

特集「波浪・潮汐に係る海域特性の調査及び支援資料作成技術の向上」

太平洋への吹き出し風予想時における 沿岸波浪モデルの修正量について

金子 秀毅^{*1}・瀨名 実^{*2}・出口 英昭^{*3}・井上 正廣^{*4}・遠峯 勉^{*5}

要 旨

冬型の気圧配置など日本列島から太平洋へ吹き出す風の場合、東海・近畿・四国地方の太平洋沿岸で観測される波高は沿岸波浪モデルが予想する波高より高めに経過する傾向があり、この波高の差が量的にどの程度の大きさがあるか調査を行った。その結果、海峡・海域により観測と予想との波高の差の大きさは異なり、吹き出し風の風速が20knotを超える場合、伊良湖水道や紀伊水道では0.75m、豊後水道では0.25m予想より高く波高が経過することがわかった。本調査結果で示した波高の差は沿岸波浪モデルが予想する波高に対する「修正量」として神戸海洋気象台が発表する「波浪に関する地方解説資料」へ採り入れており、その精度の向上に大きく役立つものと考えられる。

1. はじめに

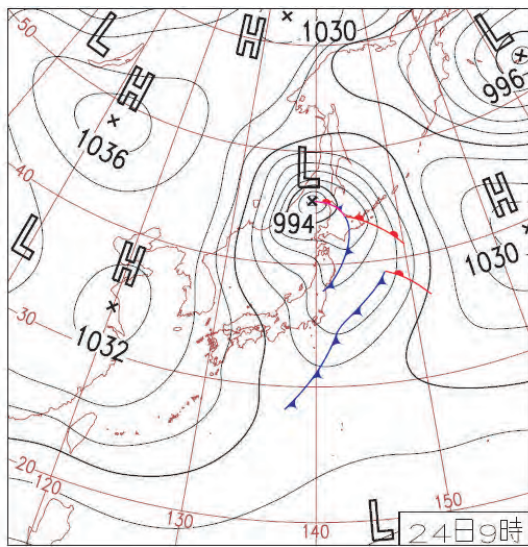
2012年3月28日より、神戸海洋気象台は4つの地方予報中枢（大阪・高松・広島・名古屋）を対象に「波浪に関する地方解説資料」（以下、解説資料とする）の提供を開始した。解説資料では、気象庁で現業運用している沿岸波浪モデル（以下、モデルとする）により予想される波高（以下、予想波高とする）と沿岸波浪計などから得られる実況の波高（以下、観測波高とする）との間に顕著な差がある場合、あるいは今後顕著な差が現れると見込まれる場合に、その差を「修正量」として、修正量の大きさ（0.25m単位）のほか要因（モデルの特性など）や傾向（持続、拡大、縮小など）、期間（～から、～まで）等をコメントしている。解説資料を作成するにあたり、各海域に特有の波浪特性を把握・熟知する必要があるため、当台では瀨名ほか（2012）が大阪湾と伊勢湾の波浪特性を、

金子ほか（2011）が播磨南東部の波浪特性を報告するなど、積極的に調査を進めているところである。

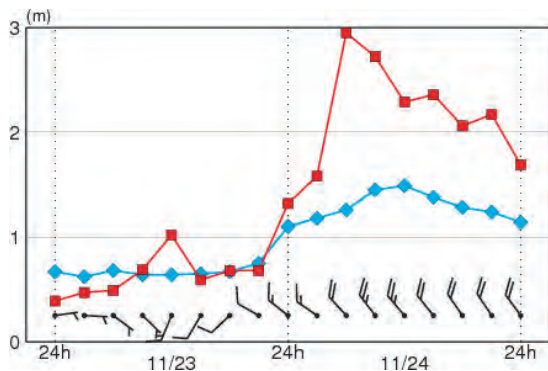
本稿では、西～北よりの風が伊良湖水道や紀伊水道などを経て太平洋へ吹き出すときに、東海・近畿・四国地方の太平洋沿岸での観測波高が予想波高より高めに経過するケースを取り上げた。第1図は2011年11月24日の天気図で、日本列島は冬型の気圧配置となっており、和歌山県白浜町の沖合に設置された和歌山南西沖 GPS 波浪計（位置は第3図参照）では、11月23日24時以降北西の風が強まる予想となっていた（第2図）。これに対応して同地点での波高も上昇する予想となっていたが、観測波高は予想波高より0.5mから1.5m高く経過した（第2図）。観測波高と予想波高との差は、風向が北西、すなわち紀伊水道から太平洋へ吹き出す風向に変化し、風速も15knot

*1 神戸海洋気象台（現 仙台管区気象台） *2 地球環境・海洋部海洋気象課 *3 神戸海洋気象台（現 大阪管区気象台）

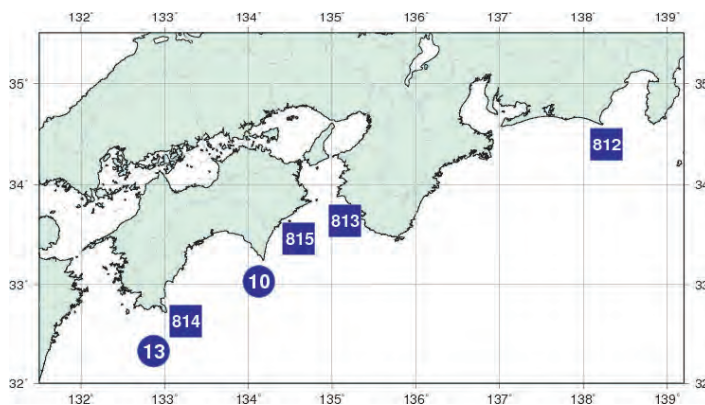
*4 神戸海洋気象台 *5 函館海洋気象台（現 札幌管区気象台）



第1図 2011年11月24日の09時の地上天気図
気象庁ホームページ「日々の天気図」より。



第2図 和歌山南西沖 GPS 波浪計における2011年11月23日から24日にかけての3時間ごとの予想風向・予想風速(5knot単位)・予想波高(青:◆), 及び観測波高(赤:■)の経過



第3図 神戸担当海域におけるGPS波浪計(□印;国土交通省港湾局により設置)とGPS式の波浪計を搭載した黒潮牧場ブイ(○印;高知県により設置)の設置地点図

数字は地点番号を表し、地点名はそれぞれ、812:静岡御前崎沖, 813:和歌山南西沖, 815:徳島海陽沖, 10:黒潮牧場10号, 814:高知西部沖, 13:黒潮牧場13号である。

以上に強まってから現れている。このことから、風の強まりに伴う風浪の発達をモデルが過小に表現していることが推測される。太平洋への吹き出し風が予想されたときに、モデルの特性により過小に表現されると見込まれる予想波高との差、すなわち「修正量」の大きさを見積もるため、気象モデル(GSM)により予想される風向・風速(以下、予想風向・予想風速とする)に対し、予想波高と観測波高との差(以下、波高差とする)がどのような関係にあるか、統計的に調査した。

2. 利用したデータ

モデルの予想波高は、観測に対して負のバイアスがあったが、2011年4月にエネルギー入力過程の見直しが行われて冬季の負バイアスが改善された(吉田ほか, 2012)。本調査は主に冬季に多く出現する事例を対象としており、モデルの改良前後で予想値に明瞭な差異があると考えられることから、調査対象の期間はモデル改良後の2011年4月から太平洋へ吹き出し風が多く出現する冬季を含む2012年3月までの1年間とした。

観測データは、国土交通省港湾局により東海地方沿岸から四国地方太平洋沿岸に設置されたGPS波浪計、及び高知県により室戸沖と足摺沖に設置され、GPS式の波浪計を搭載した黒潮牧場ブイで観測された波浪と海上風のデータを利用した。第3図にGPS波浪計と黒潮牧場ブイの設置地点、その地点番号、及び地点名を示す。なお、

三重尾鷲沖にも GPS 波浪計があるが、設置地点が紀伊山地の陸陰となり太平洋へ吹き出し風による影響は小さいと考えられるため、調査対象から除外した。

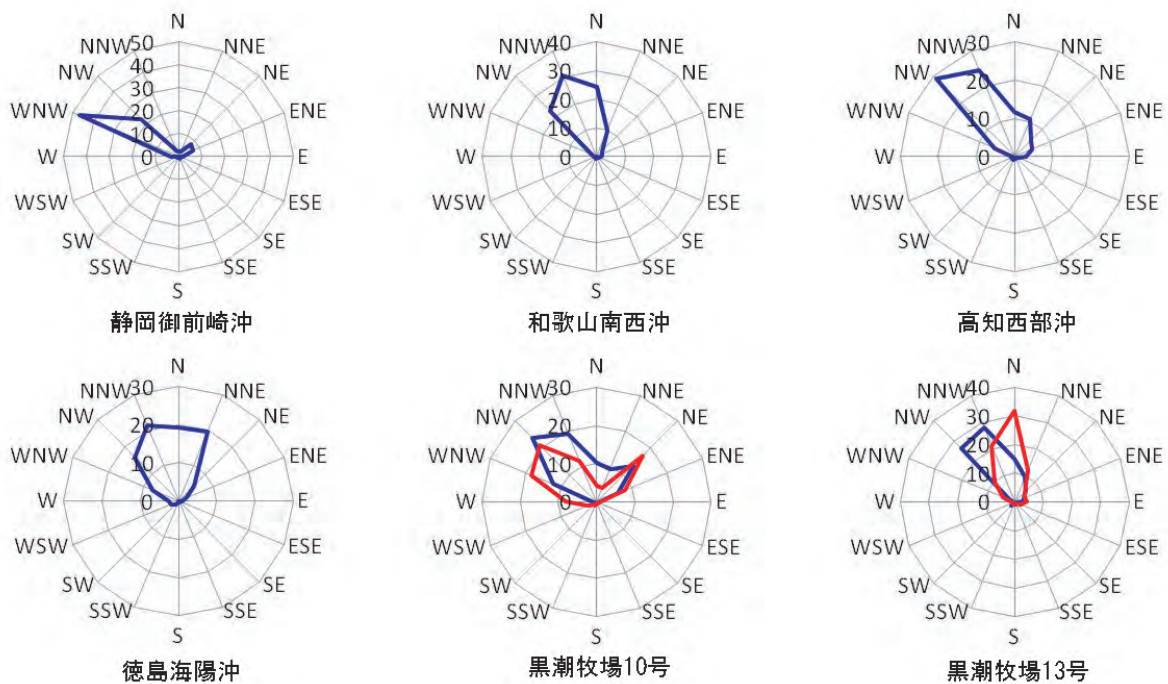
モデルの予想データは、GPS 波浪計や黒潮牧場ブイの設置地点に最も近い格子点(0.05 度間隔)における 3 時間間隔の波浪とモデルの外力となる GSM の海上風の時系列データを利用した。

3. 調査結果

3.1 吹き出し風の定義

太平洋へ吹き出す風は海陸分布や山岳などの地形の影響を強く受ける。そのため、GPS 波浪計・黒潮牧場ブイでの風向はその地点に特有の風向を示すと考えられる。そこで、太平洋への吹き出す風が予想されたときに多く出現する風向を波浪観測点ごとに求めた。第 4 図は各波浪観測点の冬(12 月～2 月)の風向(16 方位)の出現率を表す風配図である。海上風の観測データには長期あるいは断続的な欠測や異常と思われる数値が多くみられたため、風配図の作成には欠測がなく均質な各波浪観測点の海上風の予想データ(3 時間間隔の

データで、03 時・09 時・15 時・21 時はモデル初期値、06 時・12 時・18 時・24 時は 3 時間後の予想値)を用いた。更に、調査対象期間内に欠測や異常値のなかった黒潮牧場 10 号・13 号については海上風の観測データによる風向出現率も併せて風配図に表した。両波浪観測地点とも予想データによる風配図と観測データによる風配図に違いがみられ、黒潮牧場 10 号では観測は予想より西より、黒潮牧場 13 号では予想より北よりの風向が観測される傾向にあることがわかる。このように太平洋へ吹き出す風は予想と観測との間に多少の誤差があることから、太平洋へ吹き出す風の風向を幅広くとり、予想データによる最も出現頻度の高い風向(最多風向)と最多風向に近接する 2 番目に頻度の高い風向、同 3 番目に高い風向の 3 方位からの風向を合せて「吹き出し風向」と定義した。予想データによる吹き出し風向と全風向に対する比率は、黒潮牧場 10 号では西北西～北北西で約 55%、黒潮牧場 13 号では北西～北で約 69%となる。一方、観測データによる吹き出し風向の比率は黒潮牧場 10 号約 51%、黒潮牧場 13 号で約 69%と予想データによる吹き出し風向の比率



第 4 図 予測データから求めた各波浪観測点の冬(12 月～2 月)の風配図(青線)

データ数は 2011 年 12 月～2012 年 2 月までの 91 日×8 個/日の 728 個。単位はパーセント。期間中欠測のなかった黒潮牧場 10 号・13 号には観測データによる風配図(赤線)も表した。

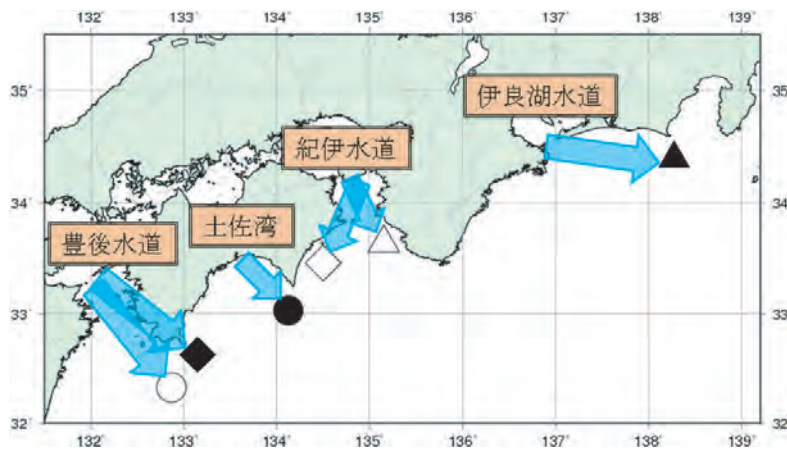
とほぼ等しくなり、吹き出し風の風向を幅広くとることで、予想と観測との風向の誤差をカバーできると考えた。同様に、静岡御前崎沖では西～北西、和歌山南西沖・高知西部沖では北西～北、徳島海陽沖では北北西～北北東を吹き出し風向とした。地理的には、静岡御前崎沖は伊良湖水道から、和歌山南西沖と徳島海陽沖は紀伊水道から、黒潮牧場10号は土佐湾から、高知西部沖と黒潮牧場13号は豊後水道から太平洋へ吹き出す経路にあたる(第5図)。

第6図は月ごとの吹き出し風向の割合を表した

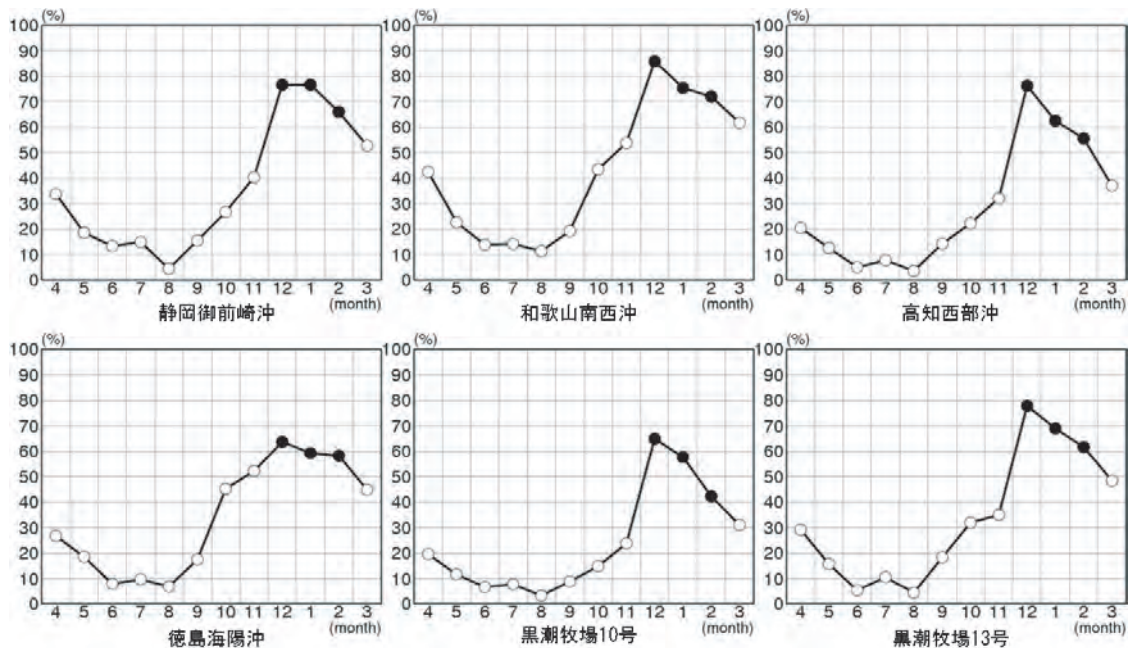
図で、各地点とも12月が60～90%と年で最も吹き出し風向の割合が大きく、次いで1月、2月の順となっている。一方で、夏(6月～8月)は10%前後で、冬に比べると極端に小さくなっている。太平洋への吹き出し風は、冬季に顕著に現れる季節変化が明瞭な現象であるといえる。

3.2 吹き出し風予想時の予想波高と観測波高の統計的關係

太平洋への吹き出し風が予想されたときの予想波高と観測波高の統計的關係を把握するため、各



第5図 各波浪観測点の冬(12月～2月)の最多風向と太平洋への吹き出し風が通過する海峡・海域の名称
▲は静岡御前崎沖・△は和歌山南西沖・◇は徳島海陽沖・◆は高知西部沖・●は黒潮牧場10号・○は黒潮牧場13号を表す。



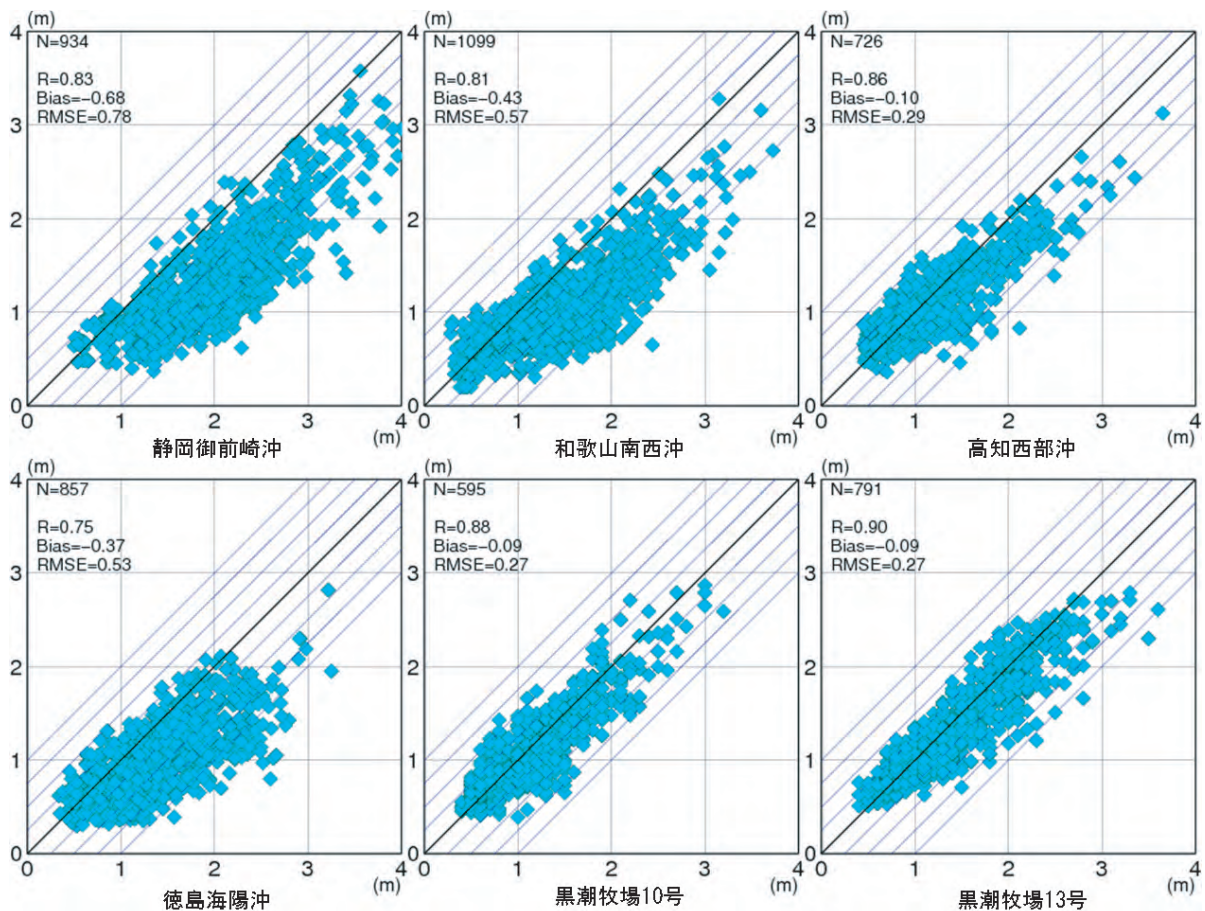
第6図 各波浪観測点で吹き出し風向をとる風の出現割合
単位はパーセント。黒丸は冬(12月～2月)を表す。

波浪観測地点の全データから予想風向が吹き出し風向に合致するデータを抽出した。抽出したデータのうち、風速が小さい場合は予想波高そのものも小さく、観測波高との差もそれほど大きくはないものとして、吹き出し風向が持続している期間の予想風速の最大値が10knot未満の場合は期間内の全データを除外した。更に、台風が太平洋沿岸に接近・通過した後には吹き出し風向が予想された事例が4例あったが、台風を波源とするうねりが観測波高に大きく影響すると考えられるため、これも同様に除外した。

第7図は、各波浪観測地点の吹き出し風向予想時の予想波高と観測波高を比較した散布図で、統計的関係を示す相関係数、バイアス（平均誤差）、RMSE（Root Mean Square Error, 二乗平均平方根誤差）を各図の左上に付した。それぞれの統計量

の算出方法は濱名ほか（2012）を参照した。相関係数は0.75～0.9と大きく、予想波高と観測波高は良い対応関係にある。バイアスの符号は各波浪観測地点とも負（すなわち、観測波高が予想波高より高い）で、RMSEは約0.3m～約0.8mであった。バイアスの絶対値が大きいほどRMSEとの差は小さい傾向がみられ、静岡御前崎沖ではその差は0.1mとなっている。負バイアスの値が大きいほど観測波高側に偏った分布となっており、吹き出し風向時の観測波高は静岡御前崎沖では約0.7m、和歌山南西沖・徳島海陽沖では約0.4m、高知西部沖や黒潮牧場10号・13号では約0.1m、予想波高より高めに推移する傾向にある。

解説資料では修正量を0.25m単位で提供していることから、抽出した吹き出し風向予想時の波高差を0.25m階級に編集した。波高差階級は、0.0m

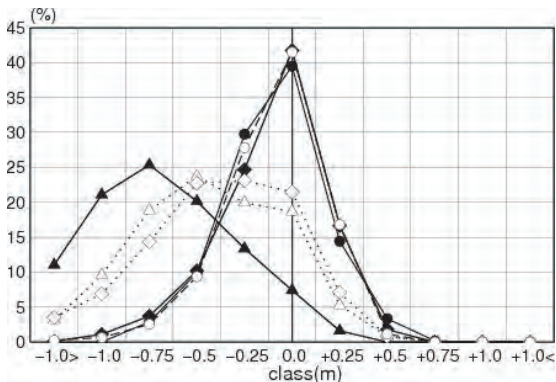


第7図 各波浪観測地点の吹き出し風向予想時における予想波高（縦軸）と観測波高（横軸）の散布図

原点から右上に伸びる黒実線は予想波高＝観測波高の線を、その外側の青実線は予想波高と観測波高との差が±0.25m・±0.5m・±0.75m・±1.0mの線を表す。また、図中左上のNはデータ数を、Rは相関係数を、Biasはバイアス（平均誤差）を、RMSEは二乗平均平方根誤差を表す。

を中心に±0.25m, ±0.5m, ±0.75m, ±1.0m, +1.0m以上, -1.0m以下の11階級で、各波高差階級の上限・下限の値は隣接の波高差階級の値との中間値とした。例えば、波高差階級0.0mは波高差が-0.125m～+0.125mの範囲内にあるデータを、+1.0m以上は波高差が+1.125m以上のデータを意味している。第8図は、各地点における波高差階級の相対度数を表したものである。高知西部

沖や黒潮牧場10号・13号では0.0m, すなわち予想波高との差が最も小さい階級の度数が約40%と最も多く、負の波高差階級側への偏りはみられるが、他の観測点に比べて0.0mを軸とする左右対称に近い分布となっている。これに対し、和歌山南西沖と徳島海陽沖は類似していて、-0.5mの階級が約25%と最も多く、0.0mは約20%となっている。静岡御前崎沖は-0.75mが約25%と最も多く、0.0mはわずか約7%となっていて、負の波高差階級の度数が全体の約90%を占めている。このように、波高差階級の相対度数分布から大きく3つのグループに大別することができ、それぞれ豊後水道と土佐湾、紀伊水道、伊良湖水道から太平洋への吹き出しに対応している。

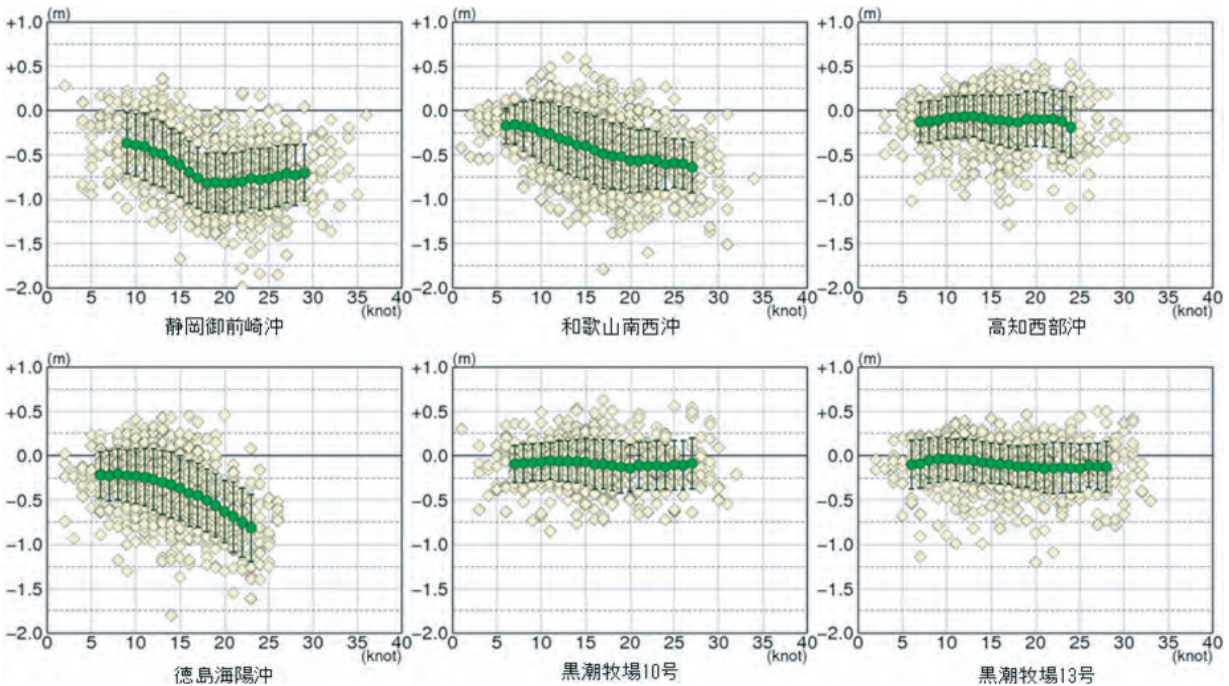


第8図 各波浪観測点の吹き出し風向予想時における波高差階級の相対度数分布図

▲は静岡御前崎沖・△は和歌山南西沖・◆は高知西部沖・◇は徳島海陽沖・●は黒潮牧場10号・○は黒潮牧場13号を表す。

3.3 吹き出し風予想時の予想風速と波高差の関係

太平洋への吹き出し風が予想されたときの予想風速と波高差の関係を調べた。第9図は、各地点の予想風速と波高差との関係を表した散布図である。標本数が10以上ある予想風速(約5knot～約28knot)に対して予想風速ごとの波高差の



第9図 各波浪観測点の吹き出し風向予想時における予想風速(横軸;単位はノット)と波高差(縦軸;単位はメートル)の散布図

緑丸は予想風速±2ノットで移動平均した波高差を、エラーバーは標準偏差を表す。

平均値を求め、風速の誤差を考慮して予想風速±2knot で移動平均したものを予想風速に対する波高誤差とした。また、標準偏差をエラーバーで示した。

高知西部沖と黒潮牧場 10 号・13 号では、予想風速が大きくなるにつれてわずかではあるが波高誤差も大きくなり、黒潮牧場 10 号では 19knot 以上、13 号では 20knot 以上で波高誤差階級 -0.25m の上限値の波高誤差 -0.125m より大きくなっている。高知西部沖では、18knot 以上で -0.125m 前後の値となっている。和歌山南西沖では、予想風速が大きくなるにつれて波高誤差は大きくなる傾向が明瞭にみられ、6～13knot で波高誤差階級 -0.25m, 14～26knot で -0.5m, 27knot は -0.75m の範囲内となっている。徳島海陽沖も同様の傾向がみられ、6～15knot で -0.25m, 16～19knot で -0.5m, 20～23knot で -0.75m の範囲内となっている。静岡御前崎沖でも予想風速が大きくなるにつれて波高誤差は大きくなる傾向がみられ、9knot で -0.25m, 10～15knot で -0.5m, 16～29knot で -0.75m の範囲内となっているが、19knot 以降はほぼ一定となっている。

第 9 図に示した予想風速に対する波高誤差は、実況に対してモデルが過小に表現している波高に相当し、この過小分の波高を予想波高に加算することで実況に近い波高を予想することができる。すなわち、予想風速に対する波高誤差の「逆符号」が本稿での調査目的の「修正量」である。修正量は予想風速約 5knot～約 28knot の間で算出されているが、予想風速約 5knot 未満の修正量は予想風速 0 のときの波高誤差を 0 として内挿により求め、予想風速約 28knot を超える修正量は

予想風速約 28knot での修正量が持続するものとした。第 10 図に各地点での吹き出し風予想時における予想風速 30knot までの修正量を示す。例えば吹き出し風の予想風速が 20knot の場合、高知西部沖や黒潮牧場 10 号・13 号での修正量は +0.25m, 和歌山南西沖では +0.5m, 徳島海陽沖と静岡御前崎沖では +0.75m となることを表している。これを 3.2 項で大別した海峡・海域グループで見ると、豊後水道と土佐湾では約 20knot 以上の吹き出し風が予想される場合に +0.25m の修正量の検討が必要となる。紀伊水道及び伊良湖水道では約 5knot 以上の風が予想される場合にどちらも +0.25m の修正量が必要となり、+0.5m の修正量が必要になるのは、紀伊水道では約 15knot, 伊良湖水道では約 10knot 以上の風が予想される場合である。

4. 検証

4.1 予想波高と修正量を加算した波高との統計的關係

第 10 図に示した各地点での修正量が妥当であるか確認するための検証を行った。第 11 図は、各地点の吹き出し風向予想時の予想波高と予想波高に予想風速に対する修正量を加算した波高（以下、修正波高とする）とを比較した散布図で、各図の左上に相関係数・バイアス・RMSE を付した。各地点とも相関係数は 0.8～0.9, バイアスはほぼ 0, RMSE は 0.3m 前後となっている。修正量を加算する前の第 7 図との比較では、バイアスや RMSE の絶対値が大きかった地点ほど改善の程度が大きく、特に静岡御前崎沖ではバイアスが -0.68m から -0.02m へ、RMSE が 0.78m か

地点名\予想風速	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
静岡御前崎沖	0.0				+0.25				+0.5				+0.75																		
和歌山南西沖	0.0				+0.25				+0.5				+0.75																		
高知西部沖	0.0										+0.25																				
徳島海陽沖	0.0				+0.25				+0.5				+0.75																		
黒潮牧場 10 号	0.0										+0.25																				
黒潮牧場 13 号	0.0										+0.25																				

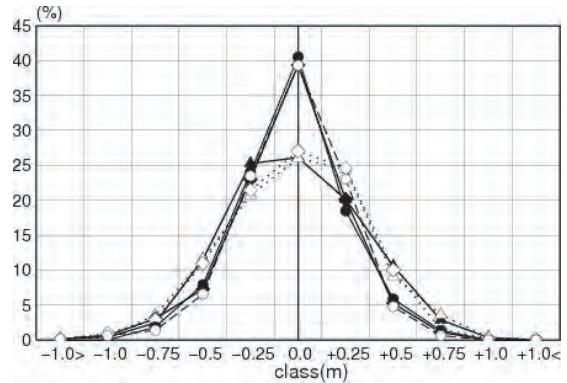
第 10 図 各波浪観測点の吹き出し風向予想時における予想風速（単位はノット）に対する修正量の大きさ（単位はメートル）

修正量は 0.25m 間隔で表し、大きいほどグレーの背景色を濃くしている。

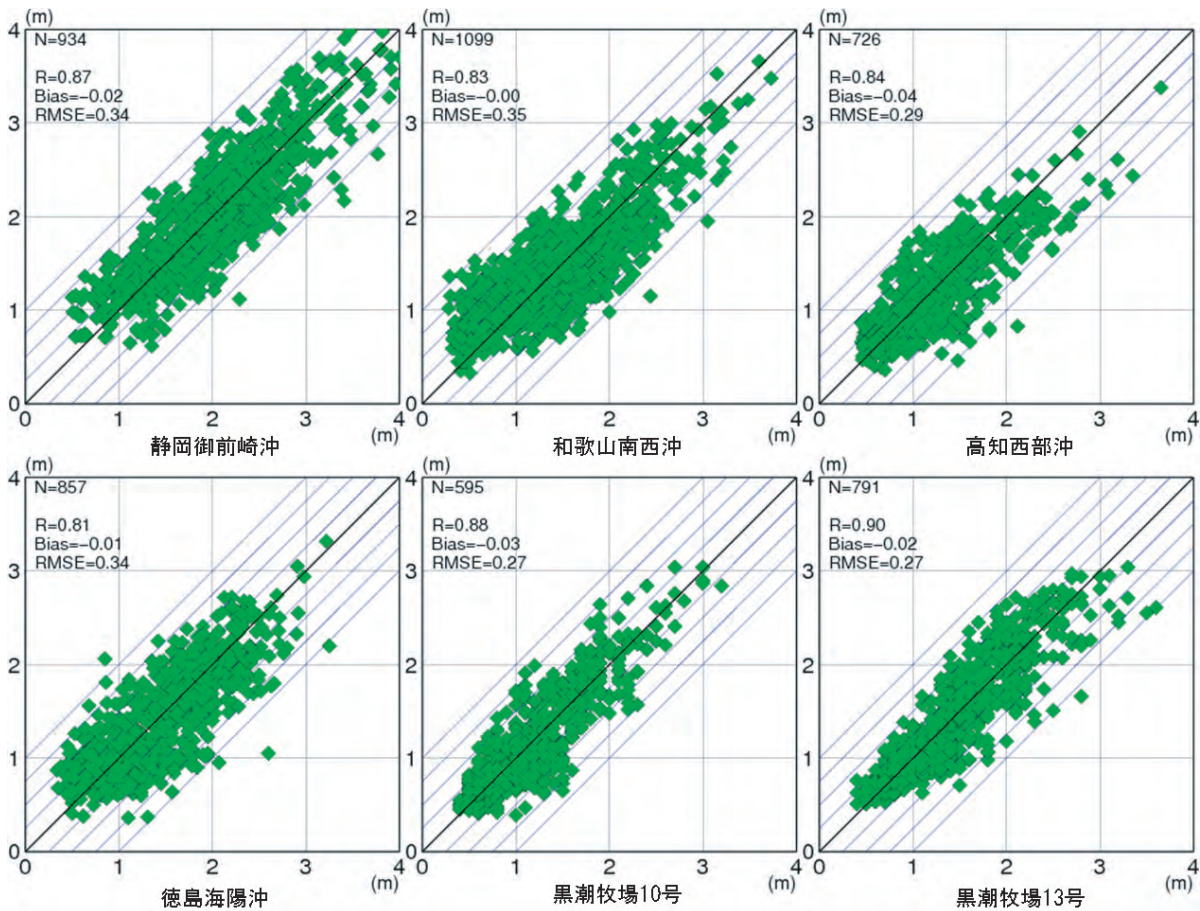
ら 0.34m へと修正量加算による改善が顕著であった。一方で、修正量加算前においてもバイアスや RMSE の小さかった高知西部沖や黒潮牧場 10 号・13 号ではバイアスが若干 0 に近づいたが、相関係数や RMSE はほとんど変化がなかった。

予想波高と修正波高との波高差の 0.25m 階級の相対度数分布を第 12 図に示す。高知西部沖と黒潮牧場 10 号・13 号では 0.0m の相対度数は約 40% で修正量加算前とほとんど変化はなかったが、やや負の波高差階級側に偏っていた度数分布が、0.0m を軸としたほぼ左右対称な分布へと改善されている。和歌山南西沖・徳島海陽沖・静岡御前崎沖では 0.0m の相対度数は約 25% で高知西部沖と黒潮牧場 10 号・13 号よりは小さいが、負の波高差階級側に大きく偏っていた度数分布が、同様に 0.0m を軸としたほぼ左右対称な分布となっている。修正量の加算により統計量だけでなく、波

高差階級の度数分布も 0.0m を軸とする左右対称形に改善されたことが確認でき、第 12 図の修正量はおおむね妥当なものであるといえる。



第 12 図 各波浪観測点の吹き出し風向予想時における予想波高と修正波高との波高差階級の相対度数分布図
図中の記号は第 8 図を参照。



第 11 図 各波浪観測点の吹き出し風向予想時における予想波高（縦軸）と予想波高に予想風速に対する修正量を加算した波高（横軸）の散布図
図の見方は第 7 図を参照。

4.2 独立資料による事例検証

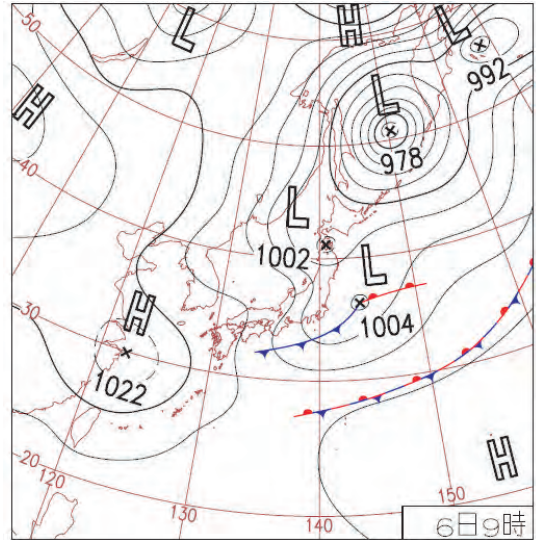
調査対象期間（2011年4月～2012年3月）外のデータを利用して事例検証を行った。

第13図は2012年4月6日の天気図で、東海地方から四国地方にかけて寒冷前線通過後の北よりの風の場に変化していた。和歌山南西沖では、5日21時以降北よりの風に変わり、6日03時以降は北よりの風が強まる予想となっていた（第14図）。これに対応して波高も6日06時から09時にかけて上昇し、その後ゆるやかに下降する予想となっていた。同地点での吹き出し風向（北西～北）は5日21時～6日18時にかけて予想されており、予想風速に対応する修正量は第10図より5日21時と24時が+0.25m、6日03時～18時が+0.5mと求められる。予想波高、修正波高、及び観測波高を比較した図が第14図で、観測波高は予想波高より修正波高に近い経過をたどっており、特に6日09時～18時にかけて観測波高は修正波高にほぼ等しかった。修正量を加算した期間における観測波高との差の平均は、予想波高が-0.54mであったのに対し修正波高は-0.08mで、予想風速に対応した修正量を加算することにより観測波高との差が大きく縮減した。本事例では、第11図で示す修正量を加算することにより時間変化が適切に予測できるように改善された。

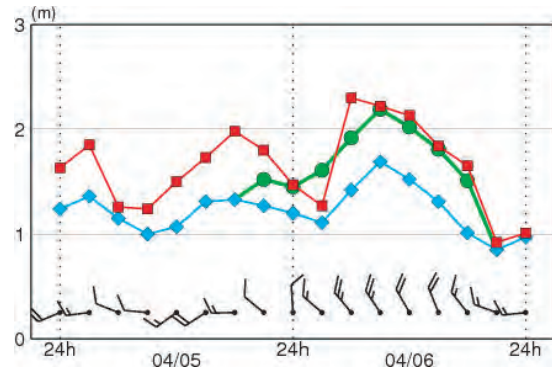
5. 考察

太平洋への吹き出し風時の予想波高と修正波高との差、すなわち修正量は、一般に予想風速が大きくなるにつれて大きくなることがわかったが、これは風の強まりとともに発達する風浪の表現にその原因があると考えられる。この原因を理解するためには、風浪の発達に密接に関わる吹送距離・吹続時間・風速の3つの要素について検討する必要があるが、このうち吹続時間・風速は海上風の観測データが継続的に取得できた地点が少なかつたため、本稿では吹送距離に関連するモデル過小の要因を考察する。

太平洋へ吹き出す風の場合では、海岸線が風上側に、静岡御前崎沖など各波浪観測点が風下側となることから、各波浪観測点から海岸線方向への距離が太平洋への吹き出し風の吹送距離となる。沿



第13図 2012年4月6日の09時の地上天気図
気象庁ホームページ「日々の天気図」より。



第14図 和歌山南西沖 GPS 波浪計における2012年4月5日から6日にかけての3時間ごとの予想風向と予想風速（5knot単位）・予想波高（水色）・修正波高（緑色）、及び観測波高（赤色）の経過

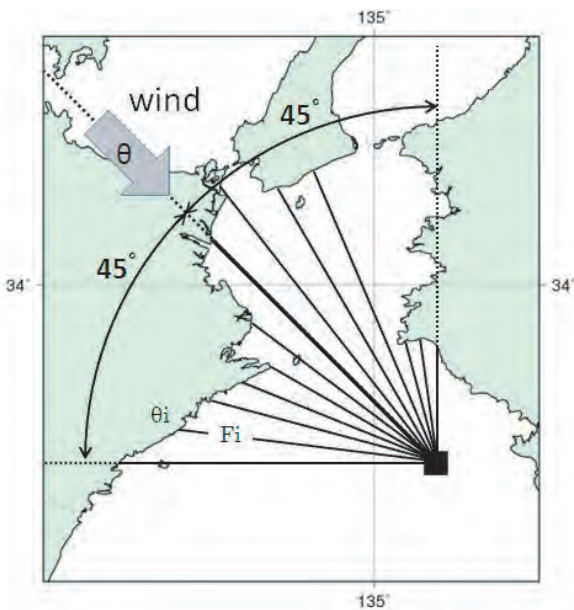
岸域では複雑な海岸地形の影響があるため、各波浪観測点から海岸までの直線距離をもって吹送距離（フェッチ）とするには不十分であり、小野田ほか（1982）が特定海域の波浪推算用分布図作成に用いた有効フェッチを用いた。

有効フェッチの算出方法について、海上の特定の点における風向 θ に対して ± 45 度の角度幅を与え、この角度幅を任意の角度で細分し、それぞれの角度方向 θ_i について海岸までの距離 F_i を求める。こうして、有効フェッチ F_e は次式で求められる。

$$F_e = \frac{\sum F_i \times \cos^2(\theta_i - \theta)}{\sum \cos(\theta_i - \theta)} \quad (1)$$

本稿では、細分した角度を 2.5 度とした。第 15 図は和歌山南西沖を例に 315 度（北西）方向の有効フェッチの算出方法を表した図で、270 度（西）～ 360 度（北）まで、2.5 度間隔、すなわち 37 個の海岸線までの距離を地図上で測り、(1) 式に代入すると有効フェッチ 27.49 海里 (NM) が得られる。これは北方向や西北西方向の海岸線までの短い距離が反映されているため、和歌山南西沖から 315 度方向に延ばした海岸線までの距離 38.73 海里 (NM) より短くなっている。同様の方法で求めた各波浪観測地点の西から北北東方向、及び吹き出し風向の有効フェッチ（吹き出し風向と定義とした 3 方位の風向の有効フェッチを平均したもの）を第 1 表に表す。

高野 (2011) が詳細に解説している有義波法



第 15 図 和歌山南西沖（図の■）での北西風に対する有効フェッチの計算方法

第 1 表 各波浪観測点の西～北北東方向、及び吹き出し風向の有効フェッチ

網掛は各波浪観測点における吹き出し風向と定義した 3 方位の風向を表す。単位は海里 (NM)。

地点名\風向	西	西北西	北西	北北西	北	北北東	吹き出し風向
静岡御前崎沖	63.87	43.58	26.22	20.27	24.17	29.09	44.56
和歌山南西沖	42.83	31.78	27.49	22.96	17.15	11.06	22.53
高知西部沖	54.67	32.48	19.95	20.97	32.45	51.59	24.46
徳島海陽沖	16.27	10.70	10.35	11.56	16.72	24.27	17.52
黒潮牧場 10 号	68.07	44.46	34.22	27.61	29.46	39.43	35.43
黒潮牧場 13 号	60.86	49.57	39.31	30.98	34.89	50.23	35.06

(SMB 法ともいう) によれば、風浪は吹送距離・吹送時間が長いほど、風速が大きいほど発達するが、海岸に近い波浪観測点での吹送距離は海岸から波浪観測点までの距離以上にはならないため、どんなに長時間風が吹送しても吹送距離の制限によりある波高 (fetch limited waves) 以上には大きくなれない。すなわち、その波浪観測点での波高は吹送時間によらず風速と吹送距離により波高が決まる。Bretschneider (1970) は、吹送距離・風速と波高の関係を次式で表した。

$$\frac{gH}{U^2} = 0.283 \tanh \left\{ 0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right\} \quad (2)$$

ここで g は重力加速度、 H は波高、 U は風速、 F は吹送距離である。(2) 式の F に吹き出し風向の有効フェッチ F_e (一定値) を、 U に予想風速を代入して決まる波高 (以下、SMB 波高とする) を第 16 図に表した。SMB 波高は吹き出し風による風浪の大きさを表す波高であり、各地点とも予想風速が大きくなるにつれて SMB 波高も大きくなっている。また、同じ予想風速でも吹き出し風向の有効フェッチが長いほど SMB 波高が大きくなっている。

各波浪観測点の吹き出し風の予想風速に対する予想波高・観測波高の平均値と SMB 波高を比較した (第 16 図)。予想風速が小さい場合は各波浪観測点とも予想波高の方が SMB 波高より大きい。吹き出し風による風浪は小さく、東方からの波高 1m 弱のうねりの方が卓越するため、予想波高にはうねりの波高が反映されると考えられる。予想風速が大きくなるにつれて吹き出し風による風浪

は発達，SMB 波高も次第に大きくなって予想波高との差は徐々に小さくなり，予想風速 17knot 前後で SMB 波高と予想波高はほぼ等しくなっている．17knot より大きい予想風速では，吹き出し風による風浪は更に発達して東方からのうねりより卓越するため，予想波高は吹き出し風による風浪が反映され，SMB 波高とほぼ等しくなっている．

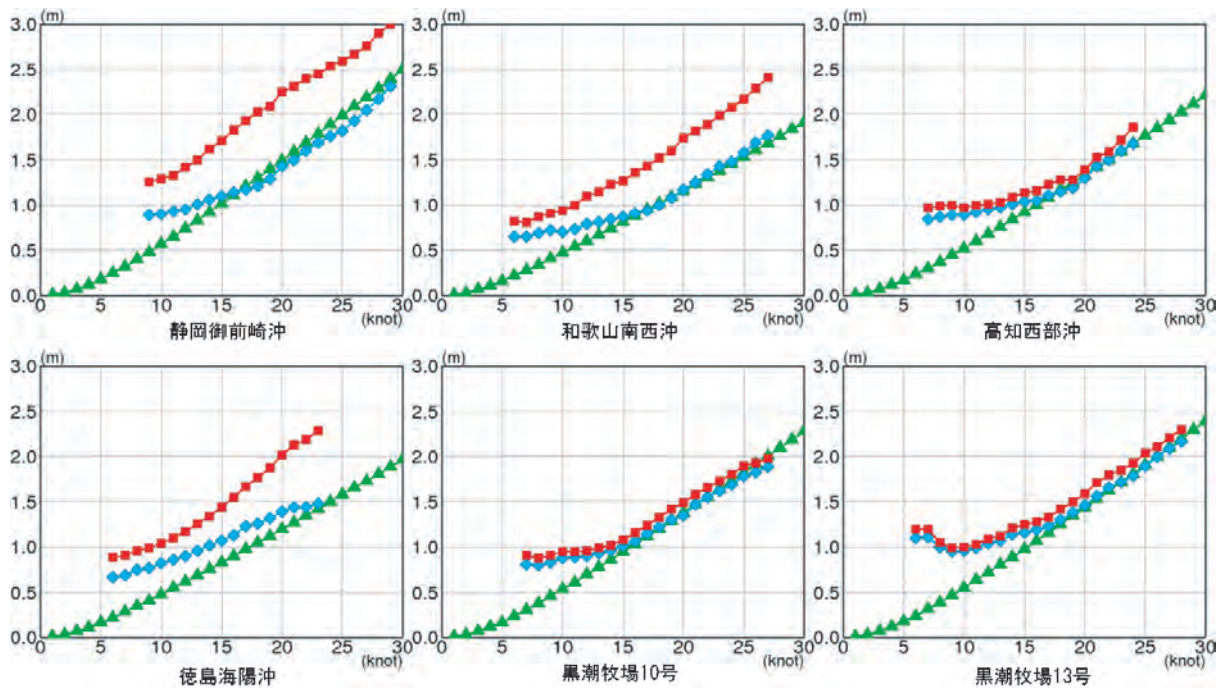
第 16 図の予想波高と SMB 波高との比較より，吹き出し風による風浪が卓越している状況では予想波高と SMB 波高がほぼ一致していた．すなわち，吹き出し風による風浪について，モデルは有義波法による風浪発達とおおむね合致する予想をしていることから，モデル過小になる原因として (2) 式の U が予想風速より大きいこと (実況の海上風が予想より強いこと) が示唆される．

実況の海上風が予想風速にほぼ等しい場合でも風向が予想と異なることによって有効フェッチが長くなり，観測波高は予想波高より高く経過する場合も考えられる．第 2 表は各予想風速に対応する吹き出し風向 3 方位のなかの最長の有効フェッチの SMB 波高と最短の有効フェッチの SMB

波高との差を表したものである．例えば，静岡御前崎沖では予想風向が北西・予想風速・20knot で観測風向が西・観測風速・20knot だった場合，SMB 波高は 0.45m 高くなることを意味する．予想風向と実況の風向が異なることによる波高の差は，風速が大きくなるにつれて大きくなる傾向があり，波高差階級にして 1 ないし 2 階級もの差となる場合もある．予想波高が過小になる原因として，実況の風速が予想風速より大きいことだけでなく，風向の誤差による影響も考えられる．

第 2 表 各波浪観測点の吹き出し風の 3 風向における最長の有効フェッチでの SMB 波高と最短の有効フェッチでの SMB 波高の差
波高の差の単位はメートル，風速の単位はノット．

地点名\風速	10	15	20	25	30
静岡御前崎沖	0.12	0.27	0.45	0.63	0.82
和歌山南西沖	0.07	0.14	0.21	0.28	0.36
高知西部沖	0.08	0.15	0.23	0.32	0.40
徳島海陽沖	0.10	0.18	0.27	0.36	0.47
黒潮牧場 10 号	0.06	0.15	0.23	0.32	0.42
黒潮牧場 13 号	0.03	0.07	0.10	0.15	0.19



第 16 図 各波浪観測点の吹き出し風向での有効フェッチをもとに SMB 法を用いて推算される波高 (緑色) と予想波高 (水色) と観測波高 (赤色) の比較
横軸は予想風速 (単位はノット)，縦軸は波高 (単位はメートル)．

6. まとめ

太平洋への吹き出し風向予想時における、モデルが過小に表現する波高の大きさ、すなわち「修正量」は、予想風速と関係があり、その大きさは海峡・海域ごとの特徴があることがわかった。また、モデル過小の要因として、実況の海上風が予想より強いこと、及び風向の誤差が示唆された。本調査結果による修正量は、モデルの初期値更新と同時に「自動案」というかたちで解説資料に取込まれるように効率化しており、現業作業において積極的に活用している。

本稿で調査した期間については、継続的な海上風の観測データが取得できない地点があり、調査としては十分ではなかったが、本稿執筆中の2012年9月現在では調査対象としたGPS波浪計での海上風データは欠測なく継続的に取得できており、今後は海上風の観測データも取入れた調査を行うことを検討している。また、モデルが改良されてまだ1年と、波高の統計比較に用いたデータ数も十分ではなかった。今後は、冬季を中心としたデータの蓄積と並行して予想風速に対する波高の修正量を随時更新し、より精度の高い解説資料の提供に努めていきたい。

参考文献

- Bretschneider, C. L. (1970) : Forecasting relations for wave generation. Look Lab. Hawaii, 1 (3), 31-41.
- 小野田仁・高田政幸 (1982) : 特定海域の波浪推算用分布図について. 沿岸波浪予報技術調査報告, 4, S1-S14.
- 金子秀毅・濱名実・出口英昭・井上正廣 (2011) : 播磨南東部の波浪の特性と推定について. 平成22年度大阪管区気象研究会誌 (兵庫県).
- 高野洋雄 (2011) : 有義波法による波浪推算—現業での利用を目的として—. 測候時報, 78, 185-198.
- 濱名実・金子秀毅・出口英昭・東條伸・森一正 (2012) : 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. 測候時報, 79, 特別号, S59-S71.
- 吉田久美・三浦大輔・高野洋雄 (2012) : 沿岸波浪モデルの統計的検証と改善について. 測候時報, 79, 特別号, S73-S82.