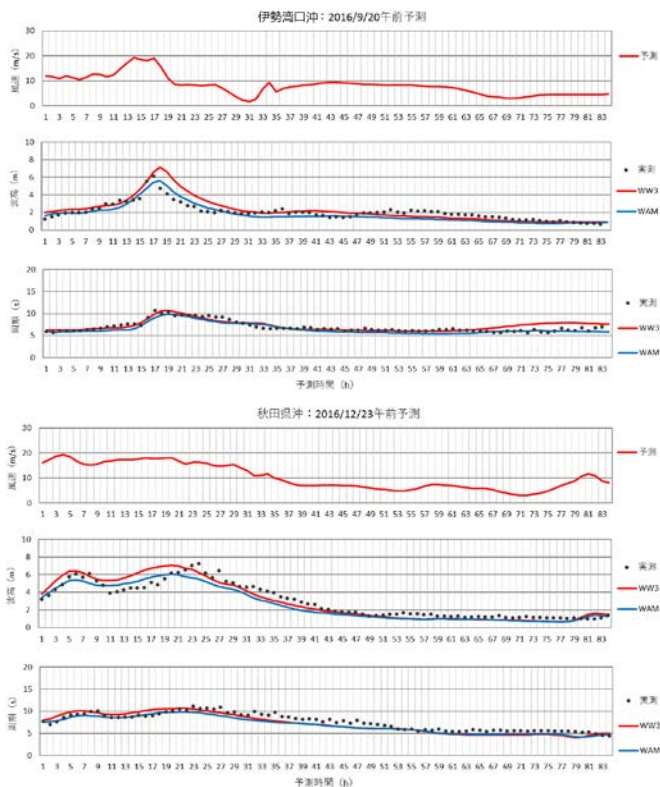


図-2 異常時波浪の経時変化（風速、波高、周期）の例
上から T1616 伊勢湾口沖、L1223 秋田県沖

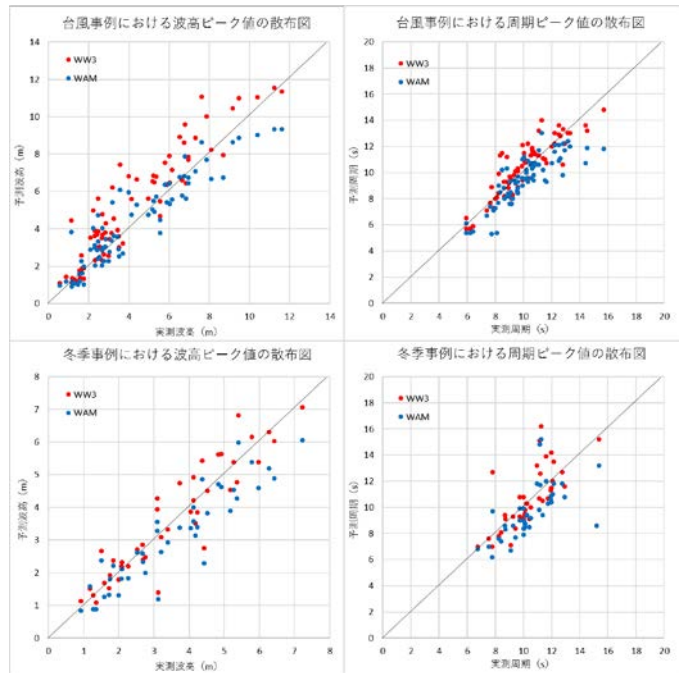


図-3 散布図（上段 台風（左：波高、右：周期）
赤 WW3 青 WAM（下段 冬季（左：波高、右：周期））

(2) 常時波浪

常時波浪の対象期間中の代表地点の波高と周期の頻度分布を図-4 に、相関関連の統計値の精度を比較して良値の地点数を集計した結果を表-9 に示す。

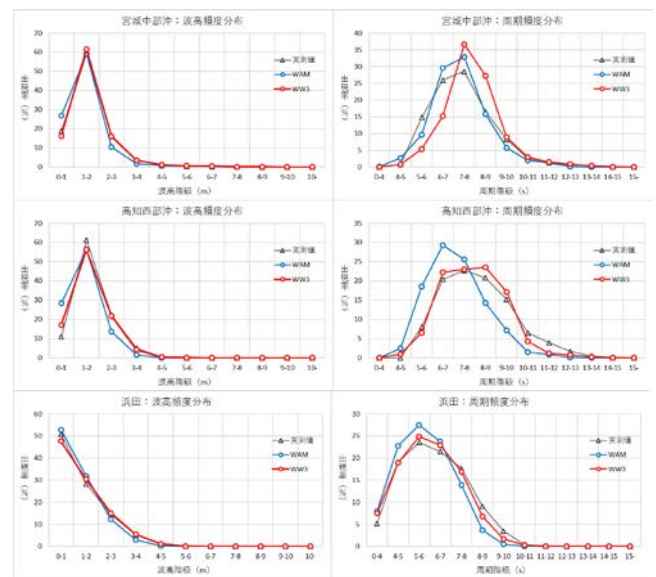


図-4 波高（左）と周期（右）の頻度分布図
宮城中部沖（上段）高知西部沖（中段）、浜田（下段）

表-9 統計値の精度比較による良値地点数集計表

	波 高				周 期			
	回帰係数	相関係数	BIAS	RMSE	回帰係数	相関係数	BIAS	RMSE
WW3	22	10	15.5	14	22	6	15	8
WAM	12	24	18.5	20	12	28	19	26

以上の比較検証の結果、以下のことがわかった。

- ・波高と周期の頻度分布は地点による違いはあるが全体としてはWW3とWAMで大きな違いはなかった。
- ・波高と周期の統計解析は、回帰係数はWW3が、相関係数はWAMの方が良好な精度であった。

(3) 試験運用での予測精度上の課題

運用時の予測の誤差には、モデル誤差に加えて風の予測誤差が含まれる。モデル誤差の比較はフェーズ1で行っており、WW3の方がWAMより予測精度が高いことを示した。一方、このように運用時の予測精度はWW3の方がWAMよりも高いとはいえない結果であり、気象庁MSMの風予測を入力した場合のWW3のチューニングが現時点では不足していることを示している。

4. 運用時の予測精度向上への対応

4.1 異常時波浪の予測精度向上の検討

異常時波浪の予測精度向上は、台風事例に過大予測のあることがわかったことから、 Su （高風速時の摩擦速度を低減することができるパラメータ）を調整して対応することを検討した。試験運用では Su を1.0で行っていたが、高風速時の波のエネルギー輸送が低減されるように Su を1.5に設定して計算した結果を図-5に示す。これにより、風速25m/s程度では波高が40cm程度低減されることがわかる。

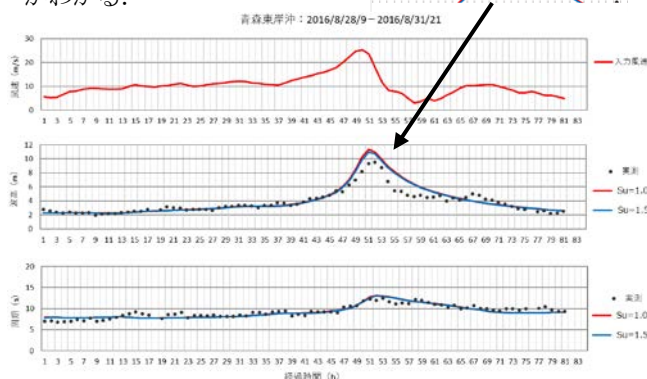


図-5 $Su=1.0$ (赤)と $Su=1.5$ (青)の推算結果の比較

4.2 常時波浪の予測精度向上の検討

WW3は、その開発時にはECMWFの予測風を利用してチューニングが行われており、今回の試験運用では開発時と同様のデフォルトのパラメータ値を利用した。試験運用の入力風は気象庁MSMの予測風を利用しており、波浪予測計算は、ECMWFの予測風と気象庁MSMの予測風との違いの影響を受ける。予測風同士の直接比較は困難なため、 β_{max} （風から波へのエネルギー輸送量を調整することができる、波の発達過程の無次元パラメータ）を利用して間接的に調整することを検討した。試験運用では β_{max} は1.52としていたが、ここでは1.33

として計算した結果を図-6に示す。これにより、宮城北部沖GPS波浪計の例では回帰係数、RMSEともに改善されることがわかる。

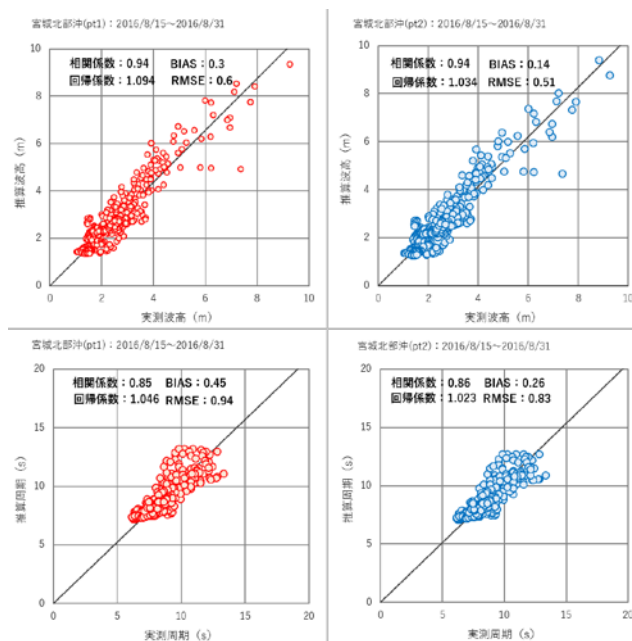


図-6 $\beta_{max}=1.52$ （左側）と $\beta_{max}=1.33$ （右側）の比較

4.3 今後の対応

このように運用時の予測精度向上は異常時波浪と常時波浪の両方に着目して β_{max} と Su を調整することで対応する。海域による特性の違いを考慮するために、太平洋側と日本海側に分けて β_{max} と Su の組み合わせを変えることも現在検討中である。

5. おわりに

今回のWW3のカムインズ予測への導入計画においては、有識者による研究会を開催し、その場での意見を踏まえながら進めてきた。本稿では言及していないが、平成29年度中途のWW3の予測モデルへの導入に併せてカムインズのシステム上の利便性向上も計画している。これらを通して、カムインズ利用者の方々の日々の業務遂行に更なる貢献ができることを願うものである。

謝辞

WW3のカムインズ波浪予測への導入にあたっては、「WAVEWATCH IIIの波浪予測モデル導入検討に関する研究会」にご出席頂いた委員ならびに有識者の方々から貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木善光, 高山知司, 吉永泰祐, 岡田弘三, 窪田和彦, 宇都宮好博, 松藤絵理子, 君塚政文: WAMとWAVEWATCHIIIによる推算波浪の再現特性, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 72, No. 2, I_265-I_270, 2016.