

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」

山陰～北陸地方における高潮モデルの地域特性

若林 吾宇*1・森 裕之*1・河野 俊一*2・板垣 真資*3

要 旨

高潮モデルの地域特性に着目し、高潮モデルの予測誤差を統計的に調査することで、地点ごとの予測精度を求めた。次に、高潮モデルが大きく外れた事例を抽出し、その要因を調査した。これらの結果を踏まえ、要因ごとに修正を加えることにより、高潮モデルの計算結果を修正する方法をまとめた。この方法は、沿岸防災解説業務の質的向上や作業の効率化に活用することが期待できる。

1. はじめに

海洋気象台では、地方予報中枢官署に潮位に関する地方解説資料を提供する沿岸防災解説業務を2012年3月28日より開始した。この解説資料の質的向上のため、これまでにガイダンス修正に係る量的補正の調査及び副振動の統計調査を実施した(大門ほか,2011)。今回の調査では高潮モデルの地域特性等に着目し、高潮モデルの計算結果が観測値を大きく下回った事例の要因調査を行った。

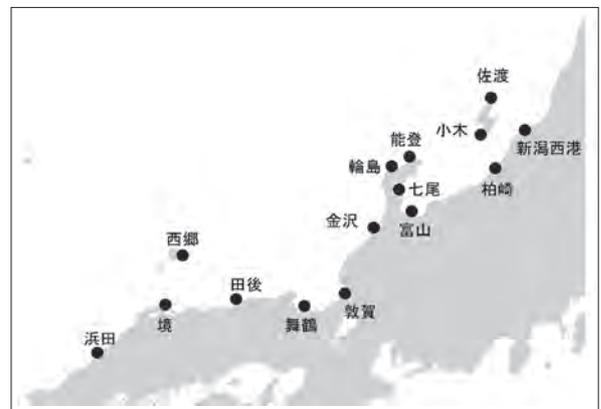
2. データ

今回の調査では、舞鶴海洋気象台管轄海域(山陰・近畿北部・北陸地方)で高潮ガイダンスが求められている15地点の検潮所を対象とした(第1図)。検潮所で観測された毎時潮位と天文潮位との差(以下、観測偏差)と高潮モデルのハインドキャスト潮位偏差(以下、ハインドキャスト)を用い、両者の差(以下、OMHと記す。OMHとは Observation Minus Hindcast の略)について統計調査を行った。なお、高潮モデルのハインドキャストとは、前イニシャル(3時間前)の初期時

刻(FT=-3)を起点とした現在の初期時刻(FT=0)までの高潮モデル計算のことである。

調査には2004～2010年のデータを使用した。ただし、七尾・敦賀は国土交通省港湾局から潮位データの配信を受けた2007年7月以降のデータを使用した。

調査を始めるにあたり、データの品質チェックを行ったところ、舞鶴ではハインドキャストが1～2時間の周期で大きく振動しており、この振動が調査に悪影響を及ぼすことが考えられた。また、



第1図 調査対象地点

*1 舞鶴海洋気象台(現 福岡管区気象台) *2 舞鶴海洋気象台(現 大阪管区気象台) *3 地球環境・海洋部海洋気象課

観測偏差はデジタル数値フィルター（ローパスフィルター）を用いた平滑化処理（気象庁気候・海洋気象部,1999）を行っているため、ハインドキャストをそのまま用いると条件が異なるデータを比較することとなる。このため、OMHを算出する前に、ハインドキャストに対して全地点・全期間とも観測値を平滑化すると同じカットオフ周期 209 分のローパスフィルターを用いた平滑化処理を実施した（第 2 図）。

3. OMH の大きさと発生割合の統計的調査

高潮モデルから大きく外れた事例を抽出するにあたり、能登や柏崎など、OMH 分布が正規分布から大きく外れた地点もあることから、本調査では 3σ 範囲外のような標準偏差を用いた条件ではなく、単純に OMH の大きい方から上位 0.1% までの事例を高潮モデルの計算結果が観測値を大きく下回った事例（以下、OMH の大きい事例）とし、上位 0.1% 時点の OMH を OMH 上位 0.1% のしきい値とした。また、OMH の大きさ別発生頻度の割合（OMH の値が $-50 \sim +100\text{cm}$ の間で、 10cm 区間ごとの発生回数の割合。以下、OMH の発生割合）の調査を行った。

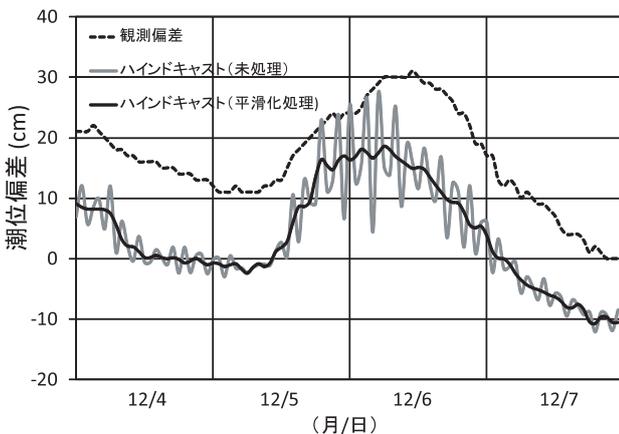
OMH 上位 0.1% のしきい値としきい値を超過した事例数を第 3 図に示す。OMH 上位 0.1% のしきい値は能登で $+38.5\text{cm}$ 、柏崎で $+34.3\text{cm}$ と比較的大きい、この 2 地点を除くと OMH 上位

0.1% のしきい値は $+30\text{cm}$ 以内になっており、高潮モデルの計算結果の 99.9% の OMH が $+30\text{cm}$ 以内に収まっていることがいえる。

OMH の発生割合のヒストグラムを第 4-1 図及び第 4-2 図に示す。OMH の発生割合は、全ての地点で $\pm 20\text{cm}$ 以内に全データの 90% 以上が含まれているが、柏崎・富山・能登では他の地点に比べて $\pm 20\text{cm}$ を超える割合が大きい。また、全ての地点で OMH はマイナスよりもプラス側の発生割合が大きく、正規分布に比べて非対称でプラス側に裾の長い分布となっている。OMH の最大値は、能登で $+93.1\text{cm}$ と特に大きく、柏崎と富山の $+40 \sim +50\text{cm}$ が続く。その他の地点はおおむね同じ傾向で $+20 \sim +40\text{cm}$ であった。

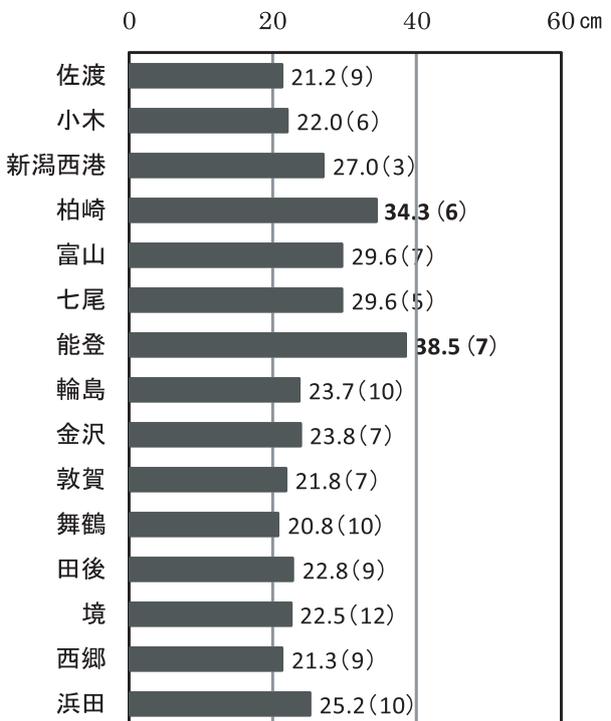
4. OMH の大きい事例の要因調査

第 4-1 図及び第 4-2 図に示したとおり、OMH はマイナスよりもプラス側の発生割合が大きい、すなわち見逃し事例が多いことが確かめられた。



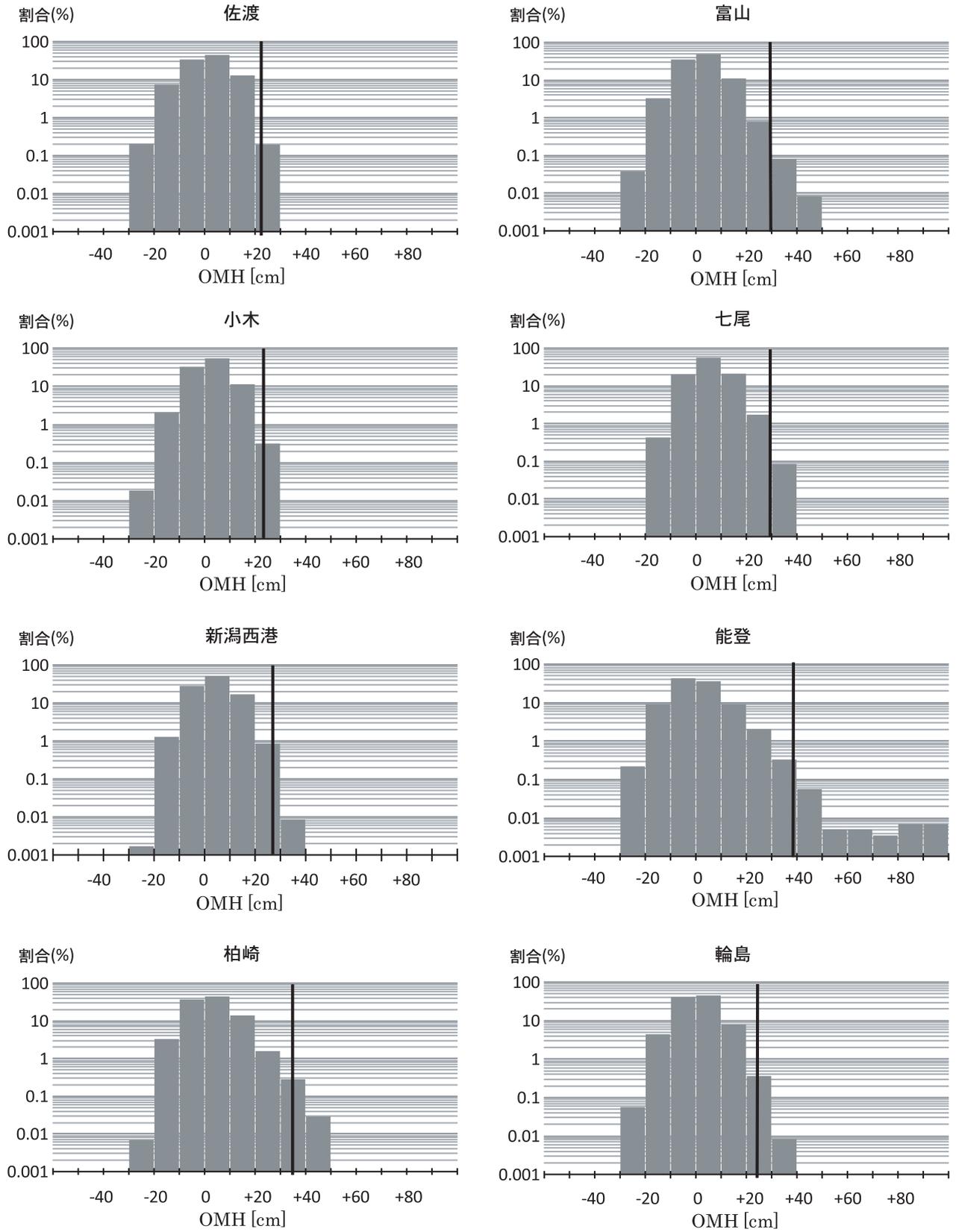
第 2 図 舞鶴の 2009 年 12 月 4 日～7 日の観測偏差とハインドキャストの時系列

点線が観測偏差、薄い実線がハインドキャスト、濃い実線はハインドキャスト（平滑化処理）。



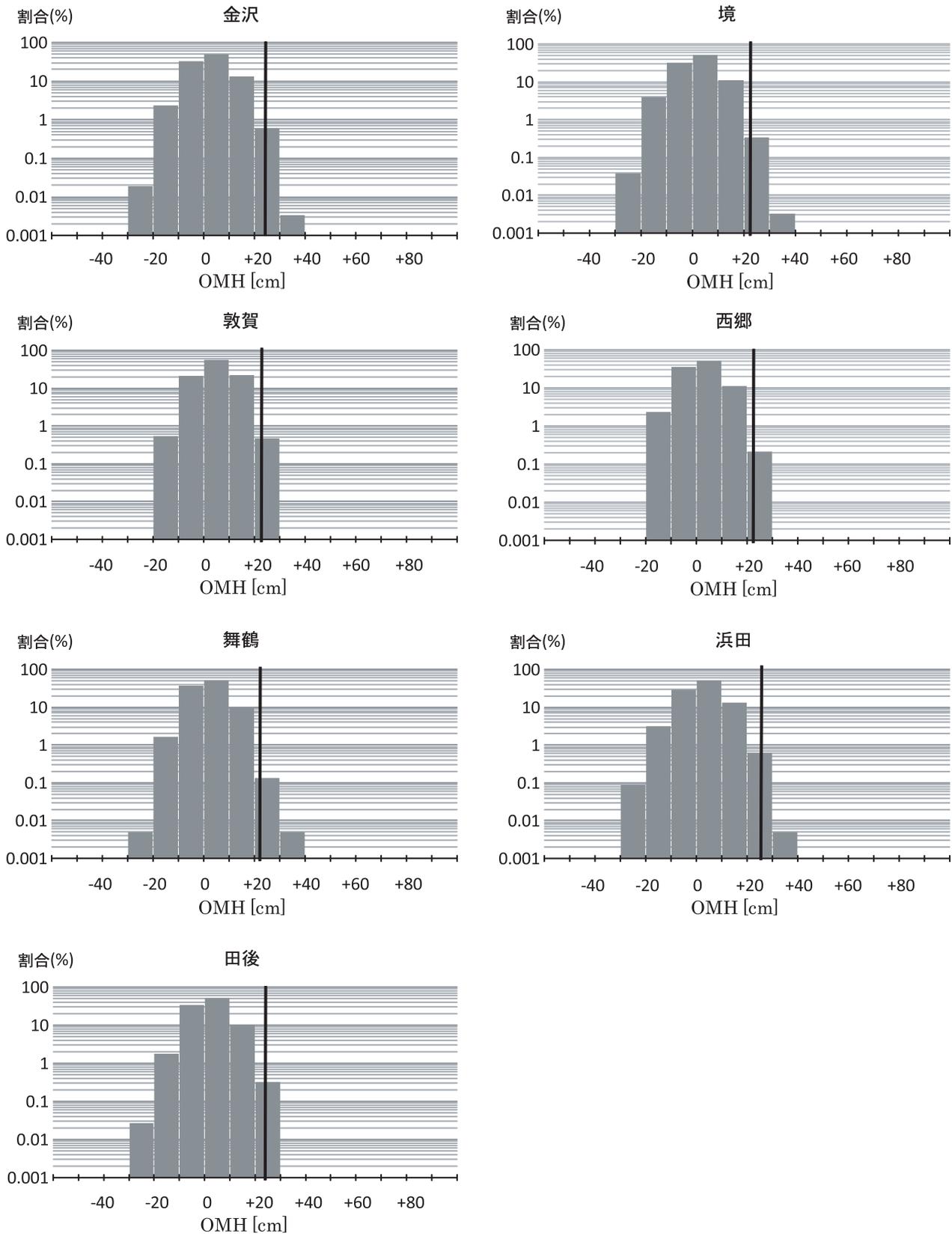
第 3 図 観測値とハインドキャストの差 (OMH) 上位 0.1% のしきい値と事例数

グラフの数値は OMH 上位 0.1% のしきい値 (30cm 以上は太字) と括弧内にそのしきい値を超過した事例数を示す。



第4-1図 新潟県～石川県の観測値とハインドキャストの差 (OMH) の発生割合のヒストグラム

図中の線はOMH上位0.1%のしきい値を示す. 左段は上から, 佐渡, 小木, 新潟西港, 柏崎. 右段は上から, 富山, 七尾, 能登, 輪島.



第4-2図 石川県～島根県の観測値とハインドキャストの差(OMH)の発生割合のヒストグラム

図中の線はOMH上位0.1%のしきい値を示す。左段は上から、金沢、敦賀、舞鶴、田後。右段は上から、境、西郷、浜田。

高潮モデルでは海洋要因や波浪による潮位上昇などが考慮されておらず、どの要因がどの程度見逃し事例に関連しているのかを知ることが大事と考える。そこで、山陰・近畿北部・北陸地方で OMH が大きい事例の要因を調べたところ、次の四つに分類することができた。なお、OMH マイナス側の空振りについては、事例数が少ないため今回は調査していない。

- ① 表層水温が高い等の海洋要因
- ② Wave Setup (波浪による潮位上昇)
- ③ 台風通過後の風の急変によって生じた慣性振動に起因する潮位振動
- ④ 高潮モデル計算結果の過大・過小

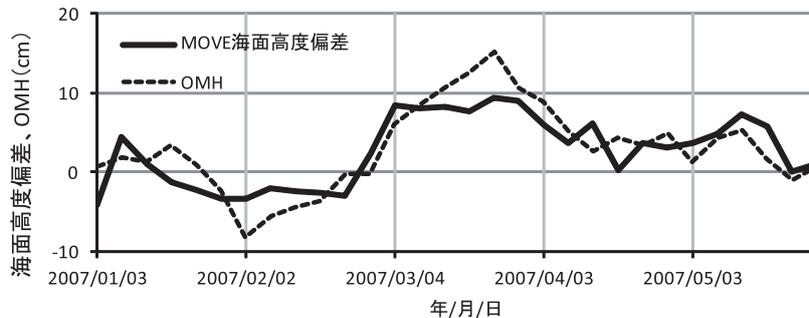
このうち、現在の高潮モデルで計算していない現象によるものが①②③、高潮モデルの誤差に該

当するものが④である。これらは以下の判断基準で分類した。

まず、OMH の大きい状態（おおむね +10cm 以上）が総観規模の時間スケール（1日～1週間程度）より長期間継続し、海洋データ同化システム（MOVE/MRI.COM）（石崎ほか，2009）による海面高度偏差と OMH との対応がよい場合は、海洋要因とした（第 5 図）。

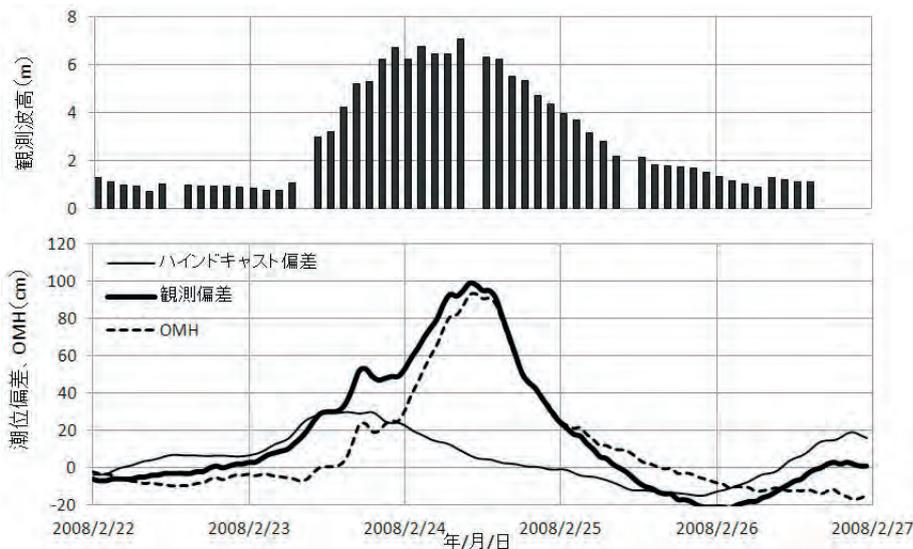
次に、おおむね 4m 以上の高波高時の波高の変化と OMH の変化との対応がよい場合は、Wave Setup とした（第 6 図）。

また、潮位振動は、風の急変により能登半島北岸沖でおよそ 20 時間周期の慣性振動が発生し、これに伴う潮位振動が富山湾内に伝搬することによって起こり、数日間継続するとされている（第



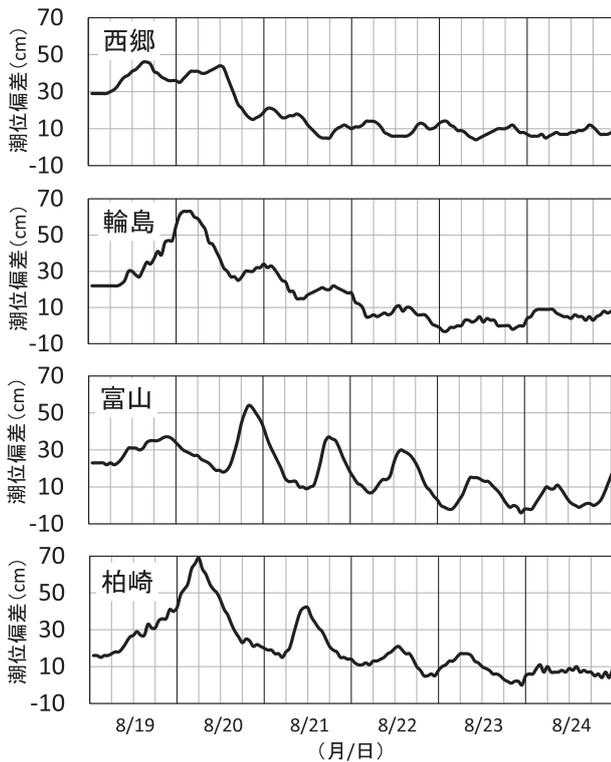
第 5 図 海洋要因事例

2007 年 1 月 3 日～5 月 28 日の半旬平均した舞鶴の観測値とハインドキャストの差（OMH）と MOVE/MRI.COM の舞鶴近傍の格子点（北緯 35 度 30 分，東経 135 度 24 分）における海面高度の 1985～2010 年同旬平均からの偏差。3 月上旬から 4 月上旬にかけて、海洋要因により OMH と海面高度偏差が大きくなっている。



第 6 図 WaveSetup 事例

2008 年 2 月 22～26 日の輪島港の有義波高と能登の観測値とハインドキャストの差（OMH）、観測偏差、ハインドキャストの時系列。波高は、港湾局波浪データ（ナウファス）データ（確定値）を利用



第7図 潮位振動事例
2004年8月19～24日の西郷、輪島、富山、柏崎の観測潮位偏差の時系列。台風第15号通過後の20日午後から数日間、潮位振動が続いた。

7図) (上野, 2006)。したがって、台風通過後に周期20時間程度の振動が数日間継続する場合は潮位振動とした。

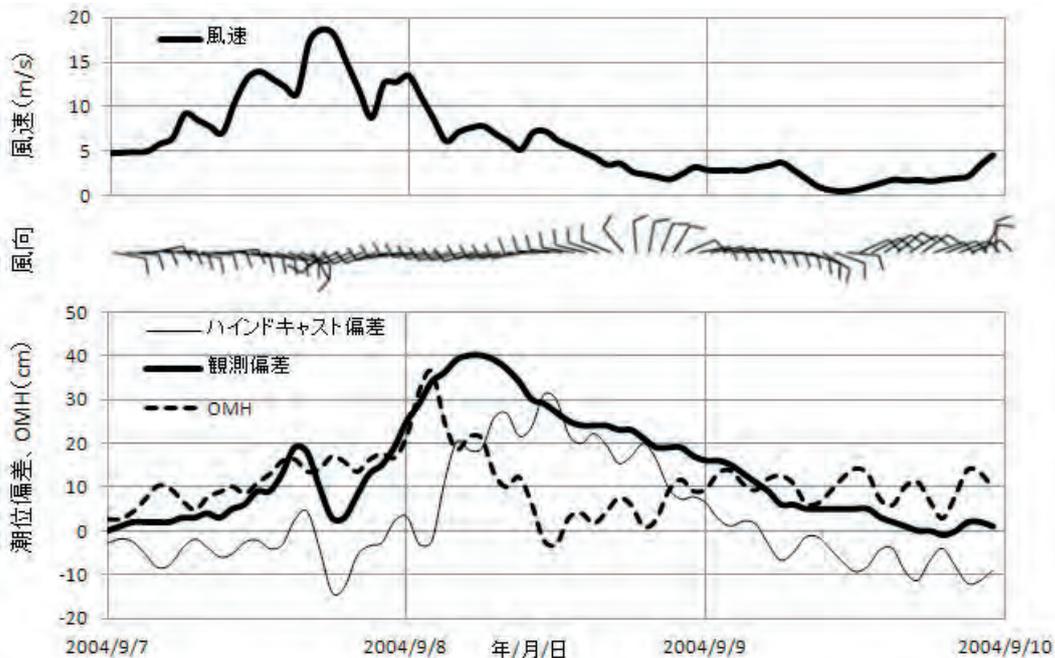
Wave Setup 及び潮位振動に該当せず、風向又は風速の変化に合わせてOMHが変化している場合は、高潮モデルの過大・過小と判断した(第8図)。

4.1 要因別の発生割合

ここではOMHが上位0.1%のしきい値を超え、+15cm以上の偏差が5時間以上の断裂がなく継続した場合を同一事例とみなした。ただし、富山湾等で観測されている慣性振動に起因する潮位振動による事例は、振動の周期が20時間程度であるため+15cmを下回った時間が5時間以上でも同一事例として扱った。

OMHの大きい事例について、要因別の発生割合と事例数を第9図に示す。複数の要因によってOMHが大きくなっていると判断した場合には帯グラフを上下に分割して、該当する要因を示した。

まず、海洋要因による事例が能登を除く地点でOMHの大きい事例の60%以上を占めている。継続時間がほかの要因と比べて長く、第5図に示したようにOMHのバイアスとして表現される。



第8図 高潮モデルの過大・過小事例
2004年9月7～9日の境の風向・風速と観測値とハインドキャストの差(OMH)、観測偏差、ハインドキャストの時系列。

次に高潮モデルの過大・過小予想は柏崎・富山を除く地点で確認され、新潟西港・七尾・金沢・舞鶴・境・西郷・浜田で OMH の大きい事例に対する割合が 67% 以上と比較的大きい。この高潮モデルの過大・過小は、北～東の風によって負の潮位偏差を過大に計算している事例が多い。

Wave Setup は柏崎・富山・能登・輪島・田後で確認された。特に能登では Wave Setup が全ての事例に参与しており、第 6 図に示したように OMH が +90cm を超える事例もあり 5 地点の中でも突出していた。

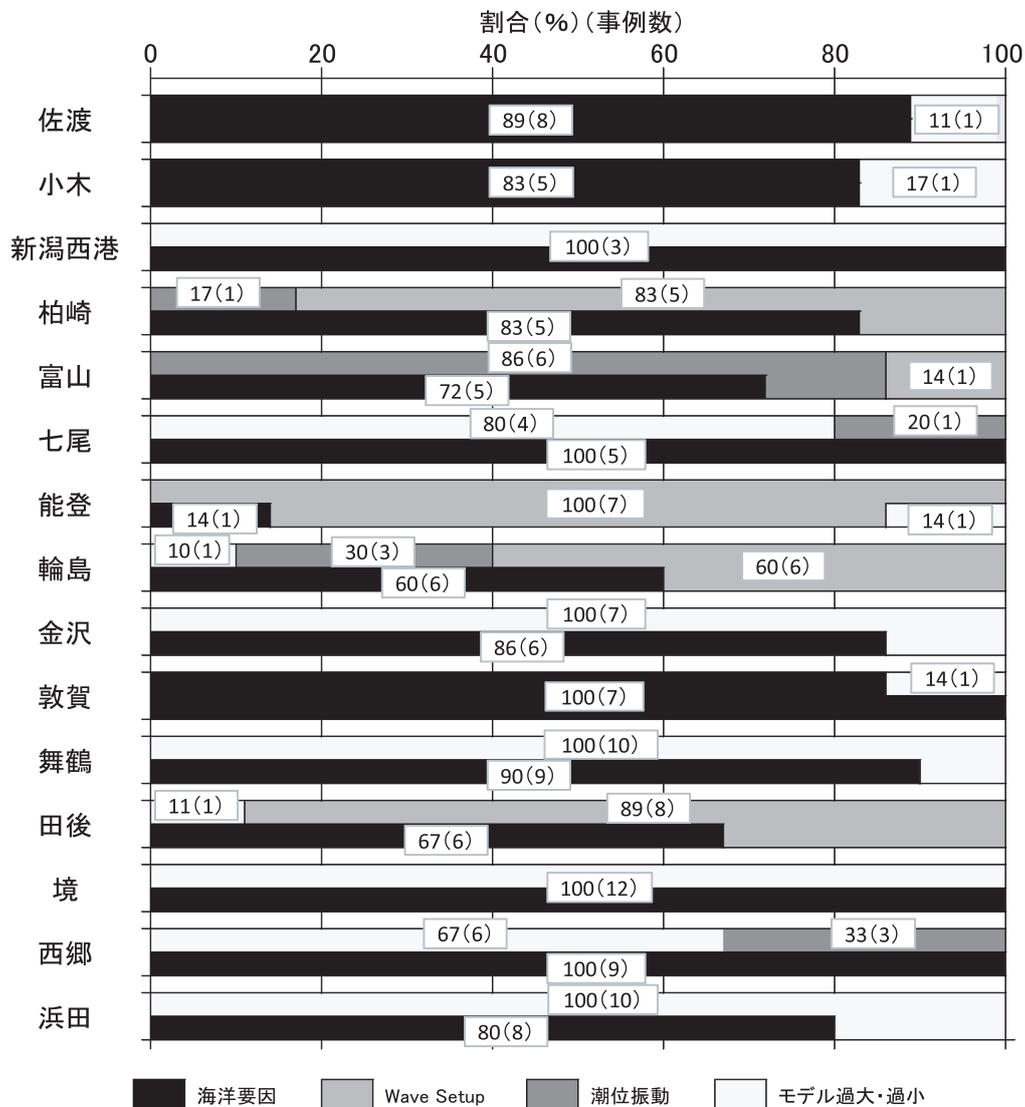
潮位振動は第 7 図に示したように柏崎・富山・

七尾・輪島・西郷で周期 20 時間程度の事例が確認された。特に富山では OMH の大きい事例の 86% と大きい割合を占めた。

その他の特徴として、佐渡・小木・能登・敦賀を除く地点では、複数の要因が重なった事例が 60% 以上となっており、その全てに海洋要因が含まれていた。

4.2 観測偏差と OMH の大きい事例

防災上の影響を考慮すると、OMH だけでなく観測偏差も大きい事例の要因を把握しておくことが重要である。そこで、全地点における第 4.1 節



第 9 図 観測値とハインドキャストの差 (OMH) の大きい事例の要因別発生割合と事例数

調査地点において、OMH の大きい事例の発生要因とその割合と括弧内に事例数を示す。複数の要因が重なった場合は主な 2 つの要因でグラフを二段にしている。

で抽出した OMH の大きい事例について、観測偏差が大きい順に上位 30 位以内の事例（以下、観測偏差と OMH の大きい事例）の要因も調査した。これは観測偏差で +34cm 以上の事例に相当する。全地点における観測偏差と OMH の大きい事例

について、観測偏差が大きい順番に第 1 表に示す。第 16 位以内（観測偏差が +43cm 以上）には、要因に Wave Setup を含む柏崎・能登・輪島・田後の事例と、要因に潮位振動を含む富山・西郷の事例が確認された。第 16～30 位（観測偏差が

第 1 表 観測偏差と、観測値とハインドキャストの差 (OMH) の大きい事例

全調査地点の OMH が大きい事例を、観測偏差が大きい順に上位 30 事例。観測偏差・OMH・ハインドキャストは、各事例の最大の OMH となった時刻の値で、単位は cm。OMH が 30cm 以上の事例は OMH の数字を太字で示す。

順位	地点名	日付	観測偏差	OMH	ハインドキャスト	要因
1	能登	2008/2/24 11:00	98	93.1	4.9	Wave Setup
2	能登	2004/11/27 5:00	67	42.1	24.9	Wave Setup
3	柏崎	2010/12/4 8:00	64	46.6	17.4	海洋要因+Wave Setup
4	能登	2006/12/29 18:00	61	48.8	12.2	Wave Setup
5	田後	2004/8/20 4:00	59	29.6	29.4	海洋要因+Wave Setup
6	柏崎	2004/11/27 7:00	56	44.2	11.8	Wave Setup
6	能登	2005/12/6 7:00	56	40.3	15.7	Wave Setup
8	富山	2004/8/20 19:00	54	49.2	4.8	海洋要因+潮位振動
9	輪島	2007/1/7 18:00	52	24.6	27.4	Wave Setup
10	柏崎	2007/3/13 0:00	48	40.8	7.2	海洋要因+Wave Setup
10	輪島	2004/11/27 5:00	48	28.5	19.5	Wave Setup
12	柏崎	2010/11/10 22:00	47	41.4	5.6	海洋要因+Wave Setup
13	能登	2004/12/6 12:00	45	41.3	3.7	Wave Setup
13	富山	2004/9/8 22:00	45	39.4	5.6	海洋要因+潮位振動
15	輪島	2008/2/24 8:00	44	34.2	9.8	Wave Setup
16	舞鶴	2004/10/20 19:00	43	36.2	6.8	北よりの風による吹き寄せ効果の増大を過小に予想
16	西郷	2004/8/20 12:00	43	27.2	15.8	海洋要因+潮位振動
18	柏崎	2004/8/21 11:00	42	44.8	-2.8	海洋要因+潮位振動
18	舞鶴	2004/8/20 7:00	42	25.8	16.2	海洋要因+風向変化によるエクマン効果の減少を過大に予想
18	西郷	2004/9/7 16:00	42	21.6	20.4	海洋要因+台風通過直後のエクマン効果の増大を過小に予想
21	富山	2010/11/10 7:00	41	36.8	4.2	海洋要因+潮位振動
22	七尾	2010/11/10 3:00	39	35.5	3.5	海洋要因+離岸風により負偏差を過大に予想
22	輪島	2010/11/10 21:00	39	26.4	12.6	海洋要因+西風の弱まりによるエクマン効果の減少を過大に予想
24	富山	2004/9/1 3:00	38	32.4	5.6	海洋要因+潮位振動
24	田後	2004/9/8 8:00	38	22.8	15.2	海洋要因+Wave Setup
26	輪島	2006/12/29 16:00	37	24.5	12.5	Wave Setup
26	新潟西港	2010/9/14 8:00	37	30.1	6.9	海洋要因+西よりの風によるエクマン効果の増大を過小に予想
28	富山	2010/9/14 12:00	36	32.5	3.5	海洋要因+潮位振動
29	新潟西港	2010/11/11 8:00	35	30	5	海洋要因+西風の弱まりによるエクマン効果の減少を過大に予想
30	境	2004/9/8 2:00	34	36.4	-2.4	海洋要因+東風から西風への風向変化によるエクマン効果の増大を過小に予想
30	輪島	2004/8/20 23:00	34	25.5	8.5	海洋要因+潮位振動

+34 ~ +43cm) には、要因に高潮モデルの過大・過小を含む新潟西港・七尾・輪島・舞鶴・西郷・境の事例が確認された。高潮モデルの過大・過小については、ほとんどがほかの風向から西よりの風が変わった際に正偏差の増大を過小に予想していたか、西よりの風が弱まる際に正偏差の減少を過大に予想していたために OMH が大きくなったと推察される (第 8 図)。このほか、第 16 位の舞鶴では北よりの風による吹き寄せ効果を過小に予想、第 22 位の七尾では離岸風による負偏差を過大に予想していたために OMH が大きくなったと考えられる。

日本海における OMH は、WaveSetup が要因の場合に大きい傾向がある。また、海洋要因は単独では大きな OMH となりにくい、他の要因と重なって大きな OMH となる傾向がある。

観測偏差と OMH の大きい事例の時期と総観場の特徴については、高潮モデルの過大・過小と潮位振動が要因となる時期は 8 ~ 11 月となっており、台風や日本海低気圧が影響していた。Wave Setup が要因となる時期は、8 ~ 3 月となっており、台風や日本海低気圧、冬型の気圧配置時の高波が影響していた。

なお、海洋要因による事例については、特に季節的な特徴はみられなかった。

5. 考察

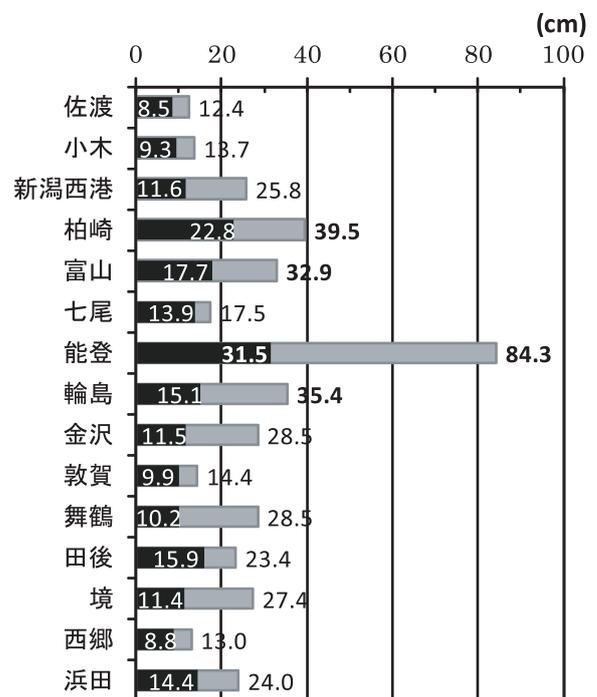
5.1 ハイパスフィルターを用いた考察

前節で調査した OMH の大きい事例の調査では、海洋要因がほかの要因と複合している事例が多かった。OMH にハイパスフィルターをかけ、海洋要因によるバイアスである長周期成分を除き、高潮モデル計算結果の過大・過小、Wave Setup、台風通過後の風の急変によって生じた慣性振動に起因する潮位振動といった数時間 ~ 1 週間程度の周期成分に対応した OMH の大きさの調査を行った。なお、ハイパスフィルターに用いたカットオフ周期は、高・低気圧の時間スケール (1 日 ~ 1 週間程度) と海洋要因の時間スケール (1 週間 ~ 3 か月程度) を考慮して、高・低気圧の時間スケールよりやや長い 300 時間 (12.5 日) とした。

第 10 図によると、海洋要因を除いた OMH の上位 0.1% のしきい値は、能登・柏崎で +20cm を富山・輪島・田後では +15cm を超えているが、そのほかの地点では +15cm 以内に収まっている。Wave Setup や潮位振動が卓越する田後や柏崎から輪島にかけての各点を除くと OMH の上位 0.1% のしきい値は、ハイパスフィルターをかけていない第 3 図の値と比較してほぼ半減しており、OMH に対する海洋要因の大きさを明示している。

海洋要因を除いた OMH の最大値は、能登で +84.3cm と特に大きく、次いで柏崎・富山・輪島で +30 ~ +40cm と大きく、新潟西港・金沢・舞鶴・田後・境・浜田で +20 ~ +30cm、佐渡・小木・七尾・敦賀・西郷で +10 ~ +20cm と小さい。

これらの結果は日本海における高潮モデルの精度が高いことを示しており、長期的に継続する海洋要因は実況から見積もったうえで、高潮モデルに含まれていない数時間 ~ 数日の時間スケールをもつ Wave Setup や 10 日程度継続することが多い潮位振動を適切な手法で見積もることができれば



第 10 図 海洋要因を除いた観測値とハインドキャストの差 (OMH) 上位 0.1% のしきい値と最大値
海洋要因を除いた OMH 上位 0.1% のしきい値を黒色棒グラフと白文字で、最大値を灰色棒グラフと黒文字で示す。30cm を超えるものに関しては太字としている。

防災上有益な情報を地方予報中枢官署に提供可能と考える。

なお、七尾の最大値が小さい理由は、データの期間が2007年7月～2010年12月と短く、2004年の富山湾での潮位振動のデータを含まないためと考えられる。

5.2 解説資料作成時の留意事項

ハイパスフィルターを用いた結果では、海洋要因を除いた高潮モデルの予測誤差には地点別の要因がはっきりしていることが明らかになったことから、以下の事項に留意すれば防災上有益な解説資料の提供につながるものと期待される。

- ①海洋要因でOMHが大きくなる場合は、その期間が比較的長いことが多く、ほかの要因と重なり更にOMHが大きくなる可能性がある。実況でOMHが正の状態が続いて海洋要因が疑われる場合は、台風や低気圧の通過、西高東低の冬の気圧配置によりOMHが更に大きくなる可能性を考慮する。
- ②高波が予想される場合は、能登～柏崎の沿岸と、田後周辺の沿岸についてWave Setupの可能性を考慮に入れ、Wave Setup予測式(森・小林, 2012)によるガイダンスの補正を行う。ただし、この予測式は有義波高に対する二次式で与えられるため、波向きによっては必ずしも妥当な補正を与えられるとは限らない。このため波向きごとの補正方法の検討が必要である。
- ③潮位振動については密度場を考慮した高潮モデルの三次元化が望ましい解決法であるが、直ちに導入することは困難と認識している。当面、台風通過後の風の場の変化を監視し、発生が予見される場合に定性的注意喚起を行うとともに、潮位振動の予測手法(木瀬・高佐, 2008)による定量化を試みる。

6. まとめ

海洋要因を除いたOMHについて、いくつかの地点を除き全データの99.9%が+15cm以内に含まれており、日本海での高潮モデルの精度は高いことが分かった。一方で+15cmを超える地点

では、地点ごとの特徴に留意すればよい。Wave Setupの影響は田後・輪島・能登・柏崎で、潮位振動の影響は富山で大きい。海洋要因によるバイアスを踏まえたうえで、OMHを大きく増大させることがあるWave Setup及び潮位振動が発生しやすい気象条件に留意すれば、有益な解説資料が提供できる。

なお、今回の調査で利用した観測偏差はローパスフィルターを用いた平滑処理がなされている。このため高潮警報・注意発表の基準として用いられる瞬間値による潮位について検証されておらず、高潮の極値や副振動について評価されていない。今後、瞬間値を用いた高潮モデルの検証を行う必要がある。その場合、能登等の井戸を有しない検潮所の瞬間値を求めるためにローパスフィルターのカットオフ周期3分が適切かどうかについても併せて検討する必要がある。

参 考 文 献

- 大門秀志・森裕之・板垣真資・若林吾宇(2011): 山陰～北陸地方の海域における高潮ガイダンスの特性調査と補正方法の検討. 平成22年度海洋気象技術検討会要旨集, 9pp.
- 石崎士朗・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲地政文(2009): MOVE/MRI.COMの概要と現業システムの構築. 測候時報, 76, 特別号, S1-S15.
- 木瀬宏和・高佐重夫(2008): 能登半島東岸の潮位振動の予測手法. 平成20年度東京管区調査研究会誌(CD-ROM版).
- 気象庁気候・海洋気象部(1999): 潮汐観測原簿(毎時・満干潮, 毎時偏差, 年)及び津波記録整理表・高潮記録整理表作成要領.
- 森裕之・小林宰(2012): wave setupの発生地点及び予測一潮位・波高観測値及び高潮ガイダンスによる解析一. 平成23年度海洋気象技術検討会要旨集, 5pp.
- 上野大輔(2006): 能登半島北岸から富山湾で発生した潮位振動のシミュレーション. 測候時報, 73, 特別号, S51-S62.