

特集「沿岸防災業務強化に向けた業務改善」

大阪湾と伊勢湾における波浪特性及び沿岸波浪モデルの 予想特性についての調査*

濱名 実^{**1}_{※1}・金子 秀毅^{**1}・出口 英昭^{**1}
・東條 伸^{**2}・森 一正^{**3}_{※2}

要 旨

全国港湾海洋波浪情報網の観測点である神戸港と伊勢湾のデータを用いて神戸海洋気象台担当海域内の内海である大阪湾と伊勢湾の波浪特性を調査した。波浪の統計結果より、神戸港観測点では南西方向から波高の高い風浪が観測されることなどが分かった。また、両観測点とも湾奥に位置するにも関わらず外海からのうねりが観測されていた。各観測点における沿岸波浪モデルの予想値と観測値との比較では、大阪湾ではモデルが風浪を過小評価する傾向、伊勢湾ではうねりを過大評価する傾向がみられた。

1. はじめに

神戸海洋気象台では担当海域内の4つの地方予報中核官署（大阪、高松、広島、名古屋）に対して、波浪の実況や沿岸波浪モデル（以下、モデル）予想の修正量を示す「波浪に関する地方解説資料」（以下、支援情報）を提供することとなった。支援情報では、海陸分布を考慮して担当海域を8つに細分化（第1図）し、それぞれの海域に対してコメントすることとしている。8つの海域のうち3つは、四方をほぼ陸地に囲まれた内海で

ある。内海における波は通常穏やかであることが多いが、台風などの気象じょう乱が接近、通過する際には、波高が高くなることもある。支援情報の作成にあたっては、このような各海域に特有の波浪特性の把握、理解が必要不可欠である。

本稿では、神戸海洋気象台担当海域内の内海に設置された波浪観測点のうち、リアルタイムでデータを利用できる神戸港（34° 38′ 50″ N, 135° 16′ 36″ E）と伊勢湾（34° 55′ 12″ N, 136° 44′ 25″ E）を対象に、その観測値からみ

* A Research for Observed Wave Characteristics and Forecasted Characteristics of Coastal Wave Model of Osaka Bay and Ise Bay

**1 Minoru Hamana, Hideki Kaneko and Hideaki Deguchi

Maritime Meteorological Division, Kobe Marine Observatory（神戸海洋気象台海上気象課）

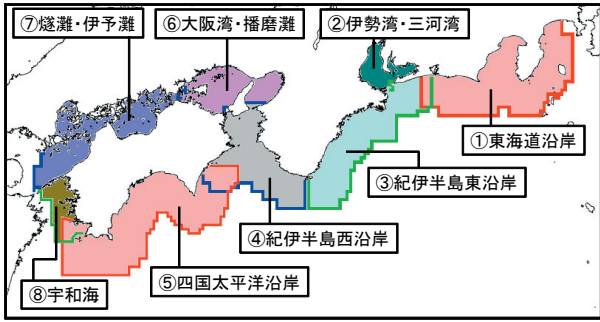
**2 Shin Tojo

Disaster Management Division, Tokushima Local Meteorological Observatory（徳島地方気象台防災業務課）

**3 Kazumasa Mori

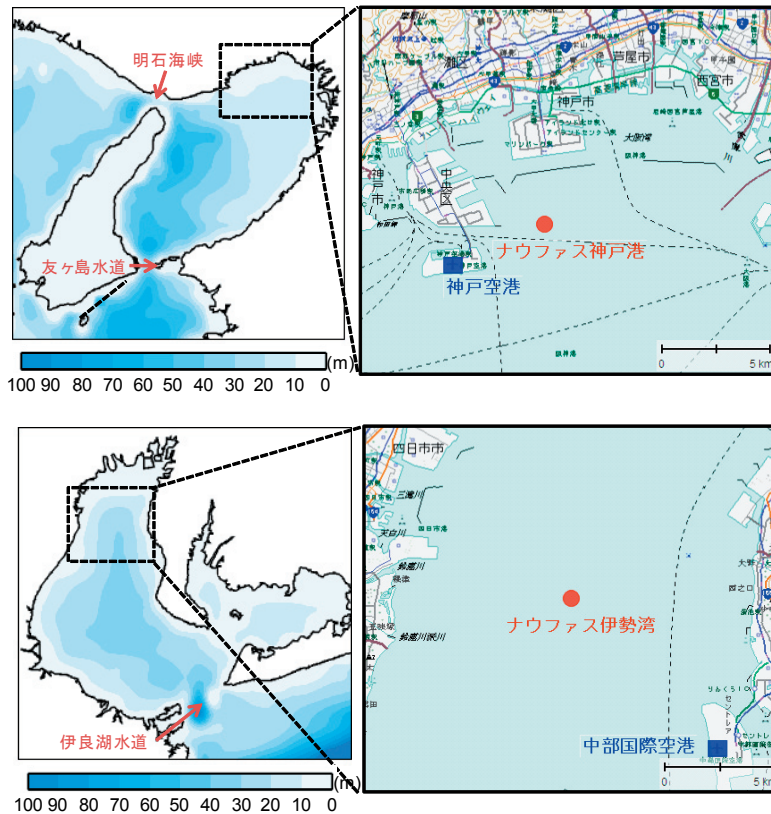
Lower Aerological Observations Division, Aerological Observatory（高層気象台観測第一課）

現所属 ※1 地球環境・海洋部海洋気象課 ※2 高層気象台観測第二課



第1図 神戸海洋気象台担当海域の8細分海域
 ②伊勢湾・三河湾, ⑥大阪湾・播磨灘, ⑦燧灘・伊予灘は四方をほぼ陸地に囲まれた内海.

られる波浪の特徴, 及び観測値と観測点に対応するモデル格子点の予想値との比較からモデルの特性について調査を行った. これらの観測点は, いずれも国土交通省港湾局や各地方整備局などが相互協力のもとに構築・運営しているナウファス(全国港湾海洋波浪情報網: NOWPHAS: Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarborS)と呼ばれるシステムの一部であることから, 以後観測点名の前に「ナウファス」を付加する. なお, ナウファス神戸港は大阪湾湾奥の水深約17m, ナウファス伊勢湾は伊勢湾湾奥の水深約27mの海底に超音波式波浪計のセンサーが設置されている(第2図).



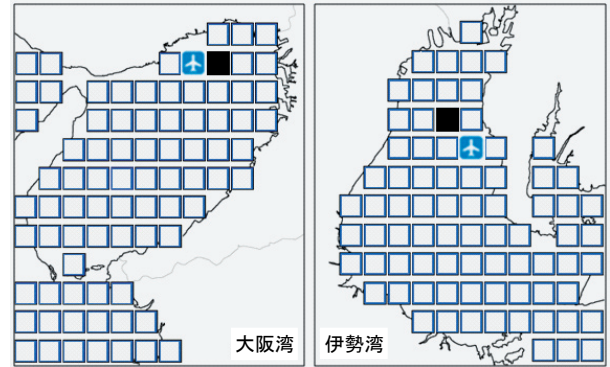
第2図 大阪湾, 伊勢湾の水深図(左)とナウファス観測地点の周辺図(右)

赤い丸がそれぞれナウファス神戸港, ナウファス伊勢湾の波浪計設置場所, 青い四角がそれぞれ神戸空港, 中部国際空港の位置を表す. なお, 周辺図の背景地図等データは, 国土地理院の電子国土 Web システムから配信されたものである.

2. 利用したデータ

2008年1月1日から2009年12月31日までの2年間を調査対象とした。波浪の観測値はナウファス神戸港、ナウファス伊勢湾における2時間ごと（毎偶数時）の有義波高、有義波周期（以下、観測波高、観測周期）、及び波向を利用した。一方、予想値は波浪観測点に対応するモデル格子点の波高、周期（以下、予想波高、予想周期）を利用した。予想値については初期値（00UTC、06UTC、12UTC、18UTC）における6時間後予想値と9時間後予想値を取り出して3時間ごとの予想時系列を作成した。予想値と観測値を比較するにあたり、この予想時系列と対応させるため、03時、09時、15時、21時における観測値を前後1時間の観測値から内挿した。なお、予想値と観測値の比較については、2008年7月3日00UTC初期値以降で行い、さらに予想波高が0.3m未満と0.3m以上の場合に分けた。これは、モデルが2008年7月3日00UTC初期値から適用のパラメータ調整により、予想波高が0.3m以上の場合は従来どおり0.01m単位で出力し、予想波高が0.3m未満の場合は“一律”波高0.2m、周期2.0秒と出力するように変更されたためである。

また、波浪観測点におけるモデルの予想誤差（＝予想値－観測値）の考察には、波浪観測点近くの海上空港（ナウファス神戸港は神戸空港、ナウファス伊勢湾は中部国際空港）で観測された風向と風速（以下、観測風向、観測風速）と、GSMにより予想された波浪観測点における風向と風速（以下、予想風向、予想風速）を利用した。第2図に波浪観測地点と空港周辺の地図を、第3図にモデル格子点上における波浪観測点と海上空港の位置を示す。第3図より海上空港はナウファス神戸港、ナウファス伊勢湾それぞれの隣接する格子点（格子間隔は約5km）にあるため、GSM予想の波浪観測点における風と海上空港で観測された風に大きな差はないと考え、海上空港で観測された風を波浪観測点におけるものとして扱った。



第3図 大阪湾、伊勢湾における沿岸波浪モデルの格子点配置

黒い四角はそれぞれナウファス神戸港、ナウファス伊勢湾に対応する格子点。飛行機印は神戸空港、中部国際空港に対応する格子点。

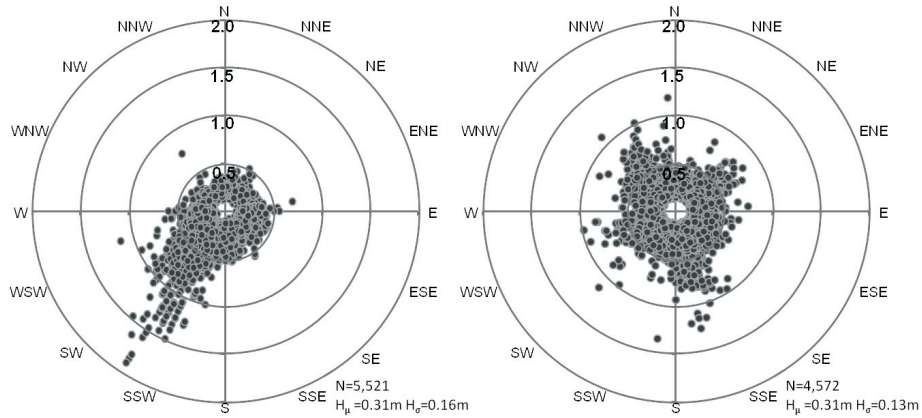
3. 大阪湾と伊勢湾の波浪特性

3.1 観測値から見た波浪特性

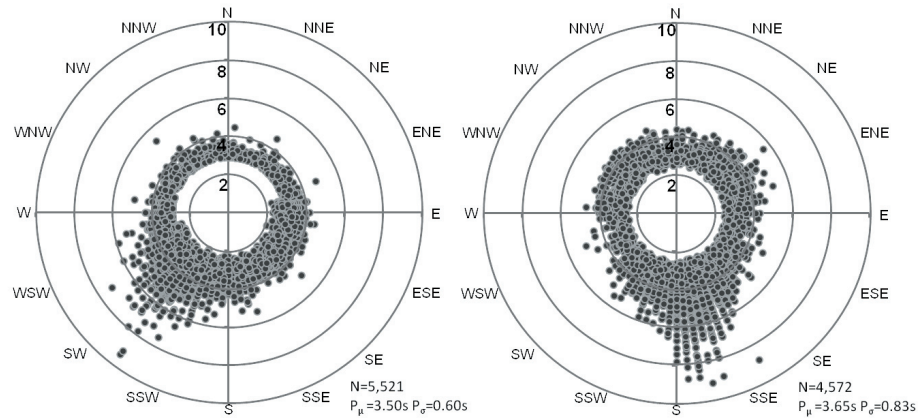
2008年1月1日から2009年12月31日までのナウファス神戸港、ナウファス伊勢湾における2時間ごとの値を用いて、波向別の観測波高の分布を調査した（第4図）。ナウファス神戸港とナウファス伊勢湾の平均波高はともに0.31mであり、観測波高はほぼ0.5m前後に集中している。波高0.5m以上についてみると、ナウファス伊勢湾ではほぼ全方向から来る波が観測されているのに対し、ナウファス神戸港では主に南南西～西南西から来る波である。これは、ナウファス神戸港から南西方向は楕円状の大阪湾の長軸方向にあたり、ほかの方向に比べて吹送距離が長くなるため、風浪が発達する傾向があると考えられる。

観測周期についても波向別の分布を調べた（第5図）。平均周期はナウファス神戸港が3.50秒、ナウファス伊勢湾は3.65秒とほぼ同じで、観測値のほとんどは4秒前後に集中している。周期4秒以上の波についてみると、ナウファス神戸港では南南西～西南西、ナウファス伊勢湾では南南東～南に偏っていることがわかった。

ナウファス神戸港、ナウファス伊勢湾の観測波



第4図 波向別の波高の分布 (左はナウファス神戸港, 右はナウファス伊勢湾)
観測波高の同心円は波高0.5m間隔を, Nは観測数を, H_{μ} は平均値を, H_{σ} は標準偏差.



第5図 波向別の周期の分布. 左はナウファス神戸港, 右はナウファス伊勢湾
観測周期の同心円は周期2秒間隔を, Nは観測数を, P_{μ} は平均値を, P_{σ} は標準偏差.

第1表 ナウファス神戸港における波高 (0.5m間隔) と周期 (1秒間隔) の出現率 (%)

波高 (m)	2.5-3.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.0-2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.5-2.0	0	0	0	0	0.04	0.07	0	0	0	0	0
	1.0-1.5	0	0	0	0.05	0.78	0.05	0	0	0	0	0
	0.5-1.0	0	0	0.09	5.96	1.94	0.16	0.05	0.04	0	0.04	0
	0.0-0.5	0	0	13.37	63.67	11.59	1.59	0.42	0.09	0	0	0
		0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	
		周期 (sec)										

第2表 ナウファス伊勢湾における波高 (0.5m間隔) と周期 (1秒間隔) の出現率 (%)

波高 (m)	2.5-3.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.0-2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.5-2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.0-1.5	0	0	0	0.13	0.11	0	0	0	0	0	0
	0.5-1.0	0	0	1.60	5.51	0.70	0.28	0.07	0.04	0	0	0
	0.0-0.5	0	0	18.61	45.65	21.26	4.09	1.36	0.35	0.22	0.02	0
		0.0-1.0	1.0-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	
		周期 (sec)										

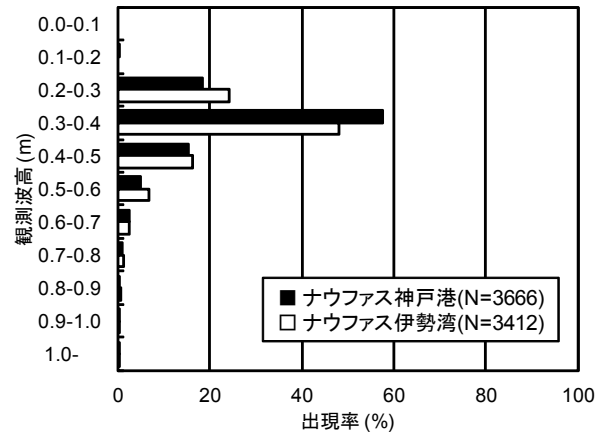
高を0.5m 間隔、観測周期を1秒間隔で階級化し、これらを組み合わせた波の出現率をそれぞれ第1表、第2表に示した。両観測点とも波高0.5m未満、周期3～4秒の波が最も多く観測された。また、周期6秒を超える波の波高は全て1m未満であった。大阪湾や伊勢湾における吹送距離は最長55km程度であり、SMB法(Bretschneider,1958)によると、風浪が卓越している場における周期6秒程度の波高は2～3m、周期7秒程度の波高は3～4mと推定されるので、これらは明らかに風浪ではなくうねりであるといえる。すなわち、両観測点にみられる南よりから到達する周期6秒以上のうねりは、外海(太平洋)から狭い海峡(友ヶ島水道や伊良湖水道)を通過して内海(大阪湾や伊勢湾)に入った後、観測点まで到達していると考えられる。

3.2 モデルの予想特性

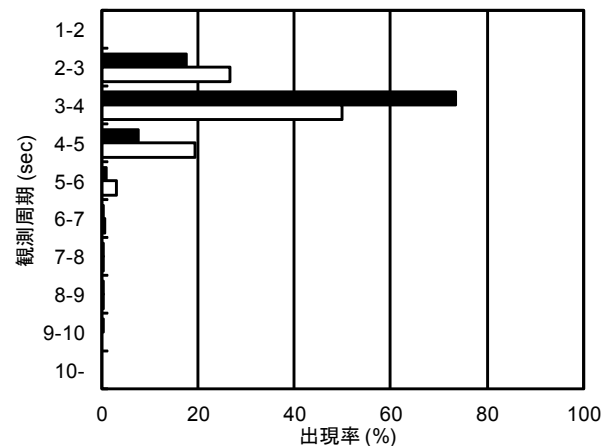
3.2.1 モデルの予想特性の評価

本調査で利用したデータ中、予想波高0.3m未満の割合は、ナウファス神戸港で95.5%、ナウファス伊勢湾で83.7%と大半を占めていた。予想波高0.3m未満における観測波高、観測周期の出現率をそれぞれ第6図、第7図に示す。両観測点ともに、観測波高は0.2～0.5mが約90%、観測周期は2～5秒が約95%を占めており、高い頻度で予想波高(0.20m)、予想周期(2.0秒)とほぼ同等の波が観測されている。このため、モデルとの差を0.5m単位でコメントする支援情報では、予想波高が0.3m未満の場合、モデルとの差についてコメントするケースは少ないといえる。

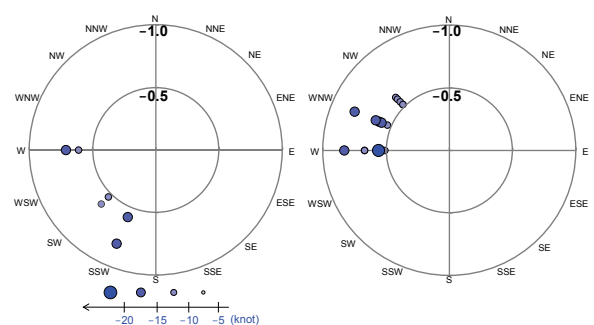
一方、予想波高0.3m未満のなかで、予想波高が観測波高より0.5m以上低い事例は、ナウファス神戸港7例(0.19%)、ナウファス伊勢湾18例(0.53%)であった。このときの波高の予想誤差と風速の予想誤差を観測風向別に示す(第8図)。ナウファス神戸港では風向が南南西～西の南西方向、ナウファス伊勢湾では西～北西の北西方向にそれぞれ限られており、全ての事例において予想風速が観測風速より5knot(1knot=約0.514m/s)以上弱いときに発現している。また、観測風向が東よりでは一度も発現していない。これらのこと



第6図 予想波高0.3m未満におけるナウファス神戸港とナウファス伊勢湾の観測波高の出現率(%)



第7図 予想波高0.3m未満におけるナウファス神戸港とナウファス伊勢湾の観測周期の出現率(%)



第8図 予想波高0.3m未満における観測風向別の波高の予想誤差

波高の予想誤差が-0.5m以下の事例について示す。左がナウファス神戸港、右がナウファス伊勢湾で、同心円は波高の予想誤差0.5m間隔。シンボルが大きいほど、風速の予想誤差が大きい。

から、両観測点において波高が 0.3m 未満と予想された場合、おおむねモデルと同程度の波高が観測されており、支援情報のコメントの用語でいえば「モデル並み」「モデル基本」と考えることができる。しかし、特定の風向（ナウファス神戸港では南西方向、ナウファス伊勢湾では北西方向）で予想風速が観測風速より 5knot 以上弱い場合、予想波高の方が 0.5 ~ 1.0m 低い波となることがある。観測点でこれら特定の風向が見込まれる場合には、近傍の海上空港の風に留意する必要がある。

予想波高 0.3m 以上の事例はナウファス神戸港 193 例 (4.5%)、ナウファス伊勢湾 674 例 (16.3%) と少ないが、波高は 0.01m 単位で出力されており、観測との対応関係を詳細に知ることができる。以降、予想波高が 0.3m 以上であった事例を対象に、調査結果を報告する。観測波高と予想波高の直接比較のほか、観測風向別及び季節別（春：3-5 月，夏：6-8 月，秋：9-11 月，冬：12-2 月）に整理してモデル予想値の評価を行った。評価には以下の式から求めたバイアス、二乗平均平方根誤差 (RMSE = Root Mean Square Error)、相関係数を用いた。

$$\text{バイアス} = \frac{1}{n} \sum (\text{予想値} - \text{観測値}) \quad n: \text{事例数}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\text{予想値} - \text{観測値})^2}$$

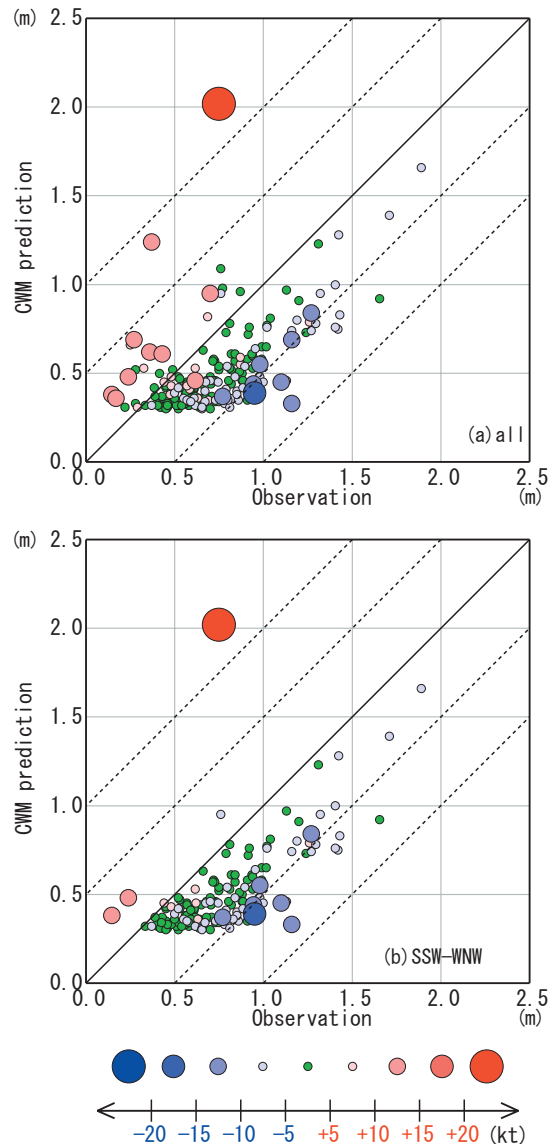
$$\text{相関係数} = \frac{\sum (\text{予想値} - \text{予想値の平均})(\text{観測値} - \text{観測値の平均})}{\sqrt{\sum (\text{予想値} - \text{予想値の平均})^2} \sqrt{\sum (\text{観測値} - \text{観測値の平均})^2}}$$

風浪の発達においては、風速及び風向が重要な要素となるため、観測風向別及び季節別の調査の前に風向の比較を行った。また、風速の予想誤差が及ぼす影響も考慮し、風速の予想誤差が 5knot 未満の事例についてもバイアス、RMSE、相関係数を求めた。なお、支援情報においては風速の予想誤差に対する波高の修正量の目安を、風速の予想誤差 5knot あたり波高 0.5 ~ 1.0m とコメントしている。

3.2.2 大阪湾におけるモデルの予想特性

3.2.2.1 波高・風の特性

ナウファス神戸港における観測波高と予想波高とを比較した（第 9 図 a）。予想波高の 87% は観



第 9 図 予想波高 0.3m 以上におけるナウファス神戸港の観測波高（横軸）と予想波高（縦軸）との比較

(a)【上図】は期間中の全データ、(b)【下図】は観測風向が南南西～西北西のデータ。原点から右上にのびる直線は予想波高が観測波高と等しく、この直線を挟んだ両側の破線は波高の予想誤差 ±0.5m、±1.0m を表す。また、シンボルの大きさや色は風速の予想誤差。

測波高より低く、予想風速が観測風速と同等（緑色：予想誤差 5knot 未満）であっても、予想波高が観測波高より低い事例が 92% と圧倒的に多い。予想波高が観測波高より 0.5m 以上低かった事例

は 18 例 (9.3%) であり, 1.0m 以上低かった事例は 1 度もなかった. 逆に, 予想波高が観測波高より 0.5m 以上高かった事例は 2 例 (1.0%) であった. 観測波高と予想波高が最も離れたのは台風第 0918 号が愛知県を北東進していたときの事例であり, 観測波高 0.75m に対して予想波高 2.02m であった. このとき, 神戸空港の観測では西北西風 25knot に対してモデル予想は北西風 48knot であり, 予想風速が過大であったことが要因のひとつと考えられる.

観測風向と予想風向を比較すると (第 3 表), 予想風向が西の場合には西北西, 南南西の場合には南西と時計回りにずれて観測されていた事例が数例みられる. また, 南が予想されて北東となった特殊な数例 (状況は後述) を除くと, 予想風向と観測風向はおおむね同じ風向であるといえる.

観測風向別に, 波高の予想誤差について評価した (第 4 表). 約 8 割の事例の観測風向が南南西 ~ 西北西に集中している. これらの事例についてみると, 風速の予想誤差が ± 5knot 未満のとき (表中 () で示す), 観測波高及び予想波高の平均が最も高いのは南南西であり, 神戸港から見ると吹送距離の長い友ヶ島水道の方向にあたる. バイアスは全て負の値 (-0.34m ~ -0.20m) をとり, 最も小さいのは南南西 (-0.34m) である. RMSE はバイアスと同様に南南西が他方向に比べて大きく,

相関係数は西南西 (0.62) を除いておおむね 0.8 以上と高い. 風速の予想誤差が 5knot 以上の事例を含むと, 南南西の観測波高はほかの風向と比べて高い状態を維持し, バイアスは -0.43m と全体の 2 倍近い値となった. これは, 南南西における予想風速が観測風速より弱い事例が多いため (風速の予想誤差 5knot 以上の 22 事例中 20 事例) と考えられる. また, バイアスや RMSE としては悪くなっているが相関係数は 0.8 以上を維持しており, 風速の予想誤差による適切な補正を予想波高に加えることで, 観測波高に近い波高を見積もることが可能と考えられる.

一方, 観測風向が西及び西北西においては, 予想誤差が 5knot 以上の事例を含むと相関係数は著しく低下した. ここで, 事例の多い南南西 ~ 西北西における観測波高と予想波高とを比較した (第 9 図 b). 第 9 図 b において, さらに観測風向別に詳しく調べた結果 (図等省略), 予想波高が観測波高より低かった事例の観測風向は全て南南西 ~ 西南西であり, 高かった数事例は西及び西北西であることが分かった. これらの事例には 2009 年 8 月 11 日若しくは 2009 年 10 月 8 日の台風第 0909 号, 第 0918 号の影響を受けていた期間が含まれており, この期間を除くと, 西及び西北西の相関係数はそれぞれ 0.48 から 0.54, 0.39 から 0.73 へと高くなった. また, 北東ではバイアスは

第 3 表 予想波高 0.3m 以上におけるナウファス神戸港の観測風向に対する予想風向の頻度値は事例数.

予 想 風 向	NNE																	1	
	NE																		1
	ENE																	1	
	E																	1	1
	ESE																		
	SE																		
	SSE									1								1	
	S					1	1		6	2	3								5
	SSW			1	2	4	18	28	2	1			1				3		2
	SW						2	3											
	WSW					4	5	3											
	W			2	16	23	6												
	WNW		1		24	7													
	NW	1		1	2	1		1											
NNW				1															
N																			
		N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE	E	ENE	NE	NNE		
		観測風向																	

正となり、相関係数が小さい。これは第3表によると、予想風向が観測風向と逆の南と予想していた数例のためであるが、これらの事例では近傍に前線があり、前線通過のタイミングのずれと考えられる。

以上より、観測風向が南南西～西北西のときは、台風のような特別なじょう乱が無い限り、予想波高は観測波高より低くなる傾向があるといえる。

第4表と同様に、季節別にも評価した(第5表)。事例が多かったのは夏と冬であり、夏は南風、冬は明石海峡を抜けて来る西風が卓越する季節にあたる。バイアスは全ての季節において負であり、夏と冬が他の季節に比べて大きい。相関係数は秋を除いて高く、冬が最も高い。風速の予想誤差が5knot以上の事例を含むことで、相関係数は全ての季節において低くなった。中でも秋はRMSE

も大きくなり、予想精度がより下がったといえる。一方、事例数が多い冬では相関係数0.8以上を維持しており、RMSEの増加も小さい。観測風向別の予想値の評価において、台風の事例を除いた西よりの風の場合における波高の予想精度が高くなった傾向も考慮すると、冬の西よりの風の場合における予想精度は高いといえる。また、春は予想波高の平均がほかの季節に比べて高く、観測波高の平均も夏に次いで高い。バイアスが小さく、相関係数は0.53であるが、風速の予想誤差が5knot未満の場合は0.75と高いことから、春の予想精度は良いと考えられる。

3.2.2.2 波周期の特性

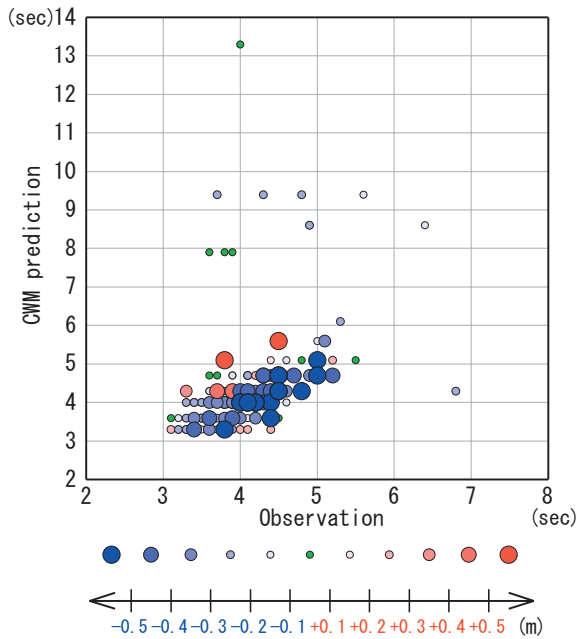
次に、ナウファス神戸港における観測周期と予想周期とを比較した(第10図)。観測周期、予想

第4表 予想波高0.3m以上におけるナウファス神戸港の観測風向別の波高の予想誤差の評価
()内は風速の予想誤差が5knot未満の事例。事例数10未満の場合は-。

観測風向	事例数	観測波高[平均] (m)	予想波高[平均] (m)	バイアス (m)	RMSE (m)	相関係数
NNE	3 (1)	-	-	-	-	-
NE	10 (4)	0.42 (-)	0.60 (-)	0.18 (-)	0.34 (-)	0.26 (-)
ENE	3 (2)	-	-	-	-	-
E	0	-	-	-	-	-
ESE	1 (0)	-	-	-	-	-
SE	1 (1)	-	-	-	-	-
SSE	4 (2)	-	-	-	-	-
S	5 (1)	-	-	-	-	-
SSW	34 (12)	1.10 (0.99)	0.67 (0.65)	-0.43 (-0.34)	0.46 (0.39)	0.85 (0.85)
SW	25 (18)	0.74 (0.70)	0.50 (0.50)	-0.24 (-0.20)	0.29 (0.24)	0.78 (0.80)
WSW	18 (12)	0.79 (0.70)	0.52 (0.44)	-0.27 (-0.26)	0.30 (0.29)	0.85 (0.62)
W	40 (21)	0.67 (0.66)	0.44 (0.44)	-0.22 (-0.22)	0.29 (0.24)	0.48 (0.81)
WNW	44 (31)	0.65 (0.65)	0.47 (0.43)	-0.18 (-0.21)	0.31 (0.24)	0.39 (0.80)
NW	3 (3)	-	-	-	-	-
NNW	1 (1)	-	-	-	-	-
N	1 (1)	-	-	-	-	-
全方向	193 (110)	0.74 (0.69)	0.52 (0.48)	-0.22 (-0.20)	0.33 (0.26)	0.59 (0.74)

第5表 予想波高0.3m以上におけるナウファス神戸港の季節別の波高の予想誤差の評価
()内は風速の予想誤差が5knot未満の事例。

季節	事例数	観測波高[平均] (m)	予想波高[平均] (m)	バイアス (m)	RMSE (m)	相関係数
春:3-5月	34 (16)	0.77 (0.77)	0.63 (0.61)	-0.14 (-0.15)	0.33 (0.26)	0.53 (0.75)
夏:6-8月	64 (34)	0.79 (0.74)	0.50 (0.49)	-0.29 (-0.24)	0.37 (0.30)	0.69 (0.76)
秋:9-11月	24 (14)	0.63 (0.59)	0.54 (0.44)	-0.09 (-0.15)	0.35 (0.23)	0.31 (0.48)
冬:12-2月	71 (46)	0.71 (0.65)	0.49 (0.45)	-0.23 (-0.20)	0.29 (0.24)	0.80 (0.82)
通年	193 (110)	0.74 (0.69)	0.52 (0.48)	-0.22 (-0.20)	0.33 (0.26)	0.59 (0.74)



第 10 図 予想波高 0.3m 以上におけるナウファス神戸港の観測周期（横軸）と予想周期（縦軸）との比較

原点から右上にのびる直線は予想周期が観測周期と等しいことを表す。シンボルの大きさと色は波高の予想誤差。

周期とも 5 秒以下が約 90% を占め、バイアスは -0.35 秒、RMSE は 1.25 秒と周期の予想誤差は小さく、周期の予想精度は良いといえる。ただし、観測波高と同様に、観測周期についても台風の接近、通過時には予想誤差が大きくなることもある。第 10 図の最も上のシンボルは台風第 0918 号が知多半島付近に上陸後に北東進していた際の事例であり、予想周期 13.3 秒（予想波高 0.45m）に対して、観測周期 4.0 秒（観測波高 0.44m）であった。

3.2.2.3 モデルの予想特性のまとめ

ナウファス神戸港における波高の予想は全体的に負のバイアスであった。観測風向別にみると、南西方向では風速の予想誤差が小さい場合でも負のバイアスが大きく、また、予想風速が観測風速よりも弱い事例が多い。しかし、相関係数はおおむね高い値であり、風速の予想誤差に対する波高の修正量を求めることで、観測波高に近い値を見積もることも可能と考えられる。また、季節別にみると冬（特に西風が吹く事例）の予想精度が高

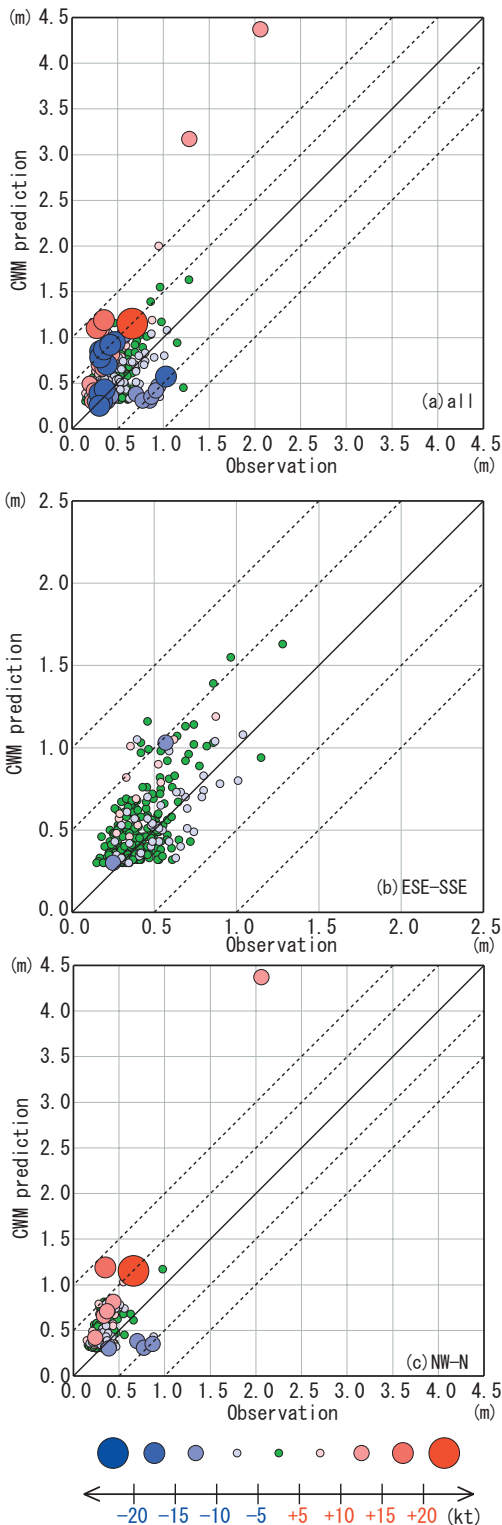
く、秋は低い傾向がある。周期については、5 秒以下の事例が 90% を占めていることから風浪主体の場合が多く、予想精度が良いといえる。上述した予想波高の過小表現を考慮すると、ナウファス神戸港の予想波高が 0.3m 以上の場合、モデルは南西方向からの風浪を過小に表現していると考えられる。

3.2.3 伊勢湾におけるモデルの予想特性

3.2.3.1 波高・風の特徴

ナウファス伊勢湾における観測波高と予想波高とを比較した（第 11 図 a）。ナウファス伊勢湾では大阪湾とは逆に予想波高の 77% が観測波高より高く、予想風速が観測風速と同等（緑色：予想誤差 5knot 未満）であっても、予想波高が観測波高よりも高い事例が 79% と多かった。観測波高に対する予想波高のバイアスは 0.11m、RMSE は 0.24m であり、大阪湾に比べると小さい。予想波高が観測波高より 0.5m 以上低かった事例は 5 例（0.74%）で、1.0m 以上低かった事例は 1 度もなかった。一方、観測波高より 0.5m 以上高かった事例は 16 例（2.3%）、1.0m 以上高かった事例は 3 例（0.45%）であり、ナウファス神戸港とは逆に、観測波高 +0.5m 以上となる事例の方が -0.5m 以下となった事例より多かった。波高の予想誤差の最大は 2.31m（観測波高 2.06m、予想波高 4.37m）であった。予想誤差が 1.0m 以上大きかった 3 例はいずれも台風第 0918 号の接近に伴って発現されたもので、予想風速が観測風速より 10knot 以上強かったことが要因のひとつと考えられる。

ナウファス神戸港と同様に、ナウファス伊勢湾についても観測風向と予想風向とを比較すると（第 6 表）、おおむね一致していたが、予想風向が南南東の場合には南東、南東の場合には東南東と反時計回り、北西の場合には北北西と時計回りにずれて観測されていた事例がみられた。また、北東～東～南が予想された場合で、大きく外れる例がある。続いて観測風向別に、波高の予想誤差について評価した（第 7 表）。ナウファス伊勢湾では全ての観測風向における観測波高の平均が 0.5m を超えず、バイアスが正となっているのが特徴的である。事例数は東南東～南南東、及び北



第 11 図 予想波高 0.3m 以上におけるナウファス伊勢湾の観測波高（横軸）と予想波高（縦軸）との比較
 (a) 【上図】は期間中の全データ，(b) 【中央図】は観測風向が東南東～南南東のデータ，(c) 【下図】は北西～北のデータ。原点から右上にのびる直線及びこの直線を挟んだ両側の破線については第 9 図参照。

西～北がほかの風向に比べて多かった。風速の予想誤差が 5knot 未満の場合，東南東～南南東及び北西～北について，相関係数は 0.6～0.8 程度で，RMSE も小さく，予想精度はおおむね良いといえる。事例数の多い東南東～南南東，北西～北における観測波高と予想波高をそれぞれ比較した（第 11 図 b，第 11 図 c）。第 11 図 b より，観測風向が東南東～南南東の事例における風速の予想誤差は 5knot 未満の事例（緑シンボル）が多く，第 7 表において風速の予想誤差が 5knot 以上の事例を含めても，バイアス，RMSE，相関係数が大きく変化しない傾向と一致する。一方，第 11 図 c から，観測風向が北西～北の事例では観測風速と予想風速が顕著に異なる事例がみられる。これは第 7 表において風速の予想誤差が 5knot 以上の事例を含めた場合，北西の RMSE が高くなり，予想精度が悪くなった傾向と一致する。

季節別に整理した第 8 表より，予想波高が 0.3m 以上であった事例は春から秋にかけて多く，冬は極端に少ない。夏が最も多く，伊勢湾やその外海である遠州灘や熊野灘において南よりの風が卓越する季節にあたる。バイアスは全ての季節で正（0.1m 程度）となっており，冬はほぼゼロに等しい。風速の予想誤差が 5knot 未満では相関係数は春が 0.8 程度と高いが，夏から冬は 0.5 程度であった。風速の予想誤差が 5knot 以上の事例を含めると，春や夏の相関係数は大きく変化しなかったが，秋は 0.74 と高くなり，冬は 0.12 と低くなった。秋については台風第 0918 号の 3 事例を除くと相関係数は 0.46 まで下がり，大きく変化していないといえる。冬だけ相関係数が大きく変化した要因のひとつとして，風速の予想誤差が 5knot 以上の事例数の割合が多いことが考えられる。バイアス，RMSE，相関係数を総じてみると，一年の中で予想精度が良いのは春であった。

3.2.3.2 波周期の特性

ナウファス伊勢湾における観測周期と予想周期とを比較した（第 12 図）。予想周期の 96% が観測周期より長く，バイアスは 4.62 秒，RMSE は 5.42 秒で大坂湾とは傾向が異なり，周期の予想誤差は大きい。第 8 表と同様に，周期についても季

第6表 予想波高0.3m以上におけるナウファス伊勢湾の観測風向に対する予想風向の頻度値は事例数.

予想風向	NNE		1	2	2			1			1	2			2		5	
	NE	3	3	3	1										1		1	
	ENE	4	2		2	1	1		1	2	1				1		5	
	E	3	4	1					1		2	1	5	2	1	2	4	
	ESE	7	5	3	2			1		2	2	10	31	5	8	5	2	
	SE	2	3	3		2		2	1	6	10	46	64	14	1	1		
	SSE	1	3		1	3	2	3	8	11	31	46	19	1	1	1		
	S	1	1	3	2	2	2	3	3	7	10	6	4		1	1		
	SSW	1				1			1	3	1							
	SW						1											
	WSW	1		1		1	1					1	1	1				
	W	1	1		1	4	4		1								1	
	WNW		1	7	5	4	4	1			1						1	
	NW	2	13	28	8	3	5	2									2	1
	NNW	7	15	7	1	1	1		2				1					4
	N	12	4	3		1	2	1				1			1	2		3
	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE	E	ENE	NE	NNE		
観測風向																		

第7表 予想波高0.3m以上におけるナウファス伊勢湾の観測風向別の波高の予想誤差の評価
()内は風速の予想誤差が5knot未満の事例. 静穏時は統計値を算出していない.

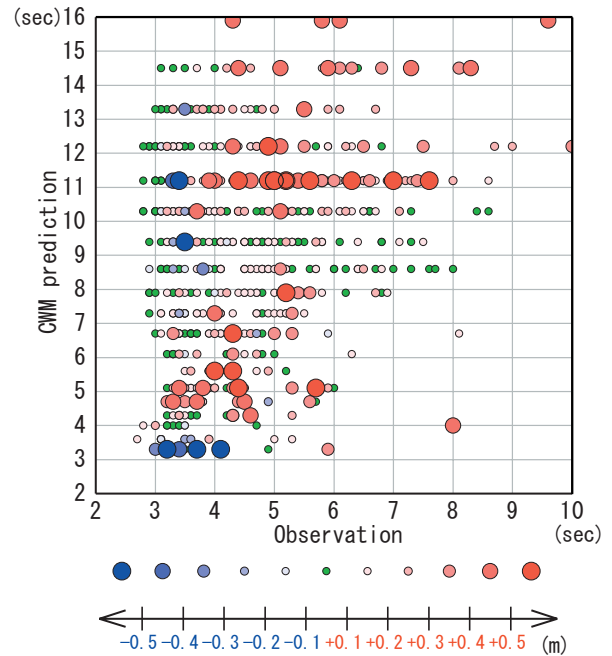
観測風向	事例数	観測波高[平均] (m)	予想波高[平均] (m)	バイアス (m)	RMSE (m)	相関係数
NNE	26 (18)	0.32 (0.28)	0.49 (0.38)	0.16 (0.10)	0.27 (0.15)	0.45 (0.13)
NE	15 (12)	0.36 (0.29)	0.57 (0.38)	0.21 (0.09)	0.50 (0.13)	0.96 (0.45)
ENE	17 (13)	0.31 (0.32)	0.40 (0.42)	0.09 (0.09)	0.15 (0.15)	0.46 (0.56)
E	23 (20)	0.35 (0.34)	0.51 (0.52)	0.16 (0.18)	0.22 (0.23)	0.57 (0.61)
ESE	125 (89)	0.45 (0.41)	0.57 (0.55)	0.12 (0.15)	0.21 (0.22)	0.69 (0.77)
SE	113 (100)	0.40 (0.39)	0.46 (0.44)	0.06 (0.05)	0.17 (0.15)	0.56 (0.62)
SSE	59 (47)	0.42 (0.41)	0.50 (0.46)	0.08 (0.05)	0.19 (0.17)	0.76 (0.79)
S	31 (27)	0.34 (0.34)	0.45 (0.45)	0.11 (0.11)	0.17 (0.18)	0.47 (0.47)
SSW	18 (14)	0.30 (0.29)	0.39 (0.37)	0.09 (0.08)	0.13 (0.11)	0.01 (0.18)
SW	14 (11)	0.30 (0.31)	0.43 (0.44)	0.13 (0.14)	0.15 (0.16)	0.75 (0.75)
WSW	23 (16)	0.38 (0.35)	0.53 (0.43)	0.15 (0.08)	0.29 (0.14)	0.76 (0.54)
W	23 (17)	0.42 (0.38)	0.44 (0.43)	0.01 (0.05)	0.29 (0.26)	-0.04 (0.03)
WNW	25 (18)	0.40 (0.35)	0.40 (0.39)	0.00 (0.04)	0.20 (0.15)	0.42 (0.58)
NW	61 (39)	0.45 (0.37)	0.54 (0.47)	0.09 (0.09)	0.37 (0.15)	0.78 (0.75)
NNW	56 (34)	0.33 (0.31)	0.54 (0.51)	0.21 (0.19)	0.28 (0.26)	0.57 (0.62)
N	45 (27)	0.30 (0.29)	0.46 (0.45)	0.16 (0.16)	0.19 (0.20)	0.66 (0.58)
全方向	674 (502)	0.39 (0.36)	0.50 (0.46)	0.11 (0.10)	0.24 (0.18)	0.64 (0.62)

第8表 予想波高0.3m以上におけるナウファス伊勢湾の季節別の波高の予想誤差の評価
()内は風速の予想誤差が5knot未満の事例.

季節	事例数	観測波高[平均] (m)	予想波高[平均] (m)	バイアス (m)	RMSE (m)	相関係数
春:3-5月	128 (91)	0.45 (0.44)	0.55 (0.55)	0.10 (0.11)	0.20 (0.19)	0.73 (0.79)
夏:6-8月	280 (230)	0.34 (0.33)	0.45 (0.43)	0.11 (0.10)	0.20 (0.17)	0.44 (0.48)
秋:9-11月	228 (168)	0.39 (0.36)	0.52 (0.47)	0.13 (0.11)	0.29 (0.20)	0.74 (0.48)
冬:12-2月	38 (13)	0.49 (0.46)	0.51 (0.50)	0.02 (0.04)	0.29 (0.21)	0.12 (0.48)
通年	674 (502)	0.39 (0.36)	0.50 (0.46)	0.11 (0.10)	0.24 (0.18)	0.64 (0.62)

節別に整理した（第9表）。夏から秋にかけて、バイアスとRMSEが大きくなることが特徴といえる。この季節は南風が卓越する時期にあたり、外海（太平洋）から内海（伊勢湾）に流入する南からのうねりにとっては追い風となる。そのため、追い風による高周波数側（短周期側）の風浪のエネルギーが、非線形相互作用によって低周波数側（長周期側）へ輸送された結果、周期の長いうねりとして残った可能性がある。また、春と冬のバイアスが夏と秋に比べて小さいのは、季節的に北よりの風が卓越するため、モデルはナウファス伊勢湾のある湾奥では北からの風浪が卓越すると表現することが多くなるためと考えられる。一年を通して予想周期が観測周期よりも過大となるのは、格子の粗さはもちろん、伊勢湾口におけるモデルの格子点の配置も注目すべきである。伊勢湾口の伊良湖水道には3つの格子が設定されており（第3図）、外海からの入口が広いために湾奥のナウファス伊勢湾に対応する格子点までうねりを伝播しやすくなっている可能性がある。一方、大阪湾では外海との間（友ヶ島水道）に配置されている格子点は1つであり、入口が狭いためナウファス神戸港に対応する格子点までうねりが伝播すると表現されることは少ないと考えられる。相関係数がいずれの季節も小さい傾向があるのは、観測

周期が連続値であるのに対して、予想周期が25成分（26.7秒，24.5秒，…，3.6秒，3.3秒）で計算・出力されていることも影響している可能性がある。



第12図 予想波高0.3m以上におけるナウファス伊勢湾の観測周期（横軸）と予想周期（縦軸）との比較
シンボルの大きさと色は波高の予想誤差。

第9表 予想波高0.3m以上におけるナウファス伊勢湾の季節別の周期の予想誤差の評価

季節	事例数	観測周期[平均] (sec)	予想周期[平均] (sec)	バイアス (sec)	RMSE (sec)	相関係数
春:3-5月	128	4.57	7.55	2.98	3.40	0.63
夏:6-8月	280	4.13	9.45	5.32	5.90	0.15
秋:9-11月	228	4.73	9.86	5.13	5.93	0.22
冬:12-2月	38	4.62	6.71	2.09	3.81	0.22
通年	674	4.44	9.07	4.63	5.42	0.23

3.2.3.3 モデルの予想特性のまとめ

ナウファス伊勢湾の予想波高は大阪湾とは逆に、全体的に正のバイアスであった。観測風向別にみると、事例数の多い南東方向及び北西方向では相関係数 0.6～0.8 であり、予想精度はおおむね良好であった。季節別に整理した結果より、風速が 5knot 以上異なる事例を含めても、冬を除いてその相関係数は大きく変化しなかった。予想周期については特に夏から秋（南よりの風が卓越しやすい季節）にかけて観測周期より過大となり、外海から内海へ流入して来るうねりを過大に表現していたとみられる。このうねりの過大表現が 0.1m 程度の正のバイアスの要因とみられる。

4. おわりに

ナウファス神戸港とナウファス伊勢湾における観測値とモデル予想値を用いて、神戸海洋気象台担当海域の内海のうち、大阪湾と伊勢湾における波浪特性を調査した。それぞれの観測点の2年間の統計調査により、内海の観測点のため波は通常穏やかであるが、ナウファス神戸港では南西からの風浪が卓越すること、及び両観測点において太平洋からのうねりが湾奥まで到達することが分かった。

また、観測値とモデルの予想値との比較を行った結果、予想波高が 0.3m 未満の場合、波高の予想誤差はおおむね 0.5m 未満でモデルの精度は良いといえるが、大阪湾は南西方向、伊勢湾では北西方向の風が予想される時に、観測風速が 5knot 以上強くなる場合には、観測波高も 0.5m 以上高くなることもある。予想波高が 0.3m 以上の場合、

大阪湾では南西方向からの風浪を過小に表現する傾向がみられた。観測風速が南西方向の場合、風速の予想誤差が大きい事例を含むとその傾向（バイアス）は大きくなるため、予想風速と観測風速の差を考慮し、波高を適宜修正する必要がある。

一方、伊勢湾では夏から秋にかけて、南からのうねりを過大に表現する傾向がみられた。観測に対する予想の正のバイアスは、大阪湾の負バイアスほど大きくないが、要因としてはうねりが残りやすいというモデルの傾向や格子設定が考えられる。また、両観測点において波高の予想誤差が 1.0m を超えるような事例は、今回整理した期間ではいずれも台風が関係しており、台風の接近、通過時には実況の監視が特に重要であることが分かった。また、本稿では観測風向と予想風向をほぼ同一とみなして調査を行ったが、事例をより多く集め、風向の予想誤差、風速の予想誤差を別々に評価することにより、予想と観測が異なる場合の波浪の見通しについて、詳細な調査が可能となるかもしれない。

今後は、国土交通省水管理・国土保全局（旧河川局）管理の波浪観測所など、非即時データも利用して内海の波浪特性についてさらに調査を進めたい。

参考文献

- Bretschneider, C. L. (1958) : Revision in wave forecasting; deep water and shallow water. Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 30-67.