

令和5年3月28日

第1回 気候変動を踏まえた徳島県海岸保全施設技術検討会

資料-4

徳島県沿岸における 気候変動を踏まえた計画外力の検討方針(案)

目次

1.検討方針	1
2.平均海面上昇量の評価(期望平均満潮位の更新)	2
3.将来の高潮外力の推算手法	7
4.将来の高潮外力の推算モデル	11
5.検討方針(案) 総括	23

1. 検討方針

➤ 「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方提言」等を踏まえ、本沿岸における計画外力の検討方針を設定。

項目	「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方提言」内容	検討方針（案）
海岸保全の目標	<p>気候変動を踏まえた海岸保全の基本的な方針（本文P12, 4.） 海岸保全の目標は、<u>2℃上昇相当（RCP2.6）を前提としつつ、広域的・総合的な視点からの取組は、平均海面水位が2100年に1m程度上昇する予測（4℃上昇相当（RCP8.5））も考慮し、長期的視点から関連する分野とも連携することが重要である。</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ RCP2.6(2℃上昇相当)とする。 ・ RCP8.5(4℃上昇相当)も考慮する
評価時点		<ul style="list-style-type: none"> ・ 2100年（21世紀末）
海面水位	<p>高潮対策・津波対策（本文P15, (1)） <u>平均海面水位は徐々に上昇し、その影響は継続して作用し、計画高潮位にも設計津波の水位にも影響する。長期的に、平均海面水位は上昇し、数百年単位で元に戻ることがないと予測されることから、ハード対策とソフト対策を組み合わせ、今後整備・更新していく海岸保全施設（堤防、護岸、離岸堤等）については、手戻りのないように整備・更新時点における最新の朔望平均満潮位に、施設の耐用年数の間に将来的に予測される平均海面水位の上昇量を加味するべきである。</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最新の朔望平均満潮位に、2100年（21世紀末）に予測される平均海面水位の上昇量を加える。
潮位偏差 （計画偏差）	<p>高潮対策・津波対策（本文P15, (1)） 潮位偏差や高波は、台風や低気圧が発生した場合に顕著に影響が現れるため、いつ想定した極値が生起するかはわからない。また、現時点では、<u>将来の潮位偏差や波浪の長期変化量の予測は平均海面水位の上昇量に比べて不確実性が高いが施設設計への影響は大きい。</u>今後、研究成果の蓄積を踏まえ、<u>最新の研究成果やd4PDF等による気候予測結果を活用し、将来的に予測される潮位偏差や波浪を推算し対策を検討すべきである。</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 気候変動の影響を考慮した大規模アンサンブル気候予測データベース（d4PDF等）を活用して、将来的に予測される変動量を推算する。 <p>※現行計画の水準（安全度）を下回らないよう留意する。</p>
波浪 （計画波）		

2. 海面水位の評価(朔望平均満潮位の更新)

• 2.1 気候変動を踏まえた朔望平均満潮位の設定の考え方

- 朔望平均満潮位は、各沿岸直近の小松島検潮所(気象庁)等の近年の観測値を用いて設定する。
- 2021年を起点とした2100年までの平均海面水位上昇量は、平均潮位の上昇のトレンドと、気象庁が「日本の気候変動2020」で公表している20世紀末から21世紀末までの平均海面水位上昇量の予測値を考慮して設定する。
- 気候変動を踏まえた朔望平均満潮位は、上記の朔望平均満潮位に平均海面水位上昇量を加えて設定する。

■気候変動を踏まえた海岸保全のあり方 提言

(1-3)平均海面水位への今後の対応方針

○(1-1)(1-2)を踏まえ、気候変動による平均海面水位の上昇量については、今後以下のように対応することが考えられる。

<前提条件>

- ① 施設で防ぎきれぬ高さには限界があり、ハード・ソフト施策を組み合わせ、災害を防止・軽減する。
- ② 現行計画の作成当時と比べ、すでに気候変動の影響による外力増加が含まれている可能性がある。
- ③ 予測の不確実性については十分考慮すべき。

<対応方針>

- ① 近年の観測データには気候変動の影響が含まれている可能性があるため、最新の観測データも含めた統計データを用いて朔望平均満潮位を設定する。
- ② 観測結果の傾向の外挿及び予測データを用いて、将来予測される平均海面水位の上昇量を考慮する。
- ③ 2050年以降など中長期の適応を考える場合には、最新の観測データをベースに将来へ外挿するだけでは精度に不安があるため、気象庁等による科学的な予測値を考慮する。

1) 朔望平均満潮位

各沿岸近傍の検潮所を対象に、最新の近5ヶ年の観測値を用いて、朔望平均満潮位を設定する。

2) 平均海面上昇量

平均潮位の上昇トレンドと、気象庁が「日本の気候変動2020」で公表している20世紀末から21世紀末までの平均海面上昇量の予測値を考慮して設定する。

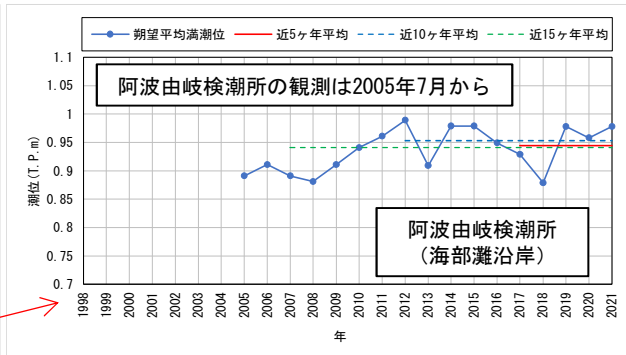
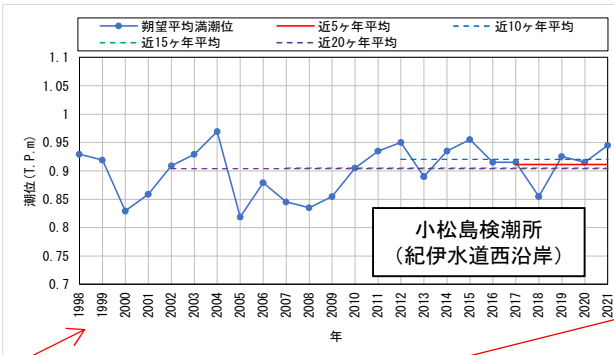
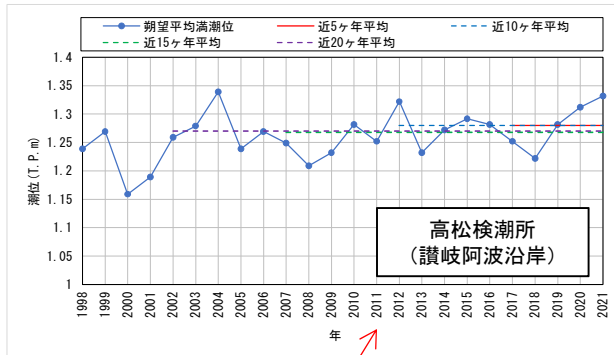
3) 気候変動を踏まえた朔望平均満潮位

上記、1)の朔望平均満潮位に2)の平均海面上昇量を加えて設定する。

2. 平均海面上昇量の評価(朔望平均満潮位の更新)

2.2 最新(2021年時点)の朔望平均満潮位の設定

- 当県沿岸近傍には、気象庁所管の高松、小松島、阿波由岐検潮所があり、各月の朔望平均満潮位(1998年以降)が公表されている。讃岐阿波沿岸には、香川県所管の三本松検潮所がある。
- 最新の近5ヶ年(2017年から2021年まで)の値を平均して朔望平均満潮位を設定する。平均期間を変化させた場合の差は概ね1cm程度であり、期間の取り方による影響は小さいことから、気象庁の考え方にならうことで統一する。



検潮所の位置

平均期間別の朔望平均満潮位

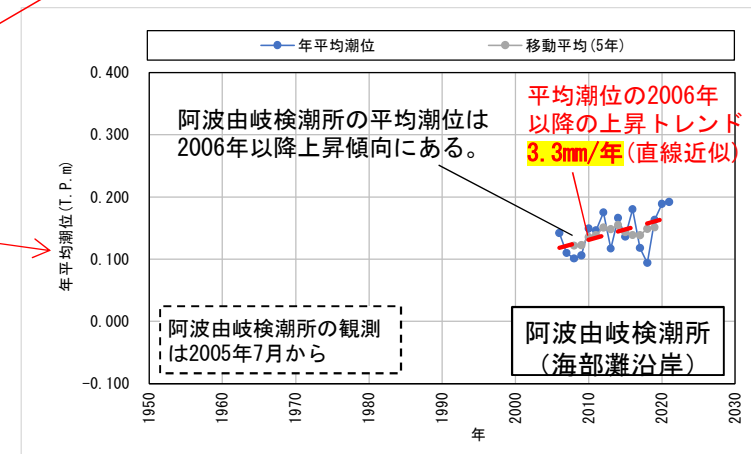
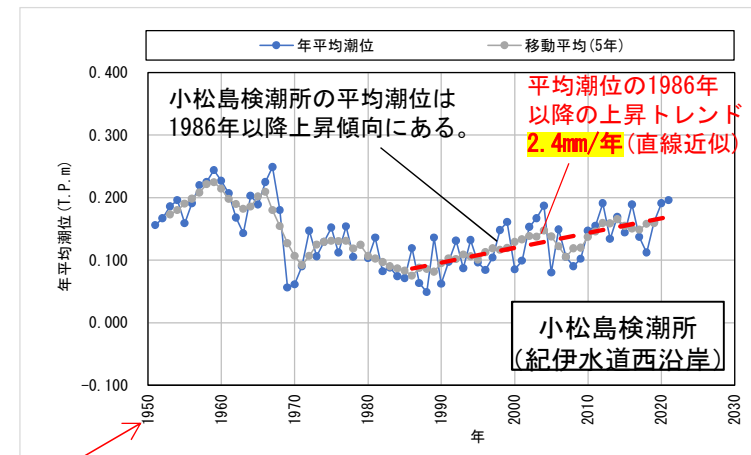
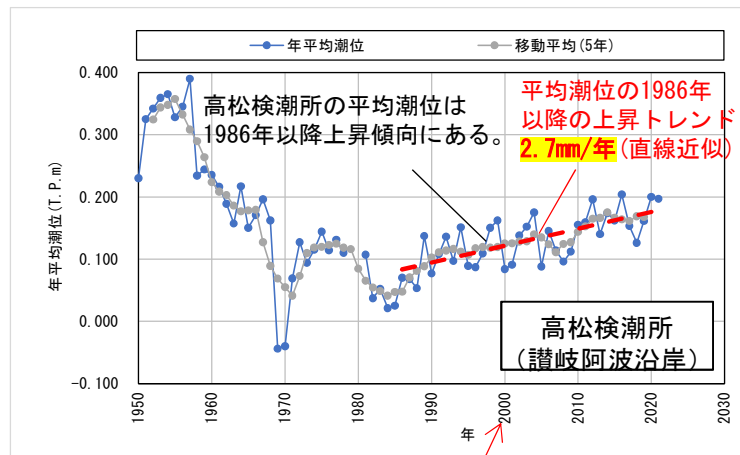
沿岸	検潮所	平均期間別の朔望平均満潮位 (T.P.m)			
		近5ヶ年 (2017~2021)	近10ヶ年 (2012~2021)	近15ヶ年 (2007~2021)	近20ヶ年 (2002~2021)
讃岐阿波	高松 (気象庁)	1.280	1.280	1.268	1.270
	三本松 (香川県)	1.066	—	—	—
紀伊水道西	小松島 (気象庁)	0.911	0.920	0.905	0.904
海部灘	阿波由岐 (気象庁)	0.944	0.953	0.941	—

平均期間を変えても、算定結果は±1cm程度に収まる
⇒気象庁の整理方法にならい、近5か年の平均値を採用

2. 平均海面上昇量の評価(朔望平均満潮位の更新)

2.3 将来予測される平均海面水位の上昇量の設定

- 観測期間の長い気象庁の高松、小松島、阿波由岐検潮所の年平均潮位の経年変化を整理。
- 近年(1986年以降)は、いずれも上昇傾向にあり、観測所ごとの年平均上昇量を整理。



※年平均潮位の傾向を把握するため移動平均(5年)を图示
潮位の上昇トレンドは年平均潮位を直線近似して算定

高松、小松島、阿波由岐検潮所(気象庁)の年平均潮位の経年変化

2. 平均海面上昇量の評価(朔望平均満潮位の更新)

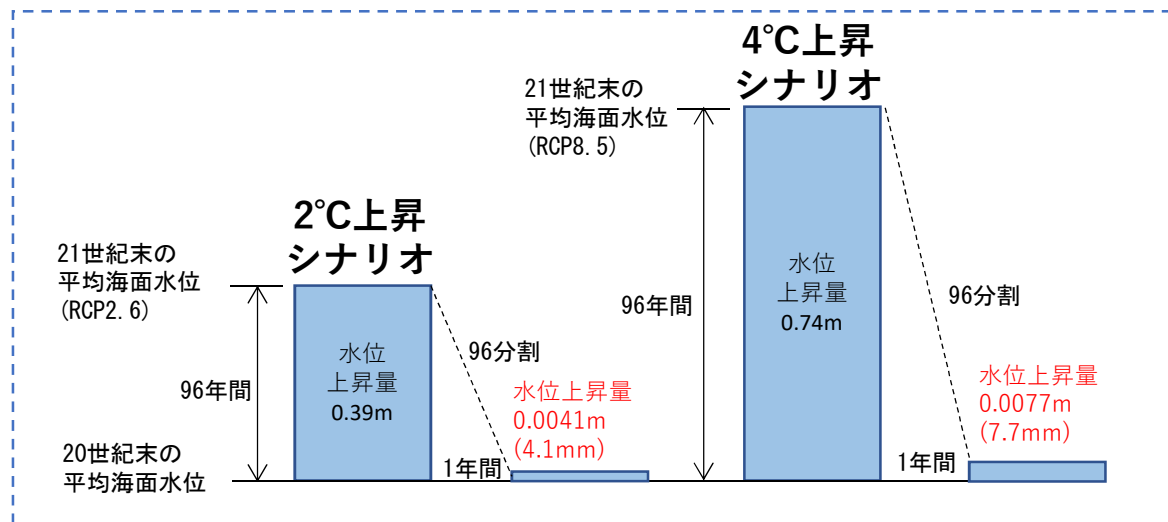
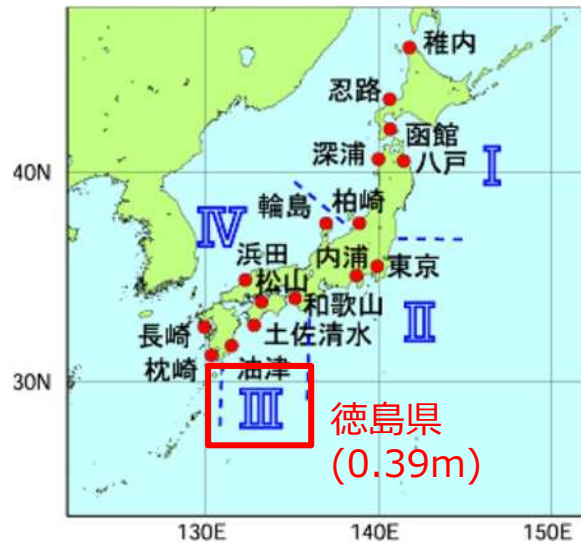
・ 2.3 将来予測される平均海面水位の上昇量の設定

- 「日本の気候変動2020」では、20世紀末から21世紀末までの平均海面水位上昇量(96年間の上昇量)の平均値を、徳島県が位置する領域Ⅲで0.39m(2℃上昇シナリオ)、0.74m(4℃上昇シナリオ)と予測している。
- 1年あたりの水位上昇量を計算すると4.1mm/年(2℃上昇シナリオ)、7.7mm/年(4℃上昇シナリオ)となる。

時期	20世紀末(1986~2005年の平均) ~ 21世紀末(2081~2100年の平均) ※96年間				
シナリオ	日本沿岸の平均海面水位の上昇量				世界の平均海面水位の上昇量
	領域Ⅰ 北海道・東北地方の沿岸	領域Ⅱ 関東・東海地方の沿岸	領域Ⅲ 近畿~九州地方の 太平洋側沿岸	領域Ⅳ 北陸地方から九州地方の 東シナ海側沿岸	
2℃上昇シナリオ (RCP2.6)	0.38m (0.22~0.55m)	0.38m (0.21~0.55m)	0.39m (0.22~0.56m)	0.39m (0.23~0.55m)	0.39m (0.26~0.53m)
4℃上昇シナリオ (RCP8.5)	0.70m (0.45~0.95m)	0.70m (0.45~0.95m)	0.74m (0.47~1.00m)	0.73m (0.47~0.98m)	0.71m (0.51~0.92m)

徳島県

下段の()内の数値は、95%信頼区間を示す。



1年あたりの水位上昇量の考え方

2. 平均海面上昇量の評価(朔望平均満潮位の更新)

• 2.4 気候変動を踏まえた朔望平均満潮位の設定

- ①実績潮位の上昇トレンドと②気象庁の整理を比較し、2100年時点における平均海面水位の上昇量を設定。
- 最新の朔望平均満潮位に、2100年時点における平均海面水位の上昇量を加えて、将来気候下における朔望平均満潮位を設定。

2100年時点における平均海面水位の上昇量の設定

項目	①実績潮位（平均潮位）の上昇トレンド			②気象庁の予測 （日本の気候変動2020）	
	讃岐阿波	紀伊水道西	海部灘	領域Ⅲ	
沿岸、エリア	讃岐阿波	紀伊水道西	海部灘	領域Ⅲ	
検潮所	高松	小松島	阿波由岐	—	—
1年あたりの水位上昇量	+ 2.7mm/年	+ 2.4mm/年	+ 3.3mm/年	+ 4.1mm/年 (2℃上昇)	+ 7.7mm/年 (4℃上昇)
2100年までの水位上昇量 (2021～2100年 = 79年間)	21cm	19cm	26cm	32cm	61cm

2100年時点における朔望平均満潮位の設定

沿岸	①朔望平均満潮位 (2021年時点) ※2017～2021年の平均値	②平均海面水位上昇量		朔望平均満潮位 (2100年時点) ※①+②
		2℃上昇シナリオ	4℃上昇シナリオ	
讃岐阿波沿岸	T.P.+1.066m (三本松検潮所)	2℃上昇シナリオ	32cm	T.P.+1.386m
		4℃上昇シナリオ	61cm	T.P.+1.676m
	T.P.+1.280m (高松検潮所)	2℃上昇シナリオ	32cm	T.P.+1.600m
		4℃上昇シナリオ	61cm	T.P.+1.890m
紀伊水道西沿岸	T.P.+0.911m (小松島検潮所)	2℃上昇シナリオ	32cm	T.P.+1.231m
		4℃上昇シナリオ	61cm	T.P.+1.522m
海部灘沿岸	T.P.+0.944m (阿波由岐検潮所)	2℃上昇シナリオ	32cm	T.P.+1.264m
		4℃上昇シナリオ	61cm	T.P.+1.554m

3. 将来の高潮外力の推算手法

- 気候変動を踏まえた潮位偏差(高潮)や波浪の推算方法は、大きく2つに区分(A:想定台風、B不特定多数の台風)
- 現行外力の設定方法(既往最大値 OR 確率評価)に応じて、推算方法を選定する

気候変動を踏まえた外力設定の基本的な考え方
 → 気候変動後も現行計画と同じ安全度を確保する。

現行の外力の設定方法に応じて、将来の外力の推算方法を選定する必要がある。

①現行外力が既往最大値で設定されている場合

例) 本県の計画潮位は第二室戸台風時の実績潮位が用いられている。

→ **右表 A : 想定台風**を対象とした手法で推算
 (概要) 将来気候下で、現在の想定台風と同じ頻度で発生しうる台風条件を設定し、その際の外力(潮位、波浪)を推算

※このうち、**A-1パラメトリック台風モデル**は従来から高潮推算で用いられてきた手法であり、これを採用。
 ※今回は、下記の**B-1**も併せて行い、上記で算定される潮位偏差の生起確率を評価する。

②現行外力が確率評価で決定されている場合

例) 本県の計画波浪は確率波浪が用いられている。
 旧河川局、港湾局所管海岸 50年確率波浪
 水産庁、林野庁所管海岸 30年確率波浪

→ **右表 B : 不特定多数の台風**を対象とした手法で推算
 (概要) d2PDF、d4PDFの中で発生する全台風を対象に、波浪や潮位の推算を行い、現行計画と同じ生起確率となる値を採用

※このうち、**B-1全球、領域気候モデル**はd4PDF、d2PDFデータを直接利用するものであり、適用性が高いことから、本県でも採用。

表 : 潮位偏差及び波浪の長期変化量の推算方法

対象台風	考え方	地球温暖化の影響	適用性
A. 想定台風	伊勢湾台風や室戸台風等の規模を想定した特定事例		
A-1. パラメトリック台風モデル	例えば、Myers モデル等経験的台風モデル ⁴⁾	・d2PDF、d4PDF等の計算結果に基づく中心気圧の低下量で簡易的に考慮	・従来、想定台風で外力を設定してきた沿岸で適用性がある。 ・B-1の多数アンサンブルデータセットを組み合わせることで確率評価が可能。
A-2. 領域気候モデルを用いた力学的計算	WRF等の領域気候モデル	・d2PDF、d4PDF等の計算結果から将来変化を現在の気候場に乗せて仮想的に考慮(擬似温暖化手法) ⁵⁾	・従来、想定台風で外力を設定してきた沿岸では適用性があるが、同一条件であっても過去の高潮推算とは異なる結果になることに留意が必要。
B. 不特定多数の台風	数多くのサンプルを確保できれば確率評価が可能		
B-1. 全球気候モデル台風領域気候モデル台風	d2PDF、d4PDF等全域もしくはダウンスケール領域気候モデルで気候計算される台風を利用	・d2PDF、d4PDF等に温暖化の影響は含まれているが、バイアス補正が必要 ⁶⁾	・多数のサンプルが確保可能であり、外力が発生確率で設定されている沿岸で適用性がある。
B-2. 気候学的アプローチ	台風の熱力学的最大発達強度(MPI)を考慮し、環境場から最大クラスの台風を推定	・MPIの理論を応用して、d2PDF、d4PDF等の気候値から気候的 ⁷⁾ 最大高潮偏差をシームレスに推定する手法等 ⁷⁾	・従来、想定台風で外力を設定してきた沿岸で適用性がある。
B-3. 確率台風モデル	台風属性の統計的特性をもとにモンテカルロシミュレーションにより人工的に台風を発生させる統計的手法	・d4PDF台風トラックデータ(バイアス補正)を用いた確率台風モデルの作成事例あり ⁸⁾	・多数のサンプルが確保可能であり、外力が発生確率で設定されている沿岸で適用性がある。

東京都
大阪府 等

大阪府 等

出典:令和3年8月2日 課長補佐事務連絡
 気候変動の影響を踏まえた海岸保全施設の計画外力の設定方法等について

3. 将来の高潮外力の推算手法

- ▶ 潮位偏差・波浪の観測記録から、上位の台風(20位以内)をそれぞれ整理。
- ▶ 最大の暴風域半径(388.9km)を目安とし、徳島県を中心とした東西に400kmの範囲を通過する台風を抽出。

■いずれかの観測所で上位20位に入る台風リスト※

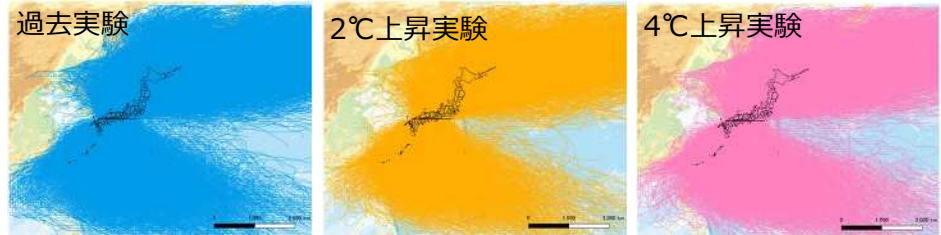
台風	潮位偏差 (m)		有義波高 (m)			中心気圧 最低値 (hPa)	最大風速 (m/s)	暴風域 半径 (km)
	小松島	阿波由岐	高知港	室津港	小松島			
1961年18号	1.48	▲				910	▲	▲
1965年23号	1.11					940	データなし	データなし
1968年04号	0.66					955		
1975年06号	1.19					965	▼	▼
1979年20号	0.76					950	46.3	277.8
1987年17号	0.94					950	41.2	185.2
1989年17号	0.76					975	28.3	55.6
1996年12号				6.32		960	38.6	185.2
1997年08号			6.39	6.31		970	33.4	277.8
1997年09号	0.89				3.51	940	43.7	240.8
1997年19号			6.96		2.86	950	41.2	240.8
1998年07号		データ				960	38.6	185.2
1998年10号	0.7	なし	7.08	7.19	3.30	975	30.9	166.7
1999年18号				6.34		930	46.3	203.7
2003年04号			6.02			980	28.3	74.1
2003年10号	0.8			6.26	3.71	945	43.7	388.9
2004年06号	0.88		6.33	6.36	4.22	945	43.7	277.8
2004年10号	0.71				3.21	935	43.7	222.2
2004年16号			7.01	6.42	3.15	935	46.3	277.8
2004年18号			7.17	6.56		925	48.9	370.4
2004年23号	0.92	▼			3.98	950	41.2	333.4
2005年14号			8.58	6.99		935	43.7	296.3
2007年04号			8.11	6.18		930	48.9	277.8
2007年05号			6.36			945	46.3	185.2
2009年18号				6.40		940	43.7	222.2
2011年06号	0.73	0.74	8.06	7.87	4.38	950	41.2	222.2
2011年12号	0.85	0.85			4.75	970	25.7	暴風域無し
2011年15号		0.58				940	43.7	185.2
2012年04号			6.97	7.38		950	41.2	277.8
2012年17号						930	46.3	222.2
2013年18号					3.01	960	33.4	185.2
2014年11号	0.78	0.8	8.16	6.77	4.49	945	41.2	185.2
2014年18号			6.15	6.60		935	48.9	185.2
2014年19号		0.58	7.68	7.25		945	43.7	277.8
2015年11号	0.88	0.86	6.49		5.71	945	43.7	185.2
2016年16号				6.64	3.31	940	48.9	111.1
2017年18号				8.49	3.42	935	48.9	203.7
2018年20号	0.75	0.84			4.77	950	43.7	222.2
2018年21号	0.97	1.03	7.37		5.27	940	46.3	222.2
2018年24号	0.78	0.94	6.39		3.25	950	43.7	277.8
2019年10号			6.62		3.11	965	28.3	333.4
2019年19号					4.44	925	48.9	370.4
2020年10号			6.68	6.01		925	48.9	314.8
2021年09号			6.32			984	23.2	暴風域無し

■台風抽出範囲（徳島県を中心として東西に400kmの範囲）



最大値
≒400km

■d4PDF/d2PDF台風トラックデータの抽出結果



	過去実験 1951~2010	2°C上昇実験 2031~2090	4°C上昇実験 2051~2110
年数	6,000年	3,240年	5,400年
抽出台風数	10,276個	4,844個	5,937個

※阿波由岐は観測期間が短いため、小松島で潮位偏差が高くなった事象の値を整理。

3. 将来の高潮外力の推算手法

3.1 A: 想定台風を対象とした手法 (A-1パラメトリック台風モデル)の概要

➤ 将来気候下で、現行の想定台風と同等の生起確率となる台風条件(=台風中心気圧)を設定し、その際の外力を推算して、将来の計画外力とする。

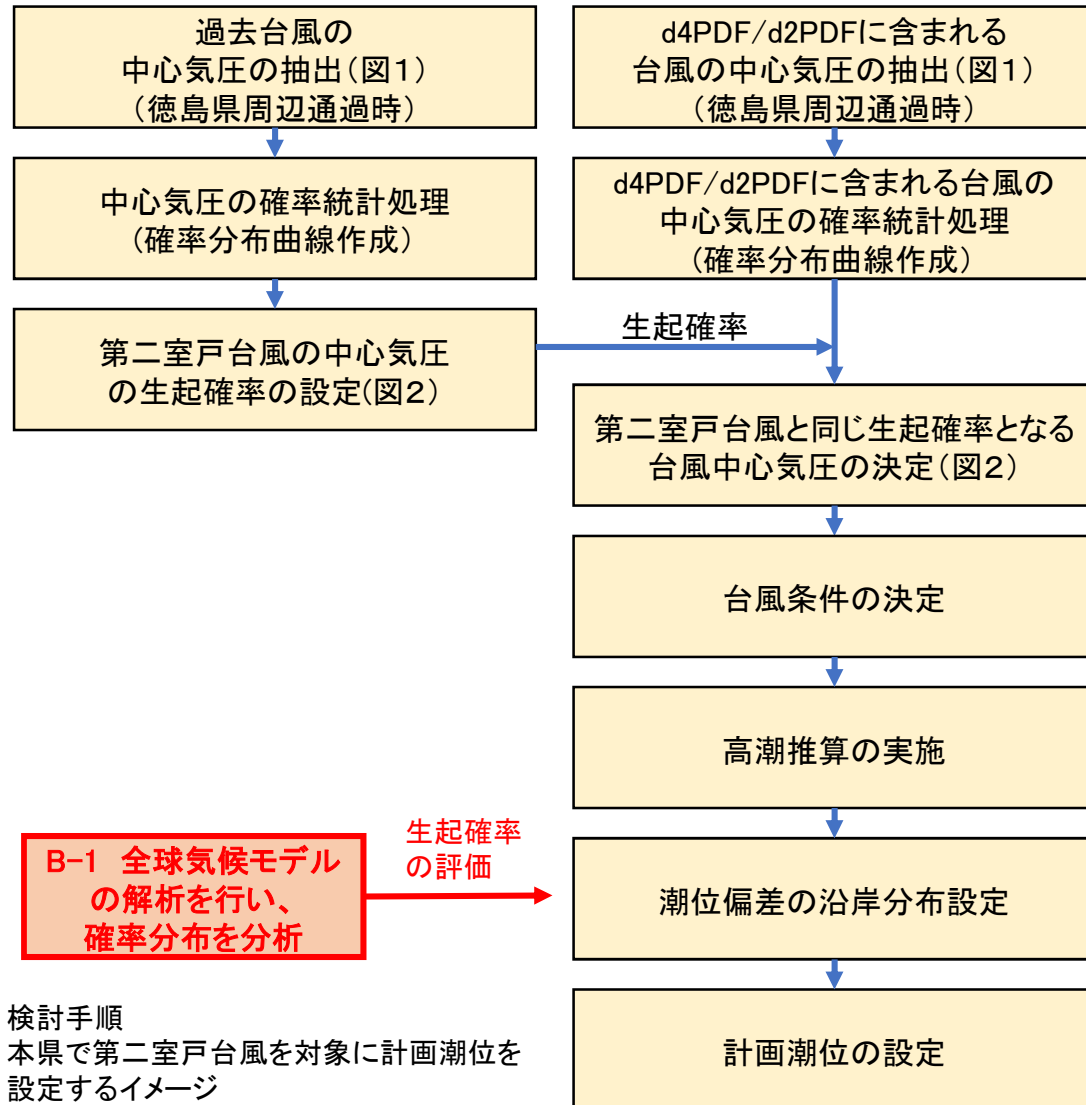


図1 台風の抽出イメージ
※徳島県周辺を通過する際の中心気圧を抽出

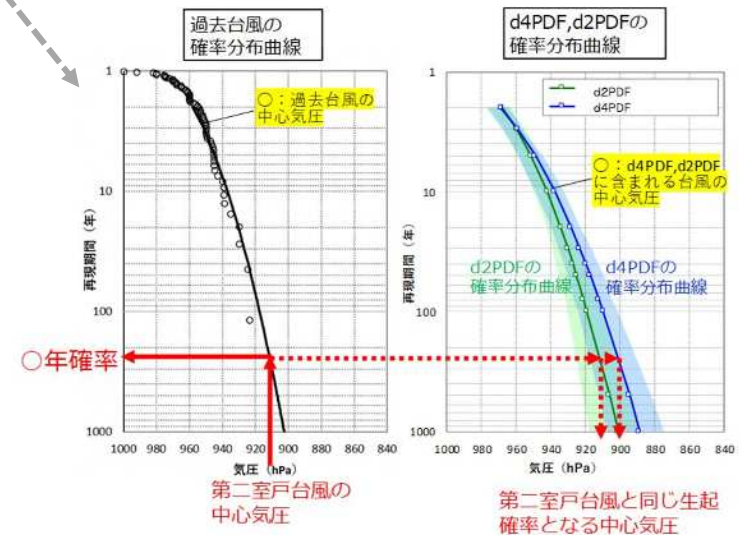


図2 第二室戸台風の中心気圧と同じ生起確率の中心気圧を決定するイメージ

検討手順
本県で第二室戸台風を対象に計画潮位を設定するイメージ

3. 将来の高潮外力の推算手法

3.2 B:不特定多数の台風を対象とした手法 (B-1 全球気候モデル、領域気候モデル)の概要

➤ 将来気候下で発生する**全台風を対象に推算**を行い、推算地点の値を確率処理して、現行計画と同じ確率規模の値を将来の計画外力とする。

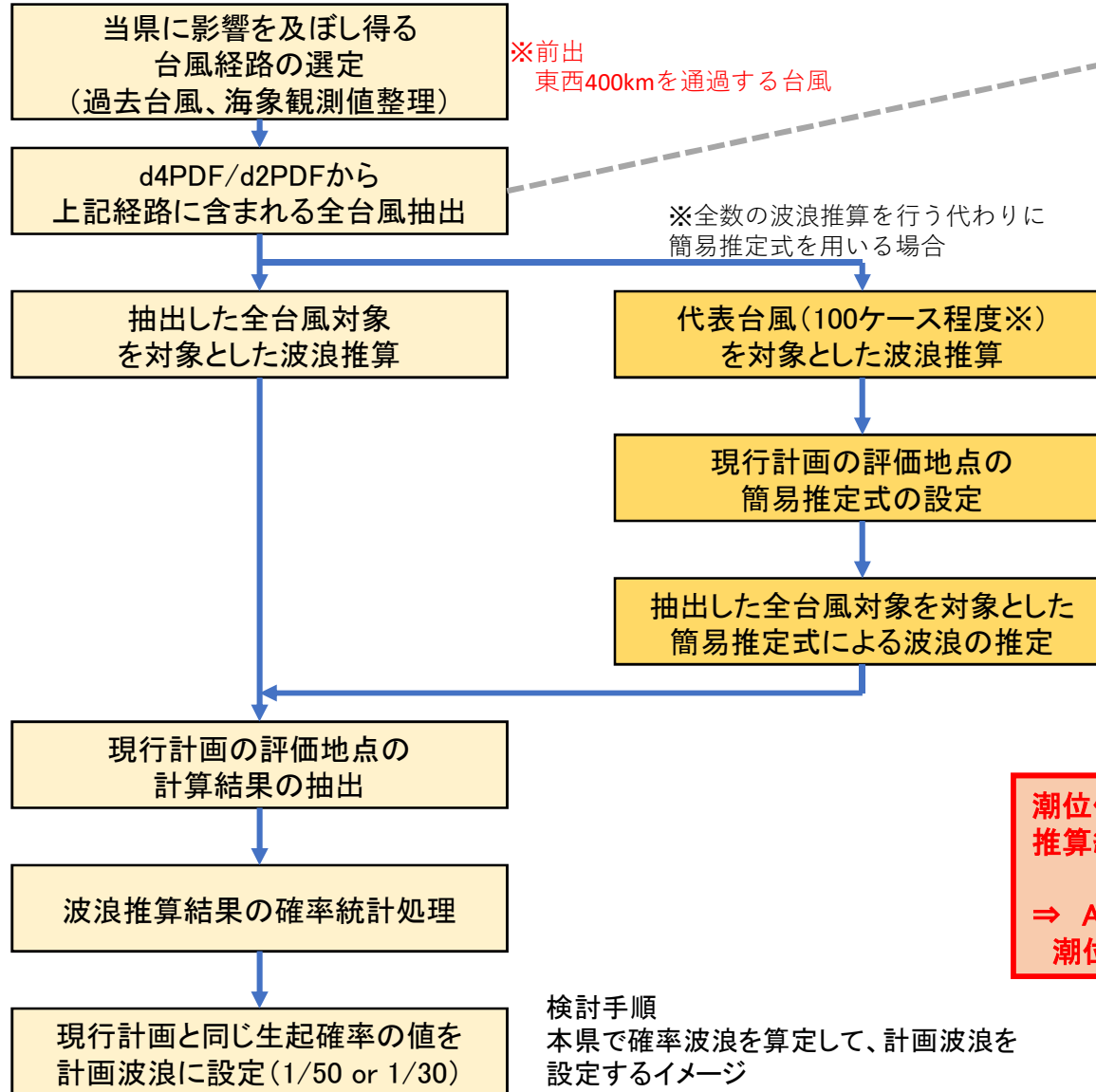


図1 台風の経路の選定イメージ

※下記の論文を参考に設定する。
「大規模アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)を用いた高潮・波浪に対する気候変動の影響評価の効率化手法の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2022.」

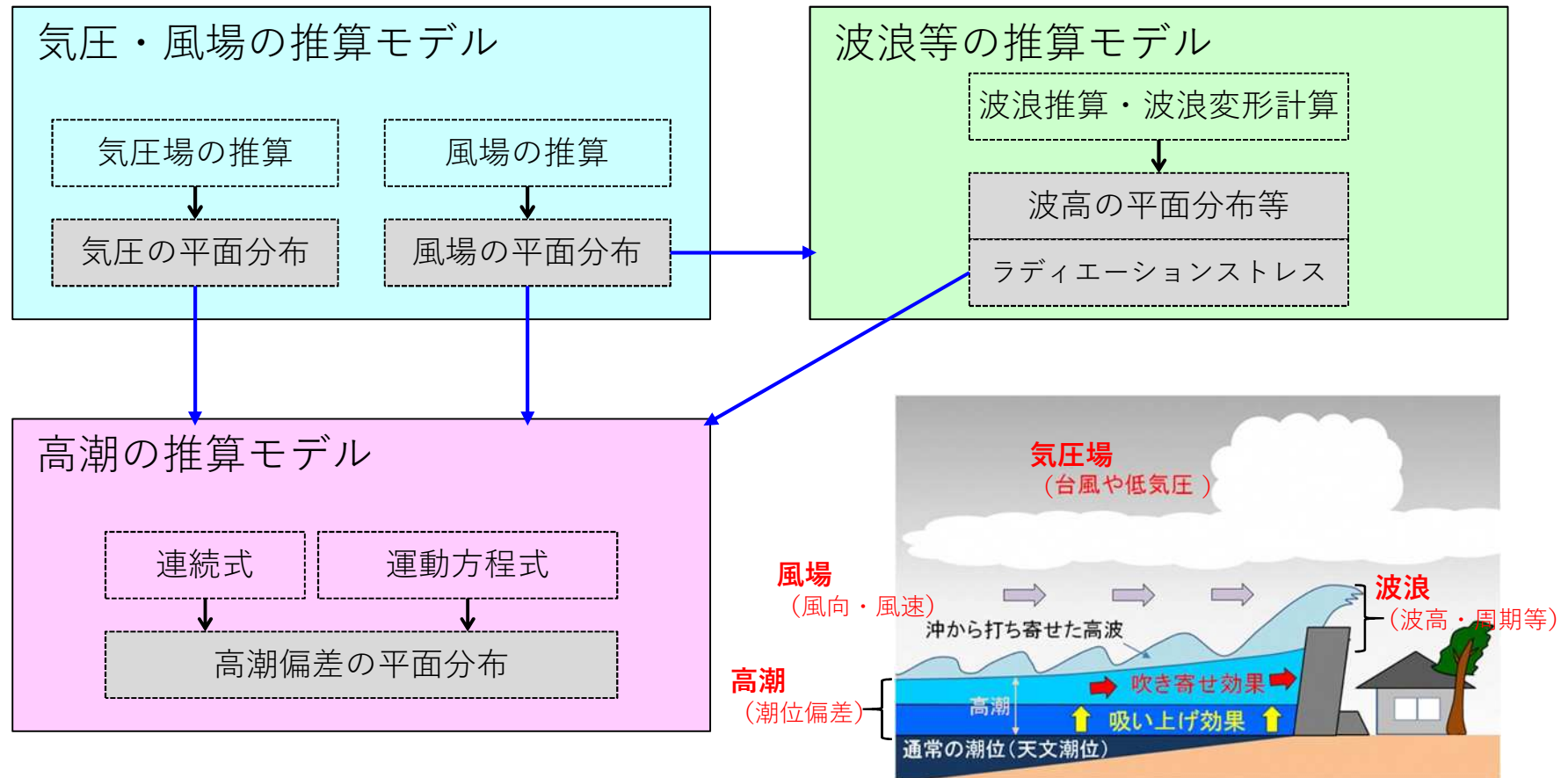
潮位偏差も同様の手順で実施し、
推算結果の確率統計処理を実施する。
⇒ A-1 パラメトリック台風による
潮位偏差の推算結果の生起確率の評価に使用

4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.1 推算モデルの概要

➤ 「高潮浸水想定区域図作成の手引きVER.2.10(R3.7)」を参考とし、以下のモデル構成とする。

○台風による高潮シミュレーションのモデル構成（イメージ図）



4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.2 推算モデルの基礎式

各推算モデルの基礎式を以下に示す。

○気圧・風場の推算モデル (Myersの式)

【台風の気圧分布の推定式、Myersの式】

$$P(r) = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right)$$

r は台風中心からの距離、 $P(r)$ は地点における気圧、 P_c は台風中心の気圧、 ΔP は台風の中心示度、 r_0 は台風半径 (最大旋風風速半径) である。

【傾度風速の推定式】

傾度風速は、Myers の式を傾度風の式にあてはめると次式により与えられる。

$$U_1(r) = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta P r_0}{\rho_a r} \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right)}$$

(f : コリオリ係数, ρ_a : 空気の密度)

台風の移動に伴う風速は、 V_T を台風の移動速度とすると次式により与えられる。

$$U_2(r) = \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V_T$$

$$V_1 = C_1 U_1(r)$$

$$V_2 = C_2 U_2(r) = C_2 \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V_T$$

$$U_{10} = V_1 \cos(\beta - 60^\circ) + V_2 \cos(90^\circ - \beta + \theta)$$

※出典：「高潮浸水想定区域図作成の手引きVer. 2.10」R3.7

○波浪等の推算モデル (スペクトル法)

【基礎方程式、SWANモデル】

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(C_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(C_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(C_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(C_\theta N) = \frac{S}{\sigma}$$

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

$$C_x = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \frac{\sigma k_x}{k^2}, \quad C_y = \frac{dy}{dt} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \frac{\sigma k_y}{k^2}, \quad C_\sigma = \frac{d\theta}{dt}, \quad C_\theta = \frac{d\sigma}{dt}$$

ここに、 $N(\sigma, \theta)$: 波作用量スペクトル、 $E(\sigma, \theta)$: 方向スペクトル、 σ : 角周波数、 θ : 波向、 S : エネルギーソース項

○高潮の推算モデル (非線形長波方程式)

【連続式】

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

【運動方程式】

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right)$$

$$= fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sx} - \tau_{hx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right)$$

$$= -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sy} - \tau_{hy}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

ここで、 η は静水面からの水位変化量、 g は重力加速度、 ρ_w は海水の密度、 P は海面での大気圧、 f はコリオリ係数 ($f = 2\omega \sin \phi$: ω は角速度、 ϕ は緯度)、 A_h は水平渦動粘性係数、 D は全水深である。 M 及び N は流量フラックスで水底 h から水面 η まで水平流速 u 、 v を積分して、

$$M = u(h + \eta) = uD, N = v(h + \eta) = vD$$

で与えられる。 τ_{sx} は海面せん断応力、 τ_{bx} は底面せん断応力、 S_{xx} 、 S_{xy} 及び S_{yy} は「ブレイカー」ストレスである。

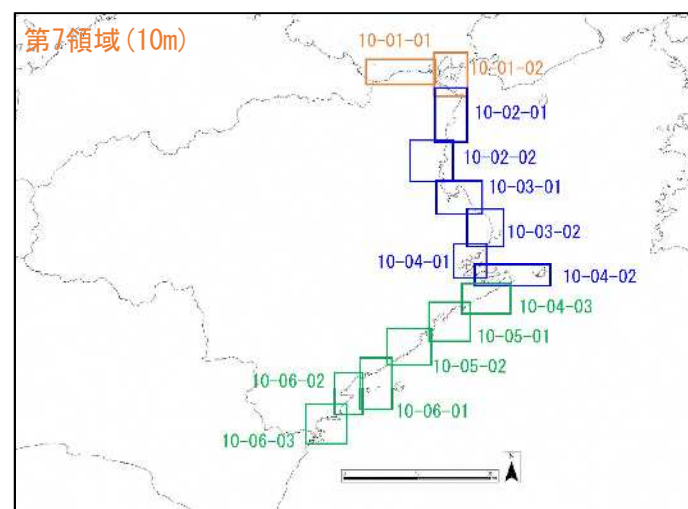
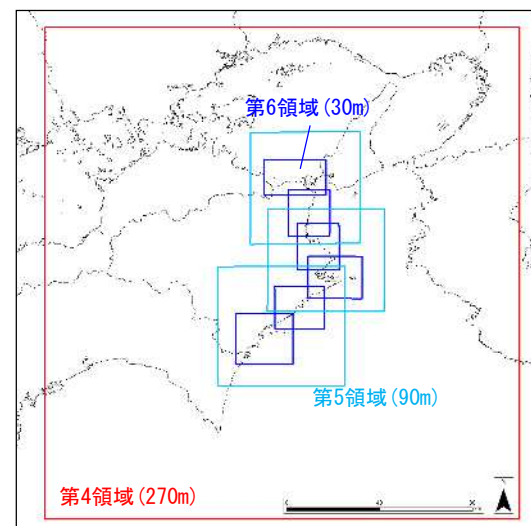
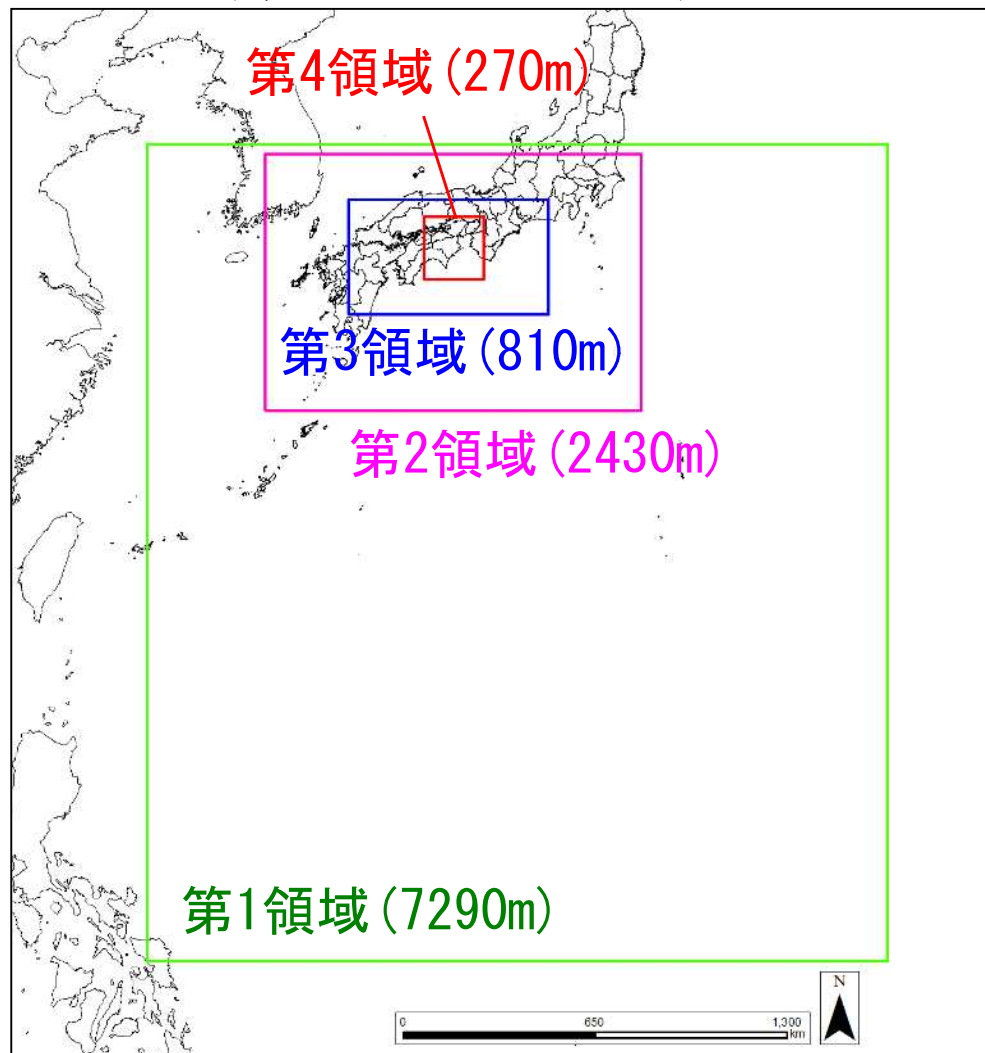
※出典：「高潮浸水想定区域図作成の手引きVer. 2.10」R3.7

4. 将来の高潮外力の推算モデル

• 4.3 推算モデルの計算領域

- 台風に伴う潮位偏差および波浪の時々刻々の変化を推算するため、計算領域は太平洋沖に十分広く確保した。
- 外洋から沿岸かけて7290~10m格子の計算領域を設定。各種推算結果は、領域外縁部で順に接続する。(ネスティング)

○計算領域図 (7,290m→10mメッシュ)



4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.4 推算モデルの再現検証

- 代表台風の再現計算を実施する。その結果より、最適なモデル定数(C1,C2)を検証する。
- 解析条件表を以下に示す。風速変換係数C1,C2、検証台風、検証対象地点の設定については後述する。

○再現検証の解析条件表

項目		モデルの再現性検証のための解析条件
解析対象範囲		南北方向:約2,500km、東西方向:約2,800km (7,290mメッシュの解析領域)
解析格子サイズ		$\Delta x = \Delta y = 7,290\text{m} \rightarrow 2,430\text{m} \rightarrow 810\text{m} \rightarrow 270\text{m} \rightarrow 90\text{m} \rightarrow 30\text{m} \rightarrow 10\text{m}$ ネスティング
地形データ		現況地形(令和2年1月公表の高潮浸水想定区域検討で使用したデータ)
台風諸元		中心気圧、台風経路、移動速度:各台風の実績値(気象庁ベストトラック) ①第二室戸台風、②T0423、③T0514、④T1411、⑤T1511、⑥T1821 ※徳島沿岸で潮位偏差・波浪が大きい代表台風を選定し実績諸元を設定
初期潮位		検証期間の天文潮位(小松島観測所)の最大値
河川流量		河川流量は考慮しない
気圧・風場推算	気圧場モデル	Myersの式
	風場モデル	傾度風の式
	計算条件	風速変換係数C1,C2は再現性の高い値を比較の上設定 傾度風の風向:30° ※高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver.2.10(R3.7)に準拠 最大旋風風速半径:加藤の式
波浪推算	モデル	スペクトル法(第三世代波浪推算モデル:SWAN)
	計算条件	地形条件:現況地形(令和4年度末時点) メッシュ分割:上記の「解析格子サイズ」参照(最小メッシュサイズ10m)
高潮推算	モデル	非線形長波方程式モデル(コリオリカ、気圧変動、海面摩擦を考慮)
	計算条件	地形条件:現況地形(令和4年度末時点) メッシュ分割:上記の「解析格子サイズ」参照(最小メッシュサイズ10m) 粗度係数:水域は一律、マンシングの粗度係数 $n=0.025$ 本検討では陸域への浸水は考慮しないため、陸域は未設定 海面抵抗係数:本多・光易(1980)式を基本に風速45m/sで上限設定 計算時間間隔:CFL条件を満たすように設定

4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.5 再現計算に基づく台風モデル風速変換係数C1、C2について

- 変換係数C1,C2は、台風モデルで算定される風速の高潮への寄与度を示す係数である。物理的な値ではなく、実績台風の検証計算を踏まえて設定される定数であり、実績台風の再現性を踏まえて設定する。

○最新の手引きにおける変換係数C1,C2に関する記述

(2) 解析モデル

① 気圧・風場の推算

a) 気圧場の推算モデル

台風の気圧分布の推定式は、実際の気圧場に比較的良好に合致^{19,20}する Myers の式を基本とする。

$$P(r) = P_c + \Delta P \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)$$

r は台風中心からの距離、 $P(r)$ は地点における気圧、 P_c は台風中心の気圧、 ΔP は台風の中心示度、 r_0 は台風半径（最大旋衡風速半径）である。

b) 風場の推算モデル

海面上10mの風速 (U_{10}) は、図22のとおり、傾度風速 $U_1(r)$ と台風の移動に伴う風速 $U_2(r)$ にそれぞれ海面摩擦を考慮した変換係数 C_1 、 C_2 を乗じ、傾度風の風向を約 30° 台風の中心方向に傾け、ベクトル和で求めることとする。

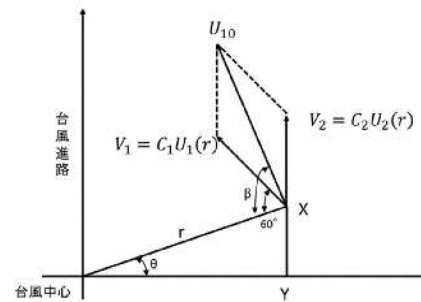


図22 海上風算出の模式図

傾度風速は、Myers の式を傾度風の式にあてはめると次式により与えられる。

$$U_1(r) = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{\Delta P r_0}{\rho_a r} \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)}$$

(f : コリオリ係数、 ρ_a : 空気密度)

台風の移動に伴う風速は、 V_T を台風の移動速度とすると次式により与えられる。

$$U_2(r) = \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V_T$$

$$V_1 = C_1 U_1(r)$$

$$V_2 = C_2 U_2(r) = C_2 \frac{U_1(r)}{U_1(r_0)} V_T$$

$$U_{10} = V_1 \cos(\beta - 60^\circ) + V_2 \cos(90^\circ - \beta + \theta)$$

これらの変換係数 C_1 、 C_2 には一般に一定値として $0.6 \sim 0.7$ が用いられており、実績台風の検証によって定める。なお、実績台風の検証に当たり、台風の眼の外側（最大旋衡風速半径の $1/2$ 付近）において、眼の三次元構造に起因した自由大気の風速を超える海上風（超傾度風(super gradient wind)と呼ばれる）を考慮する必要がある場

※出典：「高潮浸水想定区域図作成の手引きVer. 2.10」R3. 7

¹⁹ (4) 7) 磯部雅彦・藤城透：ベンガル湾東における高潮上計算，海面上学論文集，44，pp.346-350，1997。

²⁰ (4) 8) 村上利男・森川雅行・堀江毅：ADI法による高潮の数値計算法，運輸省港湾技術研究所資料，No.529，35p.，1985。

4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.6 検証対象台風、検証地点について

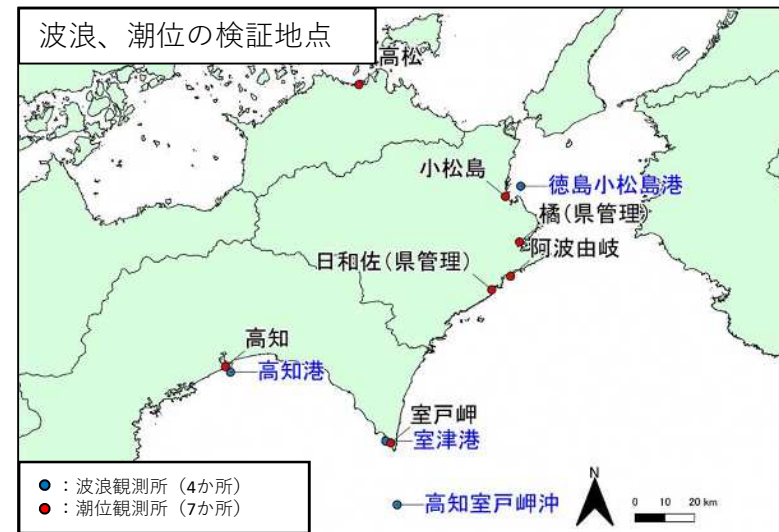
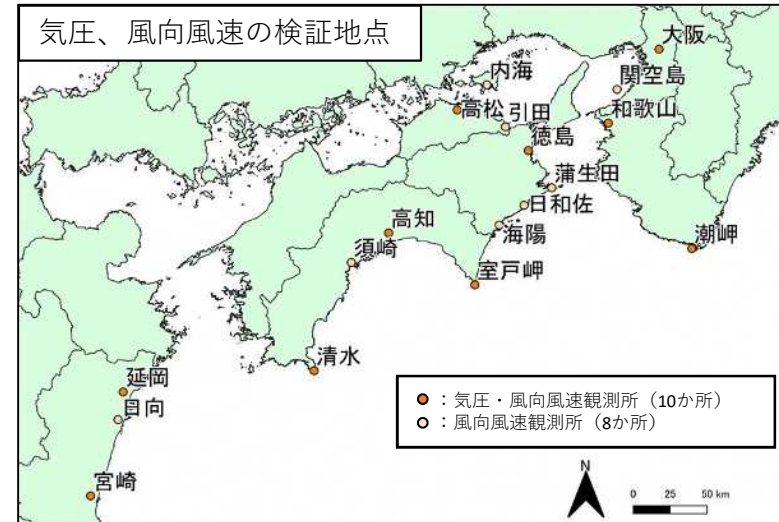
➤ 徳島県沿岸域における潮位偏差、波浪の観測値が大きかった代表的な台風を、経路に偏りがないう選定。

○検証対象台風

No.	台風名	検証対象とした根拠	検証		
			気圧 風向 風速	波浪	潮位 偏差
1	1961年(S36) 台風18号(第二室戸台風)	潮位偏差大 (小松島既往最大)	○		○
2	2004年(H16) 台風23号(T0423)	潮位偏差大 (小松島既往6位)	○		○
3	2005年(H17) 台風14号(T0514)	有義波高大 (高知港既往最大)	○	○	
4	2014年(H26) 台風11号(T1411)	徳島県で被害実績大 潮位偏差大 (小松島既往12位)	○		○
5	2015年(H27) 台風11号(T1511)	有義波高大 (徳島小松島港既往最大)	○	○	
6	2018年(H30) 台風21号(T1821)	有義波高大 (徳島小松島港既往2位) 潮位偏差大 (小松島既往4位)	○	○	○

- 検証対象台風は、徳島沿岸の主要観測所における潮位偏差と波高が大きい台風を選定した後、経路に偏りがないう代表的な台風を選定した。
- 気圧、風向風速の検証対象台風は、潮位偏差および波浪の検証対象台風とした。
- 気圧、風向風速の検証地点は、徳島県周辺の観測所に加え、太平洋に面する主要な観測所も対象とした。

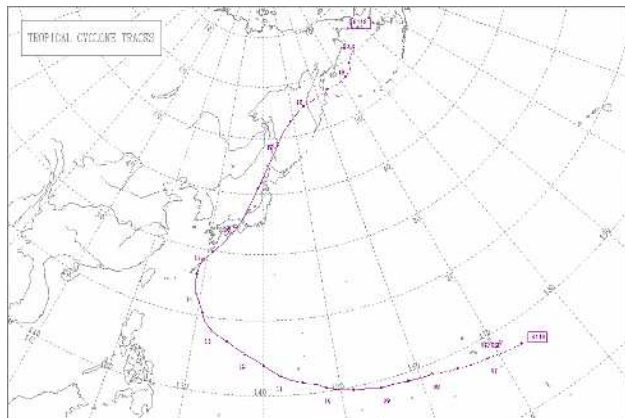
○検証地点



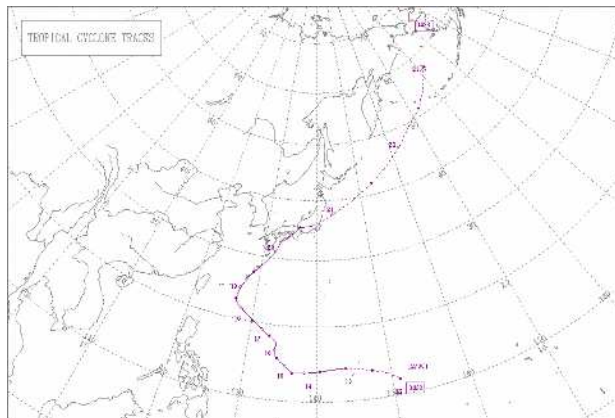
4. 将来の高潮外力の推算モデル

• 4.7 検証対象台風の経路図

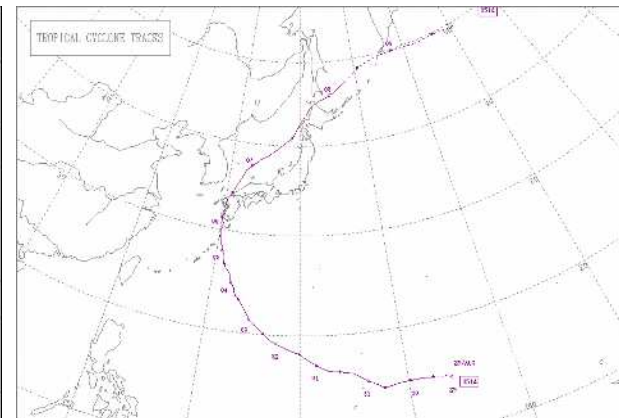
1961年(S36)台風18号(第二室戸台風)



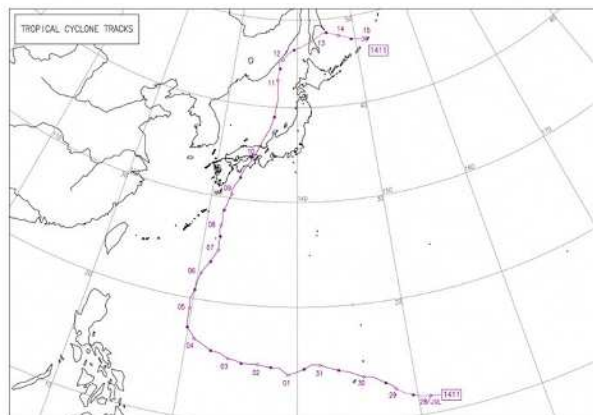
2004年(H16)台風23号(T0423)



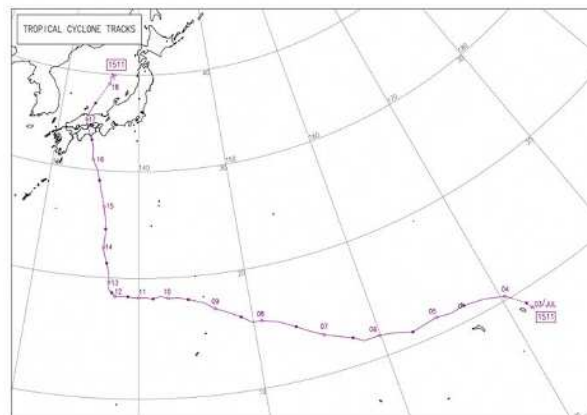
2005年(H17)台風14号(T0514)



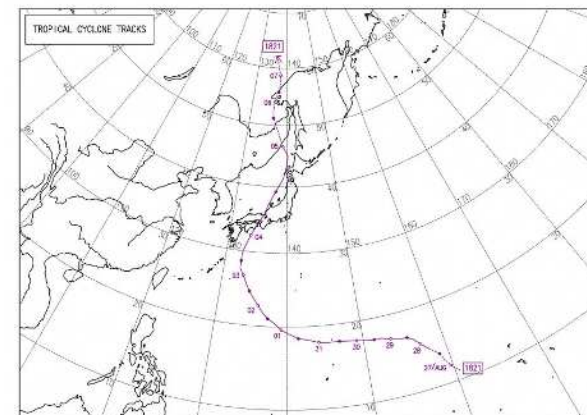
2014年(H26)台風11号(T1411)



2015年(H27)台風11号(T1511)



2018年(H30)台風21号(T1821)

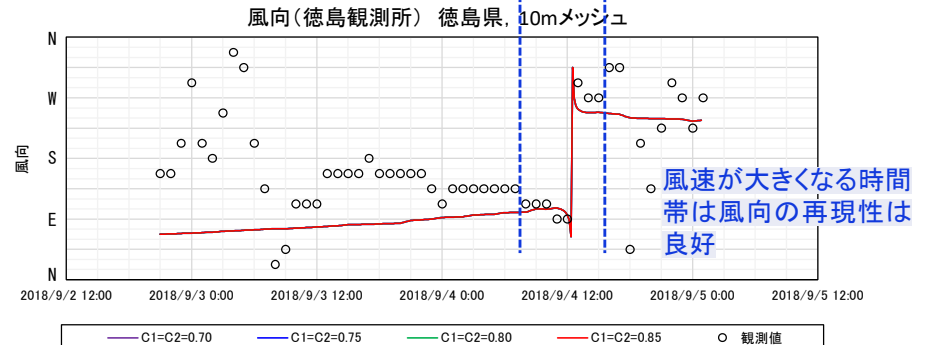
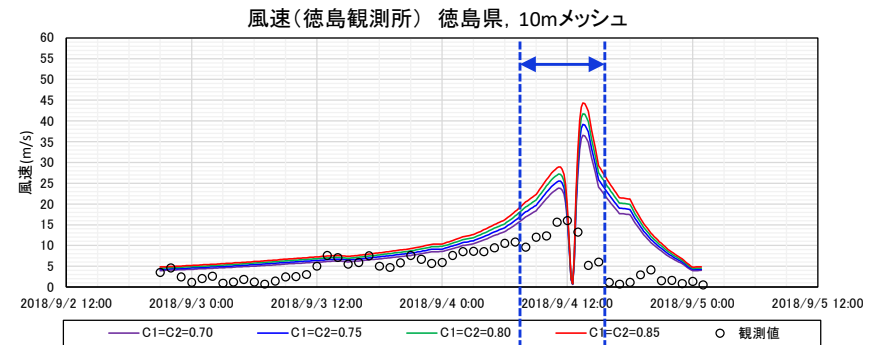
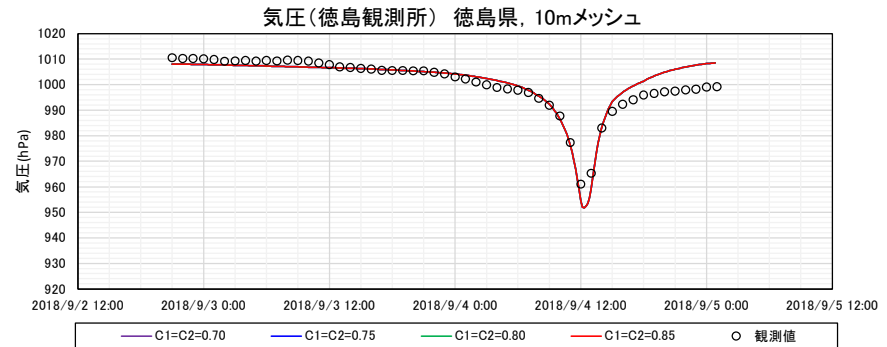
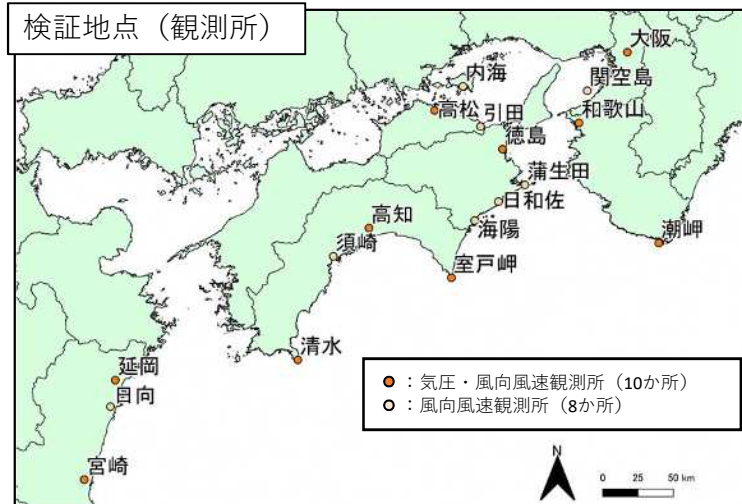
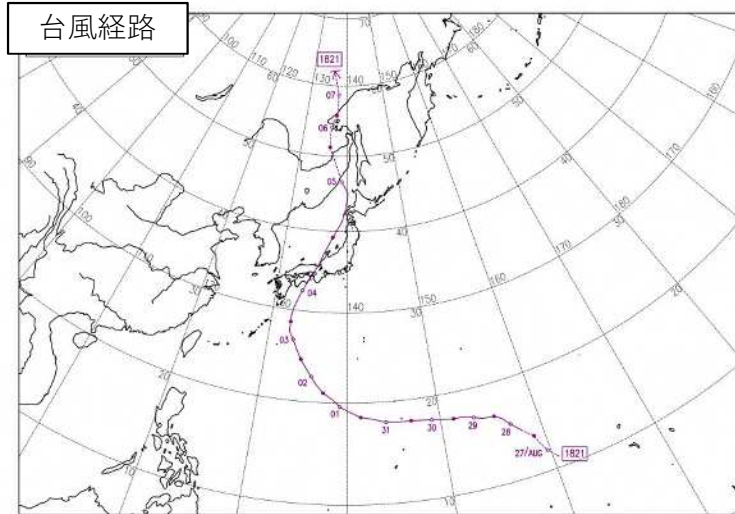


4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.8 推算モデルの再現検証結果(気圧、風向・風速)

- 気圧は、いずれの台風も各検証地点で再現性が高い。
- 風速は、計算結果が実測に対して計算結果が大きくなる傾向。風向は、強風時の再現性は良好。

2018年(H30)台風21号(T1821)

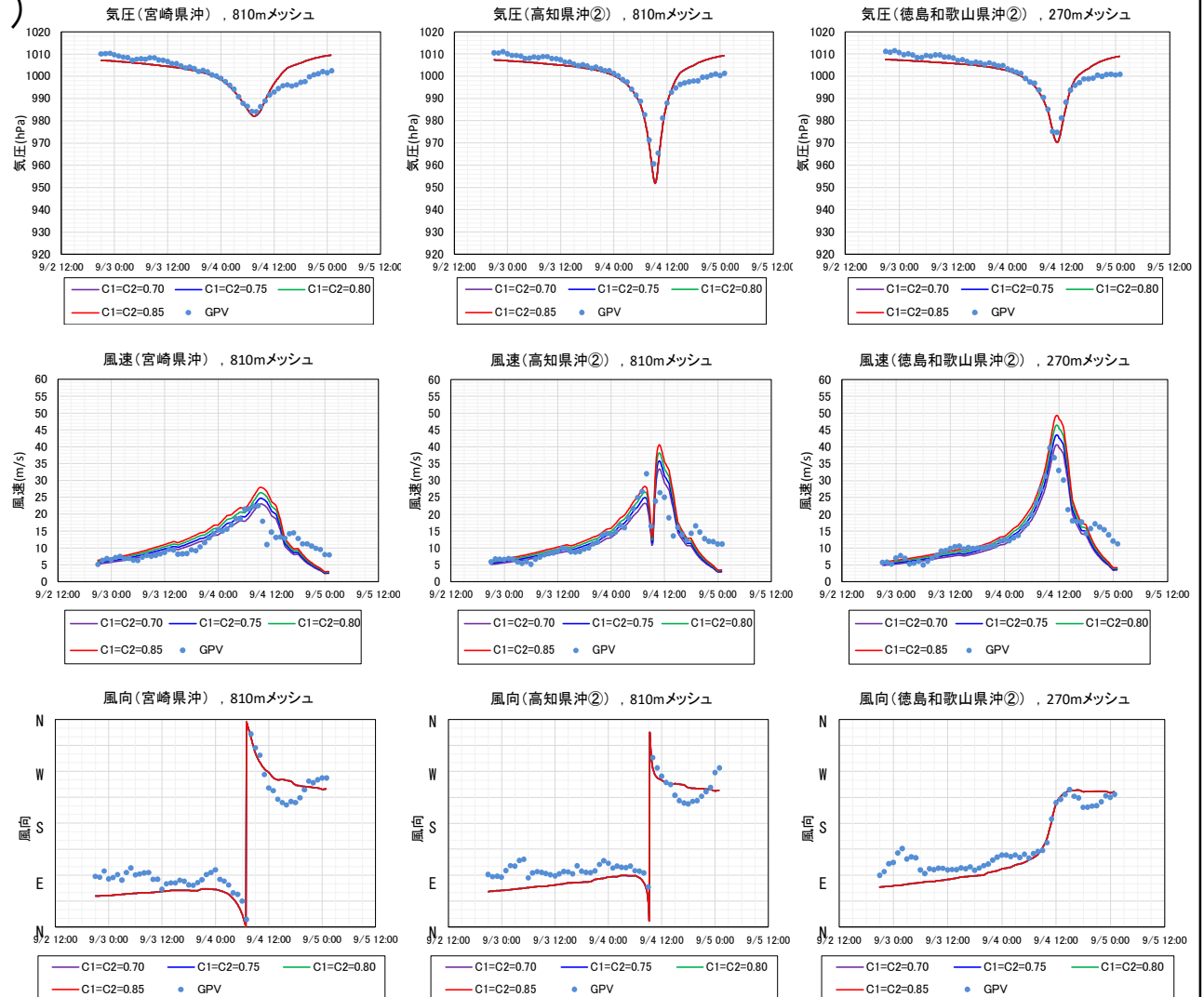
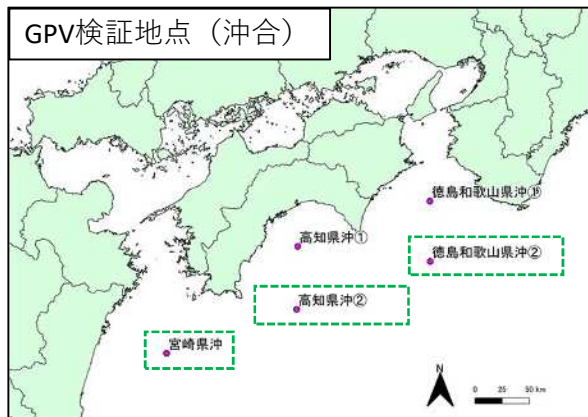
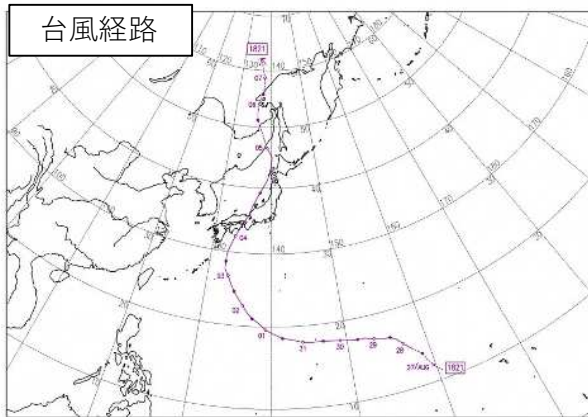


4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.8 推算モデルの再現検証結果(気圧、風向・風速)

- 気象庁が公開している数値予報GPVデータより、海上風の再現性を確認した。
- 気圧および風速、風向の再現性は、いずれの台風も各検証地点で高い結果となった。

2018年(H30)台風21号(T1821)

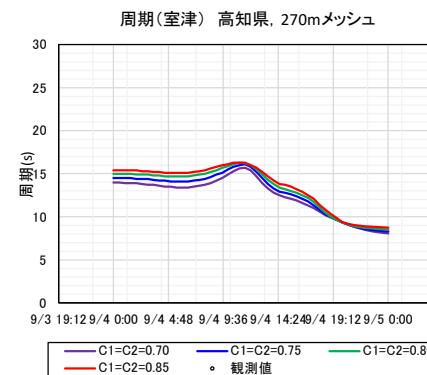
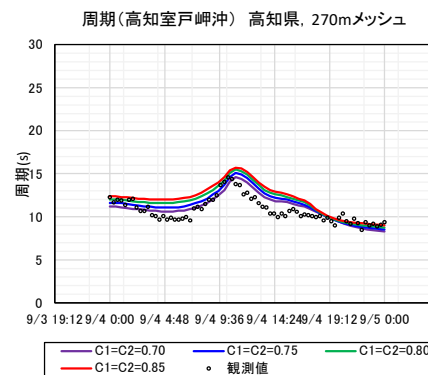
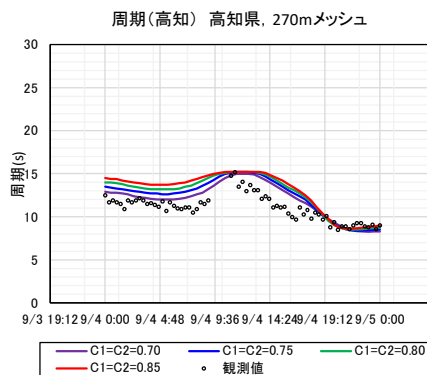
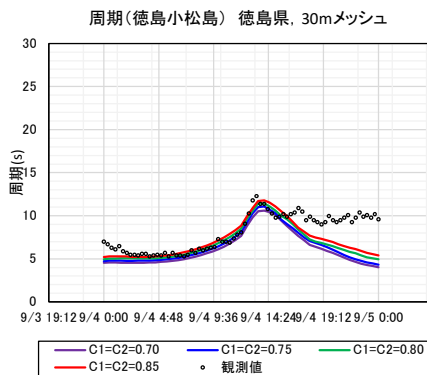
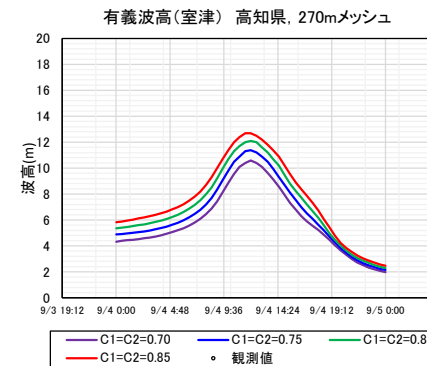
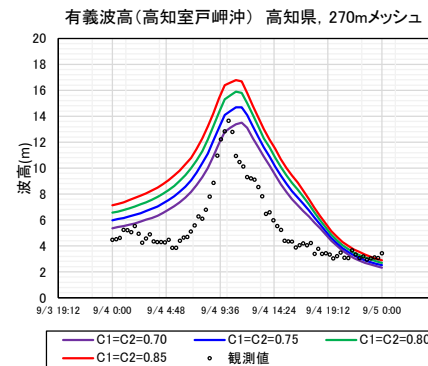
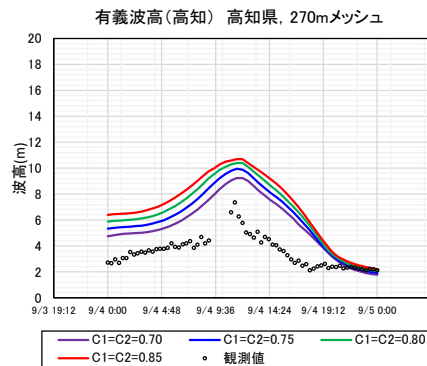
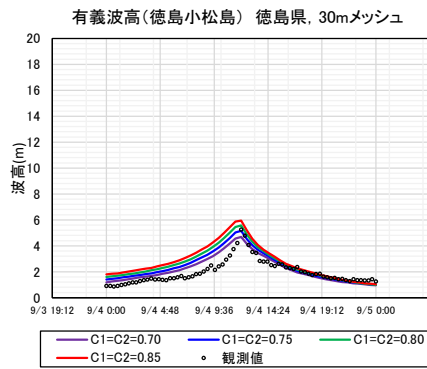
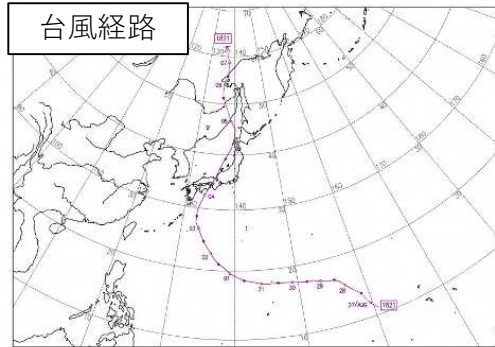


4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.8 推算モデルの再現検証結果(波浪)

- 有義波高及び有義周期に対し、C1,C2を変化させた計算を行い、再現性の高い係数を検討。
- 小松島や高知室戸沖の再現性は高い傾向にある。

2018年(H30)
台風21号(T1821)



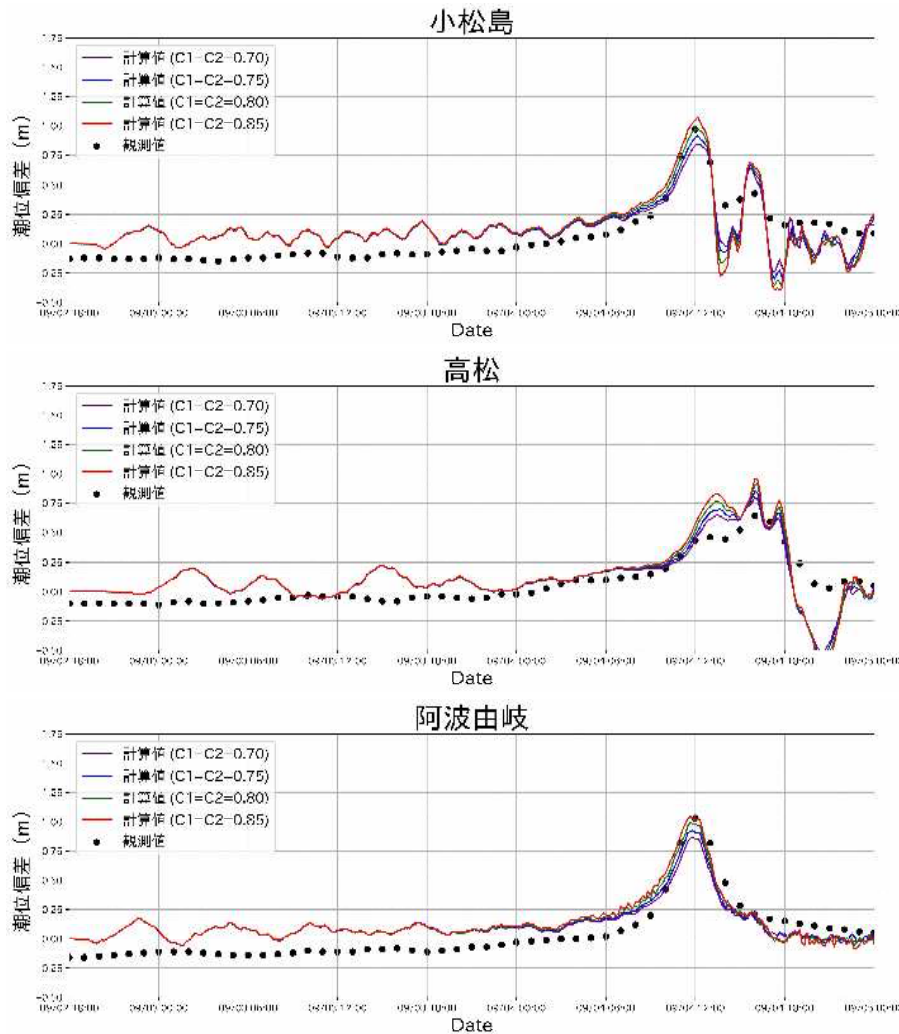
4. 将来の高潮外力の推算モデル

4.8 推算モデルの再現検証結果(潮位偏差)

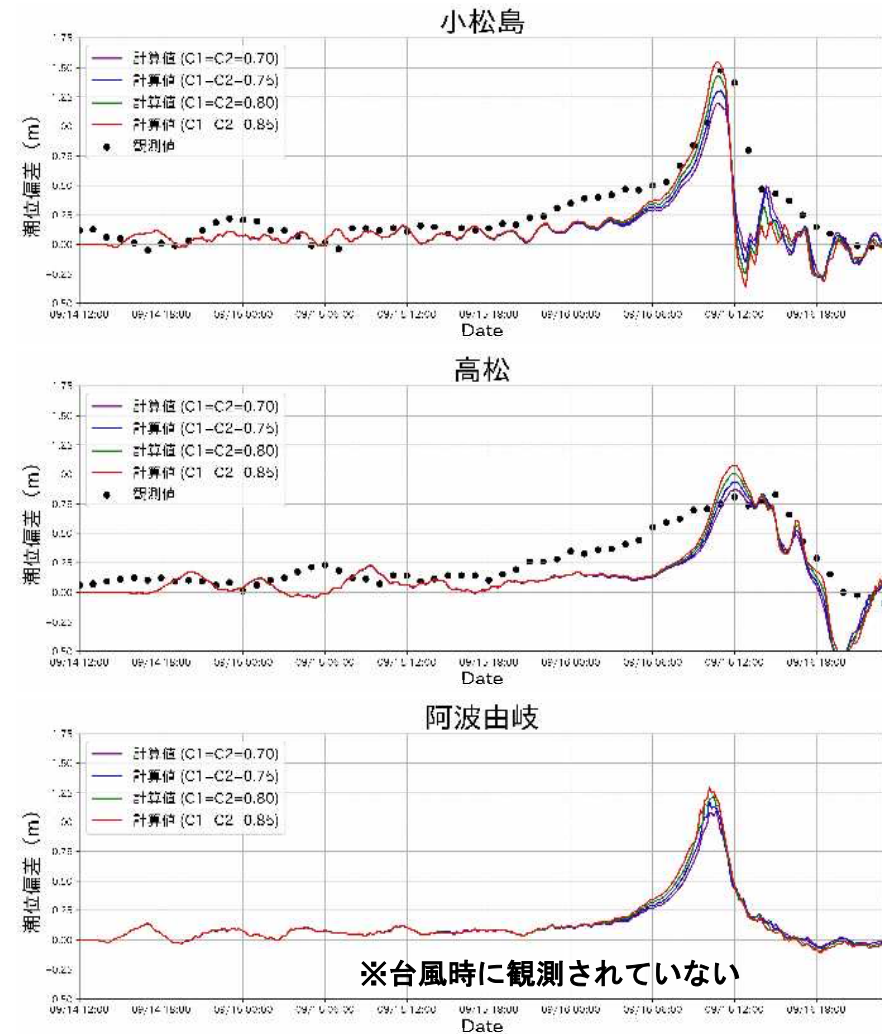
- C1、C2を変化させた計算の結果、ピーク付近で係数の違いによる差が現れる傾向。
- 実測の偏差の大きい、T1821,第2室戸台風では、C1,C2=0.80の場合にピークの再現性が高いことから、C1,C2は0.80を採用する。



2018年(H30)台風21号(T1821)



1961年(S36)台風18号(第二室戸台風)



4. 将来の高潮外力の推算モデル

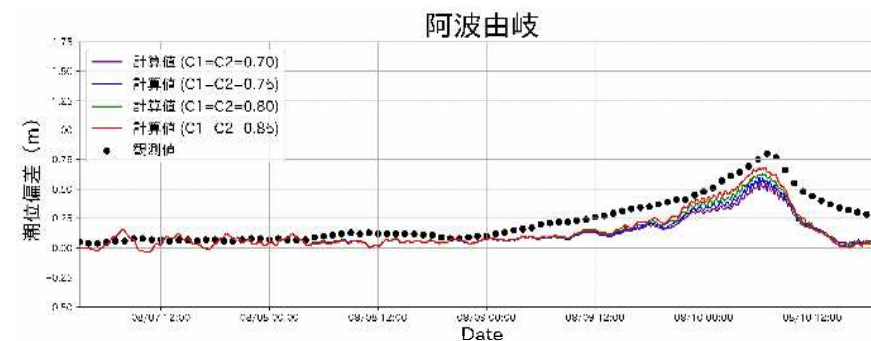
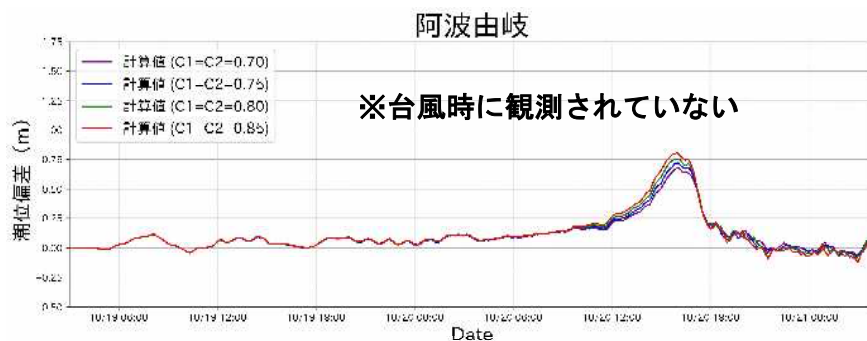
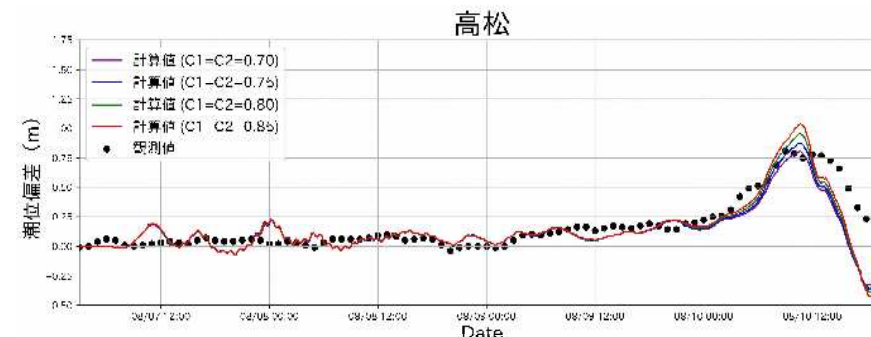
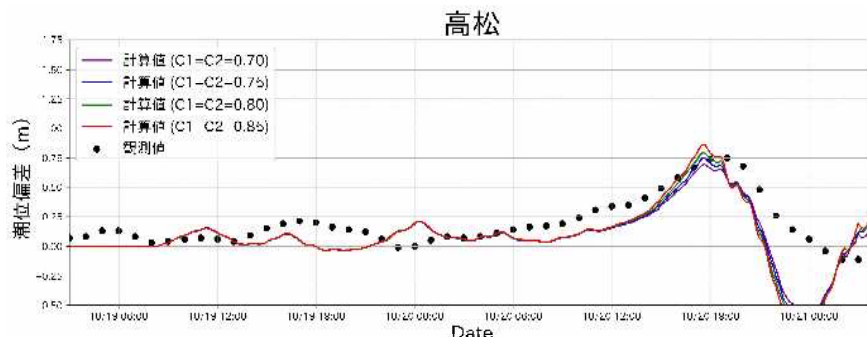
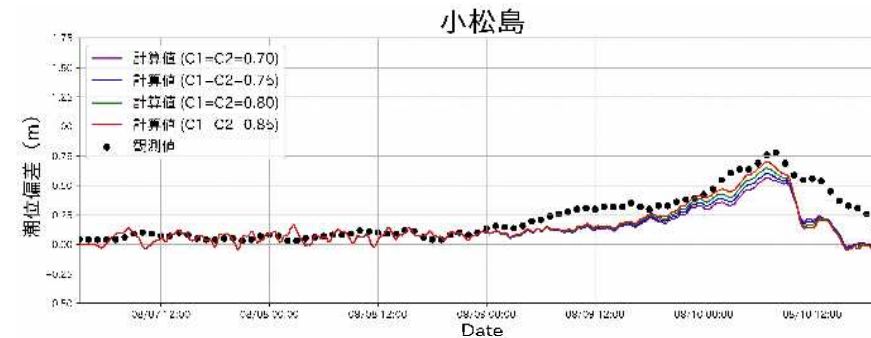
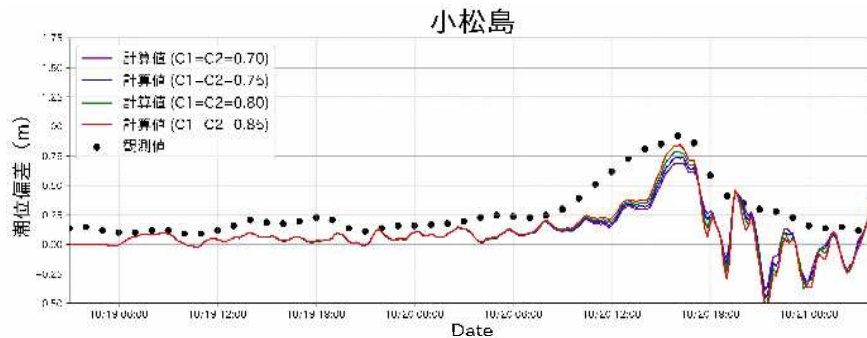
4.8 推算モデルの再現検証結果(潮位偏差)

- C1、C2を変化させた計算の結果、ピーク付近で係数の違いによる差が現れる傾向。
- 実測の偏差の大きい、T1821,第2室戸台風では、C1,C2=0.80の場合にピークの再現性が高いことから、C1,C2は0.80を採用する。



2004年(H16)台風23号(T0423)

2014年(H26)台風11号(T1411)



5. 検討方針(案) 総括

➤ 整理結果を踏まえ、本沿岸における計画外力の検討方針を総括

項目	検討方針(案)	設定値、設定方法								
海岸保全の目標	<ul style="list-style-type: none"> RCP2.6(2℃上昇相当)とする。 RCP8.5(4℃上昇相当)も考慮する 	<ul style="list-style-type: none"> RCP2.6(2℃上昇相当)とする。 RCP8.5(4℃上昇相当)も考慮(検討)する。 								
評価時点	<ul style="list-style-type: none"> 2100年(21世紀末) 	<ul style="list-style-type: none"> 2100年(21世紀末) 								
海面水位	<ul style="list-style-type: none"> 最新の朔望平均満潮位に、2100年(21世紀末)に予測される平均海面水位の上昇量を加える。 	<p>【評価地点】 三本松、高松、小松島、阿波由岐検潮所 【評価時点(2100年時点)の朔望平均満潮位】</p> <table border="1"> <tr> <td>2100年時点の朔望平均満潮位</td> <td>【讃岐阿波沿岸】 T.P. +1.386m (三本松) T.P. +1.600m (高松)</td> <td>【紀伊水道西沿岸】 T.P. +1.231m</td> <td>【海部灘沿岸】 T.P. +1.264m</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"> </p> <table border="1"> <tr> <td>最新の朔望平均満潮位(2021年時点)</td> <td>T.P. +1.066m (三本松) T.P. +1.280m (高松)</td> <td>T.P. +0.911m (小松島)</td> <td>T.P. +0.944m (阿波由岐)</td> </tr> </table>	2100年時点の朔望平均満潮位	【讃岐阿波沿岸】 T.P. +1.386m (三本松) T.P. +1.600m (高松)	【紀伊水道西沿岸】 T.P. +1.231m	【海部灘沿岸】 T.P. +1.264m	最新の朔望平均満潮位(2021年時点)	T.P. +1.066m (三本松) T.P. +1.280m (高松)	T.P. +0.911m (小松島)	T.P. +0.944m (阿波由岐)
2100年時点の朔望平均満潮位	【讃岐阿波沿岸】 T.P. +1.386m (三本松) T.P. +1.600m (高松)	【紀伊水道西沿岸】 T.P. +1.231m	【海部灘沿岸】 T.P. +1.264m							
最新の朔望平均満潮位(2021年時点)	T.P. +1.066m (三本松) T.P. +1.280m (高松)	T.P. +0.911m (小松島)	T.P. +0.944m (阿波由岐)							
潮位偏差(計画偏差)	<ul style="list-style-type: none"> 気候変動の影響を考慮した大規模アンサンブル気候予測データベース(d4PDF等)を活用して、将来的に予測される変動量を推算する。 	<p>【手法】 A-1 パラメトリック台風モデル 【台風条件】 d4PDF等に基づき、将来気候下における第二室戸台風と同じ生起確率となる条件を2℃、4℃上昇相当下で設定 【設定方法】 高潮推算モデルにより評価地点毎に潮位偏差を算定</p>								
波浪(計画波)		<p>【手法】 B-1 全球気候モデル台風を採用 【台風条件】 d4PDF等に含まれる台風のうち、当県に影響を及ぼし得る経路を通る全台風 【設定方法】 波浪推算モデルにより評価地点毎に波浪(波高、周期)を算定し、確率評価により現行防護水準相当の波浪を設定</p>								