

内湾を対象としたリアルタイム波浪予測 システムの開発

DEVELOPMENT OF A REAL-TIME WAVE FORECAST SYSTEM FOR INLAND SEAS

加藤史訓¹・福濱方哉¹・橋本典明²・三嶋宣明³・松藤絵理子⁴・宇都宮好博⁵
Fuminori KATO, Masaya FUKUHAMA, Noriaki HASHIMOTO, Nobuaki MISHIMA,
Eriko MATSUFUJI and Yoshihiro UTSUNOMIYA

¹正会員 工修 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 (〒305-0804 つくば市旭1)

²フェロー 工博 九州大学大学院工学研究院環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

³工修 財団法人日本気象協会首都圏支社 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

⁴学修 財団法人日本気象協会首都圏支社 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

⁵正会員 博(工) 財団法人日本気象協会首都圏支社 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1)

The Flood Fighting Law stipulates that prefectural governors shall issue a flood fighting warning of storm surges on coasts previously recognized as being at high risk of storm surges. However, forecasts of storm surges and high waves before a typhoon approaches are insufficient information to issue a flood fighting warning because the forecasts do not indicate that the wave runup exceeds coastal dikes and wave forecasts are imprecise. Also, wave forecasts are not very precise near coasts because wave models do not consider wave transformation in shallow water such as shoaling and refraction. Therefore we are developing a real-time wave forecast system for inland seas to ensure proper flood fighting warnings

Key Words : Real-time Wave Forecast, WAM, SWAN, Inland Seas

1. はじめに

水防法では、都道府県知事が、高潮により相当な損害が生ずるおそれがあると認めて指定した海岸について、水防警報を発令することになっている。しかし、台風接近の前に気象庁が発表する高潮や高波の予報は、各海岸での波のうちあげ高が堤防高を上回るかどうか分からないこと、予報範囲が沿岸単位と広いことから、各海岸の水防警報発令の判断材料として十分ではない。また、気象庁の沿岸波浪モデルは、空間解像度が比較的粗く、屈折などの浅海変形は考慮されていないため、海岸付近での精度は十分ではない。そこで、水防警報の適切な発令のため波のうちあげ高を予測することを前提に、台風接近時において内湾での波浪をリアルタイムで予測するのに適当な波浪モデルについて検討した。

2. 波浪推算モデルの選定

(1) モデル選定の考え方

気象庁では、全球波浪モデルの予測結果を境界条件として、日本近海を対象とする沿岸波浪モデルにより沿岸部の波浪を推算している。2007年3月現在、

沿岸波浪モデルの格子間隔は6分(約10km)であり、屈折などの浅海変形は考慮されていない。このため、地形が複雑な内湾については、地形および浅海変形の再現性の点で精度に限界があると考えられる。本研究では、沿岸域の地形および浅海変形を考慮し、沿岸波浪モデルの予測結果を境界条件として、沿岸域の波浪を詳細に予測することを想定し、その予測に用いる波浪モデルを検討した。

浅海域に適用できる代表的な波浪推算手法として、WAM (WAVE Model) やSWAN (Simulating WAVES Nearshore) が知られている。これらは、外力として風を与えて波浪を推算するものであり、特に沿岸域において重要な現象である浅水変形や屈折を考慮できる。WAMは外洋での波浪推算に実績があり、浅海域への適用についても近年検討されている^{1~4)}。SWANは、WAMと同じく第3世代波浪推算モデルであり、地形性砕波も考慮されている。一方、海岸保全施設の設計においては、施設近傍での波浪の諸元を求めるため、風を考慮せずに入射波の屈折や砕波等を計算する波浪変形モデルが多用されてきた。波浪変形モデルは、風による波の発達等を考慮していないが、それ故に計算所要時間が短いという利点を持っている。

本研究では、図-1~3に示す伊勢湾、播磨灘、有明海を対象として、1997~2004年に各海域に影響を及ぼした主な台風について波浪推算を行った。計算領域は表-1のように設定し、表-2のように、領域毎にWAM(Cycle 4), SWAN(40.41), 波浪変形モデル(エネルギー平衡方程式)を用いて、計算精度および計算所要時間を比較した。本研究では中領域と狭領域での計算が検討対象となり、「沿岸波浪モデル」の守備範囲となる広領域1~3の波浪推算は全ケースともWAMで行った。広領域2から広領域3へネスティングする際、方向スペクトルは f^{-5} 乗則に従って周波数帯を高周波側に拡張し、スプライン補間によって方向分割数を上げた。ケース1~4では、広領域3の結果を境界条件として、中領域の波浪を計算格子間隔約1.7kmで推算し、さらにその結果を境界条件として狭領域での計算を行った。ケース5では、中領域の計算を行わず、広領域の計算結果を

境界条件として、狭領域での計算をエネルギー平衡方程式(周波数10成分)で行った。なお、狭領域での計算格子間隔については、WAMとSWANは約0.4kmとし、波浪変形モデルは計算量が少ないので50mとした。

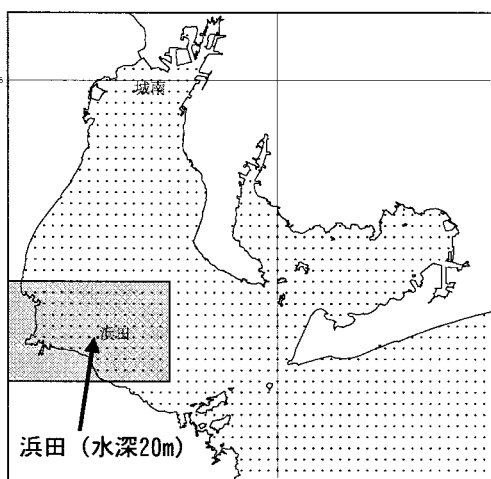


図-1 伊勢湾の中領域・狭領域(矢印:波浪観測点)

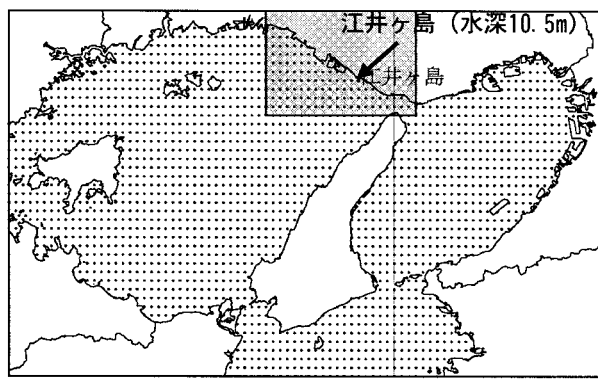


図-2 播磨灘の中領域・狭領域(矢印:波浪観測点)

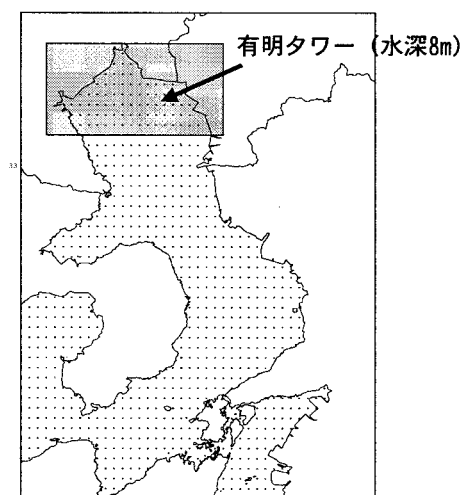


図-3 有明海の中領域・狭領域(矢印:波浪観測点)

表-1 各計算領域の設定

	広領域1	広領域2	広領域3	中領域	狭領域	
計算範囲	N 15.0~50.0 E 120.0~155.0	N 30.0~35.5 E 128.0~140.0	伊勢湾	N 34.0~35.25 E 136.5~137.75	N 34.4~35.1 E 136.5~137.4	N 34.55~34.7 E 136.5~136.8
			播磨灘	N 33.5~35.0 E 134.0~135.5	N 34.1~34.8 E 134.1~135.5	N 34.6~34.8 E 134.7~135.05
			有明海	N 32.0~33.5 E 129.25~130.75	N 32.45~33.25 E 130.05~130.75	N 33.05~33.2 E 130.1~130.45
格子数	71×71	49×23	伊勢湾 26×26 播磨灘 31×31 有明海 31×31	55×43 85×43 43×49	73×37 85×49 73×37	
格子間隔	30分 (約50km)	15分 (約25km)	3分(約5km)	1分(約1.7km)	0.25分 (約0.4km)	
周波数分割数	25成分		35成分			
	$f(1) \times 1.10^{(i-1)}$ ($f(1) = 0.04177248$)					
周期成分	約24秒~2.4秒		約24秒~0.9秒			
方向分割数	16成分		36成分			
入力風データ	傾度風モデル		RSM、ANEMOS、傾度風モデル			

表-2 計算ケース

ケース	中領域	狭領域
1	WAM	WAM
2	WAM	SWAN
3	WAM	波浪変形モデル
4	SWAN	SWAN
5	-	波浪変形モデル

表-3 内湾での波浪推算に用いた風モデル

伊勢湾		播磨灘		有明海	
T9807	RSM	T9708	ANEMOS	T9711	傾度風
T9810	RSM	T9805	RSM	T9918	ANEMOS
T0111	RSM	T9807	RSM	T0014	ANEMOS
T0310	ANEMOS	T9810	ANEMOS	T0205	RSM
T0406	RSM	T9918	ANEMOS	T0215	傾度風
		T0310	ANEMOS	T0306	ANEMOS
		T0416	RSM	T0314	RSM
		T0418	RSM	T0418	ANEMOS

計算は、PentiumIV(周波数3.6GHz)を積んだパソコンで行った。また、水深データは、伊勢湾と播磨灘については中央防災会議(東南海, 南海地震等に関する調査会)が整備したデータを、有明海については日本水路協会のJTOPO30をもとに作成した。

外洋の風に関しては、傾度風モデル(Cardone-Myersハイブリッドモデル⁵⁾)とECMWFデータを四国沖ブイ(N29° 0', E135° 0')と東シナ海ブイ(N28° 10', E126° 20')の実測値(1997~1999年)と比較したところ、両者の相関係数がほぼ同等だったことから、回帰係数が1により近い傾度風モデルを波浪推算に用いることとした。一方、湾内の風に関しては、気象庁GPV(RSM), 局地気象モデル(ANEMOS), 傾度風モデル(Cardone-Myersハイブリッドモデル⁵⁾+マスコンモデル)を対象に、検証地点(伊勢湾8地点, 播磨灘6地点, 有明海6地点)での実測値(風向・風速)との相関係数を求め、実測値ともっとも適合するモデルを台風毎に選定した(表-3参照)。なお、選定したモデルで推定した風

を波浪推算モデルに入力する際には、浜田(伊勢湾), 江井ヶ島(播磨灘), 有明タワー(有明海)での回帰係数で推定風速を除した。

(2) 検討結果

波浪の実測値は、浜田, 江井ヶ島, 有明タワーで得られている。各海岸での波高および周期の相関係数(R), 誤算の2乗平均(E), 一次回帰式(A:回帰係数, y:推算値, x:観測値), 東播海岸を対象とした計算所要時間を表-4にまとめた。相関係数は、いずれのモデルでも周期と比べて波高の方が高く, モデル間で大差は見られなかった。また, 誤差の2乗平均については, いずれのモデルでも波高は0.6m未満と比較的よいが, 周期はSWANを用いたケース2やケース4で大きかった。一方, 計算所要時間については, 中領域, 狭領域ともWAMを用いたケース1が最も短く, 中領域約14分, 狭領域53分であった。ケース1では, 周期の回帰係数は1程度であり, 波高の回帰係数は1を上回っており, 平均的には実測値よりやや大きめの推算値が得られた。また, 図-4のように時系列で比較しても, 推算値は実測値とよく対応していた。

もっとも計算所要時間が短かったケース1について, 計算所要時間をさらに短縮する方法として, 浅海域での非線形相互作用の計算省略と, 計算格子を粗くすることを検討した。非線形相互作用は, 波浪の周波数成分間でエネルギー輸送を起こすことで, 波浪の発達・減衰の重要な要素であるが, 閉鎖的な海域ではその効果は小さいと考えられる。そこで, 各海域の波浪観測点でもっとも波高が大きかった台風について, 非線形項を省略して計算したところ, 図-5のように推算波高の差異は小さいこと, 計算所要時間を30%短縮できることが確かめられた。一方, 計算格子を粗くすることの効果の評価するため, 中領域と狭領域の計算結果を比較したところ, 中領域と狭領域の波高・周期推算値はほぼ一致した。

表-4 各ケースの計算精度および東播海岸を対象とした計算所要時間

ケース	伊勢湾西南海岸(浜田)		東播海岸(江井ヶ島)		有明海岸(有明タワー)		24時間の計算所要時間				
	波高	周期	波高	周期	波高	周期	広領域	中領域	狭領域		
ケース1 (WAM-WAM)	R=0.81	R=0.55	R=0.91	R=0.73	R=0.86	R=0.42	約1.5分	約14分	約53分		
	E=0.58m	E=1.49s	E=0.34m	E=1.07s	E=0.43m	E=1.26s					
	y=1.26x	y=1.09x	y=1.08x	y=1.05x	y=1.42x	y=0.99x					
ケース2 (WAM-SWAN)	R=0.81	R=0.40	R=0.85	R=0.64	R=0.85	R=0.40		約1.5分	約14分	約232分	
	E=0.51m	E=2.58s	E=0.40m	E=1.83s	E=0.34m	E=1.82s					
	y=1.21x	y=0.48x	y=0.96x	y=0.54x	y=1.19x	y=0.50x					
ケース3 (WAM-波浪変形モデル)	R=0.74	R=0.56	R=0.92	R=0.86	R=0.88	R=0.56			約1.5分	約14分	約92分
	E=0.55m	E=1.23s	E=0.31m	E=0.96s	E=0.48m	E=0.96s					
	y=1.11x	y=1.02x	y=0.98x	y=0.86x	y=1.48x	y=0.90x					
ケース4 (SWAN-SWAN)	R=0.81	R=0.48	R=0.97	R=0.91	R=0.95	R=0.85	約1.5分			約113分	約232分
	E=0.43m	E=2.83s	E=0.40m	E=2.21s	E=0.32m	E=1.61s					
	y=1.04x	y=0.44x	y=0.84x	y=0.53x	y=0.80x	y=0.52x					
ケース5 (波浪変形モデルのみ)	R=0.73	R=0.57	R=0.92	R=0.80	R=0.87	R=0.56		約1.5分		なし	約92分
	E=0.55m	E=1.34s	E=0.32m	E=0.92s	E=0.44m	E=0.96s					
	y=1.08x	y=1.06x	y=1.02x	y=0.88x	y=1.39x	y=0.88x					

R: 相関係数, E: 誤差の2乗平均, y=A_x: 一次回帰式

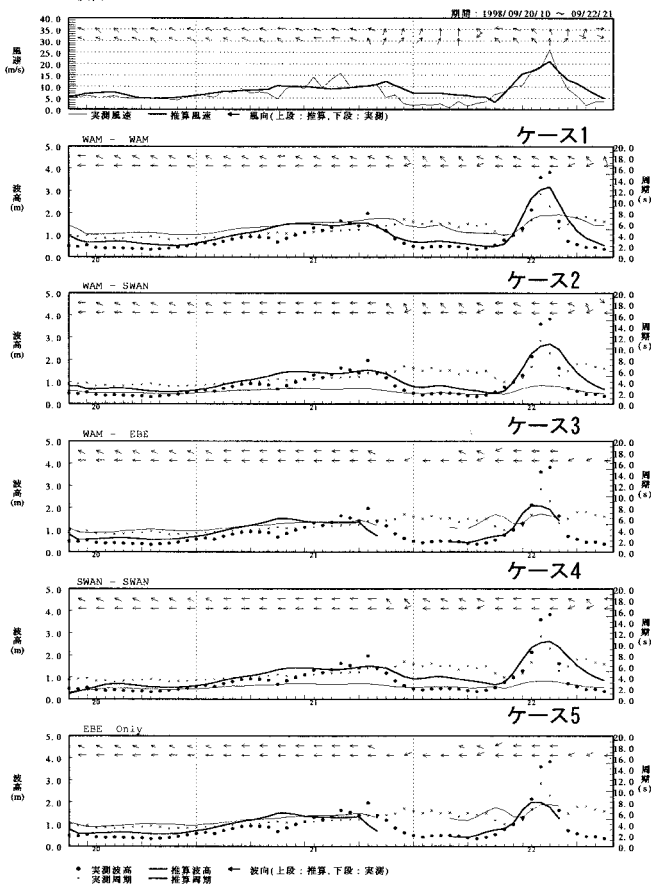


図-4 推算値と実測値の経時変化(台風9807号, 浜田)

以上のように、約1.7kmメッシュのWAMにより短時間で比較的精度よく内湾波浪を推算できることが確かめられたので、これをベースにリアルタイム波浪予測システムを構築することとした。

3. 波浪推算モデルの改良

(1) モデル改良の考え方

内湾は水深が比較的小さく、海岸近傍では地形性砕波が生じるが、WAMはSWANとは異なり地形性砕波が考慮されていない。また、潮汐による潮位の時間的変化が比較的大きく、水深変化が波浪に影響する可能性がある。リアルタイム波浪予測において地形性砕波と潮汐を考慮する必要性を検討するため、SWANの地形性砕波の計算に採用されているboreモデル⁶⁾をWAMに組み込むとともに、海洋潮汐モデル(NAO.99b)⁷⁾で作成される1分メッシュの潮位面データを使用して1時間毎に水深を変化させて波浪推算を行い、実測値と比較した。boreモデルは、砕波と段波の類似性に着目し、段波におけるエネルギー消散量を砕波として計算する方法である¹⁾。

対象とした台風を表-5に示す。計算範囲や周波数分割数などは表-1と同一であるが、入力風データは広領域3と中領域では、RSMを実測風速により補正したものを使用した。

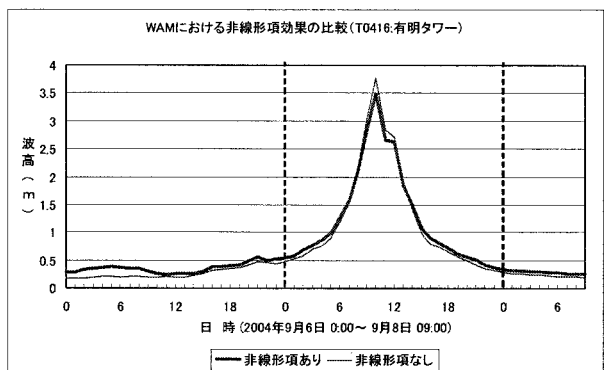
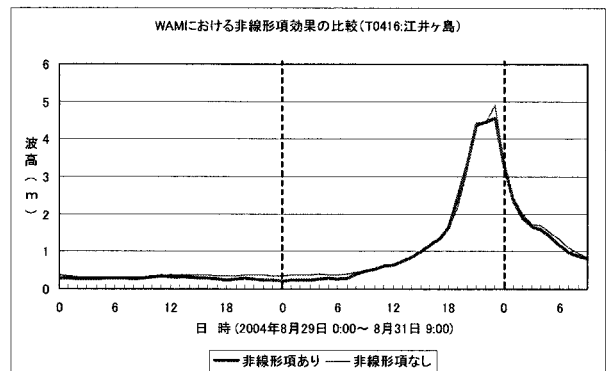
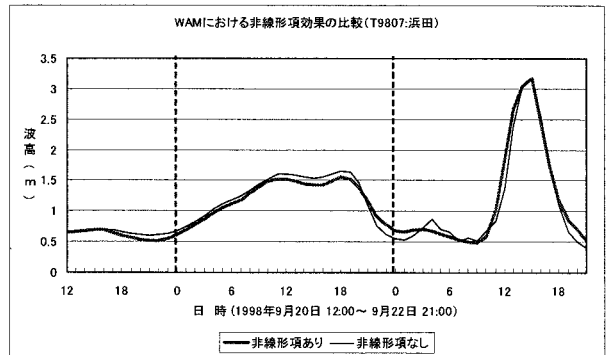


図-5 非線形項の効果(上:浜田, 中:江井ヶ島, 下:有明タワー)

(2) 検討結果

表-6および7のように、伊勢湾の浜田では改良の効果は現れていないが、播磨灘の江井ヶ島や有明海の有明タワーでは地形性砕波の考慮により波高の回帰係数およびRMS誤差が改善された。たとえば、浜田では図-6のようにモデル間の差異は小さいが、有明タワーでは、図-7のように、地形性砕波の考慮

表-5 改良モデルの検証対象台風

領域	台風	最大有義波高	期間
伊勢湾	T9807	3.84m	1998年9月20-22日
	T9810	3.08m	1998年10月16-18日
播磨灘	T9805	2.78m	1998年9月14-16日
	T0416	3.94m	2004年8月27-31日
	T9810	2.85m	1998年10月16-18日
有明海	T0418	2.62m	2004年9月4-8日
	T0418	2.85m	2004年9月4-8日
	T0306	2.42m	2003年6月16-20日
	T0415	2.08m	2004年8月17-19日
	T0314	1.84m	2003年9月10-13日

表-6 推算波高と実測波高との相関

領域	推算方法	回帰係数	相関係数	RMS誤差
伊勢湾	改良前	1.17	0.82	0.47m
	+碎波	1.16	0.82	0.46m
	+潮汐	1.18	0.82	0.48m
	+碎波・潮汐	1.17	0.82	0.48m
播磨灘	改良前	1.15	0.91	0.39m
	+碎波	0.98	0.90	0.32m
	+潮汐	1.15	0.91	0.39m
	+碎波・潮汐	0.99	0.90	0.32m
有明海	改良前	1.44	0.93	0.42m
	+碎波	1.23	0.92	0.33m
	+潮汐	1.42	0.94	0.40m
	+碎波・潮汐	1.20	0.93	0.31m

表-7 推算周期と実測周期との相関

領域	推算方法	回帰係数	相関係数	RMS誤差
伊勢湾	改良前	1.17	0.61	1.6s
	+碎波	1.17	0.62	1.5s
	+潮汐	1.20	0.61	1.7s
	+碎波・潮汐	1.20	0.61	1.6s
播磨灘	改良前	0.98	0.71	1.3s
	+碎波	0.97	0.71	1.3s
	+潮汐	1.01	0.69	1.3s
	+碎波・潮汐	1.00	0.69	1.3s
有明海	改良前	0.91	0.55	1.3s
	+碎波	0.89	0.53	1.2s
	+潮汐	0.91	0.55	1.3s
	+碎波・潮汐	0.89	0.53	1.2s

により波高ピーク時の精度が向上している。水深20mの浜田と比べ、江井ヶ島や有明タワーは水深が比較的小さいため、地形性碎波の効果が現れやすかったと考えられる。さらに、地形性碎波と潮位変動を考慮しても、計算所要時間は10%程度しか増加しないことも確かめられた。

4. おわりに

以上のように、地形性碎波および潮位変動を考慮できるようにWAMを改良することにより、各海域の波浪をリアルタイムで精度良く予測できることが確認された。各海岸のうちあげ高予測と組み合わせることにより、高潮水防警報の適切な発令判断に資する情報が提供されることになる。

謝辞：本研究は、国土交通省河川局および港湾局、気象庁の連携のもと、国土技術政策総合研究所、独立行政法人港湾空港技術研究所、気象庁、気象研究所により構成される「高潮情報システム技術検討ワーキング」での議論を通じて進められた。本研究では、港湾空港技術研究所で改良されたWAMのプログラムを使用させていただいた。伊勢湾および播磨灘の海底地形データは、中央防災会議で整備した電子データを内閣府よりお借りした。ここに記して関係各位に謝意を表します。

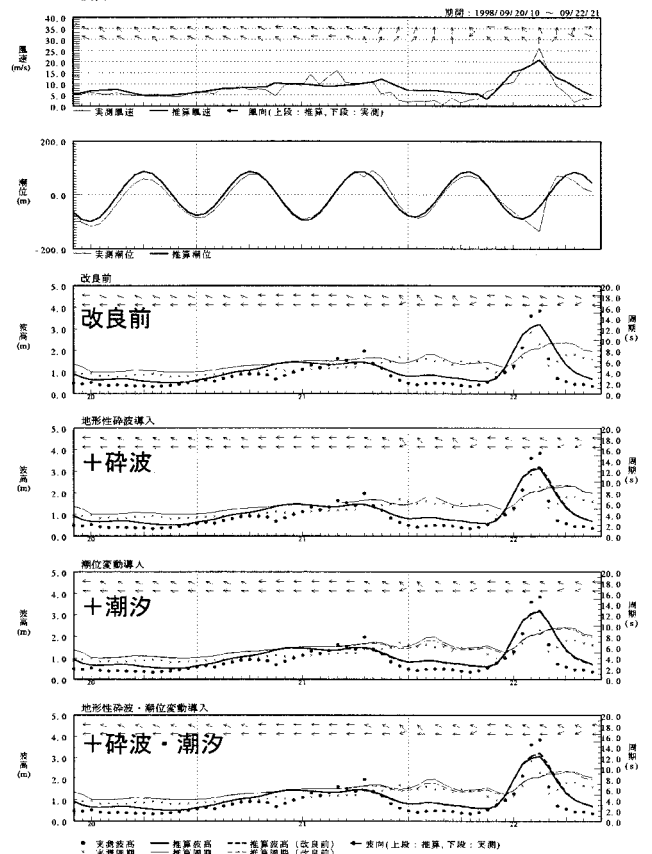


図-6 推算値と実測値との比較（台風9807号，浜田）

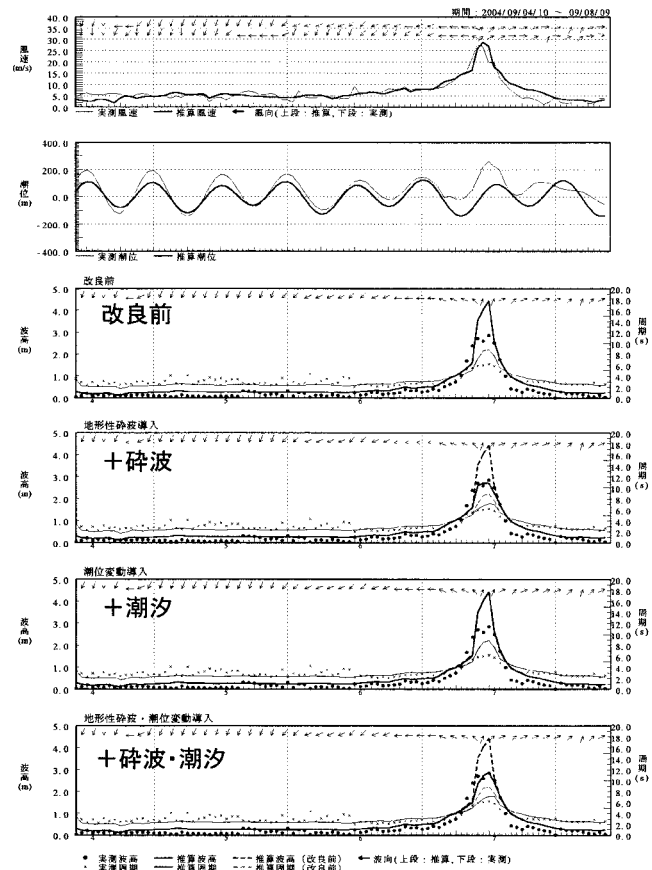


図-7 推算値と実測値との比較（台風0418号，有明タワー）

参考文献

- 1) 川口浩二, 杉本 彰, 橋本典明: 第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用性—メソスケール気象モデルの導入, 港湾空港技術研究所資料, No.1061, 53p., 2003.
- 2) 橋本典明, 川口浩二: 波浪推算モデルとその利用, 海洋開発論文集, 第19巻, pp.53-58, 2003.
- 3) 橋本典明, 松本秀雄, 川口浩二, 松藤絵理子, 松浦邦明: 局地気象モデルと第三世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.
- 4) 橋本典明, 川口浩二, 池上正春, 鈴山勝之: 東京湾におけるWAMの波浪推算特性に関する検討, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.845-850, 2004.
- 5) 岡田弘三, 林 健次, 磯崎一郎: 内海における海上風推算手法の開発, 海の研究, Vol.4, No.2, pp.91-99, 1995.
- 6) Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp.569-587, 1978.
- 7) Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M.: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/ POSEIDON altimeter data into hydrodynamical models: a global model and a regional model around Japan, Journal of Oceanography, Vol. 56, pp.567-581, 2000