高潮モデルとその利用
高潮事例における予報作業

令和4年3月

気象庁　大気海洋部
環境・海洋気象課　海洋気象情報室

令和3年度版

気象庁 Japan Meteorological Agency　1

改訂履歴

2020年3月　令和元年度版作成

2021年3月　令和2年度版に更新

2022年3月　令和3年度版に更新

・2020年の検証結果を追加（第3節、第4節）

・最近の高潮モデル改善事項の説明を追加（第3節）

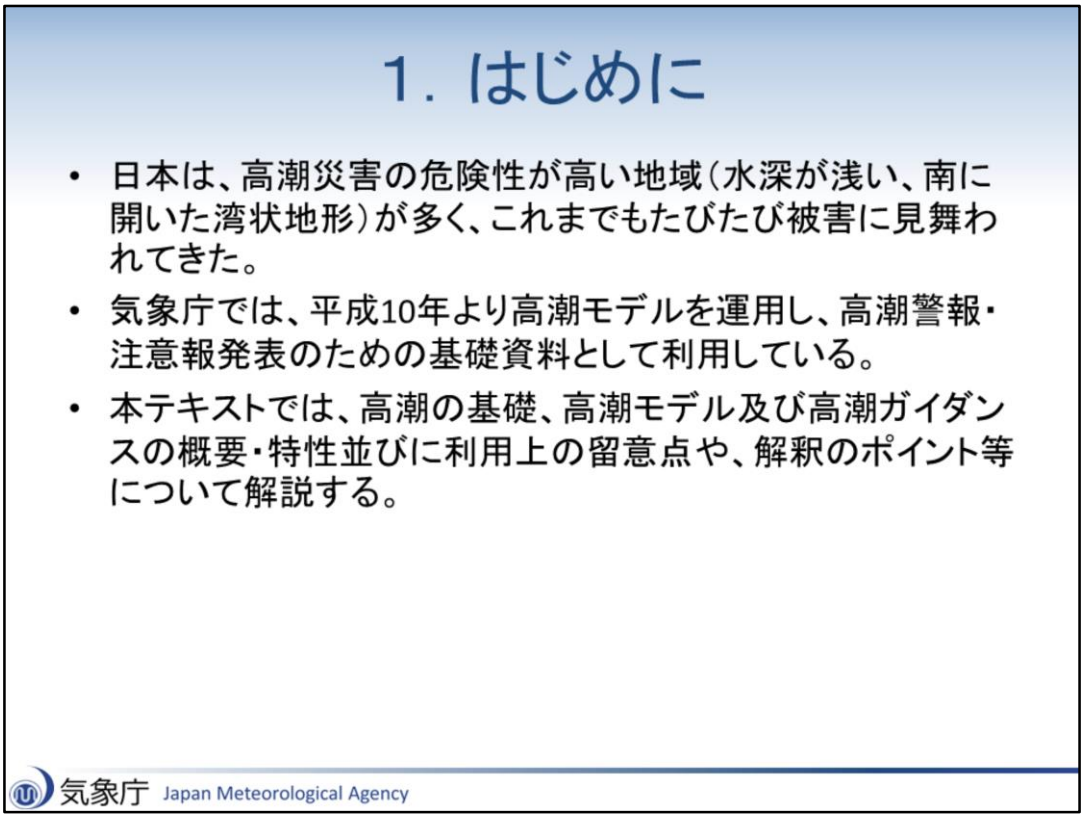
・今後の改善計画の内容を更新（第8節）

・その他、記載事項の軽微な修正。

目次

1. はじめに
2. 高潮の基礎
3. 高潮モデル
4. 高潮ガイダンス
5. 平成30年台風シーズンの事例検証
6. 令和元年台風シーズンの事例検証
7. 高潮モデル・ガイダンス解釈のポイント
8. 改善に向けて
9. まとめ

1. はじめに



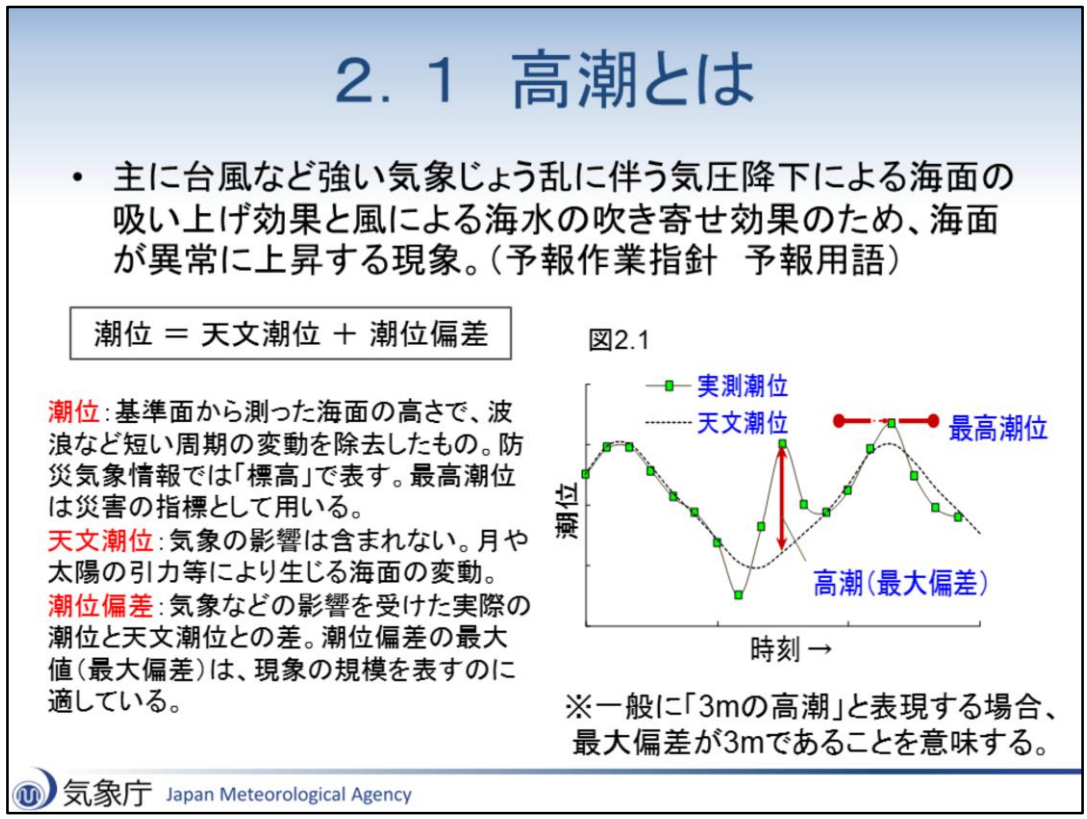
1. はじめに

我が国は、水深が浅く南に開いた湾状地形が多く、高潮災害の危険性が高い地域が多い。そのため、高潮に関して正確かつ迅速な情報発表が、国民の生命・財産を守るために必要不可欠のものとなっている。

気象庁では、平成10年7月より高潮モデルの運用を開始し、高潮警報・注意報の発表に関する基礎資料として利用してきた。これまでに様々な改善・変更が行われてきており、現在は、日本全国の沿岸域に対して、1kmの解像度で、39時間先までの高潮予測計算を、1日8回運用している。また、高潮モデルの結果は、波浪効果（Wave Setup）や海況要因、浅海潮などの補正を行った上で、高潮ガイダンスとして配信している。

本テキストでは、高潮の基礎、高潮モデル及び高潮ガイダンスの概要・特性並びに利用上の留意点や、解釈のポイント等について解説する。また、顕著な高潮が観測された平成30年及び令和元年の台風シーズンについて、事例検証の結果を紹介する。

2. 高潮の基礎



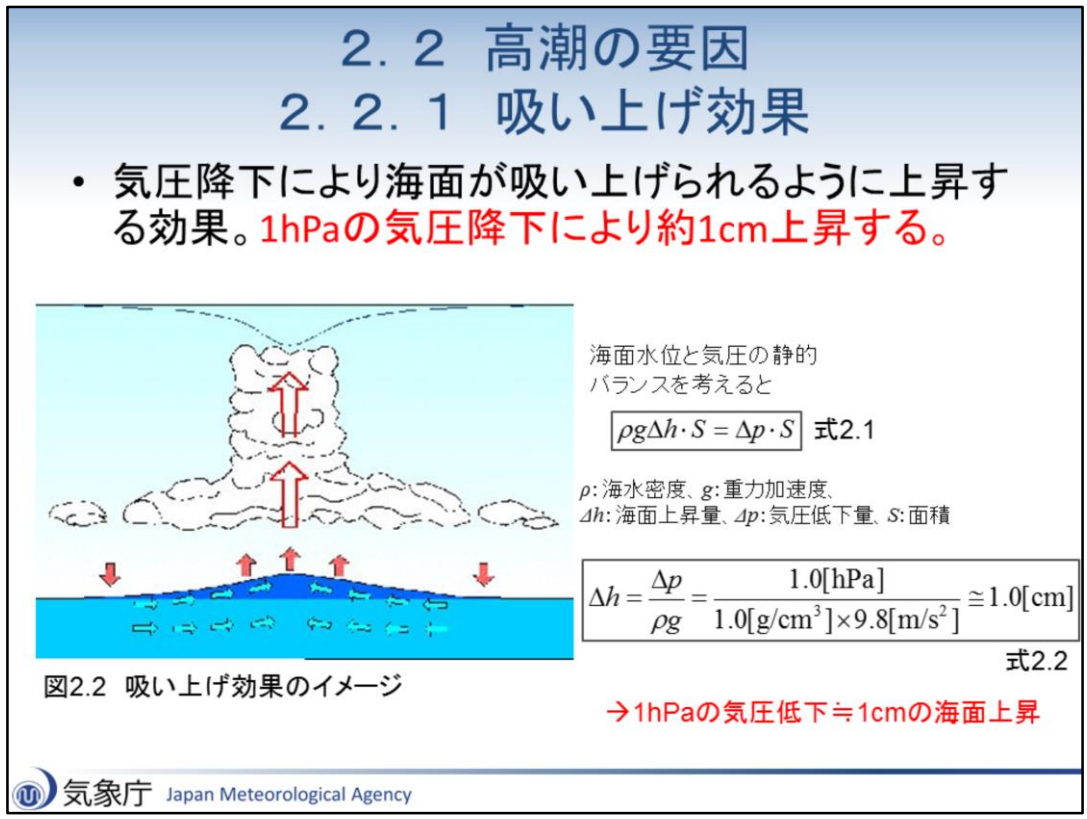
２．１　高潮とは

高潮とは「主に台風など強い気象じょう乱に伴う気圧降下による海面の吸い上げ効果と風による海水の吹き寄せ効果のため、海面が異常に上昇する現象」である。

満潮・干潮のように月や太陽からの重力によって引き起こされる海水の上昇・下降を潮汐と言い、それに伴う潮位を天文潮位という。実際に観測される潮位には天文潮位のほかに、海面気圧の変化や海岸に強風が吹きつけることなど、気象要因により引き起こされる潮位の上昇・下降が重なっている（図2.1）。観測される潮位と天文潮位との差を潮位偏差と呼び、大きな正の潮位偏差は高潮と呼ばれる。潮位偏差は現象の規模を表すのに適している。一方、天文潮位と潮位偏差を足し合わせた潮位は、海面の実際の高さであるため、災害の指標として用いられる。

一般に「3mの高潮」と表現する場合、潮位偏差が3mであることを意味する。ただし、一般へのわかりやすさの観点から、高潮を定量的に表現する場合には、東京湾平均海面（Tokyo Peil：T.P.=「標高」の基準）上の最高潮位の値なのか、又は（天文潮位からの）潮位偏差の最大値を指しているのか、明示することが望ましい。

なお、「高潮偏差」と記述している資料をしばしば見かけるが、気象庁ではこの表現は使用していない。



２．２　高潮の要因

２．２．１　吸い上げ効果

台風や低気圧の中心では気圧が周辺より低いため、気圧の高い周辺の空気は海水を押し下げ、中心付近の空気が海水を吸い上げるように作用する結果、海面が上昇する。これを吸い上げ効果と呼ぶ（図2.2）。

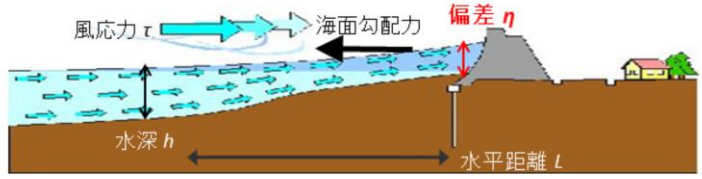
この吸い上げ効果は、吸い上げられた水にかかる力の釣り合いから求めることができる。ある面積を持つ海水柱の真上に低気圧があると考えると、海水上昇分の重力は、海水密度（ρ）、重力加速度（g）、海面上昇量（Δh）及び面積（S）より、ρgΔh・Sと表される。これが面積（S）における気圧の減少分（Δp）と釣り合うことから、式2.1の関係（静水圧平衡の関係）が得られる。式2.1から海面上昇量（Δh）を求めると、式2.2により1hPaの気圧の減少により約1cm海面が上昇すると見積もることができる。

したがって、台風などの気象じょう乱接近前に1000hPaであったとして、気象じょう乱により気圧が970hPaに低下した場合、吸い上げ効果による海面上昇量は約30cmであると見積もられる。

２．２　高潮の要因
２．２．２　吹き寄せ効果

- 風により海水が海岸に吹き寄せられる効果。水位の上昇量は、風速の2乗に比例し、水平距離が長く、水深が浅いほど大きい。

図2.3　吹き寄せ効果のイメージ



τ: 風応力(風速2乗に比例)、
L: 水平距離、h: 水深

風応力と海面勾配力のバランスから

$$g\frac{\partial \eta}{\partial x}=\frac{\tau}{\rho h} \quad \text{式2.3}$$

$$\eta=\int_0^L \frac{\tau}{\rho g h}dx=\frac{\tau}{\rho g h}\cdot L \quad \text{式2.4}$$

→風速の2乗に比例し、水平距離が長く、水深が浅いほど大きい。

気象庁 Japan Meteorological Agency

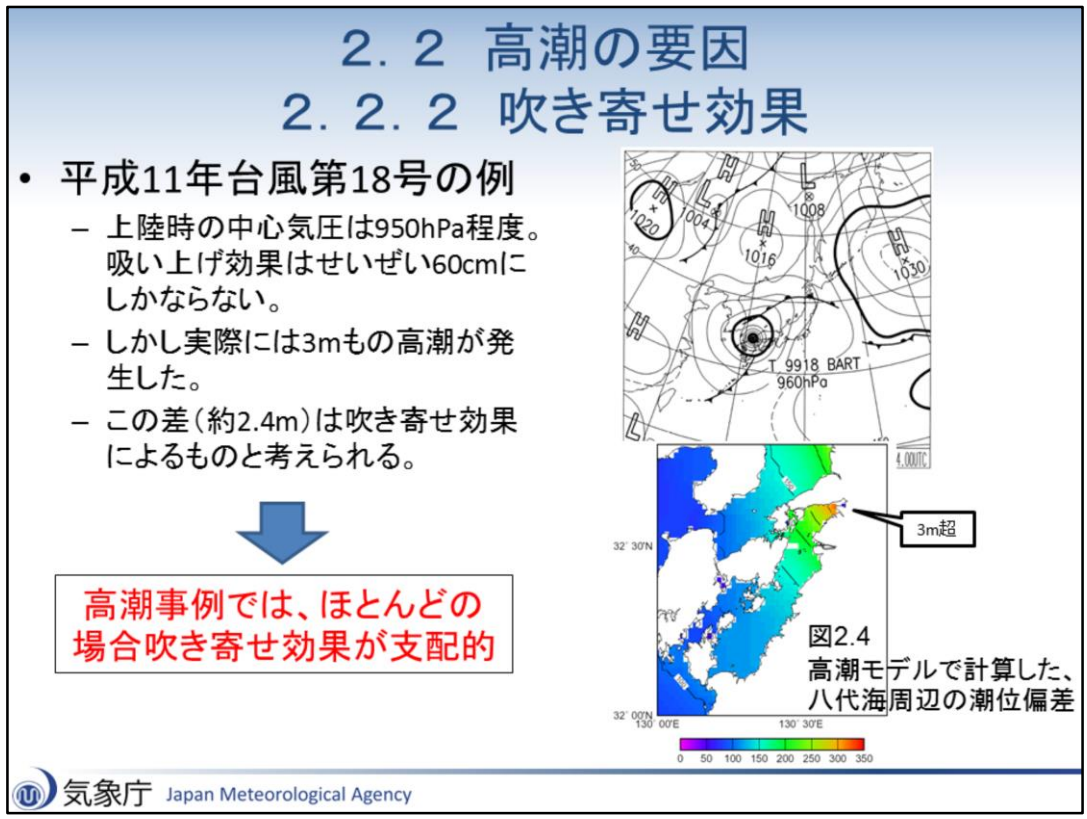
２．２　高潮の要因

２．２．２　吹き寄せ効果

台風や低気圧に伴う強い風が沖から海岸に向かって吹くと、海水は海岸に吹き寄せられ、海岸付近の海面が上昇する。これを吹き寄せ効果と呼ぶ（図2.3）この効果による潮位の上昇は風速の2乗に比例し、風速が2倍になれば海面上昇は4倍になる。また遠浅の海や、風が吹いてくる方向に開いた湾の場合、地形が海面上昇を増大させるように働き、特に潮位が高くなる。

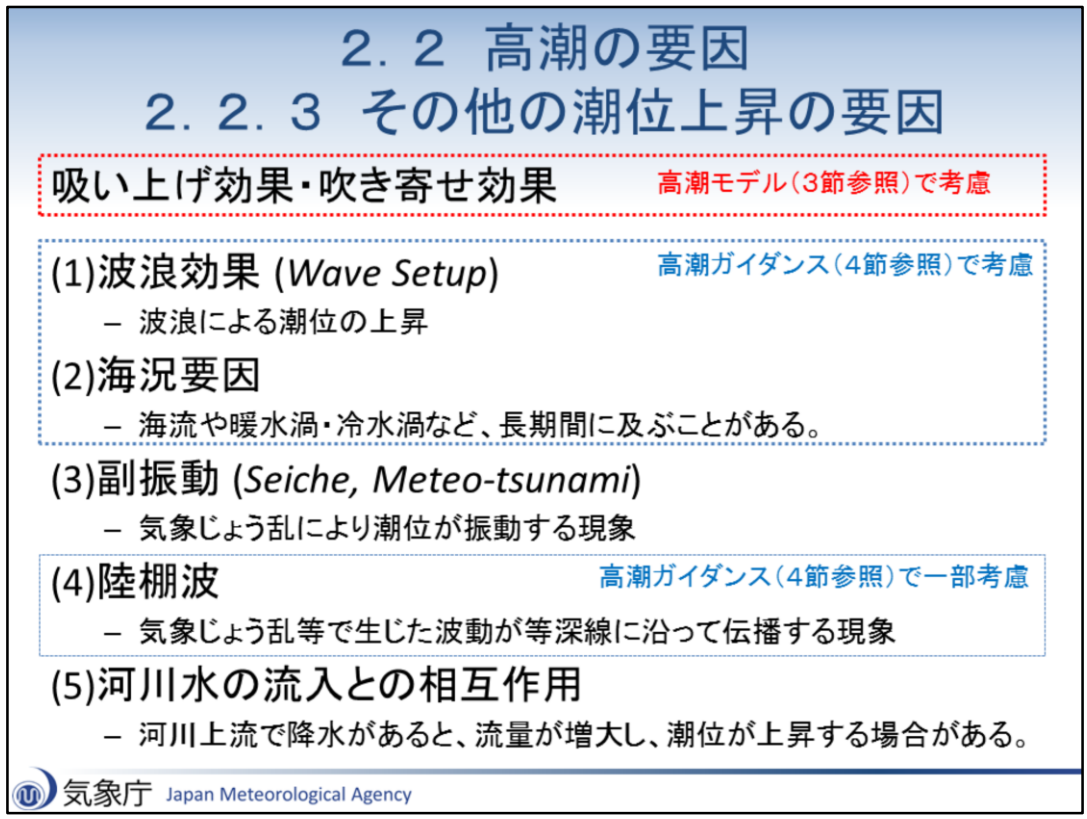
この吹き寄せ効果は、海岸にかかる風応力が海面勾配による力と釣り合うことから求められる。吹き寄せ効果の模式図を図2.3に示す。図中右に海岸があり、左から右に向かって風が吹いているとする。このとき、海岸に吹きつける風による力は、風応力（τ）、海水密度（ρ）及び水深（h）より、τ/ρhと表される。一方海岸付近の海面上昇に伴う海面勾配による力は、重力加速度（g）、海面上昇量（η）及び海岸から風が吹いてくる方向の距離（x）より、gδη/δxと表されることから、両者のつり合いより、式2.3が得られる。式2.3から海面上昇量（η）を求めると、式2.4が得られる。ここでは海岸から沖合までの距離をLとした。風応力（τ）は風速の2乗に比例するので、式2.4の関係から「吹き寄せ効果による海面上昇量は、風速の2乗に比例し、水平距離に比例し、水深に反比例する」ことが分かる。

この関係より、水深が浅く、遠浅の海岸では吹き寄せ効果が大きく寄与することが分かる。



2.2.1で述べたように、吸い上げ効果については「海面気圧が1hPa降下→潮位が約1cm上昇」の関係が成り立つので、どんな強い台風でも吸い上げ効果による潮位上昇は高々数10cm～1mである。一方、過去に甚大な被害をもたらした高潮は数mを記録していることから、一般に吹き寄せ効果は吸い上げ効果よりも高潮への影響が支配的であると言える。

図2.4は、平成11年台風第18号により、八代海沿岸地域で浸水被害が起こった事例である。台風上陸時の中心気圧はおよそ950hPaであり、吸い上げ効果は60cm程度であったと考えられるが、現地調査によると局地的には3mもの高潮が発生していた（気象庁技術報告第122号より）。この差約2.4mは吹き寄せ効果によるものと考えられ、高潮事例では吹き寄せ効果が支配的であることが分かる。



２．２　高潮の要因

２．２．３　その他の潮位上昇の要因

これまで、高潮の主要因である吸い上げ効果及び吹き寄せ効果について述べたが、その他の潮位上昇の要因について説明する。なお、（1）の波浪効果（Wave Setup）以外は、高潮とは切り離して考えるべき現象もあるが、実際に高潮災害が起こる際はこれらの要因が複合して起こる場合があるため、本テキストでは同じ項で扱う。

(1)　波浪効果（Wave Setup）

外洋に面した海岸や島嶼部では、波浪が砕波する際に潮位が上昇する現象が見られることがあり、波浪効果（Wave Setup）と呼ばれている。Wave Setupを数値モデルで再現するためには数十mという空間解像度が必要なため、現業高潮モデルに組み込んではいない。ただし、過去の観測からWave Setupの影響が大きな地点は限られていることが分かっているので、高潮ガイダンスでは、別途実験式により見積もった値で補正している。詳細は第4節で述べる。

(2)　海況要因

海水温が高ければ、海水の熱膨張により海面は上昇し、海水温が低ければ下降する。温暖な海流や暖水渦・冷水渦などの海況の現象は比較的長期間に及ぶため、天文潮位に対して潮位のバイアスとなって現れる。高潮ガイダンスでは、数日前からのバイアスを補正値としている。詳細は4.2で述べる。

(3)　副振動

気象じょう乱が接近・通過する際、湾内の潮位が振動する現象が見られることがあり、これを副振動と呼んでいる。その振幅は1m以上になることがあり、漁船の転覆や低地での浸水などの被害が発生することがある。振動の周期は地形（例えば湾の幅や奥行きなど）に依存する。台風通過後に湾内で生じる周期数十分～数時間程度の副振動でかつ高潮モデルの解像度で表現可能であれば、振幅が過大ではあるものの、ある程度の再現は可能である。詳細は4.4を参照のこと。

(4)　陸棚波

台風や低気圧によって沿岸付近に励起された波動が、岸を右に見ながら陸棚に沿って伝播することがあり、これを陸棚波と呼んでいる。この現象は潮位を数10cm上昇させることがある。詳細は4.4を参照のこと。

(5)　河川水の流入との相互作用

河川上流で降水があると、河川流量が増大し、潮位が上昇する場合がある。特に海水の出入りが制限されるような閉鎖された湾内ではこのような現象が潮位に影響することがある。詳細は4.4を参照のこと。

2．3　波浪や津波との違い

- 高潮は津波と同じく浅水波
- 波浪との共通点
  - 外部重力波
  - 主な原因は気象じょう乱
- 波浪との相違点
  - 時間・空間スケール
    - 高潮：個々の波動を数kmの格子で表現可能
    - 波浪：格子より波長が短いのでスペクトルで表現
  - 影響の及ぶ場所
    - 高潮：沿岸のみ
    - 波浪：外洋・沿岸両方

図2.5　海洋現象の時空間スケール

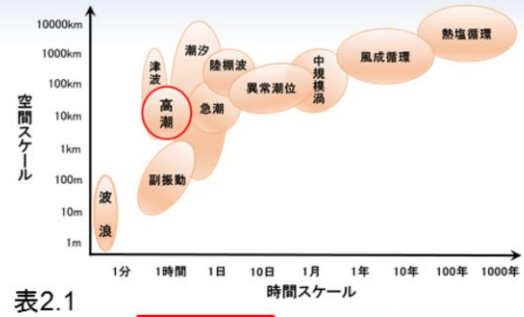


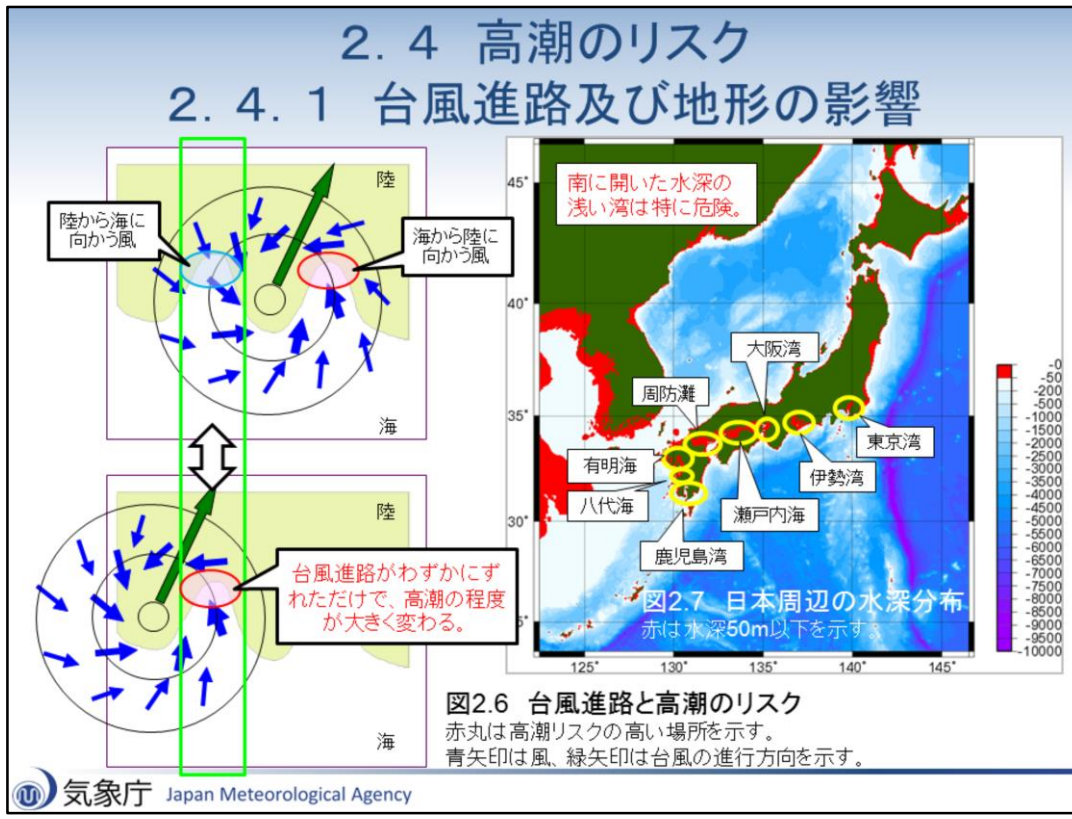
表2.1

	高潮	波浪	津波
原因	強風, 海面気圧低下	強風	海底地震, 噴火など
性質	浅水波	深水波	浅水波
空間スケール	10^5m	10^2m	$10^{5\sim6}$m
時間スケール	$10^{2\sim3}$s	10^1s	10^2s

気象庁 Japan Meteorological Agency

2．3　波浪や津波との違い

図2.5に主な海洋現象の時空間スケール、表2.1に高潮と波浪や津波との比較を示す。図2.5に赤丸で示したのが高潮の時空間スケールで、時間的にはおよそ数10分～数時間程度、空間的には数km～数10km程度のスケールを持ち、津波に近い現象であることが分かる。高潮は津波と同じく、波長が水深に比較して十分に大きい浅水波に分類される。波浪は、高潮と同様に主な原因が気象じょう乱であるが、時空間スケールが非常に小さい。高潮は個々の波動を数kmの格子で表現可能であるが、波浪は波長が短いため、数値モデルでは一般にスペクトルにより表現される。また、波浪は沿岸・外洋両方に影響を及ぼすが、高潮に関しては影響は沿岸域のみである（外洋でも高潮は起こるが、海岸で見られる吹き寄せ効果がないため潮位偏差が小さく、災害のリスクという観点では影響がない）。



２．４　高潮のリスク

２．４．１　台風進路及び地形の影響

一般に、高潮において吹き寄せ効果の影響が支配的であるため、台風に伴う高潮のリスクはその進路に大きく依存している。図2.6は台風上陸時の風向きを示した模式図である。一般に、台風の東側で南寄りの風、西側で北寄りの風となる。台風中心を境に風向きが逆になるため、進路がほんのわずかずれただけで、地点によっては生じる潮位偏差の正負が変わるほどの影響が出ることが分かる（実際には、更に台風の移動速度が加算される）。吹き寄せ効果の性質を考慮すれば、南に開いた水深の浅い湾というのは特に危険であることが分かる。（図2.7参照）

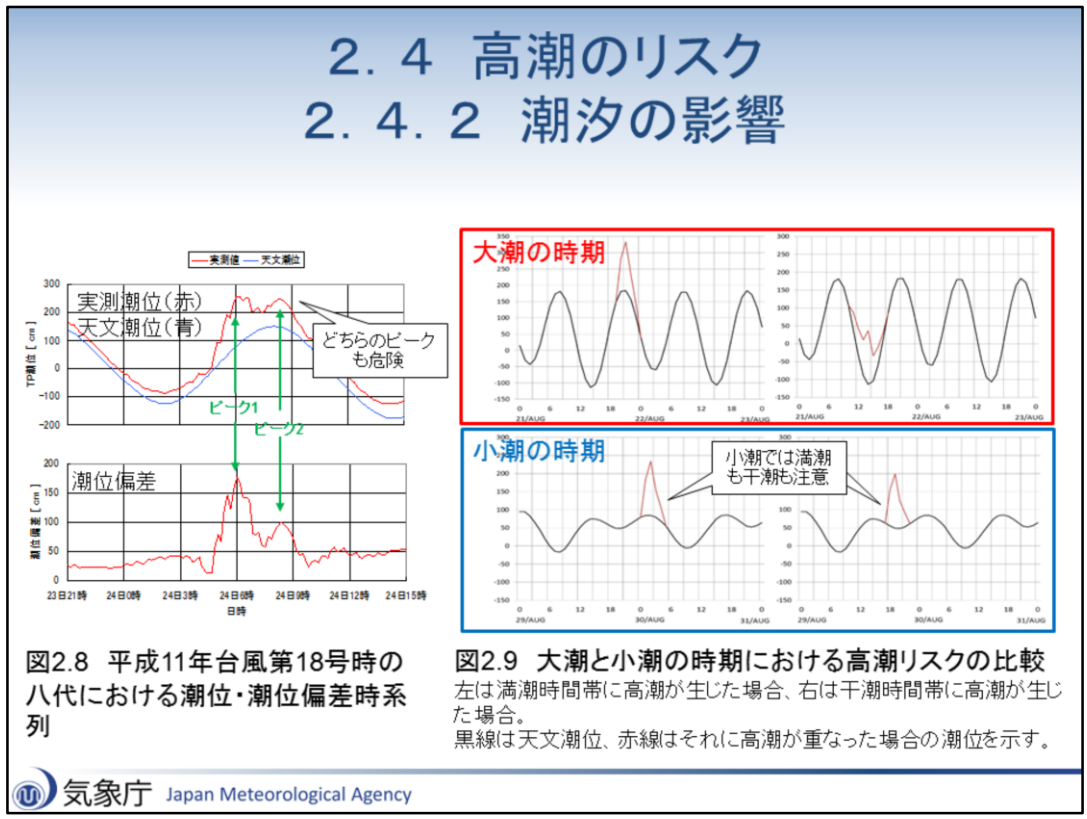


図2.8　平成11年台風第18号時の八代における潮位・潮位偏差時系列

図2.9　大潮と小潮の時期における高潮リスクの比較
左は満潮時間帯に高潮が生じた場合、右は干潮時間帯に高潮が生じた場合。
黒線は天文潮位、赤線はそれに高潮が重なった場合の潮位を示す。

2．4　高潮のリスク

2．4．2　潮汐の影響

2.1で述べたように、災害時の指標として重要になってくるのは天文潮位※に潮位偏差を足し合わせた潮位である。

天文潮位の変動は地形や季節にもよるが、日本国内においてその振幅は最大で2.5m以上にもなる。そのため、最も危険となるのは満潮時間帯に高潮が重なる場合であるが、これを「満潮時間帯以外は安全である」と解釈するのは誤りである。図2.8は平成11年台風第18号時の、熊本県八代における潮位と潮位偏差時系列である。このとき潮位偏差（高潮）のピークは2回あり、1回目は満潮時間前に、2回目は満潮時間帯に起こった。1回目の潮位偏差のピークは2回目よりもかなり大きかったため、実際の潮位で見ると、1回目と2回目のピークはほぼ同程度の高さとなった。高潮被害の最も大きかった松合地区における現地での聞き取り調査によると、満潮時間帯（9月24日午前8時頃）よりも前の、午前5時30分頃に浸水が始まったという（気象庁技術報告第122号より）。

図2.9は、大潮・小潮の時期における満干潮時に高潮が重なったときの潮位を表す模式図である。大潮の時期においては満潮と干潮の差が大きくはっきりしており、満潮時間帯に高潮が重なると重大な災害に繋がるおそれがある。干潮時間帯に高潮が予想されていたとしても、予想される高潮発生時刻には誤差があるため、ピークが満潮時間帯にずれ込むリスクも考慮する必要がある（第7節参照）。小潮の時期では満干潮の差が小さく、場所によっては例え干潮時間帯でも、満潮時間帯と同程度に高潮災害の危険性が高くなる場合がある。

※天文潮位

天文潮位は潮汐に伴う潮位の変動である。潮汐を起す力（起潮力）は天体（月と太陽）と地球との間の引力と慣性力の合成で表され、大部分の運動は周期的であるため、起潮力は三角関数で表される様々な周期の成分の総和により計算することができる。この個々の周期の成分を分潮と呼び、各周期成分の振幅と遅角（天体の周期的な運動に対する遅れ具合）の値を調和定数と呼ぶ。気象庁では60個の分潮からなる潮汐調和定数を用いて、天文潮位の計算を行っている。天文潮位については、気象庁ホームページの解説（https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/suisan/explanation.html）も参照されたい。

２．５　過去の高潮災害の例（昭和以降）

高潮の発生頻度は多くはないが、発生したときの被害は甚大。

※人的被害数及び建物被害数は高潮以外の要因によるものも含む

表2.2

年月日	主な被害地域	人的被害			建物被害			
		死者	負傷者	行方不明	全壊	半壊	流出	
S 2. 9.13	有明海	373	181	66	1,420		791	
S 9. 9.21	大阪湾	2,702	14,994	334	38,771	49,275	4,277	室戸台風
S17. 8.27	周防灘	891	1,438	267	33,283	66,486	2,605	
S20. 9.17	九州南部	2,076	2,329	1,046	58,432	55,006	2,546	枕崎台風
S25. 9. 3	大阪湾	393	26,062	141	17,062	101,792	2,069	ジェーン台風
S26.10.14	九州南部	572	2,644	371	21,527	47,948	3,178	ルース台風
S34. 9.26	伊勢湾	4,697	38,921	401	38,921	113,052	4,703	伊勢湾台風
S36. 9.16	大阪湾	185	3,879	15	13,292	40,954	536	第２室戸台風
S45. 8.21	土佐湾	12	352	1	811	3,628	40	台風第10号
S60. 8.30	有明海	3	16	0	0	589	—	台風第13号
H11. 9.24	八代海	12	10	0	52	99	—	台風第18号
H16. 8.30	瀬戸内海	3	22	0	2	9	—	台風第16号

出典：平成17年度版
防災白書（内閣府）

災害名	主な事象	人的被害（人）		住家被害（棟）			備考
		死者・行方不明者	負傷者	全壊	半壊	床上浸水	
平成30年台風第21号（平成30年9月3日～9月5日）	9月4日12時頃に非常に強い勢力で徳島県南部に上陸し、その後14時頃には兵庫県神戸市に再び上陸し波浪を上げながら近畿地方を縦断した。5日9時には韓国海峡で温帯低気圧に変わった。台風の接近・通過に伴って、西日本から北日本にかけて非常に強い風が吹き、非常に激しい雨が降った。特に、四国や近畿地方では、猛烈な風が吹き、猛烈な雨が降ったほか、これまでの観測記録を更新する記録的な高潮となったところがあった。	14	980	68	833	244	・関係閣僚会議（1回） ・政府調査団派遣 ・激甚災害指定

出典：令和2年版
防災白書附属資料（内閣府）

２．５　高潮災害の例

高潮の発生頻度は必ずしも多くはないが、ひとたび発生すると甚大な被害をもたらすことがある。日本国内における昭和以降の主な高潮被害を表2.2に示す。（人的被害数及び建物被害数は高潮以外の要因によるものも含む。）

1959年（昭和34年）９月26日夕刻に紀伊半島先端に上陸した台風第15号（伊勢湾台風）では、台風災害としては明治以降最多の死者・行方不明者数5,098名に及ぶ被害が生じた。この台風による犠牲者は全国32道府県に及んだが、その83%は高潮の発生によって愛知・三重の２県に集中した。（内閣府　災害教訓の継承に関する専門調査会報告書より）

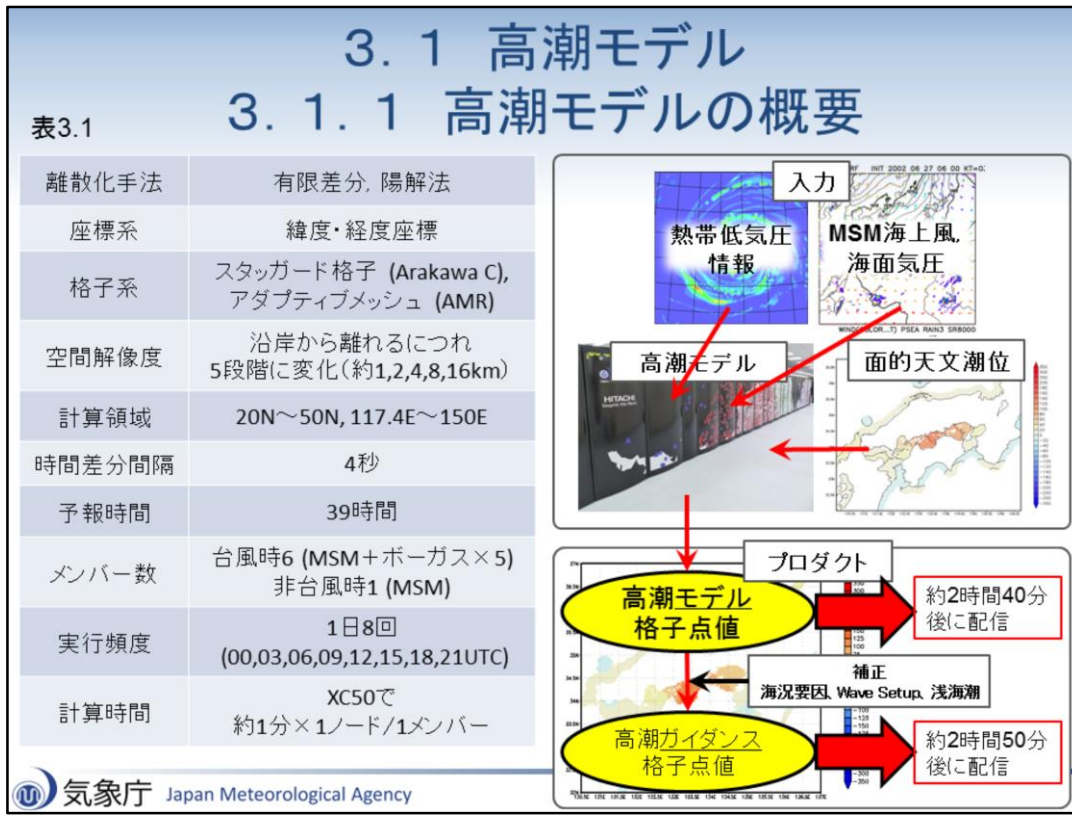
2018年（平成30年）9月4日に近畿地方を縦断した台風第21号では、大阪湾と紀伊水道の沿岸で顕著な高潮と高波が発生し、関西国際空港では滑走路の冠水などの被害が発生した。高潮で潮位が高くなっているときに高波があると、浸水被害が拡大することがあるので注意が必要である。

また、高潮は、台風だけでなく、温帯低気圧により発生する場合もある。2014年（平成26年）12月には、急速に発達した温帯低気圧の影響により、北海道根室市を中心に高潮が発生し、根室市街地では、床上浸水87戸、床下浸水10戸などの被害が発生した。（国土交通省　高潮水防の強化に関する技術検討委員会資料より）このように、台風だけでなく、急速に発達する温帯低気圧等により発生する高潮にも注意が必要である。

参考文献

- 気象庁, 2000: 平成11年（1999年）台風第18号高潮災害調査報告. 気象庁技術報告第122号.
- 内閣府, 2020: 令和2年度防災白書, 附属資料9
- 内閣府, 2005: 平成17年度版防災白書, 表2-40-20
- 内閣府, 2008: 1959伊勢湾台風報告書, 中央防災会議　災害教訓の継承に関する専門調査会
- 国土交通省, 2014: 第1回　高潮水防の強化に関する技術検討委員会, 資料3 高潮に関する最近の状況、今後の水防強化の方向性について

3. 高潮モデル

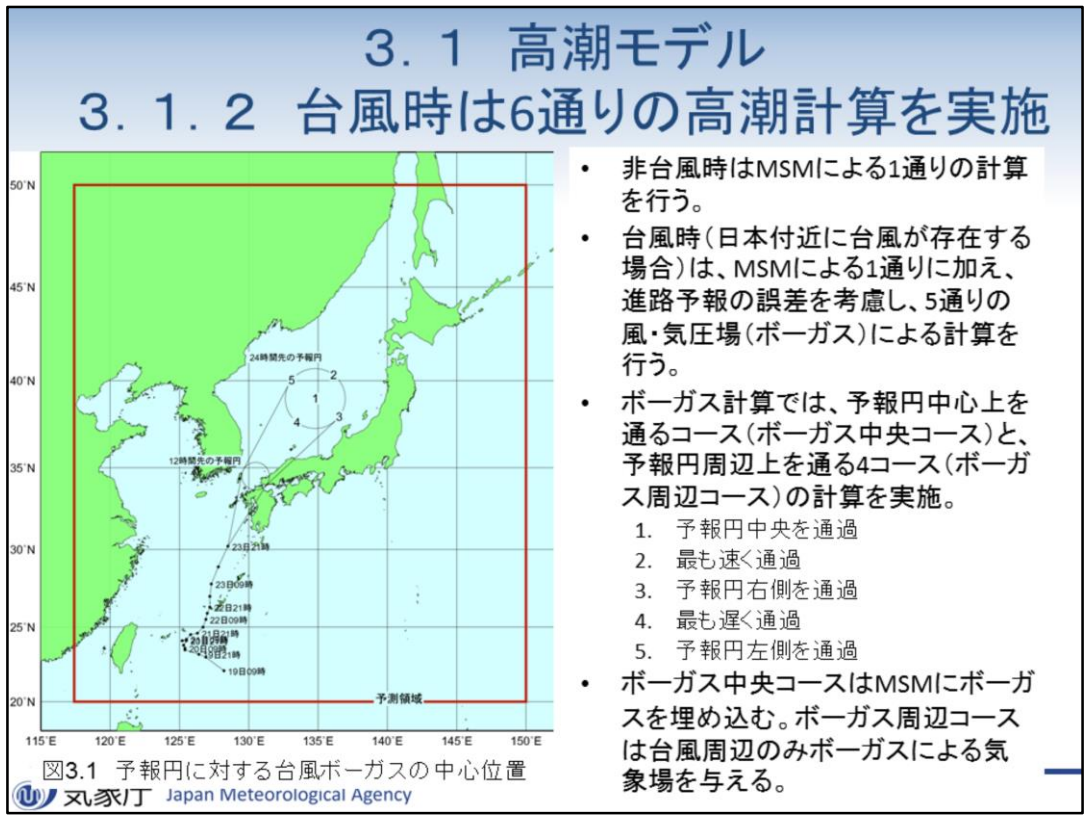


３．１　高潮モデル

３．１．１　高潮モデルの概要

高潮モデルの仕様を表3.1に示す。モデル領域は日本の国土ほぼ全てをカバーしている。予報時間は39時間先までで、1日8回（00,03,06,09,12,15,18,21UTC初期値）実行する。高潮モデル計算の際には入力データとして、気象庁発表の台風予報と同じ内容の、予報課が作成する熱帯低気圧情報（実況解析値、予報値）と、気象庁のメソモデル（以下MSM、https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-3-6.html）の海上風、海面気圧を必要とする。計算された潮位偏差に面的天文潮位（一般に、天文潮位は観測値の存在する地点において調和解析することで算出できるが、データ同化などの技術を用いて、任意の地点で天文潮位を算出することができる。詳細は3.3を参照のこと。）を加算し、「高潮モデル格子点値」として、初期時刻から約2時間40分後に配信している。

第2節の図2.5で示したように、様々ある海洋現象の時空間スケールにおいて、高潮の影響は一部にすぎない。高潮モデルでターゲットとしているのは、図2.5の赤丸で示した部分（空間スケール数km～数10km、時間スケール数10分～数時間）で、吸い上げ効果や吹き寄せ効果が該当する。波浪効果（Wave Setup）や海況要因、浅海潮といった、高潮モデルで考慮していない現象の影響は別途見積もり、上述の高潮モデル格子点値を補正して「高潮ガイダンス格子点値」とし、初期時刻から約2時間50分後に配信している。高潮ガイダンスについては第4節を参照のこと。



３．１　高潮モデル

３．１．２　台風時は6通りの高潮計算を実施

非台風時には、MSMの風・気圧場を使用した1通りの予測計算を行う。一方、台風による高潮の場合、台風の進路によって高潮の規模や発生のタイミングが大きく異なることから、台風進路予報の誤差などを考慮して高潮の予測をする必要がある。このため、台風が日本に接近する（台風が予測期間（39時間）内に日本の沿岸300km以内を通過する）と予想される場合（以下、台風時）には、高潮モデルでは6つの異なる風・気圧場を用いた6メンバーの予測計算を行う。6メンバーの予測のうち、1つは台風時以外と同様MSMの風・気圧場を使用し、その他5メンバーについては熱帯低気圧情報に基づき作成した仮想的な台風周辺の風・気圧場（以下、台風ボーガス）を用いる。MSMと台風ボーガスの2種類の外力を利用する理由は、MSM予測値を用いた場合に地形による変形や、中緯度に北上してきたことによる台風の構造の変化が高潮予測に反映されるメリットがある一方で、MSM予測が気象庁発表の台風予報と異なる進路・強度を示す可能性を考慮するためである。

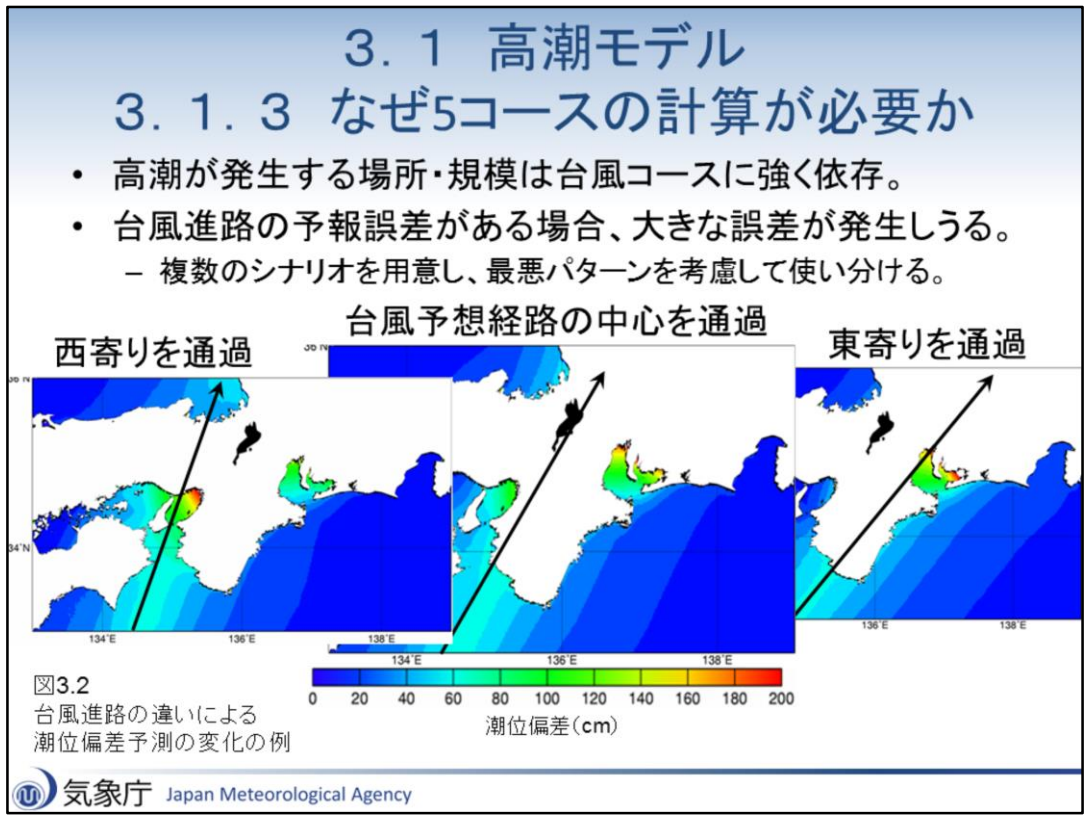
台風ボーガスを使用する5メンバーの予測では、図3.1に示したように台風が

1. 予報円中心
2. 予報円上の最も速いコース
3. 予報円上で進行方向右
4. 予報円上の最も遅いコース
5. 予報円上で進行方向左

を通過する場合の高潮を予測する。1を「ボーガス中央コース」、2～5を「ボーガス周辺コース」と呼ぶ。

複数の台風が日本に接近した場合、高潮の予測に使用する台風ボーガスは、複数の台風それぞれについて同じコース同士で台風ボーガスの重ね合わせを行い計算する（例えば、重ね合わせに使用する台風ボーガスは、一方の台風を予報円上の最も速いコースで計算する場合、もう一方の台風も同様に予報円上の最も速いコースで計算する）。台風ボーガスを埋め込むときは、弱い台風・優先度の低い台風から埋め込み、優先度の高い台風で上書きを行う、という手続きがとられる。いずれの台風も中心付近（強風半径程度）ではそれぞれの台風ボーガスを使用し、その外側では両者を合成する。ボーガス中央コースはMSMにボーガスを埋め込むが、ボーガス周辺コースは台風周辺のみボーガスによる気象場を与える（ボーガス周辺コースはボーガスとMSMによる台風位置が大きくずれる場合が多いため、ボーガスをMSMに埋め込むと、MSMによる台風が残ってしまう）。

また、24時間以内に台風ではなくなり、外力として用いる39時間先までの台風予報値が熱帯低気圧情報に記述されない場合、台風の強度・移動速度を一定と仮定して必要な値を外挿することにより予想を行う。



３．１　高潮モデル

３．１．３　なぜ5コースの計算が必要か

図3.2は、台風進路が少しずつ変わった場合に、顕著な高潮の発生する場所がどう変化するかを示している。この例では、台風が予報円西寄りを通過した場合は大阪湾、予報円中心を通過した場合は伊勢湾、予報円東寄りを通過した場合は三河湾で顕著な高潮が発生することが分かる。

このように、高潮が発生する場所や規模は台風進路に大きく影響を受け、進路予報の誤差は高潮予測にも大きな誤差をもたらす。そのため気象庁の高潮予測においては、台風時は複数のシナリオを用意し、状況に応じて使い分けているほか、不確実性や潜在的なリスク評価にも用いている。

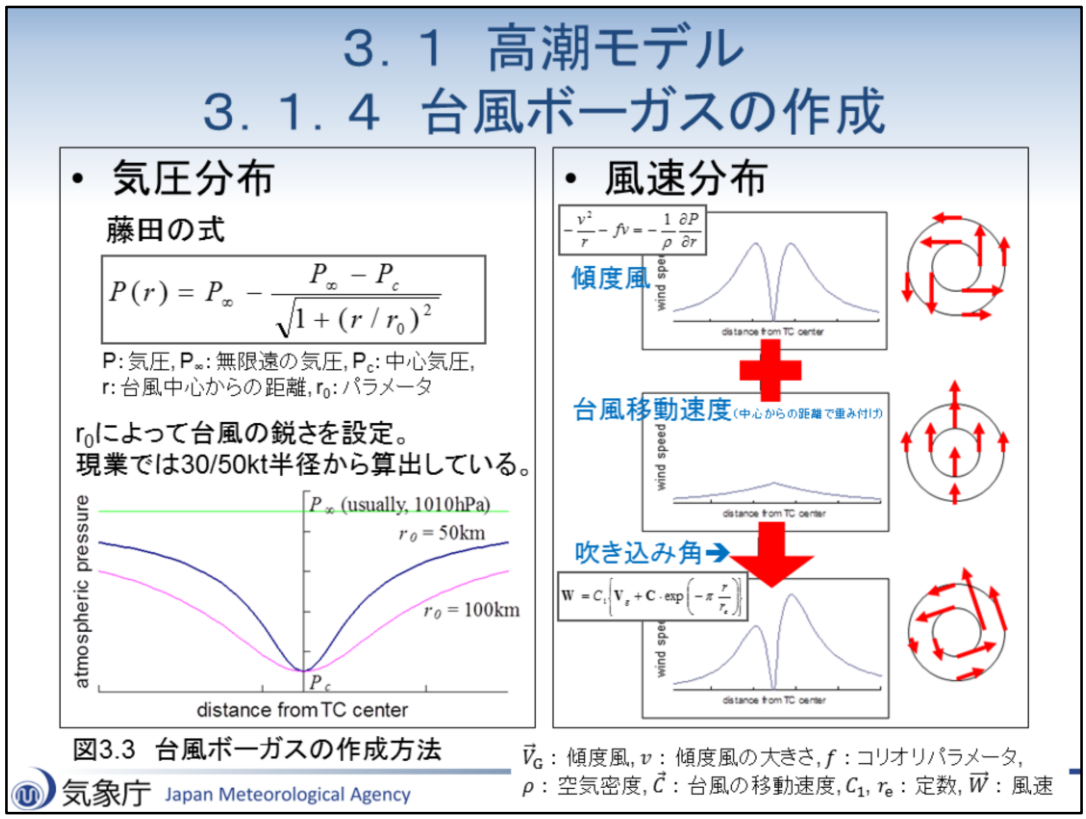


図3.3 台風ボーガスの作成方法

$\vec{V}_G$：傾度風, v：傾度風の大きさ, f：コリオリパラメータ, ρ：空気密度, $\vec{C}$：台風の移動速度, C_1, r_e：定数, $\vec{W}$：風速

3．1 高潮モデル

3．1．4 台風ボーガスの作成

気象庁の台風ボーガス作成手法について述べる。気圧分布の作成には藤田の式（Fujita 1952）を用いている（図3.3左）。ここでPは任意地点の海面気圧、rは台風中心からの距離、r_0は気圧分布の鋭さを表すパラメータ、P_cは中心気圧、P_∞は無限遠に仮定される海面気圧である。図3.3左は台風周辺の海面気圧分布の断面を表したものだが、同じ中心気圧でも、r_0が大きいと広い範囲で気圧が低くなり、r_0が小さいと中心付近で急激に気圧が下がるような分布となる。台風周辺の風については、傾度風の関係から風向・風速分布を作成し、更に台風移動速度を考慮することで台風分布の非対称性を表現している（図3.3右）。ここで、fはコリオリパラメータ、ρは空気の密度、C_1とr_eは定数、$\vec{V}_G$は傾度風、vは傾度風の大きさ、$\vec{C}$は台風の移動速度、$\vec{W}$は台風移動速度を加えた風速である。更に、台風中心へ吹き込む風を考慮し、30° の吹き込み角を一律に設定している。これらは熱帯低気圧情報による情報を元に計算することができる。

３．１　高潮モデル
３．１．５　台風ボーガスの埋め込み

- 埋め込む範囲は、中心から同心円状の範囲
  - ボーガス中央コース：中心からの距離により、強風半径（以下、r30）の2倍の範囲内で、ボーガスとMSMの重み付き平均をとる。
  - r30の範囲内ではボーガスを完全に採用。

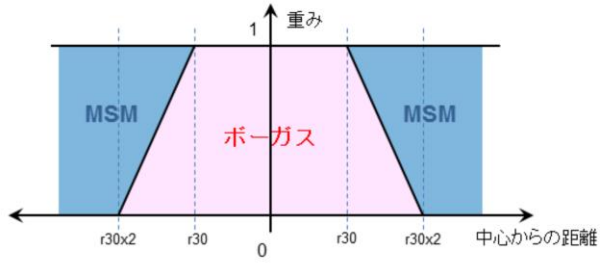


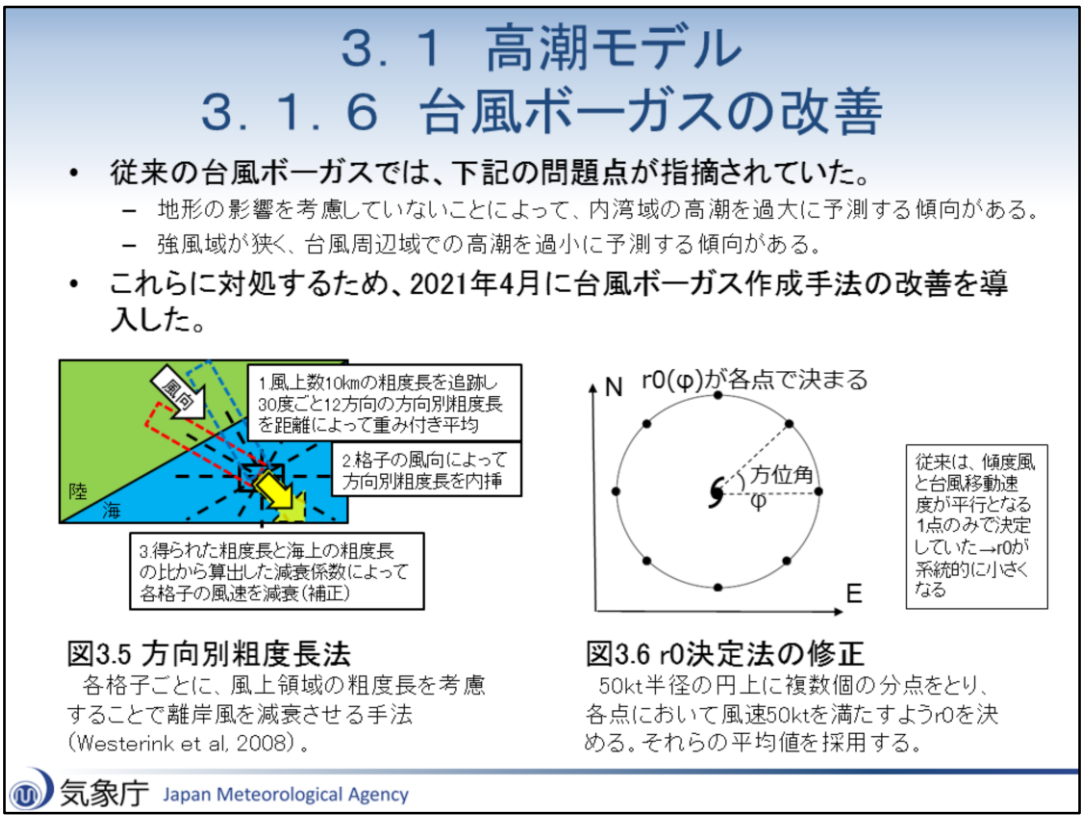
図3.4　台風ボーガスの埋め込み
埋め込む範囲は台風中心から同心円状の範囲。ボーガス中央コースの場合、中心からの距離により、強風半径（以下、r30）の2倍の範囲内で、ボーガスとMSMの重み付き平均をとる。r30の範囲内ではボーガスを完全に採用。

気象庁 Japan Meteorological Agency

３．１　高潮モデル

３．１．５　台風ボーガスの埋め込み

図3.4は、ボーガス中央コースについて、図3.3で作成した台風ボーガスをMSMの風・気圧場に埋め込む時の模式図である。強風半径、つまり風速30kt以上の範囲では、ボーガスによる風・気圧場をそのまま使う。一方その外側では、強風半径の2倍の範囲までボーガスとMSMの加重平均を使い、台風中心から離れるにしたがってMSMの割合を大きくしていく。ボーガス周辺コースでは、図3.4のMSMのところが無風・平年値（海面気圧）になる。



３．１　高潮モデル

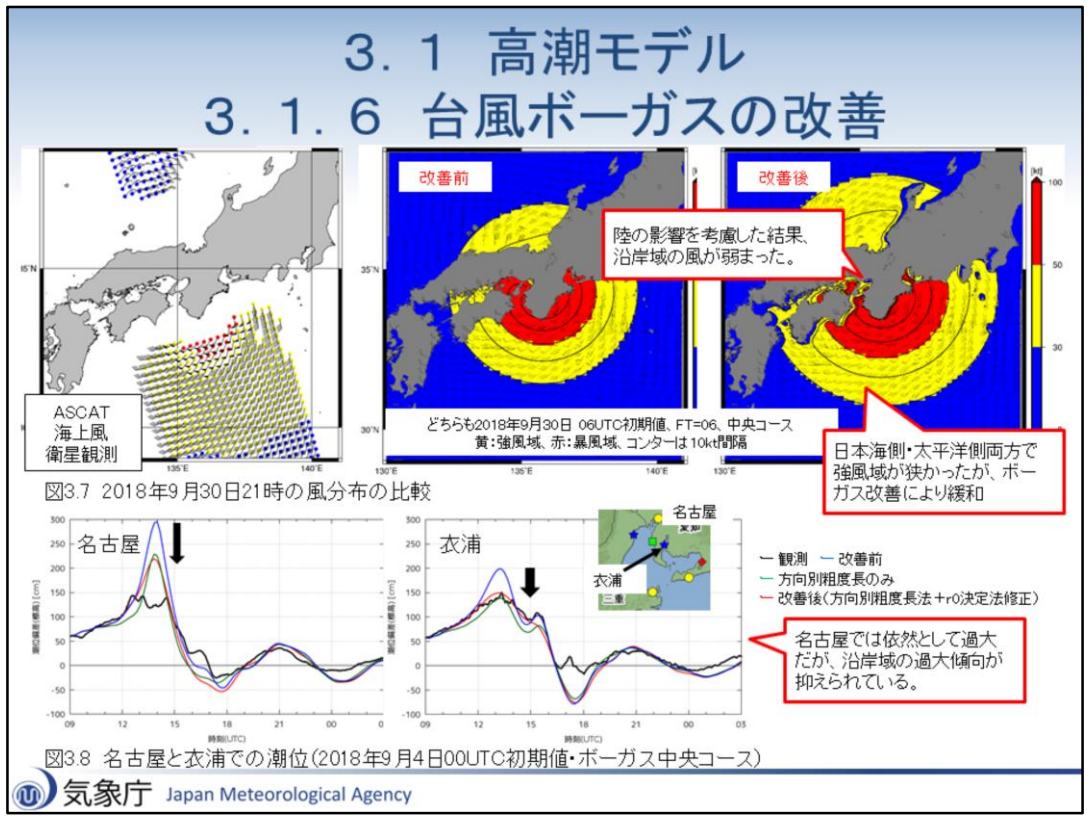
３．１．６　台風ボーガスの改善

これまで台風ボーガスを利用する上で、地形の影響を考慮していない風向・風速を与えることによる高潮の過大予測が問題となっていた。一方、台風ボーガスの強風域が実際よりも狭く、台風周辺域では高潮を過小に予測する傾向があることも知られていた。気象庁では、2021年4月に新たな台風ボーガス作成手法を取り入れることにより、台風ボーガスの改善を実施した。

変更点は以下の2点である。1点目は、モデル領域内各格子において、風上側の陸地の粗度を元に風向別の減衰率を計算し、ボーガスによる風を補正する手法（Westerink et al, 2008）を取り入れたことである（図3.5）。方向別粗度長法と呼ばれ、米国ハリケーンセンターの現業高潮予測モデルSLOSHでも採用されている手法である。方向別粗度長法を採用することで、内湾域の過大な風速が適切な風速に弱められ、高潮の過大予測が改善される。2点目は、気圧分布の鋭さを表すパラメータであるr_0（3.1.4節を参照のこと。）の決定手法を見直したことである（図3.6）。従来は、傾度風と台風移動速度が平行となる1点のみでr_0を決定していた。新しい手法では、50kt半径の円状に複数個の分点をとり、各点において風速50ktとなるr_0をそれぞれ求め、それらの平均値を台風ボーガスに適用する。従来の手法ではr_0が系統的に小さくなっていたが、これが解消され、強風域が拡大する。方向別粗度長法の採用に加えてr_0決定法を変更したことにより、台風周辺域でも高潮予測が改善される。

（参考）配信資料に関する技術情報第560号（高潮モデルの改善について）

https://www.data.jma.go.jp/suishin/jyouhou/pdf/560.pdf

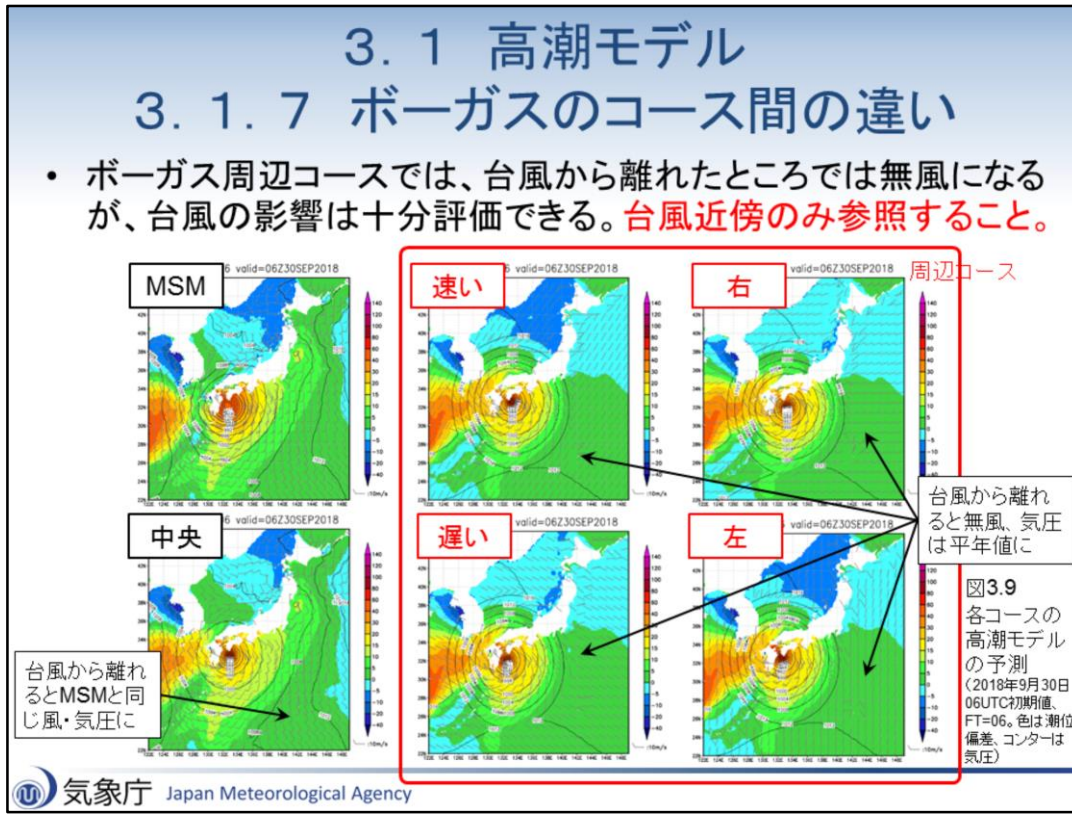


3．1　高潮モデル

3．1．6　台風ボーガスの改善

この項では、台風ボーガスの作成手法を変更したことにより高潮予測が改善した例を示す。図3.7は2018年9月30日21時を対象に台風ボーガスの風を観測と比較したもので、左図が衛星観測（ASCAT）、中央図が台風ボーガス変更前、右図が変更後の風分布を示す（モデルの初期値は2018年9月30日06UTC、初期値から6時間後（FT=6））。中央図と右図の赤色は暴風域、黄色は強風域を示している。左図では衛星観測の特性を考慮し、同程度の風速と推定される領域を同じ色で示している。内湾域で風速が弱まると共に、台風の周辺部では風速が強まり、衛星観測で推定される風速分布に近づいていることが分かる。

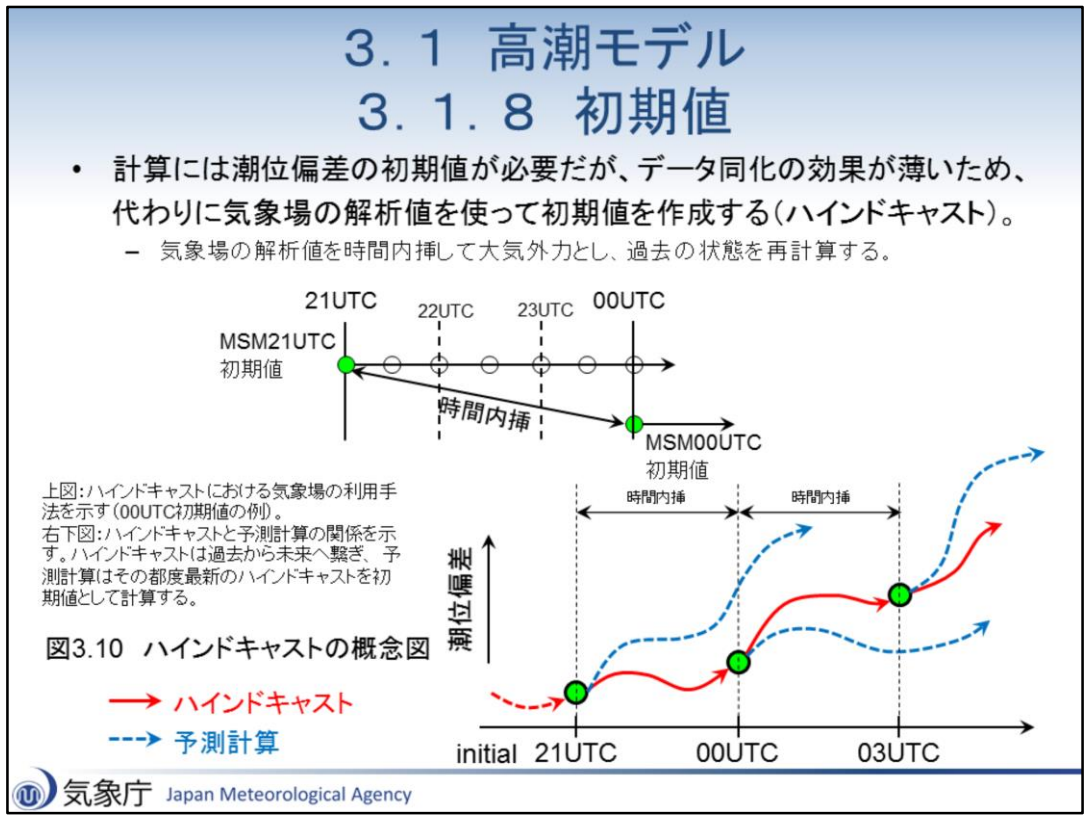
図3.8は2018年9月4日00UTC初期値の名古屋と衣浦での潮位時系列である。潮位のピークで見ると、台風ボーガス改善前はどちらの地点も大幅に過大な予測となっていた。方向別粗度長法を取り入れることにより、名古屋では依然として過大ではあるものの、観測との差が小さくなっている。衣浦は方向別粗度長法によりやや過小な予測となるが、r_0決定法の修正を加えることで方向別粗度長による下方修正を低減し、より観測に近づくことが分かる。



3．1　高潮モデル

3．1．7　ボーガスのコース間の違い

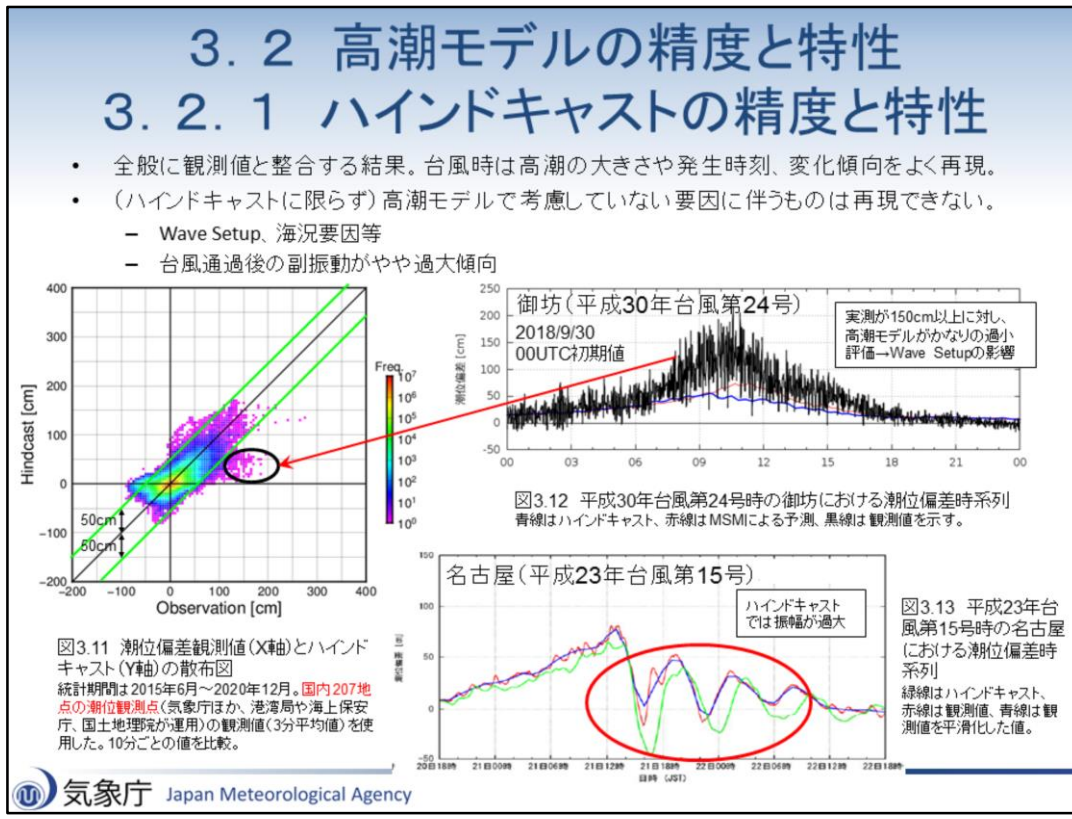
予報円中心を通過する場合はMSMの風・気圧場に台風ボーガスを埋め込むが（図3.4）、中心以外の予報円上4点を通過するメンバーはMSMの場に埋め込まず、台風ボーガスのみを外力として使用する（台風の中心付近（強風半径の2倍の範囲）の外側では無風、図3.9）。これは、中心以外の予報円上を通過する場合に埋め込みを行うと、MSM予測の台風位置と台風ボーガスの位置とが大きくずれて台風の中心が2つ存在し、現実にはあり得ない大気の場になることを防ぐためである。このため、ボーガス周辺コース（速い、右、遅い、左）では、台風から離れた場所では無風に、海面気圧は平年値になる。台風から離れた場所の高潮予測結果は参照することはできない。台風近傍（強風半径以内）のみ参照すること。



３．１　高潮モデル

３．１．８　初期値

高潮モデルの計算には潮位偏差の初期値が必要だが、大気モデルと比較してデータ同化の効果が薄い（高潮モデルのデータ同化に関する特性は付録-2-5を参照のこと。）ため、気象場の解析値を使った計算により初期値を作成している。これをハインドキャストと呼んでいる。図3.10（上）は00UTC初期値の例である。この場合、ハインドキャストには一つ前の初期値、つまり前日の21UTCのMSMによるFT=0の気象場と、00UTCのMSMによるFT=0の気象場がそれぞれ必要となる（図ではこれらを緑丸で表現している）。FT=0の気象場は解析値であり、その時点で最も確からしいデータであると言える。ハインドキャストでは、これら二つの気象場を時間内挿して大気外力とし、過去の状態を再計算することで00UTCにおける潮位偏差の初期値を作成する。図3.10（下）に示すように、ハインドキャストは過去から未来へと繋いで計算し、予測計算はその都度ハインドキャストを初期値として計算する。



３．２　高潮モデルの精度と特性

この項では、高潮モデルの精度の分析結果や特性について解説する。本項での結果を踏まえた、高潮モデル・高潮ガイダンスの解釈のポイントについては、第７節で解説する。

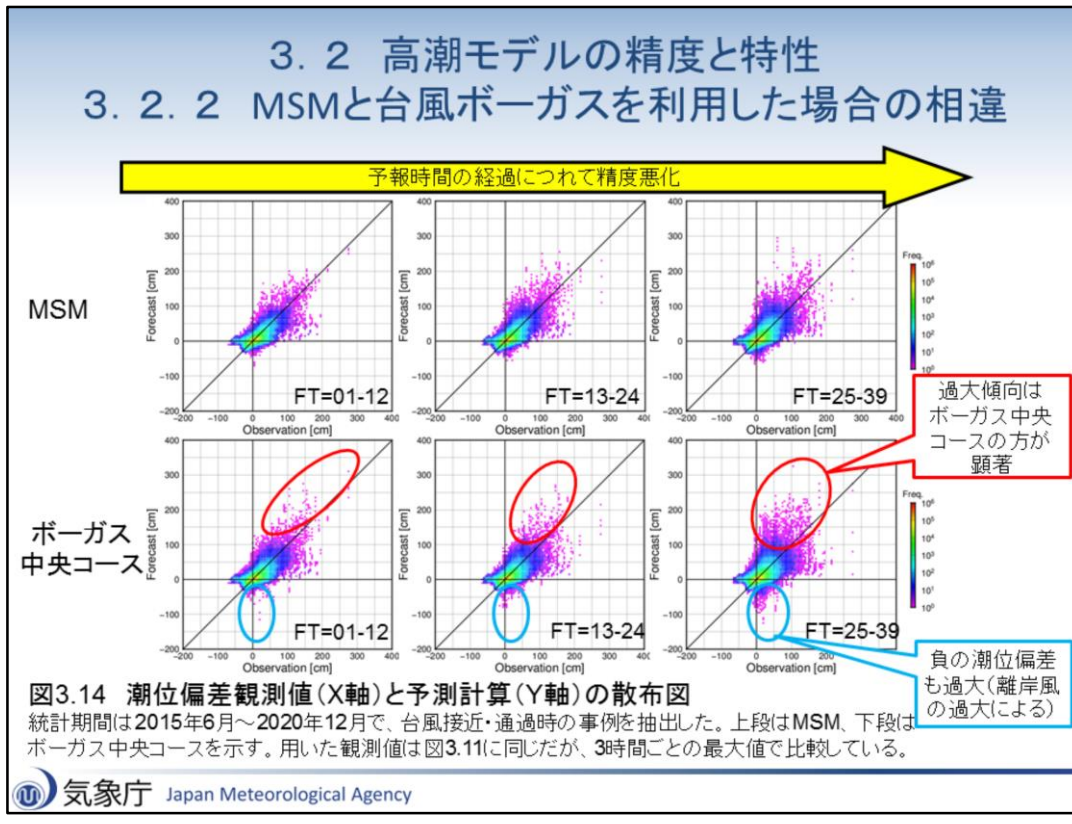
３．２．１　ハインドキャストの精度と特性

高潮モデルの精度は、高潮モデル本体だけでなく大気外力にも依存している。大気外力の影響を除き、高潮モデルそのものの精度を検証するため、大気解析値のみによる計算（ハインドキャスト）の精度を示す。図3.11は2015年6月～2020年12月を対象としたハインドキャストにより計算された潮位偏差と、日本国内207地点の潮位観測点の観測値（3分平均値）※ による潮位偏差の散布図である。これら潮位観測点には、気象庁のほか、港湾局や海上保安庁、国土地理院が運用しているものが含まれる。これによれば、潮位偏差の誤差は概ね緑線で示された±50cm以内に納まっており精度は良いと言える。

一方、大きな誤差も見られ、これらは主に高潮モデルで考慮されていない要因、つまりWave Setupや海況要因によるものと考えられる。例えば図3.12に示すように、台風や低気圧が接近・通過する際、外洋に面した地点では過小評価となることがあり、これはWave Setupの影響と考えられる（詳細は3.2.6を参照のこと）。ここで示した平成30年台風第24号の事例では、他に白浜や室戸岬などでもWave Setupによる潮位上昇が見られた。また、図3.11において、高潮モデルで潮位偏差がほぼ0と予想しているのに、観測値では大きく正負に振れる場合があることが分かる。これは、海況要因が原因の可能性がある（詳細は3.2.7を参照のこと）。

高潮モデルは潮位偏差の最大を記録した後で、大きめに副振動を計算する傾向がある。これは、現在の高潮モデルでは潮汐を計算していないため、副振動を減衰させるような高潮と潮汐の相互作用が考慮されていない影響等が考えられる（図3.13）。

※本資料では、これ以降も、精度検証（散布図、スコア図）で用いる観測値には3分平均値を用いている。



３．２　高潮モデルの精度と特性

３．２．２　MSMと台風ボーガスを利用した場合の相違

以下では、気象の外力として予測値を与えた場合の高潮モデル予測精度を示す。

図3.14は、2015年6月～2020年12月に台風が接近・通過したとき（全1896初期値）の、高潮モデルにより予測された潮位偏差（MSM、ボーガス中央コース）と、日本国内207地点の潮位観測点の観測値による潮位偏差の散布図を示す。台風ボーガスを使用した予測値は実測値0～200cmに対し0～300cm程度と過大な予測値を示すことがあり、過大評価傾向が認められる。MSM予測値を用いた高潮予測値は概ね実測値±100cm程度の範囲に収まっており、実況からの誤差が比較的小さい。このように台風ボーガスによる高潮の予測誤差が大きいのは、台風ボーガスで仮定している風の場の推定法では、台風が中緯度まで北上したことにより、典型的な台風の構造から変化することを考慮していないことが主な原因と考えられる。MSM、ボーガスともに予測時間後半に精度が悪化するのは、潮位偏差のピーク出現時刻の予測誤差の影響もあると考えられる。

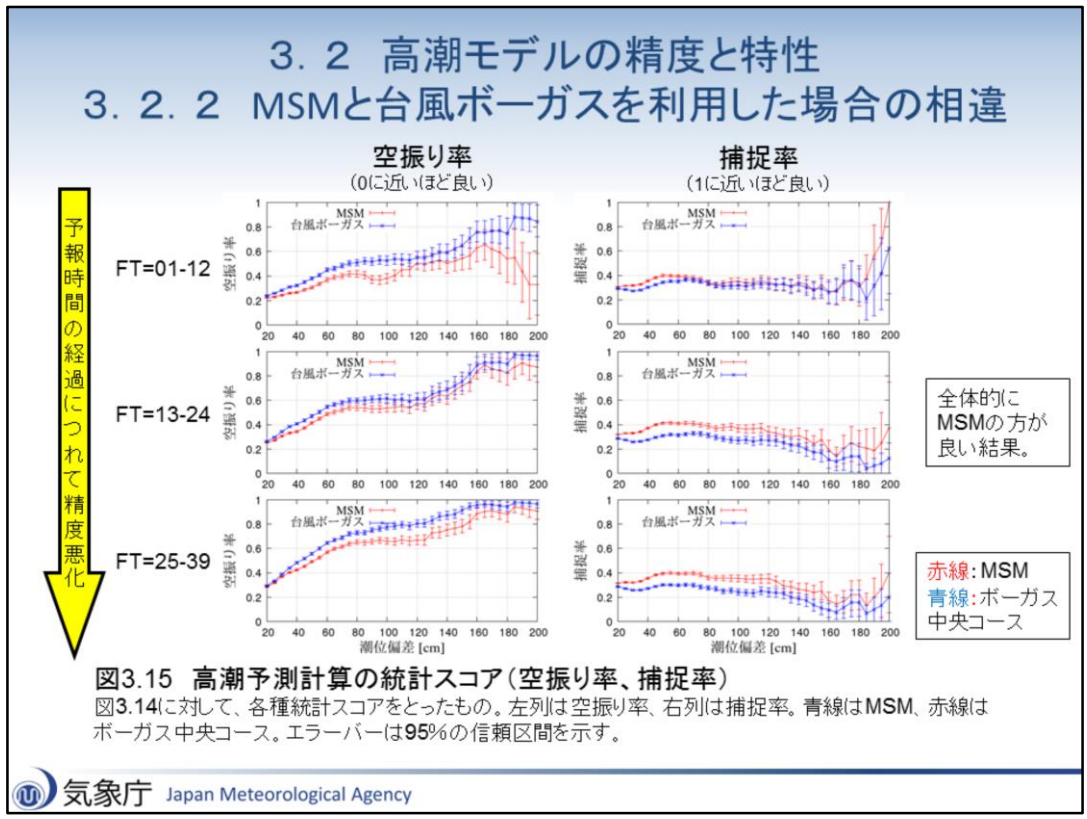


図3.15　高潮予測計算の統計スコア（空振り率、捕捉率）
図3.14に対して、各種統計スコアをとったもの。左列は空振り率、右列は捕捉率。青線はMSM、赤線はボーガス中央コース。エラーバーは95%の信頼区間を示す。

３．２　高潮モデルの精度と特性

３．２．２　MSMと台風ボーガスを利用した場合の相違

図3.14に使用したデータサンプルを用い、予測期間を1～12時間、13～24時間、25～39時間に分けて空振り率・捕捉率を計算した結果が図3.15である（統計スコアの定義については付録を参照のこと）。顕著な高潮ほどサンプル数が少なく、エラーバーが大きくなることに注意が必要である。この統計ではMSM、ボーガス中央コースともに、潮位偏差20～100cmのサンプル数は20万程度であるのに対し、100cm～200cmのサンプル数は2500程度だった。全体的に見ると、概ねMSMによる予測の方が精度が良い。

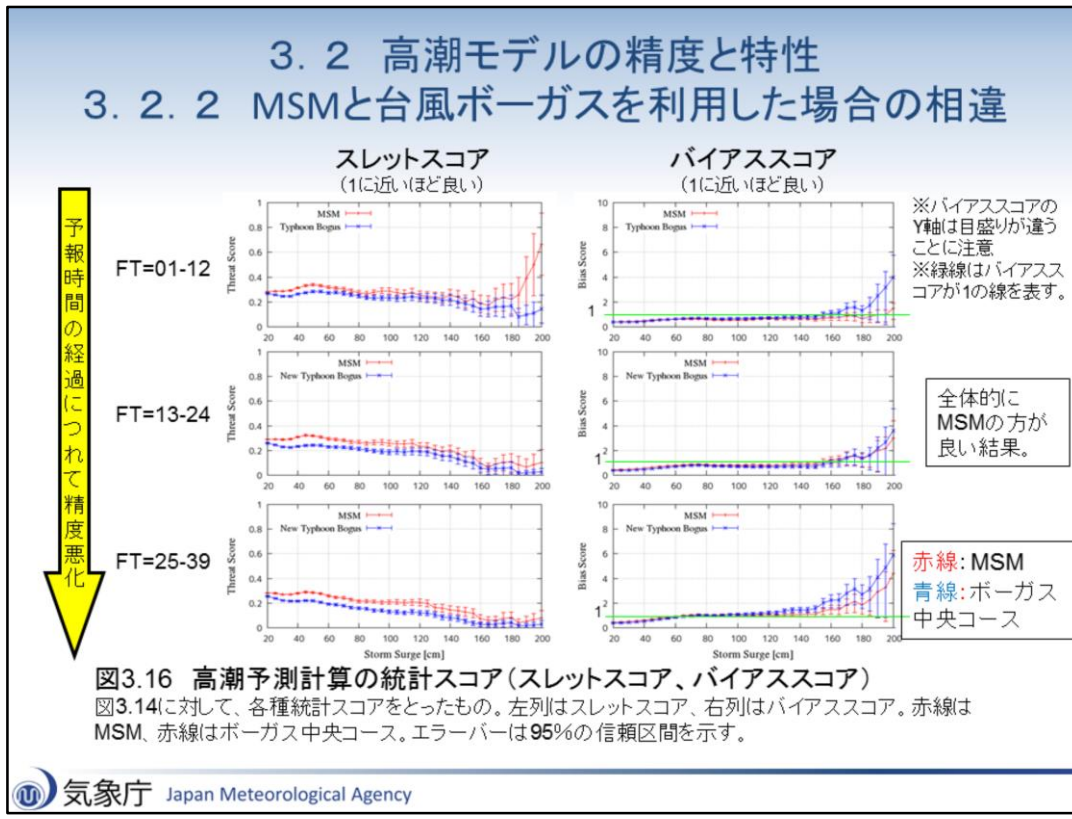


図3.16　高潮予測計算の統計スコア（スレットスコア、バイアススコア）
図3.14に対して、各種統計スコアをとったもの。左列はスレットスコア、右列はバイアススコア。赤線はMSM、赤線はボーガス中央コース。エラーバーは95%の信頼区間を示す。

３．２　高潮モデルの精度と特性

３．２．２　MSMと台風ボーガスを利用した場合の相違

予測期間を1～12時間、13～24時間、25～39時間に分けてスレットスコア・バイアススコアを計算した結果が図3.16である。MSMによる潮位偏差予測バイアススコアを見ると、1.5m以上の潮位偏差に対して過大評価傾向（バイアススコア＞1）が見られるが、その程度は台風ボーガスによる予測の方が大きい。予測時間後半にスコアが悪化するのは、潮位偏差のピーク出現時刻の予測誤差の影響もあると考えられる。

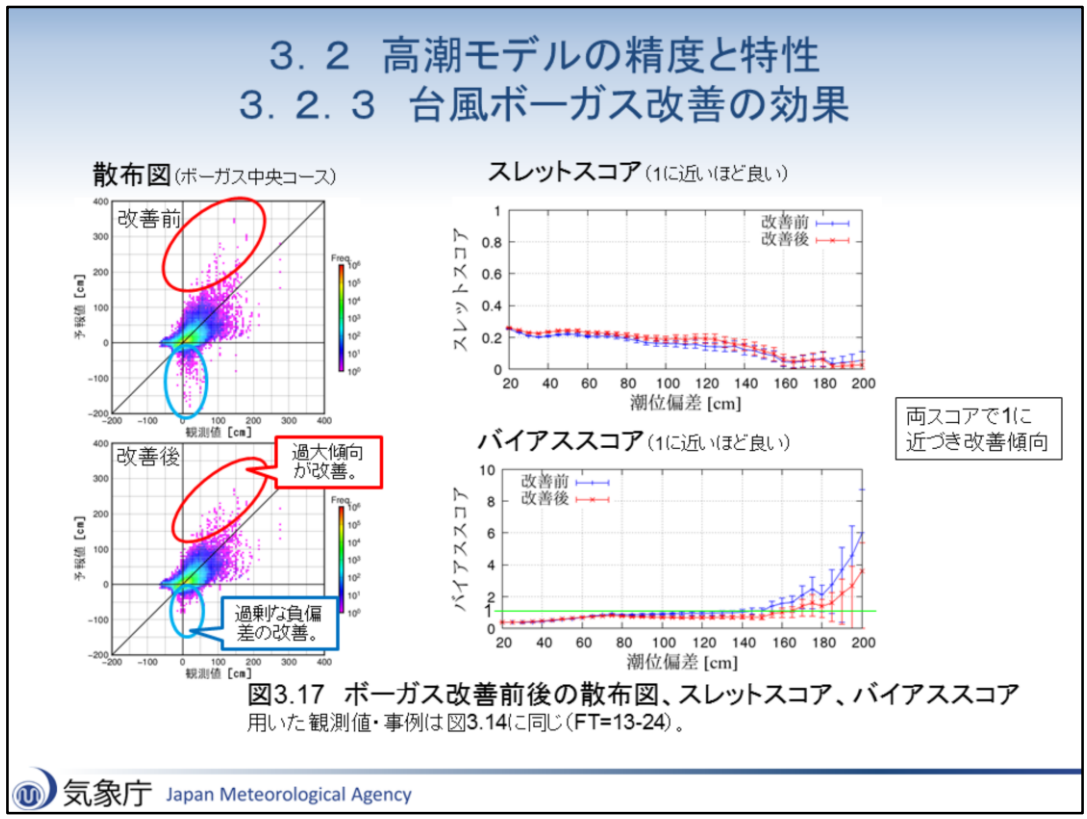


図3.17　ボーガス改善前後の散布図、スレットスコア、バイアススコア
用いた観測値・事例は図3.14に同じ(FT=13-24)。

３．２　高潮モデルの精度と特性

３．２．３　台風ボーガス改善の効果

図3.14～図3.16に示したボーガス中央コースの散布図及びスコア図は、いずれも3.1.6で示した台風ボーガス改善を取り入れた後の結果である。台風ボーガス改善の効果をみるため、改善前後の散布図、スコア図を比較したものが図3.17である。ボーガス中央コースによる過大な潮位偏差予測が低減されており、改善傾向が認められる。これは方向別粗度長法の効果により地表面摩擦による風速の減衰を再現できるようになったことが大きな要因であると考えられる。同様に、実測値0～50cmに対し-200～0cm程度の過剰な負の潮位偏差を予測する場合があったが、こちらも方向別粗度長を取り入れたことにより誤差が低減されている。スレットスコア、バイアススコアも概ね改善していることが分かる。しかしながら、3.2.2節で示したように依然MSMの方が予測誤差が小さい傾向にある。

３．２　高潮モデルの精度と特性
３．２．４　台風ボーガスの課題

- MSMの方がボーガス中央コースよりも各種統計スコアが良い。
  - MSMは地形による摩擦の影響や中緯度における台風構造の変化を表現しているのに対し、台風ボーガスは、それらが表現されていない等が理由として考えられる（図3.18）。

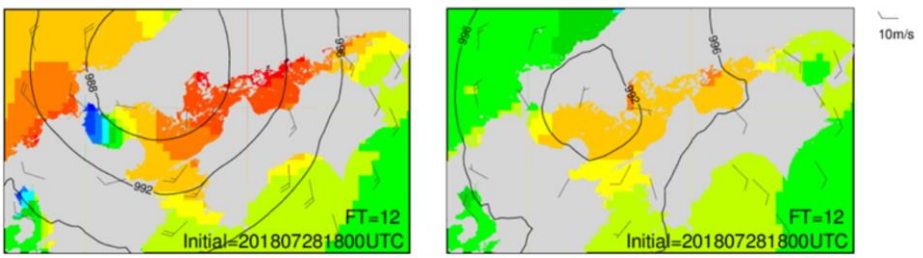


図3.18　ボーガス中央コース（左）とMSM（右）の風・気圧

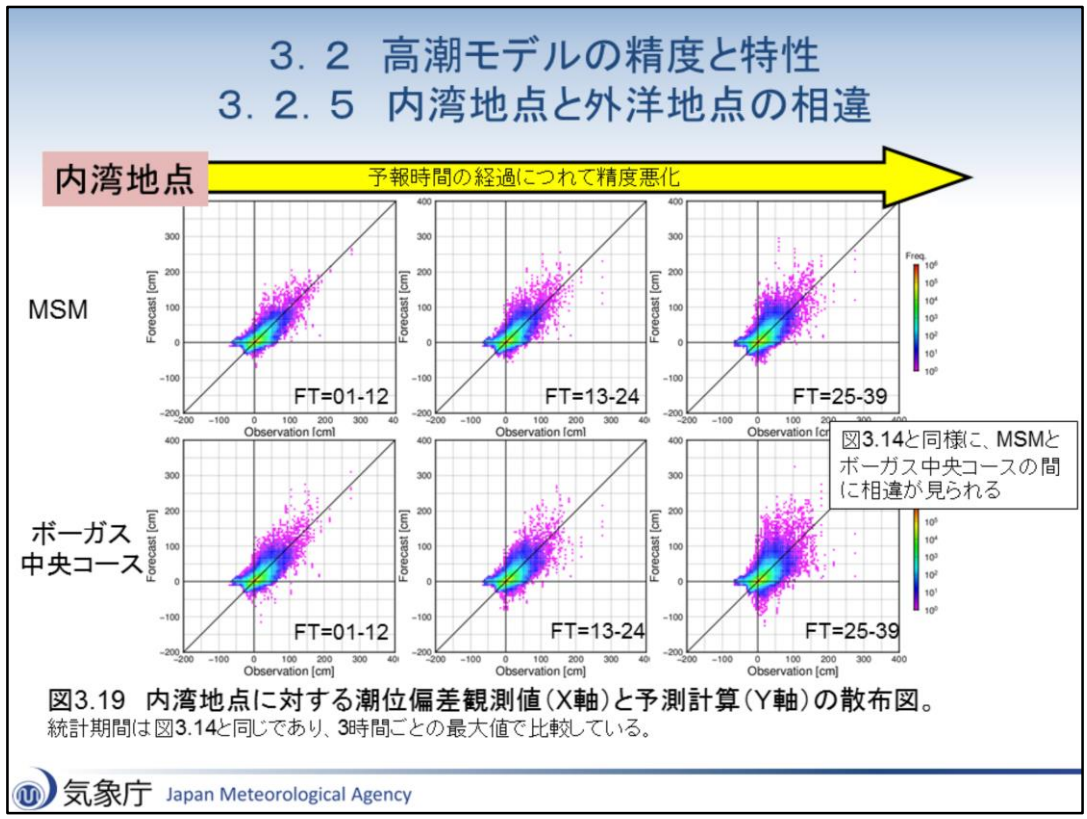
気象庁 Japan Meteorological Agency

３．２　高潮モデルの精度と特性

３．２．４　台風ボーガスの課題

図3.14～図3.16で見たように、MSMの方がボーガス中央コースよりも各種統計スコアが良い傾向がある。これは、台風ボーガスで仮定している風の場の推定法では、地形等地表面の影響（風速の減衰や風向のずれ）が考慮されていないことや、台風が中緯度まで北上したことにより典型的な台風の構造から変化することを考慮していないことが主な原因と考えられる。（方向別粗度長導入により、地形による摩擦の影響の表現は一部改善された。）図3.18は、ボーガス中央コースとMSMによる、海上風と海面気圧の分布を比較したものである。MSM（右図）は地形による摩擦の影響や中緯度における台風構造の変化が適切に表現されているのに対し、ボーガス中央コース（左図）はそれらが表現されていないことがわかる。

また、24時間以内に台風ではなくなる場合は、台風ボーガスは台風強度及び移動速度を一定と仮定して値を外挿する（3.1.2参照）。そのため、台風が衰弱して熱帯低気圧に変わる場合は予測が過大となりやすく、逆に、台風が衰弱後に再発達する場合は予想が過小となりやすいことも、ボーガス中央コースの誤差が大きくなる理由として考えられる。



３．２　高潮モデルの精度と特性

３．２．５　内湾地点と外洋地点の相違

以下では、日本国内の潮位観測点を内湾地点(178地点)と外洋地点(25地点)に分割し、それぞれの地点における予測精度について述べる。ここでは、Wave Setupの計算対象となっている地点（Wave Setupの計算については後述）を外洋地点、それ以外を内湾地点と定義している。ただし、2019年9月に新規にWave Setupの計算を開始した沖縄の地点については、内湾と外洋のどちらにも含めていない。Wave setupの計算対象地点の位置は4.2節の図4.3を参照。

図3.19は、内湾地点における、高潮モデルによって予測された潮位偏差（MSM、ボーガス中央コース）と、観測値による潮位偏差の散布図を示したものである。内湾地点の散布図では、MSM予測値を用いた高潮予測値（上段）は概ね実測値±100cm程度の範囲に収まっている一方、ボーガス中央コースを用いた高潮予測値（下段）では過大評価傾向が見て取れる。これらは、図3.14で見られた特徴と同様のもので、3.2.2で述べたMSMとボーガス中央コースの間の相違が現れたものと考えられる。

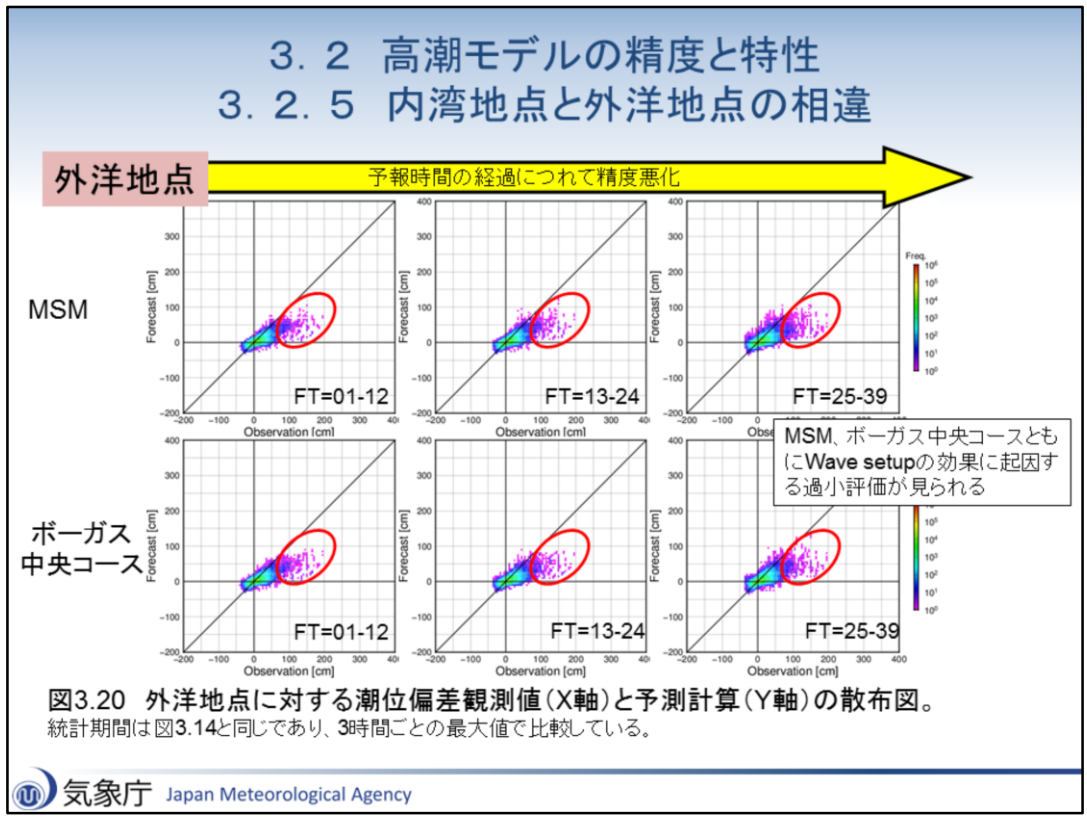
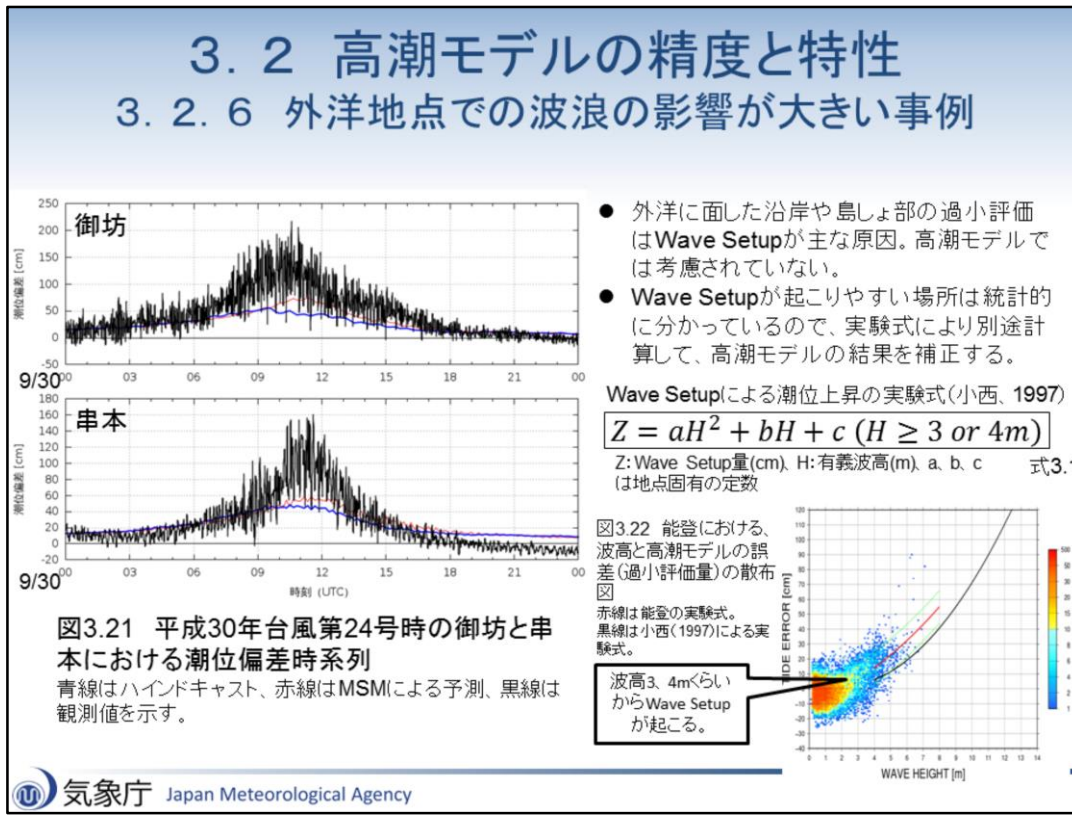


図3.20　外洋地点に対する潮位偏差観測値（X軸）と予測計算（Y軸）の散布図。
統計期間は図3.14と同じであり、3時間ごとの最大値で比較している。

３．２　高潮モデルの精度と特性

３．２．５　内湾地点と外洋地点の相違

図3.20は、外洋地点における、高潮モデルによって予測された潮位偏差（MSM、ボーガス中央コース）と、観測値による潮位偏差の散布図である。外洋地点では、高潮モデルの観測値に対する過小評価が顕著な領域があることを見て取れる（丸で囲んだ領域。）内湾地点の散布図では、MSM及びボーガス中央コースの間の相違が明確に現れていたのに対し、外洋地点においては両者の間の相違は小さい。特に、高潮モデルが過小評価している領域では、MSMとボーガス中央コースの差はほとんど見られない。これは、過小評価の主要因が大気外力の与え方にあまり依存しないことを示唆しており、高潮モデルで考慮していないWave Setupの効果であると考えられる。



３．２ 高潮モデルの精度と特性

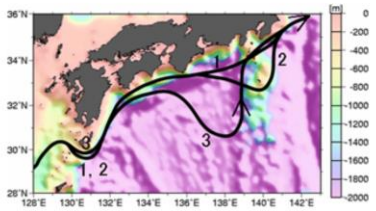
３．２．６ 外洋地点での波浪の影響が大きい事例

外洋地点には、勝浦、布良、八丈島、石廊崎、舞阪、高知、室戸岬、能登、男鹿などの外洋に面した沿岸や島しょ部が該当する。外洋地点における散布図で示されたように、これらの地点では、高潮モデルが観測値を過小評価する傾向にある。これは、外洋に面する比較的水深の深い沿岸では、内湾と異なり風の吹き寄せに起因する高潮が発生しにくく、現在の高潮モデルでは考慮されていないWave Setupが高潮の主な原因であるためと考えられる。そのため、Wave Setupの影響を定量化するための式が別途必要になる。

Wave Setupが顕著な地点では、波浪モデルの結果と潮位観測値との比較からWave Setupを見積もった実験式が作られており、小西（1997）によると、Wave Setup量Z(cm)は、有義波高Hが3、4mから15mの範囲で式3.1のようになる。（式3.1が、大気外力に依存していないことに注目。）気象庁の調査で潮位観測点ごとに実験式が求められており、潮位に関する解説資料ではこれらの実験式などから求めたWave Setup量を補正量としている。

３．２　高潮モデルの精度と特性
３．２．７　初期値による誤差

- 海況要因に伴う潮位上昇
  - 一度起こると長期間継続する場合がある。
  - 高潮モデルでは考慮していないため、前24時間の観測値とハインドキャストの差から別途見積もり、高潮モデルの結果を補正する（第4節参照）。



本州南岸を流れる黒潮の典型的な流路
1：非大蛇行接岸流路 2：非大蛇行離岸流路
3：大蛇行流路

図3.23 海況要因の例（黒潮の流軸の変化）
（出典：気象庁ホームページ（海水温・海流の知識））

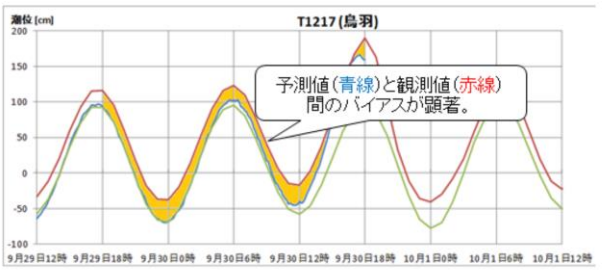


図3.24 2012年台風第17号時の鳥羽（三重県）における潮位時系列
青線はハインドキャスト、赤線は観測値、緑線は天文潮位を示す。

気象庁 Japan Meteorological Agency

３．２　高潮モデルの精度と特性

３．２．７　初期値による誤差

低気圧の停滞の際に生じる潮位の上昇など、気象変動による潮位変化が継続している場合、その影響は高潮モデルの予測結果に反映される。しかし、黒潮の流軸の変化や暖水渦の接近等といった海況要因により異常潮位が生じている場合、現在の高潮モデルではこの影響を取り込むことができないため、高潮モデルの予測結果はバイアスを持つ。海況変動に伴う潮位変化は一度起こると長期間継続する場合があるので、高潮ガイダンスでは、前24時間の観測値とハインドキャストの差から平均的なバイアスを見積もり、補正量としている（第4節参照）。

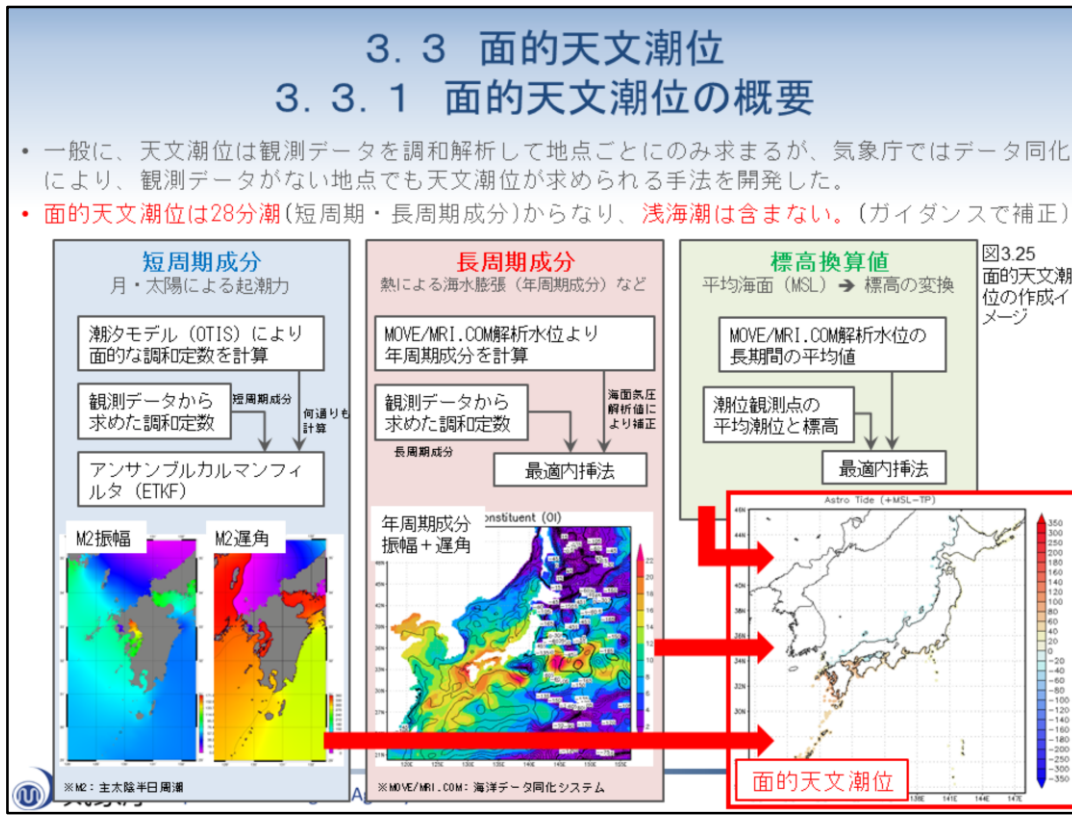


図3.25 面的天文潮位の作成イメージ

3．3　面的天文潮位

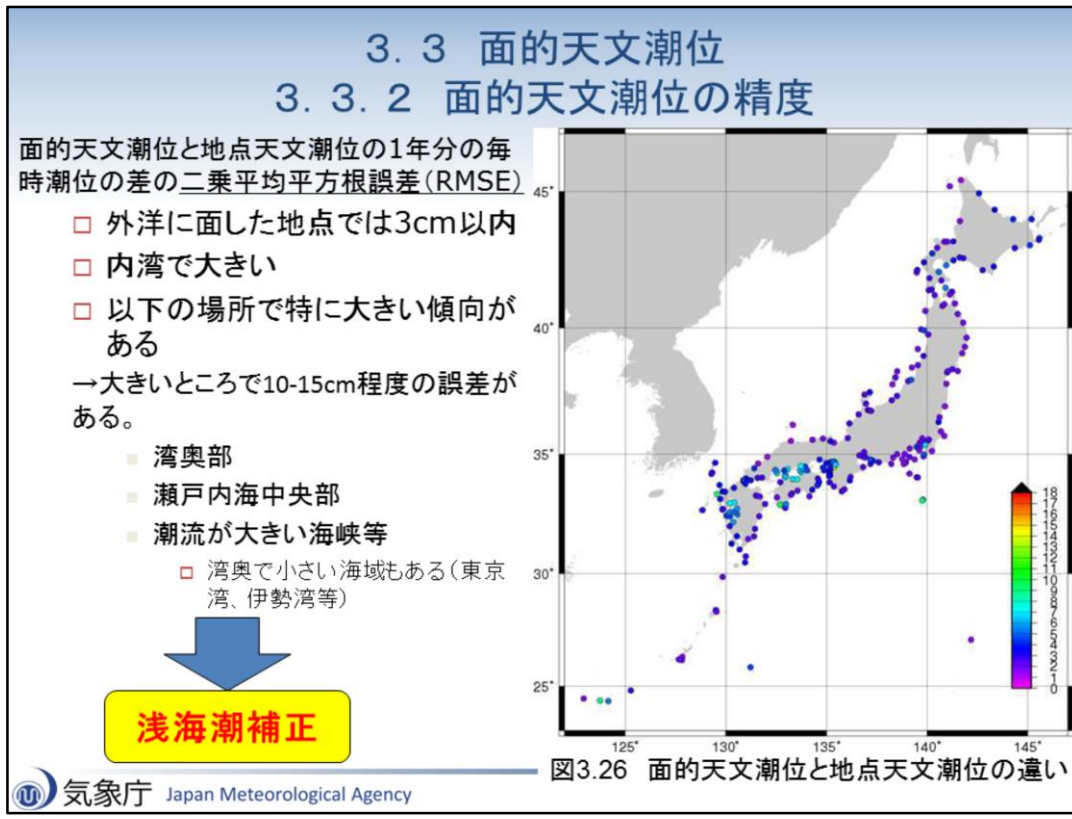
3．3．1　面的天文潮位の概要

高潮モデルは潮位偏差のみの計算を行っている。このため、高潮警報・注意報の基準値と同じく標高で表した潮位として予測値を作成するには、潮位偏差に天文潮位を加算し、標高に換算する必要がある。日本の全ての海岸線に沿った連続的な天文潮位を得るために、面的天文潮位を使用する。面的天文潮位は、オレゴン州立大学の潮汐モデル（Egbert et al., 2002）の計算結果をベースとして、潮位観測点の潮汐調和定数をアンサンブル変換カルマンフィルタにより同化して、面的に求めた潮汐調和定数から計算されている。ただし、上記潮汐モデルに含まれていない年周期成分の潮汐調和定数については別途、海洋データ同化システム（MOVE/MRI.COM）（石崎ほか、2009）の海面高度解析値を調和解析したものをベースに、長期大気再解析（JRA-55）の海面気圧解析値により気圧補正し、潮位観測点の潮汐調和定数を最適内挿法により同化した結果を使用している。

分潮や潮汐調和定数、振幅、遅角等の用語については、2.4.2項を参照。

面的天文潮位の計算に用いた海底地形は、高潮モデルと同じ1km格子となっており、1km格子毎に各周期成分の潮汐調和定数について振幅と遅角を事前に計算しておき、格子点毎に天文潮位の計算を行っている。詳細については、髙佐ほか（2011）を参照されたい。

なお、面的天文潮位は28分潮(短周期・長周期成分)からなり、浅海潮（面的天文潮位の計算に含まれていない半日より短い周期の成分で、浅海域で発達しやすい。詳細は4.2参照。）は含まない。浅海潮の影響については、高潮ガイダンスで考慮している。詳細は第4節を参照。



３．３　面的天文潮位

３．３．２　面的天文潮位の精度

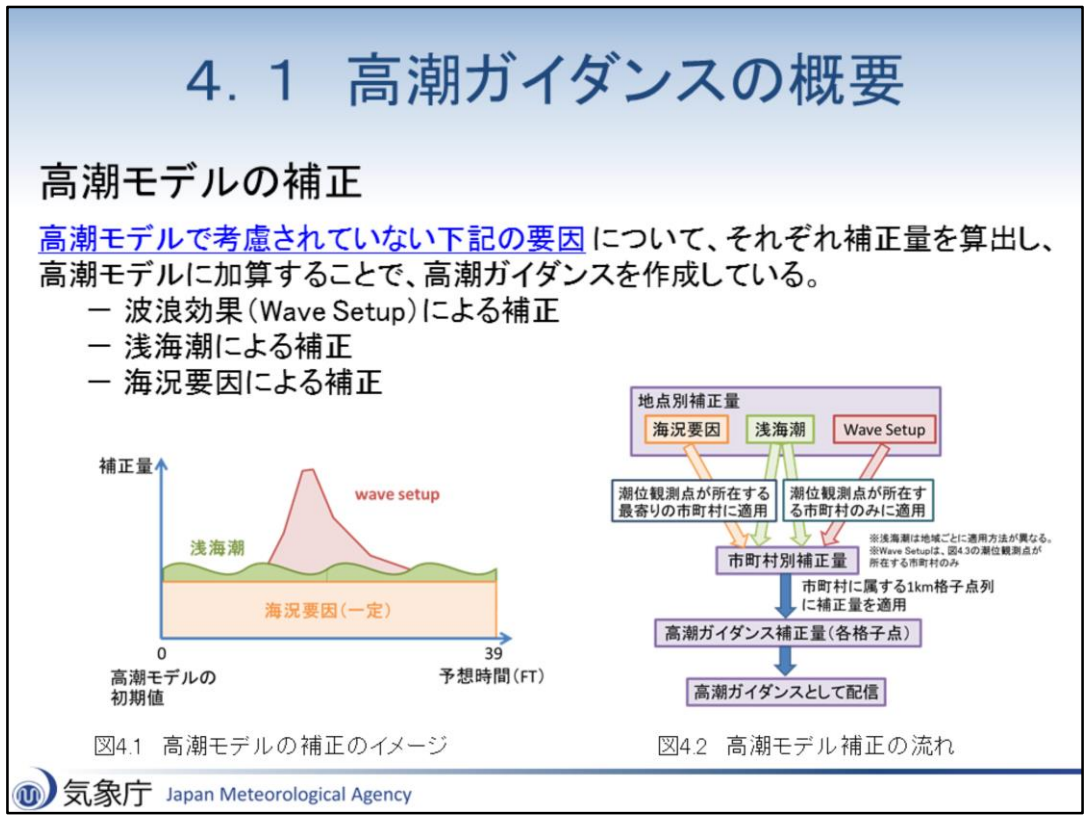
地点天文潮位（潮位観測点の潮汐調和定数による天文潮位）と、それぞれの地点の最寄りの格子点における面的天文潮位について、両者の差の二乗平均平方根誤差（RMSE）を求めた結果を図3.26に表す。浅海潮が相対的に大きい瀬戸内海や有明海でRMSEが大きくなる傾向がある。誤差は大きいところで10-15cm程度になる。

長期観測している地点で、面的天文潮位と地点天文潮位とのズレを求め、これを補正量として高潮ガイダンスで考慮している。詳細は第４節を参照。

参考文献

- 林原, 2011: 気象庁の高潮数値予測モデルについて, 天気, 58, 235-240.
- JMA, 2019: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency.
- Westerink et al., 2008: A Basin- to Channel-Scale Unstructured Grid Hurricane Storm Surge Model Applied to Southern Louisiana. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 833-864.
- 石崎ほか, 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-S14
- 高佐, 近澤, 森, 2011: 面的天文潮位の予測手法とその精度, 測候時報, 78, 特別号, S33-S42.
- 小西, 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, 3-12.
- Fujita, T., 1952: Pressure Distribution within Typhoon. *Geophys. Mag.*, 23, 437-451.
- Egbert, G. D. and S. Y. Erofeeva, 2002: Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 183-204.
- 桑木野, 熊谷, 1983: 潮汐の調和定数と予報精度, 水路部研究報告, 18, 68-70.

4. 高潮ガイダンス



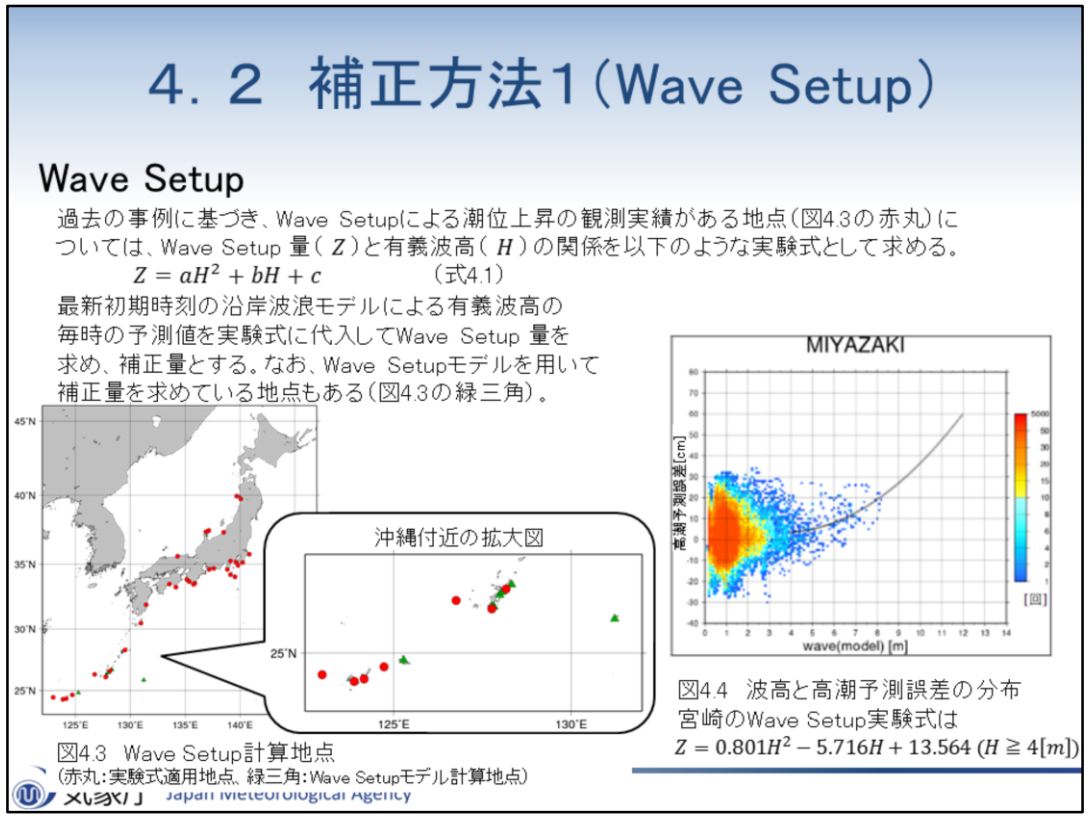
4．1　高潮ガイダンスの概要

第3節で述べた高潮モデルでは考慮されない要因及び面的天文潮位の特性により、潮位の予測が実際からずれてしまうことがある。このため、これら要因の効果を経験式等をもとに見積もり、これらを補正量としてモデル予測値に加えた「高潮ガイダンス」を用いることで、より的確に潮位の予測を行う。

高潮モデルの予測のずれを補正するため、影響の大きな3つの要因（波浪効果（Wave Setup）、浅海潮、海況要因）を考慮する。これらの要因による補正量をそれぞれ足し合わせることにより、高潮ガイダンスを作成している。なお、高潮モデル自体の精度や気象の予測精度に起因する要因については定量的に補正することが困難であるため、考慮していない。

図4.1には、高潮モデルを補正し、高潮ガイダンスを作成するイメージ図を示す。縦軸には高潮モデルの初期値に加える補正量、横軸には予想時間を示す。高潮モデルの初期値に、Wave Setupによる補正や、浅海潮による補正、海況要因による補正を加えて、高潮ガイダンスを作成している。なお、4.2項でも記載するが、海況要因はゆっくり変動することから、海況要因による補正量はモデルのその初期値において、予想時間によらず一定量で補正している。

図4.2には、高潮モデルを補正するための補正量を算出し、高潮モデルに加えることで、高潮ガイダンスを作成する流れを図に示す。まず、Wave Setup、浅海潮、海況要因、それぞれの補正量を算出する。Wave Setupによる補正量は潮位観測点が所在する市町村のみに適用（後述の図4.3の潮位観測点が所在する市町村のみに適用）し、海況要因による補正量は潮位観測点が所在する最寄りの市町村に適用（潮位観測点が所在しない市町村にも適用）する。浅海潮による補正量は、各地域の潮汐の特性等により、潮位観測点が所在する市町村のみに適用するか、最寄りの市町村へも適用するか、適用方法が異なる。これらを合わせて市町村別補正量を算出し、市町村に属する1km格子点別に適用して、各格子点における高潮モデル補正量を求める。この高潮モデル補正量を高潮モデルの予測結果に加算して、高潮ガイダンスを作成・配信している。



4．2 補正方法1（Wave Setup）

3.2.6項で述べたように、Wave Setupによる潮位上昇は高潮モデルで考慮されていない。そのため、台風や低気圧通過時には、外洋に面した沿岸や島しょ部で、高潮モデルが顕著な過小評価傾向を示すことがある。

このWave Setupが起こりやすい場所は統計的にわかっており、図4.3で赤丸で示される潮位観測点（32地点）では、過去の事例から実験式が求められている。各潮位観測点での実験式は付録-3-1に示す。

これらの潮位観測点では、最新初期時刻の沿岸波浪モデルによる有義波高の予測値を、各地点ごとに求められている実験式（式4.1）に代入して計算した結果を補正量Zとする。この補正量Zを高潮モデルに補正量として適用する。

図4.4は、宮崎における波高と高潮予測誤差の分布の図である。縦軸に潮位観測点の高潮予測誤差[cm]、横軸：沿岸波浪モデルでの有義波高[m]、カラーバー：度数[回] である。黒線は、Wave Setupが発生しやすい波向や波高を考慮して算出した、宮崎の実験式Z=0.801H^2-5.716H+13.564（H≧4m）である。この実験式に沿岸波浪モデルの有義波高予測値を代入し、Wave Setup量[cm]を求める。

また、Wave Setupの計算地点は、実験式によって求めている図4.3に赤丸の地点以外にも、Wave Setupモデルで計算している地点もある（緑三角の地点）。Wave Setupモデルについて、詳細は（近澤,2015）を参照いただきたい。

なお、Wave Setupは局所性が大きいため、この補正量は図4.3に示す潮位観測点が所在する市町村の1km格子点列のみに適用する。

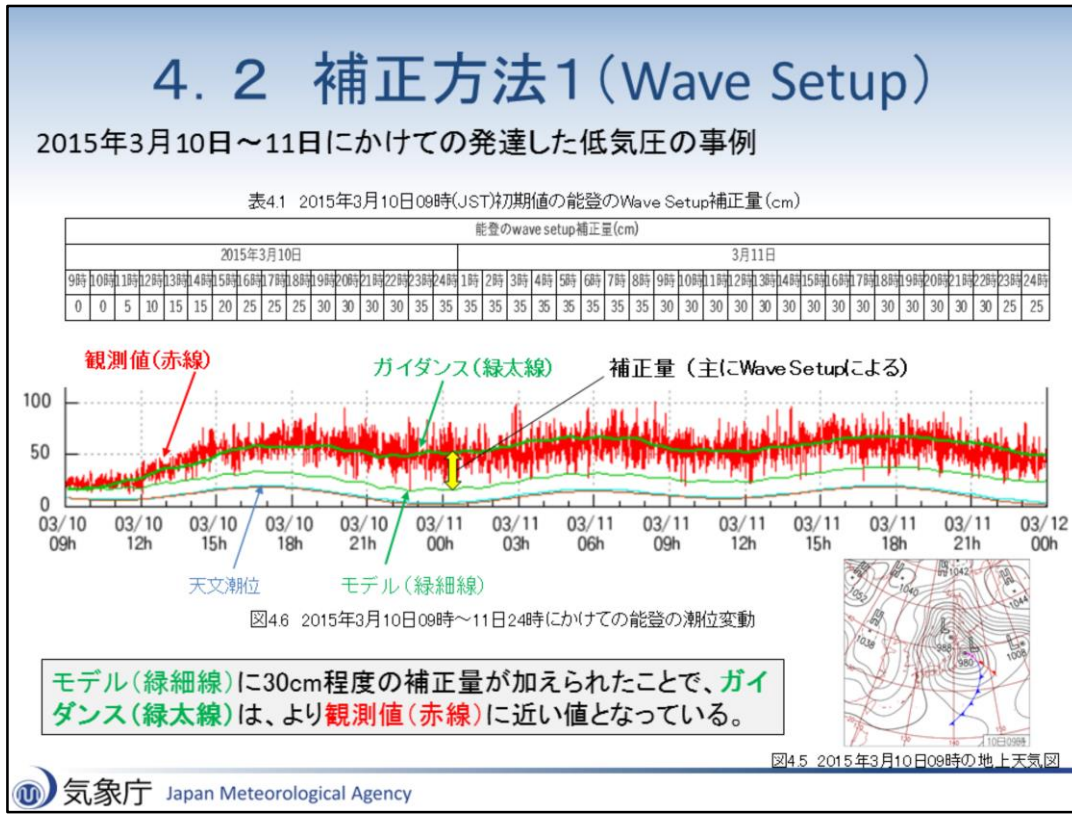
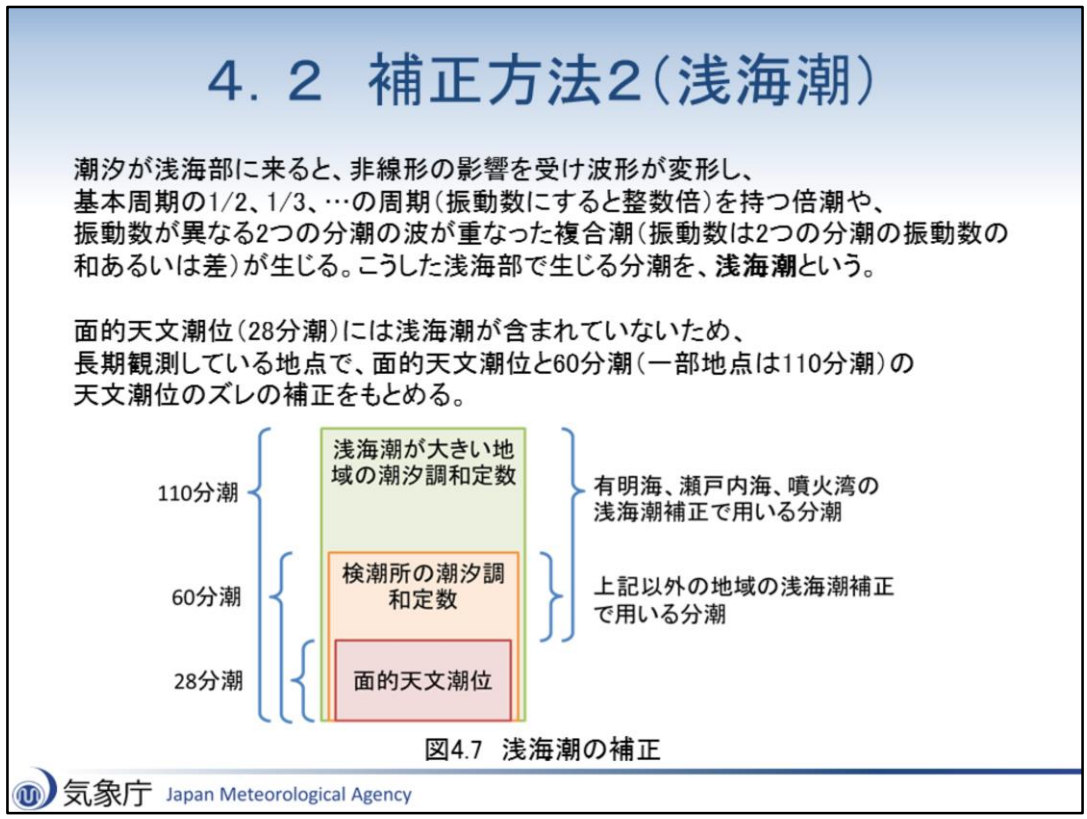


表4.1 2015年3月10日09時(JST)初期値の能登のWave Setup補正量(cm)

| 能登のwave setup補正量(cm) | | |



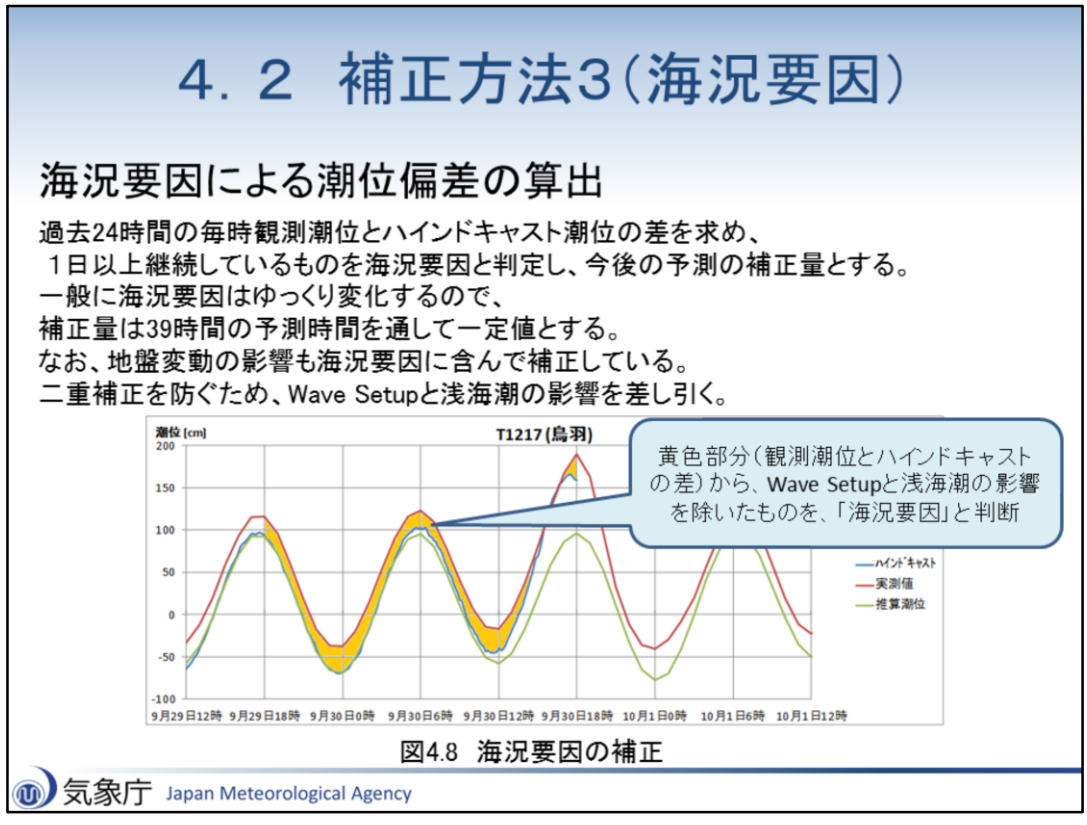
４．２　補正方法２（浅海潮）

潮汐が浅海部に来ると、非線形の影響を受け波形が変形し、基本周期の1/2、1/3、…の周期（振動数にすると整数倍）を持つ倍潮や、振動数が異なる2つの分潮の波が重なった複合潮（振動数は2つの分潮の振動数の和あるいは差）が生じる。こうした浅海部で生じる分潮を、浅海潮という。

3.3項で述べたように、面的天文潮位の計算には浅海潮が含まれていないため、潮位観測点の潮汐調和定数による天文潮位との間にずれが生じる。このため、浅海潮を補正量として加えて高潮ガイダンスを作成する。浅海潮による補正量は、各地域の潮汐の特性等により、潮位観測点が所在する市町村の1km格子点列のみに適用するか、最寄りの市町村へも適用するか、適用方法が異なる。

図4.7は、浅海潮の補正要素を示している。面的天文潮位（28分潮）では浅海潮を十分に表現できないため、浅海潮による補正を行う。浅海潮が相対的に大きい有明海、瀬戸内海、噴火湾では補正量算出に用いる分潮の数を110個とし、それ以外の地域では潮位観測点の潮汐調和定数と同じ60個としている。

分潮については、2.4.2項も参照いただきたい。



４．２　補正方法３（海況要因）

3.2.7項で述べた海況要因が原因による高潮モデルの予測結果のバイアスを考慮するための補正を行う。

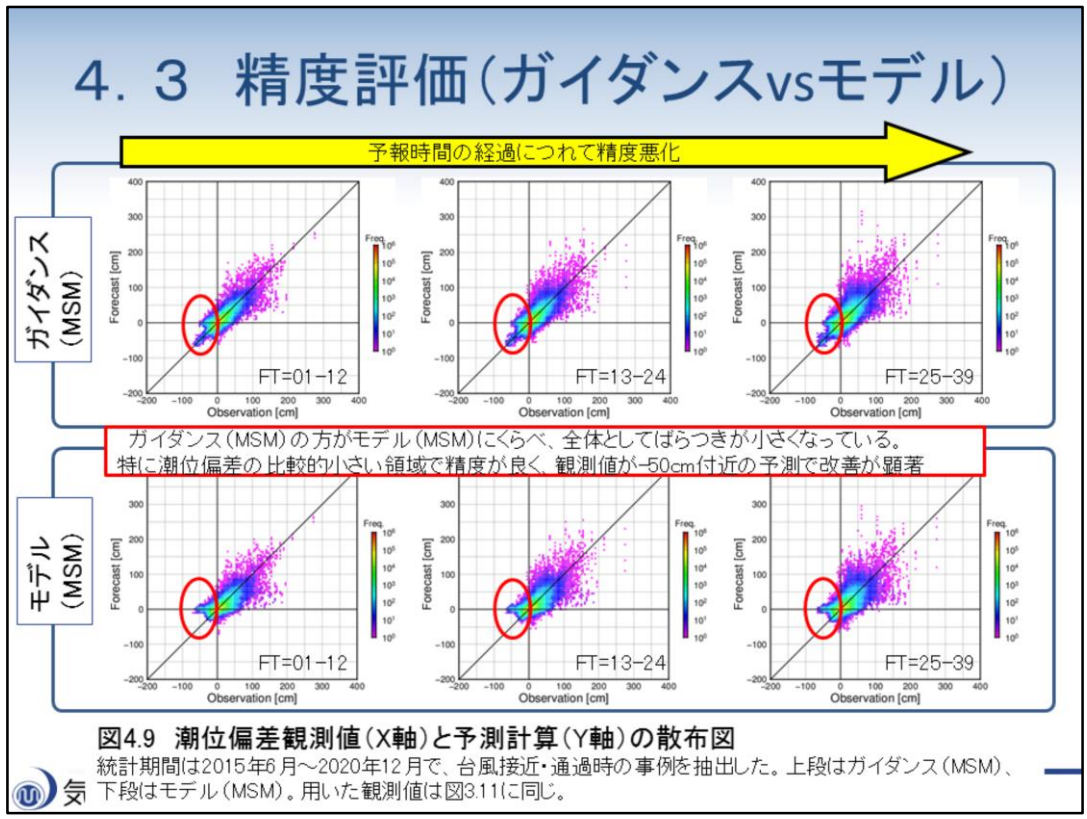
観測潮位とハインドキャスト潮位の差を潮位観測点ごとに求め、そこからWave Setupと浅海潮の影響を除いた1日以上継続しているものを、「海況要因」による補正量とする。潮位観測点が所在する最寄りの市町村の海岸線に沿った1km格子点列に、その値を適用して、高潮モデルを補正する。（潮位観測点が所在しない市町村にも適用する。）

図4.8に、海況要因による補正を示す。過去24時間の観測潮位（図中の赤線）とハインドキャスト（図中の青線）の差から、Wave Setupと浅海潮の影響を除いたものを海況要因として補正する。

本要因による補正量は、気象庁海洋気象情報室での調整作業を経て1日4回更新している。一般に海況要因による変動は海水温・海流によるゆっくりとした変化なので、この補正量は39時間の予測時間を通して一定である。

なお、気象庁では、令和2年10月より、日本沿岸実況監視予測システム（以下、「JPNシステム」）の運用を開始した。今後、JPNの予測結果を活用することで、より適切な海況要因による補正量の見積もりが可能になることが期待される。海洋気象情報室では、JPNシステムの活用について技術開発を進めている。

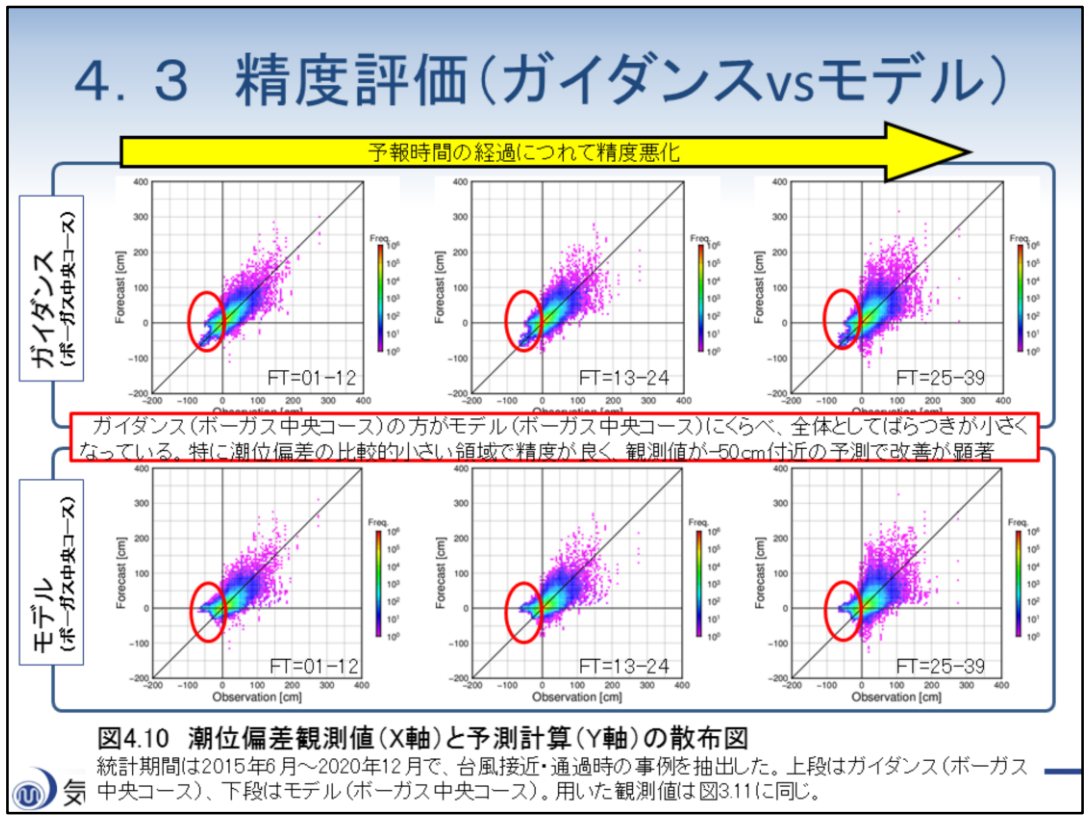
JPNシステムの詳細については、「配信資料に関する仕様No.30508（日本沿岸海況監視予測システムGPV）」（https://www.data.jma.go.jp/suishin/shiyou/pdf/no30508）を参照のこと。



4．3 精度評価（ガイダンスvsモデル）

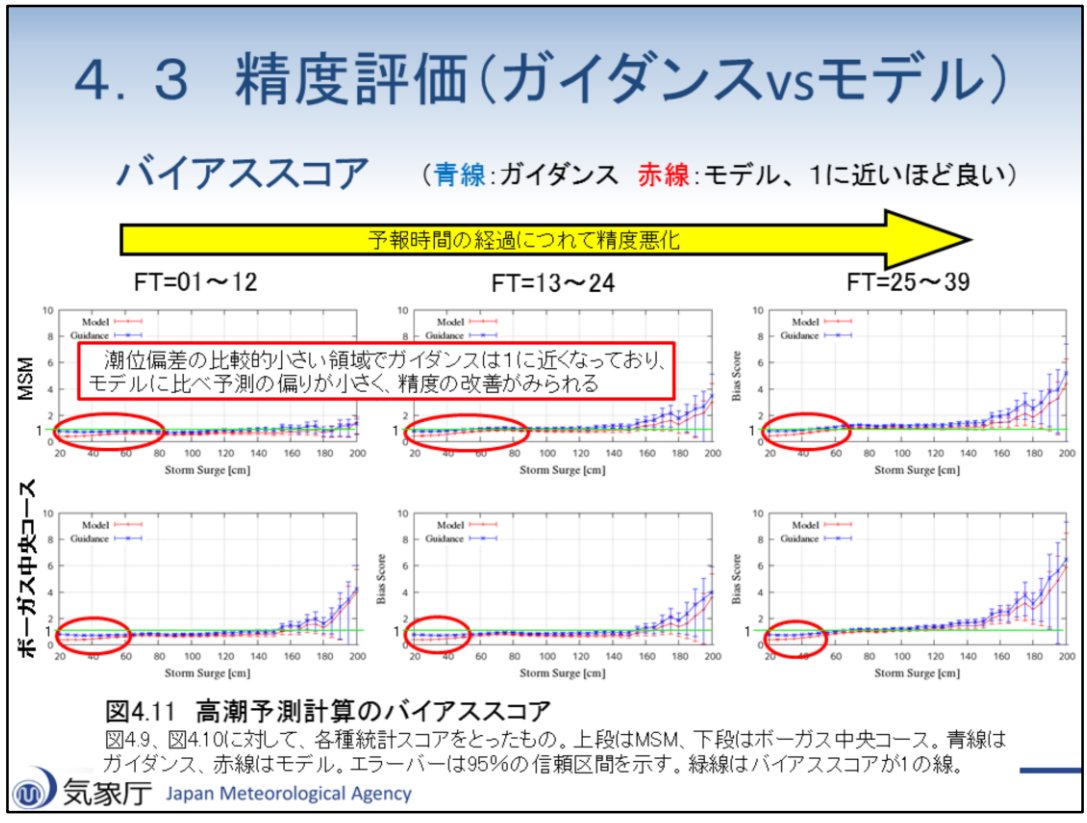
この項では、精度評価の分析結果について解説する。本項での結果を踏まえた、高潮ガイダンスの解釈のポイントについては、第7節で解説する。

図4.9は、第3節の図3.11と、同じ事例で作成したガイダンスの散布図を比較したものである。ガイダンス（MSM）とモデル（MSM）の散布図を比較すると、ガイダンス（MSM）はモデル（MSM）にくらべ、全体としてばらつきが小さくなっており、精度が改善されていることがわかる。特に、比較的潮位偏差の小さい領域において、モデルに比べガイダンスの方がより精度が高くなっており、観測値−50cm付近の予測が、モデル（MSM）に比べガイダンス（MSM）で顕著に改善されている様子がみられる。潮位偏差の大きい領域では、潮位偏差の小さい領域と比較すると、ガイダンスによる改善の効果は小さい。これは、潮位偏差の大きい領域では、潮位偏差の要因として気象要因によるものが大きく、海況やWave Setup、浅海潮などの要因は、相対的に影響が小さかったり、地域が限定的であることが考えられる。



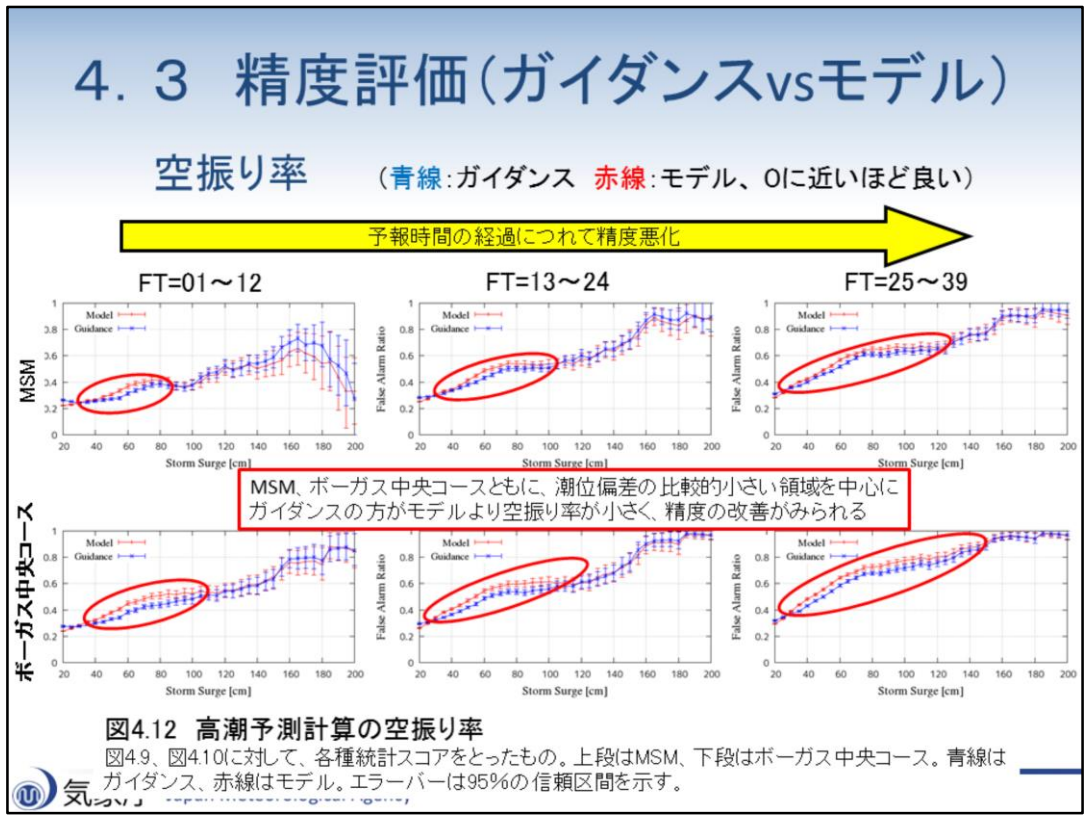
4．3 精度評価（ガイダンスvsモデル）

図4.10は、先ほどと同様に、モデル（ボーガス中央コース）とガイダンス（ボーガス中央コース）を比較した図を示す。MSMでの比較と同様に、全体的にモデル（ボーガス中央コース）に比べガイダンス（ボーガス中央コース）は全体としてばらつきが小さくなっており、精度が改善されている様子がわかる。また、比較的潮位偏差の小さい領域において、モデル（ボーガス中央コース）に比べガイダンス（ボーガス中央コース）の方がより精度が高く、観測値−50cm付近の予測が顕著に改善されている点や、潮位偏差の大きい領域でガイダンスによる改善効果が小さい点も、MSMと同様の傾向となっている。



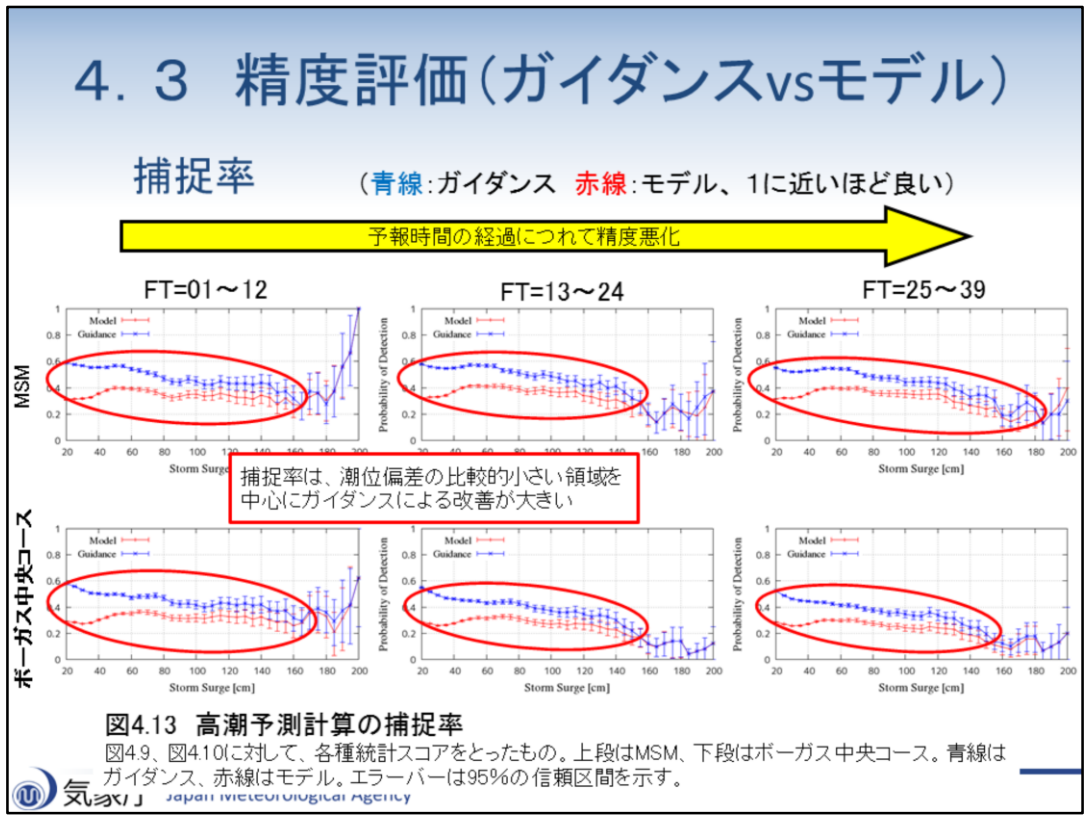
4．3 精度評価（ガイダンスvsモデル）

図4.11に、ガイダンスとモデルについて、バイアススコアを比較した図を示す。潮位偏差の比較的小さい領域でガイダンスは1に近くなっており、モデルに比べ予測の偏りが小さく、ガイダンスにより精度が改善されていることがわかる。



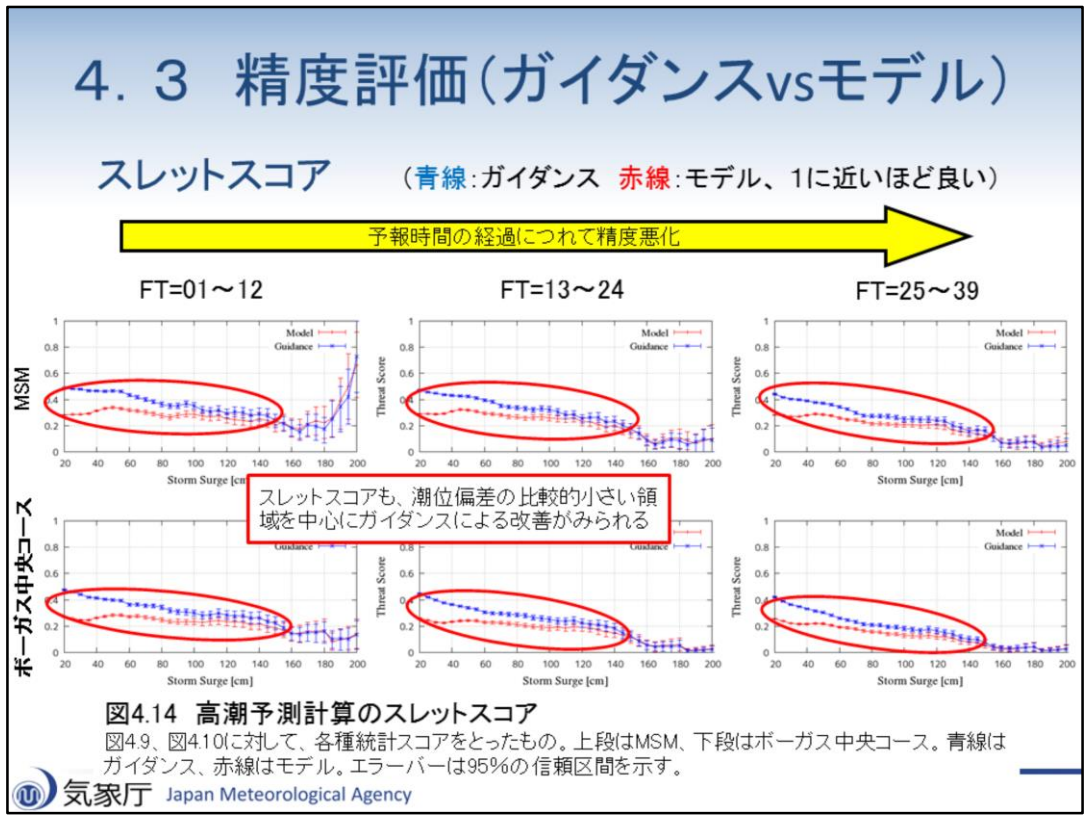
4．3 精度評価（ガイダンスvsモデル）

図4.12に、ガイダンスとモデルについて、空振り率を比較した図を示す。MSM、ボーガス中央コースともに、潮位偏差の比較的小さい領域を中心にガイダンスの方がモデルより空振り率が小さく、ガイダンスにより精度が改善されていることがわかる。



4．3 精度評価（ガイダンスvsモデル）

図4.13に、ガイダンスとモデルについて、捕捉率を比較した図を示す。捕捉率は、MSM,ボーガス中央コースともに、潮位偏差が概ね100cm未満の領域を中心に、ガイダンスによる改善効果が大きい。これは、外洋に面した沿岸や島しょ部でのWave Setupによる補正により、モデルの過小予測が改善されたことなどが主な理由と考えられる。



4．3 精度評価（ガイダンスvsモデル）

図4.14に、ガイダンスとモデルについて、スレットスコアを比較した図を示す。スレットスコアも、MSM,ボーガス中央コースともに潮位偏差が比較的小さい領域を中心にガイダンスによる改善がみられる。

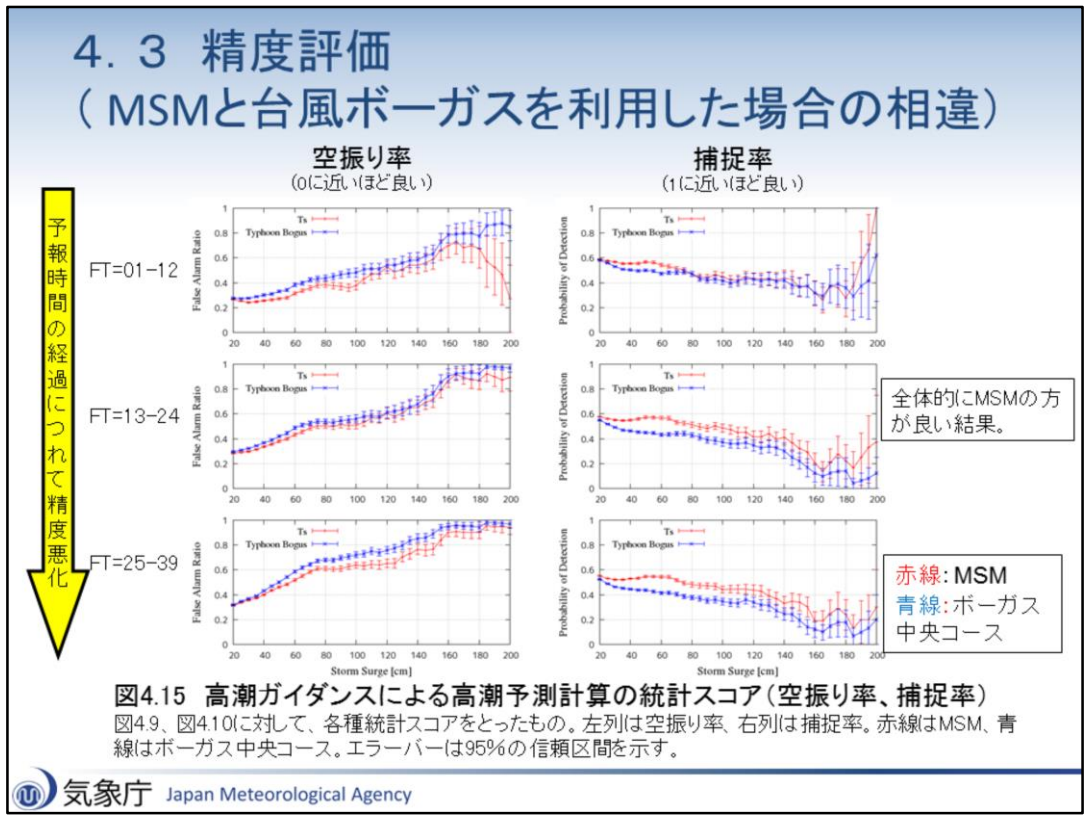
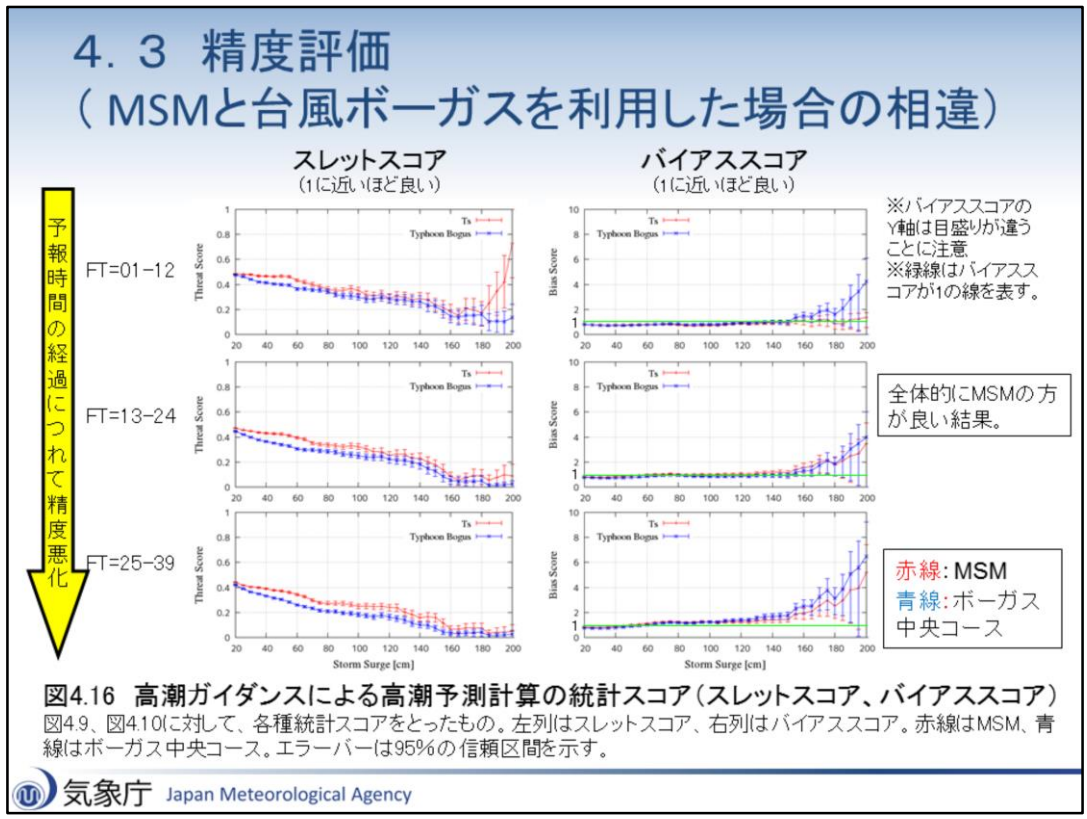


図4.15 高潮ガイダンスによる高潮予測計算の統計スコア（空振り率、捕捉率）
図4.9、図4.10に対して、各種統計スコアをとったもの。左列は空振り率、右列は捕捉率。赤線はMSM、青線はボーガス中央コース。エラーバーは95%の信頼区間を示す。

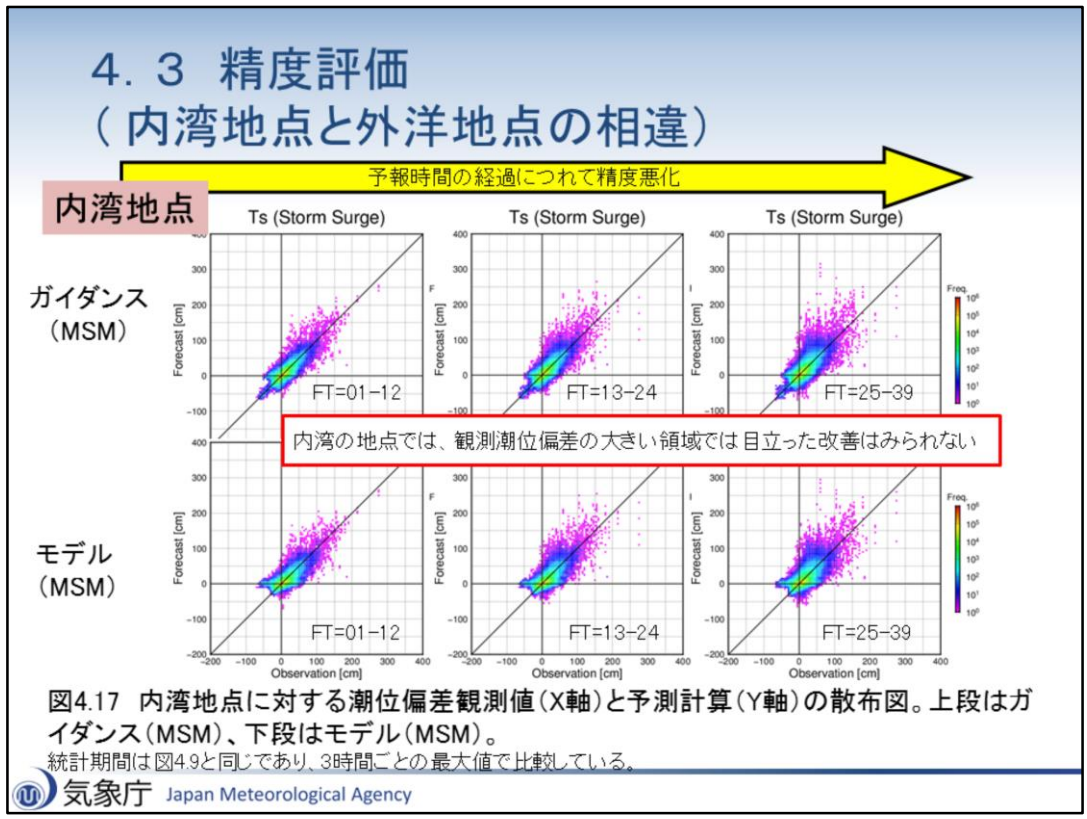
４．３ 精度評価（MSMと台風ボーガスを利用した場合の相違）

高潮ガイダンスにおいて、予測期間を1～12時間、13～24時間、25～39時間に分けて空振り率・捕捉率を計算した結果が図4.15である。モデルと同様にガイダンスでも、全体的にMSMによる予測の方がボーガス中央コースに比べ精度が良い。



4．3 精度評価（MSMと台風ボーガスを利用した場合の相違）

高潮ガイダンスにおいて、予測期間を1～12時間、13～24時間、25～39時間に分けてスレットスコア・バイアススコアを計算した結果が図4.16である。スレットスコアとバイアススコアについてもモデルと同様の傾向で、全体的にMSMによる予測の方がボーガス中央コースに比べ精度が良い。



４．３ 精度評価（内湾地点と外洋地点の相違）

図4.17は、図4.9のモデル（MSM）とガイダンス（MSM）を比較した散布図を、内湾地点と外洋地点に分けて作成したもののうち、内湾地点のものである。内湾地点と外洋地点の分け方については、第3節（3.2.5）と同様とする。

第3節での検証のとおり、内湾地点におけるモデル（MSM）による予測は概ね実測値±100cm程度の範囲に収まっていたが、ガイダンス（MSM）でも同様の結果となった。観測潮位偏差の大きい領域では目立った改善はみられないが、観測潮位偏差-50cm付近の予測が、モデルに比べガイダンスで顕著に改善されている様子がみられる。全体としては、図4.9で見られたものと、傾向は大きくは変わらない。

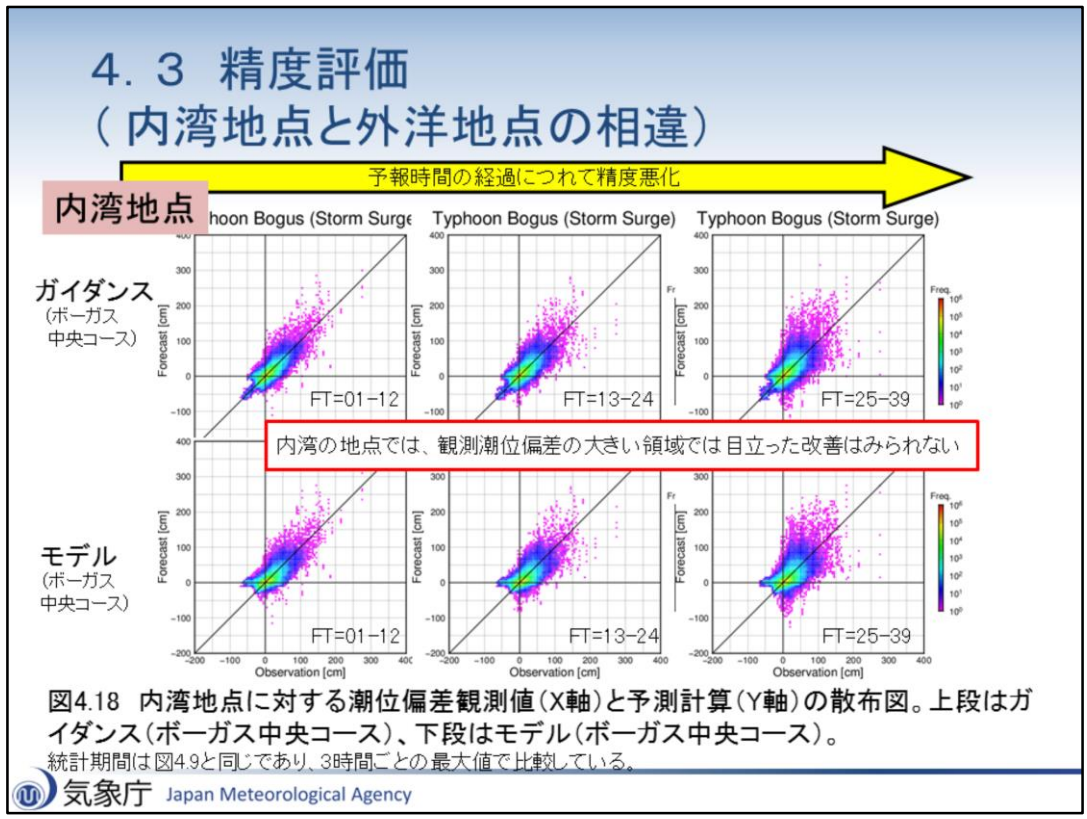
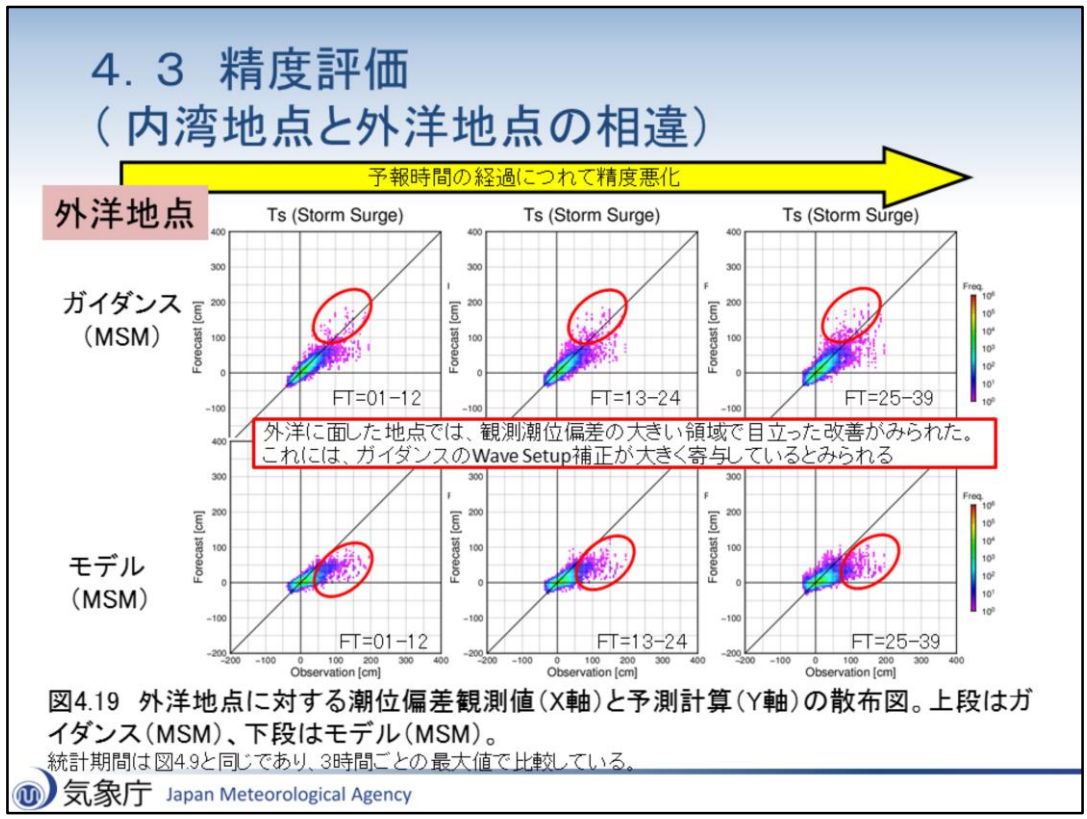


図4.18 内湾地点に対する潮位偏差観測値（X軸）と予測計算（Y軸）の散布図。上段はガイダンス（ボーガス中央コース）、下段はモデル（ボーガス中央コース）。
統計期間は図4.9と同じであり、3時間ごとの最大値で比較している。

４．３ 精度評価（内湾地点と外洋地点の相違）

図4.18は、図4.10のモデル（ボーガス中央コース）とガイダンス（ボーガス中央コース）を比較した散布図を、内湾地点と外洋地点に分けて作成したもののうち、内湾地点のものである。内湾地点と外洋地点の分け方については、第3節（3.2.5）と同様とする。

第3節での検証のとおり、内湾地点におけるモデル（ボーガス中央コース）による予測は過大評価傾向となったが、ガイダンス（ボーガス中央コース）でも同様の結果となった。観測潮位偏差の大きい領域では目立った改善はみられないが、観測潮位偏差-50cm付近の予測が、モデルに比べガイダンスで顕著に改善されている様子がみられる。全体としては、図4.10で見られたものと、傾向は大きくは変わらない。



４．３ 精度評価（内湾地点と外洋地点の相違）

図4.19は、図4.9のモデル（MSM）とガイダンス（MSM）を比較した散布図を、内湾地点と外洋地点に分けて作成したもののうち、外洋地点のものである。内湾地点と外洋地点の分け方については、第3節（3.2.5）と同様とする。

第3節での検証のとおり、外洋地点におけるモデル（MSM）による予測では、過小評価が顕著な領域（丸で囲んだ領域）があったが、ガイダンス（MSM）では大幅に改善されている様子が見られる。これには、ガイダンスによるWave Setup補正が大きく寄与しているとみられる。

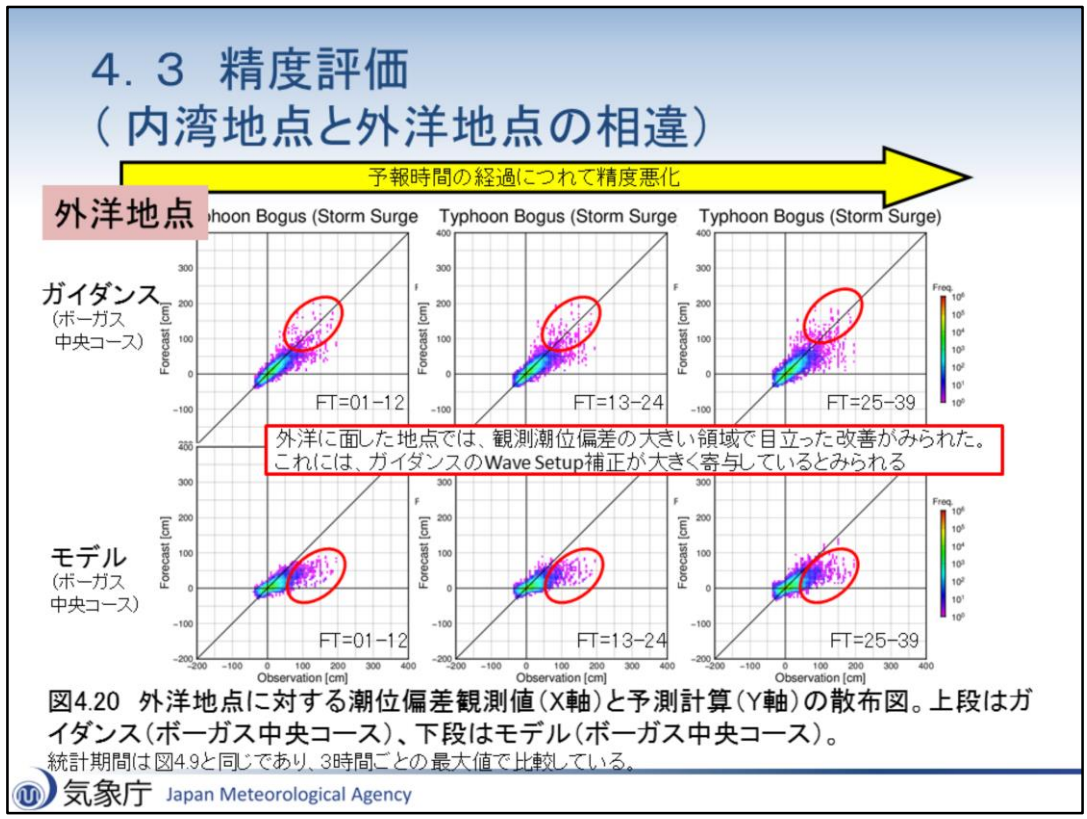
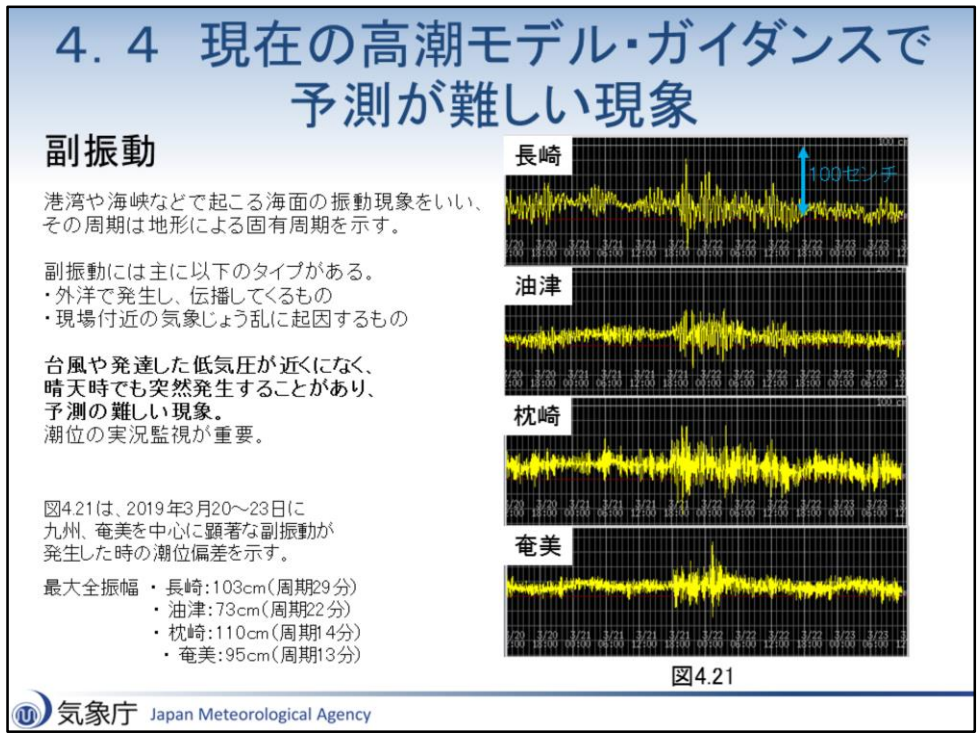


図4.20 外洋地点に対する潮位偏差観測値（X軸）と予測計算（Y軸）の散布図。上段はガイダンス（ボーガス中央コース）、下段はモデル（ボーガス中央コース）。
統計期間は図4.9と同じであり、3時間ごとの最大値で比較している。

４．３ 精度評価（内湾地点と外洋地点の相違）

図4.20は、図4.10のモデル（ボーガス中央コース）とガイダンス（ボーガス中央コース）を比較した散布図を、内湾地点と外洋地点に分けて作成したもののうち、外洋地点のものである。内湾地点と外洋地点の分け方については、第3節（3.2.5）と同様とする。

第3節での検証のとおり、外洋地点におけるモデル（ボーガス中央コース）による予測では、過小評価が顕著な領域（丸で囲んだ領域）があったが、ガイダンス（ボーガス中央コース）では大幅に改善されている様子が見られる。これには、ガイダンスによるWave Setup補正が大きく寄与しているとみられる。



4．4　高潮モデル・ガイダンスで予測対象としていない現象

この項では、現状、高潮モデル・高潮ガイダンスで予測が難しい現象（副振動、陸棚波、河川水の流入）について解説する。

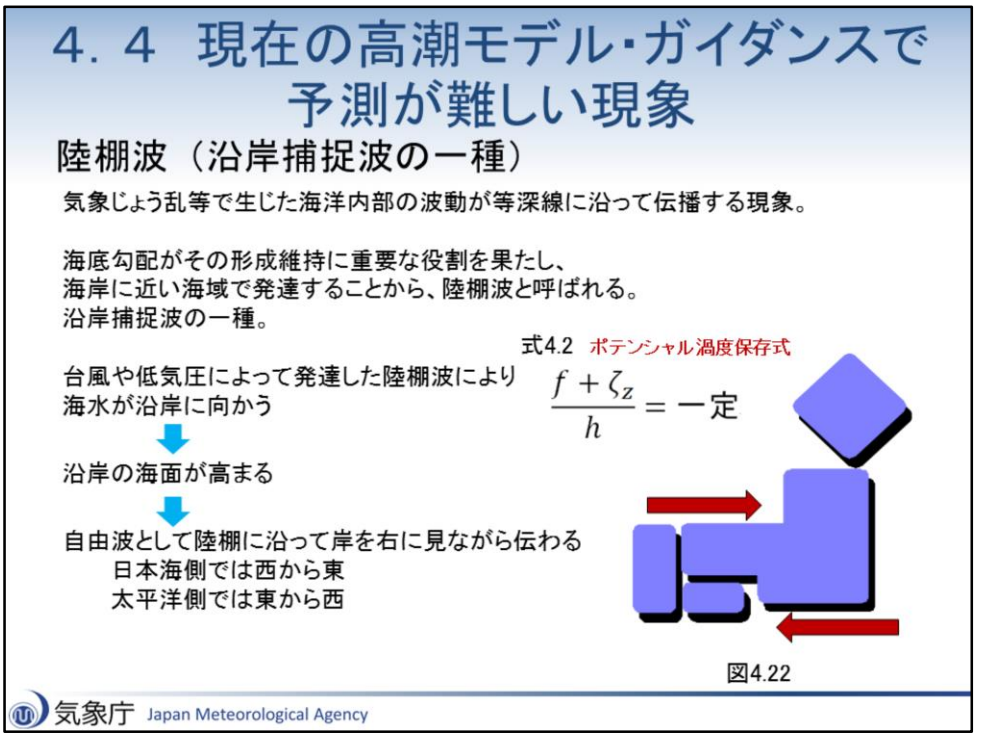
まず、副振動は、港湾や海峡などで起こる海面の振動現象をいい、その周期は地形による固有周期を示す現象である。外洋で発生し、微気圧振動や風等の影響により、海洋長波（波浪よりも周期の長い波、水深に比べ波長が十分長い）が発生する。この海洋長波が進行し、海底地形等の各種要因によって増幅される。現状では、高潮モデル、高潮ガイダンスで予測が難しい現象であり、潮位の実況監視が重要である。（ただし、2.2.3で述べたとおり、台風通過後に湾内で生じる副振動については、高潮モデルや高潮ガイダンスである程度の再現が可能な場合もある。）

通常観測される副振動の振幅は数cm～数10cmだが、特に大きなものは2mを超えることもある。過去には大きな副振動により、係留船舶の転覆や低地で浸水被害が発生したことがある。外洋で発生し伝播してくる副振動については、主に九州西岸で発生している。それ以外の地域では、現場付近の気象じょう乱に起因する副振動が主に発生している。また、石廊崎や三宅島など、外洋に面した地点や島しょ部では、波浪の影響と思われる短周期の潮位変動が発生するケースもある。過去の副振動の発生状況については、気象庁ホームページの「各年の潮汐」（https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/gaikyo/nenindex.php）から検索が可能である。

図4.21に、2019年3月20～23日に九州、奄美を中心に顕著な副振動が発生した時の潮位偏差を示す。この事例では、長崎港周辺の各地で道路冠水による交通障害などが発生した。また、この副振動および大潮により、長崎において3月21日20時37分に238cm（標高換算）を観測し、過去最高潮位を更新した。

副振動と大潮や満潮が重なると台風通過時の高潮より潮位が高くなる場合もあるので注意が必要である。

気象庁において、副振動の予測は現状困難であるが、副振動の状況や見通しについては、可能な範囲で「潮位に関する全般解説資料」でお知らせする。また、副振動が発生した場合は、速やかに潮位情報を発表するので、実況監視に留意し、防災対応に活用いただきたい。



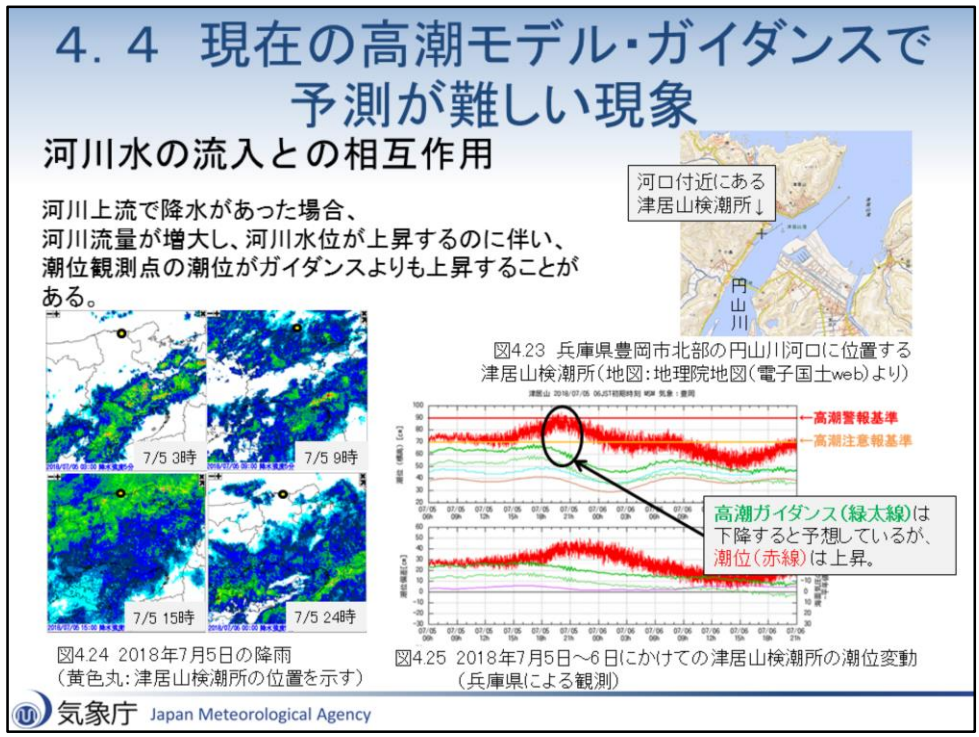
4．4　高潮モデル・ガイダンスで予測対象としていない現象

次に、陸棚波は、気象じょう乱等で生じた海洋内部の波動が等深線に沿って伝播する現象である。

陸棚波は、流体粒子の運動において、ポテンシャル渦度（=式4.2の左辺）が保存することを復元力とする波動である。なお、f=コリオリ係数（定数）、ζ=渦度、h=水深。

式4.2（ポテンシャル渦度保存式）について、はじめ、反時計回りの循環があるとして考える。水深が深くなる方向（hが増加する方向）に移動するとき、ポテンシャル渦度は保存されるから、f+ζも増加する。fは一定であるから、渦度ζが増加し、正の渦度を獲得する。その結果、反時計回りの循環が誘導される。一方で、水深が浅くなる方向（hが減少する方向）に移動するとき、ポテンシャル渦度は保存されるから、f+ζも減少する。fは一定であるから、渦度ζが減少し、負の渦度を獲得する。その結果、時計回りの循環が誘導される。これらを全体としてみると、反時計回りの循環は、水深の浅い方向から深い方向をみたとき、はじめあった場所から右側に伝播している。このように、一般に、台風や低気圧の風によって海洋中に励起された陸棚波は、水深の浅いほうを右に見ながら伝播する。このため、日本海側では西から東に、太平洋側では東から西に伝播する。（図4.22）

陸棚波は地形性ロスビー波なので、高潮モデル・ガイダンスでもある程度は表現可能である。ただし、高潮モデルでは、海洋表層の水温の成層の効果を考慮していないなどの理由から、モデルで計算される陸棚波の振幅は、実況よりも過小になりやすい。（海洋表層の水温成層があると、高潮や陸棚波にとっては、実質的に水深が浅いのと同様の効果になり、陸棚波の振幅が大きくなると考えられる。）



4．4　高潮モデル・ガイダンスで予測対象としていない現象

最後に、河川水の流入との相互作用について説明する。富山県高岡市の小矢部川河口の伏木富山や、兵庫県豊岡市の円山川河口の津居山などでは、河川流量の増大によって、潮位が上昇し、潮位観測点の潮位がガイダンスよりも上昇することがある。詳細は（櫻井,2016）を参照のこと。例として、潮位が高潮ガイダンスの予想より上昇した例として、2018年7月5日~6日にかけての兵庫県豊岡市の津居山検潮所での事例を示す。

図4.23に、兵庫県豊岡市北部の円山川の河口に位置する津居山検潮所の位置を示す。

図4.24に、2018年7月5日の兵庫県付近の降雨の様子を、左上の図から右下の図にかけて、3時から24時まで6時間ごとに示す。なお、黄色の丸は津居山検潮所の位置を示す。豊岡市付近では、7時頃から降雨が始まり、13時頃から19時頃まで1時間10mm以上のやや強い降水が続き、その後は雨は弱まっていった。

図4.25に、2018年7月4日から5日にかけての、津居山検潮所の潮位・潮位偏差を示す。図4.25の、赤線は観測された潮位、緑の太線は7月5日6時（JST）初期値の高潮ガイダンスの予測潮位、緑の細線は同初期値の高潮モデルの予測潮位を示す。また、水色線は津居山における天文潮位、茶色は津居山における面的天文潮位を示す。図4.25上段の図の、90cmに引かれた赤線は豊岡市の高潮警報基準、70cmに引かれた黄色線は同市の高潮注意報基準を示す。図4.25下段の図の、紫線はMSMの海面気圧と旬平均の海面気圧平年値との差を示す。

この事例では、津居山の高潮ガイダンスは7月5日の18時頃以降下降すると予想している。しかし、潮位は18時以降も上昇し、20時頃には警報基準を超過しており、河川水の流入による潮位上昇は高潮ガイダンスで表現できていないことがわかる。

なお、海岸付近の河川では潮位の影響により河川水位が変動することも知られており（田中ほか,2008）、河口付近の潮位は、実際には河川水の流入との相互作用を考慮する必要があるが、その影響を定量的に評価するのは難しく、現状では高潮モデル・高潮ガイダンスでの取り扱いが困難な現象である。

参考文献

- 宇野木, 1993: 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会.
- 近澤, 2015: 波浪効果（wave setup）診断モデルの高度化及びその検証, 測候時報, 82, 特別号, S7-S28.
- 櫻井, 2016: 流域雨量指数を用いた津居山検潮所における高潮ガイダンスの補正法, 測候時報, 83, 特別号, S1-S9.
- 田中, 太田, 牧原, 2008: 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善, 測候時報, 75, 特別号, 35-69.

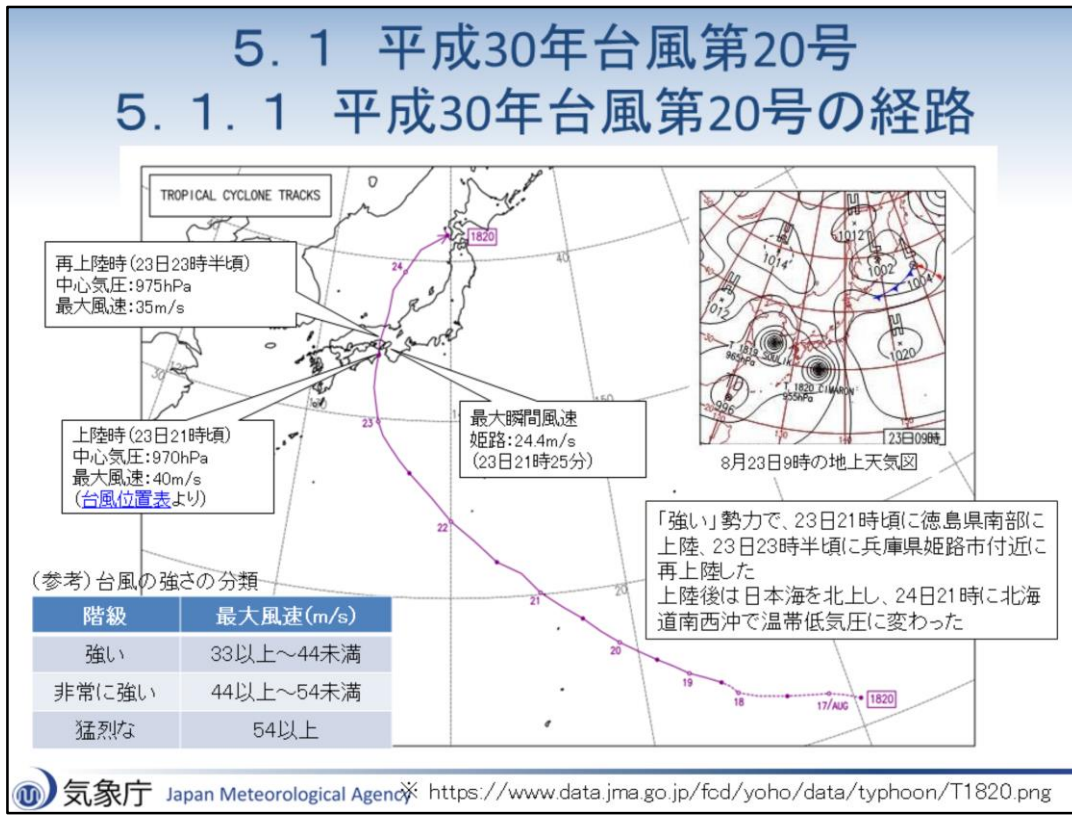
5. 平成30年台風シーズンの事例検証

気象庁 Japan Meteorological Agency

これまで、3節及び4節にて、長期間（2015年6月～2020年12月）の統計検証の結果を踏まえた高潮モデル及び高潮ガイダンスの特性について説明した。一方、個々の事例を検証すると、長期間の統計検証の結果からは見えてこない特性が明らかになることもある。そこで本節及び次節では、平成30年及び令和元年の台風シーズンにおいて顕著な高潮が発生した事例（平成30年台風第20号、第21号及び第24号並びに令和元年台風第15号及び第19号）を取り上げ、それぞれの事例検証の結果を説明する。

本節及び次節で説明する事例検証の結果と、第3節と4節で説明した長期間の統計検証の結果を踏まえ、第7節にて、高潮モデル・ガイダンスの解釈のポイントについて解説する。

なお、本節及び次節に掲載するボーガス中央コース及びボーガス周辺コースの結果は、3.1.6で述べた台風ボーガス改善の反映前の結果である。



５．１　平成30年台風第20号

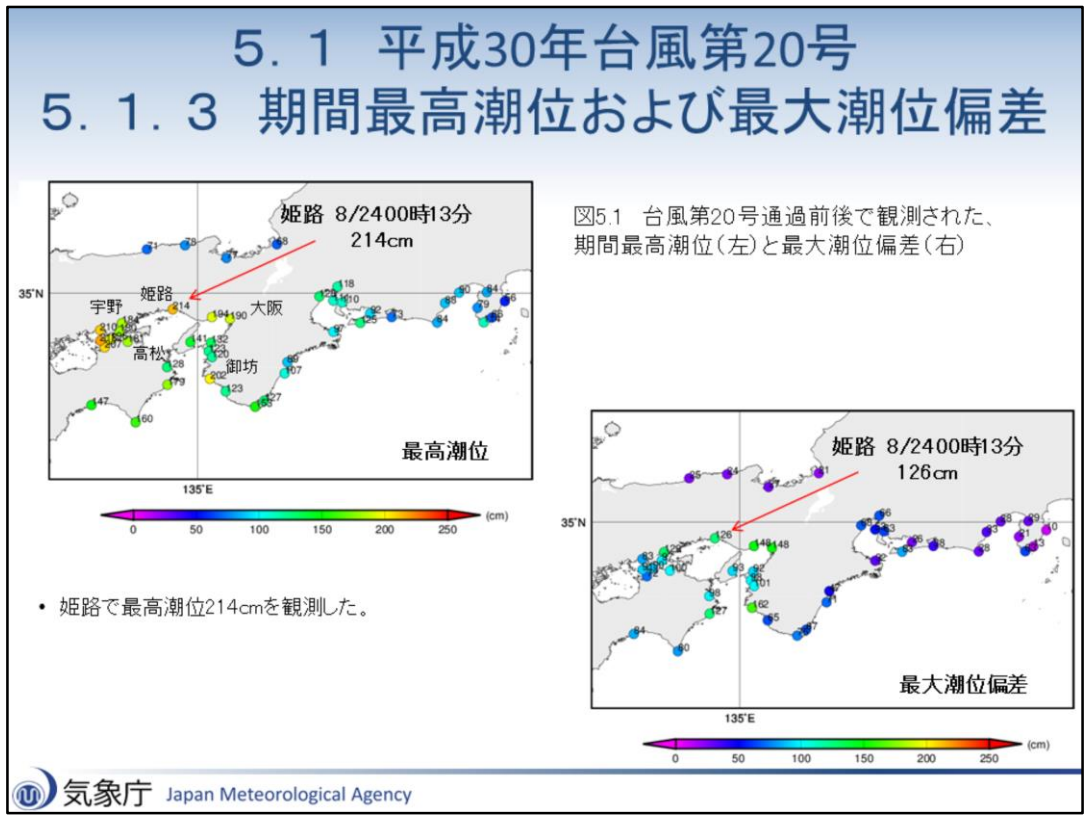
５．１．１　平成30年台風第20号の経路

台風第20号は、強い勢力で8月23日21時頃に徳島県南部に上陸し、23日23時半頃に兵庫県姫路市付近に再上陸した。上陸後は日本海を北上し、24日21時に北海道南西沖で温帯低気圧に変わった。最初の上陸時における中心気圧は970hPa、最大風速は40m/sで、再上陸時における中心気圧は975hPa、最大風速は35m/sであった。

５．１　平成30年台風第20号

５．１．２　全般情報で高潮について言及

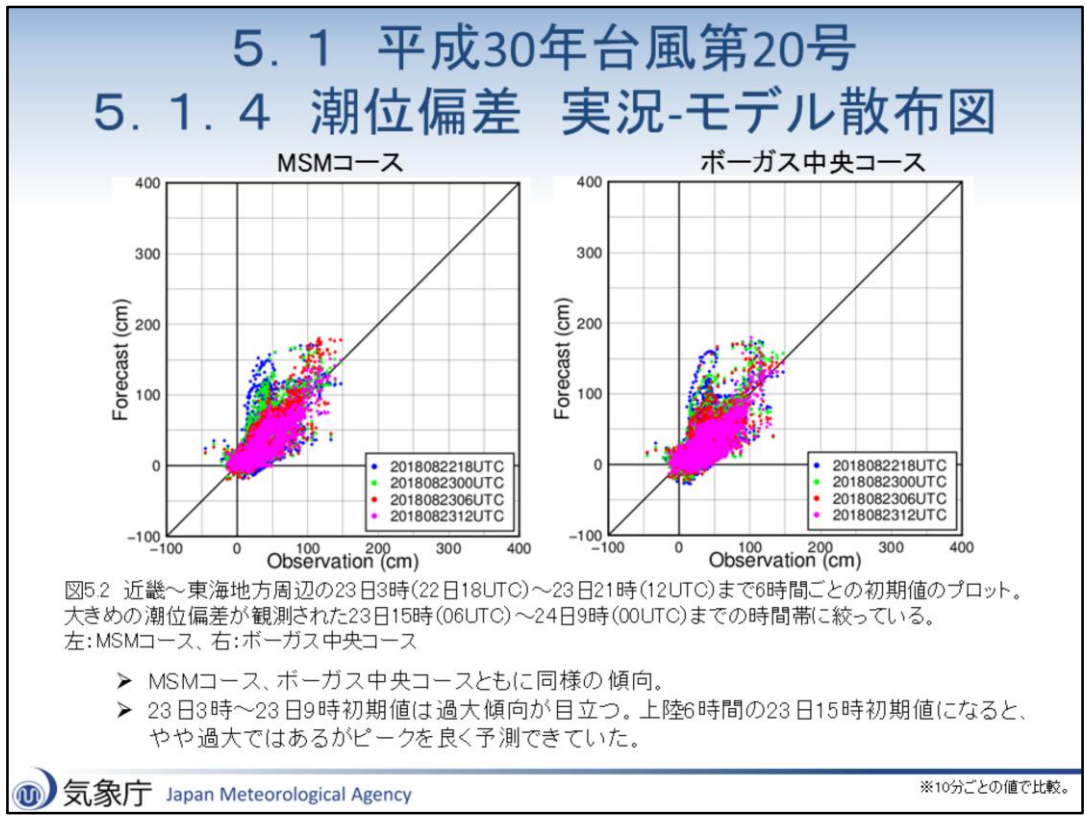
23日17時の予報部発表の情報では、潮位が23日夕方から24日明け方にかけて高潮警報基準よりかなり高くなること、予想される最高潮位が標高2メートル以上になることを踏まえ、高潮に厳重に警戒するよう呼びかけていた。



５．１　平成30年台風第20号

５．１．３　期間最高潮位および最大潮位偏差

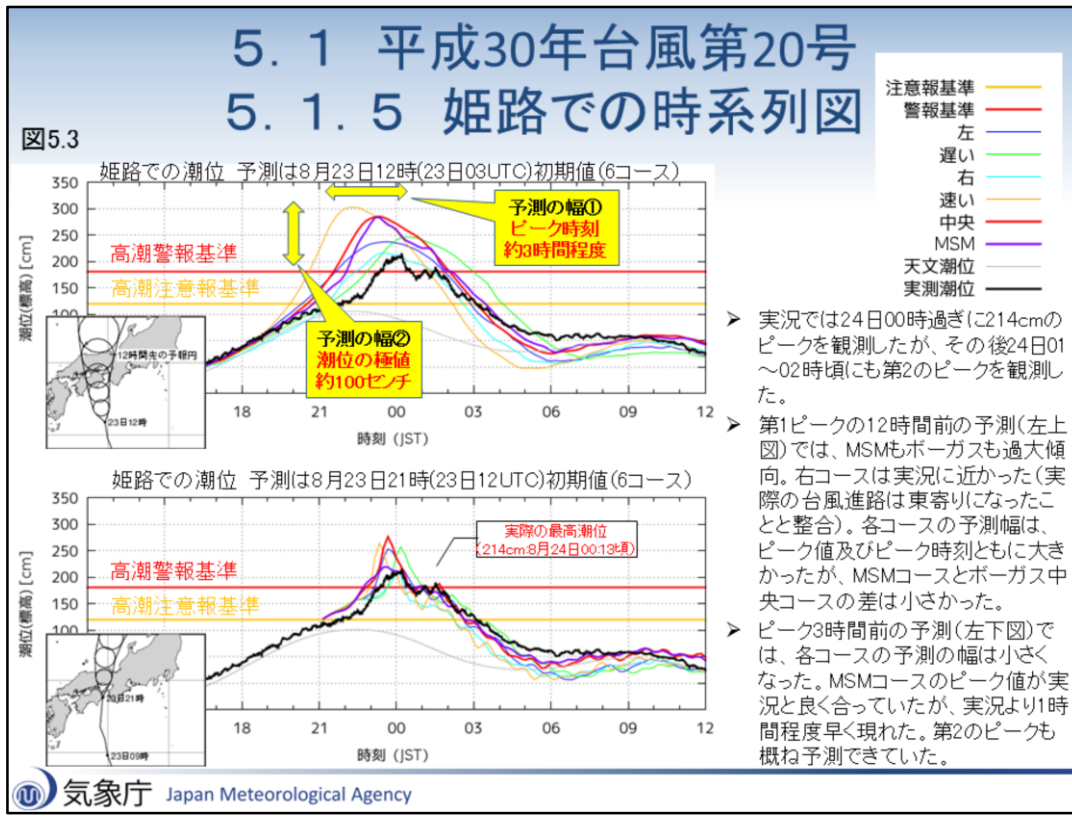
台風通過前後の期間における最高潮位と最大潮位偏差を見ると（図5.1）、姫路で最高潮位214cm、最大潮位偏差126cmを観測したほか、大阪や神戸、御坊でも1m以上の潮位偏差を観測した。



５．１　平成30年台風第20号

５．１．４　潮位偏差　実況-モデル散布図

図5.2は、近畿から東海地方周辺の潮位観測点における潮位偏差観測値と高潮モデル（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図である。上陸前後の23日3時から23日21時にかけて、6時間ごとの初期値についてプロットしている。MSMコース・ボーガス中央コースともに、同様の傾向で推移していると言える。23日3時から23日9時初期値の時点では観測値に比べ過大傾向が見られるが、これは当初の予想よりも実際の台風進路が東寄りになり、当初の予想で台風進路の東側にあたっていた姫路などで吹き寄せ効果が過大に見積もられたためと考えられる。上陸6時間前の23日15時初期値になると、やや過大ではあるがピークを良く予測できていた。

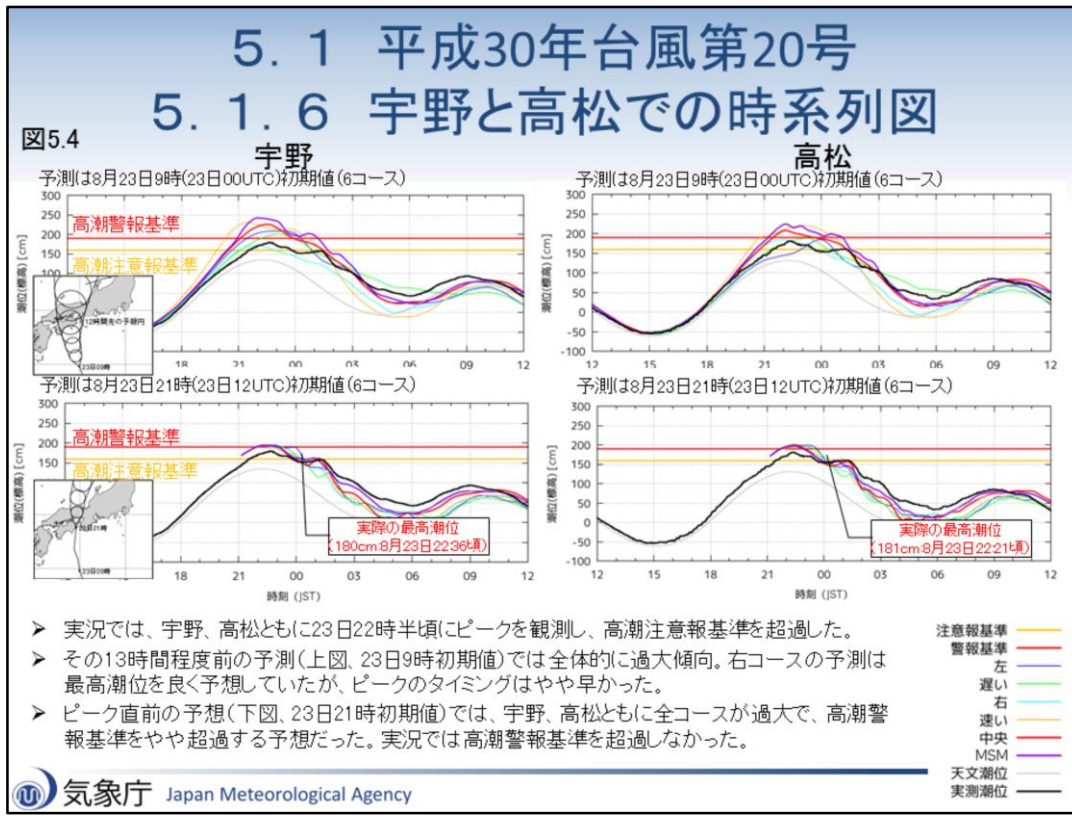


５．１　平成30年台風第20号

５．１．５　姫路での時系列図

姫路での潮位時系列を図5.3に示す。実況では24日0時過ぎに214cmのピークを観測し、その後24日1～2時頃にもピークを観測した。いずれのピークでも、姫路における高潮警報基準を超過していた。最初のピークの12時間前の予測（23日12時初期値）では、MSM・ボーガスともに過大傾向が見られたが、ボーガス右コースは実況に近かった。これは、実際の台風進路がこの時点の予測よりも東寄りであったことと整合している。姫路は上陸予想地点の東側に位置しており、吹き寄せ効果が過大に見積もられたと考えられる。また、台風の移動速度が実況よりも速く、高潮のピークが満潮に近い時刻に予測されたため、予測最高潮位が更に過大になったと考えられる。

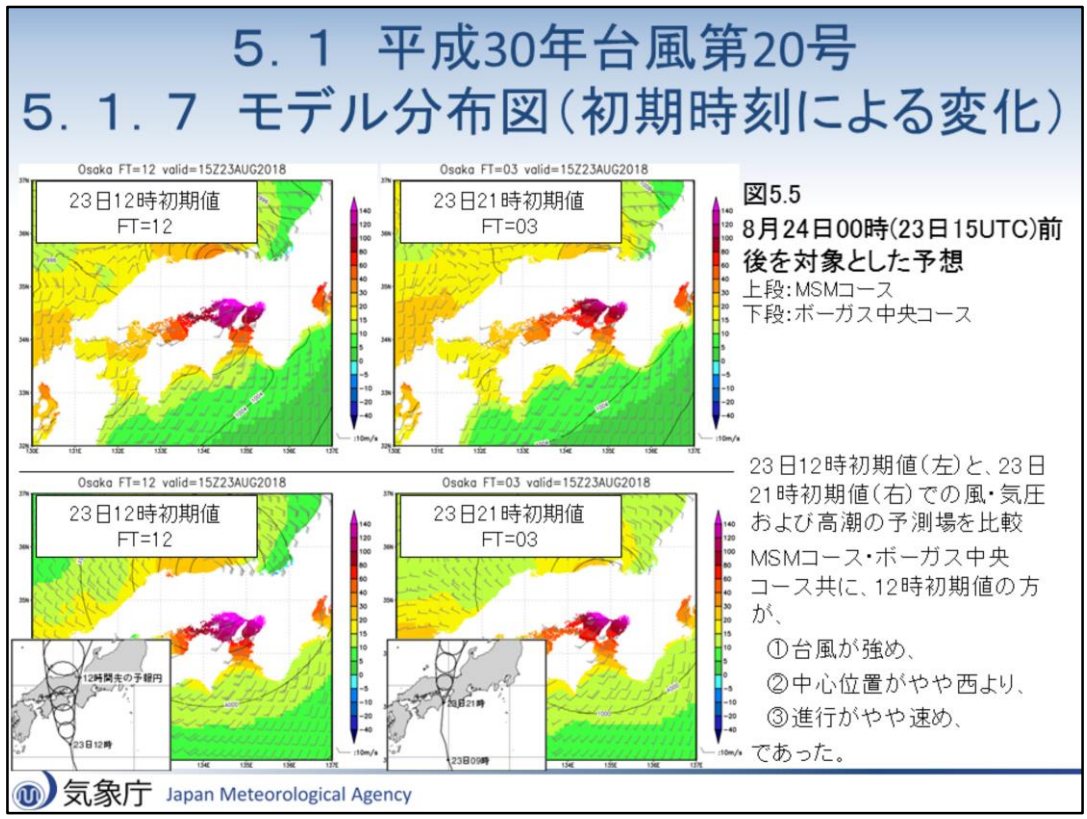
各ボーガスコースの予測幅に着目すると、ピーク値（約100cm）およびピーク時刻（約3時間）ともに大きく、この時点では不確実性は大きかったと言える。ただし、MSMコースとボーガス中央コースの差は小さかった。ピーク3時間前の予測（23日21時初期値）では、各コースの予測幅は小さくなり（ピーク値：約50cm、ピーク時刻：約1時間）、不確実性は小さくなった。MSMコースはピーク値が実況と良く合っていたものの、最初のピークは実況よりも1時間程度早く現れた。この時点のボーガスは右コースを除いて過大であった。



５．１　平成30年台風第20号

５．１．６　宇野と高松での時系列図

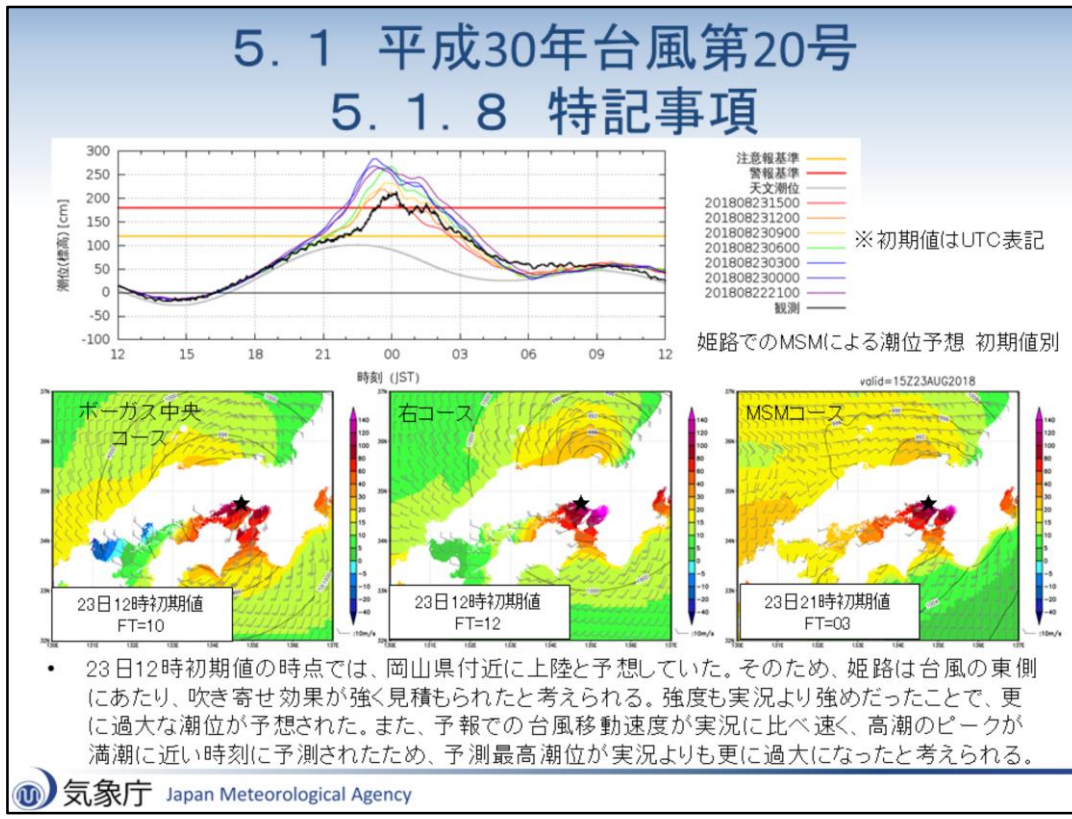
図5.4は、宇野と高松のそれぞれ23日9時および23日21時初期値における潮位時系列である。実況では宇野、高松ともに23日22時半頃に潮位のピークを観測し、高潮注意報基準を超過した。ピークの13時間程度前の予測（23日9時初期値）では全体的に過大傾向で、ボーガス右コースは最高潮位を良く予想できていたが、ややタイミングが早かった。ピーク直前の予測（23日21時初期値）では全コースが同様の傾向を示し、不確実性は非常に小さかったにも関わらず、全体的に過大傾向であった。高潮警報基準をわずかに超過する予想だったものの、実際には超過しなかった。



５．１　平成30年台風第20号

５．１．７　モデル分布図（初期時刻による変化）

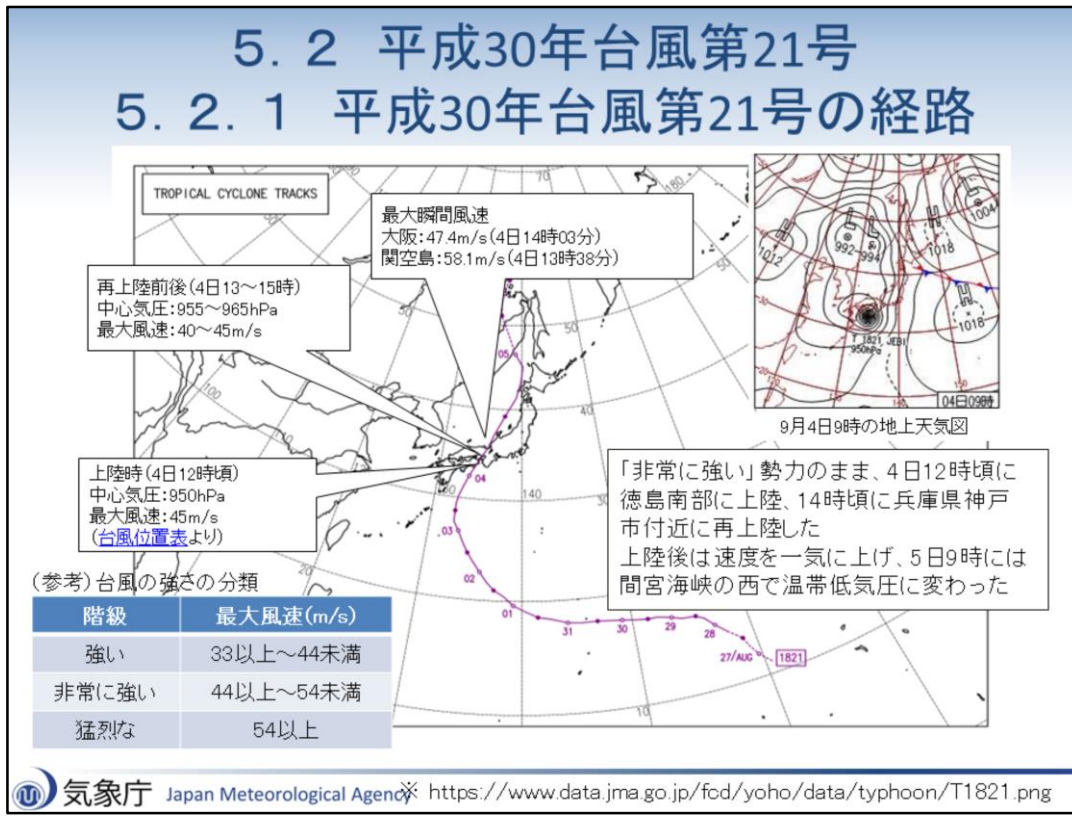
図5.5は、23日12時初期値（左）および21時初期値（右）におけるMSMコース（上段）とボーガス中央コース（下段）による高潮分布である。MSMコース・ボーガス中央コースともに、12時初期値の方が台風が強めで、中心位置がやや西寄り、進行が速めであった。これは、初期値により高潮の予報が大きく変わりうることを示している。



5．1　平成30年台風第20号

5．1．8　特記事項

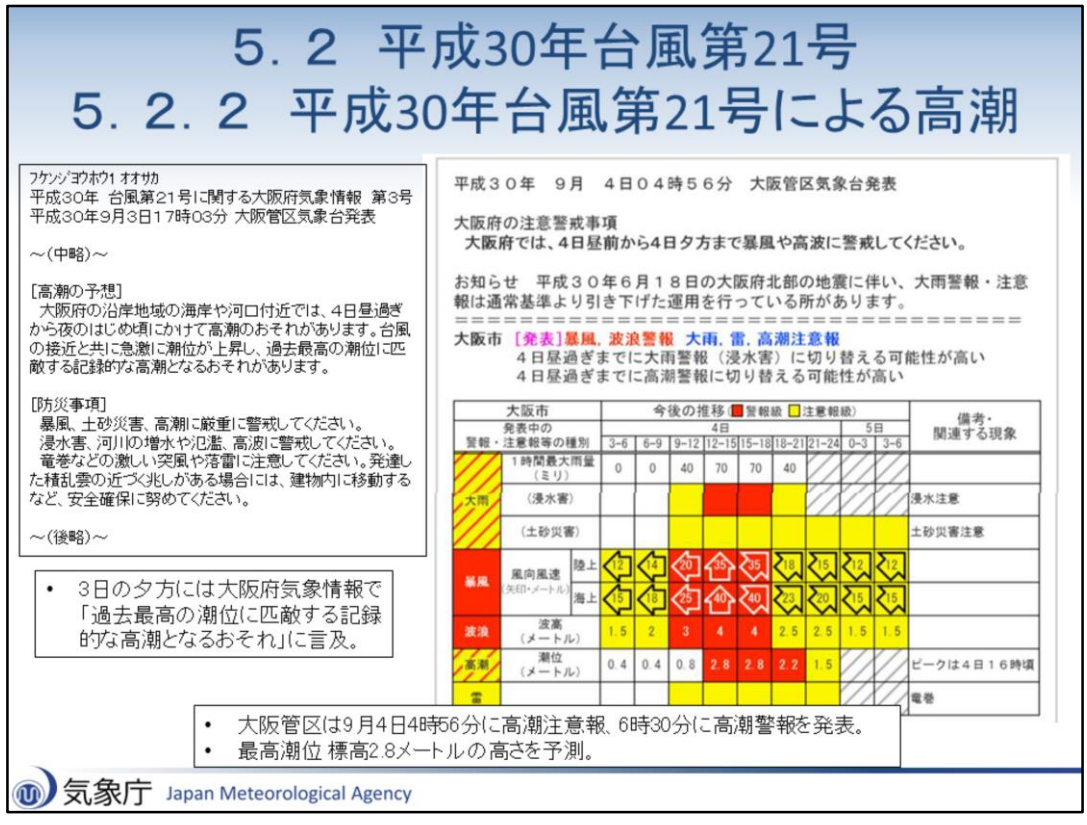
23日12時初期値の時点では、岡山県付近に上陸と予想していた。そのため、台風の東側にあたる姫路では、吹き寄せ効果が大きく見積もられたと考えられる。強度も実況より強めだったことで、更に過大な潮位が予想された。また、予報での台風移動速度が実況に比べ速く、高潮のピークが満潮に近い時刻に予測されたため、予測最高潮位が実況よりも更に過大になったと考えられる。



５．２　平成30年台風第21号

５．２．１　平成30年台風第21号の経路

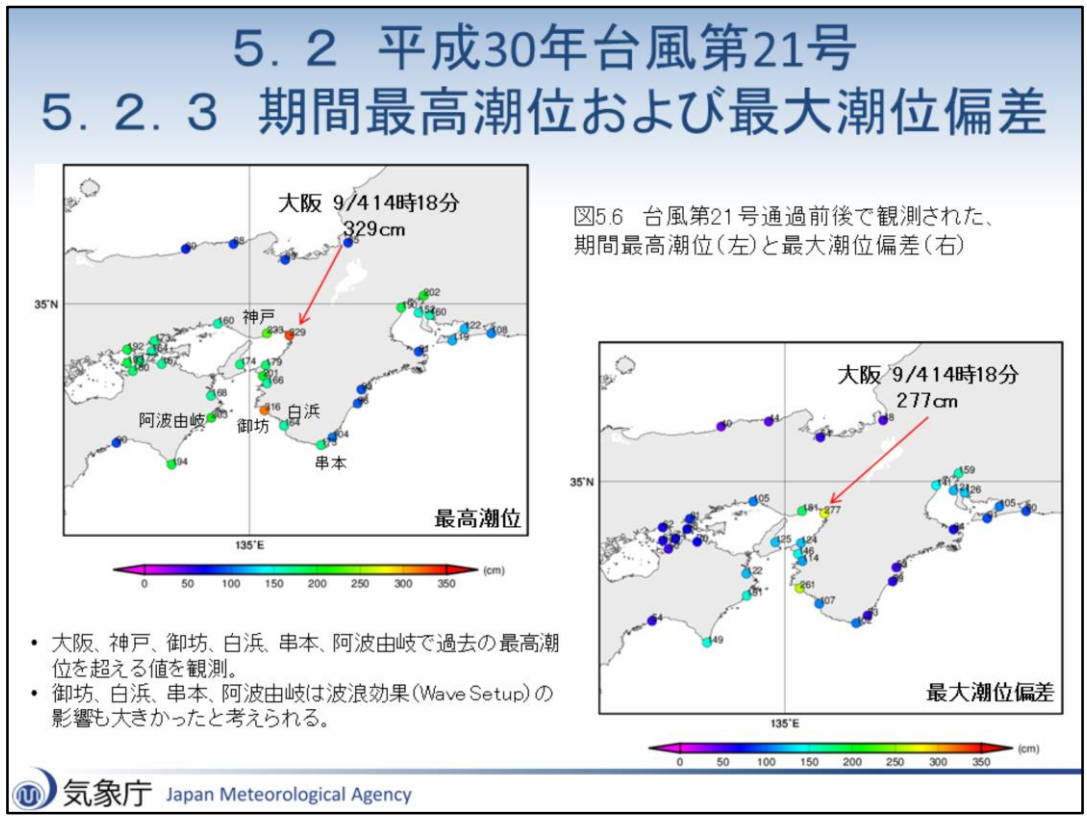
台風第21号は、非常に強い勢力のまま、9月4日12時頃に徳島県南部に上陸し、4日14時頃に兵庫県神戸市付近に再上陸した。上陸後は速度を上げ、5日9時に間宮海峡の西で温帯低気圧に変わった。最初の上陸時における中心気圧は950hPa、最大風速は45m/sで、再上陸時における中心気圧は955～965hPa、最大風速は40～45m/sであった。概ね台風第20号に似た進路を進んだが、強度は台風第21号の方が強かった。



５．２　平成30年台風第21号

５．２．２　平成30年台風第21号による高潮

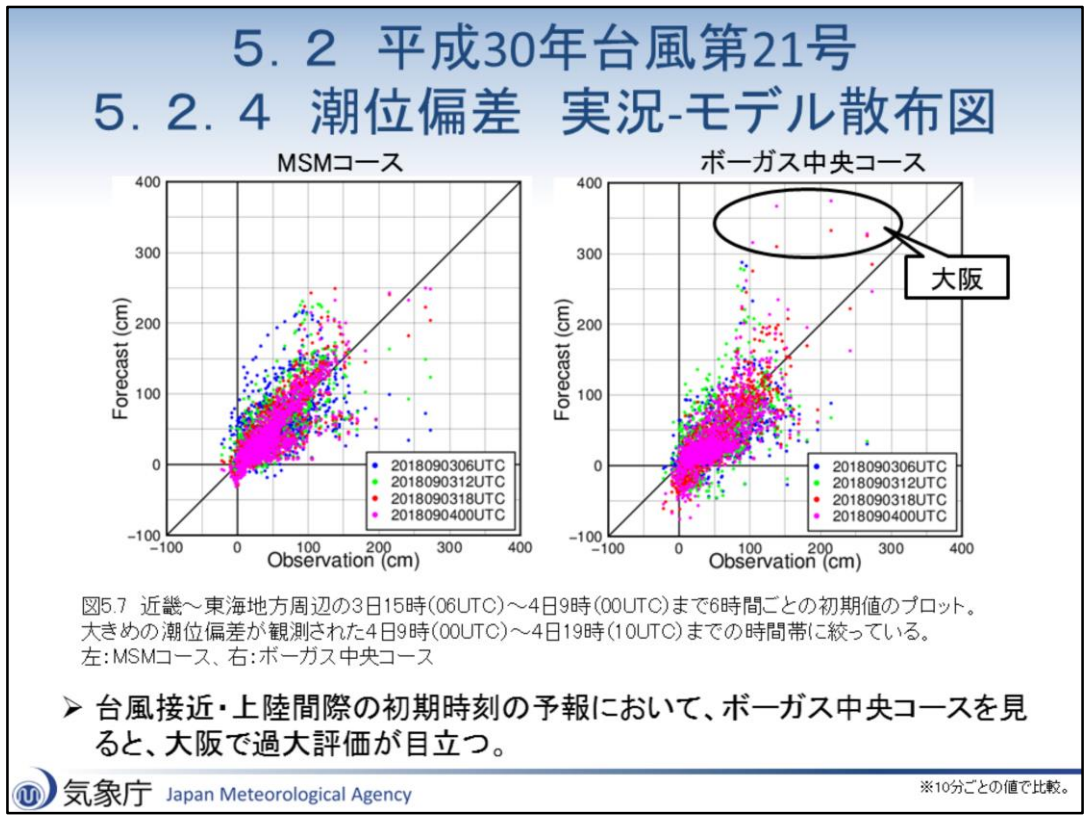
大阪管区気象台は、9月3日の夕方には、大阪府気象情報で「過去最高の潮位に匹敵する記録的な高潮となるおそれ」に言及した。4日4時56分に高潮注意報、6時30分に高潮警報を発表した。



５．２　平成30年台風第21号

５．２．３　期間最高潮位および最大潮位偏差

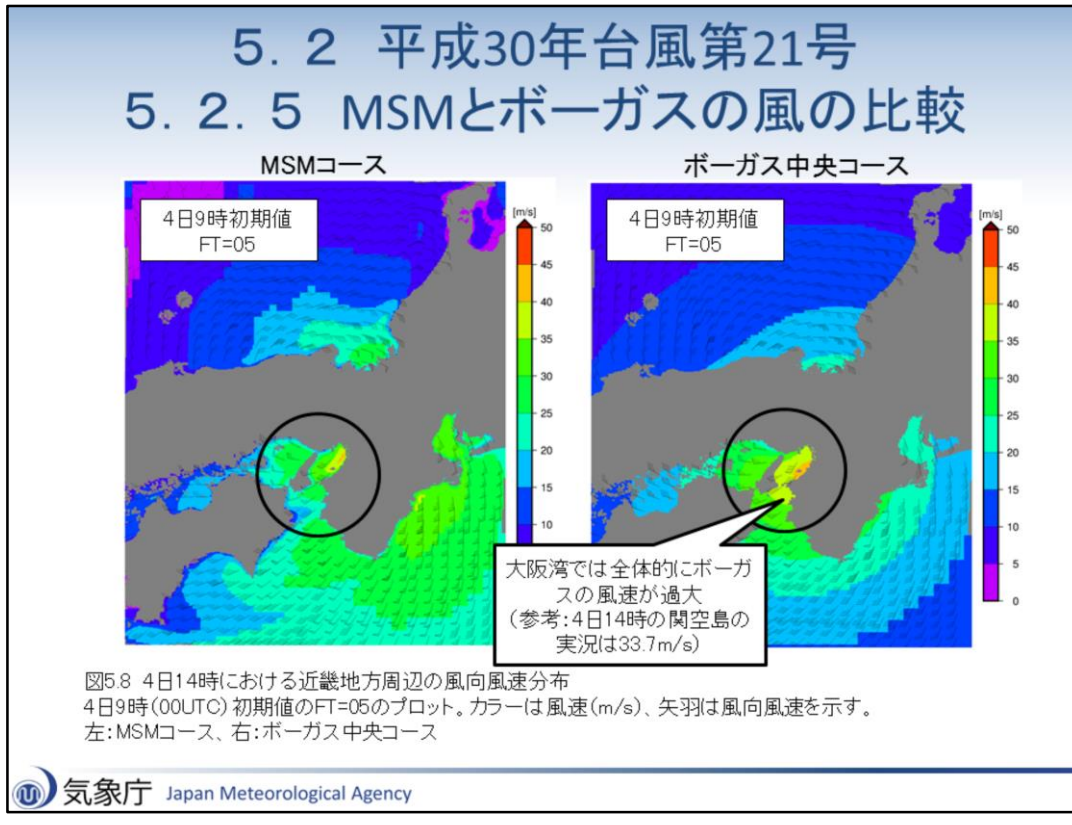
図5.6に、台風通過前後の期間における最高潮位と最大潮位偏差を示す。大阪で過去最高潮位329cmを記録したほか、神戸と御坊、白浜、串本、阿波由岐でも過去最高潮位を記録した。御坊、白浜、串本、阿波由岐は外洋に面しており、波浪効果（Wave Setup）の影響も大きかったと考えられる。



５．２　平成30年台風第21号

５．２．４　潮位偏差　実況-モデル散布図

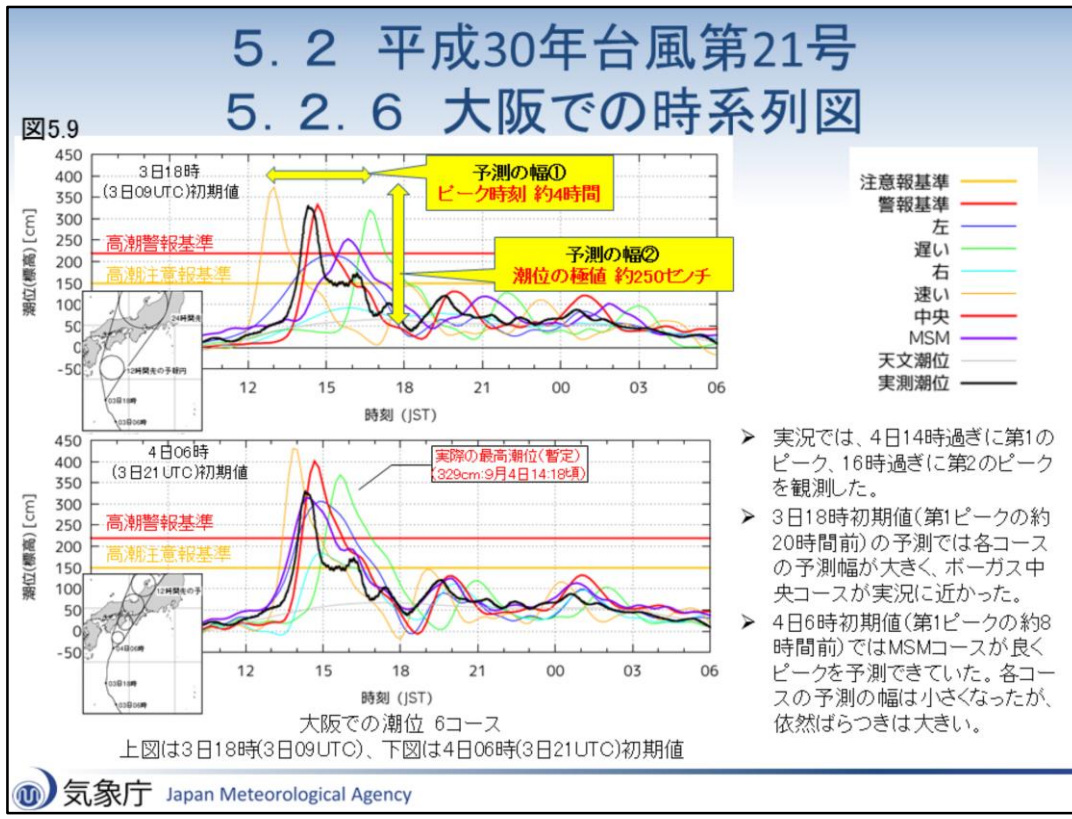
図5.7は、近畿地方から東海地方周辺の潮位観測点における潮位偏差観測値と、高潮モデル（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図である。上陸前後の3日15時から4日9時にかけて、6時間ごとの初期値についてプロットしている。ボーガス中央コースでは、初期値ごとの変化があまり大きくないが、台風接近・上陸間際の初期値では一部の地点（大阪が該当する）で過大評価が目立つ。



５．２　平成30年台風第21号

５．２．５　MSMとボーガスの風の比較

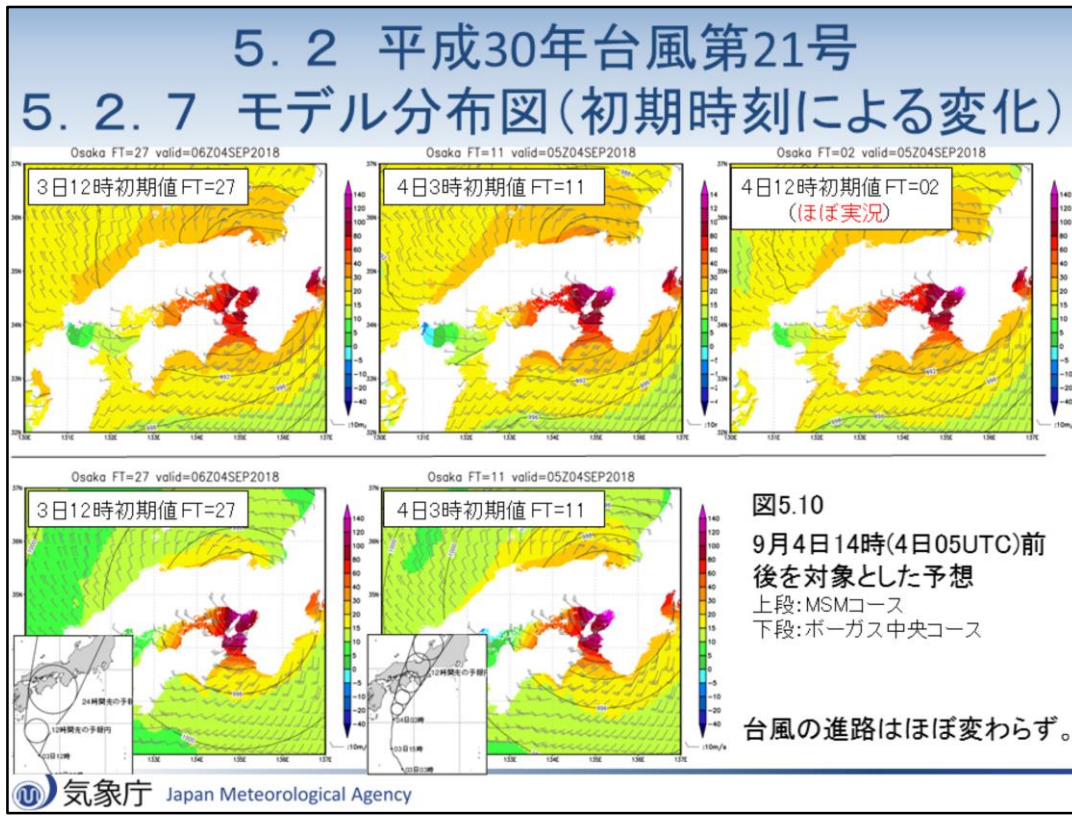
図5.8は、4日9時（00UTC）初期値のMSMとボーガス中央コースの、4日14時における近畿地方周辺の風向風速分布である。MSMコースでは、ボーガス中央コースに比べて、台風中心から離れたところで風速が大きい傾向にある。逆にボーガス中央コースは、MSMコースに比べて台風中心付近（図5.8の時間帯では大阪湾あたり）で風速が大きい。4日14時に関空島で観測された風向風速は南南西の風33.7m/sであり、図5.8から、台風中心付近ではMSMによる風がより実況に近かったと考えられる。5.2.4において、ボーガス中央コースによる大阪の潮位偏差が過大評価であったのは、これが原因と考えられる。



５．２　平成30年台風第21号

５．２．６　大阪での時系列図

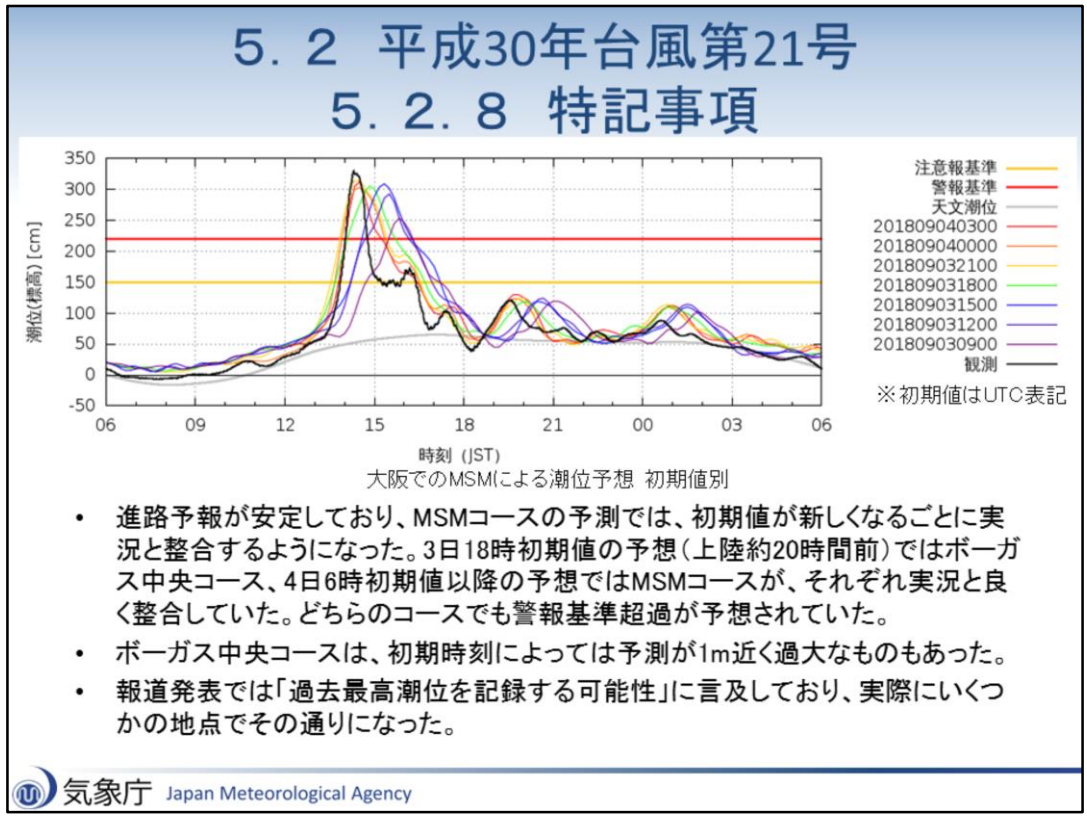
大阪での潮位時系列を図5.9に示す。実況では4日14時過ぎに第1のピークを観測し、高潮警報基準を超過した。4日16時過ぎには第2のピークを観測し、高潮注意報基準を超過した。3日18時初期値（第1ピークの約20時間前）の予測では、各コースの予測幅が大きく（ピーク値：約250cm、ピーク幅：約4時間）、不確実性は非常に大きかったと言える。この時点では、ボーガス中央コースの予測が実況に近かった。4日6時初期値（第1ピークの8時間前）の予測では、MSMコースがピークを良く予測できていた。不確実性は、3日18時初期値と比較すると小さくなったが、依然として大きかった。



５．２　平成30年台風第21号

５．２．７　モデル分布図（初期時刻による変化）

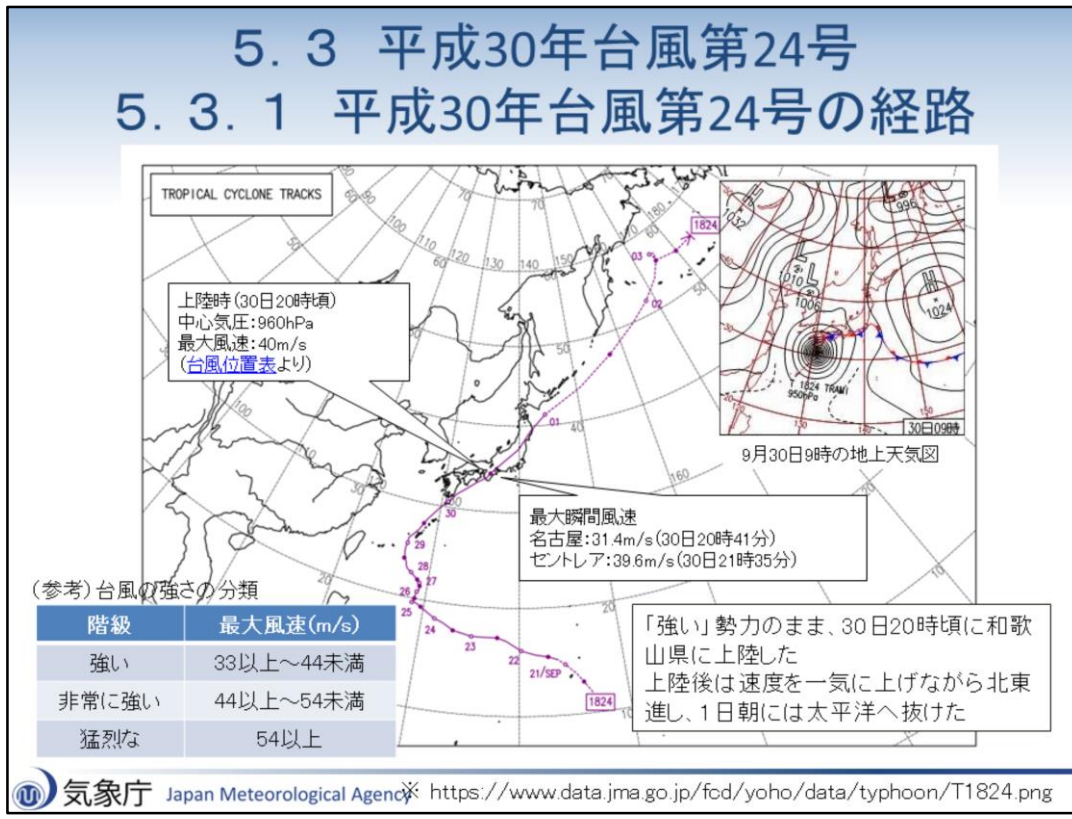
近畿地方で顕著な高潮が観測された4日14時頃の風や気圧、高潮の予測場を図5.10に示す。台風第21号は進路予報が安定しており、風・気圧の場を見ると、初期値による大きな違いは見られない。一方、高潮の予測に注目すると、ボーガス中央コースは初期値によって予測が1m程度過大なものもあった。MSMコースでは、初期値が新しくなるごとに実況と整合するようになった。



５．２　平成30年台風第21号

５．２．８　特記事項

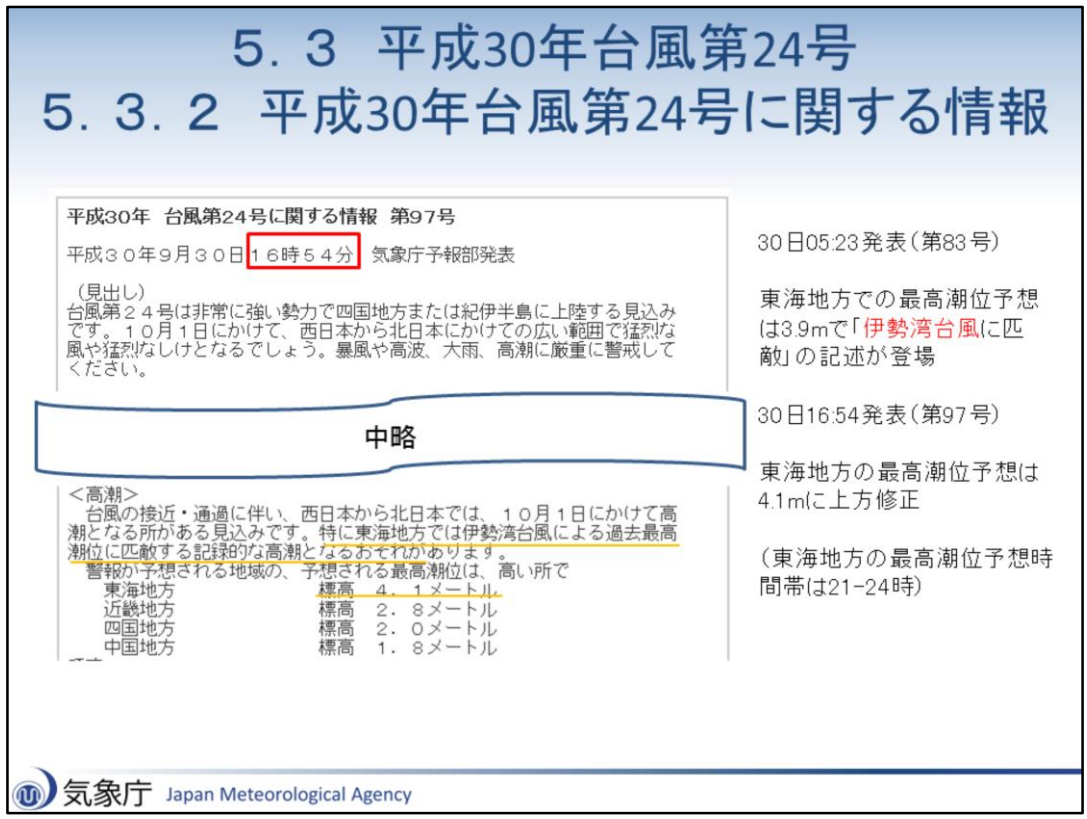
進路予報が安定しており、MSMコースの予測では、初期値が新しくなるごとに実況と整合するようになった。3日18時初期値の予想（上陸約20時間前）ではボーガス中央コース、4日6時初期値以降の予想ではMSMコースが、それぞれ実況と良く整合していた。どちらのコースでも警報基準超過が予想されていた。ボーガス中央コースは、初期時刻によっては予測が1m近く過大なものもあった。報道発表では「過去最高潮位を記録する可能性」に言及しており、実際にいくつかの地点でその通りになった。



５．３　平成30年台風第24号

５．３．１　平成30年台風第24号の経路

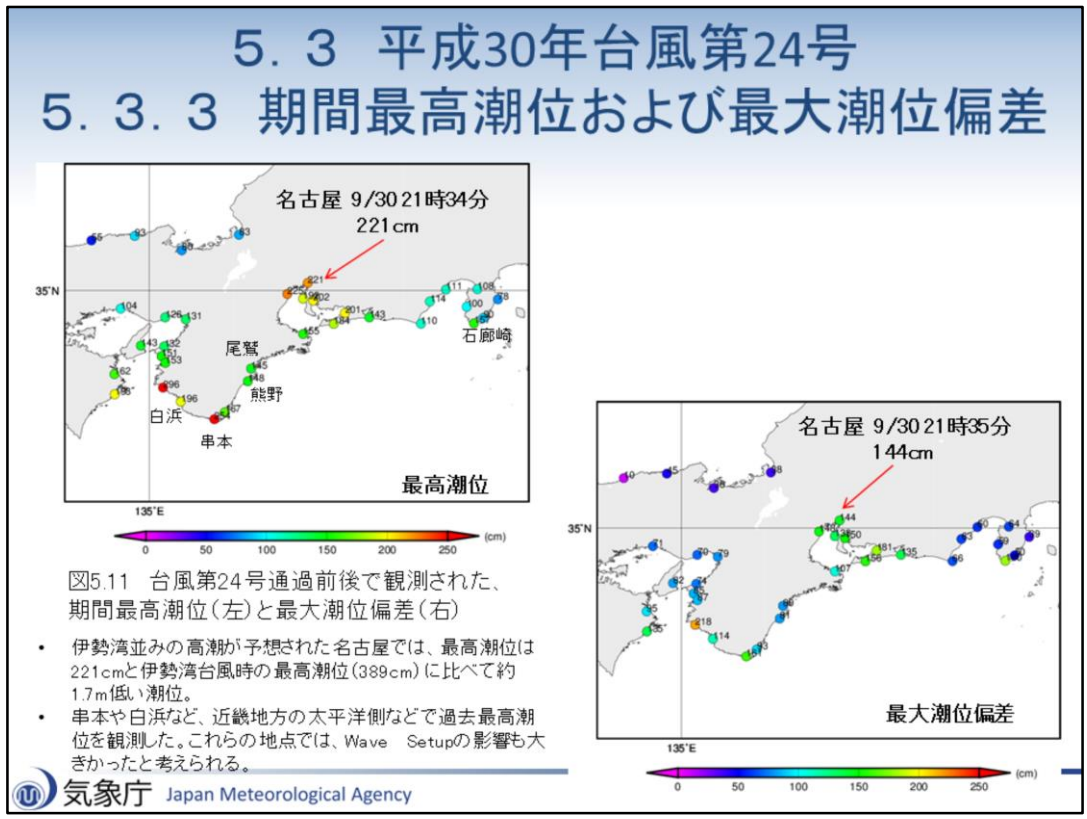
台風第24号は、強い勢力で9月30日20時頃に和歌山県に上陸し、その後速度を上げて北東進し、10月1日朝には太平洋へ抜けた。上陸時における中心気圧は960hPa、最大風速は40m/sであった。



５．３　平成30年台風第24号

５．３．２　平成30年台風第24号に関する情報

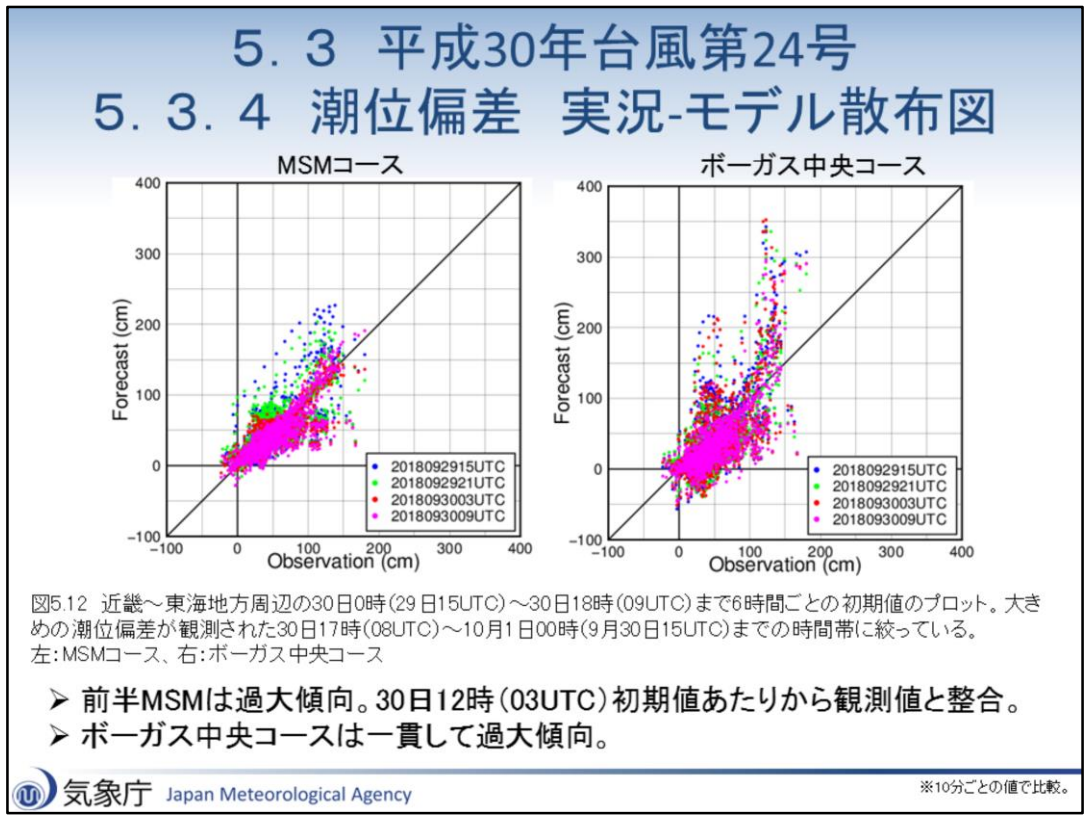
30日05:23に気象庁が発表した情報では、東海地方の予想最高潮位は3.9mで「伊勢湾台風に匹敵」する、との記述がされた。その後30日16:54発表の情報では、東海地方の予想最高潮位は4.1mに上方修正された。



５．３　平成30年台風第24号

５．３．３　期間最高潮位および最大潮位偏差

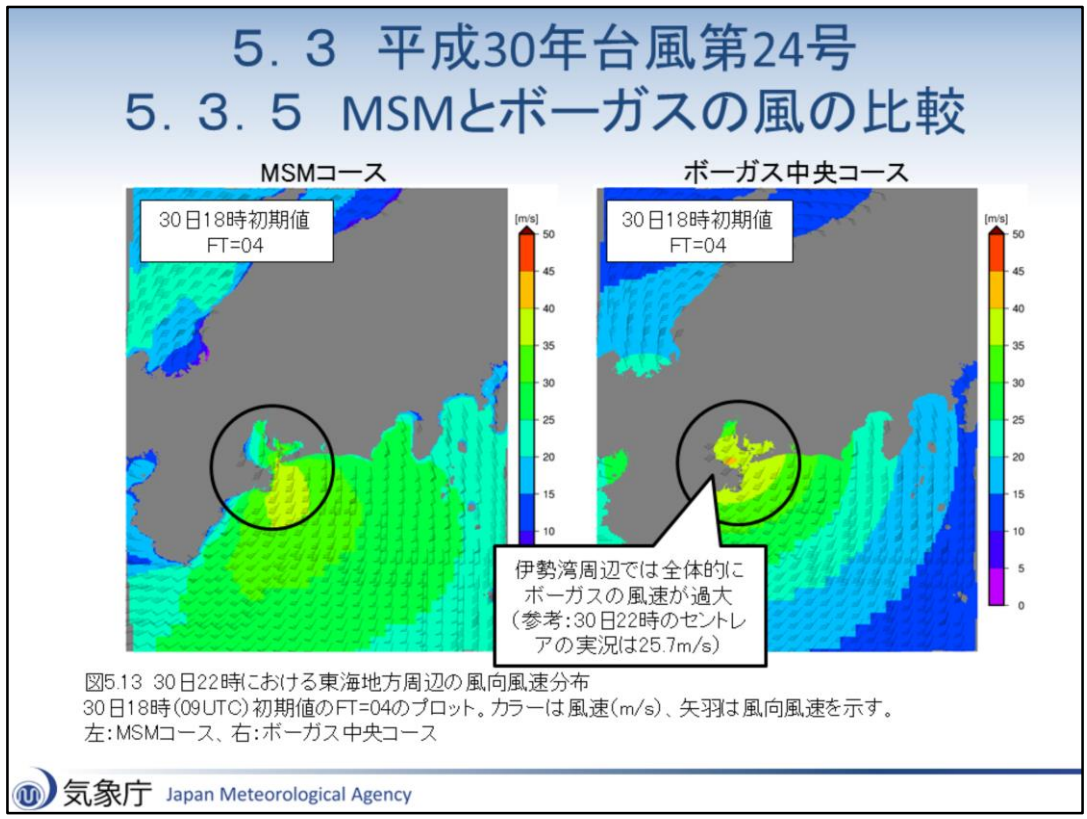
実際に観測された最高潮位は、名古屋で221cmと、伊勢湾台風時の389cmよりもかなり低かった。一方、串本や白浜など、近畿地方の太平洋側などでは過去最高潮位を観測した（図5.11）。上陸直前の9月30日18時初期値のMSMコースにおける、これらの地点の予想最高潮位は、串本で146.6cm、白浜で151.1cmと、50～100cm程度過小であった。これらの地点が太平洋に面していることや、ほぼ実況とみなせる直前の予想でも大きな過小評価となったことから、高潮モデルでは考慮されていないWave Setupの影響が大きかったと考えられる。



５．３　平成30年台風24号

５．３．４　潮位偏差　実況-モデル散布図

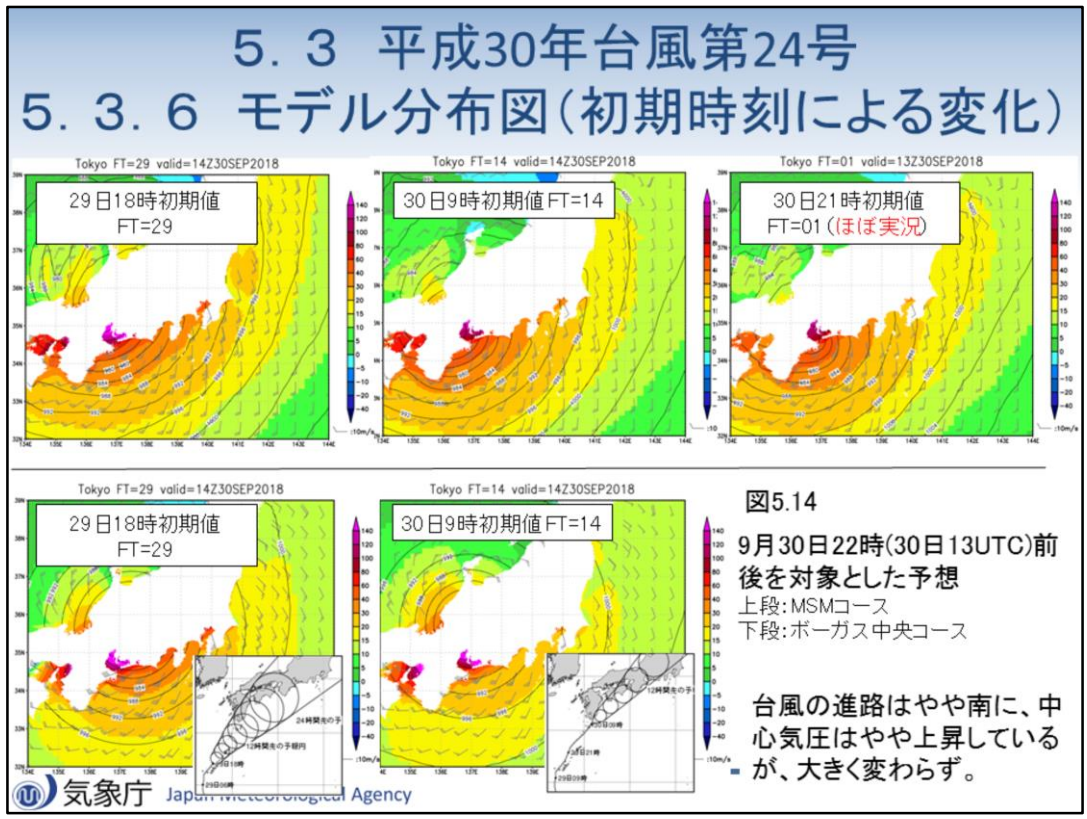
図5.12は、近畿地方から東海地方周辺の潮位観測点における潮位偏差観測値と、高潮モデル（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図である。上陸前後の30日0時から30日18時にかけて、6時間ごとの初期値についてプロットしている。MSMコースでは、前半に過大傾向が見られるが、30日9時初期値あたりから観測値と整合する予想だった。一方、ボーガス中央コースは一貫して過大傾向を示しており、上陸直前の初期値でもその傾向は変わらなかった。



５．３　平成30年台風第24号

５．３．５　MSMとボーガスの風の比較

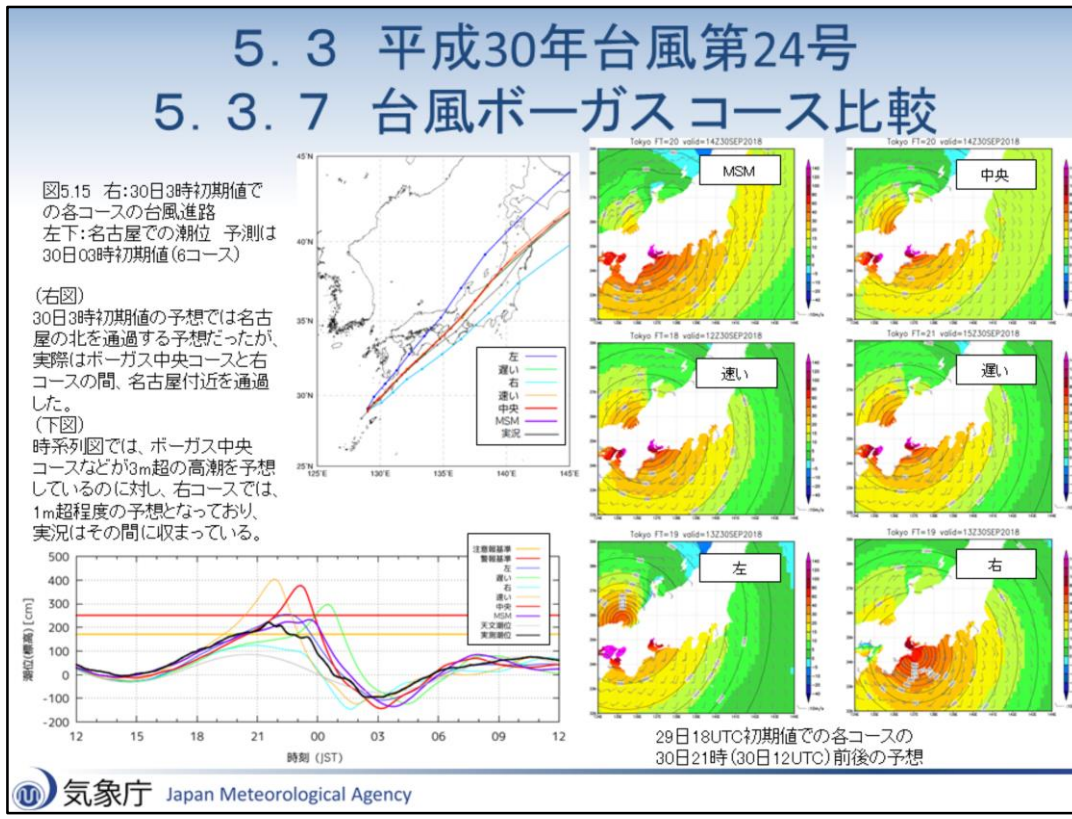
図5.13は、30日18時（09UTC）初期値のMSMとボーガス中央コースの、30日22時における近畿地方周辺の風向風速分布である。5.2.5と同様に、台風中心付近では、ボーガス中央コースの方がMSMコースに比べ風速が大きく、台風中心から離れたところでは、MSMコースの方がボーガス中央コースに比べ風速が大きい傾向にある。30日22時にセントレアで観測された風向風速は南東の風25.7m/sであり、図5.13を見るとボーガス中央コースの風速がかなり過大だったことが分かる。



５．３　平成30年台風第24号

５．３．６　モデル分布図（初期時刻による変化）

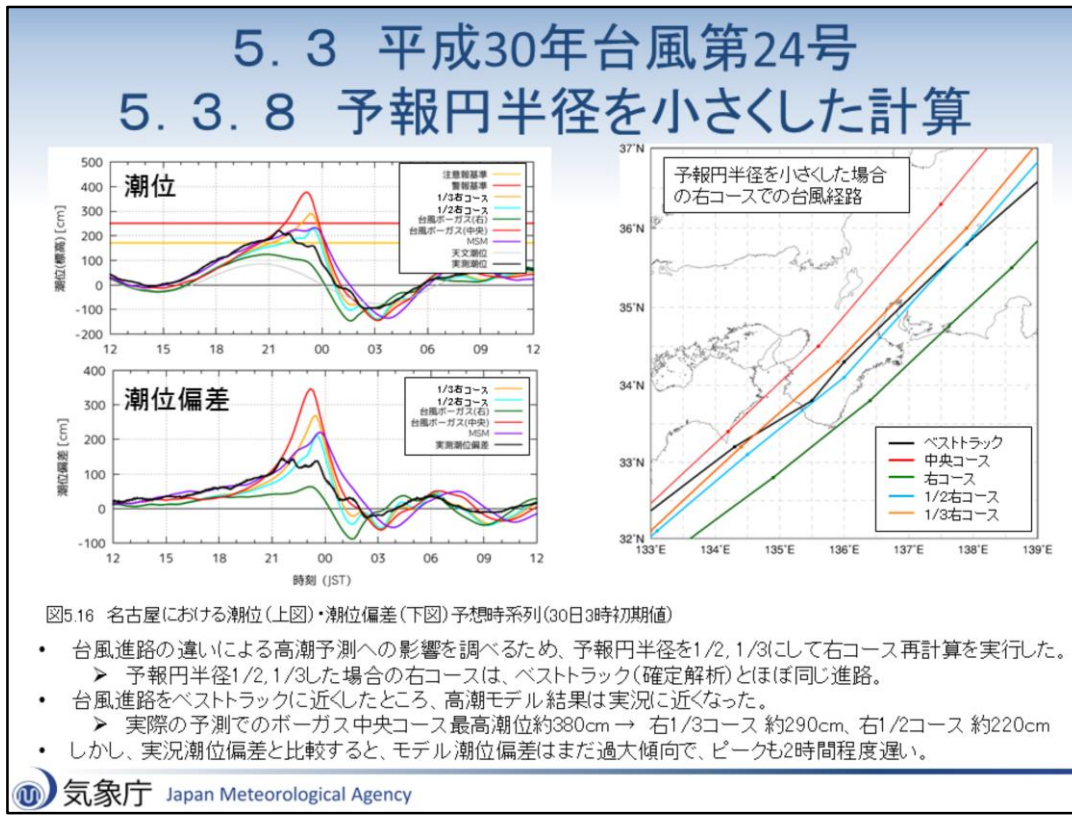
東海地方で顕著な高潮が観測された30日22時頃の風や気圧、高潮の予測場を図5.14に示す。MSMコースを見ると、30日9時初期値で台風進路はやや南にシフトし、中心気圧はやや上昇している。大きな違いではないが、これにより予想潮位が大きく変わったと考えられる。



５．３　平成30年台風第24号

５．３．７　台風ボーガス　コース比較

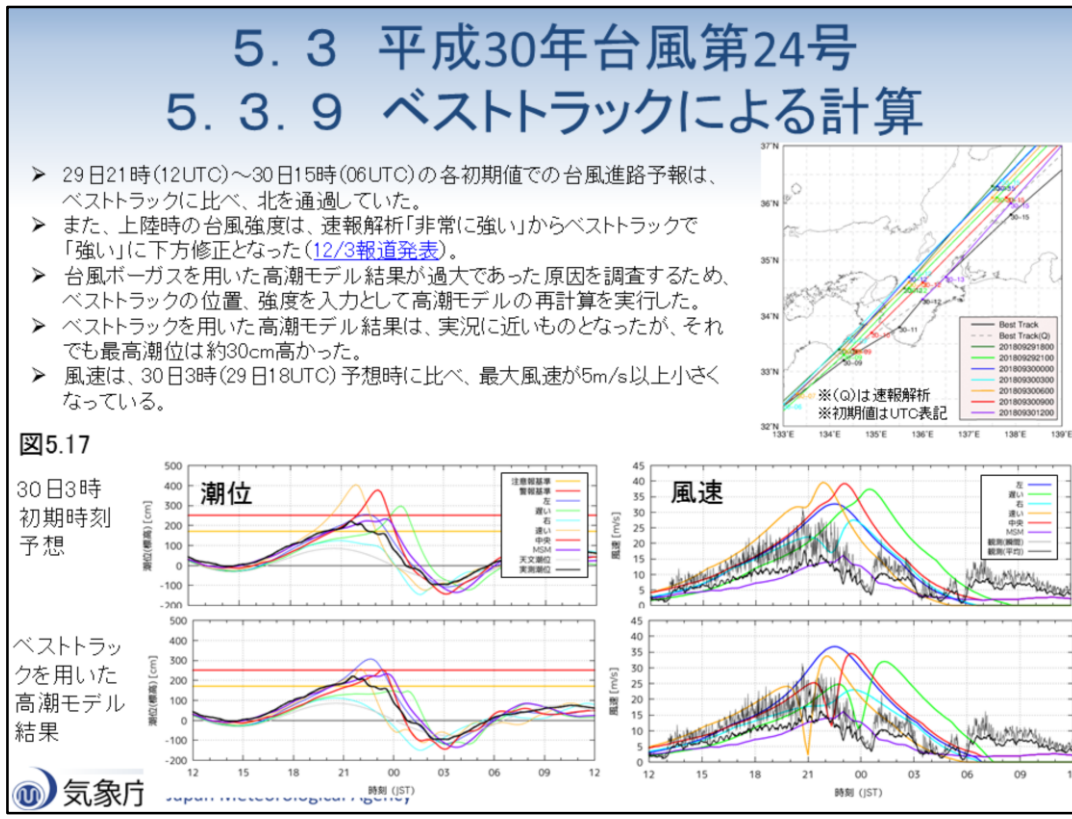
図5.15に、30日3時初期値における台風進路予想と名古屋のコース別潮位時系列を示す。この時、台風は名古屋の北を通過する予想だったが、実際はボーガス中央コースと右コースの間、名古屋付近を通過した。名古屋の時系列を見ると、ボーガス中央コースなどは3m超の潮位偏差を予想しているのに対し、右コースでは1m超程度の予想となっており、実況はその間に収まっている。



５．３　平成30年台風第24号

５．３．８　予報円半径を小さくした計算

台風進路の誤差が高潮予測に与えた影響を調べるため、予報円半径を1/2、1/3にして右コースの再計算を実行した（図5.16）。対象初期値は30日3時である。この場合の右コースはベストトラックとほぼ同じ進路となり、最高潮位の計算結果は実況に近くなった（右1/2：約220cm、右1/3：約290cm）。しかし、潮位偏差について見るとまだ過大傾向で、ピークも2時間程度遅く出現していた。

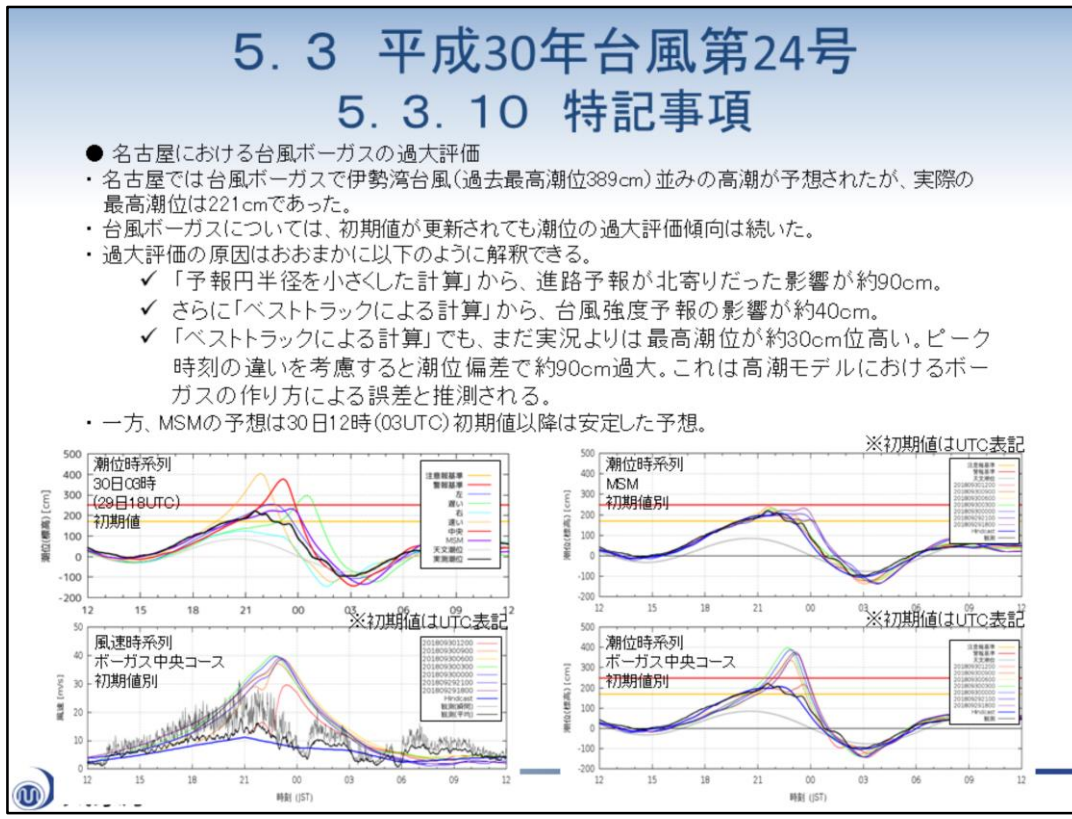


5．3　平成30年台風第24号

5．3．9　ベストトラックによる計算

さらに、台風強度の誤差が高潮予測に与えた影響を調べるため、ベストトラックを入力として高潮モデルの再計算を実行した（図5.17）。対象初期値は30日3時である。上陸時の台風強度は、速報解析の「非常に強い」からベストトラックで「強い」に下方修正となった（2018年12月3日報道発表）。ベストトラックを用いた計算結果は実況に近いものとなったが、それでも最高潮位は約30cm※高かった。なお、ベストトラックによる最大風速は、当初よりも5m/s以上小さくなった。

※　図 5.17の左下図（ベストトラックを用いた高潮モデル結果）で、中央コースと実測のピーク潮位の差（約250cm－約220cm＝約30cm）。



5．3　平成30年台風第24号

5．3．10　特記事項

以上から、名古屋における台風ボーガス計算の過大評価の原因について、次のようにまとめることができる。

「予報円半径を小さくした計算（1/3右コース）」から、進路予報が北寄りだった影響が約90cm※1。

さらに「ベストトラックによる計算」から、台風強度予報の影響が約40cm※2。

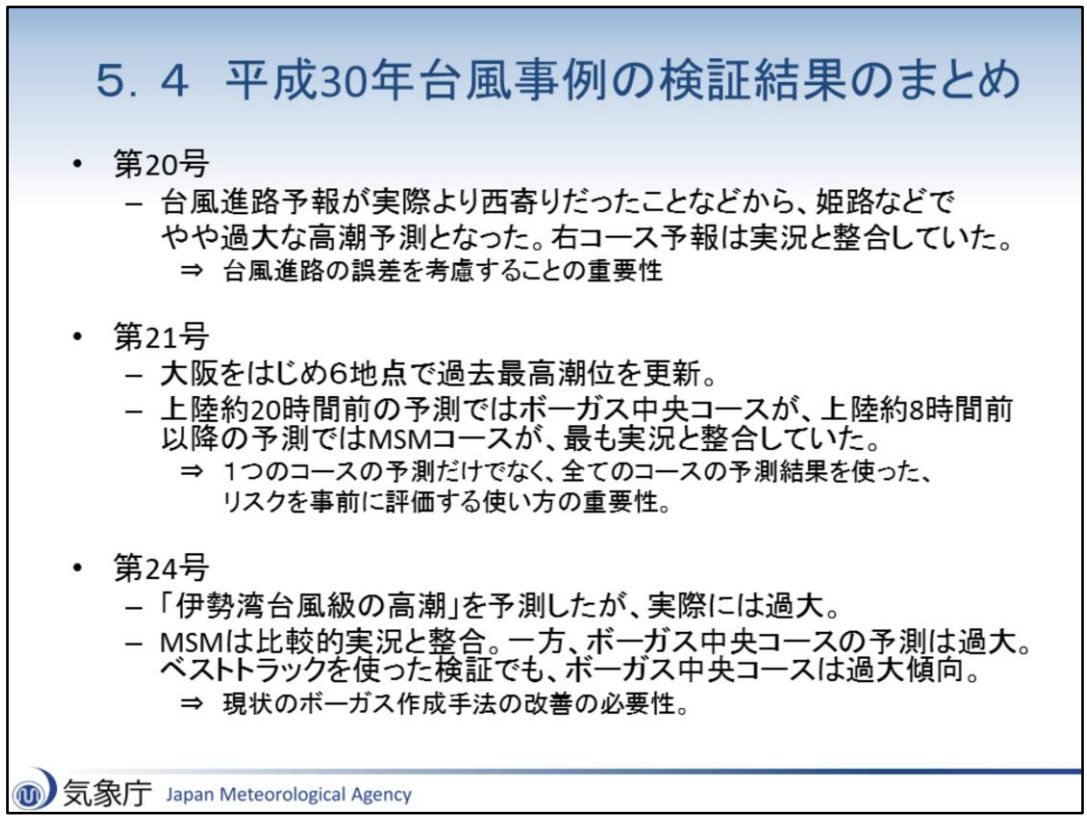
「ベストトラックによる計算」でも、最高潮位がまだ実況より約30cm※3高く、潮位偏差では約90cm※4過大となった。これは高潮モデルのボーガス作成手法による誤差と考えられる。

※1　図5.16の上図（潮位）で、台風ボーガス（中央）と1/3 右コースのピーク潮位の差（約380cm－約290cm＝約90cm）。

※2　図5.16の上図（潮位）の1/3右コースのピーク潮位と、図5.16の左下図（ベストトラックを用いた高潮モデル結果）の中央コースのピーク潮位の差（約 290cm－約250cm＝約40cm）。

※3　図 5.17の左下図（ベストトラックを用いた高潮モデル結果）で、中央コースと実測のピーク潮位の差（約250cm－約220cm＝約30cm）。

※4　図 5.17の左下図（ベストトラックを用いた高潮モデル結果）で、中央コースのピーク潮位偏差（=約230cm=ピーク潮位250cm－その時の天文潮位約20cm)と、図5.11の実測の最大潮位偏差（約140cm）の差（約230cm－約140cm＝約90cm）。



５．４　平成30年台風事例の検証結果のまとめ

本節で説明した3つの事例検証の結果についてまとめる。

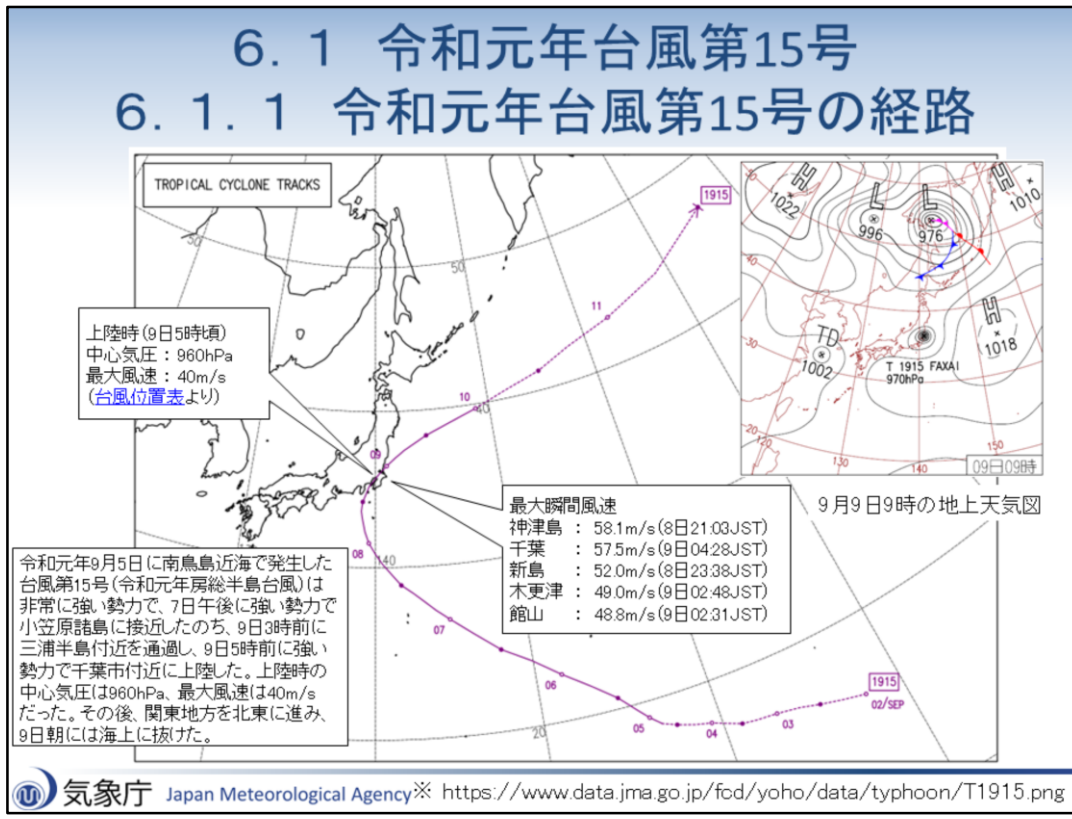
まず、台風第20号では、台風進路予報が実際より西寄りだったことなどから、姫路などでやや過大な高潮予測となった。一方、右コースの予測は実況と近く、実際の台風進路が予想より東寄りになったことと整合していた。この事例からは、高潮モデル及び高潮ガイダンスの利用にあたって、台風進路の誤差も考慮することが重要であることが分かる。

次に、台風第21号では、大阪をはじめ６地点で過去最高潮位を更新する顕著な高潮が発生した。この事例では、上陸の約20時間前の予測ではボーガス中央コースが、上陸の約8時間前以降の予測ではMSMが、最も実況と整合していた。この事例からは、１つのコースの予測だけを決定論的に利用するのではなく、全てのコースの予測結果を見て、最も高い潮位を予測しているシナリオをサブシナリオとして持つなど、リスクを事前に評価する使い方が防災上の観点から重要であることが分かる。

最後に、台風第24号では、「伊勢湾台風級の高潮」を予測したが、実際には予測が過大であった。MSMは比較的実況と整合していたが、ボーガス中央コースの予測は過大であった。ベストトラックを使った検証でも、ボーガス中央コースの予測の過大傾向は続いていた。この事例からは、現状のボーガス作成手法の改善の必要性が分かる。

本節及び次節での個別事例の検証の結果と、第3節と4節で説明した長期間の統計検証の結果を踏まえ、第7節にて、高潮モデル・ガイダンスの解釈のポイントを解説する。

6. 令和元年台風シーズンの事例検証

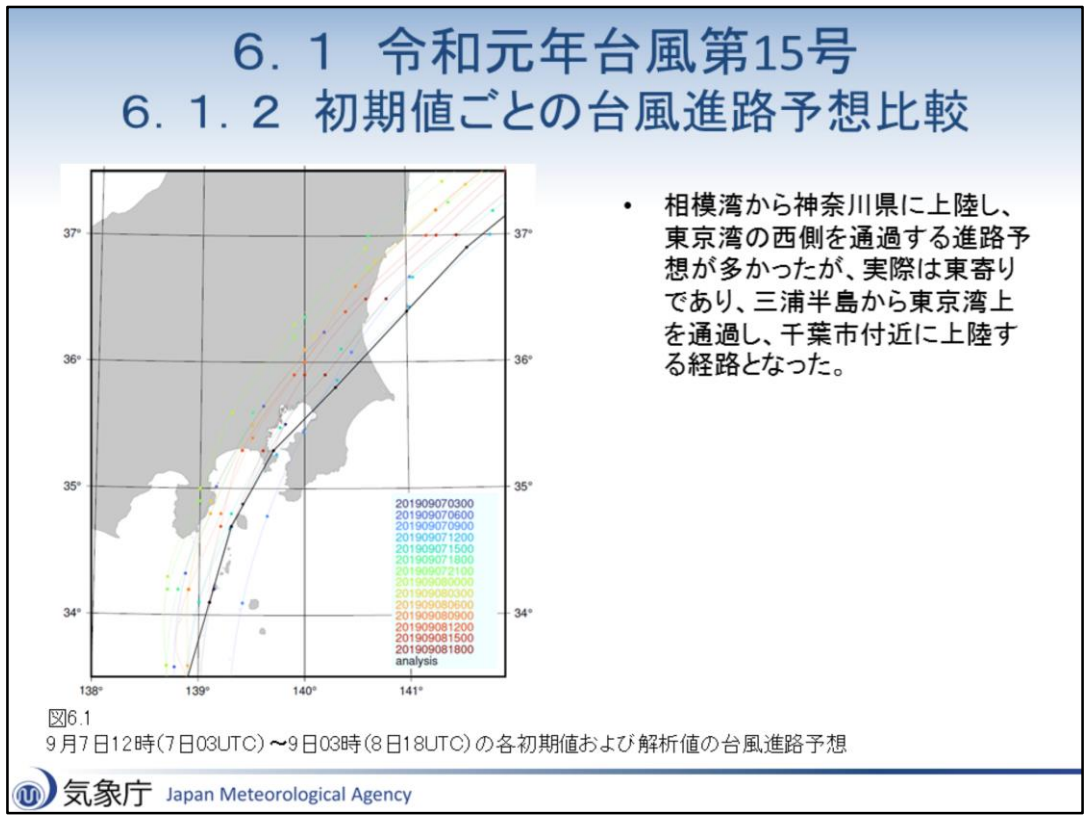


6．1　令和元年台風第15号

6．1．1　令和元年台風第15号の経路

令和元年9月5日に南鳥島近海で発生した台風第15号（令和元年房総半島台風）は、7日午後には強い勢力で小笠原諸島に接近した後、8日午後には途中非常に強い勢力となって伊豆諸島に接近、9日3時前には三浦半島付近を通過し、その後強い勢力で9日5時前に千葉市付近に上陸した。上陸時の中心気圧は960hPa、最大風速は40m/sであった。その後、関東地方を北東に進み、9日朝には海上に抜けた。

この台風の接近・通過に伴い、関東地方南部や伊豆諸島を中心に暴風、大雨となった。



6．1　令和元年台風第15号

6．1．2　初期値ごとの台風進路予想比較

図6.1は、9月7日12時（7日03UTC）～9日03時（8日18UTC）の各初期値および解析値について台風進路予想を比較したものである。全体を通して、相模湾から神奈川県に上陸し、東京湾の西側を通過する台風進路予想が多く、各初期値の台風進路をみると、初期値が新しくなるごとに、台風進路は東寄りになっていった。実況解析では、これらの予想よりも東寄りを進み、三浦半島から東京湾上を通過し、千葉市付近に上陸する経路だった。

６．１　令和元年台風第15号
６．１．３　全般情報で高潮について言及

令和元年　台風第１５号に関する情報 第４８号
令和元年９月８日１１時２２分 気象庁予報部発表

強い台風第１５号は、強い勢力を維持し暴風域を伴って伊豆諸島近海を北上し、８日夜から９日にかけて関東甲信地方または静岡県に上陸して、通過するおそれがあり、首都圏を含め、記録的な暴風となるおそれがあります。暴風やうねりを伴った高波に厳重に警戒し、土砂災害、低い土地の浸水、河川の増水や氾濫に警戒してください。

9月8日11時現在の見通し

		8日				9日							
		12-15時	15-18時	18-21時	21-24時	0-3時	3-6時	6-9時	9-12時	12-15時	15-18時	18-21時	21-24時
		昼過ぎ	夕方	夜のはじめ頃	夜遅く	未明	明け方	朝	昼前	昼過ぎ	夕方	夜のはじめ頃	夜遅く
大雨・洪水 最大１時間雨量（ミリ）	東北地方						50	50	50	30			
	関東甲信地方（伊豆諸島を除く）			40	80	80	80	50	15				
	伊豆諸島	60	80	80	80	50	20						
	東海地方		50	70	80	80	50	15	1				
暴風（メートル）	東北地方				13	15	20	30	30	20	18	13	
	関東地方（伊豆諸島を除く）	15	15	25	40	40	35	35	23	15	12		
	伊豆諸島	40	40	40	40	30	20	15	15	15			
	東海地方	20	30	40	40	35	30	20	15				
波浪（メートル）	東北地方		3	4	5	5	6	7	7	6	6	4	3
	関東地方（伊豆諸島を除く）	5	6	7	9	9	8	8	6	5	4	3	3
	伊豆諸島	10	10	10	10	8	7	5	4	3	3	2.5	
	東海地方	5	7	9	9	8	6	4	3	3	3		
高潮	伊豆諸島												
	東海地方												

警報級　注意報級

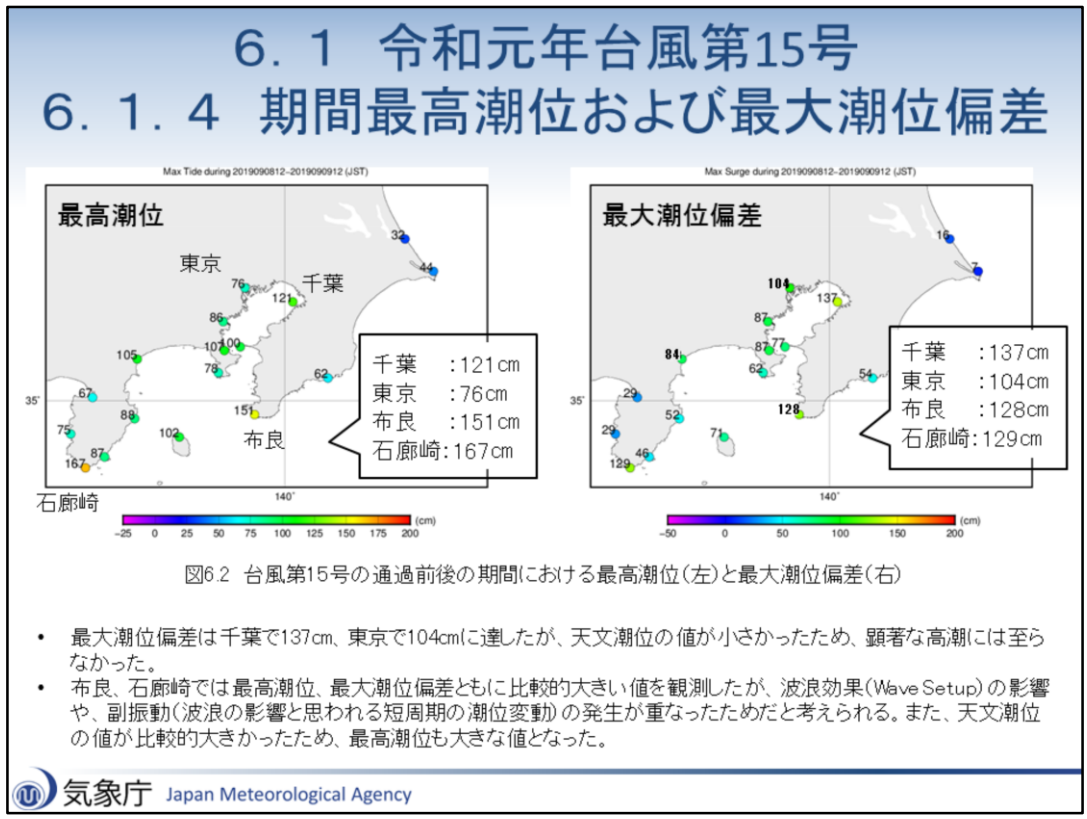
次の「令和元年　台風第１５号に関する情報（総合情報）」は８日１７時頃に発表する予定です。

気象庁 Japan Meteorological Agency

６．１　令和元年台風第15号

６．１．３　全般情報で高潮について言及

9月8日11時22分に気象庁が発表した情報では、8日11時現在の見通しとしてバーチャート形式で注意警戒を要する時間帯を示し、伊豆諸島や東海地方では8日夕方から9日未明にかけて高潮に注意するよう呼びかけた。また、8日17時08分発表の情報では、8日17時時点の見通しとして、上記の伊豆諸島や東海地方以外に、関東地方（伊豆諸島を除く）や東北地方でも8日夜遅くから9日にかけて高潮に注意するよう呼びかけた。なお、予測時点では警報級は予想されていなかったため、全般気象情報・地方気象情報ともバーチャートのみの記載で、説明文中では高潮について触れられなかった。



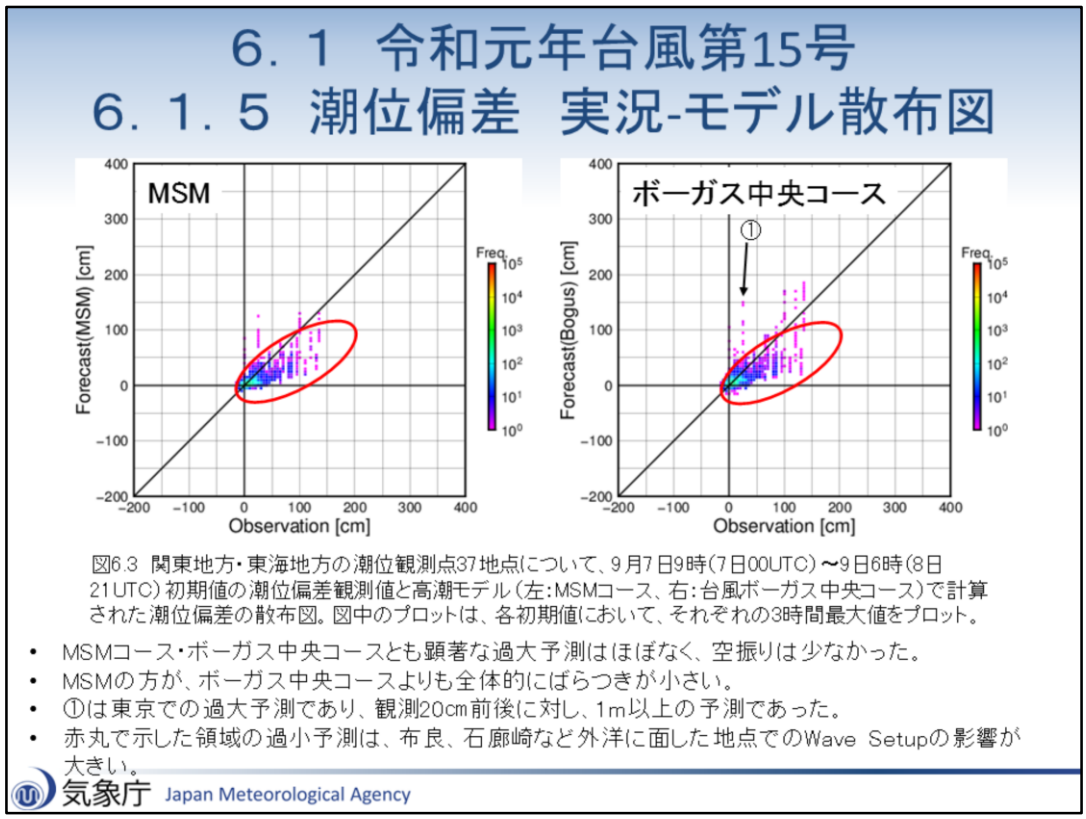
6．1　令和元年台風第15号

6．1．4　期間最高潮位および最大潮位偏差

台風通過前後の期間における最高潮位（左）と最大潮位偏差（右）を図6.2に示す。

9月8日夜はじめ頃から9日朝にかけて、伊豆諸島および東日本太平洋側沿岸を中心に最大潮位偏差が50cm以上となった。石廊崎では最高潮位が167cm、最大潮位偏差が129cm（いずれも8日22時30分）を観測したほか、布良で最高潮位151cmや、千葉や東京でも1m以上の潮位偏差を観測した。

布良や石廊崎では、最高潮位や最大潮位偏差ともに比較的大きい値を観測したが、外洋に面したこれらの地点では波浪効果（Wave Setup）の影響や、副振動（波浪の影響と思われる短周期の潮位変動）の発生が重なったためだと考えられる。また、天文潮位の値が比較的大きかったため、最高潮位も大きな値となった。



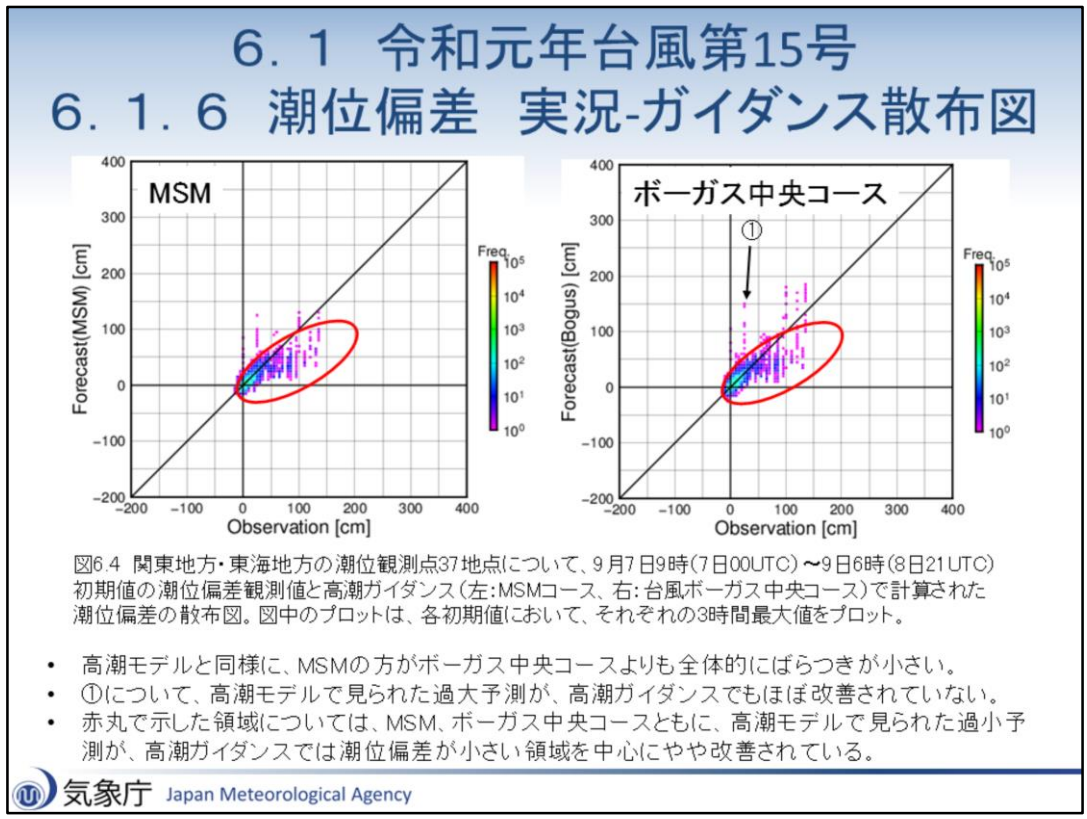
６．１　令和元年台風第15号

６．１．５　潮位偏差　実況−モデル散布図

図6.3は、関東地方・東海地方の潮位観測点37地点について、潮位偏差観測値と高潮モデル（左：MSMコース、右：台風ボーガス中央コース）で計算された潮位偏差の散布図である。台風上陸前後の9月7日9時（7日00UTC）～9日6時（8日21UTC）初期値について、それぞれの3時間最大値をプロットしている。

MSMコース・台風ボーガス中央コースともに顕著な過大予測はほぼなく、空振りは少なかったと言える。また、MSMの方がボーガス中央コースよりも全体的にばらつきが小さい。

①の過大予測は東京で、観測された潮位偏差が20cmだったのに対して、1m以上の潮位偏差を予測していた。赤丸で囲まれた領域の過小予測は、MSM・ボーガス中央コースともに見られ、布良・石廊崎など外洋に面した地点で、モデルでは表現されないWave Setupの影響が大きいと考えられる。



６．１　令和元年台風第15号

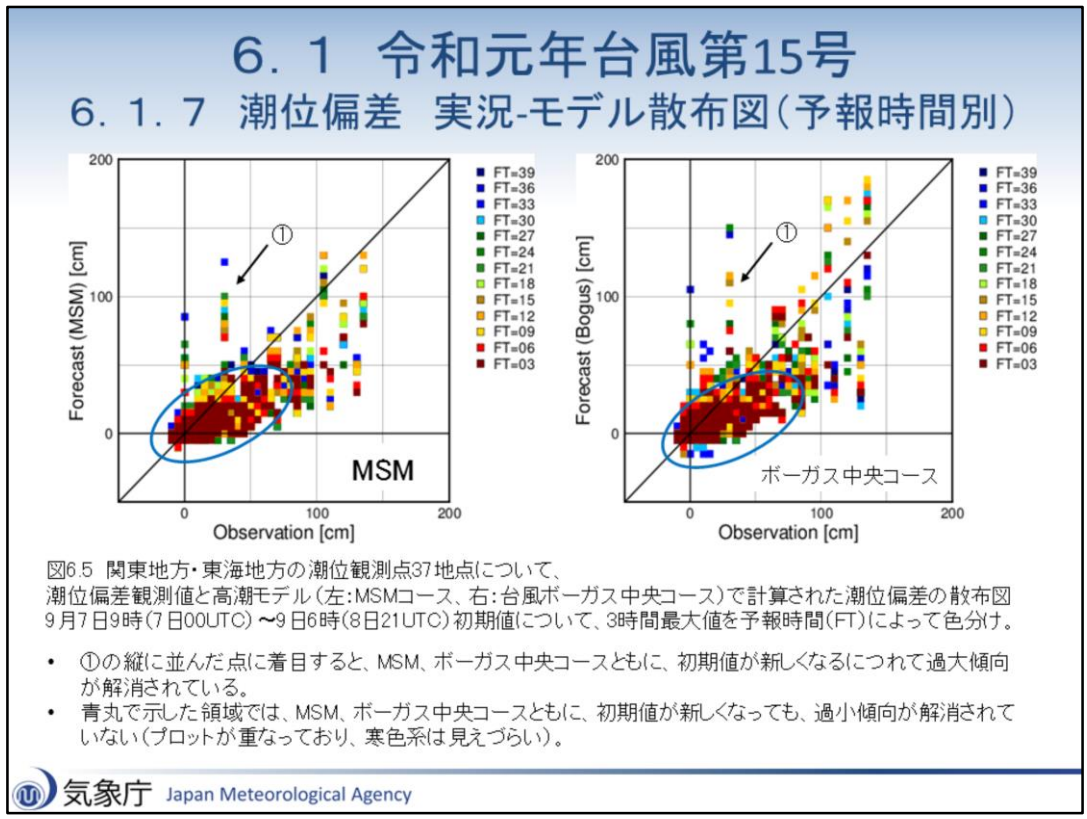
６．１．６　潮位偏差　実況−ガイダンス散布図

図6.4は、関東地方・東海地方の潮位観測点37地点について、潮位偏差観測値と高潮ガイダンス（左：MSMコース、右：台風ボーガス中央コース）で計算された潮位偏差の散布図である。台風上陸前後の9月7日9時（7日00UTC）～9日6時（8日21UTC）初期値について、それぞれの3時間最大値をプロットしている。

6.1.5の高潮モデルと実況の比較でみられた傾向と同様に、MSMの方がボーガス中央コースよりも全体的にばらつきが小さい。

①について、高潮モデルで見られた過大予測は高潮ガイダンスでもほぼ改善されていないことがわかる。高潮ガイダンスでの補正要因（海況要因、浅海潮、Wave Setup）以外の要因が、過大予測の要因として考えられる。

また、赤丸で示した領域について、高潮モデルで過小予測が見られていた部分が、高潮ガイダンスでは潮位偏差が小さい領域を中心にやや改善されている。

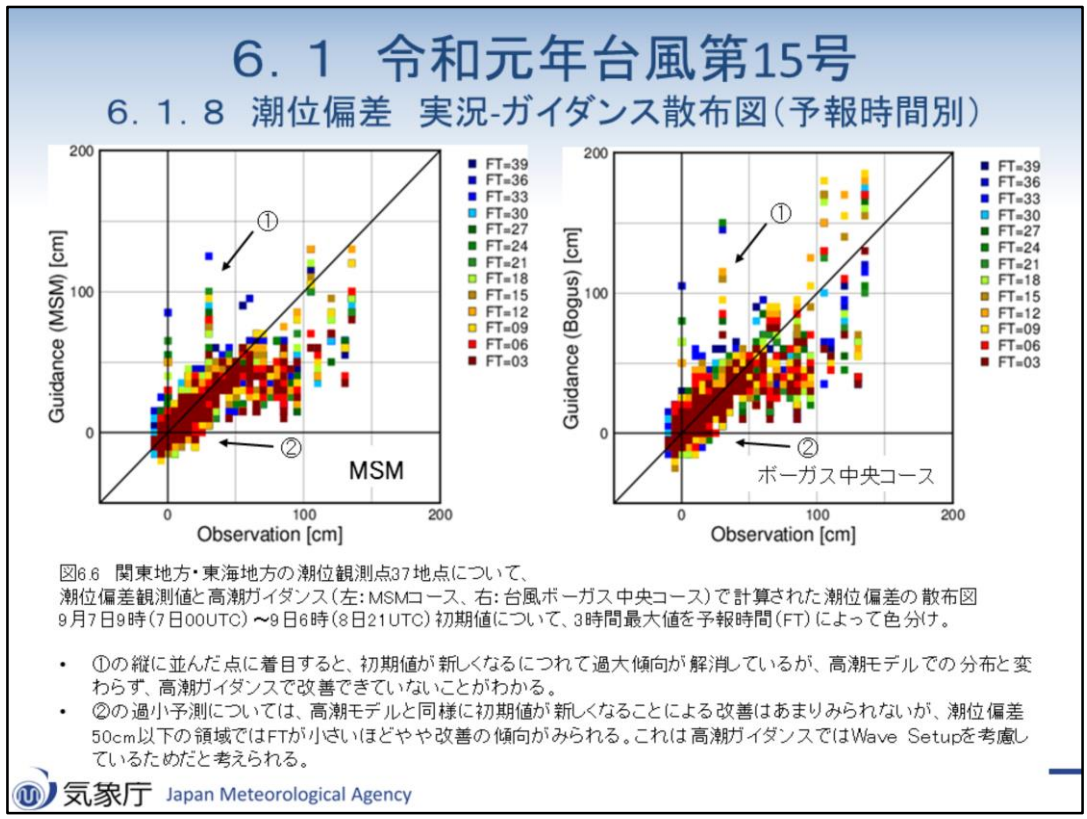


６．１　令和元年台風第15号

６．１．７　潮位偏差　実況−モデル散布図（FT別）

図6.5は、関東地方・東海地方の潮位観測点37地点について、潮位偏差観測値と高潮モデル（左：MSMコース、右：台風ボーガス中央コース）で計算された潮位偏差の予報時間（FT）別の散布図である。台風上陸前後の9月7日9時（7日00UTC）～9日6時（8日21UTC）初期値について、それぞれの3時間最大値をプロットしている。

①の縦に並んだ点に着目すると、MSM、ボーガス中央コースともに、初期値が新しくなるにつれて、プロットが1対1の線に近づき過大傾向が解消していることがわかる。青丸で示した領域では、MSM、ボーガス中央コースともに、初期値が新しくなっても、過小傾向が解消されていない（プロットが重なっており、寒色系は見えづらい）。



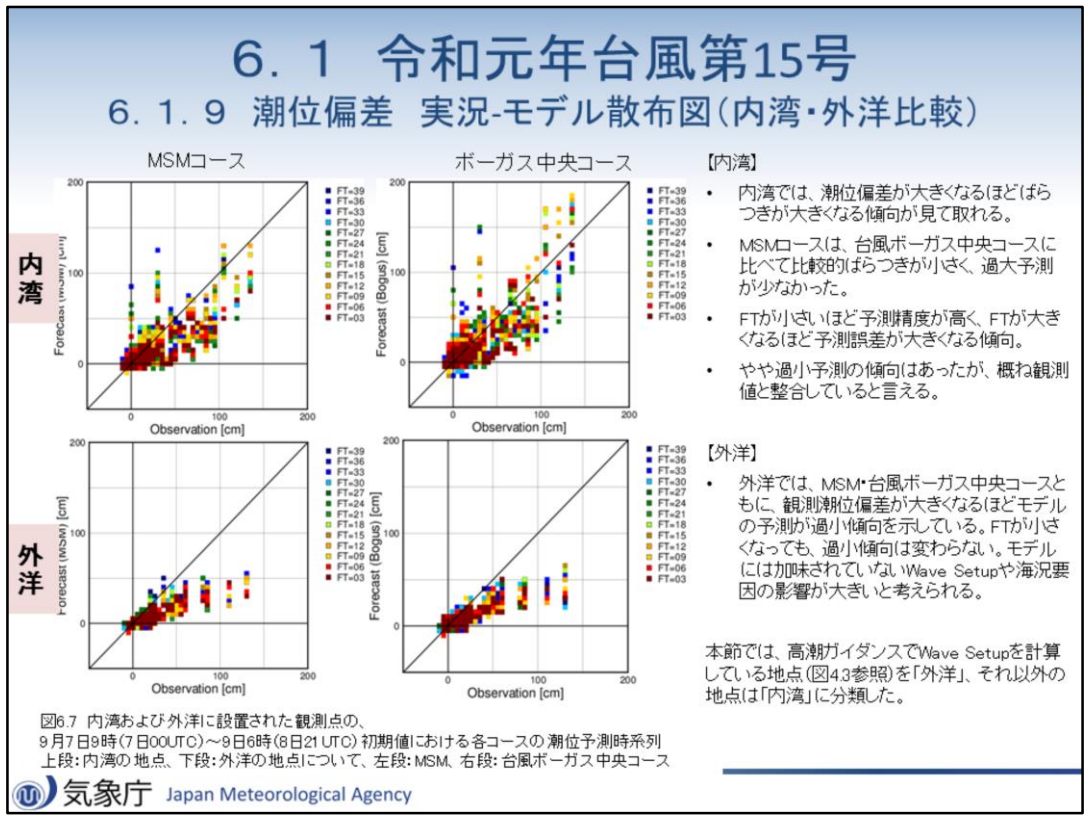
６．１　令和元年台風第15号

６．１．８　潮位偏差　実況-ガイダンス散布図（FT別）

図6.6は、関東地方・東海地方の潮位観測点37地点について、潮位偏差観測値と高潮ガイダンス（左：MSMコース、右：台風ボーガス中央コース）で計算された潮位偏差の予報時間（FT）別の散布図である。 台風上陸前後の9月7日9時（7日00UTC）～9日6時（8日21UTC）初期値について、それぞれの3時間最大値をプロットしている。

①の縦に並んだ点に着目すると、初期値が新しくなるにつれて過大傾向が解消しているが、高潮モデルでの分布と変わらず、高潮ガイダンスで改善できていないことがわかる。

②の過小予測については、高潮モデルと同様に初期値が新しくなることによる改善はあまりみられないが、特に潮位偏差50cm以下の領域ではFTが小さいほどやや改善の傾向がみられる。これは高潮ガイダンスではWave Setupを考慮しているためだと考えられる。



６．１　令和元年台風第15号

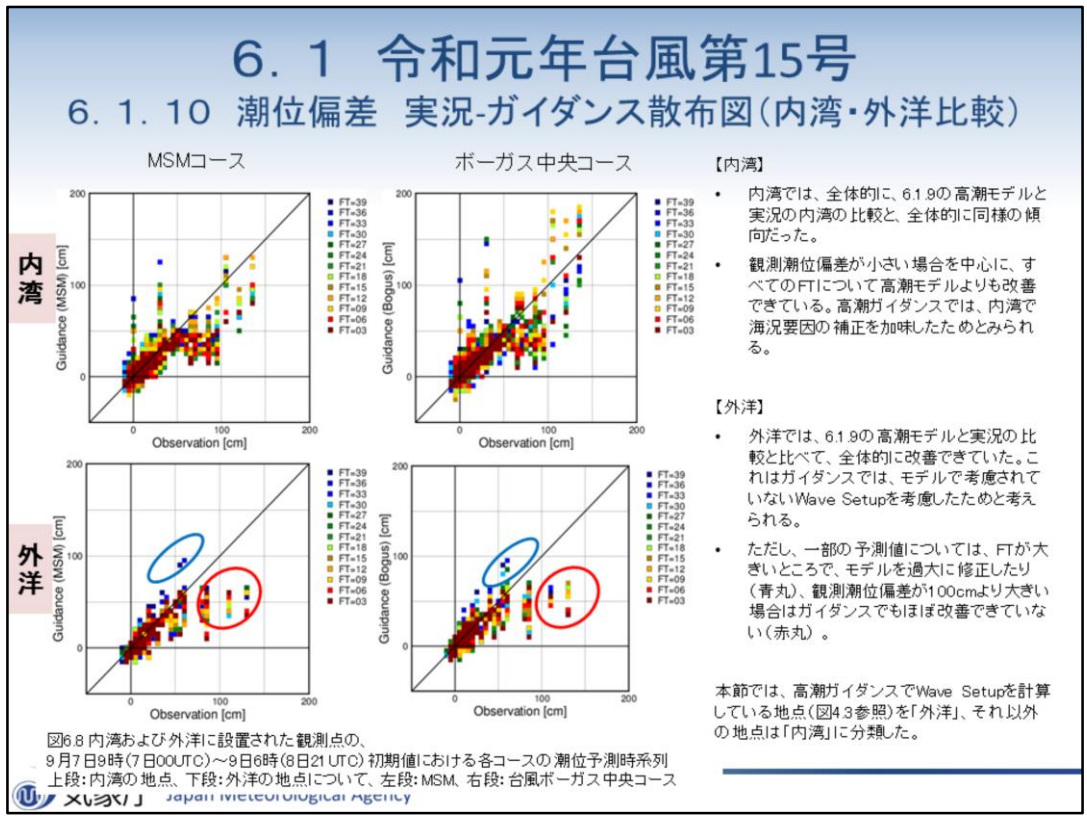
６．１．９　潮位偏差　実況−モデル散布図（内湾・外洋比較）

図6.7は、関東～東海の太平洋側に設置された潮位観測点を内湾27地点と外洋に面した10地点に分けて、それぞれ、潮位偏差観測値と高潮モデル（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図を示している。台風上陸前後の9月7日9時（7日00UTC）～9日6時（8日21TC）を対象に、各初期値において3時間毎の最大値をプロットしている。

内湾では、潮位偏差が大きくなるほどばらつきが大きくなる傾向が見て取れる。また、MSMコースは台風ボーガス中央コースに比べて比較的ばらつきが小さく、過大予測が少なかった。予報時間（FT）が小さいほど予測精度が高く、FTが大きくなるほど予測誤差が大きい傾向がみられる。内湾では、やや過小予測の傾向はあったが、概ね観測値と整合していたといえる。

外洋では、MSM・台風ボーガス中央コースともに、観測潮位偏差が大きくなるほどモデルの予測が過小傾向を示しており、またこの傾向は、FTが小さくなっても変わらない。モデルには加味されていないWave Setupや海況要因の影響が大きいと考えられる。

なお、本節では、高潮ガイダンスでWave Setupを計算している地点（図4.3参照）を「外洋」に分類した。それ以外の地点は「内湾」に分類した。



６．１　令和元年台風第15号

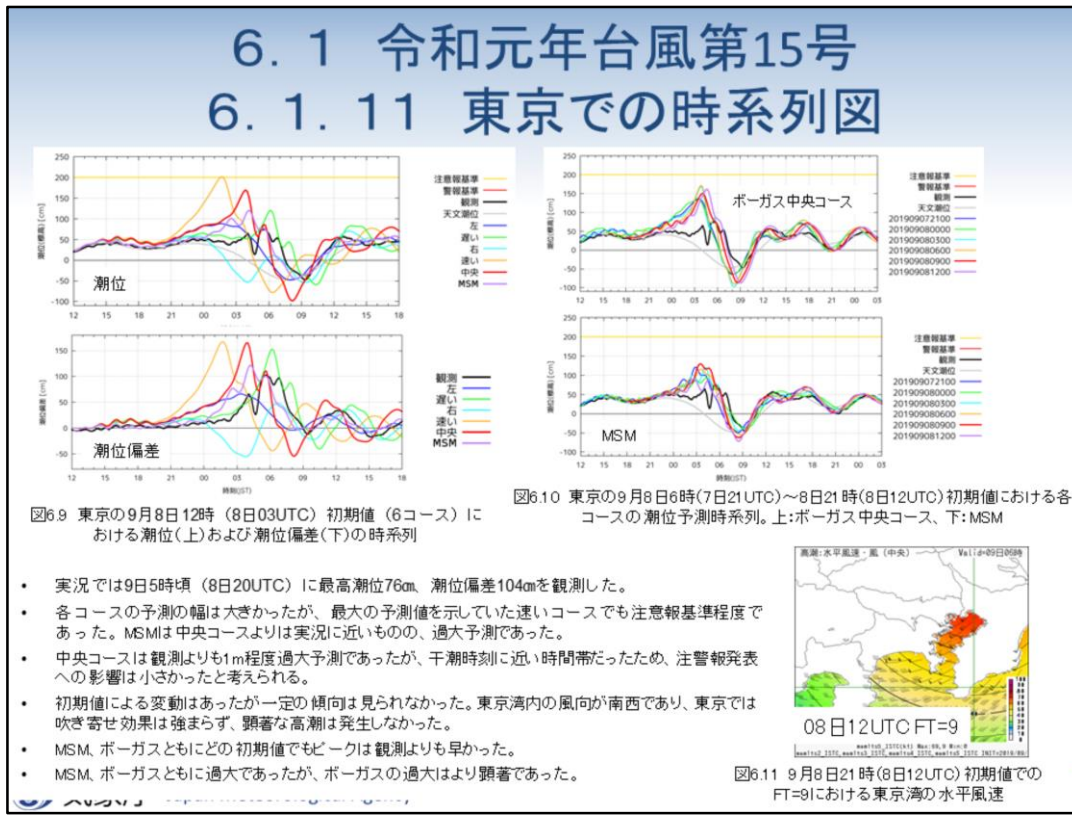
６．１．１０　潮位偏差　実況-ガイダンス散布図（内湾・外洋比較）

図6.8は、関東～東海の太平洋側に設置された潮位観測点を、内湾27地点と外洋に面した10地点に分けて、それぞれ、潮位偏差観測値と高潮モデル（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の予報時間（FT）別の散布図を示している。台風上陸前後の9月7日9時（7日00UTC）～9日6時（8日21TC）を対象に、各初期値において3時間毎の最大値をプロットしている。

内湾では、全体的に、6.1.9の高潮モデルと実況の比較と比べて、全体的に同様の傾向だが、観測潮位偏差が100cmより小さい場合を中心に、すべてのFTについて高潮モデルよりも改善できている。高潮ガイダンスでは、内湾で海況要因の補正を加味したためとみられる。

外洋では、6.1.9の高潮モデルと実況の比較と比べて、全体的に予測精度が良かった。これは、ガイダンスでは、モデルで考慮されていないWave Setupを考慮しているためだと考えられる。一方、一部の予測値では、FTの大きいところで、モデルを+50cmほど補正して実況より30-40cmほど過大な予測になっている（青丸）。また、観測潮位偏差が100cmよりも大きい領域では、ガイダンスでもほぼ改善できていないことがわかる（赤丸）。

なお、本節では、高潮ガイダンスでWave Setupを計算している地点（図4.3参照）を「外洋」に分類した。それ以外の地点は「内湾」に分類した。



6．1　令和元年台風第15号

6．1．11　東京での時系列図

実況では、9月9日5時頃（8日20UTC）に、最高潮位76cm、潮位偏差104cmを観測した。観測された潮位偏差は1m超にもなったが、干潮時刻に近い時間帯だったため、観測された潮位は最大で76cmだった。

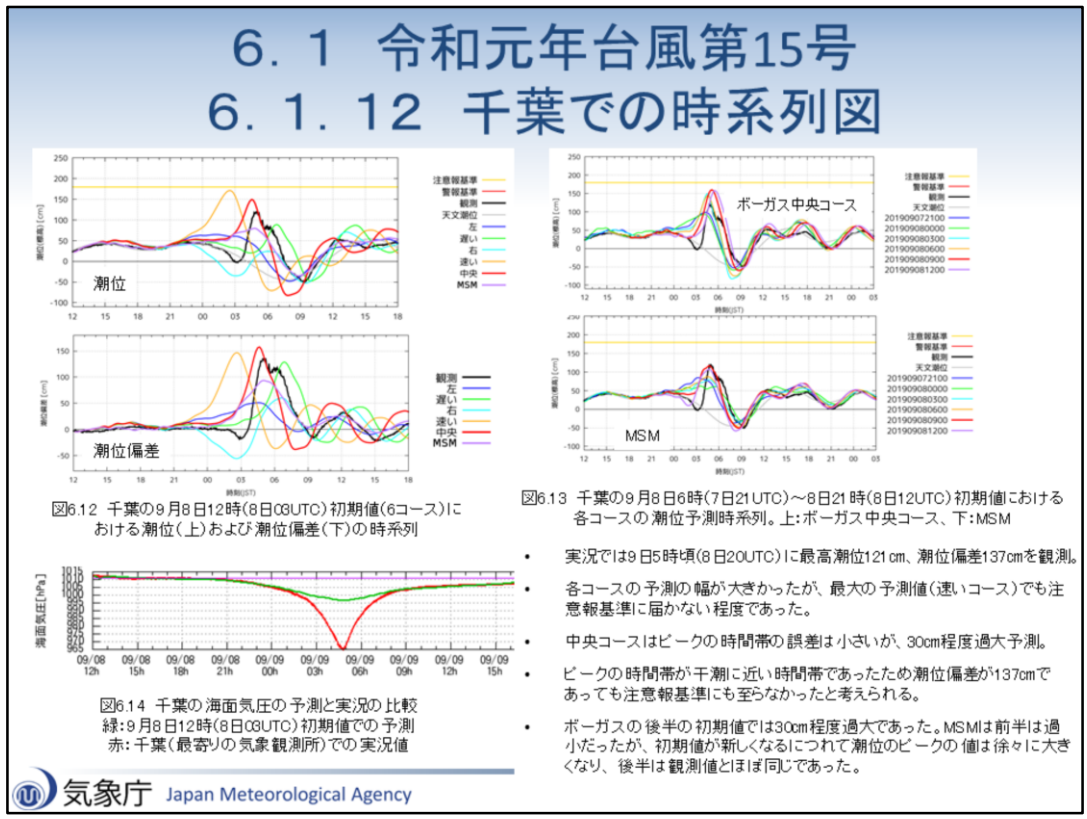
東京の8日12時（8日03UTC）初期値における各コースの潮位予測時系列（上：潮位、下：潮位偏差）を図6.9に、9月8日6時（7日21UTC）～8日21時（8日12UTC）の各初期値における各コース（上：MSMコース、下：ボーガス中央コース）による潮位時系列を図6.10に示す。

各コースの予測の幅は大きかったが、最大の潮位予測値を示していた速いコース（台風予報円内で台風の予想コースに沿って最も先に進む場合）でも注意報基準程度だった。速いコースでは、他のコースに比べて、満潮時刻に近い時間帯（満潮時刻は8日夜遅く）に潮位偏差が大きいタイミングが重なっていたため、潮位の予測が最大となったと考えられる。また、中央コース（台風の予想コースの中心を進む場合）やMSM（台風ボーガスを用いない場合）は、潮位・潮位偏差とも観測よりも過大な予測で、特に中央コースでは観測より1m程度過大な予測だった。しかし、干潮時刻に近い時間帯であったため、注警報発表への影響は小さかったと考えられる。

また、初期値による潮位予測の変化を見ると、初期値による変動はあったが一定の傾向は認められなかった。

図6.11に9月8日21時（8日12UTC）初期値でのFT=9における東京湾の水平風速を示しているが、東京湾内の風向が南西であり、東京湾の湾奥から湾の外側に向かって風が吹いたことから、東京では吹き寄せ効果は強まらず、顕著な高潮は発生しなかった。

MSM、台風ボーガス中央コースともにどの初期値でもピークは観測よりも早かった。MSM、台風ボーガス中央コースともに過大だったが、ボーガスの過大はより顕著だった。



6．1　令和元年台風第15号

6．1．12　千葉での時系列図

実況では、9月9日5時頃(8日20UTC)に、最高潮位121cm、潮位偏差137cmを観測した。

千葉の8日12時(8日03UTC)初期値における各コースの潮位予測時系列(上:潮位、下:潮位偏差)を図6.12に、9月8日6時(7日21UTC)～8日21時(8日12UTC)の各初期値における各コース(左:MSMコース、右:ボーガス中央コース)による潮位時系列を図6.13に示す。

各コースの予測の幅は大きい状況だったが、最大の潮位予測値を示していた速いコースでも注意報には届かない程度だった。

高潮モデルの中央コースやMSMはいずれもピークの時間帯の誤差は小さかったが、潮位予測は、実況に比べて、中央コースでは30cm程度過大、MSMでは40cm程度過小予測だった。

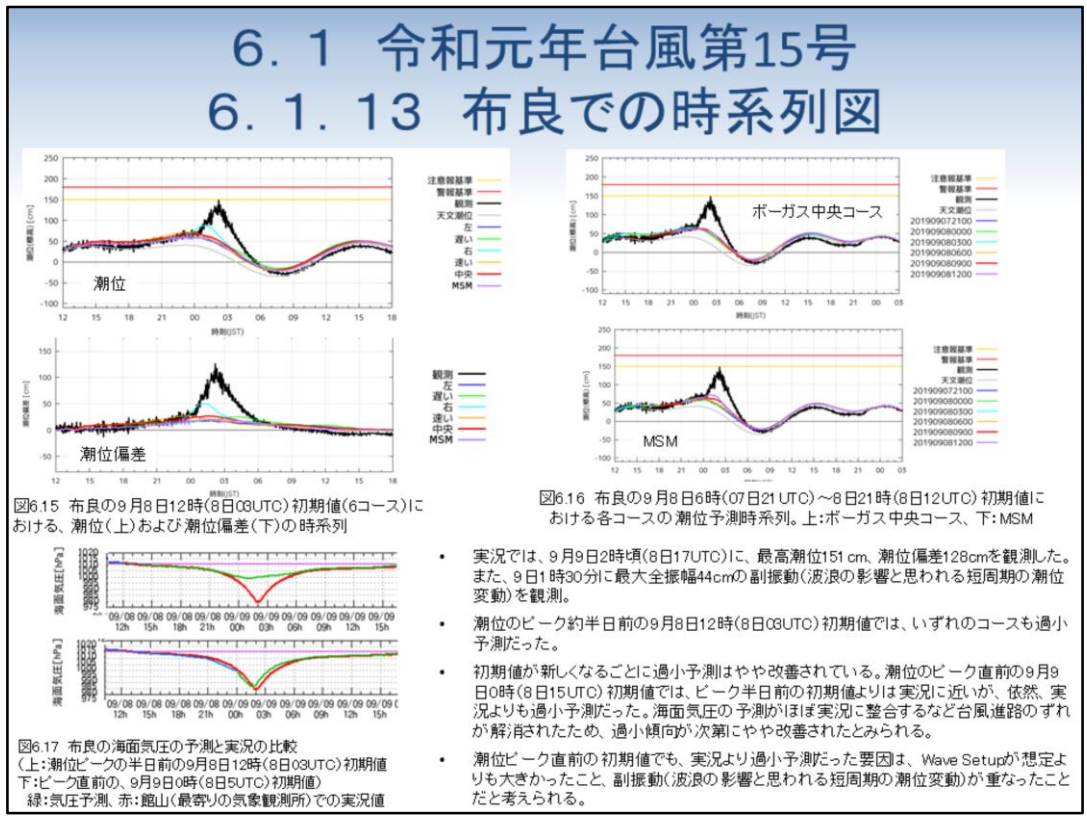
観測された潮位偏差は137cmにもなったが、ピークの時間帯が干潮に近い時間帯だったため、注意報基準には至らなかった。しかし、潮位偏差のピークが満潮と重なっていた場合は、注意報基準には達していたと見られる。

図6.14に、9月8日12時(8日03UTC)初期値でのMSMでの千葉の海面気圧の予測と、千葉(最寄りの気象観測所)での実況値を比較した図を示すが、実際の台風進路は予測よりも東寄りになったため、海面気圧はMSMの予測(1000hPa)よりも35hPaほど低く、風もMSM予測よりやや強かった。これらの台風進路の予測とのずれが、高潮モデル・ガイダンスが実況より過小だった要因だと考えられる。

また、初期値ごとの予測を見ると、初期値が新しくなるにつれて台風の予想進路が東寄りになり(6.1.2の図6.1も参照←台風進路の初期値変わりの図)、東京湾内の吹き寄せが強まることで潮位予測のピークの値は徐々に大きくなっていった。

ボーガス中央コースの後半の初期値では、ピークの時間帯の予測誤差は小さかったが、30cm程度過大だった。

MSMでは、前半の初期値では過小だったが、初期値が新しくなるにつれて潮位のピークの予測値は徐々に大きくなり、後半の初期値では観測値とほぼ同じ予測ができていた。



6．1　令和元年台風第15号

6．1．13　布良での時系列図

実況では、9月9日2時頃(8日17UTC)に、最高潮位151cm、潮位偏差128cmを観測した。また、9日1時30分に最大全振幅44cmの副振動(波浪の影響と思われる短周期の潮位変動)を観測した。

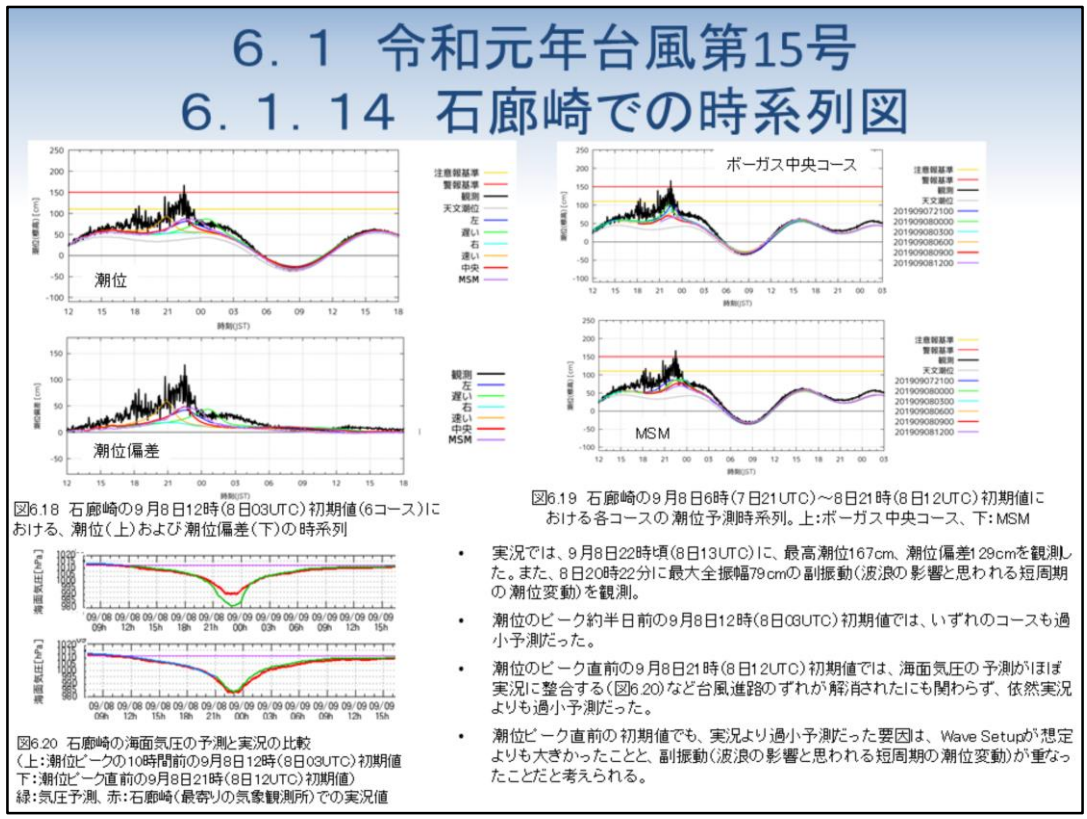
図6.15に、布良の潮位のピーク約半日前の、8日12時(8日03UTC)初期値における各コースの潮位予測時系列(上:潮位、下:潮位偏差)を示す。高潮モデルの右コース(台風予報円内で、台風の予想進路から最も右側に逸れる場合)以外のコースでは予測の幅が小さく揃っていたが、いずれのコースも実況よりも過小な予測で、MSMでは80cm程度、台風ボーガス中央コースでは60cm程度過小だった。

図6.16に、布良の9月8日6時(7日21UTC)～8日21時(8日12UTC)初期値における各コースの潮位予測時系列(上:ボーガス中央コース、下:MSM)を示す。初期値が新しくなるごとに過小予測は次第に改善されている。潮位のピーク直前の初期値では、ピーク半日前の初期値よりは実況に近いが、依然、高潮ガイダンスは実況よりも過小予測だった。

図6.17に、潮位のピーク約半日前の初期値(9月8日12時(8日03UTC)初期値)および潮位のピーク直前の初期値(9月9日0時(8日15UTC)初期値)でのMSMでの布良の海面気圧の予測と、館山(最寄りの気象観測所)での実況値を比較した図を示す。潮位ピーク直前の初期値では海面気圧の予測がほぼ実況と整合しているなど、初期値が新しくなるごとに台風進路のずれがほぼ解消されたため、次第に過小予測傾向がやや改善されたとみられる。潮位のピーク直前の初期値でも実況より過小予測だった要因は、Wave Setupが想定よりも大きかったこと、副振動(波浪の影響と思われる短周期の潮位変動)の発生が重なったことだと考えられる。

Wave Setupの見積もり精度をより向上させるため、気象庁では、随時、見積もりの改善に取り組んでいる。詳細は第8節を参照。

また、副振動(波浪の影響と思われる短周期の潮位変動)については、現時点では予測が難しい現象であり、9月8日17時予報向けの潮位に関する全般解説資料で、「東日本太平洋側と東北太平洋側では、8日～9日にかけて台風の接近・通過による副振動に留意。」とコメントしている通り、ある程度潮位の予想に幅を持たせた対応や、潮位の実況監視が重要である。



6．1　令和元年台風第15号

6．1．14　石廊崎での時系列図

実況では、9月8日22時頃(8日13UTC)に、最高潮位167cm、潮位偏差129cmを観測し、高潮警報基準を超過した。また、8日20時22分に最大全振幅79cmの副振動(波浪の影響と思われる短周期の潮位変動)を観測した。

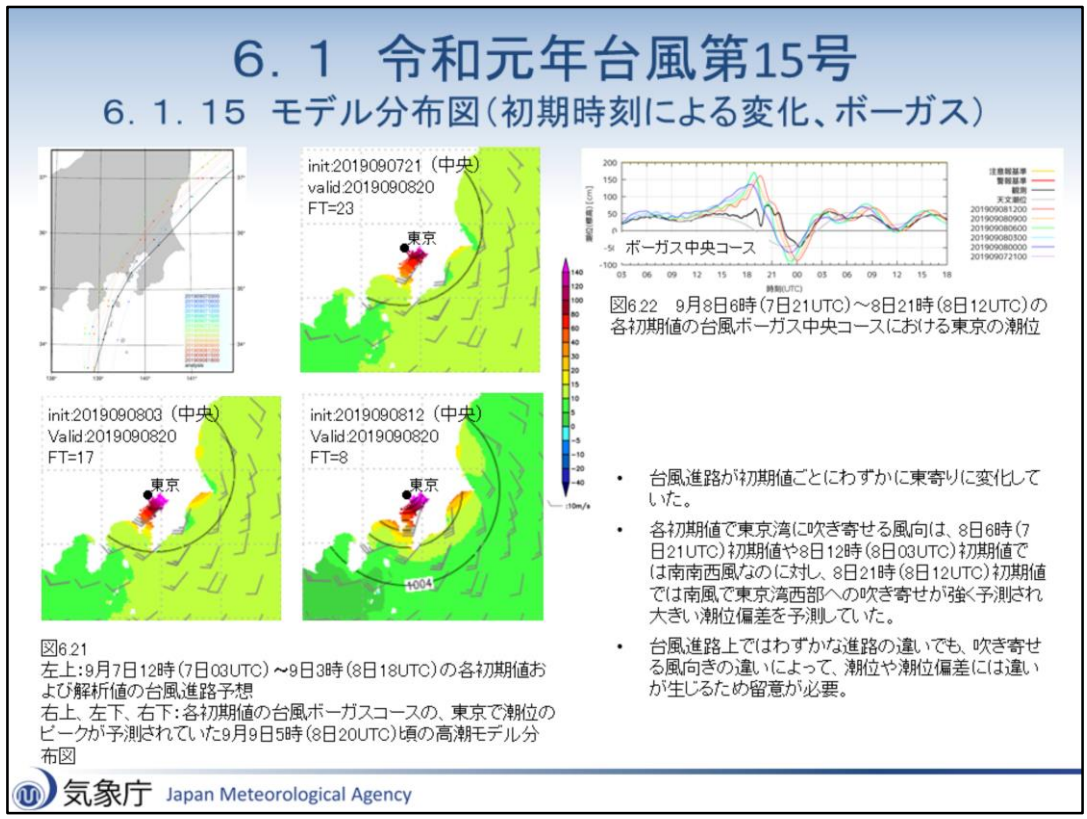
図6.18に、石廊崎のピーク約10時間前の、8日12時(8日03UTC)初期値における各コースの潮位予測時系列(上:潮位、下:潮位偏差)を示す。高潮モデルの各コースの予測は、ピークの時間帯はやや前後するが潮位偏差はいずれも50cm程度を予測しており、実況より80cm程度過小だった。

図6.19に、石廊崎の9月8日06時(7日21UTC)～8日21時(8日12UTC)初期値における各コースの潮位予測時系列(上:ボーガス中央コース、下:MSM)を示す。また、図6.20に、潮位のピーク約10時間前の初期値(9月8日12時(8日03UTC)初期値)および潮位のピーク直前の初期値(9月8日21時(8日12UTC)初期値)でのMSMでの石廊崎の海面気圧の予測と、石廊崎(最寄りの気象観測所)での実況値を比較した図を示す。潮位ピーク直前の初期値では、海面気圧の予測がほぼ実況に整合しているなど、台風進路のずれがほぼ解消されたにも関わらず、依然、高潮ガイダンスは実況よりも過小予測だった。

潮位のピーク直前の初期値でも実況より過小予測だった要因は、布良と同様に、Wave Setupが想定よりも大きかったこと、副振動(波浪の影響と思われる短周期の潮位変動)の発生が重なったことだと考えられる。

Wave Setupの見積もり精度をより向上させるため、気象庁では、随時、見積もりの改善に取り組んでいる。詳細は第8節を参照。

また、副振動(波浪の影響と思われる短周期の潮位変動)については、現時点では予測が難しい現象であり、また、9月8日11時予報や17時予報向けの潮位に関する全般解説資料で、「東日本太平洋側と東北太平洋側では、8日～9日にかけて台風の接近・通過による副振動に留意。」とコメントしている通り、ある程度潮位の予想に幅を持たせた対応や、潮位の実況監視が重要である。



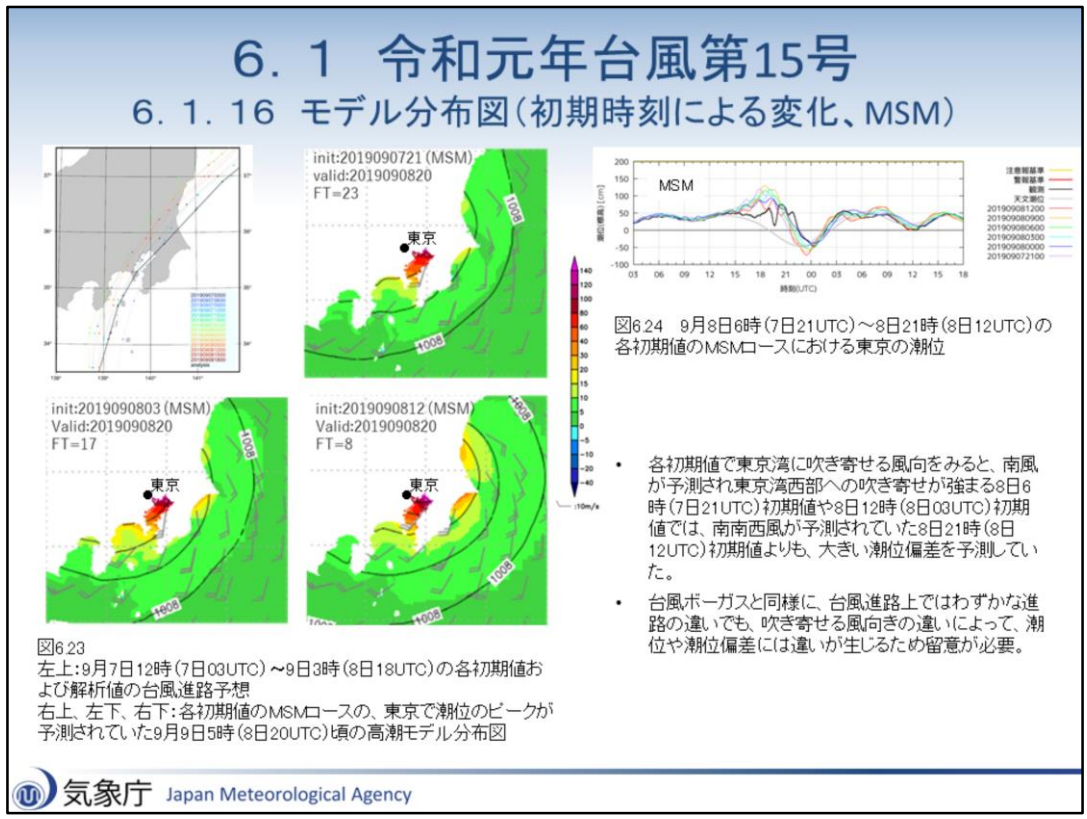
6．1　令和元年台風第15号

6．1．15　モデル分布図（初期時刻による変化、ボーガス）

図6.21に、9月7日12時（7日03UTC）～9日3時（8日18UTC）の各初期値および解析値の台風進路予想（左上）と、東京で潮位のピークが予測されていた9月9日5時（8日20UTC）頃について、9月8日6時（7日21UTC）、8日12時（8日03UTC）、8日21時（8日12UTC）の各初期値の台風ボーガスコースの高潮モデル分布図（右上、左下、右下）を示す。

台風進路は初期値ごとにわずかに東寄りに変化していた。各初期値で東京湾に吹き寄せる風向は、8日6時（7日21UTC）初期値や8日12時（8日03UTC）初期値では南南西風なのに対し、8日21時（8日12UTC）初期値では南風で東京湾西部への吹き寄せが強く予測され大きい潮位偏差を予測していた。

また、図6.22に、9月8日6時（7日21UTC）～8日21時（8日12UTC）の各初期値の台風ボーガス中央コースにおける東京の潮位を示す。これを見ると、初期値が新しくなり台風のコースが東に移動し、東京湾に近いコースとなるにつれ吹き寄せ等による潮位の予測が高くなっているのがわかる。しかし 実況では、台風のコースが更に少し東にずれ、東京湾のやや東よりを通過するコースとなったため、吹き寄せの影響が小さくなり、潮位はモデルほど上昇しなかった。このように、台風進路上ではわずかな進路の違いでも、吹き寄せる風向きの違いによって、潮位や潮位偏差には違いが生じるため留意が必要である。



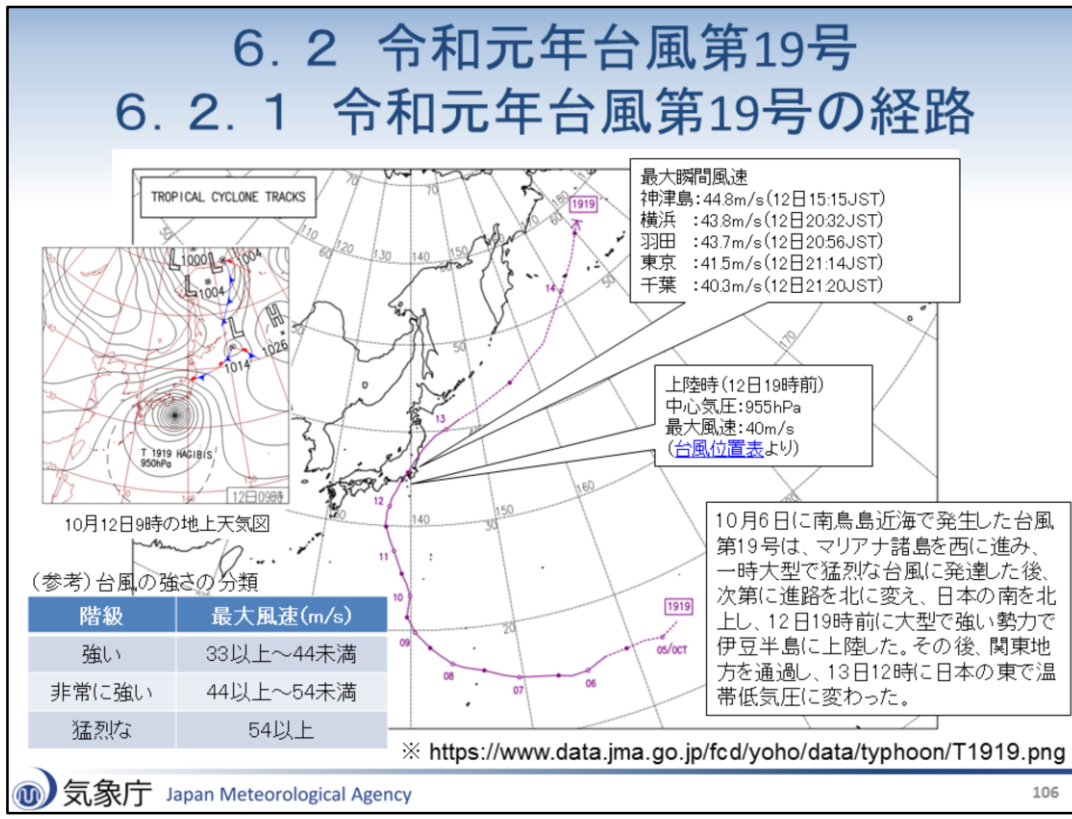
6．1　令和元年台風第15号

6．1．16　モデル分布図（初期時刻による変化、MSM）

図6.23に、9月7日12時（7日03UTC）～9日3時（8日18UTC）の各初期値および解析値の台風進路予想（左上）と、東京で潮位のピークが予測されていた9月9日5時（8日20UTC）頃について、9月8日6時（7日21UTC）、8日12時（8日03UTC）、8日21時（8日12UTC）の各初期値のMSMコースの高潮モデル分布図（右上、左下、右下）を示す。

各初期値で東京湾に吹き寄せる風向をみると、南風が予測され東京湾西部への吹き寄せが強まる8日6時（7日21UTC）初期値や8日12時（8日03UTC）初期値では、南南西風が予測されていた8日21時（8日12UTC）初期値よりも、大きい潮位偏差を予測していた。

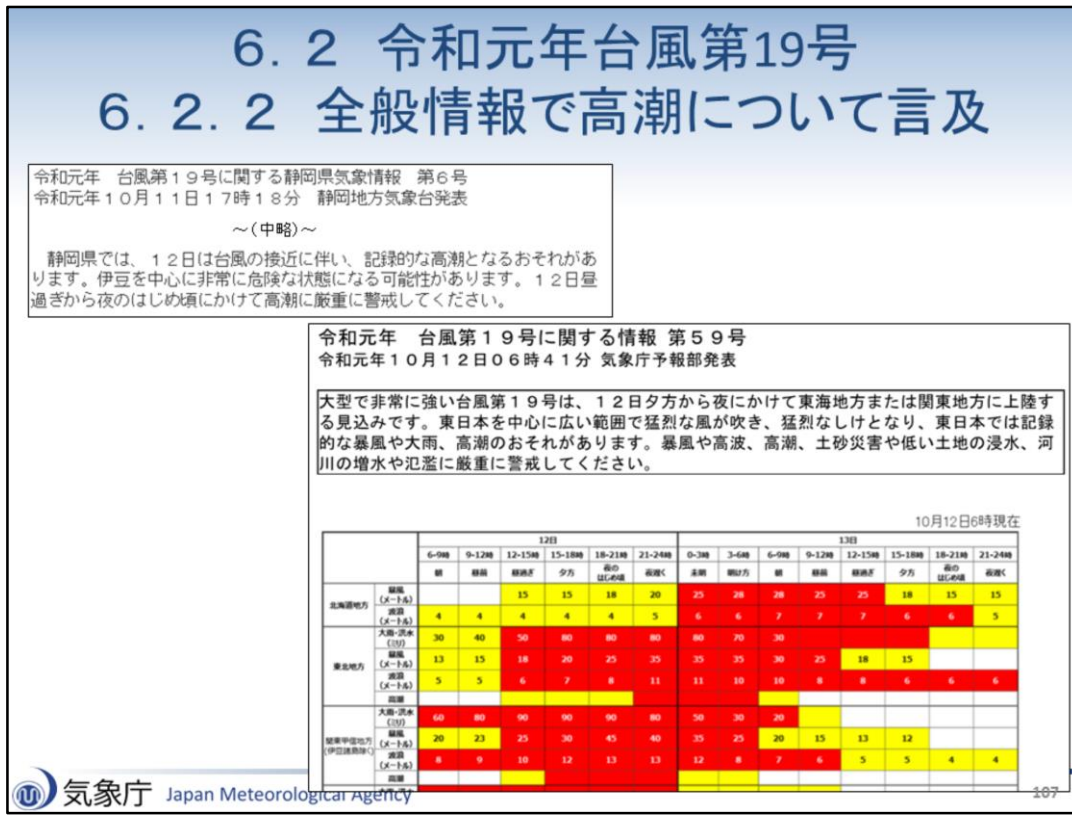
台風ボーガスと同様に、台風進路上ではわずかな進路の違いでも、吹き寄せる風向きの違いによって、潮位や潮位偏差には違いが生じるため留意が必要である。



6．2　令和元年台風第19号

6．2．1　令和元年台風第19号の経路

10月6日に南鳥島近海で発生した台風第19号（令和元年東日本台風）は、マリアナ諸島を西に進み、一時大型で猛烈な台風に発達した後、次第に進路を北に変え、日本の南を北上し、12日19時前に大型で強い勢力で伊豆半島に上陸した。その後、関東地方を通過し、13日12時に日本の東で温帯低気圧に変わった。上陸時における中心気圧は955hPa、最大風速は40m/sであった。



６．２　令和元年台風第19号

６．２．２　全般情報で高潮について言及

名古屋地方気象台は、11日17時00分発表の東海地方気象情報において、「静岡県では、台風の進路によっては記録的な高潮となるおそれ」と言及した。

静岡地方気象台は、11日17時18分発表の府県気象情報において、「12日は台風の接近に伴い、記録的な高潮となるおそれ」「伊豆を中心に非常に危険な状態になる可能性」と言及。その後、17時39分に高潮注意報、12日1時46分高潮警報をそれぞれ発表した。

また、12日6時41分に気象庁が発表した情報では、「東日本では記録的な高潮のおそれ」との記述がされた。

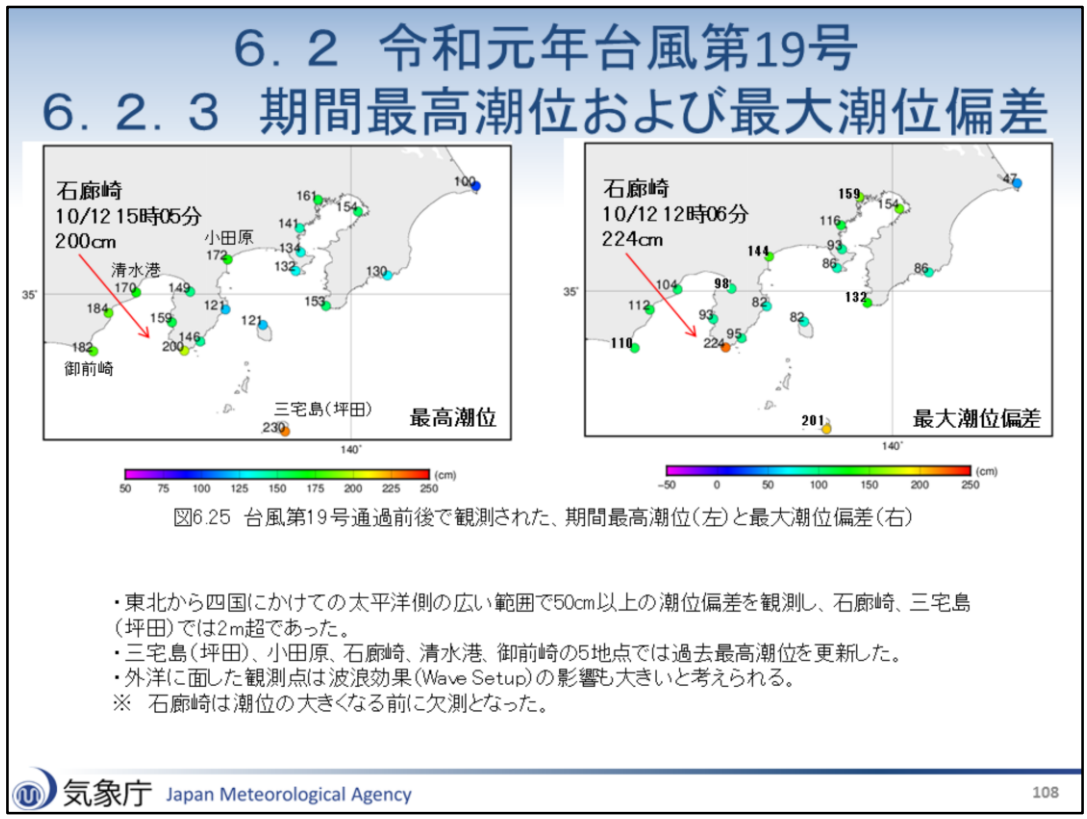


図6.25　台風第19号通過前後で観測された、期間最高潮位(左)と最大潮位偏差(右)

6．2　令和元年台風第19号

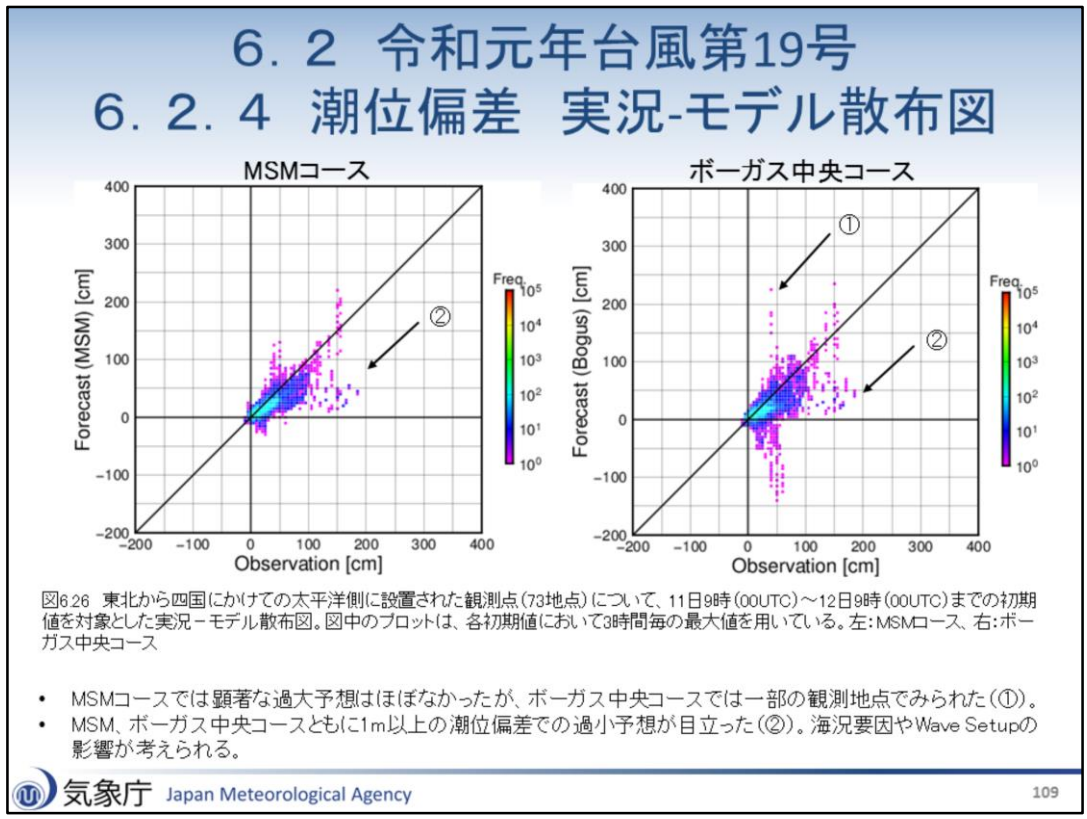
6．2．3　期間最高潮位および最大潮位偏差

台風通過前後の期間における最高潮位と最大潮位偏差を図6.25に示す。

東北から四国にかけての太平洋側の広い範囲で50cm以上の潮位偏差を観測しており、石廊崎、三宅島(坪田)では2m超の潮位偏差であった。

石廊崎は潮位の大きくなる前に欠測となったが、三宅島(坪田)、小田原、石廊崎、清水港、御前崎の5地点では過去最高潮位を更新した。

過去最高潮位を更新した5地点の内、外洋に面した三宅島(坪田)、小田原、石廊崎では、波浪効果(Wave Setup)の影響も大きいと考えられる。



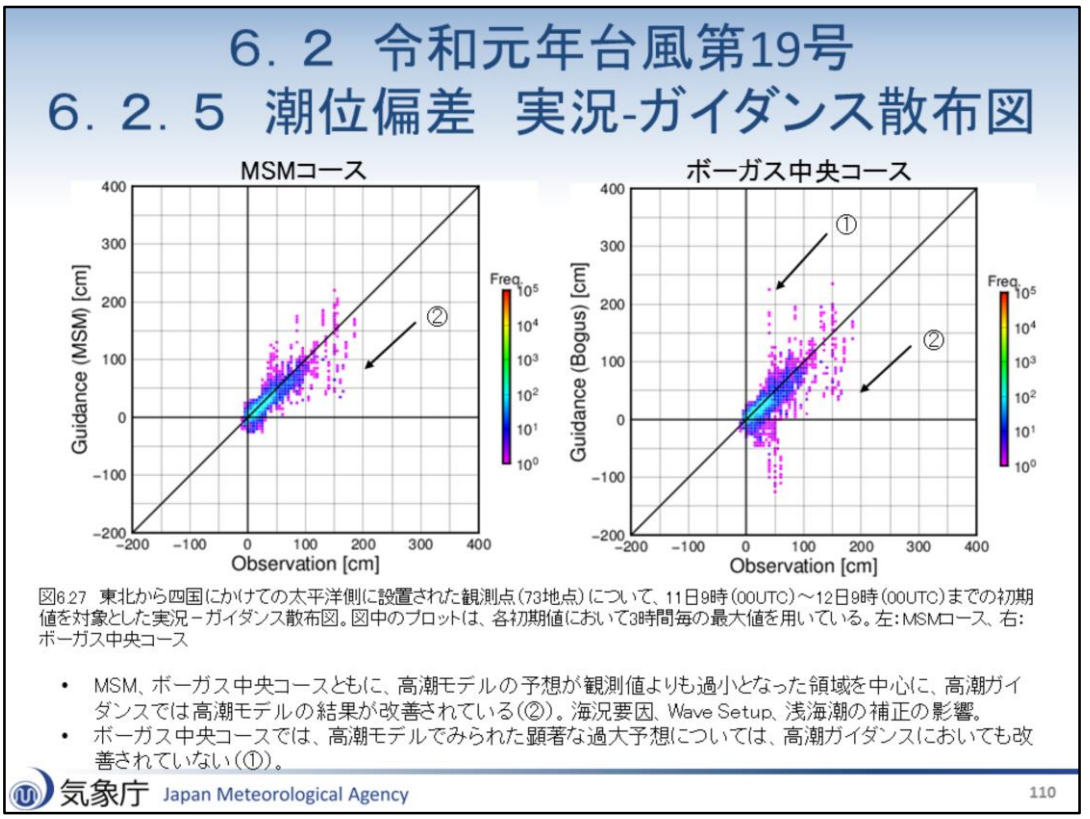
６．２　令和元年台風第19号

６．２．４　潮位偏差　実況−モデル散布図

図6.26は、東北から四国にかけての太平洋側に設置された潮位観測点について、潮位偏差観測値と高潮モデル（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図を示している。上陸前後の11日9時（00UTC）～12日9時（00UTC）の初期値を対象に、各初期値において3時間毎の最大値をプロットしている。

MSMコースでは顕著な過大予想はほぼなかったが、①で示すように、ボーガス中央コースでは一部の観測地点では顕著な過大予想がみられた。

また、②で示すように、MSMコース、ボーガス中央コースともに1m以上の潮位偏差の過小な予想が目立っており、海況要因やWave Setupの影響が考えられる。

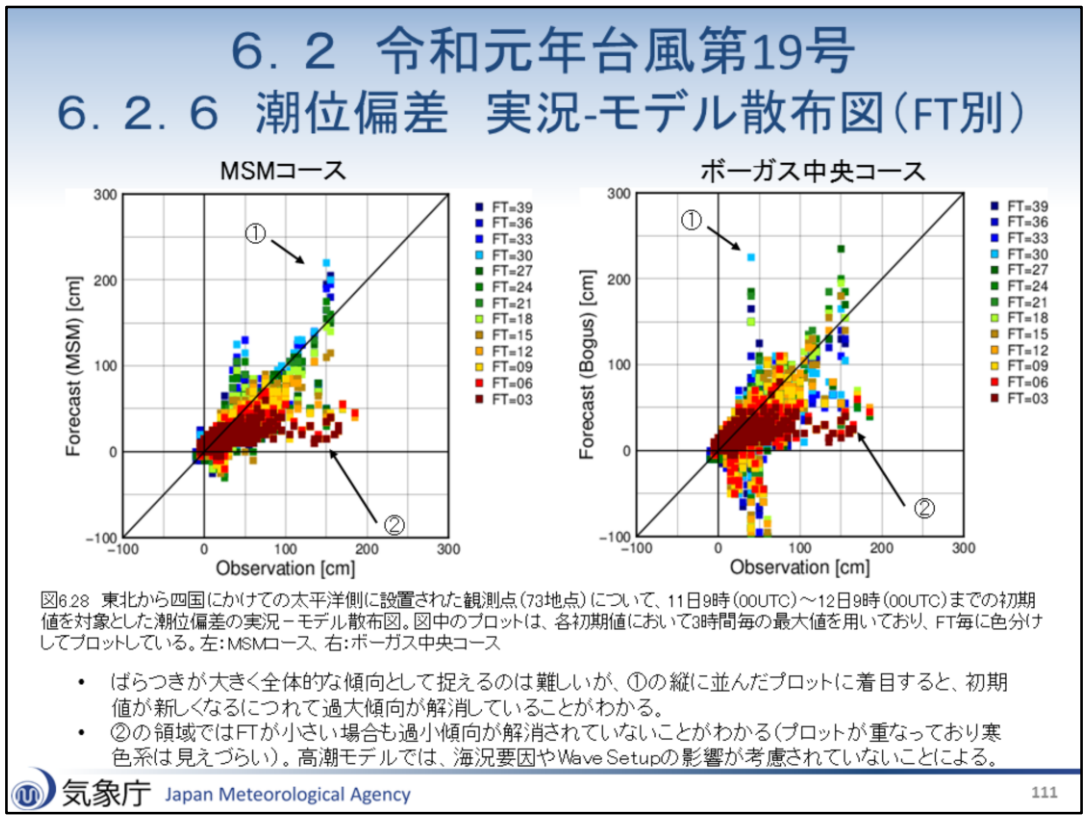


６．２　令和元年台風第19号

６．２．５　潮位偏差　実況-ガイダンス散布図

図6.27は、東北から四国にかけての太平洋側に設置された潮位観測点について、潮位偏差観測値と高潮ガイダンス（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図を示している。上陸前後の11日9時（00UTC）～12日9時（00UTC）の初期値を対象に、各初期値において3時間毎の最大値をプロットしている。

高潮モデルと異なり、高潮ガイダンスではMSMコース、ボーガス中央コース共に、実況-モデル散布図中の②で示された過小予想となった領域を中心にやや改善されていることがわかる。一方、ボーガス中央コースの実況-モデル散布図中の①で示した顕著な過大予想については高潮ガイダンスにおいても改善されていないので、この過大予想は海況要因、Wave Setup、浅海潮以外の要因によってもたらされたと考えられる。



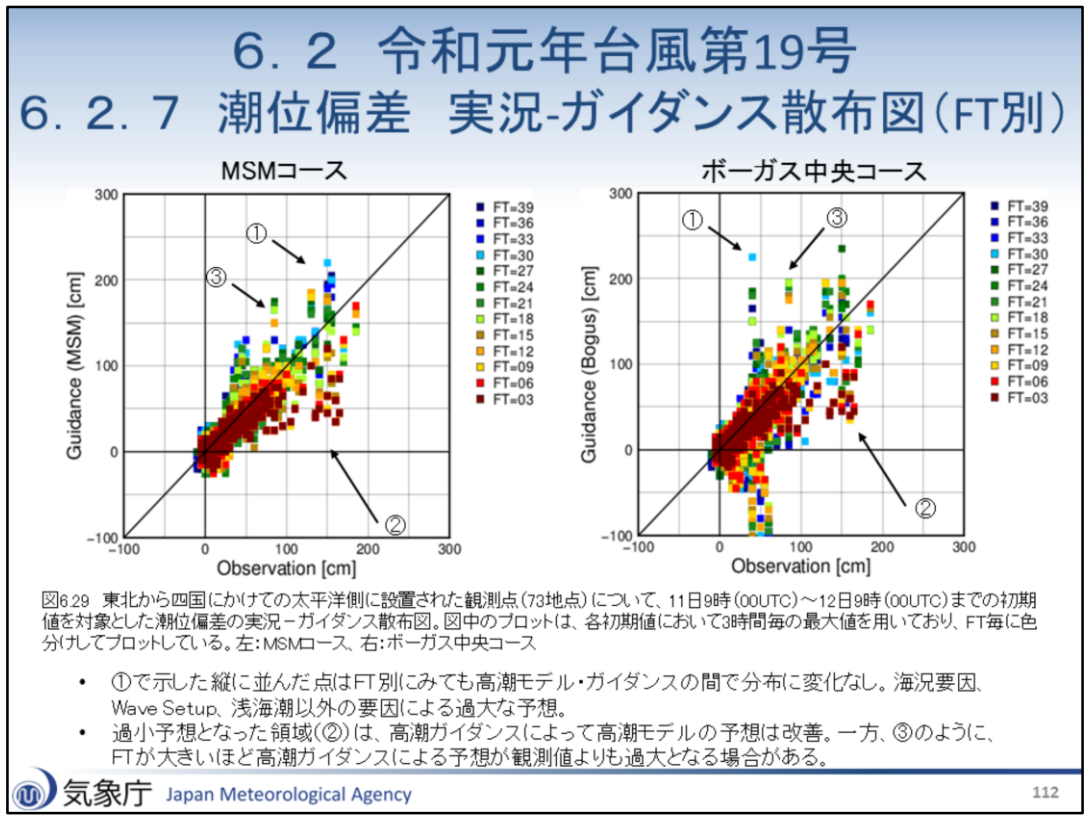
6．2　令和元年台風第19号

6．2．6　潮位偏差　実況−モデル散布図（FT別）

図6.28は、東北から四国にかけての太平洋側に設置された潮位観測点について、潮位偏差観測値と高潮モデル（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図を示している。上陸前後の11日9時（00UTC）～12日9時（00UTC）の初期値を対象に、各初期値において3時間毎の最大値をプロットしており、予報時間毎に色分けしている。

ばらつきが大きく全体的な傾向として捉えるのは難しいが、①で示した縦に並んだ点に着目すると、初期値が新しくなるにつれて過大傾向が解消していることがわかる。

一方、プロットが重なっており寒色系が見えづらいが、高潮モデルでは海況要因やWave Setupの影響が考慮されていないことから、②で示された領域ではFTが小さい場合も過小傾向が解消されていないことがわかる。



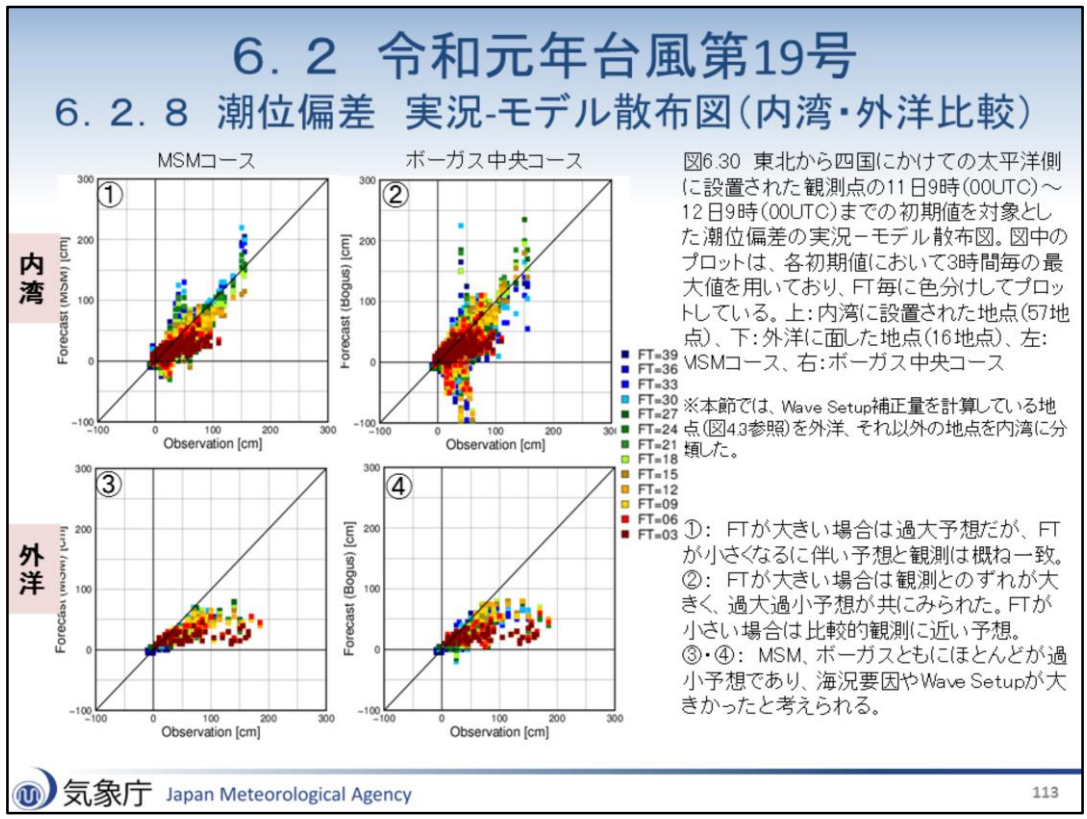
6．2　令和元年台風第19号

6．2．7　潮位偏差　実況-ガイダンス散布図（FT別）

図6.29は、東北から四国にかけての太平洋側に設置された潮位観測点について、潮位偏差観測値と高潮ガイダンス（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図を示している。上陸前後の11日9時（00UTC）～12日9時（00UTC）の初期値を対象に、各初期値において3時間毎の最大値をプロットしており、予報時間毎に色分けしている。

①で示した縦に並んだ点はFT別にみても高潮モデル・ガイダンスの間で分布に変化がないので、海況要因、Wave Setup、浅海潮以外の要因によってもたらされた過大な予想と考えられる。

②で示された過小予想となった領域をみると、高潮ガイダンスは高潮モデルの予測を改善しており、150cm以上の観測値に着目すると、FTが小さいほど改善の傾向が大きいことがわかる。一方、③で示したように、FTが大きいほど高潮ガイダンスによる予測が観測値よりも過大となる場合もある。全体的に、FTが小さいほど観測と予測は整合する傾向にあることから、高潮の規模の把握には最新の高潮ガイダンスを利用頂きたい。



6．2　令和元年台風第19号

6．2．8　潮位偏差　実況−モデル散布図（内湾・外洋比較）

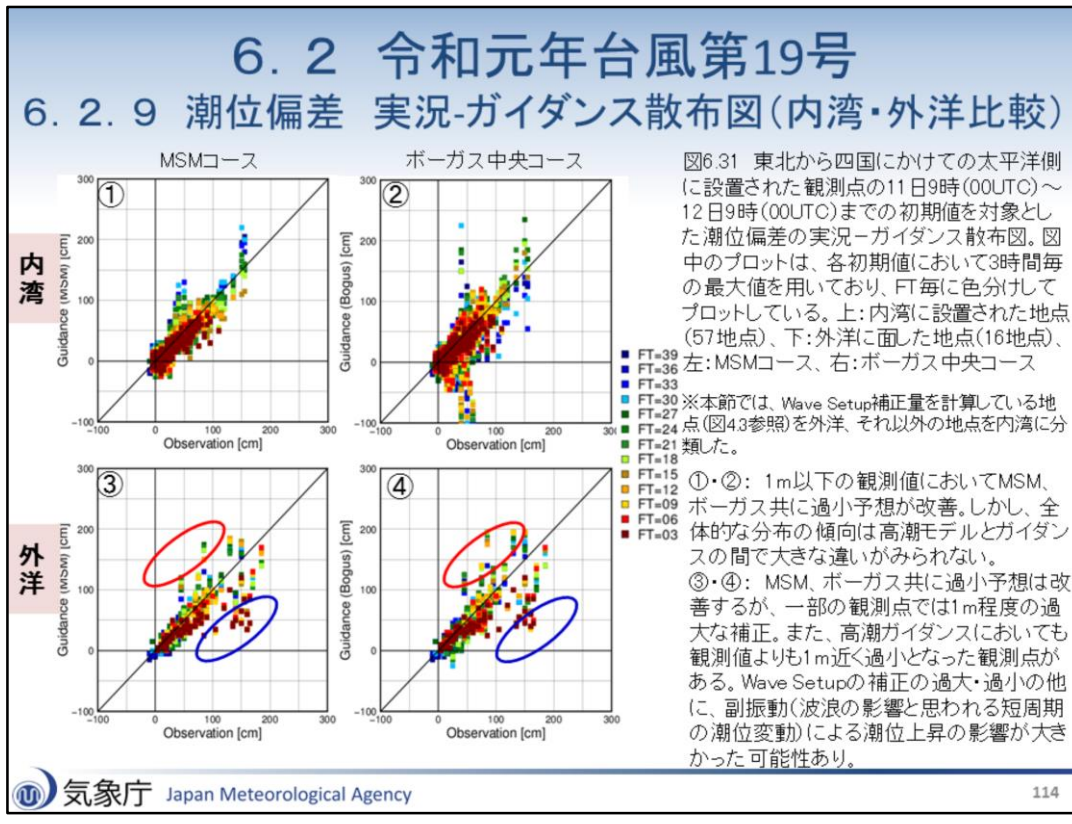
図6.30は、東北から四国にかけての太平洋側に設置された潮位観測点のうち、内湾に設置された57地点及び外洋に面した16地点について、潮位偏差観測値と高潮モデル（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図を示している。上陸前後の11日9時（00UTC）～12日9時（00UTC）の初期値を対象に、各初期値において3時間毎の最大値をプロットしており、予報時間毎に色分けしている。

本節では、Wave Setup補正量を計算している地点（図4.3参照）を外洋、それ以外の地点を内湾に分類した。

①に示したように、内湾に設置された地点を対象としたMSMコースによる予想では、FTが大きい場合は過大予想となっているが、FTが小さくなるに伴い予測と観測は概ね一致していた。

一方、②に示したように、内湾に設置された地点を対象としたボーガス中央コースによる予想では、FTが大きい場合は予想と観測とのずれが大きく、過大・過小の傾向がみられるが、FTが小さい場合は比較的観測に近い予想となっている。

③・④に示したように、外洋に面した地点を対象とした予想では、MSMコース、ボーガス中央コースともにほとんどが過小予想であり、FTが小さい場合も変わらない。海況要因やWave Setupが大きかったと考えられる。



６．２　令和元年台風第19号

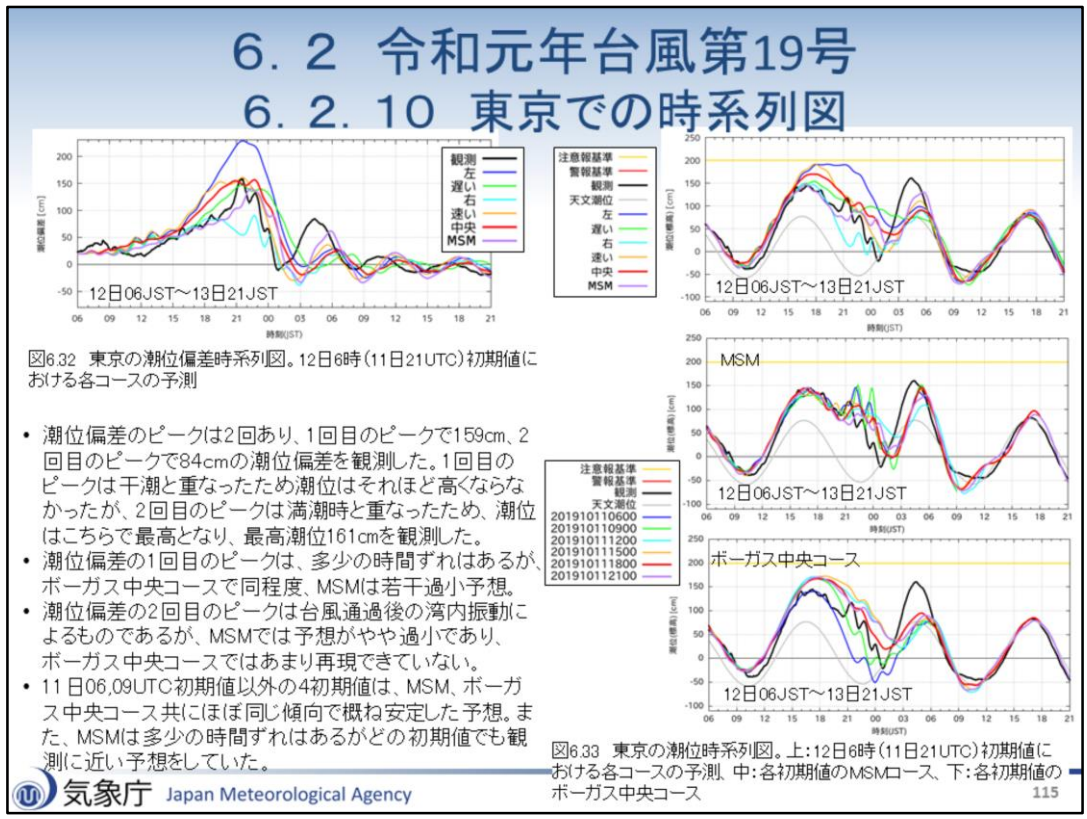
６．２．９　潮位偏差　実況-ガイダンス散布図（内湾・外洋比較）

図6.31は、東北から四国にかけての太平洋側に設置された潮位観測点のうち、内湾に設置された57地点及び外洋に面した16地点について、潮位偏差観測値と高潮ガイダンス（MSMコース、ボーガス中央コース）により計算された潮位偏差の散布図を示している。上陸前後の11日9時（00UTC）～12日9時（00UTC）の初期値を対象に、各初期値において3時間毎の最大値をプロットしており、予報時間毎に色分けしている。

本節では、Wave Setup補正量を計算している地点（図4.3参照）を外洋、それ以外の地点を内湾に分類した。

①・②に示したように、内湾に設置された地点の高潮ガイダンスの結果では、1m以下の観測値においてMSM、ボーガスともに過小予想の改善がみられる。しかし、全体的な分布の傾向は高潮モデルとガイダンスの間で大きな違いがみられない。

③・④に示したように、外洋に面した地点の高潮ガイダンスの結果では、MSM、ボーガス共に過小予想の改善がみられるが、一部の観測点では赤丸で示したように1m程度の過大な補正がなされており、Wave Setupの補正が過大に施された可能性がある。また、青丸で示したように、高潮ガイダンスにおいても観測値よりも1m近く過小となった観測点がみられ、Wave Setupの補正が過小であった他に、高潮モデル・ガイダンスで考慮していない副振動（波浪の影響と思われる短周期の潮位変動）による潮位上昇の影響が大きかった可能性がある。



６．２　令和元年台風第19号

６．２．１０　東京での時系列図

東京の潮位偏差時系列を図6.32に、潮位時系列を図6.33にそれぞれ示す。

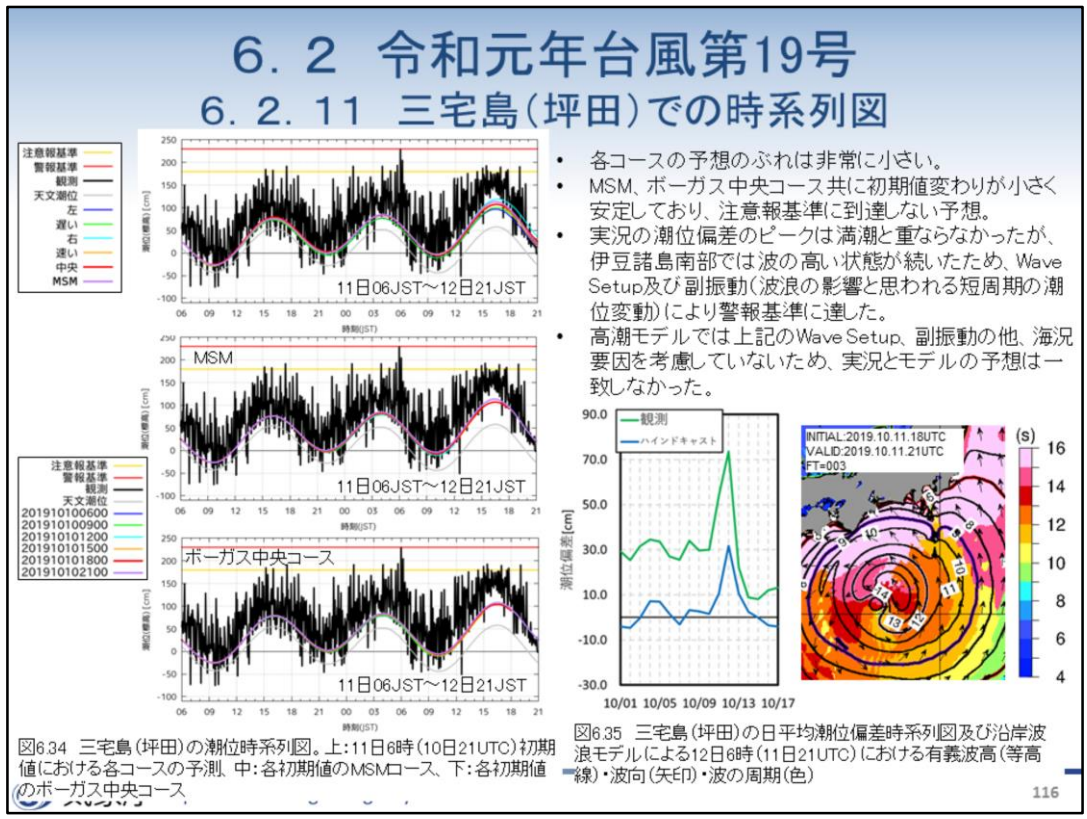
実況では、潮位偏差のピークは2回あり、台風第19号の接近によって1回目のピークである潮位偏差159cm、台風通過後の副振動によって2回目のピークである潮位偏差84cmを観測した。（詳細は6.2.15（特記事項1）を参照。）1回目のピークは干潮と重なったため潮位はそれほど高くならなかったが、2回目のピークは満潮時と重なったため、潮位はこちらで最高となり、最高潮位161cmを観測した。

潮位偏差の1回目のピークは、多少の時間ずれはあるが、ボーガス中央コースではほぼ同程度であり、MSMコースは若干過小の予想であった。

潮位偏差の2回目のピークは、モデルは実況よりも遅い時刻に発生を予想しており、予想した潮位もMSMコースでは実況よりやや過小、ボーガス中央コースではあまり再現できていなかった。

台風進路予報では、11日06UTC初期値は東京検潮所の南東を、11日09UTC初期値は東京検潮所付近を、それ以外の4初期値は東京検潮所の北西をそれぞれ通過していたことから、潮位予測においても11日06、09UTC初期値以外の4初期値は、MSMコース、ボーガス中央コース共にほぼ同じ傾向がみられ概ね安定した予想となっている。

MSMコースをみると、多少の時間ずれはあるがどの初期値でも観測に近い予想をしていた。また、ボーガス中央コースをみると、11日06及び09UTC初期値の予測が他の初期値と比べて過小となっていた。（詳細は6.2.13及び6.2.14を参照。）



６．２　令和元年台風第19号

６．２．１１　三宅島（坪田）での時系列図

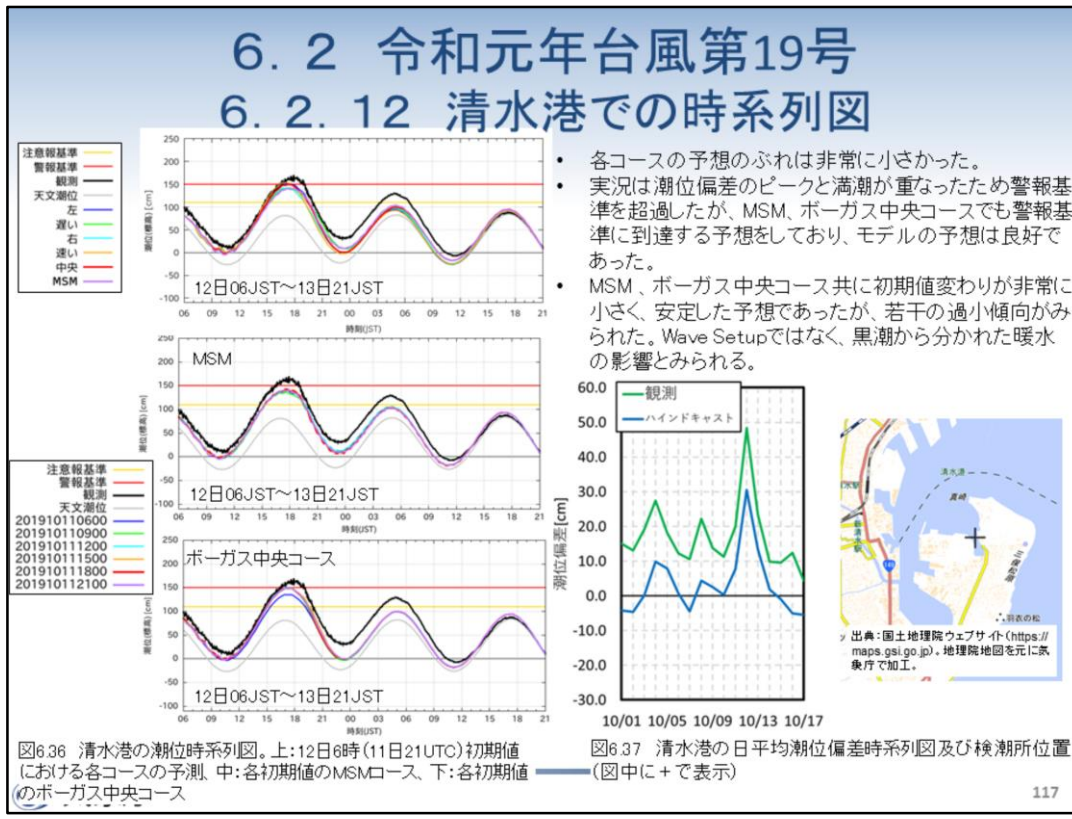
三宅島（坪田）の潮位時系列を図6.34に示す。実況では、最大潮位偏差201cm、最高潮位230cmを観測し、過去最高潮位となった。

コースの違いに着目すると、各コースの予想のぶれは小さい。また、MSMコース、ボーガス中央コース共に初期値変わりが非常に小さく安定しており、注意報基準に到達しない予想となっている。

しかし、実況は、図6.35に示したように伊豆諸島南部で波の高い状態が10日午後以降続いたため、潮位偏差のピークは満潮と重ならなかったが、Wave Setupによる潮位上昇と副振動（波浪の影響と思われる短周期の潮位変動）により、12日6時頃に警報基準に達した。

また、三宅島（坪田）では付近を黒潮が流れており、台風接近前から潮位実況はハインドキャストよりも30cm程度高い状態で推移していた。

そのため、台風第19号の接近・通過時は、その期間を通して実況と高潮モデルの予想は一致しなかった。（詳細は6.2.16（特記事項2）を参照。）



６．２　令和元年台風第19号

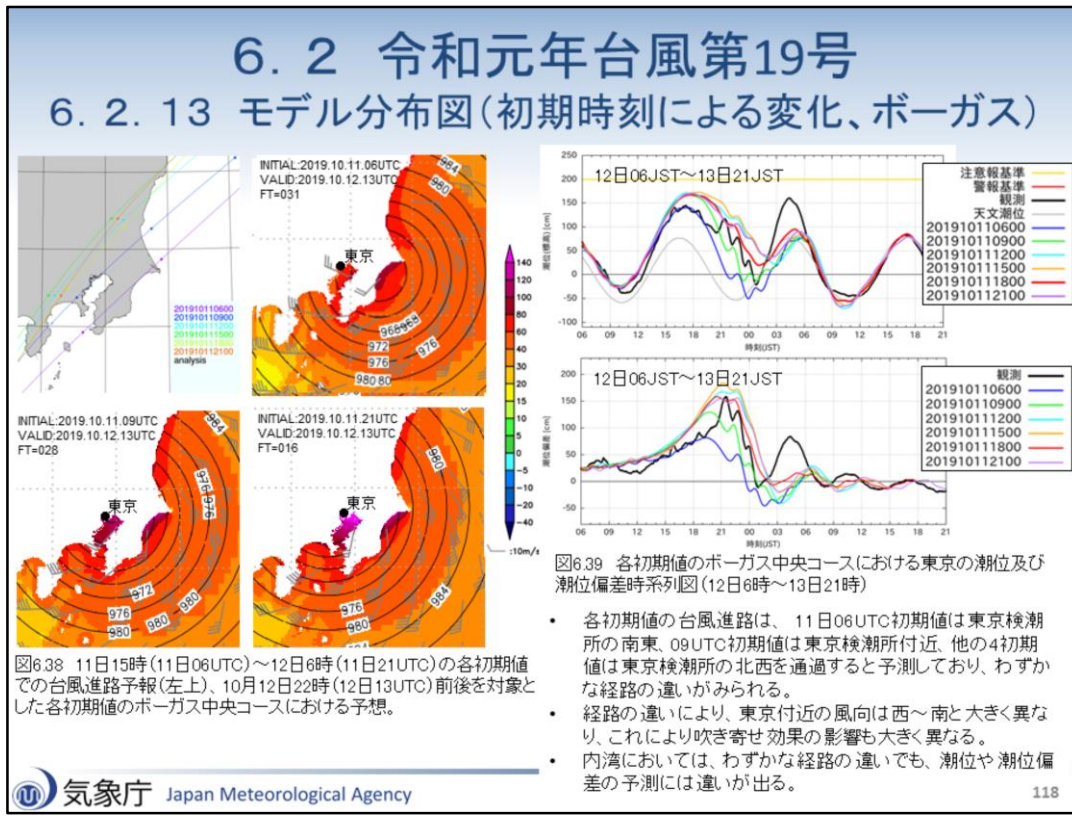
６．２．１２　清水港での時系列図

清水港の潮位時系列を図6.36に示す。実況では、最大潮位偏差104cm、最高潮位170cmを観測し、過去最高潮位となった。

コースの違いに着目すると、各コースの予想のぶれは非常に小さい。実況は潮位偏差のピークと満潮が重なったため警報基準を超過したが、MSMコース、ボーガス中央コース共に警報基準に到達する予想をしており、モデルの予想は良好であった。

また、MSMコース、ボーガス共に初期値変わりが非常に小さく、安定した予想であったが、若干の過小傾向がみられた。

図6.37に示したように、清水港は検潮所の外洋に面している方向が高い波が来る方向と異なっているため、検潮所近傍に高い波が進入することは難しい。また、10月の東海地方沿岸の潮位は黒潮から分かれた暖水の影響があり、台風接近前における清水港の潮位実況はハインドキャストよりも10～20cm程度高い状態で推移していた。そのため、この予測の過小傾向はWave Setupではなく、黒潮から分かれた暖水の影響とみられる。（参考：日本沿岸の月平均潮位の変動　診断（2019年10月）
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/archive/c_1/sl_monthly/2019/10/sl_monthly.html）



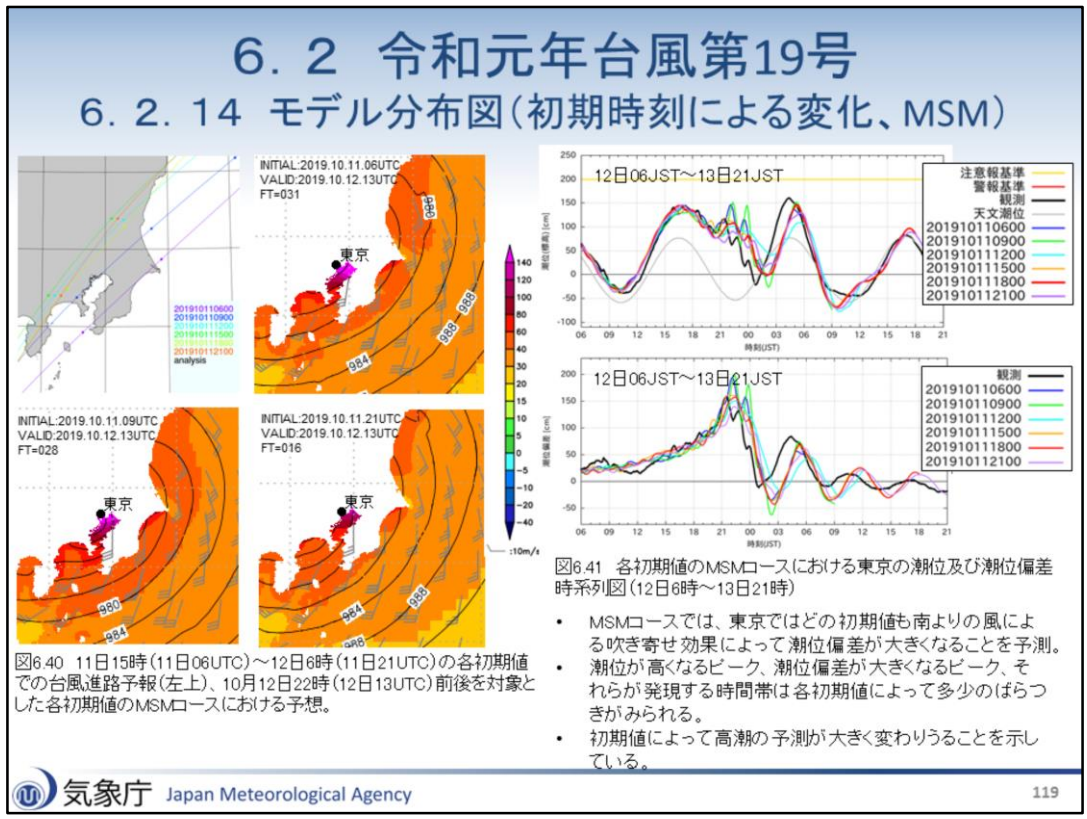
6．2　令和元年台風第19号

6．2．13　モデル分布図（初期時刻による変化、ボーガス）

図6.38は、11日15時（11日06UTC）～12日6時（11日21UTC）の各初期値での台風進路予報と、東京における最大潮位偏差が予想された10月12日22時（12日13UTC）の各初期値のボーガス中央コースにおける高潮モデル分布図である。

各初期値の台風進路をみると、11日06UTC初期値は東京検潮所の南東、09UTC初期値は東京検潮所付近、12UTC以降の4初期値はほぼ同じ経路であるが東京検潮所の北西を通過する予測となっており、わずかな経路の違いがみられる。この経路の違いにより、06UTC初期値では西よりの風、09UTC初期値では南西風、12UTC以降の初期値は南よりの風による吹き寄せ効果によって潮位偏差が大きくなることを予測している。

東京湾は南に開いていることから、12UTC以降の初期値で予測された東京の潮位や潮位偏差の値は、他の2初期値と比較して大きな値となっている。（図6.39参照。）このことは、わずかな経路の違いでも、内湾における潮位や潮位偏差の予測には違いが出ることを示している。



6．2　令和元年台風第19号

6．2．14　モデル分布図（初期時刻による変化、MSM）

図6.40は、11日15時（11日06UTC）～12日6時（11日21UTC）の各初期値での台風進路予報と、東京における最大潮位偏差が予想された10月12日22時（12日13UTC）の各初期値のMSMコースにおける高潮モデル分布図である。

ボーガス中央コースと異なり、MSMコースでは、東京ではどの初期値も南よりの風による吹き寄せ効果によって潮位偏差が大きくなることを予測している。しかしながら、図6.41に示したように、潮位が高くなるピーク、潮位偏差が大きくなるピーク、それらが発現する時間帯は各初期値によって多少のばらつきがみられる。これは、初期値によって高潮の予測が大きく変わりうることを示している。

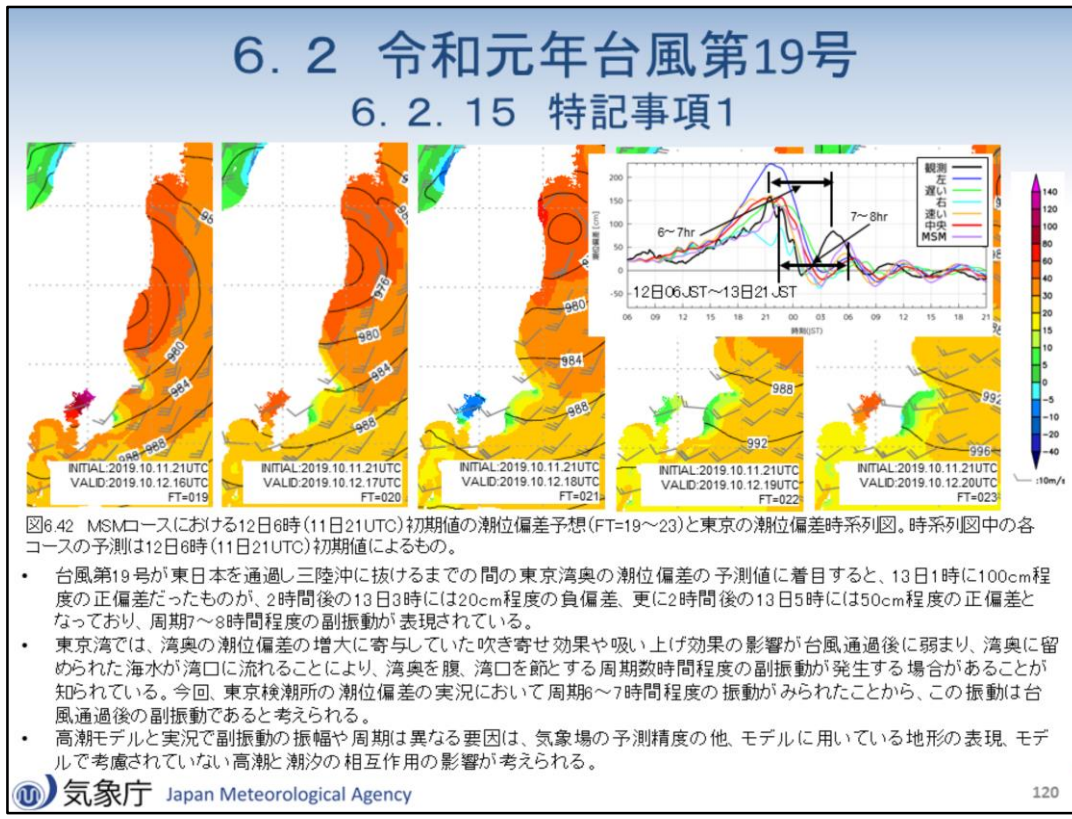


図6.42　MSMコースにおける12日6時（11日21UTC）初期値の潮位偏差予想（FT=19～23）と東京の潮位偏差時系列図。時系列図中の各コースの予測は12日6時（11日21UTC）初期値によるもの。

- 台風第19号が東日本を通過し三陸沖に抜けるまでの間の東京湾奥の潮位偏差の予測値に着目すると、13日1時に100cm程度の正偏差だったものが、2時間後の13日3時には20cm程度の負偏差、更に2時間後の13日5時には50cm程度の正偏差となっており、周期7～8時間程度の副振動が表現されている。
- 東京湾では、湾奥の潮位偏差の増大に寄与していた吹き寄せ効果や吸い上げ効果の影響が台風通過後に弱まり、湾奥に留められた海水が湾口に流れることにより、湾奥を腹、湾口を節とする周期数時間程度の副振動が発生する場合があることが知られている。今回、東京検潮所の潮位偏差の実況において周期6～7時間程度の振動がみられたことから、この振動は台風通過後の副振動であると考えられる。
- 高潮モデルと実況で副振動の振幅や周期は異なる要因は、気象場の予測精度の他、モデルに用いている地形の表現、モデルで考慮されていない高潮と潮汐の相互作用の影響が考えられる。

6．2　令和元年台風第19号

6．2．15　特記事項1

図6.42に、MSMコースにおける12日6時（11日21UTC）初期値の東京湾の潮位偏差予想を示す。台風第19号が東日本を通過し三陸沖に抜けるまでの間の東京湾奥の潮位偏差の予測値に着目すると、13日1時に100cm程度の正偏差だったものが、2時間後の13日3時には20cm程度の負偏差、更に2時間後の13日5時には50cm程度の正偏差となっており、周期7～8時間程度の副振動が表現されている。

小西（2008）等により、東京湾では、湾奥の潮位偏差の増大に寄与していた吹き寄せ効果や吸い上げ効果の影響が台風通過後に弱まり、湾奥に留められた海水が湾口に流れることにより、湾奥を腹、湾口を節とする周期数時間程度の副振動が発生する場合があることが知られている。今回、東京検潮所の潮位偏差の実況において周期6～7時間程度の振動がみられたことから、この振動は台風通過後の副振動であると考えられる。

高潮モデルと実況で副振動の振幅や周期が若干異なるが、この要因は、気象場の予測精度の他、モデルに用いている地形の表現や、3.2.1でも触れたように、現在の高潮モデルでは副振動を減衰させるような高潮と潮汐の相互作用が考慮されていないことが考えられる。

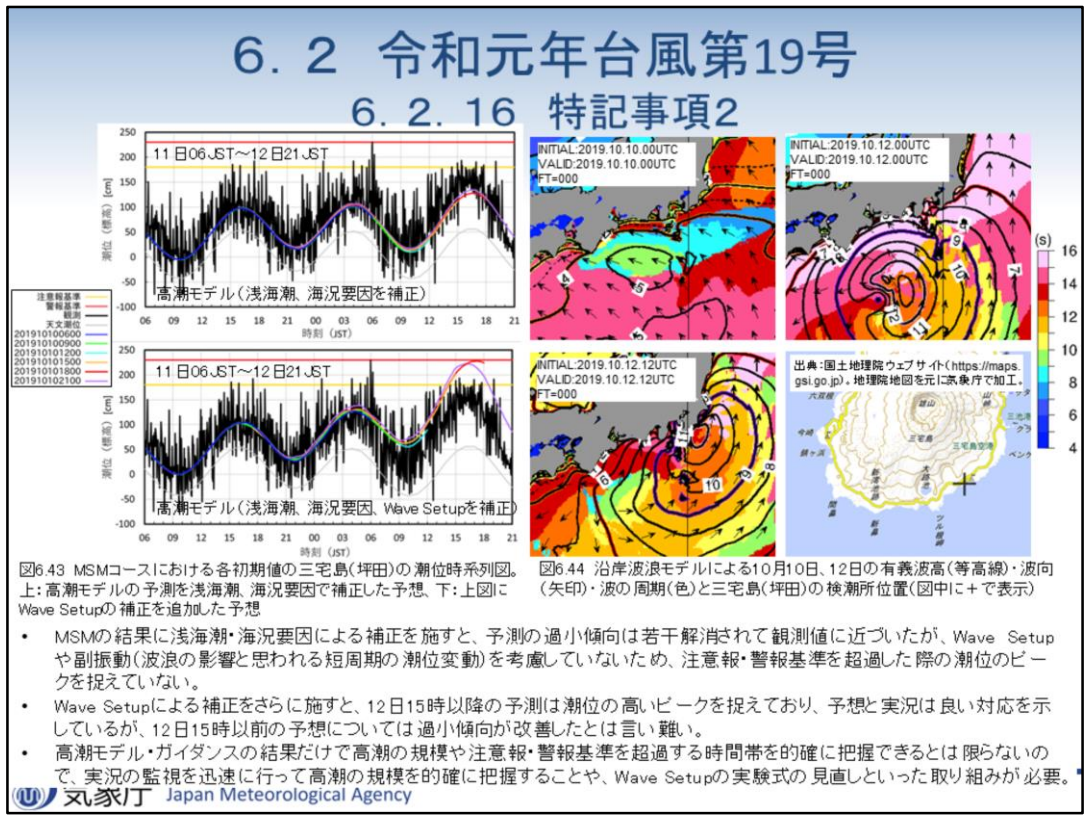


図6.43 MSMコースにおける各初期値の三宅島（坪田）の潮位時系列図。上：高潮モデルの予測を浅海潮、海況要因で補正した予想、下：上図にWave Setupの補正を追加した予想

図6.44 沿岸波浪モデルによる10月10日、12日の有義波高（等高線）・波向（矢印）・波の周期（色）と三宅島（坪田）の検潮所位置（図中に＋で表示）

- MSMの結果に浅海潮・海況要因による補正を施すと、予測の過小傾向は若干解消されて観測値に近づいたが、Wave Setupや副振動（波浪の影響と思われる短周期の潮位変動）を考慮していないため、注意報・警報基準を超過した際の潮位のピークを捉えていない。
- Wave Setupによる補正をさらに施すと、12日15時以降の予測は潮位の高いピークを捉えており、予想と実況は良い対応を示しているが、12日15時以前の予想については過小傾向が改善したとは言い難い。
- 高潮モデル・ガイダンスの結果だけで高潮の規模や注意報・警報基準を超過する時間帯を的確に把握できるとは限らないので、実況の監視を迅速に行って高潮の規模を的確に把握することや、Wave Setupの実験式の見直しといった取り組みが必要。

6．2 令和元年台風第19号

6．2．16 特記事項2

図6.43は、三宅島（坪田）について、高潮モデル（MSMコース）の予想結果と、その予想に海況要因、浅海潮、Wave Setupの影響を補正した図を示している。

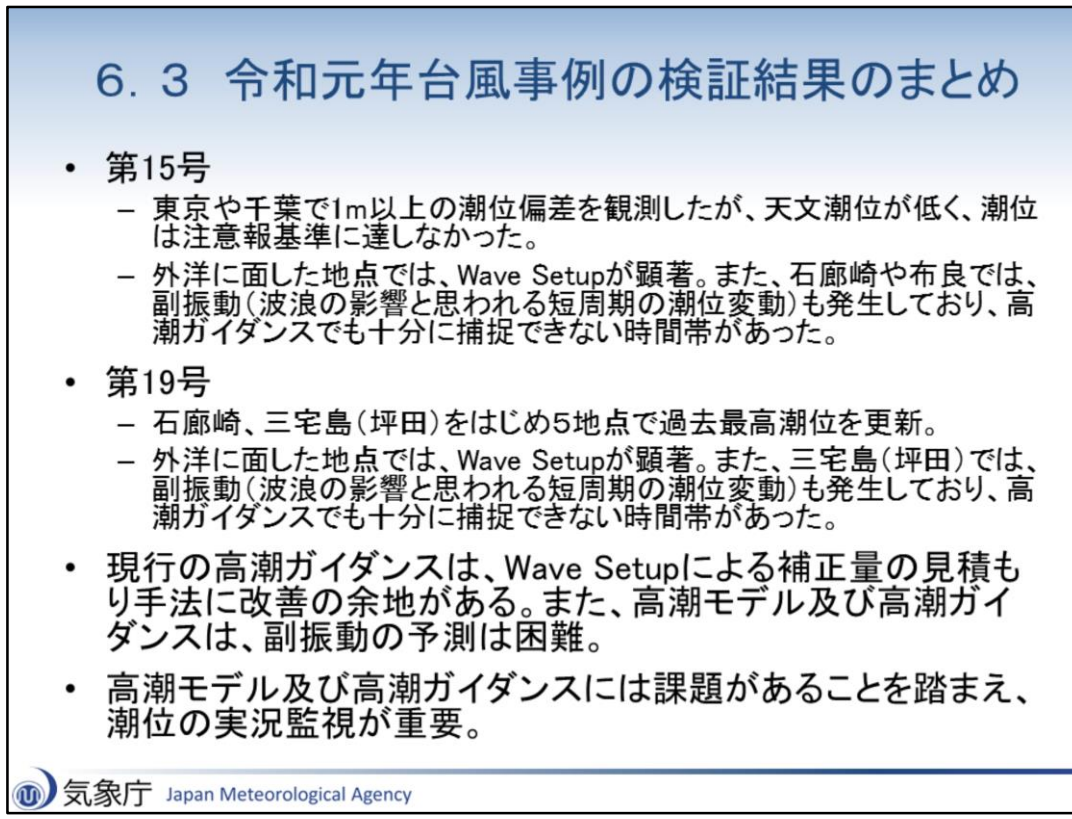
MSMコースの結果に浅海潮・海況要因による補正を施すと、予測の過小傾向は若干解消されて観測値に近づいたが、Wave Setupや副振動（波浪の影響と思われる短周期の潮位変動）を考慮していないため、注意報・警報基準を超過した際の潮位のピークを捉えていない。

また、Wave Setupによる補正をさらに施すと、12日15時以降の予測は潮位の高いピークを捉えており、予想と実況は良い対応を示しているが、12日15時以前の予想については過小傾向が改善したとは言い難い。

沿岸波浪モデルによって得られた10月10日～12日にかけての伊豆諸島近海の波の状況を図6.44に示す。伊豆諸島南部では、10月10日～11日にかけて、台風第19号の接近によって南東～南方向からの風浪により波が高くなり、12日に入ってもこの状態が続いた。台風第19号が三宅島付近を通過した後、12日夜頃から南西方向からの波が入り、13日にかけて波の高い状態が解消し始めた。南西方向からの波が入っている時間帯は、Wave Setupによる補正を施した予測と実況が良い対応を示した12日15時以降と良い対応をしている。

三宅島（坪田）は検潮所が島の南東に位置していることから、南西方向からの波と南～南東方向の波では波の入りやすさが異なる。三宅島（坪田）のWave Setupを見積もる現在の実験式は波向きを考慮せずに求めた近似式であることから、波向きによって精度が異なる可能性がある。この事例で考えると、12日15時以前の南～南東方向からの波（波が入りやすい方向からの波）によって生じたWave Setupは実際よりも過小に、12日15時以降の南西方向からの波（波が入りにくい方向からの波）によって生じたWave Setupは実際よりも過大に見積もっていた可能性がある。この事例のようにWave Setupの見積もりには課題があるため、今後は、最新のデータを元に、沿岸波浪モデルスペクトルを利用してWave Setupにおける波向きの影響を調査し、その内容を元に実験式の見直しといった取り組みを行う予定である。

また、現在の高潮モデル及びガイダンスでは、副振動（波浪の影響と思われる短周期の潮位変動）の予測は困難である。この事例のように、モデルやガイダンスの結果だけで高潮の規模や注意報・警報基準を超過する時間帯を的確に把握できるとは限らないので、実況の監視を迅速に行い、高潮の規模を把握することが重要である。



6．3　令和元年台風事例の検証結果のまとめ

本節で説明した2つの事例検証の結果についてまとめる。

まず、台風第15号では、東京や千葉で、1m超の潮位偏差が観測されたが、天文潮位が低い時間帯にあり、潮位は注意報基準にも達しなかった。外洋に面した地点では、Wave Setupが顕著であり、高潮モデルでは全体的に過小予測となっていた。また、高潮ガイダンスでも、過小予測が改善されていない地点があった。さらに、石廊崎や布良では、潮位がピークとなる時間帯で、副振動（波浪の影響と思われる短周期の潮位変動）も発生しており、高潮ガイダンスでも十分に捕捉できない時間帯があった。

次に、台風第19号では、石廊崎、三宅島（坪田）をはじめ気象庁観測の5地点で過去最高潮位を更新する顕著な高潮が発生した。15号時と同様、外洋に面した地点では、Wave Setupが顕著であり、高潮モデルでは全体的に過小予測となっていた。また、高潮ガイダンスでも、過小予測が改善されていない地点があった。さらに三宅島（坪田）では、潮位がピークとなる時間帯で、副振動（波浪の影響と思われる短周期の潮位変動）も発生しており、高潮ガイダンスでも十分に捕捉できない時間帯があった。

現行の高潮ガイダンスは、Wave Setupの実験式で波向きを考慮していないなど、Wave Setup補正量の見積もり手法に課題があり、改善の余地がある。また、高潮モデル及び高潮ガイダンスでは、副振動の予測は困難である。これらの理由から、両事例とも、一部の地点で過小予測となったと考えられる。

このように、現行の高潮モデル及び高潮ガイダンスには課題があることを踏まえ、ある程度潮位の予想に幅を持たせた対応をとるとともに、潮位の実況監視に留意することも重要である。本節及び5節で述べた個別事例の検証の結果と、3節及び4節で説明した長期間の統計検証の結果を踏まえ、次の7節にて、高潮モデル・ガイダンスの解釈のポイントを解説する。

なお、気象庁では現在、Wave Setup実験式の改善に係る取組を進めている。詳細は8節を参照。

参考文献

■ 小西, 2008: 2004年台風第22号による東京湾の高潮と副振動, 海と空, 83-4, 141-150.

7. 高潮モデル・ガイダンス解釈のポイント

気象庁 Japan Meteorological Agency

７．１　予報作業での利用上の留意点
７．１．１　最新の高潮ガイダンスを利用

- 高潮ガイダンスは3時間毎（※）に更新されるので最新の予測資料を用いる。
  ※高潮ガイダンスに含まれる補正要因のうち、海況要因は1日4回だけ更新される。
- 高潮ガイダンスは先の予想ほど予測誤差が大きい（3、4節の精度評価参照）。
  - 特に顕著な高潮の場合、12時間以内の予想なら比較的、捕捉率は良いが、13時間以降では捕捉率が低くなる（図7.1）。

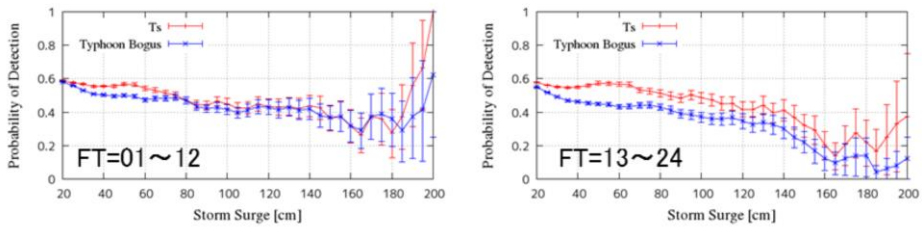


図7.1　高潮ガイダンスによる高潮予測の捕捉率（赤線：MSM、青線：ボーガス中央コース、エラーバーは95％の信頼区間を示す。）図4.15と同じ。

気象庁 Japan Meteorological Agency

７．１　予報作業での利用上の留意点

７．１．１　最新の高潮ガイダンスを利用

予報作業の留意点として、最新の高潮ガイダンスを用いた高潮予報を基本とする。 高潮ガイダンスは1日８回、3時間ごとに更新される。ただし、高潮ガイダンスに含まれる補正要因の一つである海況要因による変動は比較的小さいため、１日４回だけ更新される。高潮ガイダンスは先の予想ほど予測誤差が大きく、特に顕著な高潮の発生が予想される場合、図7.1に示すとおり、12時間以内の予想なら比較的、捕捉率は良いと言えるが、13時間より先の予測では捕捉率が0に近づき、低くなることが分かる。

ただし、顕著な高潮ほど事例数が少なく、エラーバーが大きくなることに注意が必要である。最新の予測を使いつつも、過去初期値の予測からの変動にも注意し、たとえ最新の高潮ガイダンスで予測が下がったとしても、過去初期値の予測で警報基準・過去最高潮位を超える予測であった場合は、その後の予測の変化も引き続き注視する必要がある。

7．1　予報作業での利用上の留意点
7．1．2　MSMを基本とした予報

- 台風時の高潮モデル・高潮ガイダンスのコース選択は、最新の「潮位に関する全般解説資料」等を参考に判断する。
- 「潮位に関する全般解説資料」は、台風時も一般的にはMSMを基本として作成する。MSMの方がボーガス中央コースよりも各種統計スコアが良いため（4節参照）。
  - MSMは地形による摩擦の影響や中緯度における台風構造の変化を表現しているのに対し、台風ボーガスは表現されていない等が理由として考えられる（図7.2）。
- ボーガス中央コースを基本として作成することもある（以下の場合）。
  - MSMと台風の進路予報または強度予報との差が大きい場合

※本考え方は、最新の検証結果等を踏まえ必要に応じて見直しを実施する。

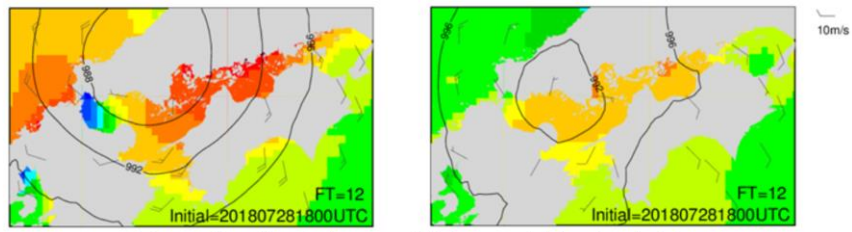


図7.2　ボーガス中央コース（左）とMSM（右）の風・気圧

気象庁 Japan Meteorological Agency

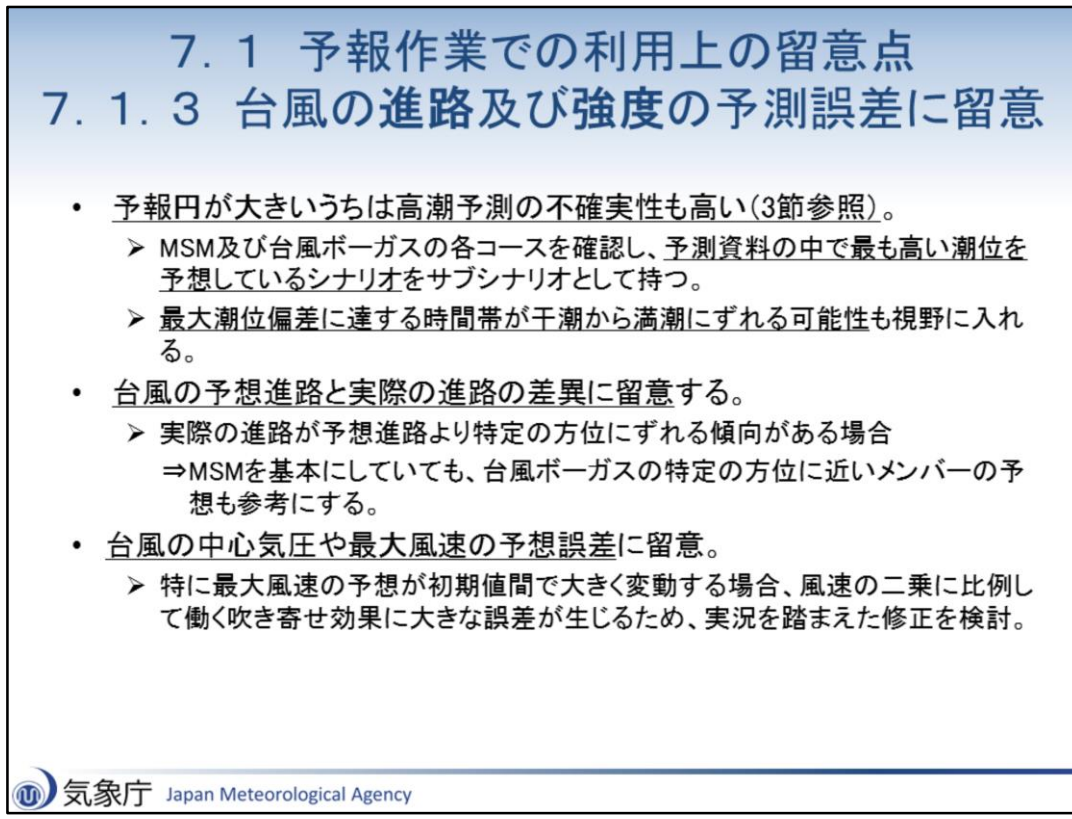
7．1．2　MSMを基本とした予報

台風時、高潮モデル・ガイダンスは複数コースの計算（MSM及び台風ボーガス5コース）を行うが、どのコースの予測を基本とすべきかは、最新の「潮位に関する全般解説資料」や潮位の実況値等を参考に判断すること。

気象庁海洋気象情報室では、台風時も一般的にMSMを基本として、「潮位に関する全般解説資料」を作成する。これは、MSMの方がボーガス中央コースよりも各種統計スコアが良いからである（4節参照）。各種スコアが良い理由としては、図7.2に示すとおり、MSMは地形による摩擦の影響や中緯度における台風構造の変化が適切に表現されているのに対し、高潮モデルの台風ボーガスは表現されていないことが考えれられる。（3.1.6で述べたとおり、方向別粗度長導入により、地形による摩擦の影響の表現は一部改善された。）また、24時間以内に台風ではなくなる場合は、台風ボーガスは台風強度及び移動速度を一定と仮定して値を外挿する（3.1.2参照）。そのため、台風が衰弱して熱帯低気圧に変わる場合は予測が過大となりやすく、逆に、台風が衰弱後に再発達する場合は予想が過小となりやすいことも理由として考えられる。

ただし、MSMと台風の進路予報または強度予報の差が大きい場合には、ボーガス中央コースを基本として、「潮位に関する全般解説資料」を作成する場合もある。

なお、今後も最新の検証結果等を踏まえ、上記考え方は必要に応じて見直しを実施していく予定である。



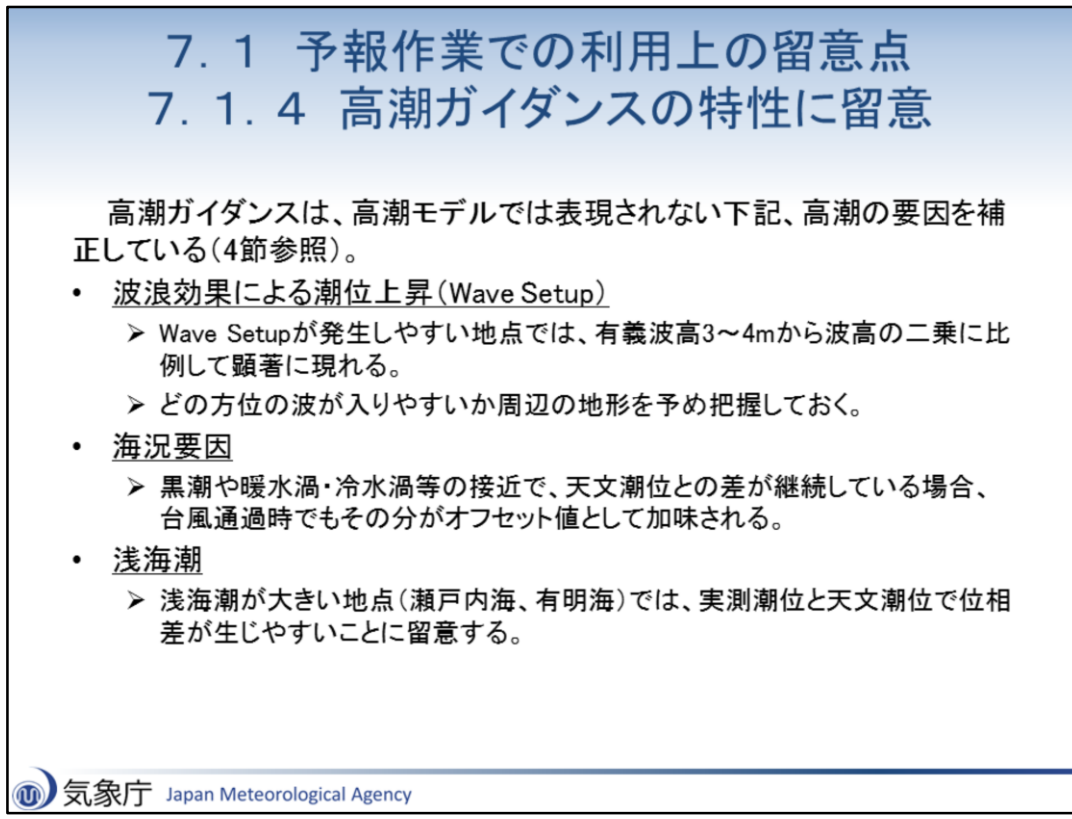
7．1．3　台風の進路及び強度の予測誤差に留意

高潮の予測は台風の進路及び強度の予測誤差に留意する必要がある（3節参照）。台風の進路が少しでも変わると、高潮の要因の一つである吹き寄せ効果が大きく変わる可能性があるため、予報円が大きいうちは高潮予測の不確実性も高いといえる。このため、最も可能性が高い予想シナリオをメインシナリオとして持つ他に、全ての予想資料（MSM及び台風ボーガス5コース）を確認し、最も高い潮位を予測しているシナリオをサブシナリオとして持つことは、防災上の観点から望ましい。2018年の台風第21号による大阪湾の高潮を例として挙げると、台風が大阪湾に最接近する8時間前の予想では、MSMが他のコースに比べ最も実況に近い予想であったが、最接近の20時間前の予想では、MSMに比べて50cm以上も高い潮位を予想していたボーガス中央コースの方が実際の最高潮位を適切に表現できていた。MSMをメインシナリオとして考えても、ボーガス中央コースによる予想をサブシナリオとして持つことは早い段階から台風第21号による高潮の規模を想定できる点からも望ましいといえる（5.2項参照）。

また、満潮時に高潮が重なると、高潮の規模によっては甚大な被害をもたらすおそれがあるため、たとえ基本とするコースにおける高潮のピークが干潮に近い時間帯であっても、他のコースにおける高潮のピークが満潮に近い時間帯に重なる可能性があるならば、それらのシナリオも事前に想定しておくことが望ましい。

さらに、台風の予想進路と実際の進路の差異に留意し、最も実況に合ったメンバーの予想を参考にする。MSMを基本としている場合でも予想資料が更新されるごとに台風の中心が特定の方位にずれる傾向がある場合は、その特定の方位に近い台風ボーガスの予想も参考にする。ただし、3.1項で述べたように、ボーガス周辺コースの予測では台風ボーガスのみを外力として予測を行っているため、ボーガス周辺コースの予測は台風近傍（強風半径の2倍の範囲内）のみ意味のある予測になっていることに注意が必要である。

台風の中心気圧や最大風速の予想誤差にも留意する。特に最大風速の予想が初期値間で大きく変動する場合、風速の二乗に比例する吹き寄せ効果に大きな誤差が生じるため、実況を踏まえた修正を検討する必要がある。



7．1．4　高潮ガイダンスの特性に留意

高潮モデルでは表現されない高潮の要因のうち、波浪効果による潮位上昇（Wave Setup）、海況要因及び浅海潮は高潮ガイダンスでは組み込んでいる（4節参照）。

このうち、Wave Setupは、外洋に面した沿岸や島しょ部で発生することが知られており、過去の観測値から求められた実験式等を使ってWave setupを予測している。Wave setupは台風等で発生した高波（概ね、有義波高3～4m以上）が沿岸に押し寄せる際に顕著に働く現象で、波高の二乗に比例して増大する。現行のWave Setupの実験式では波向きまで考慮していないが、地点ごとにどの方位の波が入りやすいか周辺の地形からあらかじめ把握しておくことも重要である。

次に海況要因については、台風が接近する前から暖水渦あるいは冷水渦等の接近や黒潮流路の変動により天文潮位と実測潮位の間に差が生じていれば、台風が接近・通過する時もその分が高潮による潮位の変化に加算されることに留意する。

最後に、浅海潮による潮位への影響は他の要因に比べると小さいが、瀬戸内海や有明海など浅海潮が大きい湾奥の地点は実測潮位と天文潮位で位相差が生じやすいことに留意する。

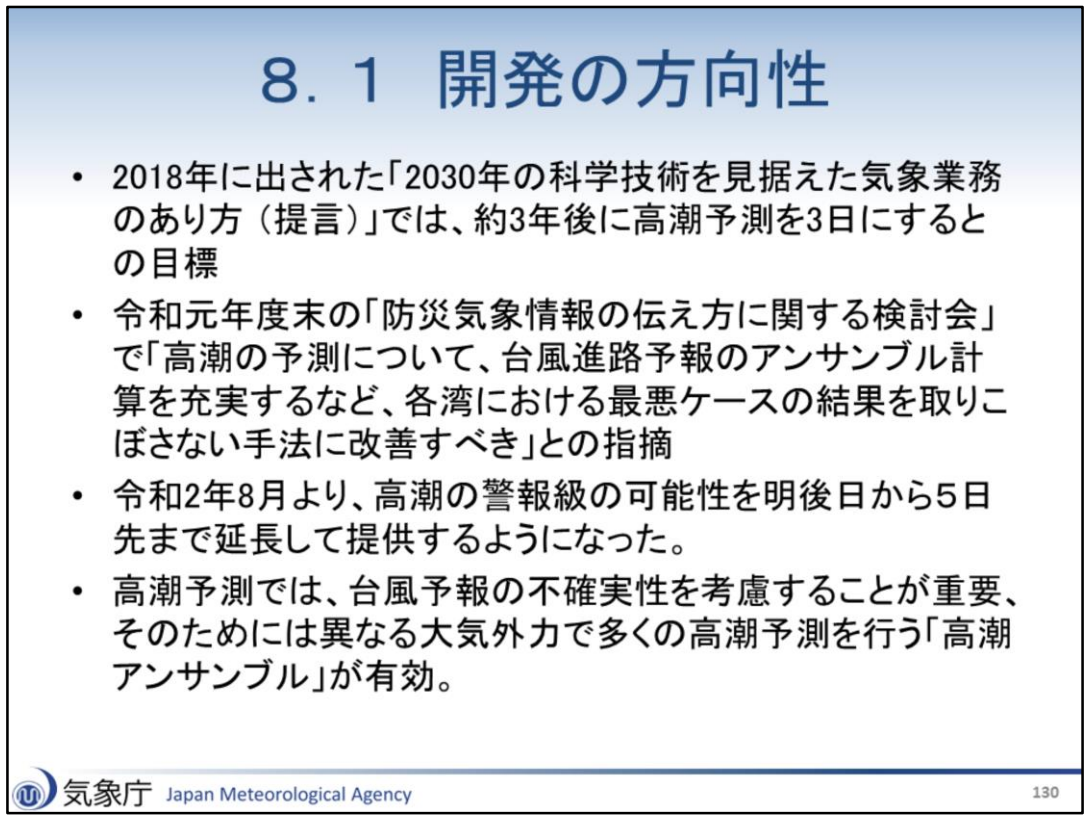
第4節でみたように、高潮ガイダンスは、補正量を含まない高潮モデルと比較し、全体的に予測精度は改善している。一方、第6節でみたように、特にWave Setupの補正については、見積もりが難しいケースもある。また、副振動は、高潮ガイダンスでも必ずしも考慮できず、予測が困難な現象である。これら高潮モデル・高潮ガイダンスの課題を踏まえ、ある程度潮位の予想に幅を持たせた対応をとるとともに、潮位の実況監視に留意することも重要である。

8. 改善に向けて

気象庁 Japan Meteorological Agency

本節では、現在気象庁で検討を進めている、高潮モデル及び高潮ガイダンスの改善に向けた開発課題について紹介する。

本節で紹介する事項は、全て現在検討中のものであり、必ずしも将来の高潮モデル及び高潮ガイダンスでこれらが導入されると決定したわけではないことに留意されたい。



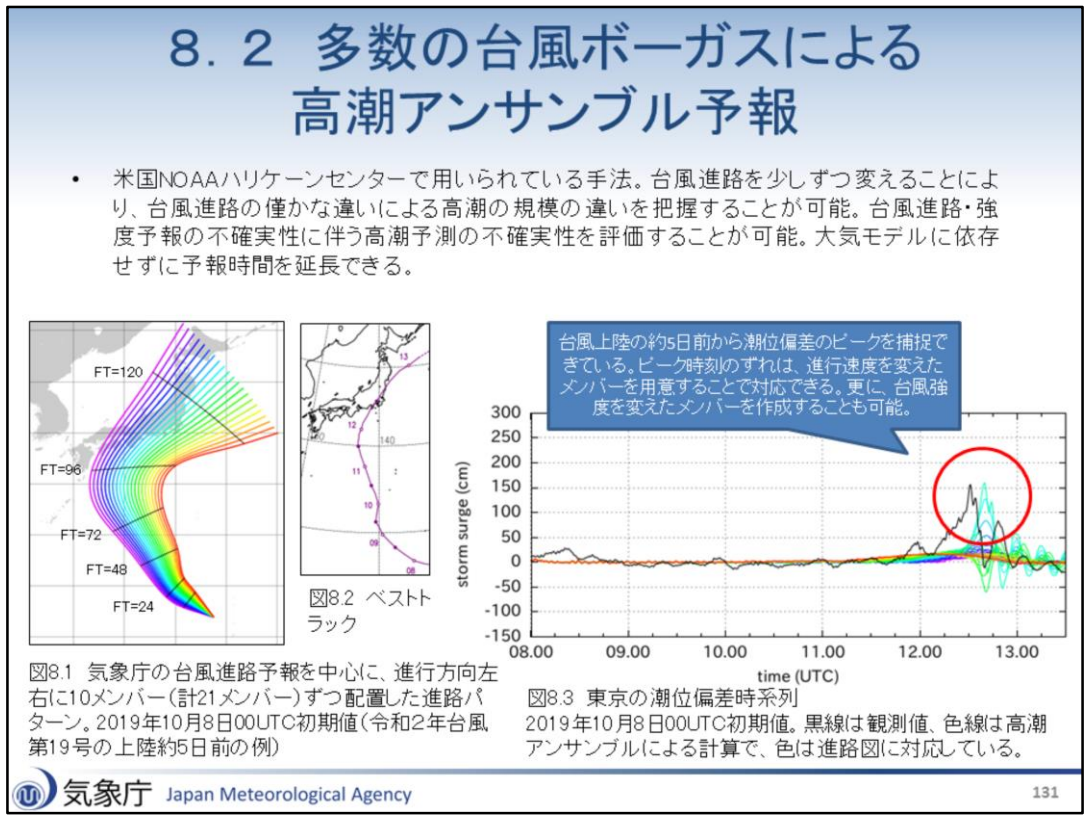
８．１　開発の方向性

ここでは、現在検討されている、今後の高潮予測システムの開発の方向性について述べる。

近年の高潮災害を受けて、気象庁から出される高潮予測情報に対する、改善要望・ニーズが高まってきている。

例えば、平成30年度に出された「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」の提言（https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai_rep.html）では、「約３年後に３日先までの高潮予測を行う」との目標が掲げられている。また、令和元年度の「防災気象情報の伝え方に関する検討会」（https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kentoukai/tsutaekata/tsutaekata_kentoukai.html）では、「高潮の予測について、台風進路予報のアンサンブル計算を充実するなど、各湾における最悪ケースの結果を取りこぼさない手法に改善すべき」、との指摘がなされた。さらに、気象庁では、令和2年8月26日より、高潮の警報級の可能性を明後日から5日先まで延長して提供するようになった。

高潮モデル及び高潮ガイダンスを利用する上で問題となるのは、その初期値における不確実性（誤差幅）の見積もりや、台風進路がわずかにずれた場合の高潮への影響の見積もり、そしてMSMコース・中央コースどちらを採用するか、などであろう。現状のMSMコース＋台風ボーガス5コースという制限の中で、これらをどう判断するかの指針は第7節で示した。気象庁では、これらをより正確かつ量的に判断できるようなプロダクトを提供するため、高潮アンサンブル予測システムの開発を検討している。アンサンブル予測システムの結果を用いることで、不確実性を面的かつ量的に捉えられ、台風進路のわずかなずれが高潮にどう影響するかが分かりやすくなることが期待される。



８．２　多数の台風ボーガスによる高潮アンサンブル予報

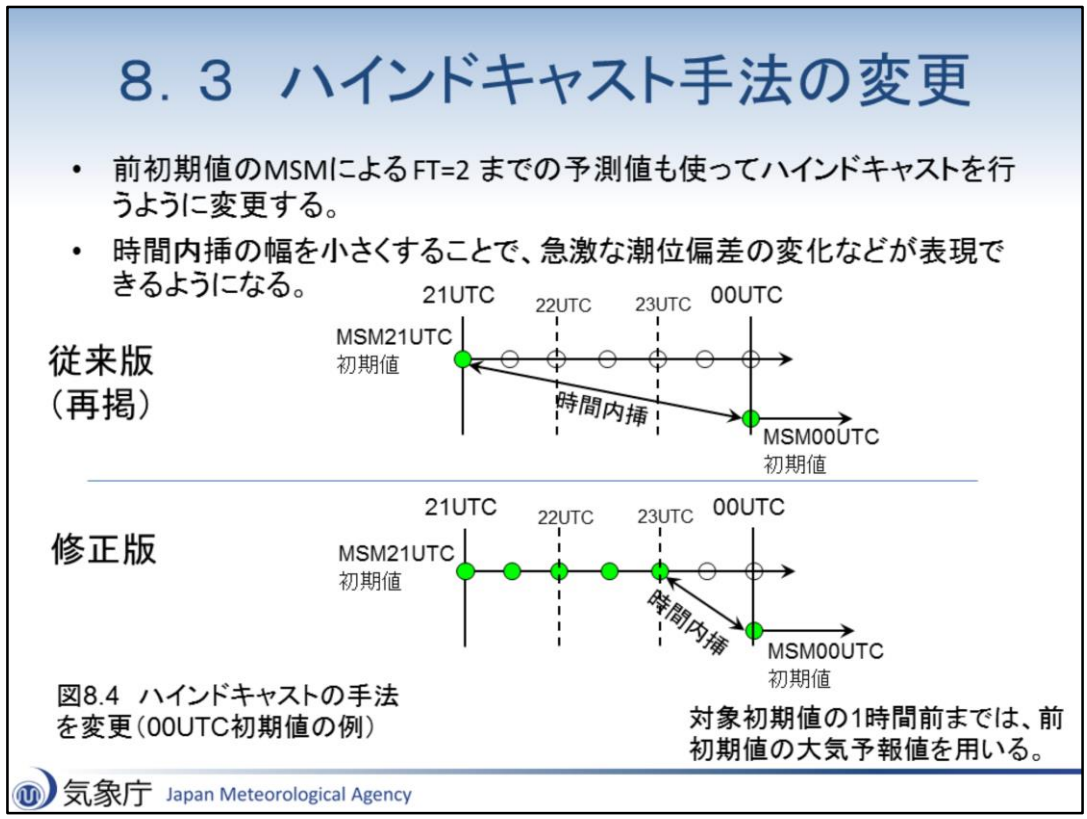
高潮アンサンブル予測システムで用いる大気外力としては、現在の台風ボーガスの手法を元に、台風進路・強度を少しずつ変えた多数のメンバーで高潮計算を行う手法（ボーガスのメンバー数を大幅に増やす）が検討されている。

この手法は、台風進路だけでなく、台風強度や強風半径なども様々に変えて、パターンを数十～百程度まで大幅に増強して確率情報を作成するというものである。これは米国ハリケーンセンターの現業高潮予測モデルSLOSHで導入されている手法で、メンバー間のばらつきを人為的に大きくすることができ、データが膨大かつ計算に時間がかかる大気アンサンブルデータの作成を待たずに高潮モデルの計算を開始できるというメリットがある。

この手法に基づいて開発中の高潮アンサンブル予報の例を示す。図8.1は令和2年台風第19号のときに、気象庁が発表する台風進路予報を中心として、進行方向左右に10メンバーずつ（計21メンバー）配置した進路パターンを示している（2019年10月8日00UTC初期値）。図8.2はベストトラックで、想定された進路パターンでほぼカバーできている。図8.3は東京における潮位偏差時系列であるが、高潮が発生するおよそ5日前の段階で、実況とほぼ同程度の約150cmの高潮が発生する可能性を予測できていたことが分かる。

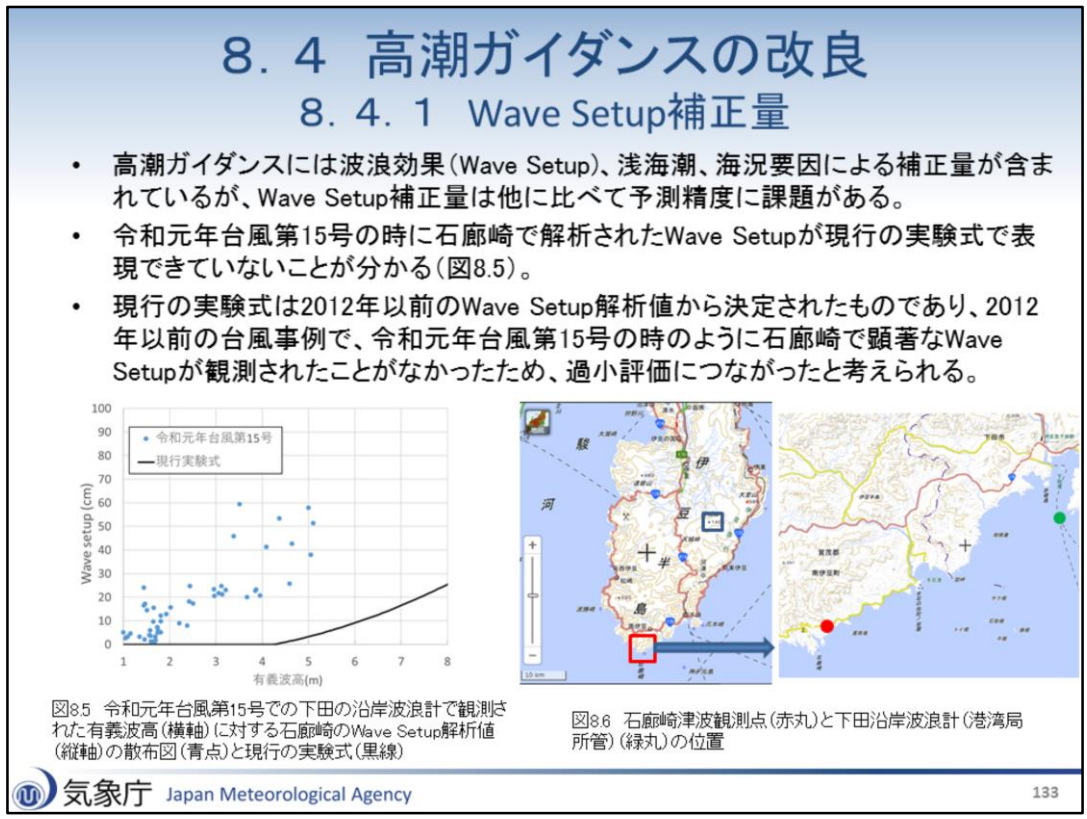
この手法は気象庁が発表する台風進路・強度予報・予報円に依存する。実用化にあたっては、台風の進行速度を変えたメンバー（速い・遅い）も用意して、満潮のタイミングで最大高潮が発生した場合の想定をしたり、台風強度を変えたメンバー（強い・弱い）によって強度予報の不確実性を考慮する、などの使い方が考えられる。

本手法が実現すれば、台風進路を少しずつ変えることにより、台風進路の僅かな違いによる高潮の規模の違いを把握することや、台風進路・強度予報の不確実性に伴う高潮予測の不確実性を評価することが可能になることが期待される。



８．３　ハインドキャスト手法の変更

従来のハインドキャストでは、対象初期値のMSMによるFT=0の予測値と前初期値のMSMによるFT=0の予測値を用いて計算しており、その間の気象場は時間内挿によって得ている。この手法では、内挿期間中に気象場の変化が表現されていても、その情報をハインドキャストに反映することができず、潮位偏差の変化を適切に表現することができない。これを改善するため、前初期値のMSMによる FT=0.0, 0.5, 1,0 1.5, 2.0 の予測値と対象初期値のMSMによる FT=0.0 の 予測値を使って時間積分を行いハインドキャストを作成するよう変更する。これにより、時間内挿の幅が小さくなり、急激な潮位偏差の変化などを表現できるようになる。高潮モデルは自身の初期値への依存性が小さいものの、ハインドキャスト潮位は高潮ガイダンスにおける補正量算出に使われており（4.2節「補正方法3（海況要因）」を参照のこと。）、この変更がガイダンスの精度向上につながると考えられる。



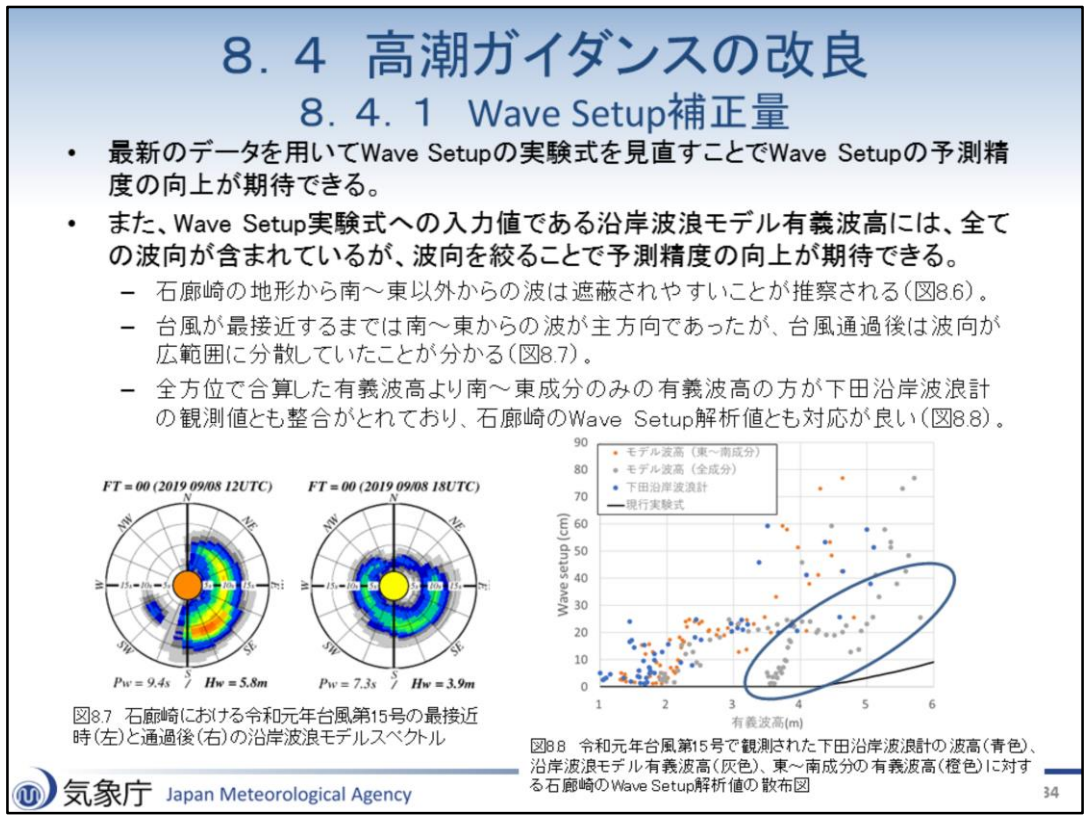
8．4 高潮ガイダンスの改良

8．4．1 Wave Setup補正量

第4節で述べたように、高潮ガイダンスには波浪効果（Wave Setup）、浅海潮、海況要因による補正量が含まれているが、第6節で述べたようにWave Setup補正量は他の補正量に比べて予測精度が高くない。

図8.5は、令和元年台風第15号接近時に下田の沿岸波浪計（港湾局所管）で観測された有義波高（横軸）に対する石廊崎におけるWave Setup解析値（縦軸）の散布図である。ここで、Wave Setup解析値は、石廊崎における実際の観測値（3分平均値）と高潮モデルハインドキャストの差から算出した（石廊崎と下田の位置は図8.6を参照）。この図に示すとおり、石廊崎のWave Setup解析値は現行の実験式では表現できていないことが分かる（図8.5）。

現行の実験式は2012年以前のWave Setup解析値から決定されたものであり、2012年以前の台風事例で、令和元年台風第15号の時のように石廊崎で顕著なWave Setupが観測されたことがなかったため、過小評価につながったと考えられる。



8．4 高潮ガイダンスの改良

8．4．1 Wave Setup補正量

石廊崎だけでなく他の地点においても、最新の顕著事例を用いて各地点におけるWave Setupの実験式を見直すことで、Wave Setupの予測精度の向上が期待できる。

また、現行のWave Setupの実験式は、入力値として沿岸波浪モデルによる有義波高の予測値を用いているが（4.2参照）、この有義波高の予測値には全ての波向が含まれている。

しかし、実際は、地形の影響を受けるため、Wave Setupが効く波向は特定の方向に絞られると考えられる。

このため、波向きを絞って算出した有義波高を実験式に入力することで、Wave Setup補正量の予測精度が向上する可能性がある。

具体的には、石廊崎を例に挙げると、図8.6から石廊崎には南～東以外からの波は地形の影響を受けて遮蔽されやすいことが推察される。

令和元年台風第15号の経路や図8.7の沿岸波浪モデルスペクトルより、台風が石廊崎に最接近するまでは南～東の波が主方向であったのに対し、台風通過後は波向きが広範囲に分散していることが分かる。

図8.8は、図8.5の散布図に石廊崎における全ての波向を合算した沿岸波浪モデル有義波高に対するWave Setup解析値（灰色）と、南～東成分の波だけ合算した有義波高に対するWave Setup解析値（橙色）を重ねた図である。図8.8の青で囲んだ箇所に着目すると、灰色が他の青色や橙色に比べて外れていることが分かる。これは、全ての波向を合算した有義波高よりも波向を南から東成分に絞った方が、実際に下田の沿岸波浪計で観測された有義波高に近いからである。

つまり、地点ごとに遮蔽されやすい波向を除いた上でWave Setup実験式に沿岸波浪モデルの有義波高を代入してWave Setupを算出した方が現実に近いといえる。

8．4　高潮ガイダンスの改良

8．4．2　海況要因の補正量

- 気象庁では、令和2年10月に、日本沿岸監視予測システム（JPNシステム）の運用を開始。JPNシステムを活用し、異常潮位に関する潮位情報に、現象の成因、持続期間や見通しに関する情報を追加する改善を実施。
- 現在の高潮ガイダンスの海況要因補正量は、過去24時間の毎時観測潮位とハインドキャスト潮位の差から算出。39時間の予測時間を通して一定値としており、時間変化を考慮していない。
- JPNシステムを活用して海況要因の補正量を見積もることで、補正量の時間変化を考慮することが可能となり（図8.9）、高潮ガイダンスの精度向上が期待される。海洋気象情報室では現在、技術的な検証を進めている。

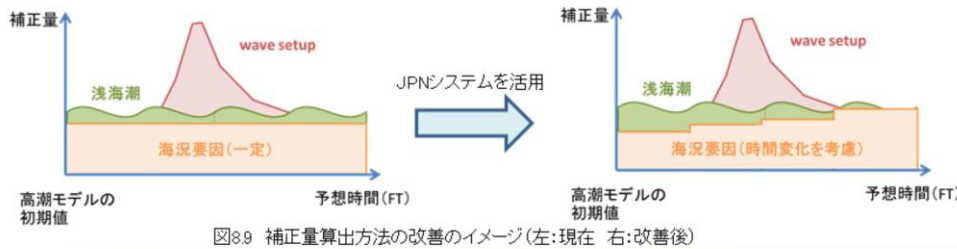


図8.9　補正量算出方法の改善のイメージ（左：現在　右：改善後）

気象庁 Japan Meteorological Agency

8．4　高潮ガイダンスの改良

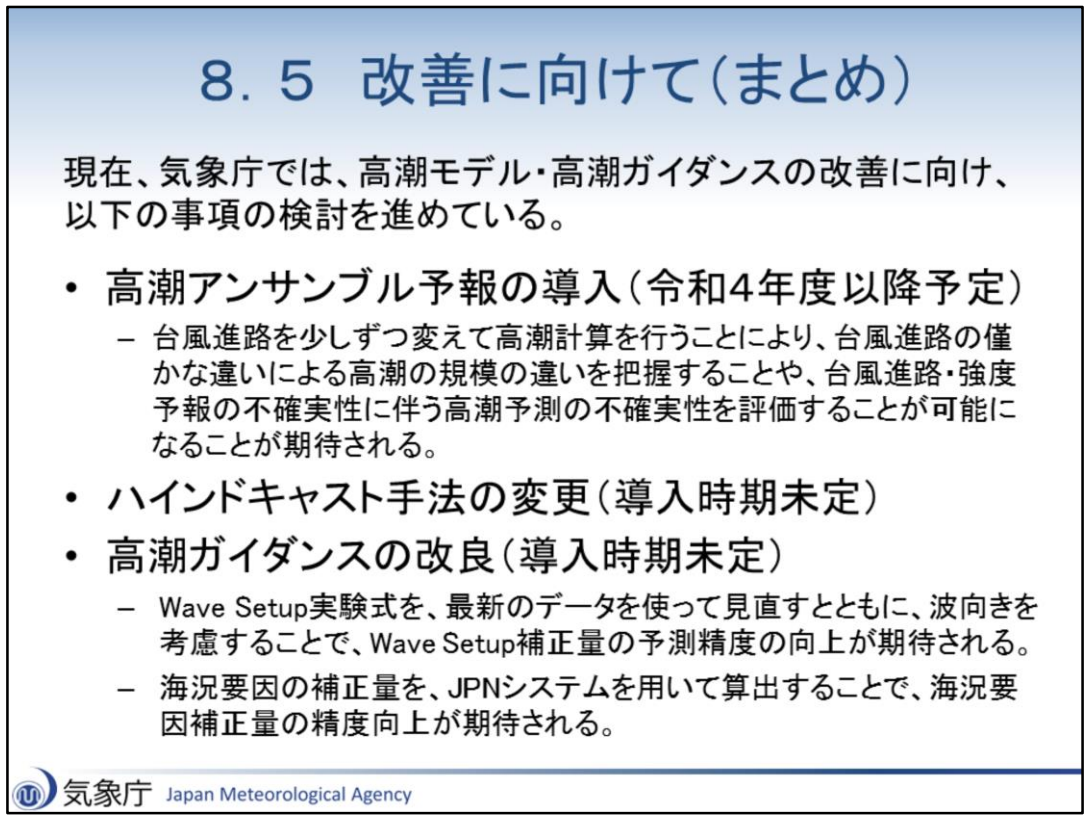
8．4．2　海況要因の補正量

気象庁では、令和2年10月に、沿岸域におけるより詳細な海流・海水温が把握可能な日本沿岸監視予測システム（JPNシステム）の運用を開始した。日本沿岸域の海流や海水温の変動を詳細に予測することで、沿岸の潮位変動の予測が可能となった。JPNシステムの詳細については、「配信資料に関する仕様No.30508（日本沿岸海況監視予測システムGPV）」（https://www.data.jma.go.jp/suishin/shiyou/pdf/no30508）を参照されたい。

JPNシステムを活用することで、一週間程度先までの異常潮位の予測が可能になったことから、気象庁では同年10月に、異常潮位に関する潮位情報に、現象の成因、持続期間や見通しに関する情報を追加する改善を実施した。（参考：令和2年9月30日付配信資料に関する技術情報「異常潮位に関する潮位情報の改善について」https://www.data.jma.go.jp/suishin/jyouhou/pdf/543.pdf）

さて、現在の高潮ガイダンスの海況要因補正量は、4.2項で述べたとおり、過去24時間の毎時観測潮位とハインドキャスト潮位の差から算出している。39時間の予測時間を通して一定値としており、時間変化を考慮していない。一般に、海況要因による潮位の変動はゆっくりであり、また現在の高潮モデルの予測時間も39時間と短いため、補正量を一定としても、ガイダンスの精度に大きな問題はないと考えられる。しかし、今後、高潮モデルの予測期間を延長した場合、海況要因の補正量が一定値のままだと、ガイダンスの精度が先の予測ほど悪化するおそれがある。

そこで、海洋気象情報室では現在、JPNシステムを活用した海況要因補正量の算出について、技術的な検証を進めている。JPNシステムを活用して海況要因の補正量を見積もることで、図8.9に示すイメージのように、補正量の時間変化を考慮することが可能となる。これにより、高潮ガイダンスの精度向上が期待される。



８．５　改善に向けて（まとめ）

本節で説明した高潮モデル及び高潮ガイダンスの改善計画についてまとめる。

まず、高潮アンサンブル予報の導入が挙げられる（8.2参照）。台風進路を少しずつ変えて高潮計算を行うことにより、台風進路の僅かな違いによる高潮の規模の違いを把握することや、台風進路・強度予報の不確実性に伴う高潮予測の不確実性を評価することが可能になることが期待される。導入は令和4年度以降を予定している。

２点目に、ハインドキャスト手法の変更が挙げられる（8.3参照）。これにより、ハインドキャストで急激な潮位偏差の変化などを表現できるようになり、高潮ガイダンスの精度向上につながると考えられる。導入時期は未定である。

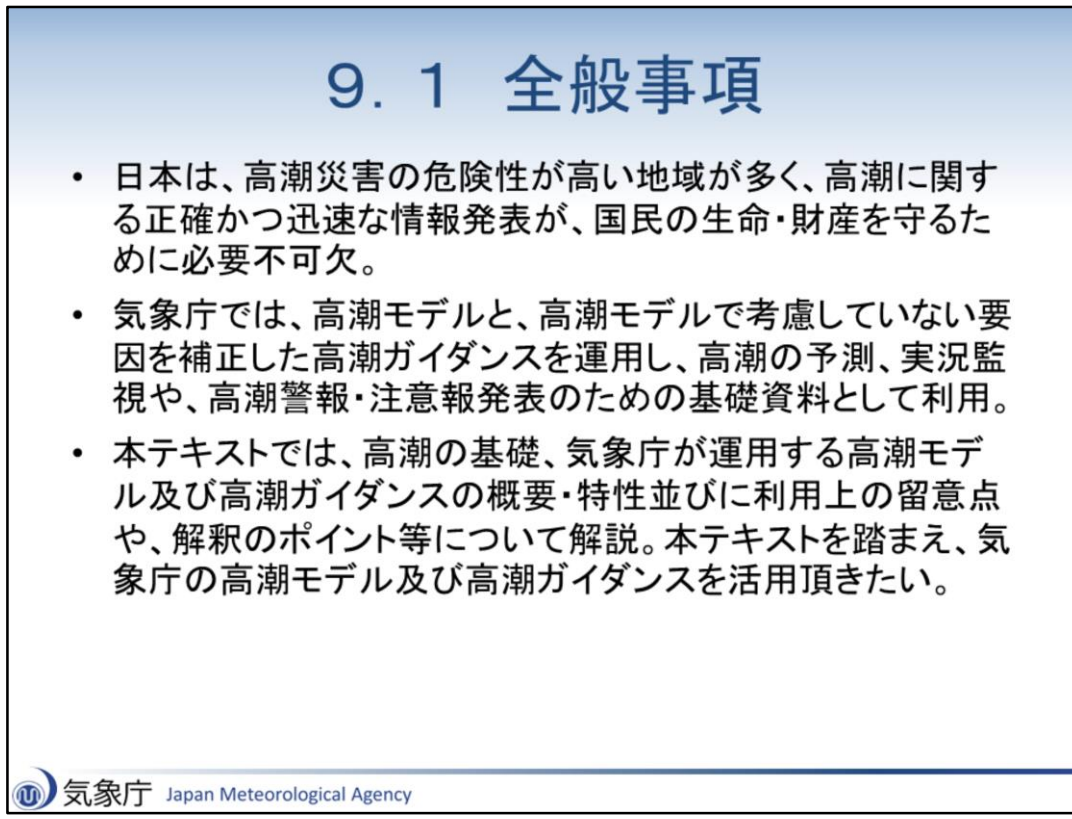
３点目に、高潮ガイダンスの改良が挙げられる（8.4参照）。まず、Wave Setup実験式を、最新のデータを使って見直すとともに、波向きを考慮することで、Wave Setup補正量の予測精度の向上が期待される。次に、JPNシステムを活用して海況要因の補正量を算出することで、補正量の時間変化を考慮することが可能となり、海況要因補正量の精度向上が期待される。いずれも導入時期は未定である。

これら改善計画については、今後も適宜進捗を報告する。なお、冒頭で説明したとおり、本節で紹介した事項は、全て現在検討中のものであり、必ずしも将来の高潮モデル及び高潮ガイダンスでこれらが現業化されると決定したわけではないことに留意されたい。

参考文献

- Usui N et al., 2020: Unusually high sea level at the south coast of Japan in September 2011 induced by the Kuroshio. *Journal of Oceanography.*, https://doi.org/10.1007/s10872-020-00575-1

9. まとめ

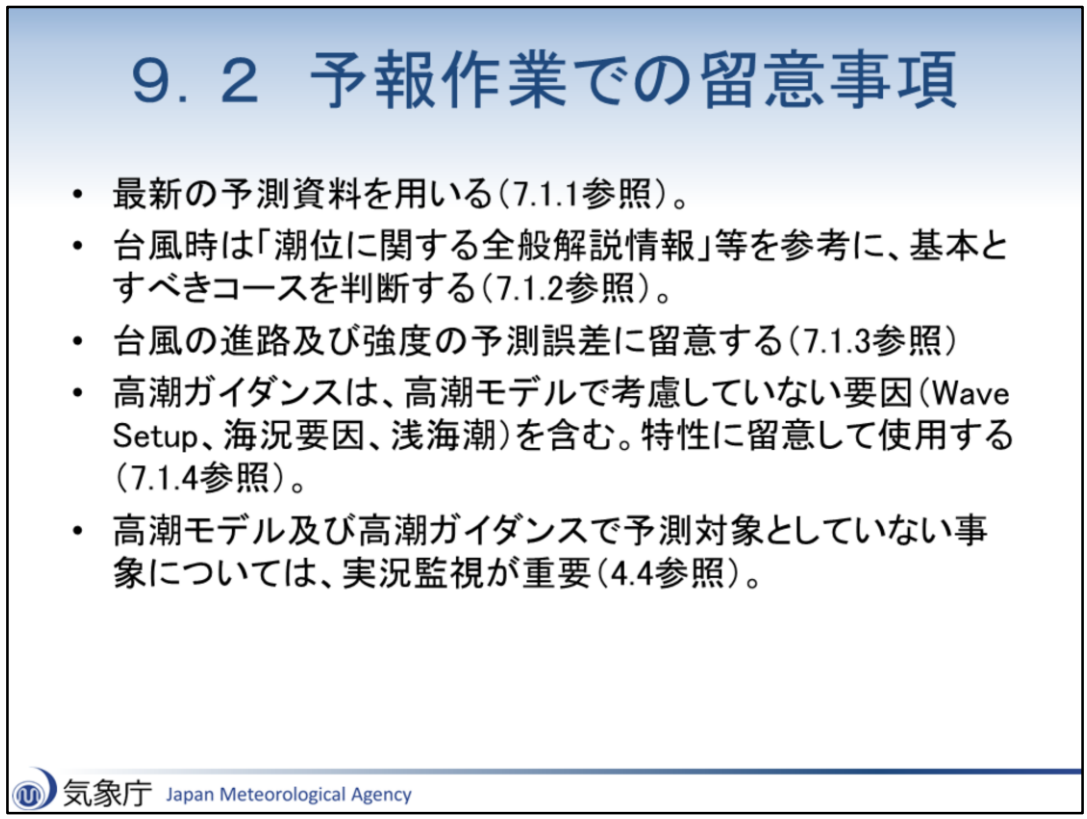


９．１　全般事項

我が国は、水深が浅く南に開いた湾状地形が多く、高潮災害の危険性が高い地域が多い。そのため、高潮に関して正確かつ迅速な情報発表が、国民の生命・財産を守るために必要不可欠のものとなっている。

気象庁では、平成10年7月より高潮モデルの運用を開始し、気象庁が発表する高潮警報・注意報の発表に関する基礎資料として利用してきた。また、高潮モデルで考慮していない要因（波浪効果（Wave Setup）、海況要因、浅海潮）を補正した高潮ガイダンスを運用し、同じく高潮の予測・監視等に活用している。

本テキストでは、高潮の基礎、気象庁が運用する高潮モデル及び高潮ガイダンスの概要・特性並びに利用上の留意点や、解釈のポイント等について解説した。本テキストの内容を踏まえ、気象庁の高潮モデル及び高潮ガイダンスを活用頂きたい。



９．２　予報作業での留意事項

予報作業で高潮モデル・高潮ガイダンスを利用するにあたっての留意事項をまとめる。

まず、予報作業においては、最新の予測資料を用いることを基本とする（7.1.1参照）。高潮モデル及び高潮ガイダンスは1日８回、3時間ごとに更新される。高潮モデル及び高潮ガイダンスは先の予想ほど予測誤差が大きく、捕捉率も低くなるため、最新の予測資料を利用することが望ましい。

次に、台風時は高潮モデル、ガイダンスとも6コースの予測（MSM、ボーガス中央コース及び周辺コース×４）を行うが、どのコースを基本とすべきかは、最新の「潮位に関する全般解説資料」や潮位の実況値等も参考に判断すること（7.1.2参照）。気象庁海洋気象情報室では、台風時も一般的に、最も各種統計スコア（捕捉率等）が良いMSMを基本として「潮位に関する全般解説資料」を作成する。ただし、MSMと台風の進路予報または強度予報の差が大きい場合には、ボーガス中央コースを基本として作成する場合もある。

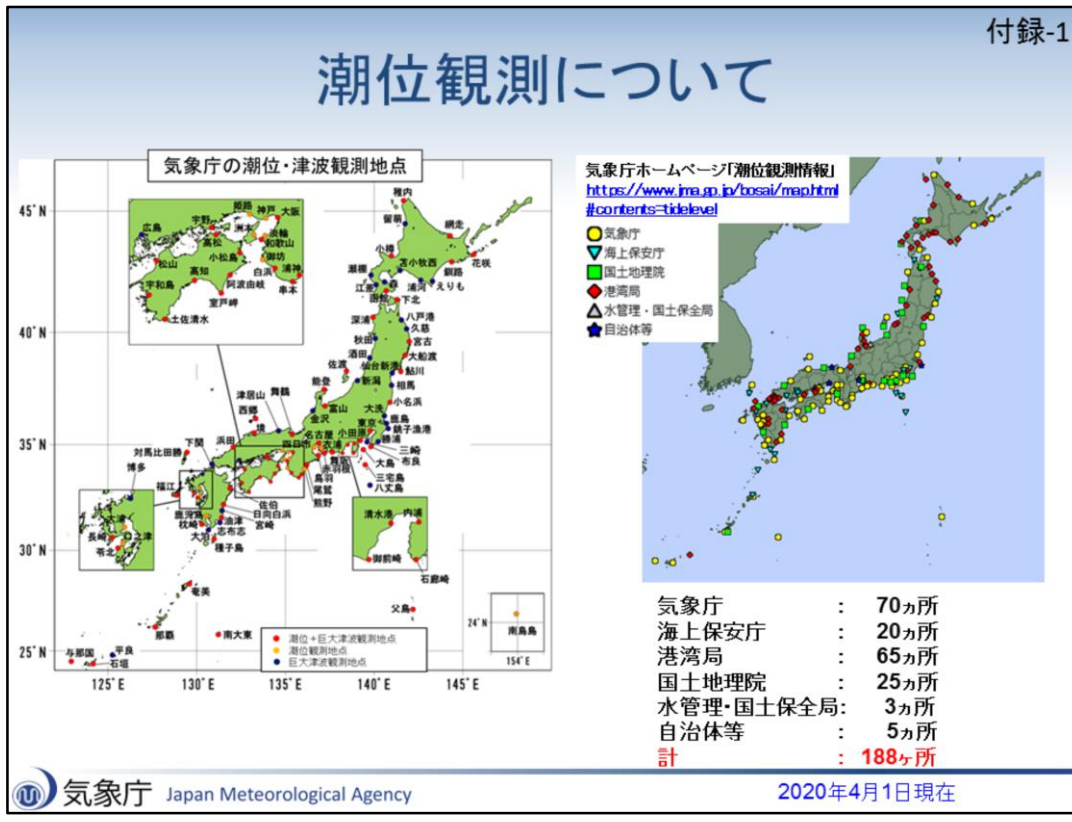
また、高潮の予測は台風の進路及び強度の予測誤差に留意する必要がある（7.1.3参照）。台風の進路が少しでも変わると、高潮の要因の一つである吹き寄せ効果が大きく変わる可能性があるため、予報円が大きいうちは高潮予測の不確実性も高い。このため、最も可能性が高い予測コースのシナリオを基本（メインシナリオ）として持つだけでなく、他のコースの予測も確認し、最も高い潮位を予測しているシナリオをサブシナリオとして持つなど、リスクを事前に評価する使い方が防災上の観点から望ましい。特に、満潮時に高潮が重なると、高潮の規模によっては甚大な被害をもたらすおそれがあるため、たとえ基本とするコースの高潮のピークが干潮に近い時間帯であっても、他のコースの高潮のピークが満潮に近い時間帯に重なる可能性があるならば、それらのシナリオも事前に想定しておく必要がある。

高潮ガイダンスでは、高潮モデルでは表現されない高潮の要因のうち、Wave Setup、海況要因及び浅海潮を考慮している（7.1.4参照）。ガイダンスで考慮している補正要因の特性を理解し、予報作業に利用することが望ましい。

最後に、現状、高潮モデルでも高潮ガイダンスでも予測対象としていない現象（副振動、陸棚波、河川水の流入）がある。これらについては、現状予測が困難であるため、潮位の実況監視が重要である。特に副振動は、大潮や満潮が重なると台風通過時の高潮より潮位が高くなる場合もあるので注意が必要である。副振動の状況や見通しについては、可能な範囲で「潮位に関する全般解説資料」でお知らせする。また、副振動が発生した場合は、速やかに潮位情報を発表するので、実況監視に活用頂きたい。

付録目次

付-1.　潮位観測について
付-2.　高潮モデルの補足事項（第3節関連）
付-3.　Wave Setup実験式の係数一覧
付-4.　検証で用いるスコア
　　参考文献

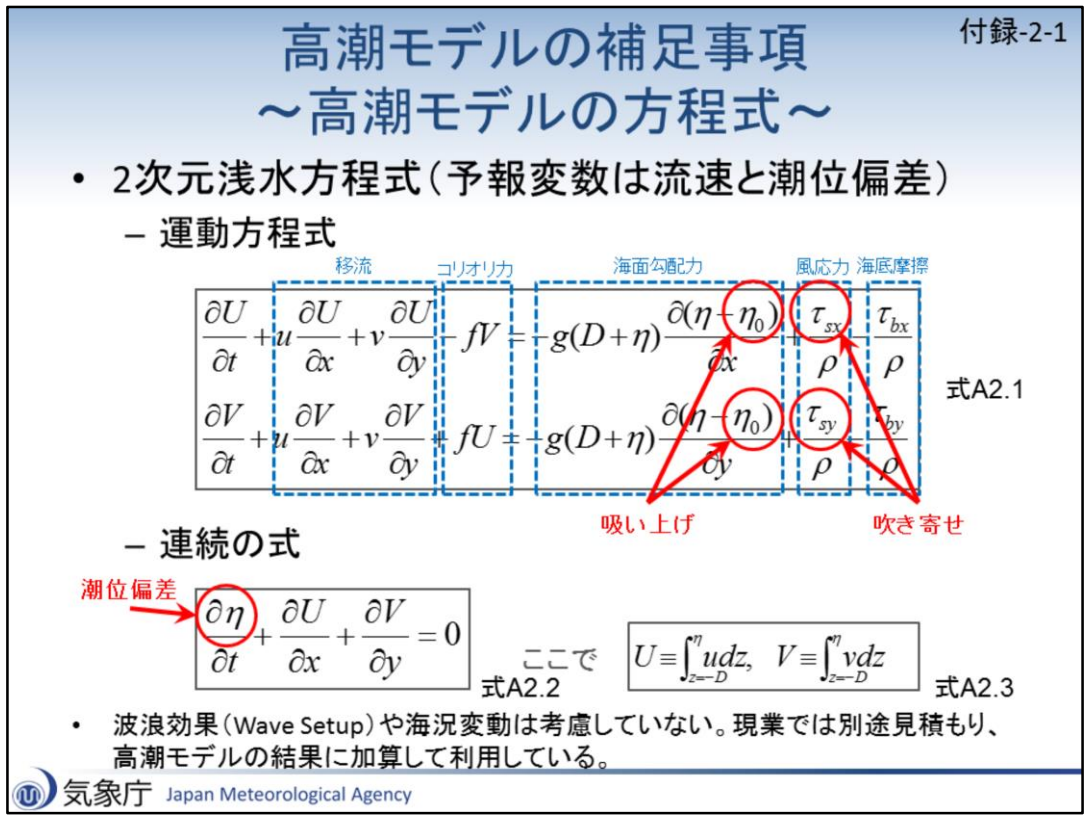


付録-1　潮位観測について

2020年4月現在、気象庁HPには188地点のリアルタイム潮位データを公開している。気象庁の観測地点のデータに加えて、他機関のデータも共有して監視等に使っている。（図A1.1、A1.2）

詳しい観測方法等は、以下の気象庁ホームページを参照。

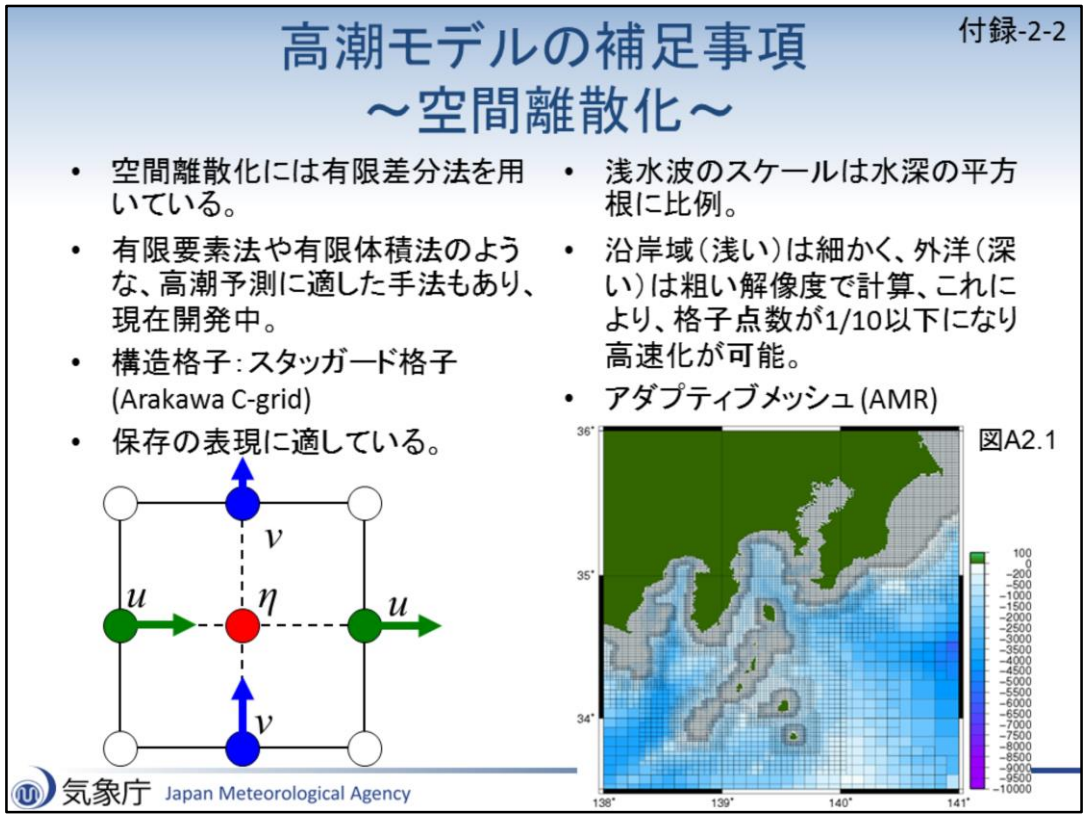
https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/explanation.html



付録-2-1　高潮モデルの補足事項～高潮モデルの方程式～

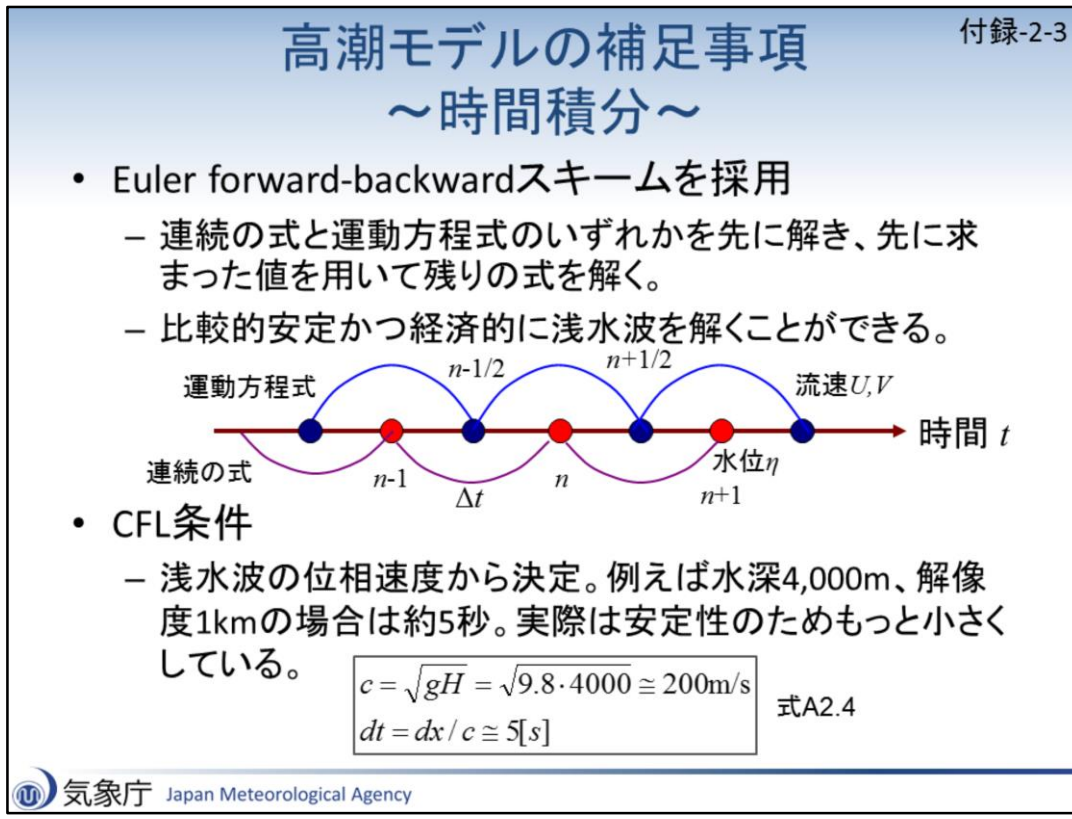
高潮モデルは、海水の運動を計算する部分とその運動を駆動する大気からの外力を与える部分から構成される。海水の運動は、2次元（鉛直方向に海水を積分して取り扱う）の運動方程式（式A2.1）、連続の式（式A2.2）を時間積分することによって計算し、海面の変位（潮位偏差）を求める。大気の外力として与える気圧と風向・風速の予想値は、台風の有無により異なる。

台風が存在しない、もしくは日本遠方（台風が高潮モデルの予測期間（39時間）内に日本の沿岸300km以内を通過しない）にある場合（以下、台風時以外）には、大気の数値予報結果（MSM）のGPVを使用する。00、03、06、09、12、15、18、21UTCのすべての初期時刻で予測時間0から39時間まで同時刻初期値のMSMを使用する。



付録-2-2　高潮モデルの補足事項～空間離散化～

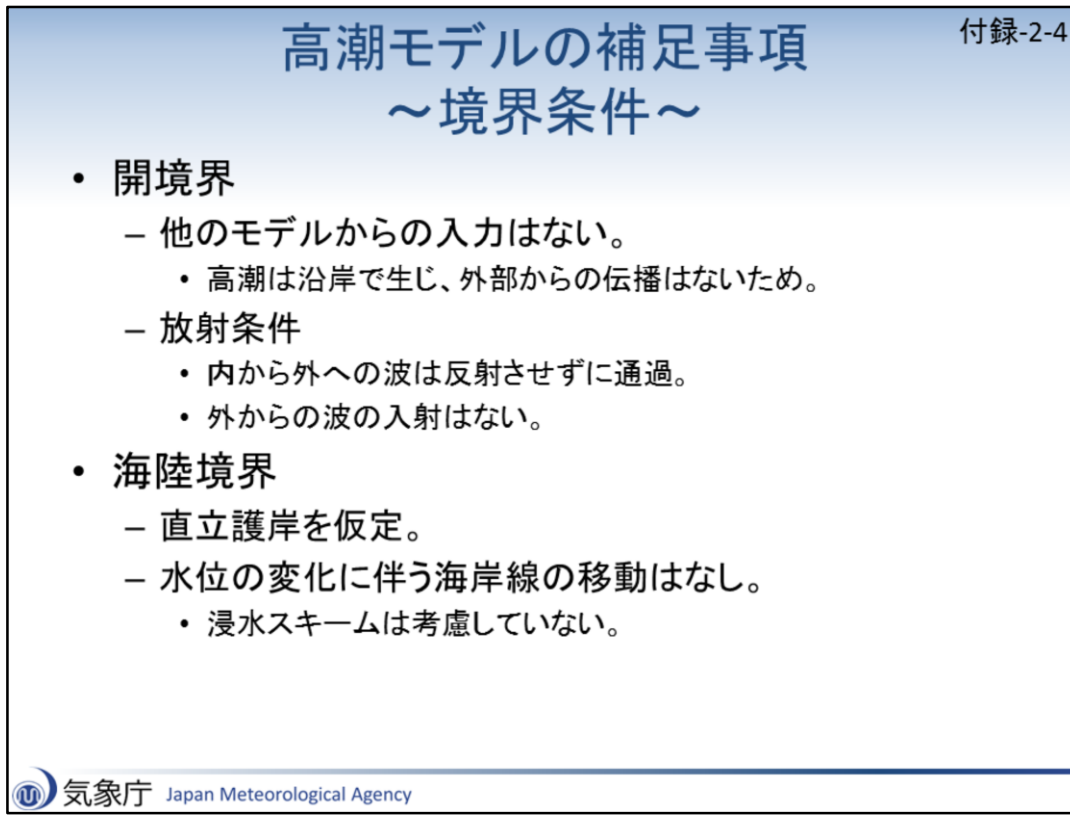
防災の観点から見ると、高潮の影響が及ぶのは沿岸域のみである。計算機資源の観点から、モデル領域内全ての格子について同じ解像度で計算するのは非効率的である。そのため、気象庁の高潮モデルではアダプティブメッシュを採用している。これは水深の浅い沿岸域のみ高解像度で計算し、水深の深い外洋では粗い解像度で高潮計算を行なうというものである。沿岸からの距離に応じて段階的（1km、2km、4km、8km、16km）に格子を粗く設定することにより（図A2.1）、一般的な緯度・経度座標系に比べ計算機資源の大幅な節約を図っている。



付録-2-3　高潮モデルの補足事項～時間積分～

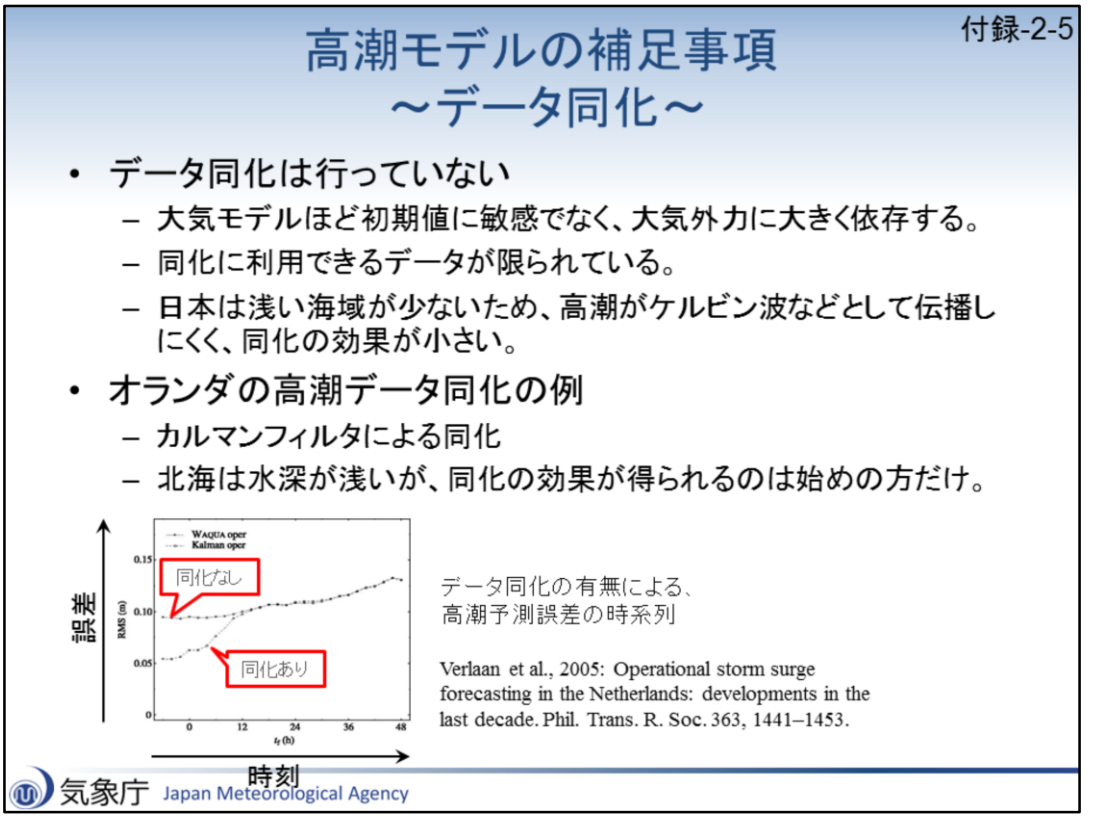
実行のサイクルは、大気モデルMSMに合わせて3時間毎、1日8回の運用となっている。時間積分間隔は4秒で、時間積分スキームにはオイラー前方後方差分を採用している。これは、連続の式と運動方程式のいずれかを先に解き、先に求まった値を用いて残りの式を解くというもので、浅水波にしか使えないものの、比較的安定かつ経済的に浅水波を解くことができる。

時間積分間隔はCFL条件から決定する。高潮は浅水波であるため（2.3参照）、その位相速度は水深の平方根に比例する。式A2.4のように、水深が4000mの場合位相速度は200m/sとなり、CFL条件から時間積分間隔は5秒となる。実際は計算安定性確保のため、余裕をもって4秒としている（3.1.1参照）。



付録-2-4　高潮モデルの補足事項～境界条件～

モデル境界については、一般によく使われているネスティング手法は行わず、放射条件を採用している。つまり、内から外への波は反射させずに通過させ、外からの波の入射はないと仮定している。流れの場は、モデル領域の外側に吸い上げ効果のみによる潮位偏差を仮定し、内側の潮位偏差がそれよりも高（低）ければ外（内）向きの流れが生じてバランスをとっている。これらの仮定は非物理的な面もあるが、高潮はそもそも沿岸で生じるものであり、外洋から伝播してくるものは重要ではないため、現業利用上不都合はない。なお、水位の変化に伴い海岸線が移動する仕組み（浸水スキーム）は考慮していない。



付録-2-5　高潮モデルの補足事項～データ同化～

一般にMSMなどの大気モデルでは、観測値を用いてより確からしい初期値を作成する、データ同化を行っている（データ同化の詳細については https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/whitep/1-3-6.html を参照してほしい）。高潮モデルではデータ同化を行っていない。理由として、大気モデルほど初期値に敏感でなく高潮予測が大気外力に大きく依存すること、同化に利用できるデータが限られていることが挙げられる。

高潮モデルにおけるデータ同化による効果を調査した、オランダでの例を示す。データ同化手法はカルマンフィルタを採用している。FT=9程度まではデータ同化により、同化なしの場合と比較して高潮予測誤差が小さくなっているものの、FT=12以降は両者にほとんど差が見られないことが分かる。日本はオランダなどに比べ沿岸に浅い海域が少ないことから高潮がケルビン波などとして伝播しにくいとされており、データ同化の効果はより小さいと考えられる。

付録-3-1

Wave Setup実験式の係数一覧

2020年8月現在

表A3.1

地点	a	b	c
石廊崎	0.79	-2.88	-2.06
舞阪	-0.23	7.42	-21.14
赤羽根	-0.22	8.64	-18.59
浦神	0.23	-1.89	4.09
串本	0.58	-5.35	12.51
白浜	0.44	-4.02	9.84
御坊	0.63	-4.64	9.6
室戸岬	1.14	-10.79	26.53
高知	0.47	-4.03	9.09
田後	0.758	-0.80	-1.34
輪島	0.215	1.92	-6.50
能登	0.544	3.74	-9.63
柏崎	-0.395	8.69	-15.58
秋田	-0.045	4.02	-12.86
男鹿	1.320	-2.74	-2.60
銚子	0.728	-1.82	-2.77
勝浦	1.093	-4.413	6.355
布良	0.5754	-3.9267	19.286
神津島	0.234	-0.9857	0.5881
三宅島(坪田)	1.093	-4.413	6.355
油壺	-0.0804	2.0123	2.8693
小田原	-0.1224	5.5823	-19.2724
宮崎	0.801	-5.716	13.564
種子島	1.919	-17.690	46.843
奄美	0.996	-9.799	27.642

表A3.1(続き)

地点	a	b	c
港川漁港	2.16	-9.91	21.23
東漁港	2.81	-21.87	70.66
久米島	-0.40	16.08	-8.22
多良間	1.093	-4.413	6.355
石垣	1.093	-4.413	6.355
西表(仲間)	1.093	-4.413	6.355
比川海岸	1.093	-4.413	6.355

表A3.1に、波浪効果(Wave Setup)の実験式

$$Z = aH^2 + bH + c$$

の導入地点における係数一覧を示す。
ZがWave Setup量、Hが有義波高を示す。

ただし、Zが負の場合は 0 とする。
また、2次曲線の頂点(おおむね波高3～4m程度)よりも低い波高の部分も Z=0 とする。

なお、沖縄の多良間、石垣、西表(仲間)、比川海岸の各地点は小西(1997)の式を0.7倍している。

気象庁 Japan Meteorological Agency

付録-3-1　Wave Setup実験式の係数一覧

表A3.1に、波浪効果(Wave Setup)の実験式(Z=aH^2+bH+c)の導入地点における係数一覧を示す。(赤字は、2020年3月から値を更新した箇所を示す。)ZがWave Setup量、Hが有義波高を示す。ただし、Zが負の場合は 0 とする。また、2次曲線の頂点(おおむね波高3～4m程度)よりも低い波高の部分も Z=0 とする。

なお、沖縄の多良間、石垣、西表(仲間)、比川海岸の各地点は小西(1997)の式を0.7倍している。

本実験式の係数は、必要に応じて随時見直し、更新を実施する予定である。

付録-3-2

Wave Setup実験式で計算されるWave Setup量

表A3.2

地点	波高(m)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
石廊崎	0	0	5	10	15	25	35	50
舞阪	0	5	10	15	20	25	25	30
赤羽根	5	10	20	25	30	35	40	45
浦神	0	0	0	0	0	5	5	10
串本	0	0	0	0	5	5	10	15
白浜	0	0	0	0	5	5	10	15
御坊	0	0	0	5	10	15	20	25
室戸岬	0	0	0	5	5	15	20	35
高知	0	0	0	0	5	5	10	15
田後	5	10	15	20	30	40	55	65
輪島	0	5	10	15	15	25	30	35
能登	5	15	25	30	45	55	70	80
柏崎	5	15	20	20	25	30	30	30
秋田	0	0	5	10	15	15	20	25
男鹿	0	10	15	30	45	60	80	100
銚子	0	0	5	15	20	30	40	50
勝浦	5	5	10	20	30	40	55	70
布良	0	15	15	15	20	25	30	40
神津島	0	0	0	5	5	10	10	15
三宅島(坪田)	5	5	10	20	30	40	55	70
油壺	10	10	10	10	15	15	15	15
小田原	0	0	5	10	15	20	20	25
宮崎	0	5	5	10	15	20	25	35
種子島	0	0	5	10	15	30	45	60
奄美	0	0	5	5	10	15	20	30

表A3.2(続き)　2020年8月現在

地点	波高(m)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
港川漁港	10	15	25	40	60	80	105	140
東漁港	20	25	30	40	55	75	100	135
久米島	35	50	60	75	85	95	105	115
多良間	0	5	10	15	20	30	40	50
石垣	0	5	10	15	20	30	40	50
西表(仲間)	0	5	10	15	20	30	40	50
比川海岸	0	5	10	15	20	30	40	50

表A3.2に、Wave Setupの実験式

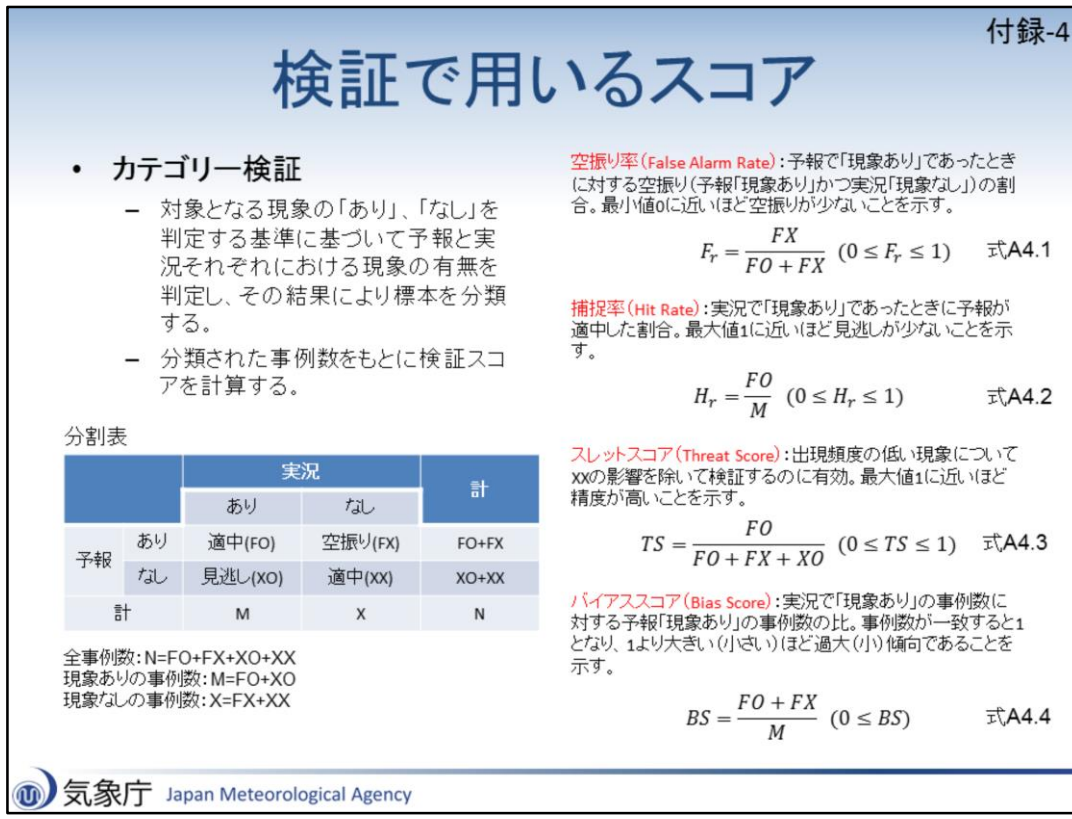
$$Z = aH^2 + bH + c$$

に波高を代入して計算した結果を5cm単位で示す。

Japan Meteorological Agency

付録-3-2　Wave Setup実験式で計算されるWave Setup量

表A3.2に、Wave Setupの実験式(Z=aH^2+bH+c)に波高を代入して計算した結果を5cm単位で示す。(赤字は、2020年3月から値を更新した箇所を示す。)



付録-4　検証で用いるスコア

3節及び4節の統計検証に用いたスコアについて解説する。ここで説明するカテゴリー検証では、対象となる現象の「あり」、「なし」を判定する基準に基づいて予報と実況それぞれにおける現象の有無を判定し、その結果により標本を分類する（分割表）。分割表はカテゴリー検証においてそれぞれのカテゴリーに分類された事例数を示している。各統計スコアはこれら事例数を用いて定義される。基本的な統計スコアは以下の通りである。

空振り率（False Alarm Rate）：予報で「現象あり」であったときに対する空振り（予報「現象あり」かつ実況「現象なし」）の割合。最小値0に近いほど空振りが少ないことを示す。（式A4.1）

捕捉率（Hit Rate）：実況で「現象あり」であったときに予報が適中した割合。最大値1に近いほど見逃しが少ないことを示す。（式A4.2）

スレットスコア（Threat Score）：出現頻度の低い現象についてXXの影響を除いて検証するのに有効。最大値1に近いほど精度が高いことを示す。（式A4.3）

バイアススコア（Bias Score）：実況で「現象あり」の事例数に対する予報「現象あり」の事例数の比。事例数が一致すると1となり、1より大きい（小さい）ほど過大（小）傾向であることを示す。（式A4.4）

参考文献

- 林原, 2011: 気象庁の高潮数値予測モデルについて, 天気, 58, 235-240.
- JMA, 2019: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency.
- 高佐, 近澤, 森, 2011: 面的天文潮位の予測手法とその精度, 測候時報, 78, 特別号, S33-S42.
- 小西, 1997: 外洋に面した港湾で発生する高潮の成因について－Wave setupの効果－, 海と空, 73
- Fujita, T., 1952: Pressure Distribution within Typhoon. Geophys. Mag., 23, 437-451.
- 伊藤, 坂地, 許田, 福田, 2013: 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, 測候時報, 80, 特別号, S63-S73..
- 田口, 橋口, 林原, 永井, 2016: 沖縄地方における簡易水位計を用いた波浪効果による潮位上昇(wave setup)の調査. 測候時報, 83, 特別号, S11-S19
- 気象庁, 2018: 全球モデルの改良と展望, 数値予報課報告・別冊第65号.