

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」

東海～四国地方及び瀬戸内海における高潮モデルの 特性に関する調査

伊藤 晋悟*¹・坂地 忠*¹・許田 盛也*²・福田 美奈*³

要 旨

現在運用されている高潮モデルは様々な要因により予測誤差が生じている。その要因について調査を行ったところ、海況による潮位変動、波浪による潮位上昇、吹き寄せ・離岸効果の過大評価が主な要因であることが分かった。

次に、フィルタリングした予測誤差のデータを用いて要因別に特性の調査を行った。波浪による潮位上昇効果については、有義波高の2次式で予測誤差の補正式を導出した。吹き寄せ・離岸効果については、風速の2乗の1次式で補正式を導出した。海況による潮位変動については、EOF解析を行い予測誤差の長周期成分の特性を調査、第1モードでは予測誤差は全体的に変動し、第2モードでは潮岬を挟んで変動のパターンが異なることが分かった。また、第1モードは黒潮の流れの速さ、第2モードは黒潮の流向との対応が示唆された。

1. はじめに

府県予報担当官署の的確な高潮警報・注意報の発表に資するため、海洋気象台等では平成23年度から地方予報中枢官署に対して「潮位に関する地方解説資料」（以下、解説資料と記す）の提供を開始した。解説資料では、潮位の実況及び今後の見通し等についての解説を行う。その「見通し」のベースとなる高潮モデル（林原，2011）は風及び気圧による潮位変動を計算しているが、波浪による潮位上昇（以下、Wave Setup と記す）の効果計算が組み込まれておらず、高波浪時に予測が過小になる地域がある。また、高潮モデルでは海況による潮位の変動についても考慮されていないため、実況値とモデル値のずれが長期間続くことがある。更に、風速と予測誤差の関係についての調査により、地域によっては吹き寄せや離岸の効果

が過大に表現される傾向があることも知られている。

より適切な解説資料を提供するためには、上述のような高潮モデルの特性について把握し、的確な補正量を見積もる必要がある。そのため、高潮モデルの予測誤差について調査を行ったので、ここに報告する。

2. 海域別特性調査

2.1 使用したデータ

神戸海洋気象台が担当する海域にある潮位観測地点のうち35地点（第1図，第1表）について、2004年1月1日から2010年12月31日まで（地点によっては設置時期等によりこれより短い）の潮位偏差の観測値（以下、OBSと記す）、高潮モデルハインドキャスト偏差（以下、HDCと記す）

*1 神戸海洋気象台（現 大阪管区気象台） *2 沖縄気象台 *3 長崎海洋気象台（現 沖縄気象台）

す), HDC の計算に用いられた海上風の 1 時間値及び北西太平洋海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM-WNP, 以下 MOVE と記す) 解析結果を用いた。

2.2 調査方法

各地点の OBS と HDC の差(以下, OMH と記す。OMH とは Observation Minus Hindcast の略) の出現分布に対し, 上位 0.1%, 下位 0.1%の境界となる値を高潮モデルのはずれのしきい値と定め, はずれ事例を抽出, 誤差の要因について調査を行った。なお, メソ数値予報モデル (以下, MSM と記す) の高解像度化が行われた 2006 年 3 月 1 日の前後で潮位偏差の振動特性に変化がみられる瀬戸内海, 紀伊水道, 伊勢湾・三河湾の各潮位観測地点では, MSM 更新後を対象に調査を行った。

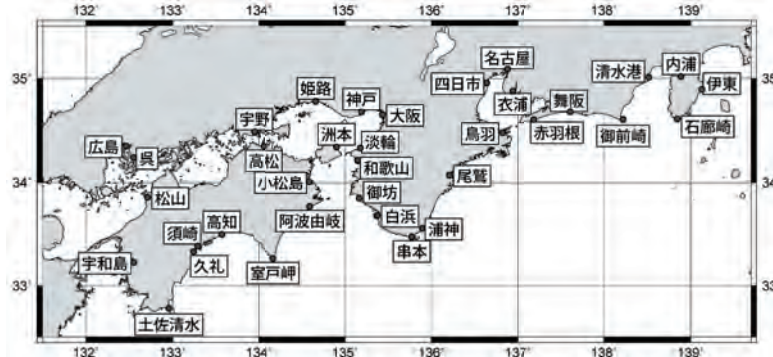
2.3 調査結果

各潮位観測地点における上位 0.1%のはずれしきい値を第 2 図に示す。この図から, 串本以西の

太平洋沿岸では浦神以东の太平洋沿岸より OMH の値が小さく, 瀬戸内海では周りの海域より OMH が大きいことがわかる。

次に, 上位及び下位 0.1%のはずれしきい値を用いてはずれ事例を抽出し, その要因について調査を行った。要因の調査においては, MOVE 解析結果の海水温偏差 (気候値からの差) や海面力学高度をみることで海況による潮位変動の影響 (海洋要因) を判断し, 波浪予想図, 解析図又は波浪観測値を用いて Wave Setup が発生したかの判断を行った。吹き寄せや離岸については, 海上風の風向・風速をみて判断を行った。この調査から以下のことが分かった。

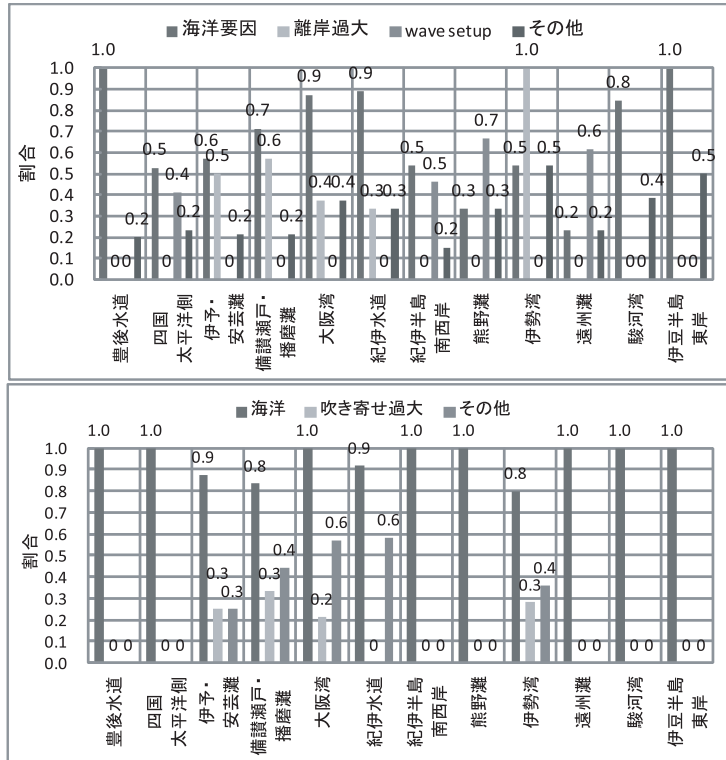
- ・海域に関わらず, モデル過小 (過大) 時には, 近接した海域の MOVE 解析結果の海水温偏差が高く (低く), 海況の影響を受けて OBS を大きく (小さく) しているとみられる事例が多い。
- ・遠州灘, 熊野灘, 紀伊半島南西岸, 四国太平洋側では, モデル過小事例の約半分に Wave



第 1 図 調査に使用した潮位観測地点

第 1 表 本報告で用いる海域名と潮位観測地点の対応

海域	検潮所
伊豆半島東岸	伊東、石廊崎
駿河湾	内浦、清水港、御前崎
遠州灘	舞阪、赤羽根
伊勢湾・三河湾	衣浦、名古屋、四日市、鳥羽
熊野灘	尾鷲、浦神
紀伊半島南西岸	串本、白浜、御坊
紀伊水道	和歌山、小松島
大阪湾	淡輪、洲本、大阪、神戸
播磨灘	姫路
備讃瀬戸	宇野、高松
伊予灘・安芸灘	松山、呉、広島
四国太平洋側	阿波由岐、室戸岬、高知、須崎、久礼、土佐清水
豊後水道	宇和島

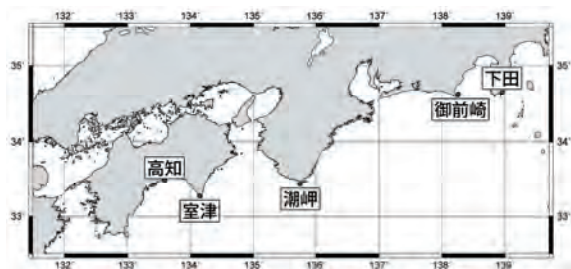


第3図 海域別のハインドキャスト誤差上位0.1%しきい値を上回った事例の要因(上)と同下位0.1%しきい値を下回った事例の要因(下)の割合
 数値は小数点以下2桁を四捨五入した割合を示す。なお、1事例につき複数の要因を想定したため、海域ごとに割合を足しても1.0にはならない。

較的相関が良いが、舞阪ではRMSEが12cmを超えているなどばらつきが大きく、また第5図の分布から有義波高との相関は良いとはいえない。この結果から舞阪でWave Setupが発生していると判断するのは困難であるが、磯崎(1970)や柴木・渡辺(2002)など舞阪でのWave Setupの発生を示唆する研究は複数存在する。舞阪において本調査で有義波高とOMHの相関が悪くなったのは、他の地点に比べて波浪観測地点と潮位観測地点の距離が離れていることや潮位観測地点が浜名湖に位置していることが影響している可能性がある。今後は用いる波浪データについて検討を行うことで、より精度の良い補正式が導出できる可能性がある。

3.2.3 検証

Wave Setupを発生させるような高波浪の事例が少なく、統計的な検証は難しい。そのため、今回は2012年台風第4号の事例を対象に補正式の



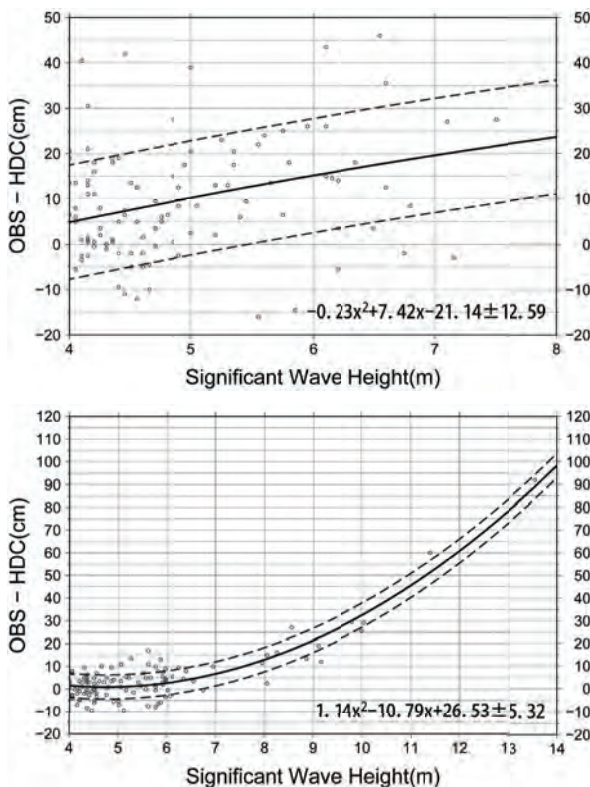
第4図 調査に使用した波浪観測地点

検証を行った。用いた波浪データは2012年6月18日から21日のナウファス速報値で、OMHは6月16日から18日の平均的なOMHを見積もり、それを海洋要因によるものとして補正を行い使用した。第6図に御坊におけるOMH(実線)と補正式による補正量(破線)を示す。これから、タイミング・補正量ともにおおむね良い精度で補正ができていることがわかる。その他の地点において、対象期間のOMH及び補正量の最大値をまとめたものを第3表に示す。浦神、串本、白浜、御坊、室戸岬では、OMHの値と補正量の差が4～

第2表 Wave Setup の補正式と RMSE 及び導出に用いた波浪観測地点別分布 (単位 hPa)

x は波浪観測地点で観測された有義波高.

潮位観測地点	波浪観測地点	補正式	適用範囲	RMSE (cm)
石廊崎	下田	$0.79x^2 - 2.88x - 2.06$	$4 \leq x \leq 8$	4.57
舞阪	御前崎	$-0.23x^2 + 7.42x - 21.14$	$4 \leq x \leq 8$	12.59
浦神	潮岬	$0.23x^2 - 1.89x + 4.09$	$4 \leq x \leq 12$	4.66
串本	潮岬	$0.58x^2 - 5.35x + 12.51$	$4 \leq x \leq 12$	4.69
白浜	潮岬	$0.44x^2 - 4.02x + 9.84$	$4 \leq x \leq 12$	4.33
御坊	潮岬	$0.63x^2 - 4.64x + 9.6$	$4 \leq x \leq 12$	4.53
室戸岬	室津	$1.14x^2 - 10.79x + 26.53$	$4 \leq x \leq 14$	5.32
高知	高知	$0.47x^2 - 4.03x + 9.09$	$4 \leq x \leq 13$	6.22



第5図 舞阪(上)と室戸岬(下)における有義波高(横軸)とハインドキャスト誤差(縦軸)の関係
 点は観測結果, 実線は回帰曲線, 破線は回帰曲線±RMSE, 右下の数式は回帰曲線±RMSEを示す.

6cm程度と、良い精度で補正ができていることがわかる。一方、高知については、差が10cmを超えており、精度は良くない。この期間、高知ではHDCが振幅10cm程度、周期約3時間で振動しており、それがOMHを一時的に大きくしていたことが一因であると考えられる。なお、石廊崎、舞阪はOMHが最大になると期待される時間帯に、それぞれ潮位データ、波浪データが欠測とな

っていたため、今回の検証からは除いた。

3.3 吹き寄せ・離岸

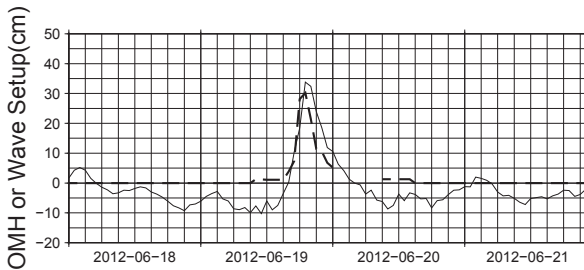
3.3.1 調査方法

高潮モデルは内海や湾では、吹き寄せ・離岸効果を過大に表現することが知られており、第2.3節の結果からも、伊勢湾や瀬戸内海で、はずれ事例の要因として大きな割合を占めていることがわかる。

吹き寄せ・離岸効果に関する補正方法を検討するために、風向8方位別に風速の2乗とOMHの関係を調べた。データの期間は、2004年1月1日～2010年12月31日までのデータを用いた。

3.3.2 調査結果

名古屋において離岸効果がはたらく北西風時の結果を第7図に示す。風速が増大するにつれてOMHが増大しており、高潮モデルが離岸効果を過大に表現していることが示唆される。この分布から求めた回帰直線の傾きは0.15となり、風速8m/sでおよそ10cm程度の予測誤差が見積もられる。その他の地点において同様に導出した回帰係数を第4表に示す。ここで、相関係数の絶対値が0.2未満の回帰係数は信頼性が低いと判断して網掛を施した。まず、伊勢・三河湾において、東～南東の風で吹き寄せが過大(回帰係数が負)、北西～北の風で離岸過大(回帰係数が正)の傾向がみられる。同様に、大阪湾奥(大阪・神戸)では南風で吹き寄せ過大、播磨灘・備讃瀬戸で東よりの風で吹き寄せ過大、西～北の風で離岸過大傾向、広島湾(広島・呉)で南東～南の風で吹き寄せ過大、



第6図 御坊におけるハインドキャスト誤差（実線）と Wave Setup 補正式から求めた補正量（破線）

第3表 2012年台風第4号時の Wave Setup の補正式から求めた補正量と最大ハインドキャスト誤差(OMH)及びその差

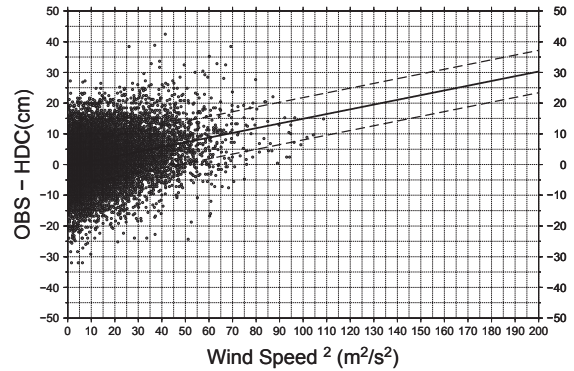
	高知	室戸岬	御坊	白浜	串本	浦神
補正量	2.3	4.2	30.2	16	20.1	9.5
最大OMH	12.5	9.5	33.8	12.2	14.5	16
差	-10.2	-5.3	-3.6	3.8	5.6	-6.5

北風で離岸過大傾向がみられる。一方、太平洋に面した沿岸では相関係数の絶対値 0.2 以上の値は、吹き寄せ方向の風向で回帰係数は正となっており、モデル過小傾向を示す。この原因は Wave Setup の効果によるものが表れている可能性がある。

今回の調査では、相関係数が 0.2 未満の地点が多くなった。伊勢・三河湾、瀬戸内海では地形の影響による様々な振動が合わさり複雑に潮位偏差が振動している。これらの振動がデータのばらつきを大きくさせ、相関係数を悪くしている可能性がある。今後、振動の影響を考慮する手法を検討することで精度の良い補正方法を確立できる可能性がある。

3.3.3 検証

2011年1月1日～2011年12月31日のOMHの短周期成分を用いて、前節で求めた補正式の検証を行った。第8図に各潮位観測地点でのRMSEとOMHの平均値の補正前後の値を示す。名古屋でOMHの平均値が大幅に改善されるなど、伊勢湾・三河湾、瀬戸内海でRMSE、OMHの平均値ともに改善がみられた。一方、外洋の地点では改善されていない地点が多い。外洋の地点では吹き寄せ・離岸効果の過大傾向が相対的に小さいため、Wave Setup の効果が補正式に含まれてしまった可



第7図 名古屋の北西風時の風速の2乗（横軸）とハインドキャスト誤差（縦軸）の関係
点は観測値、実線は回帰直線、破線は回帰直線±RMSEを示す。

能性がある。そのため、風に対応させた補正が難しいことが示唆される。今回求めた補正式は吹き寄せ・離岸効果の卓越する伊勢・三河湾、瀬戸内海に対して有効とみられる。

3.4 海洋要因

3.4.1 調査方法及び結果

OMHの長周期成分の特性をみるために、2004年～2010年のOMHについてEOF解析を行った。なお、本節で用いた調査地点には、観測期間が短い地点（赤羽根、御坊、阿波由岐）及び長周期データに不連続がみられた須崎を除いた。また、欠測した地点が一つでもあった時刻は除いてEOF解析を行った。なお、本節では海面力学高度にMOVE解析結果を用いた。

2004年～2010年で平均した海面力学高度を第9図、第1モード、第2モードの空間パターン、スコアの時系列、それぞれのモードの海面力学高度偏差場を第10図、第11図に示す。黒潮などの海流は地衡流で近似される。そのため、第9図の海面力学高度の傾度が大きい領域は流れが速く、黒潮流域に対応すると考えられる。第10図下、第11図下の海面力学高度偏差でも同様に、地衡流近似から海面力学高度偏差の傾度が流れの偏差と対応するものと考えられる。また、海水の高度は水柱全体の海水温への依存度が高い。そのため、海面力学高度が低い領域は海水温の低い領域と対応が良く、海面力学高度がすり鉢状になっている場合は渦性の流れを引き起こすため冷水渦と呼ば

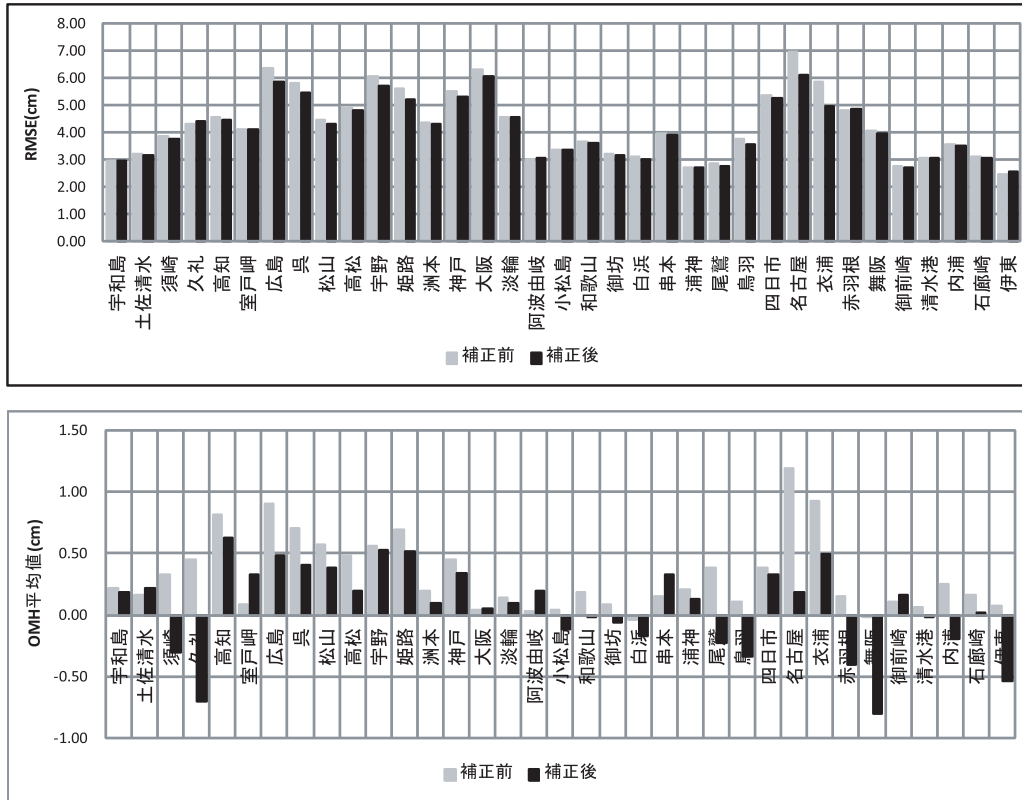
第 4 表 ハイソディキャスト誤差を風速の 2 乗の 1 次式に回帰した時の風向別回帰係数
相関係数が 0.2 未満の値は回帰係数の信頼性が低いと判断して、灰色の濃淡を施した。

地域	地点	NE	E	SE	S	SW	W	NW	N
伊豆半島東岸	伊東	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00	-0.03	0.00
	石廊崎	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
駿河湾	内浦	-0.02	-0.02	-0.01	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00
	清水港	0.00	0.00	-0.04	-0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
	御前崎	0.00	-0.01	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
遠州灘	舞阪	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00
	赤羽根	0.00	-0.02	-0.01	0.06	0.10	0.02	0.01	0.03
伊勢・三河湾	衣浦	-0.02	-0.14	-0.14	-0.10	-0.10	0.05	0.12	0.14
	名古屋	-0.06	-0.35	-0.16	-0.10	-0.16	0.03	0.15	0.17
	四日市	-0.13	-0.15	-0.07	-0.04	-0.03	0.05	0.09	0.04
	鳥羽	-0.05	-0.07	-0.06	-0.02	0.06	0.05	0.03	-0.01
熊野灘	尾鷲	0.01	0.00	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02
	浦神	0.00	0.00	-0.02	0.02	0.03	0.05	0.04	0.05
紀伊半島南西岸	串本	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.04
	白浜	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00
	御坊	-0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
紀伊水道	和歌山	0.02	0.05	-0.03	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.02
	小松島	-0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.02	0.02	0.00
大阪湾	淡輪	0.02	-0.02	-0.03	-0.01	-0.02	0.00	0.02	0.01
	大阪	0.07	0.03	-0.09	-0.08	-0.05	-0.01	0.03	0.07
	神戸	0.04	-0.02	-0.11	-0.08	-0.05	0.02	0.08	0.09
	洲本	0.01	-0.03	-0.03	-0.02	-0.03	0.01	0.03	0.04
播磨灘	姫路	0.02	-0.10	-0.07	-0.07	-0.02	0.04	0.11	0.11
備讃瀬戸	宇野	-0.03	-0.04	-0.06	-0.10	0.02	0.05	0.09	0.04
	高松	0.00	0.00	-0.05	-0.14	-0.06	0.01	0.03	0.04
伊予・安芸灘	松山	0.03	0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.01	0.01	0.04
	呉	0.03	-0.04	-0.14	-0.09	-0.07	0.01	0.08	0.12
	広島	0.03	-0.04	-0.10	-0.10	-0.05	0.03	0.11	0.12
四国太平洋側	阿波由岐	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.02	0.04	0.00	0.00
	室戸岬	0.00	-0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02
	高知	0.03	-0.01	0.00	0.02	0.05	0.02	0.01	0.01
	須崎	-0.01	-0.09	-0.05	0.00	0.04	0.00	0.03	0.01
	久礼	-0.03	-0.01	0.00	0.03	0.08	0.03	0.01	0.01
	土佐清水	-0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00
豊後水道	宇和島	0.04	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.01

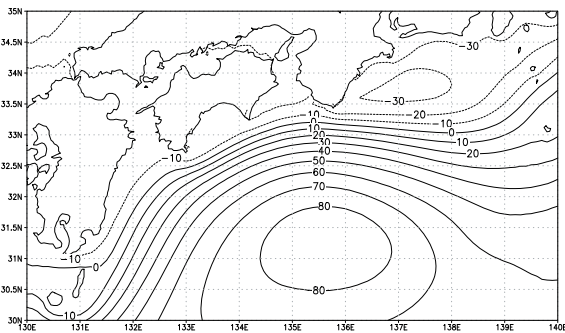
れる。

まず、第 10 図上から、EOF 第 1 モードは OMH を全体的に変動させる成分であることがわかる。第 10 図下によると、スコアが正の時、潮岬以西の沖合で海面力学高度が下がり、沿岸では上がるため、西向きの流れが励起される。第 9 図からこの領域は黒潮流域であると考えられ、黒潮の流れを減速させる効果にある。すなわち、潮岬以西では EOF 第 1 モードは黒潮の流れの速さの変化に対応していることが示唆される。一方、東海沖には海面力学高度の極小域がみられる。それに伴い、東海沿岸では弱いながら反時計回りの流れによる西向きの流れが励起され、沿岸反流により沿岸の潮位が上昇したと考ええると対応が良い。

次に、EOF 第 2 モードをみる。第 11 図下によると、スコア正の時、北緯 32.5 度、東経 138 度付近に冷水渦が解析される。これに伴い、黒潮が南に蛇行するものと考えられ、第 2 モードは黒潮の流向の変化と対応していることが期待される。実際に黒潮大蛇行が発生していた 2004 年 7 月～2005 年 8 月ではスコア正の状態が続いている。第 11 図上の空間パターンについては、スコア正の際には、冷水渦の影響で潮岬以西では南向きの流れが励起され黒潮が日本近海から離れるため海面力学高度が下がり、東海沿岸では暖水域により海面力学高度が上昇しているため、沿岸の潮位を上昇させたと考えると対応が良い。一方、スコアが負の時、潮岬以西では黒潮が接岸し海面



第8図 吹き寄せ・離岸効果過大評価に関する補正式を用いた補正前後のRMSE（上）と平均ハインドキャスト誤差（下）の比較



第9図 2004年～2010年で平均した海面力学高度 (cm)

力学高度が上昇、潮岬以東では東海沖に生じた冷水域により海面力学高度が下がると考えることができる。なお、潮岬への黒潮の離岸・接岸には串本と浦神の潮位差が指標となり、接岸時に串本が浦神より潮位が高く、離岸時は潮位差が小さくなるということが知られている。2004年～2010年の7年平均潮位では串本が浦神より約11.6cm高いが、第11図上から、スコア負の時に両観測地点の潮位差は広がり、スコア正の時に潮位差は縮小する

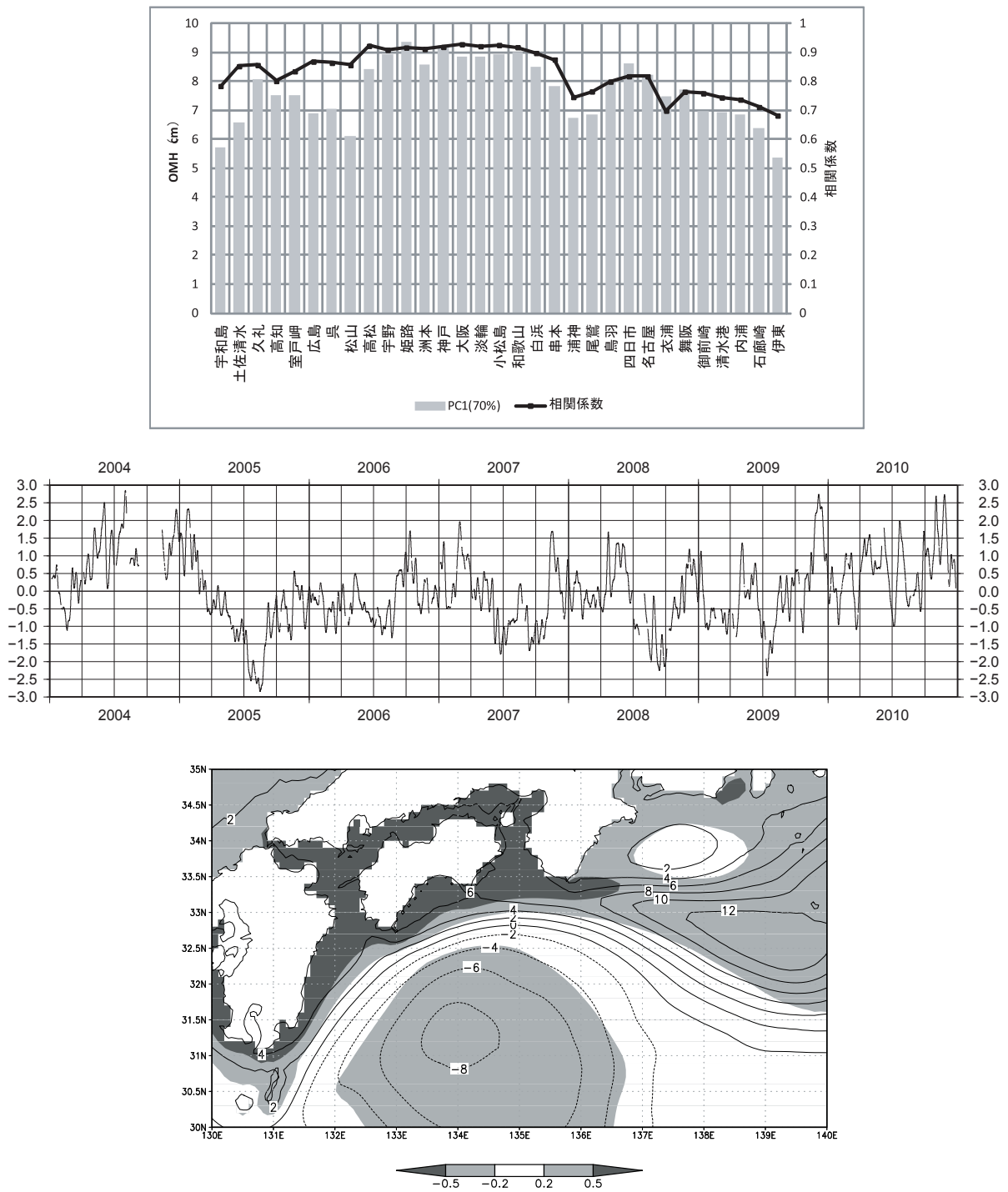
傾向にある。これは、これまでの知見と整合的である。

4. まとめと今後の課題

高潮モデルの予測誤差をもたらす要因について調査を行った。その結果、海洋要因、吹き寄せ・離岸効果の過大評価、Wave Setupが要因として抽出された。

次に、各要因別に特性及び補正方法を検討するため、200時間のカットオフ周期でフィルタリングを行い、長周期成分と短周期成分に分離し、海洋要因が長周期成分と、Wave Setup、吹き寄せ・離岸過大評価が短周期成分と対応が良いとして、要因別に調査を行った。

Wave Setupでは、OMHを有義波高の2次式として回帰した補正式を導出した。舞阪ではデータのばらつきが大きく補正式の精度が良くないが、これは用いた波浪観測地点と潮位観測地点の距離が離れていることが精度を悪くした可能性がある。今後用いるデータの検討を行う必要がある。



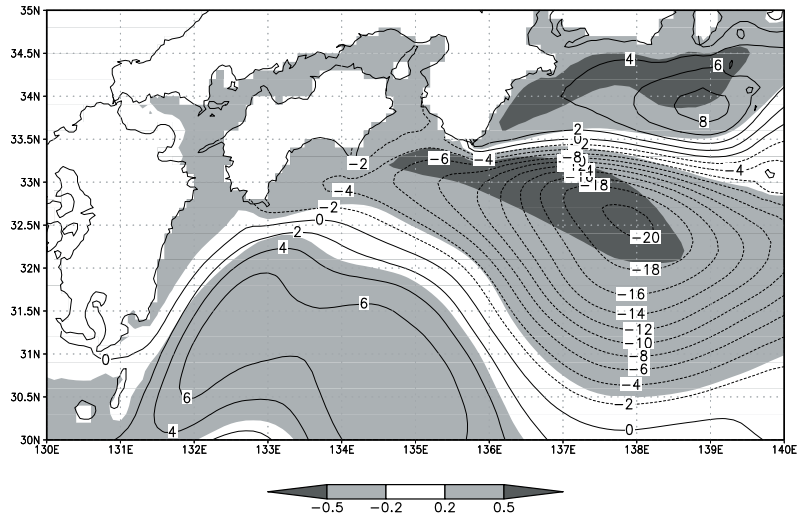
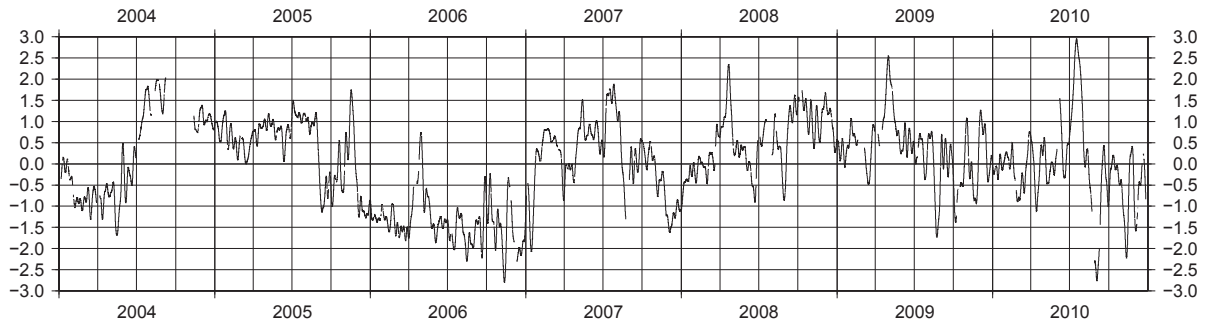
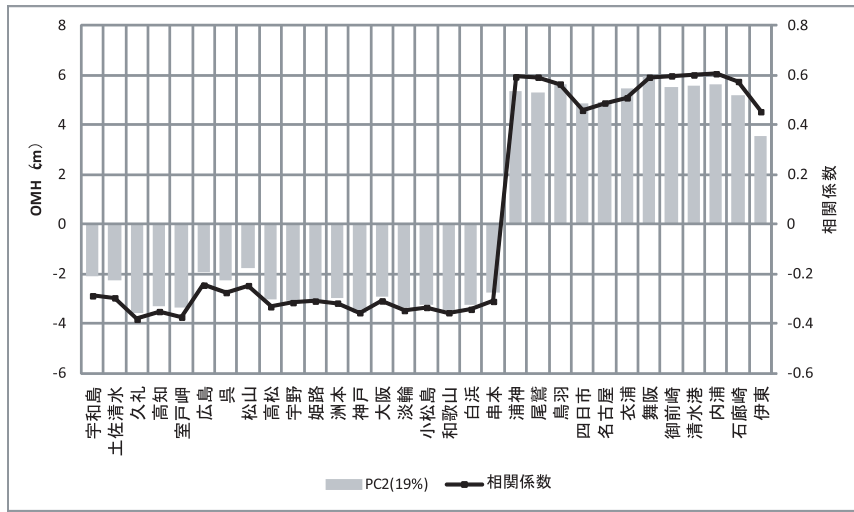
第10図 2004年～2010年のハインドキャスト誤差 (OMH) 長周期成分のEOF第1モード

(上) 空間パターン及びOMH長周期成分とスコアとの相関係数. カッコ内は寄与率 (%)

(中) スコアの時系列

(下) EOF第1モードに伴う海面力学高度偏差場

スコアに回帰した海面力学高度の回帰係数 (コンター) 及びスコアと海面力学高度の相関係数 (陰影) を格子点ごとに計算し, プロットした. コンター間隔は2cm, 陰影は相関係数の絶対値が0.2 (0.5) より大きい領域に薄い (濃い) 陰影を施している.



第11図 第10図と同様. ただし, EOF第2モード.

吹き寄せ・離岸効果過大評価では、OMH を風速の 2 乗の 1 次式に回帰した。伊勢湾・三河湾では南よりの風で回帰係数が負、北よりの風で回帰係数が正となり、吹き寄せ・離岸効果が過大であることが示唆された。一方、瀬戸内海では一部風向で吹き寄せ・離岸過大傾向がみられるものの、その他の風向では相関係数が小さい。これは湾や瀬戸内海の潮位振動によりデータにばらつきが大きくなっていることが原因である可能性がある。今後は振動の影響を取り除く手法を検討することで、補正方法の改善ができる可能性がある。

海洋要因では、OMH の長周期成分について EOF 解析を行い、その特性を調べた。EOF 第 1 モードでは、OMH が全て同じ傾向で変動するパターンが解析され、黒潮の流れの速さとの対応が示唆された。EOF 第 2 モードでは、OMH が潮岬を挟んで正負が入れ替わるパターンが解析され、黒潮の流向との対応が想定された。これらの結果では OMH の変動について定性的な言及しかできない。そのため、今後は定量的に補正する方法について検討を行う必要がある。

参 考 文 献

- 磯崎一郎 (1970) : 舞阪の高潮. 沿岸海洋研究ノート, 8, 40-47.
- 宇野木早苗 (1993) : 沿岸の海洋物理学. 東海大学出版会, 672pp.
- 小西達男 (1997) : 外洋に面した港湾で発生する高潮の成因について. 海と空, 73, 35-44.
- 柴木秀之・渡辺晃 (2002) : 密度成層と Wave Setup を考慮した多層高潮推算に関する研究. 土木学会論文集, 719, 47-66.
- Shoji, D. (1961) : On the Variations of the Daily Mean Sea Levels along the Japanese Island. The Journal of the Oceanographical Society of Japan, 17, 141-152.
- 林原寛典 (2011) : 気象庁の高潮数値予測モデルについて. 天気, 58, 235-240.