

気候変動を踏まえた計画外力の 検討結果

令和5年2月8日

国土交通省 四国地方整備局 高知河川国道事務所
高知県 土木部 港湾・海岸課

観測データ、 d^2PDF/d^4PDF の 分析結果

観測データに基づく外力状況の整理(現行計画値との比較)

■これまでに発生した外力状況を把握するため、土佐湾沿岸中央部(高知)における既往の観測データ(潮位、潮位偏差、波高・周期)を整理し、現行計画値との比較を行った。

項目	現行計画値 (土佐湾中央部)	現行計画の設定方法	観測データ (土佐湾中央部)	現行計画値と 観測データの比較
朔望平均満潮位	T.P. +1.00(m)	S25～S35の桂浜検潮所における朔望平均満潮位の平均値 (表記は新測地系への変換値)	高知検潮所(S24～R3) 近10カ年平均値:T.P.0.97(m)	近年の朔望平均満潮位は計画値を超過していない
潮位偏差	1.46(m)	S25～S45の観測値※とS25以前の推定値(簡易式)より、既往最大となるM35.9.7の推定値を設定 ※昭和45年台風10号の観測値は棄却	高知検潮所(S24～R3)※ ¹ 1位:1.93(m) 昭和45年台風10号 2位:1.28(m) 昭和49年台風16号 3位:1.16(m) 昭和35年台風16号	昭和45年台風10号の潮位偏差は計画値を超過(これ以外は超過していない)
潮位	T.P.2.46(m) (計画高潮位)	桂浜検潮所の朔望平均満潮位+既往の潮位偏差の最大値より設定 (表記は新測地系への変換値)	高知検潮所(S24～R3)※ ² 1位:T.P.2.74(m) 昭和45年台風10号 2位:T.P.2.09(m) 平成26年台風11号 3位:T.P.1.98(m) 昭和49年台風16号	昭和45年台風10号の潮位は計画値を超過(これ以外は超過していない)
波高	13.0(m) (1/30)	波浪推算データ(S26～S55)より極値統計解析を実施し、30年確率波高を設定	高知港(H8～R3)※ ³ 1位:12.49(m) 平成16年台風23号 2位:10.18(m) 平成16年台風16号 3位:9.95(m) 平成15年台風10号	観測された有義波高の最大値は計画値と同程度
周期	15.5(秒) (1/30)	波浪推算データ(S26～S55)と観測データ(S56～H8)より波高と周期の関係式を作成し、30年確率波高に対応する周期を設定	高知港(H8～R3)※ ³ 1位:16.4(秒) 平成16年台風23号 2位:11.5(秒) 平成16年台風16号 3位:13.0(秒) 平成15年台風10号	観測された有義波周期の最大値は計画値と同程度

※1:気象庁公表データ(1時間間隔)より整理。

【他観測所の観測1位】室戸岬:1.69(m) 平成16年台風23号、土佐清水:1.23(m) 昭和20年(台風の詳細は不明)

※2:気象庁公表データ(1時間間隔)より整理。

【他観測所の観測1位】室戸岬:T.P.2.57(m) 昭和45年台風10号、土佐清水:T.P.1.78(m) 平成16年台風23号

※3:ナウファス公表データ(2時間間隔)より整理。

【他観測所の観測1位】室津港:波高13.55(m)・周期15.8(秒) 平成16年台風23号、上川口:波高8.47(m)・周期13.7(秒) 平成17年台風14号

土佐湾沿岸で発生した顕著な高潮・高波(要因となった台風)の整理

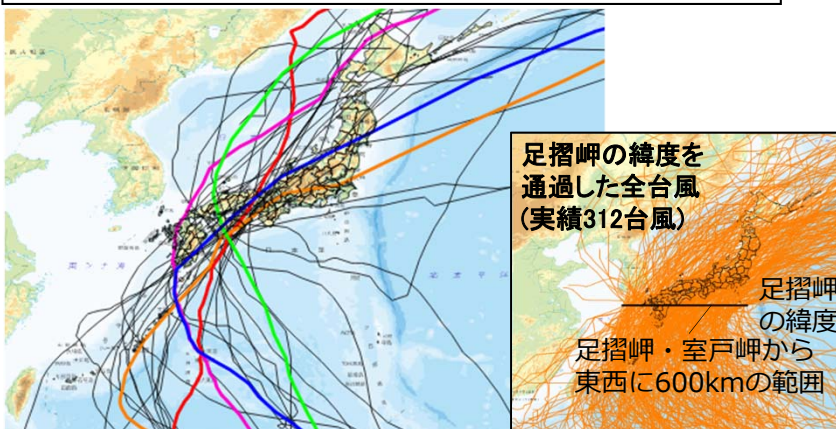
■土佐湾沿岸における既往の台風・外力に関する特性を把握するため、代表的な観測所(潮位:高知・室戸岬・土佐清水、波浪:高知港・室津港・上川口)において観測された、顕著な高潮・高波の発生状況とその要因となった台風を整理した。

顕著な高潮・高波(いずれかの観測所で昭和26年以降に観測以降10位以内の潮位偏差又は波高を観測)が発生した台風 ※赤字:観測1位

台風	潮位偏差(m)			有義波高(m)		
	高知	室戸岬	土佐清水	高知港	室津港	上川口
S26(1951)年06号	1.0		0.57			
S26(1951)年15号	0.92		0.77			
S35(1960)年16号	1.16		0.56			
S36(1961)年18号	0.91		0.78			
S39(1964)年20号	0.86		1.15			
S44(1969)年09号		1.08	0.61	波浪観測データ無し		
S45(1970)年10号	1.93	1.45	0.6			
S49(1974)年16号	1.28	0.52	0.65			
S50(1975)年05号	0.83	0.52	0.94			
S54(1979)年16号	0.5	0.92	0.7			
S62(1987)年19号	0.58	0.77	0.55			
H05(1993)年13号	0.52	0.45	0.87		9.45	
H09(1997)年19号				6.96		5.54
H10(1998)年10号	0.66	0.6	0.5	7.08	7.19	
H15(2003)年10号	0.69	0.81	0.6	9.95	8.07	6.2
H16(2004)年06号	0.78	0.87	0.63	6.33	10.02	6.93
H16(2004)年10号	0.88	0.5				
H16(2004)年16号	0.82	0.67	0.8	10.18	9.08	6.68
H16(2004)年18号	0.82	0.67	0.8	7.17	6.56	
H16(2004)年23号	0.94	1.69	0.94	12.49	13.55	
H17(2005)年14号	0.52		0.49	8.58	8.03	8.47
H19(2007)年04号	0.51	0.64	0.58	6.71	10.03	6.46
H19(2007)年05号				6.36	5.8	8.12
H23(2011)年06号	0.82	0.7		8.57	6.89	8.37
H26(2014)年11号	1.02	0.8		9.58	8.37	7.84
H29(2017)年18号					8.49	
H30(2018)年20号						6.71
H30(2018)年21号		0.84		5.78		6.29
H30(2018)年24号	0.61	1.15		9.93		6.66



顕著な高潮・高波が発生した台風経路(左表の29台風)



※台風経路は気象庁ベストトラックデータ(S25~R3)より整理
 ※同データより、足摺岬・室戸岬から東西に600km(観測以降最大の暴風半径)の範囲で足摺岬の緯度を通過した台風を抽出(全312台風)

- いずれかの観測所で観測以降10位以内に入る台風(左表の29台風)
- 昭和39(1964)年台風20号: 潮位偏差1位(土佐清水)
- 昭和45(1970)年台風10号: 潮位偏差1位(高知)
- 平成16(2004)年台風23号: 潮位偏差1位(室戸岬), 波高1位(高知港, 室津港)
- 平成17(2005)年台風14号: 波高1位(上川口)
- 平成26(2014)年台風11号: 近年で最大の潮位偏差(高知)

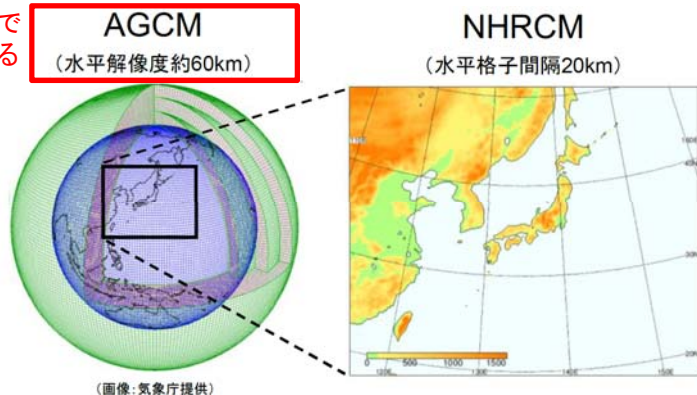
d2PDF/d4PDFの概要と整理・分析内容

- 気候変動による将来の台風特性の変化傾向を把握するため、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d2PDF/d4PDF)」の台風トラックデータを用いた整理・分析を実施した。
- d2PDF/d4PDFには、海面水温等の条件に応じた多数の数値実験結果(気圧・風速等)が含まれており、過去実験(6000ケース)、2°C上昇実験(3240ケース)、4°C上昇実験(5400ケース)が存在する。

d2PDF/d4PDFの概要

- ◆ 水平解像度約60kmの全球実験(AGCM)と水平解像度約20kmの領域実験(NHRCM)があり、本検討では全球実験(AGCM)を用いて整理を行った。

本検討で
使用する
データ



- ◆ 全球実験(AGCM)には以下のデータが含まれている。
 - ・過去実験 : 6000ケース = 60年間 × 100摂動
 - ・2°C上昇実験 : 3240ケース = 60年間 × 6モデル × 9摂動
 - ・4°C上昇実験 : 5400ケース = 60年間 × 6モデル × 15摂動

モデル

将来実験で使用している主要6モデル

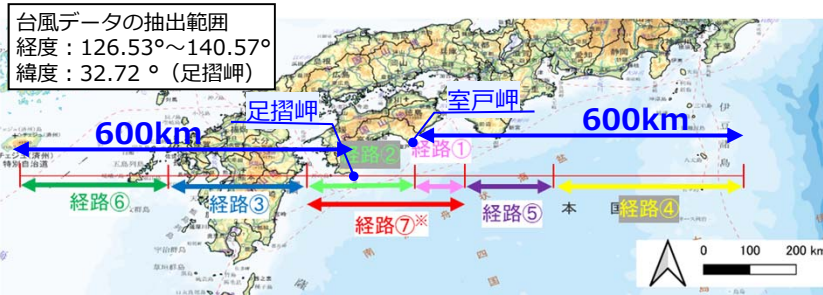
(CCSM4, GFDL-CM3, HadGEM2-AO, MIROC5, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3)

摂動

海面水温解析の推定誤差と同等の振幅をもつ海面水温摂動であり、2°C上昇実験は任意に選んだ9個、4°C上昇実験は15個が使用されている

d2PDF/d4PDFの整理・分析内容

- ◆ 整理・分析には京都大学より公開されているd2PDF/d4PDFの台風トラックデータ※1を使用
 - ◆ 足摺岬・室戸岬から東西に600km※2の範囲で足摺岬の緯度を通過する台風データを抽出
 - ◆ 抽出データより、各台風が足摺岬の緯度を通過した際の台風諸元(中心気圧※3、風速、移動速度、経路等)を整理し分析を実施
- ※ここでは、将来の台風特性の変化傾向を把握するため、過去、2°C上昇、4°C上昇の全データを用いた整理を実施



経路①: 紀伊水道を通過、経路②: 四国地方を南西方向から通過
経路③: 九州地方を通過、経路④: 太平洋を北上
経路⑤: 紀伊半島を通過、経路⑥: 日本列島の西側を通過
経路⑦: 土佐湾を南東方向から通過

※1: 京都大学防災研究所沿岸災害研究分野HP

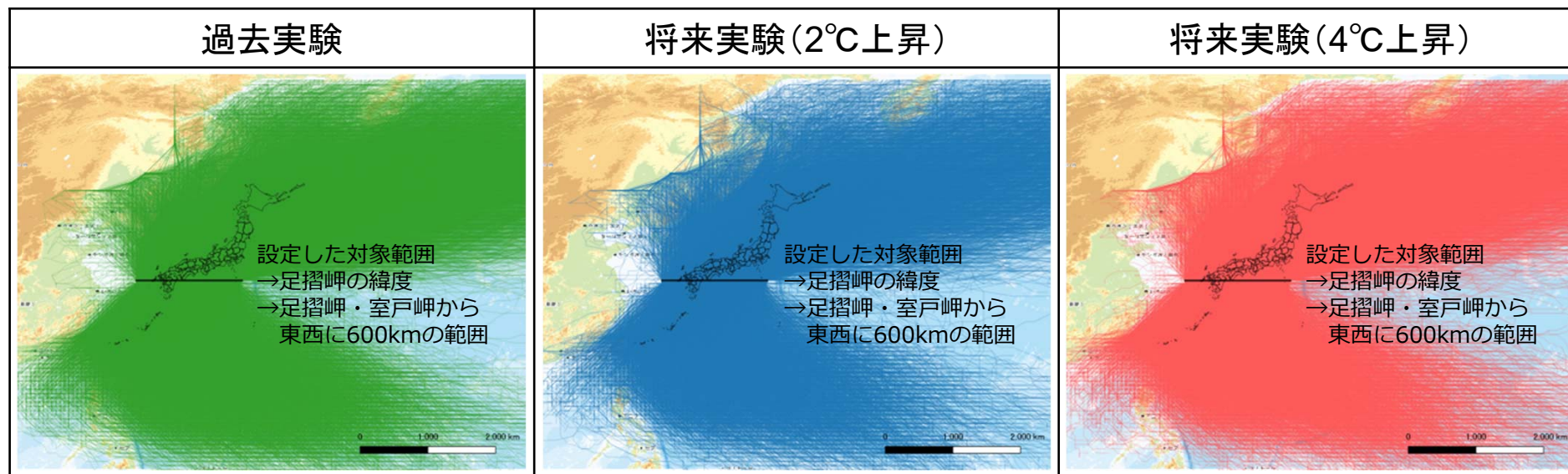
(http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/japanese/?page_id=5004)

※2: 同範囲を通過した過去の実績312台風の中から観測以降最大の暴風半径(昭和56年台風24号)を設定

※3: 足摺岬の緯度ではバイアスが小さく、ここではバイアス補正未実施

d2PDF/d4PDFの分析結果(気候変動による台風発生状況の変化)

- d2PDF/d4PDFの台風トラックデータより、設定した対象範囲を通過する台風を抽出した。
- 抽出した結果、過去実験は20,554個、2°C上昇実験は9,097個、4°C上昇実験は11,117個となった。
- それぞれの年間発生個数は、過去実験は3.43個/年、2°C上昇実験は2.81個/年、4°C上昇実験は2.06個/年となり、将来的に減少傾向にあることが確認できる。



条件	年数	抽出台風数	年間発生個数
過去実験 (1951年~2010年)	100メンバ(100摂動※2) × 60年 = 6000年	20,554個	3.43個/年 (実績: 4.39個/年)※3
将来実験(2°C) (2031年~2090年)	54メンバ(6モデル※1 × 9摂動※2) × 60年 = 3240年	9,097個	2.81個/年
将来実験(4°C) (2051年~2110年)	90メンバ(6モデル※1 × 15摂動※2) × 60年 = 5400年	11,117個	2.06個/年

※1 将来実験において使用している主要6モデル (CCSM4、GFDL-CM3、HadGEM2-A0、MIROC5、MPI-ESM-MR、MRI-CGCM3)

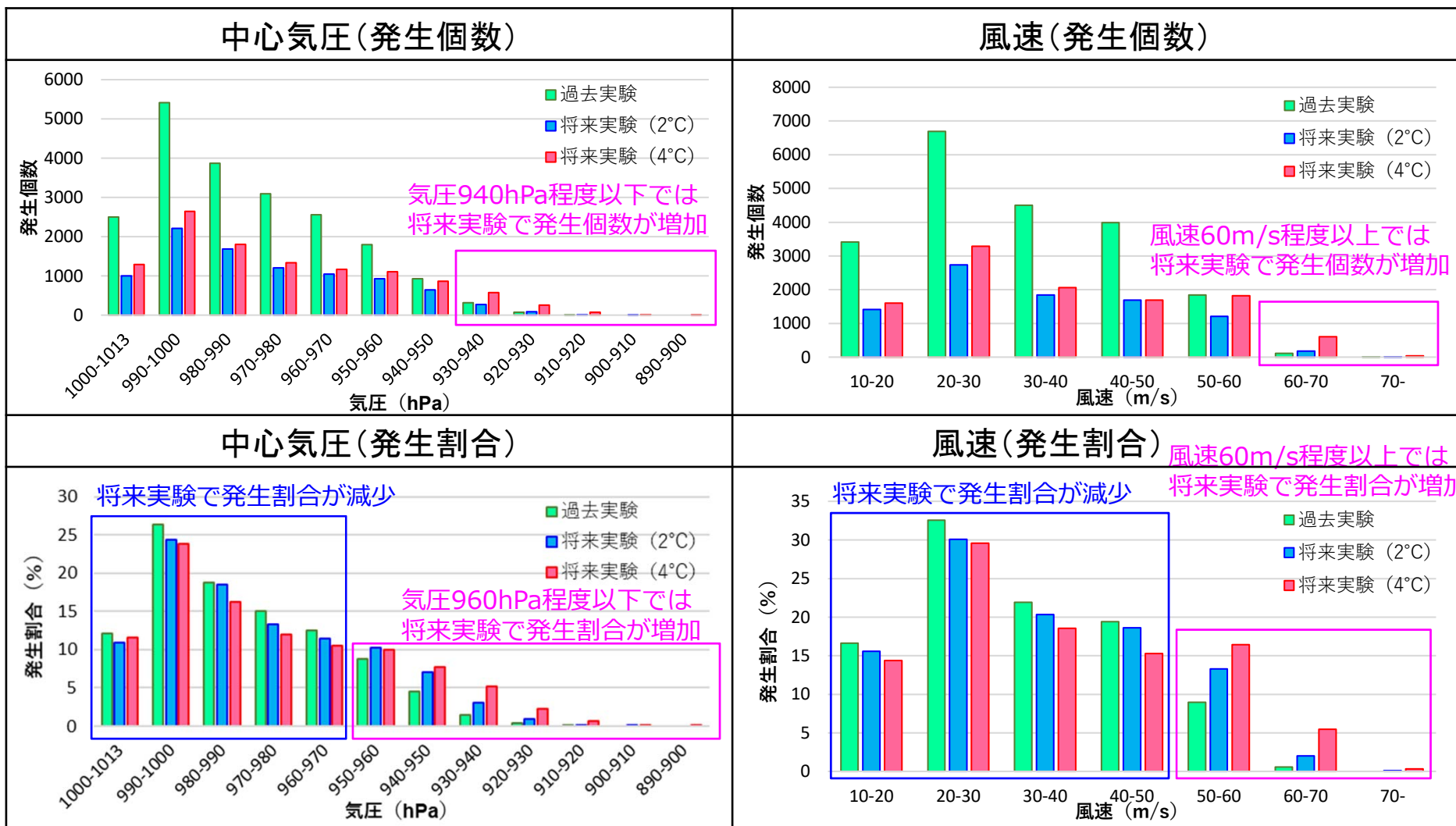
※2 海面水温解析の推定誤差と同等の振幅をもつ海面水温摂動であり、2°C上昇実験は任意に選んだ9個、4°C上昇実験は15個が使用されている

※3 気象庁ベストトラックデータ (実績台風資料) を基に対象範囲を通過した実績台風より整理した結果 (312個/71年間)

実績台風の年間発生個数は過去実験の1.28倍であり、以降の気候変動後の外力検討において年間発生個数のバイアスを考慮した

d2PDF/d4PDFの分析結果(気候変動による台風特性の変化)

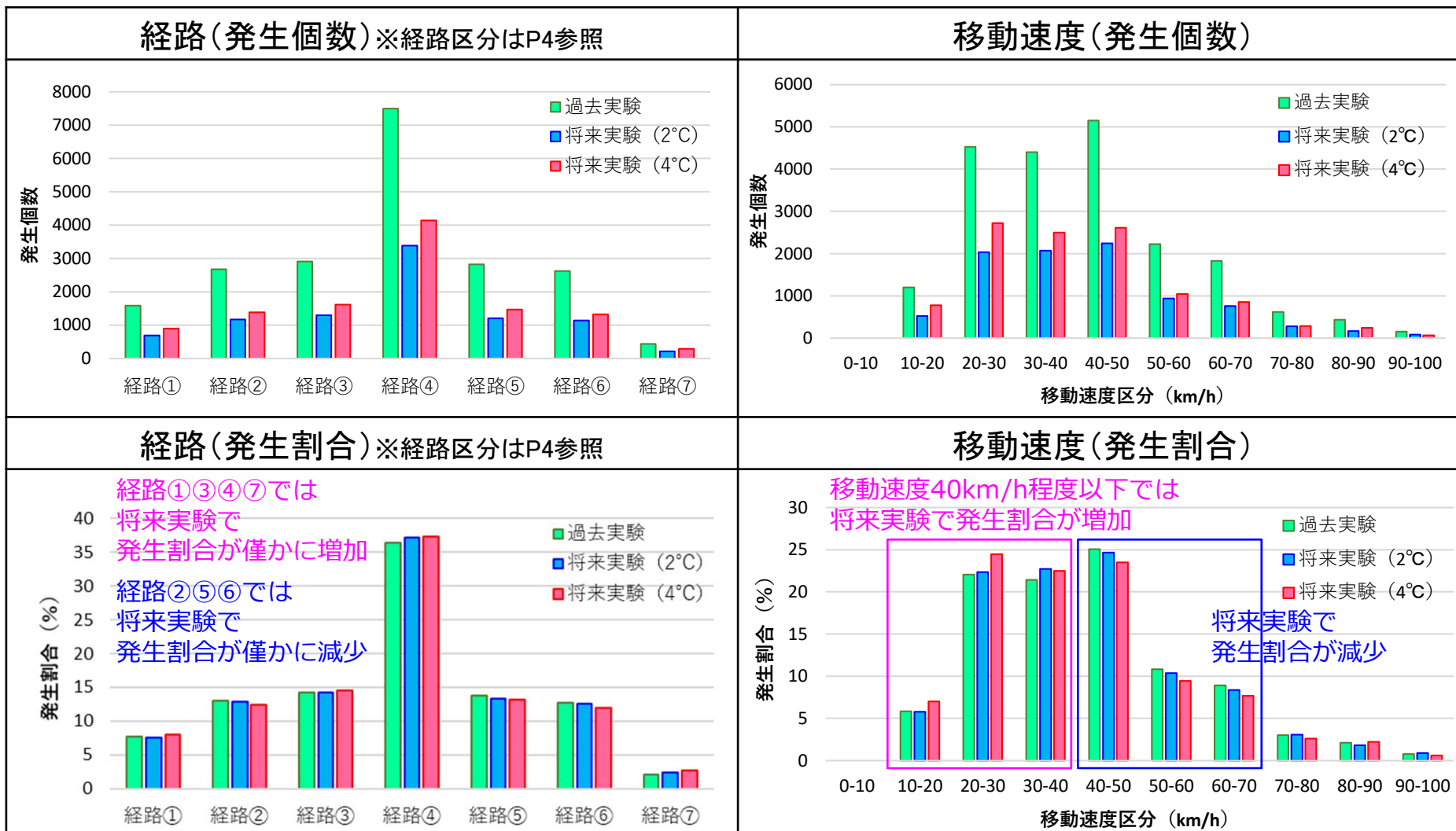
- 抽出した台風データより、各台風が足摺岬の緯度を通過した際の台風諸元(中心気圧、風速)を整理し、諸元毎に台風の発生個数と発生割合を比較した。
- 気圧及び風速では、気圧が低い台風及び風速が大きい台風の発生個数・割合が将来的に増加しており、気候変動による台風の強大化(勢力の強い台風の増加)の傾向が確認できる*。



*気候変動を踏まえた海岸保全のあり方提言(R2.7)等に示されている傾向と同様の結果となることを確認

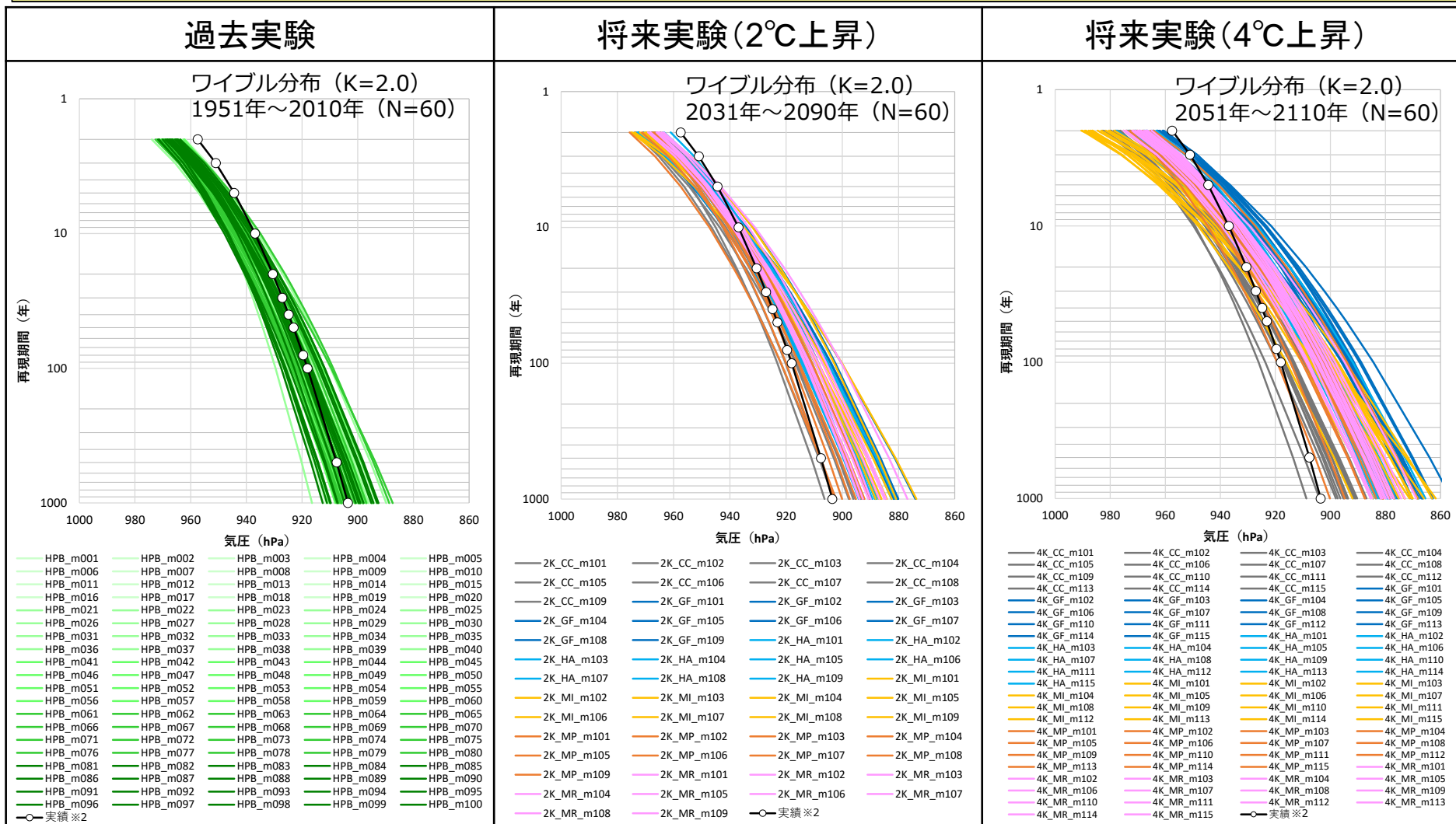
d2PDF/d4PDFの分析結果(気候変動による台風特性の変化)

- 抽出した台風データより、各台風が足摺岬の緯度を通過した際の台風諸元(移動速度、経路)を整理し、諸元毎に台風の発生個数と発生割合を比較した。
- 経路毎の台風発生割合は、経路によって将来的に増減する傾向にあることが確認できる。
- 移動速度は、過去実験と比べて、将来実験の方が低下傾向にあることが確認できる。



d2PDF/d4PDFの分析結果(台風の中心気圧の極値統計解析結果)

- 中心気圧の変化状況を把握するため、極値統計解析※¹(メンバ毎の年最低気圧を対象)を実施した。
- 過去実験は、実績データ※²と概ね一致していること(過去実験の分布幅の中央付近)が確認できる。
- 将来実験は、過去実験と比べて、同じ再現期間の中心気圧は低下することが確認できる。



※¹: 海岸保全施設の技術上の基準・同解説等に記載されている複数の手法を適用し、それぞれで最も相関係数が高い手法を採用

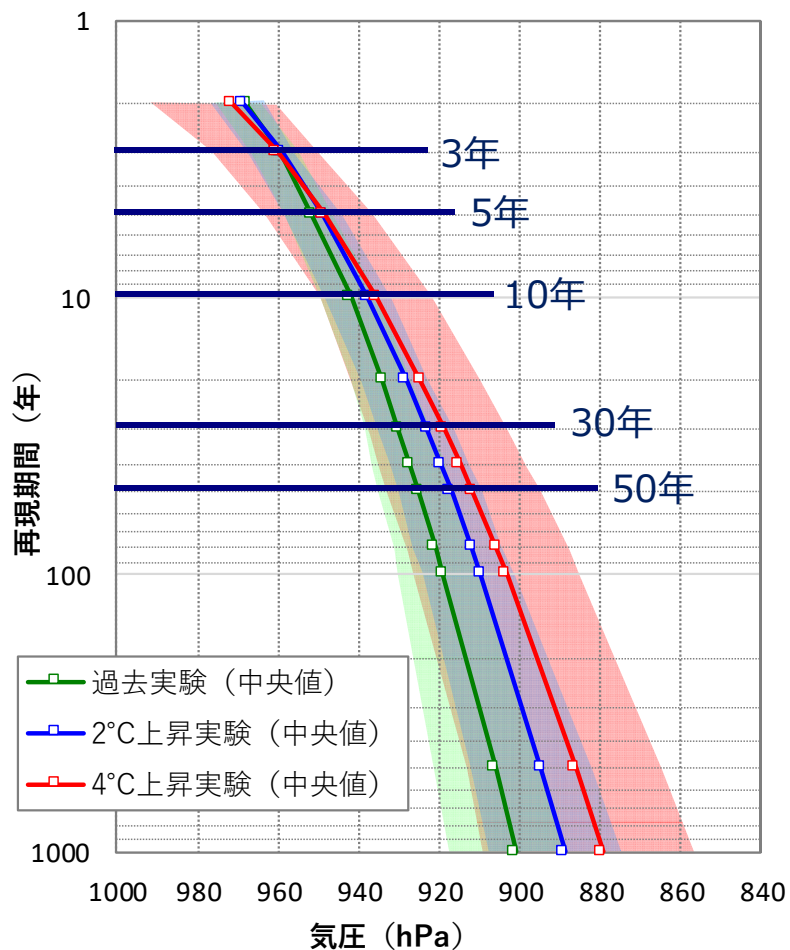
※²: 気象庁ベストトラックデータより整理した実績の中心気圧(年最低値)を用いた極値統計解析結果(ワイブル分布(K=2.0)、S26~R3、N=71)

d2PDF/d4PDFの分析結果(再現期間毎の台風を中心気圧の変化)

- 中心気圧の極値統計解析結果より、再現期間毎の中心気圧の変化状況を整理した。
- 中心気圧(メンバ毎の中央値)は、再現期間3年ではほとんど変化がみられない。一方、5年程度から低下傾向にあり、50年では2°C上昇は約8hPa、4°C上昇は約13hPa低下することが確認できる。

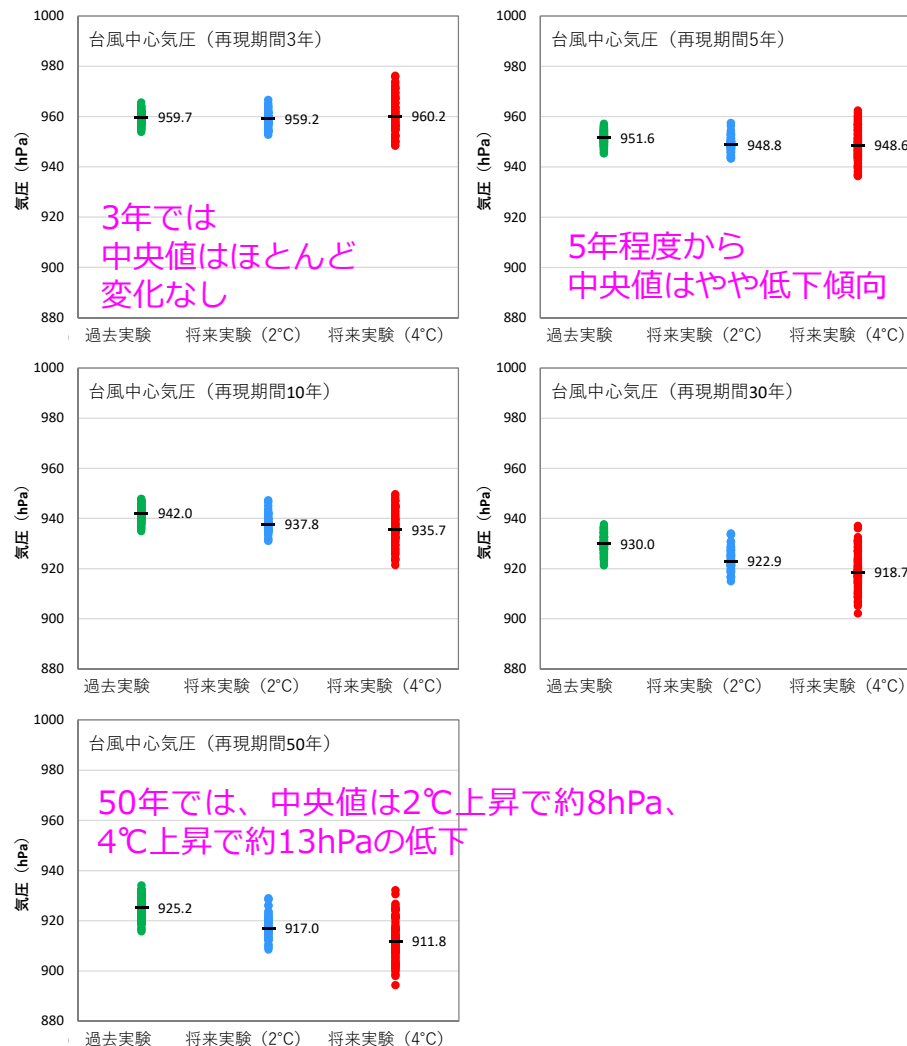
極値統計解析結果の重ね合わせ

※P8のメンバ毎の極値統計解析結果を包絡したものを表示



確率年毎の気圧の分布状況

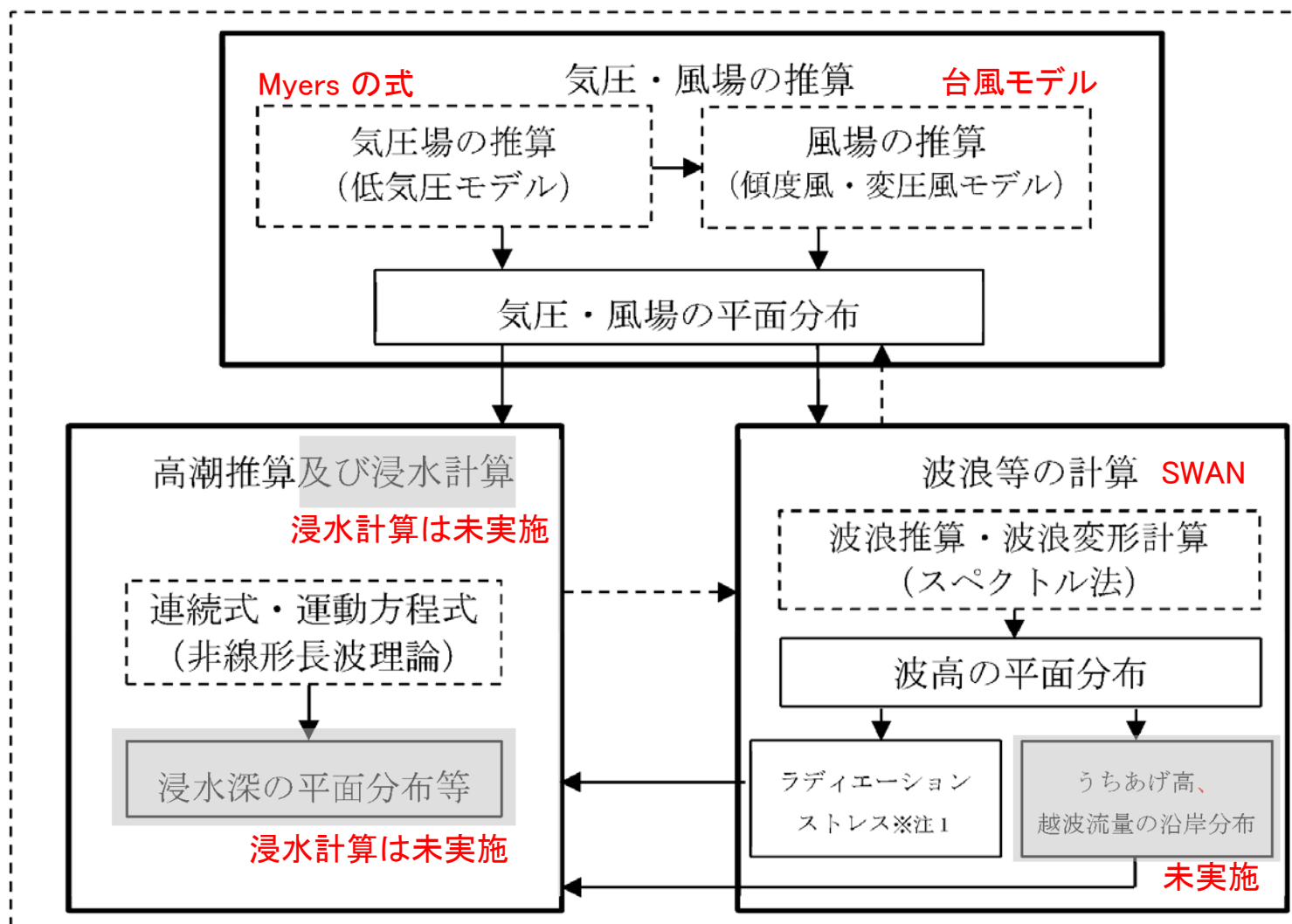
※黒線はメンバ毎の中央値を表示



高潮・波浪シミュレーションモデル の構築(再現)

高潮・波浪シミュレーションモデルの概要

- 将来予測(簡易推定式の構築)を行うために、高潮・波浪シミュレーションモデルを構築した。
- 高潮・波浪シミュレーションモデルは、「高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver.2.10(R3.7)」を基に構築し、実績台風(顕著な高潮・高波が発生した4台風)を対象に再現検証を行った。



出典：高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver. 2. 10 (R3. 7) に加筆

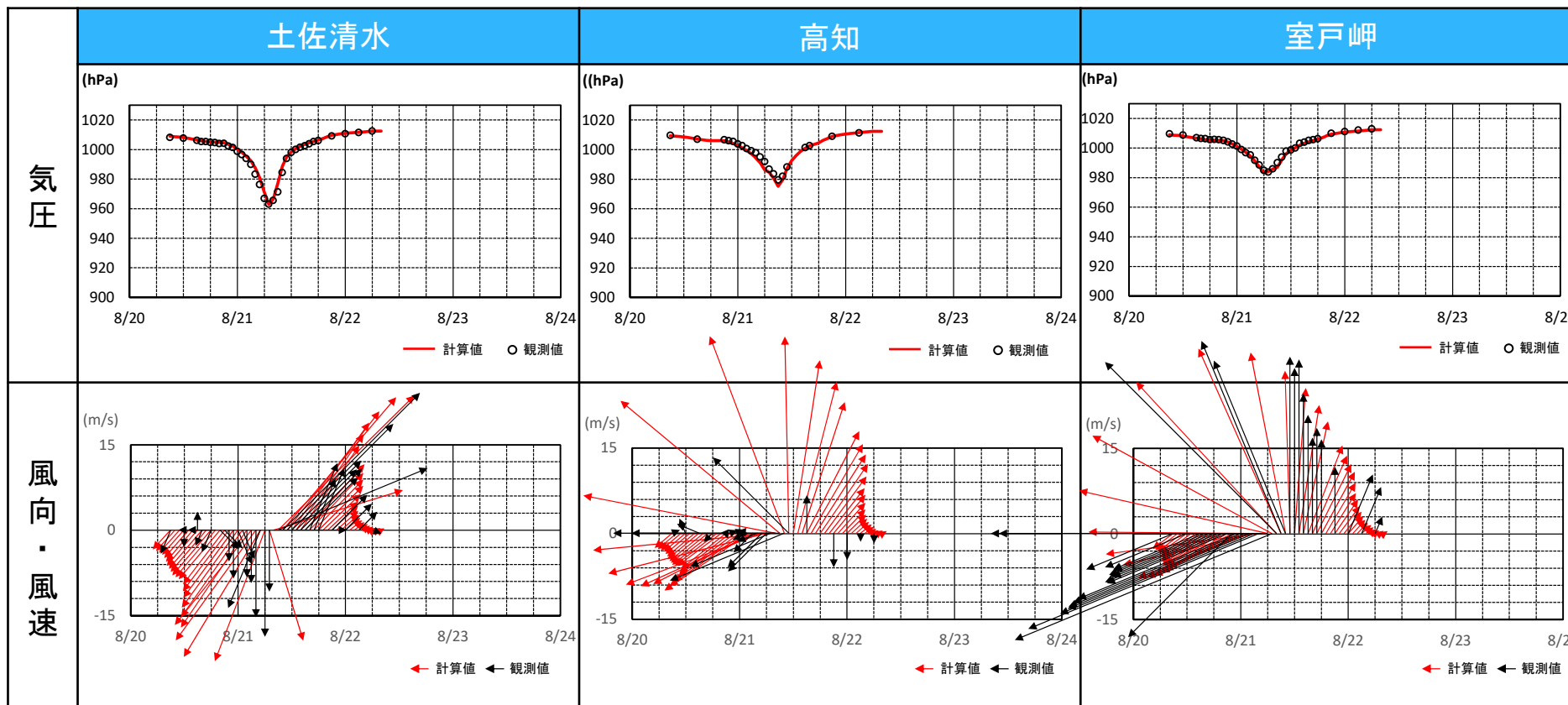
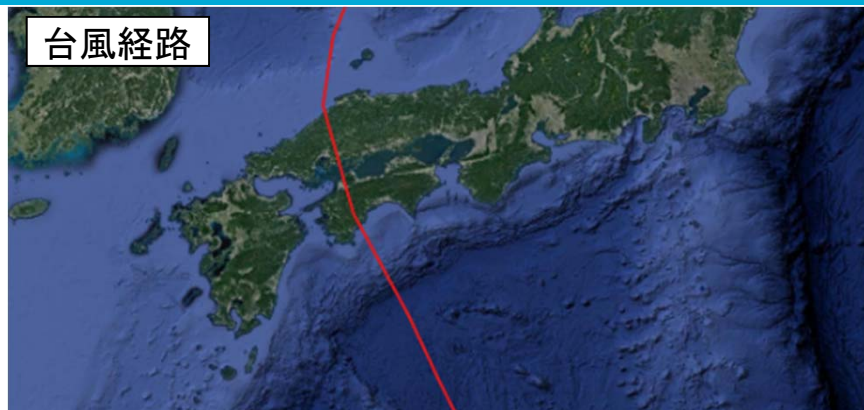
高潮・波浪シミュレーションの設定条件

- 高潮・波浪シミュレーションモデル(再現検証)は、以下の条件に基づき実施した。
- 以降の再現検証結果を踏まえ、将来予測に使用する条件(メッシュサイズ、係数等)を設定した。

項 目		計算モデル・設定条件
外力条件	再現検証の対象台風	昭和45年(1970)台風10号 : 潮位偏差1位(高知)※ ¹ 平成16年(2004)台風23号 : 潮位偏差1位(室戸岬), 波高1位(高知港, 室津港)※ ¹ 平成17年(2005)台風11号 : 波高1位(上川口)※ ² 平成26年(2014)台風11号 : 近年で最大の潮位偏差(高知)※ ¹ ※ ¹ : 土佐湾沿岸中央部(高知)で顕著な高潮・高波が発生した台風を設定 ※ ² : 高知周辺を通過する経路以外の代表的な台風を設定
計算領域	計算格子間隔 (メッシュサイズ)	波浪推算 : 7290m→2430m→810m→270m→90m◆ 高潮推算 : 7290m→2430m→810m→270m→90m◆ ◆平成26年台風11号を対象にメッシュサイズ設定のための感度分析を実施し設定
	地形・構造物条件	再現検証時点毎の防波堤等の沖合施設・地形を設定
	粗度係数※	海域 : 0.025
気圧・風場の推算	気圧場・風場の推算方法	Myersの式
	風場の推算モデル	台風モデル
	海面摩擦を考慮した 風速変換係数※	C1, C2=0.8(0.7, 0.8, 0.9の比較を実施しより再現性の高い係数を設定)
	傾度風の風向※	30°
	台風半径 (最大旋衝風速半径)	既往論文(天気図から台風半径を整理)や各観測所の気圧観測データ(Myersの式より実績気圧を再現可能な台風半径を整理)を基に設定
波浪場の計算	基礎理論	波作用量平衡式
	波浪の計算モデル	SWAN
高潮の計算	基礎理論	非線形長波理論(単層モデル、ラディエーションストレス考慮)
	海面抵抗係数※	本多・光易(1980)を基本として、風速45m/s以上は一定
	計算時間間隔	C.F.L.条件を満たすように設定

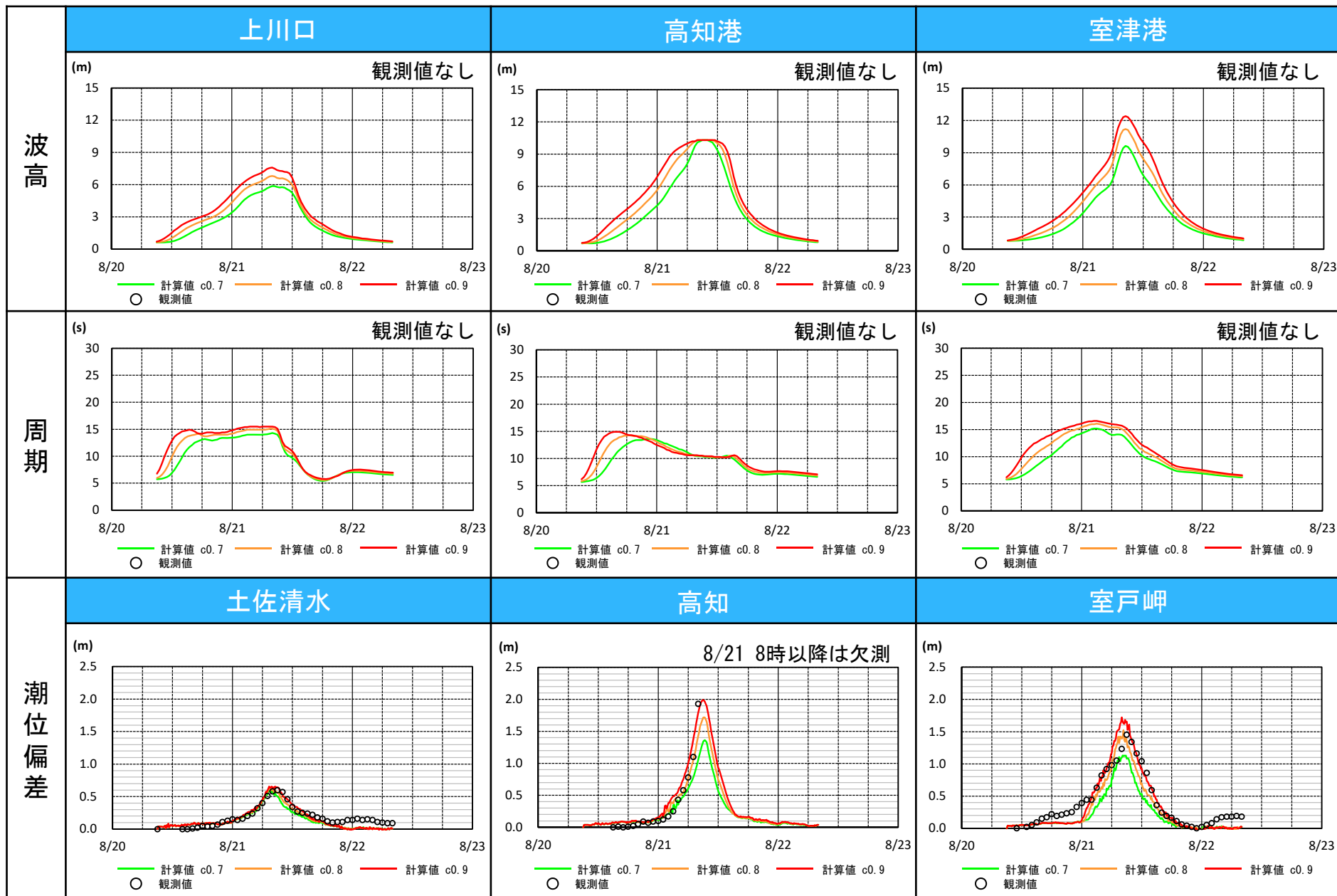
※高潮浸水想定区域図作成の手引き Ver. 2.10 (R3.7) に準拠

昭和45年台風10号の再現検証結果(気圧、風向・風速)



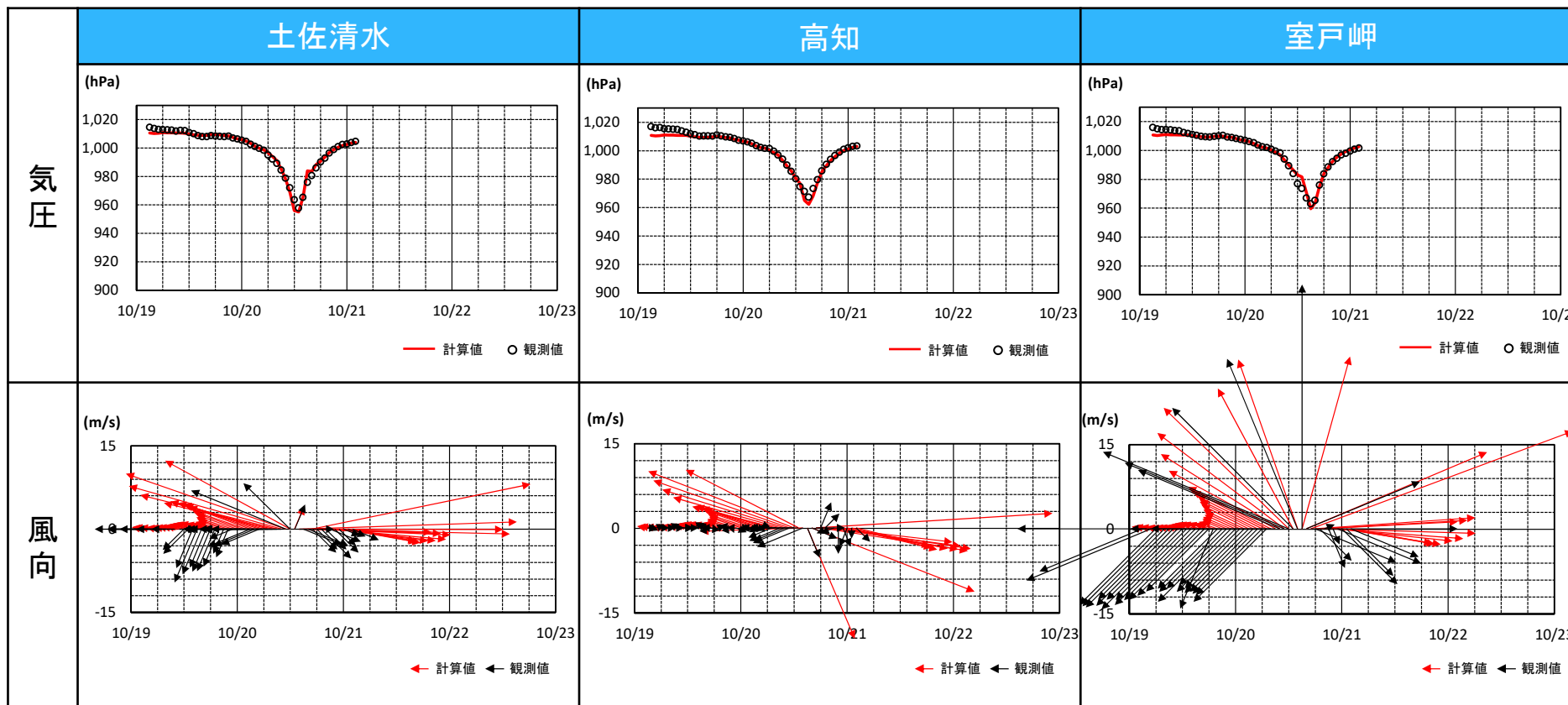
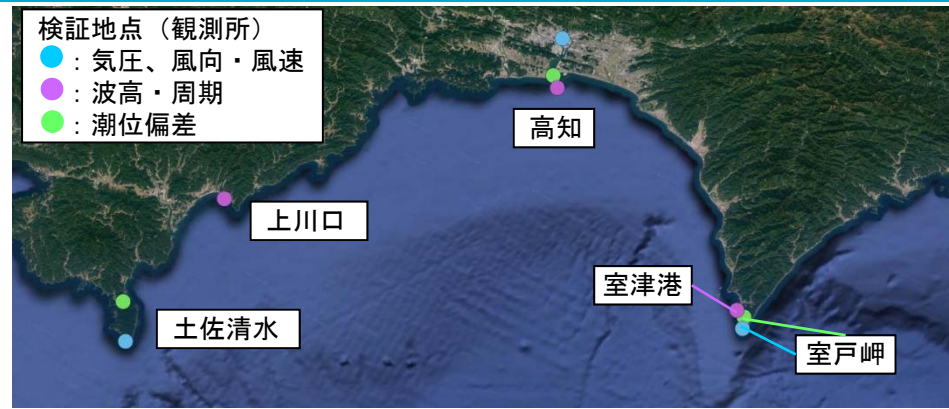
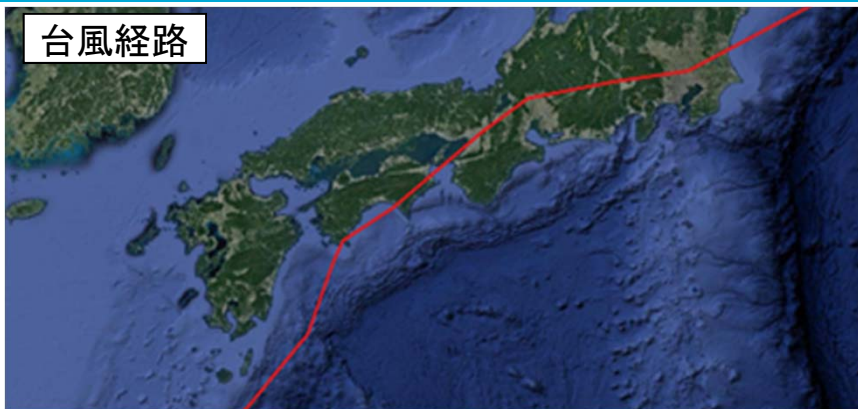
※C1, C2=0.8の結果を表示 いずれの地点でも、観測された気圧、風向・風速を概ね再現している

昭和45年台風10号の再現検証結果(波高・周期、潮位偏差)



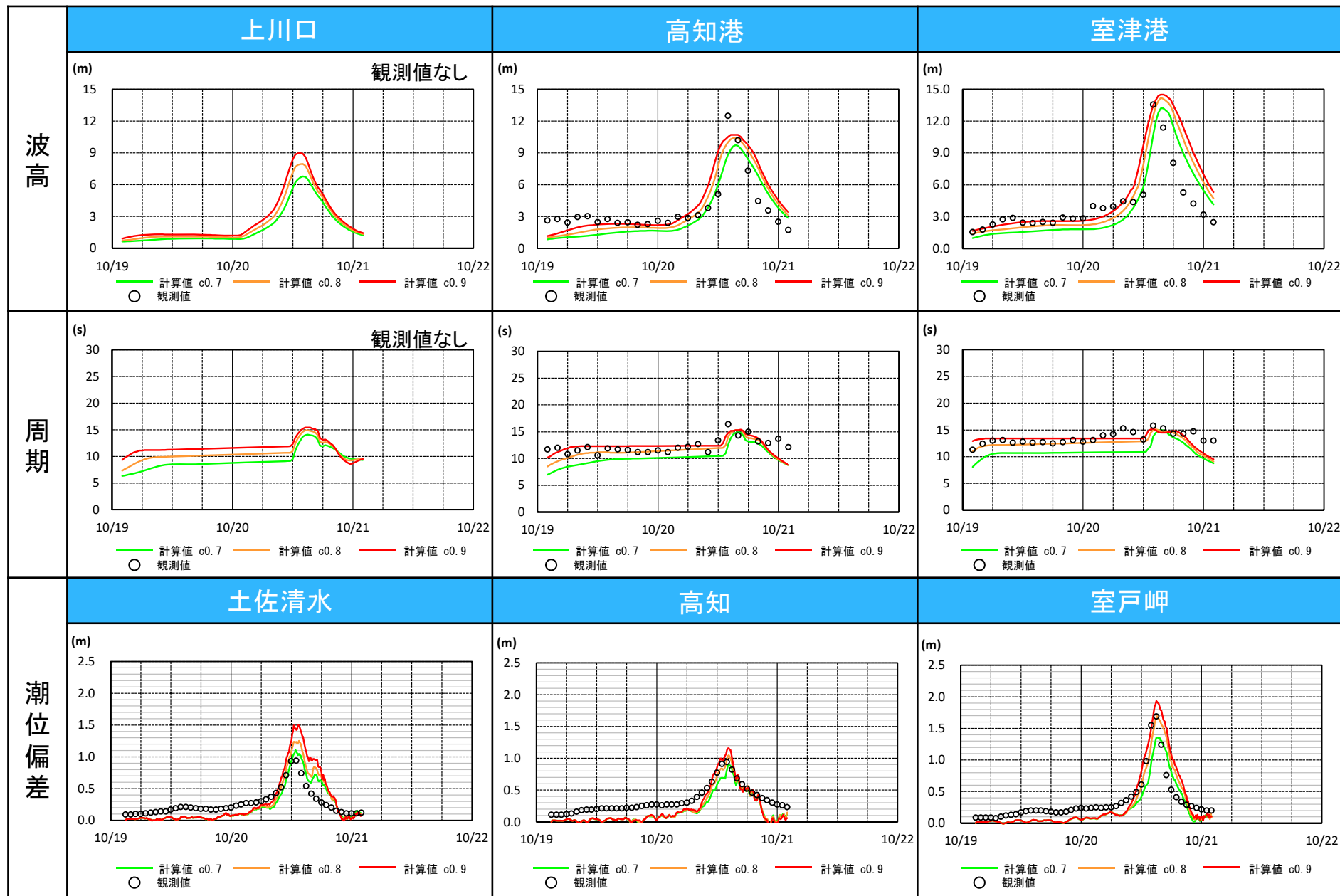
C1,C2=0.8の場合、潮位偏差の再現性がより高い (いずれの地点でも、観測された潮位偏差を概ね再現している)

平成16年台風23号の再現検証結果(気圧、風向・風速)



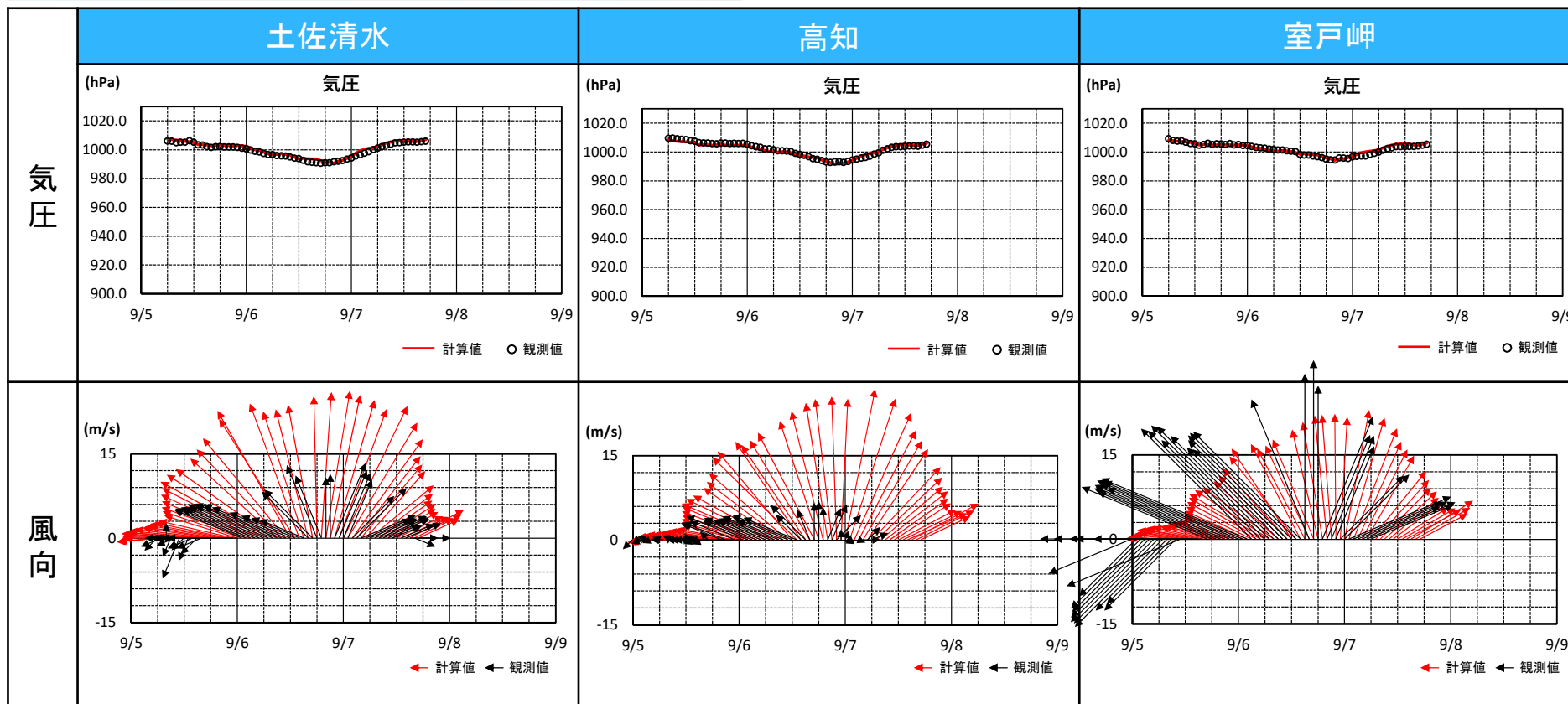
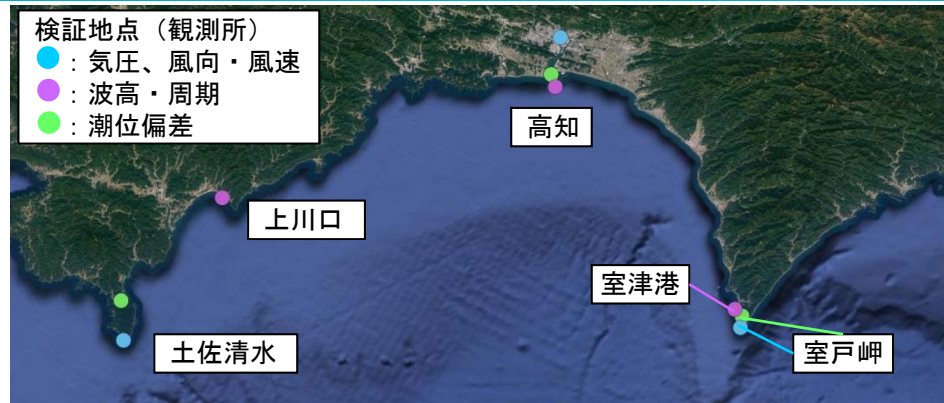
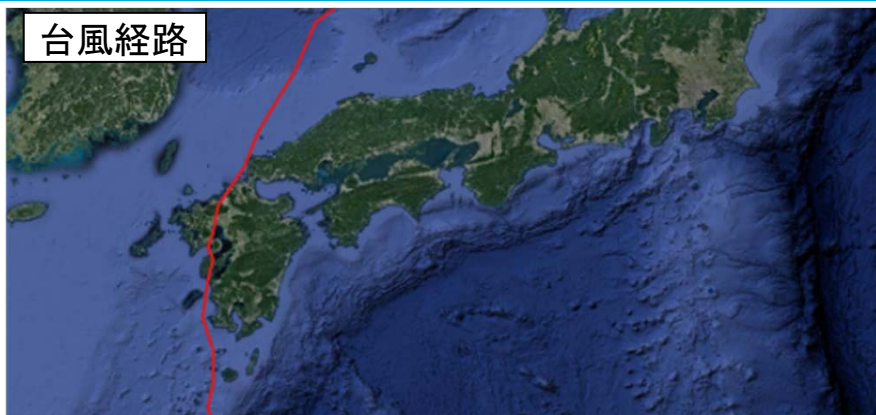
※C1, C2=0.8の結果を表示 いずれの地点でも、観測された気圧、風向・風速を概ね再現している

平成16年台風23号の再現検証結果(波高・周期、潮位偏差)



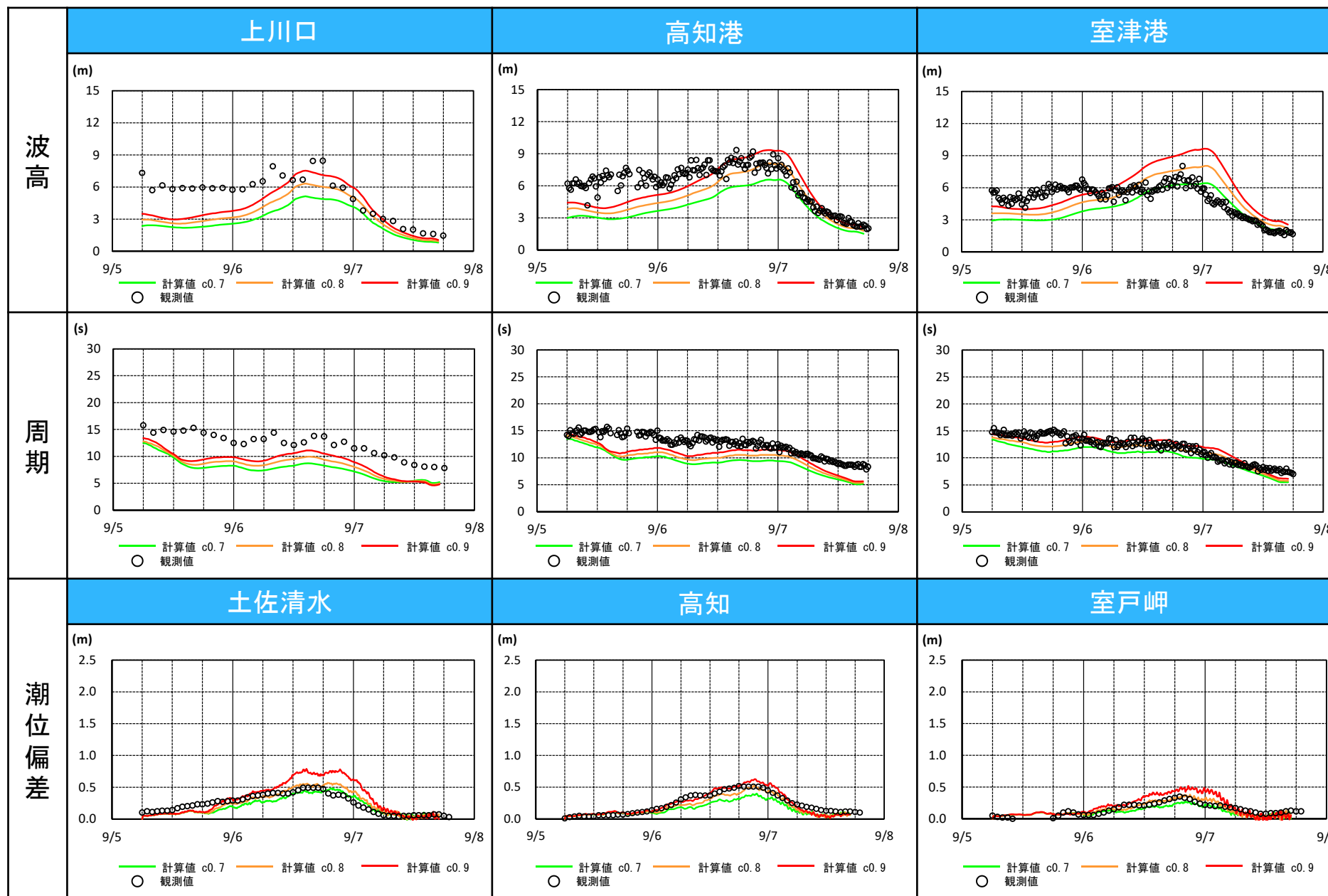
C1,C2=0.8の場合、潮位偏差の再現性がより高い (いずれの地点でも、観測された潮位偏差・波浪を概ね再現している)

平成17年台風14号の再現検証結果(気圧、風向・風速)



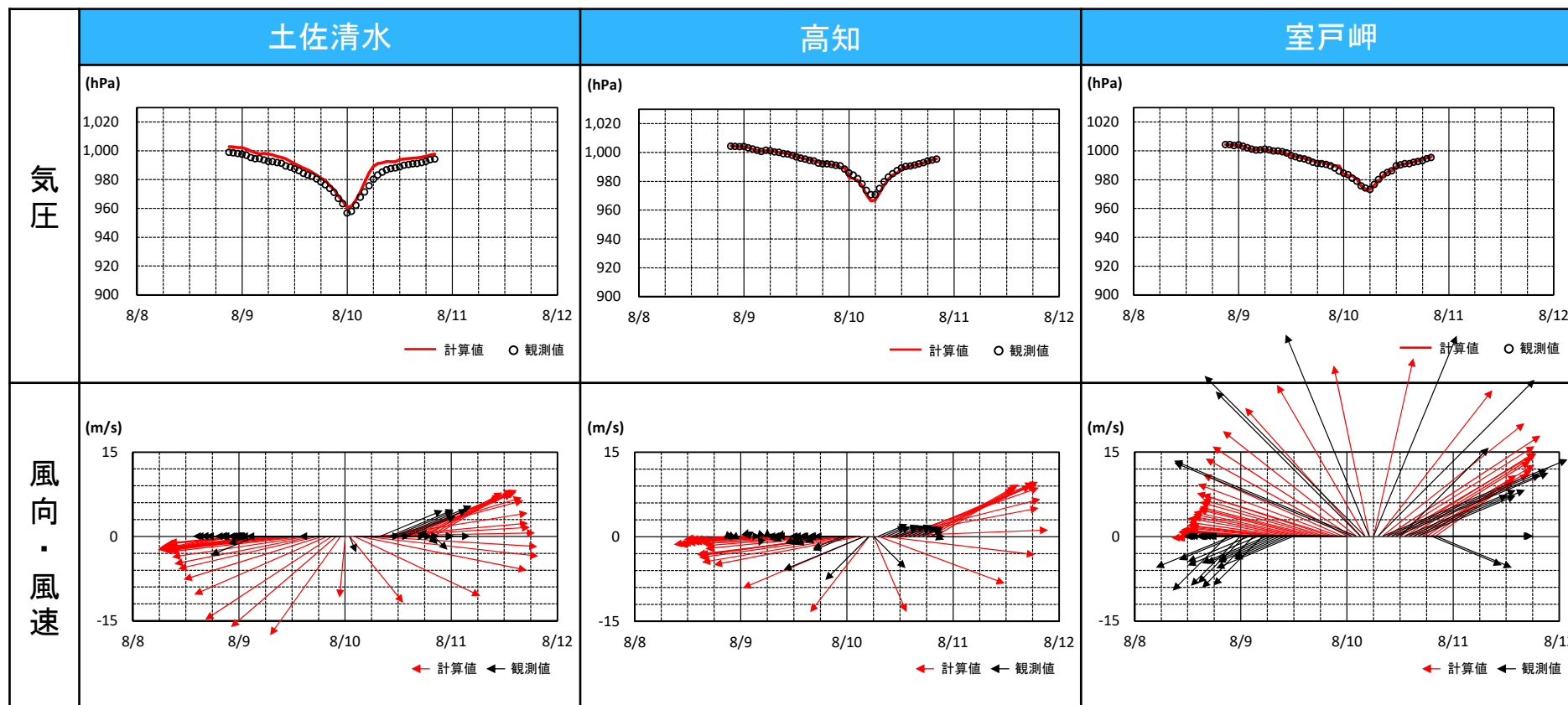
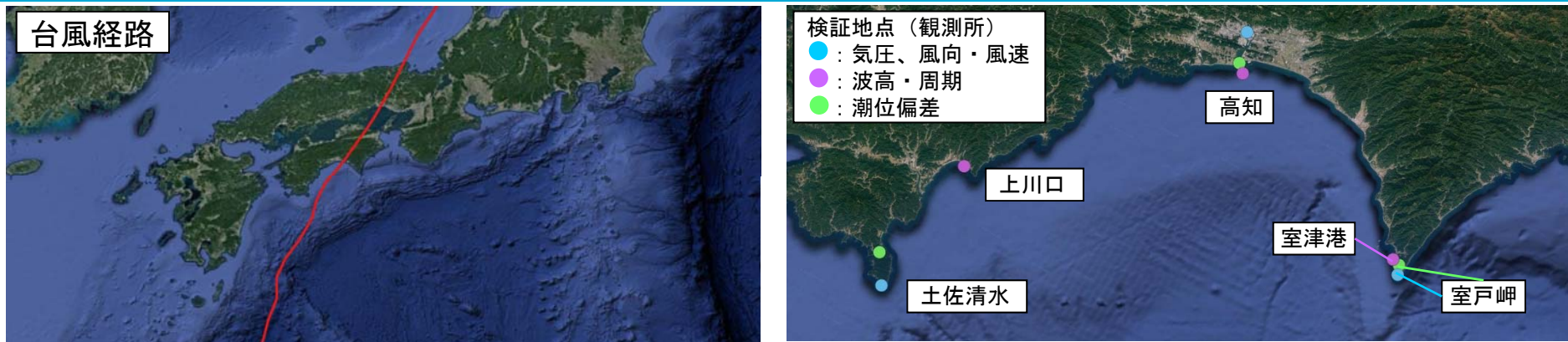
※C1, C2=0.8の結果を表示 いずれの地点でも、観測された気圧、風向・風速を概ね再現している

平成17年台風14号の再現検証結果(波高・周期、潮位偏差)



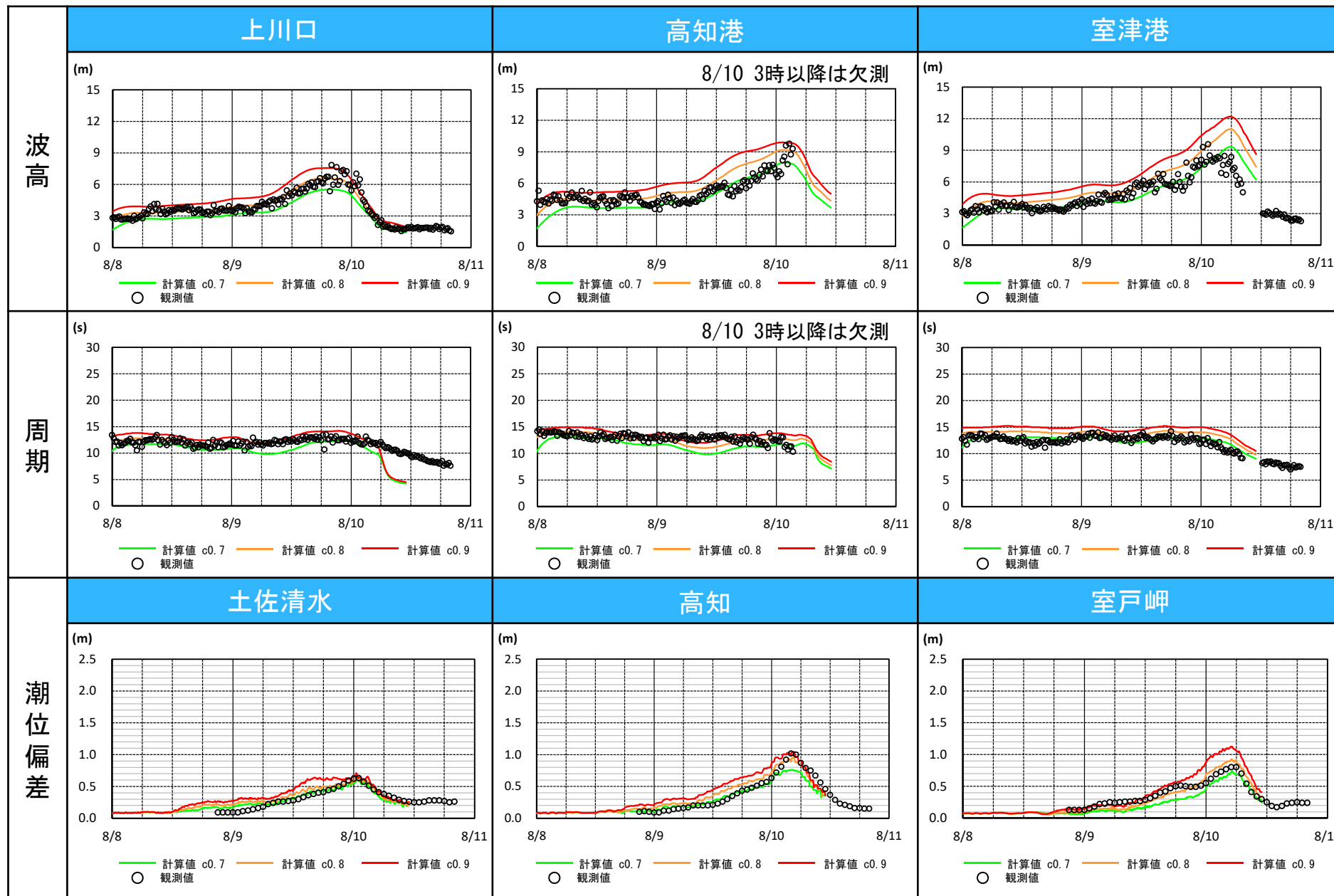
C1,C2=0.8の場合、潮位偏差の再現性がより高い (いずれの地点でも、観測された潮位偏差・波浪を概ね再現している)

平成26年台風11号の再現検証結果(気圧、風向・風速)



※C1, C2=0.8の結果を表示 いずれの地点でも、観測された気圧、風向・風速を概ね再現している

平成26年台風11号の再現検証結果(波高・周期、潮位偏差)



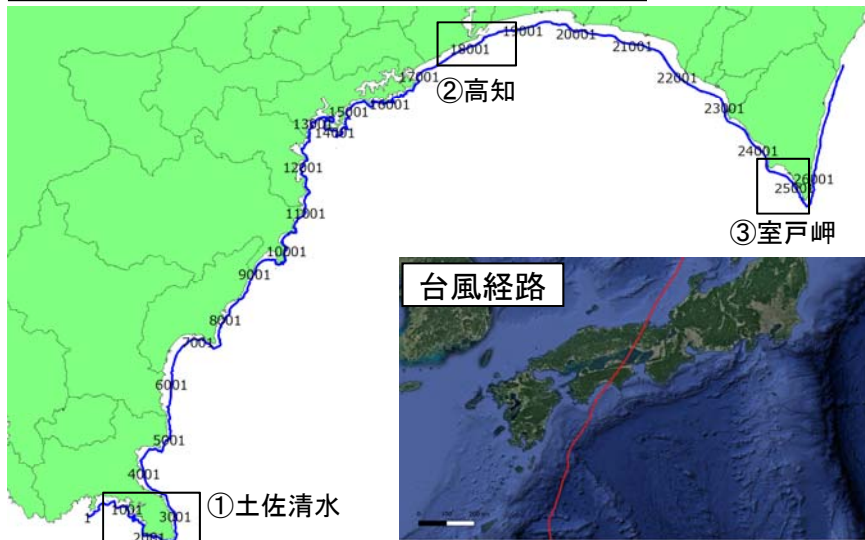
C1,C2=0.8の場合、潮位偏差の再現性がより高い(いずれの地点でも、観測された潮位偏差・波浪を概ね再現している)

メッシュサイズ別の波高・潮位偏差の比較(平成26年台風11号)

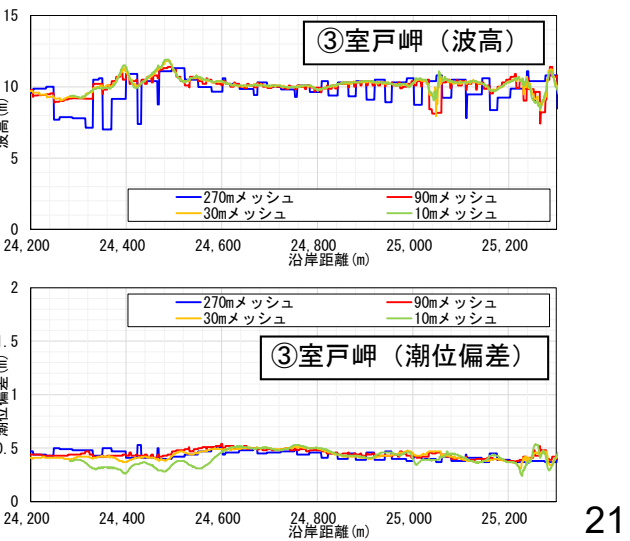
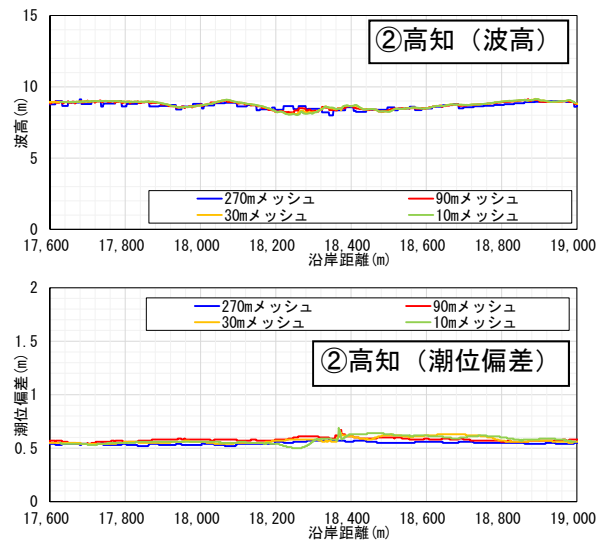
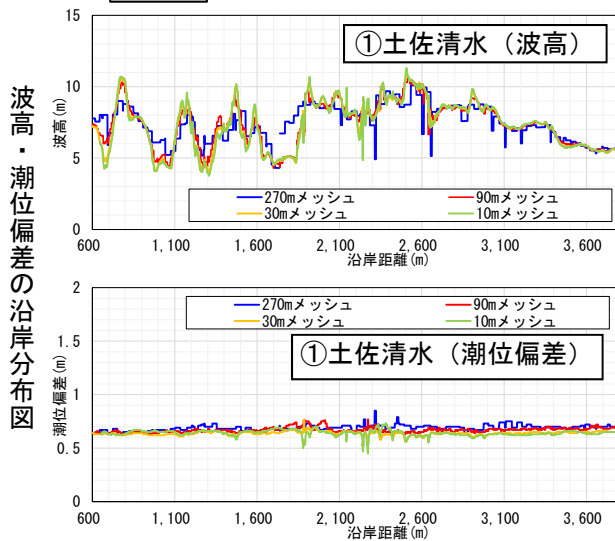
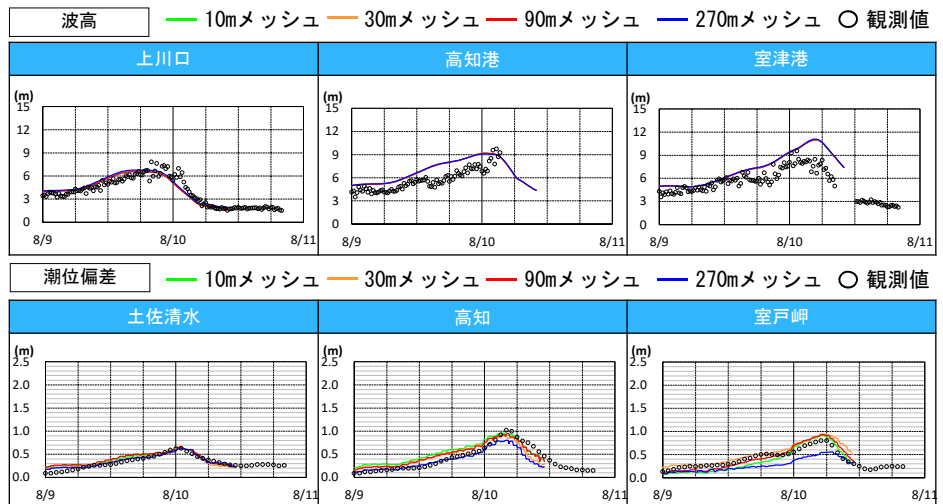
- 平成26年台風11号を対象に、最小領域のメッシュサイズ(270m、90m、30m、10m)の違いが波高・潮位偏差の計算結果へ与える影響を把握するため、メッシュサイズ毎の感度分析を実施した。
- 90m以下では波高・潮位偏差の計算結果が同程度となることから、最小領域を90mに設定した。

波高・潮位偏差の抽出ライン(水深20m地点)

※C1, C2=0.8の結果を表示



各観測所での波高・潮位偏差の時系列変化



潮位偏差、波浪の推算結果

- 潮位偏差・波浪は、「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方 提言」に基づき、現行計画の水準(安全度)^{*}を下回らないことを基本とし、気候変動の影響を考慮したd2PDF/d4PDFを活用して、高潮・波浪シミュレーションを行い、将来的に予測される変動量(差分値・変化率)を推算することとする。
^{*}波浪:30年確率、潮位偏差:62年確率(高知検潮所の観測データに基づく極値統計解析結果、資料2参照)
- ただし、d2PDF/d4PDFはデータ量が膨大であり、全ての台風を対象としたシミュレーションは現実的ではないことから、d2PDF/d4PDFの一部のケースによるシミュレーションを実施し、潮位偏差・波浪の推定式を構築することで推算する(B-1全球気候モデル台風を活用する方法)。
- また、補足手法として、A-1パラメトリック台風モデルによる推算も検討するが、現行計画では想定台風が設定されていないことから、近年の実績台風から想定台風を設定し推算する。

A-1 補足手法(簡易な方法を検討)

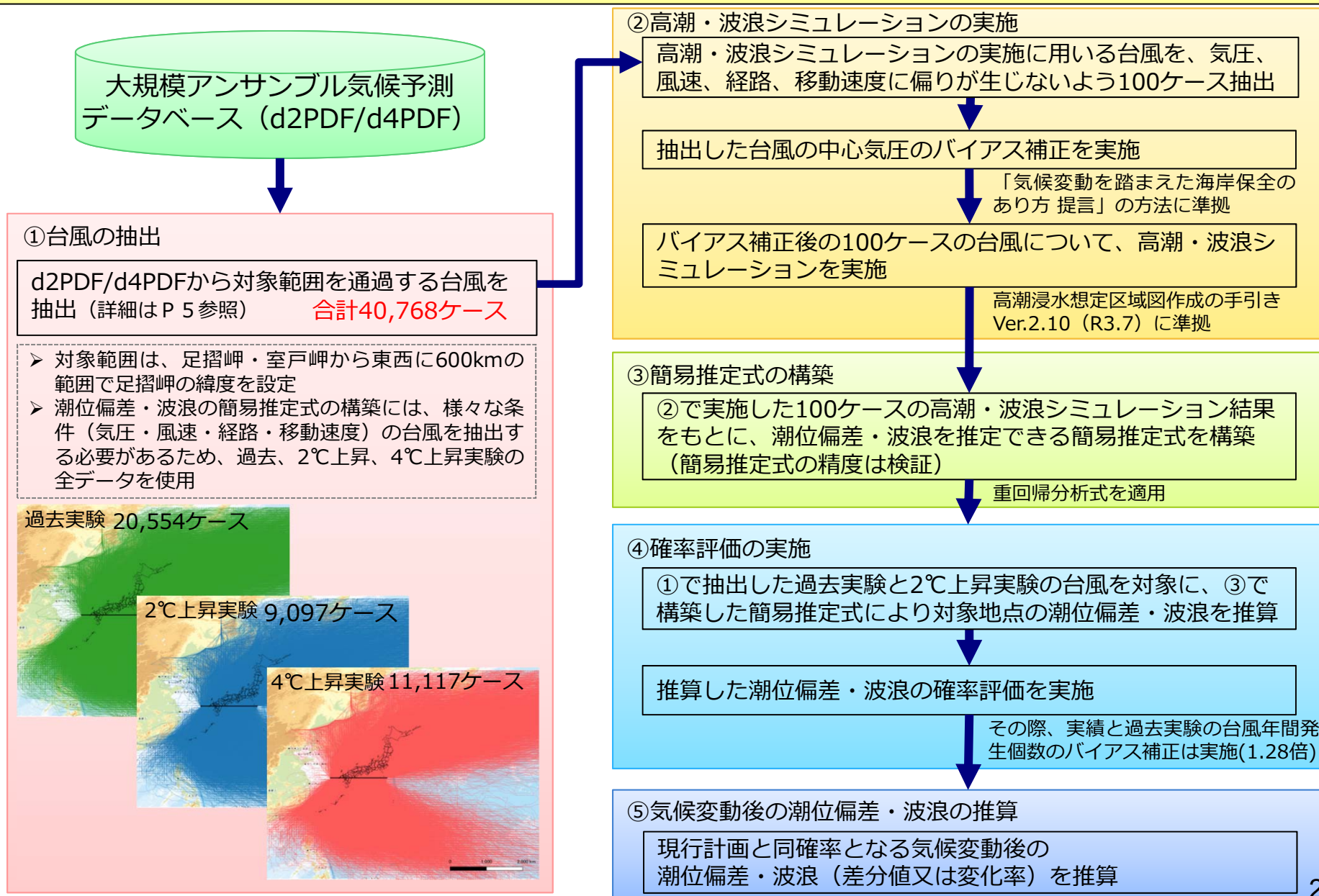
B-1 基本手法(効率的な方法を検討)

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と組み合わせることで確率評価が可能。
A-2. 領域気象モデルを用いた力学的計算	WRF等の領域気象モデル	・d2PDF、d4PDF等の計算結果から将来変化を現在の気候場に乗せして仮想的に考慮(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 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、外力が確率年で設定されている沿岸で適用性がある。

出典:「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に関する参考資料等について(令和3年8月 4省庁通知)」

B-1(全球気候モデル台風を活用する方法)による検討手順

■B-1(全球気候モデル台風を活用する方法)は、以下の手順①～⑤に基づき実施した。

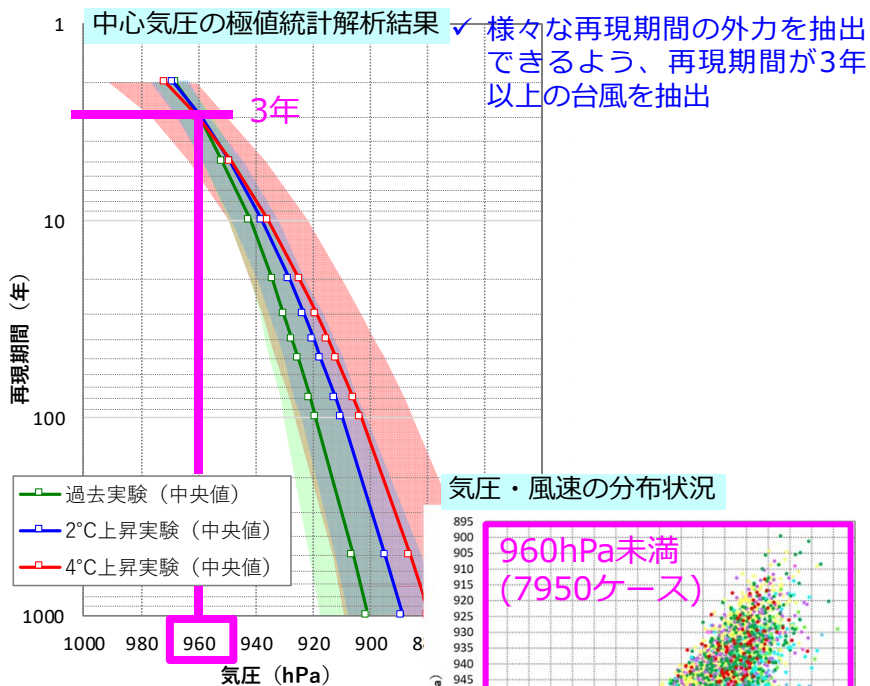


B-1: 高潮・波浪シミュレーションに用いる台風100ケースの抽出(手順②)

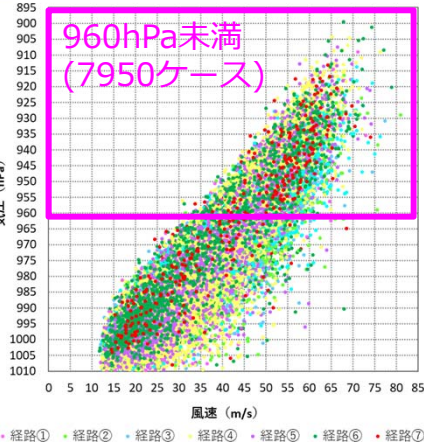
- 簡易推定式の構築のために実施する高潮・波浪シミュレーションに用いる台風100ケースの抽出を行った。
- 1次抽出: 全40,768ケースより、中心気圧が3年確率より小さい台風を抽出(7950ケースに絞り込み)
- 2次抽出: 気圧・風速の区分毎に経路・移動速度を考慮して網羅的に抽出(100ケースを最終抽出)

1次抽出(7950ケース)

気圧の再現期間が3年以上(960hPa未満)の台風を抽出



気圧・風速の分布状況

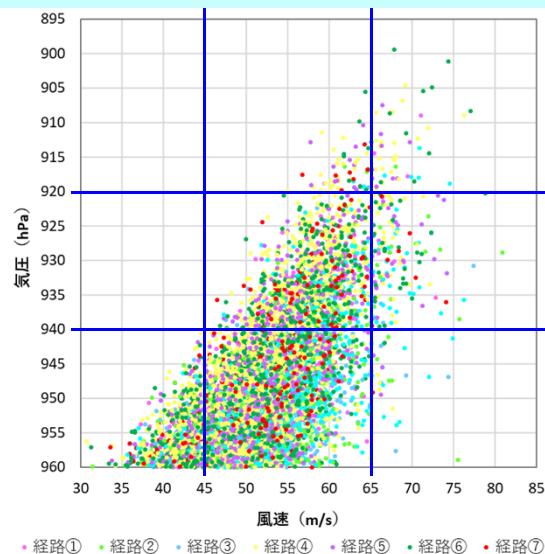


✓ 過去実験、将来実験(2°C)、将来実験(4°C)の中から、960hPa未満となる7950ケースの台風を抽出

2次抽出(100ケース)

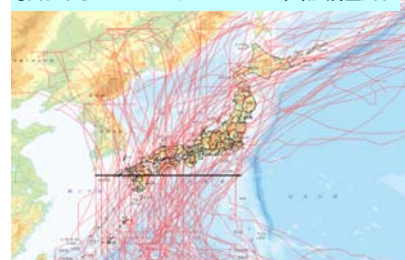
気圧・風速の区分毎に経路・移動速度を考慮し網羅的に抽出

気圧・風速の分布状況(1次抽出した7950ケース)

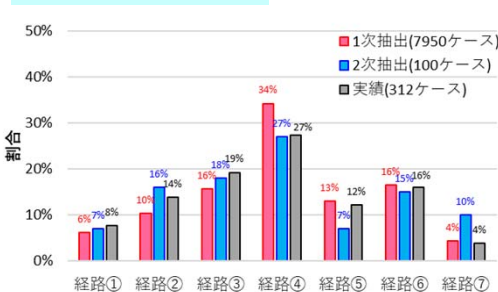


✓ 気圧・風速の区分毎に様々な経路や移動速度を網羅できるよう、満遍なく抽出(データの無い区分を除く7区分で14個程度ずつ抽出)

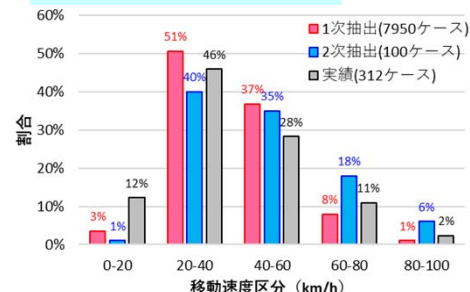
抽出した100ケースの台風経路



台風経路の分布状況



台風移動速度の分布状況



✓ 抽出した100ケースでは、経路・移動速度の分布に偏りが無いことを確認

※実績: 気象庁ハストラックデータより足摺岬の緯度通過時の実績台風の整理結果(312個/71年間)

B-1: 簡易推定式の構築(手順③)

■ 抽出した台風100ケースを対象に、中心気圧のバイアス補正を行ったうえで、高潮・波浪シミュレーション※¹を実施し、検討事例※²を基に重回帰分析による観測地点※³毎の簡易推定式を構築した。

$$\eta_{max} \text{ or } H_{max} = aP_{min} + bP_{cmin}$$

$$+ c_0 W_{max} + c_1 W_{max}^2 + c_2 W_{max,x} + c_3 W_{max,y}$$

$$+ d_0 V_t + d_1 V_t^2 + d_2 V_{t,x} + d_3 V_{t,y} + e \left(\frac{R_{min}}{R_0} \right) + f$$

説明変数：台風諸元（中心気圧、最大風速、移動速度、台風半径等）
 ※偏回帰係数（ $a \sim e$ ）、 y 切片（ f ）は重回帰分析により設定

説明変数		設定理由・根拠	潮位偏差	波高
P_{min}	最低気圧 (対象地点)	高潮(潮位偏差)の発生要因の1つである気圧低下による吸い上げを考慮 ⇒気圧・風場の推算結果より設定	● (吸い上げ)	— (非考慮)
P_{cmin}	最低中心気圧 (対象地点接近時)	高潮(潮位偏差)の発生要因の1つである気圧低下による吸い上げを考慮 ⇒気圧・風場の推算結果より設定	● (吸い上げ)	— (非考慮)
W_{max}	最大風速 (対象地点)	高潮(潮位偏差)の発生要因の1つである風による吹き寄せを考慮 風による波の発達を考慮（ x, y ：風向を考慮） ⇒気圧・風場の推算結果より設定	● (吹き寄せ)	●
V_t	移動速度 (対象地点接近時)	台風の移動速度による風速への影響を考慮 ⇒d2PDF/d4PDFの台風トラックデータより設定	● (吹き寄せ)	●
R_{min}/R_0	台風からの距離 /台風半径 (対象地点接近時)	傾度風（等圧線が曲線状の場合、気圧傾度力、コリオリ係数、遠心力が釣り合って、等圧線に沿って吹く定常な風）を考慮 ⇒距離：d2PDF/d4PDFの台風トラックデータより設定 ⇒半径：本多・鮫島(2018)の経験式より設定	● (吹き寄せ)	●

※¹：上記で再現検証を行い構築した高潮・波浪シミュレーションモデルを基に、最新の防波堤等の沖合施設や地形を設定

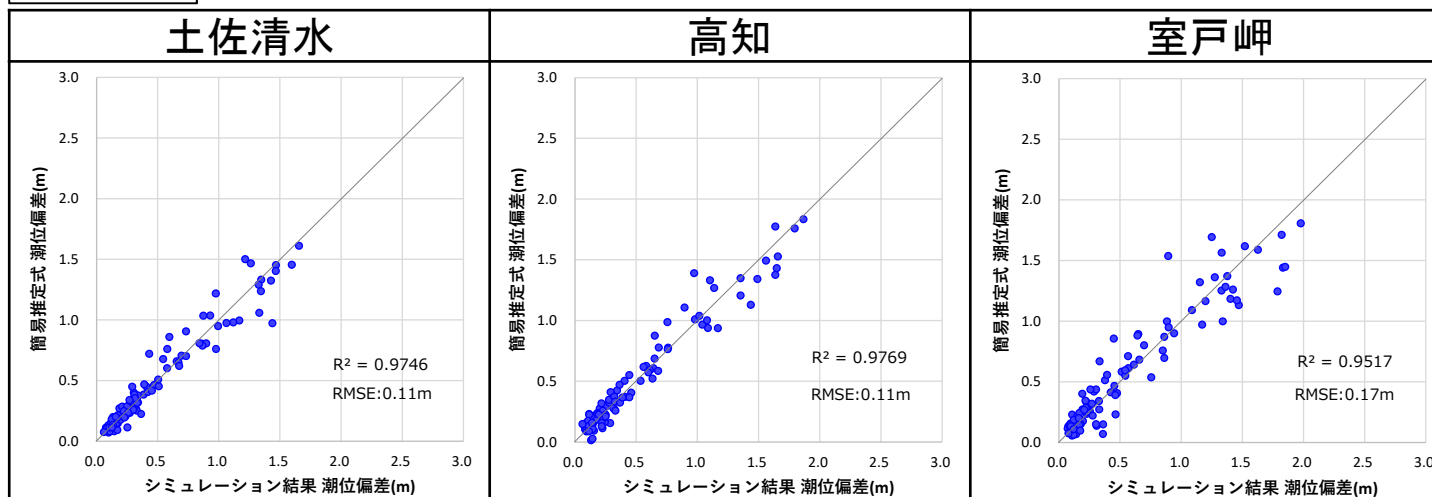
※²：大規模アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)を用いた高潮・波浪に対する気候変動の影響評価の効率化手法の検討（五十嵐ら、2022）

※³：潮位観測所（高知、室戸岬、土佐清水）、波浪観測所（高知港、室津港、上川口）

B-1: 簡易推定式の構築結果(手順③、精度検証—潮位偏差・波高)

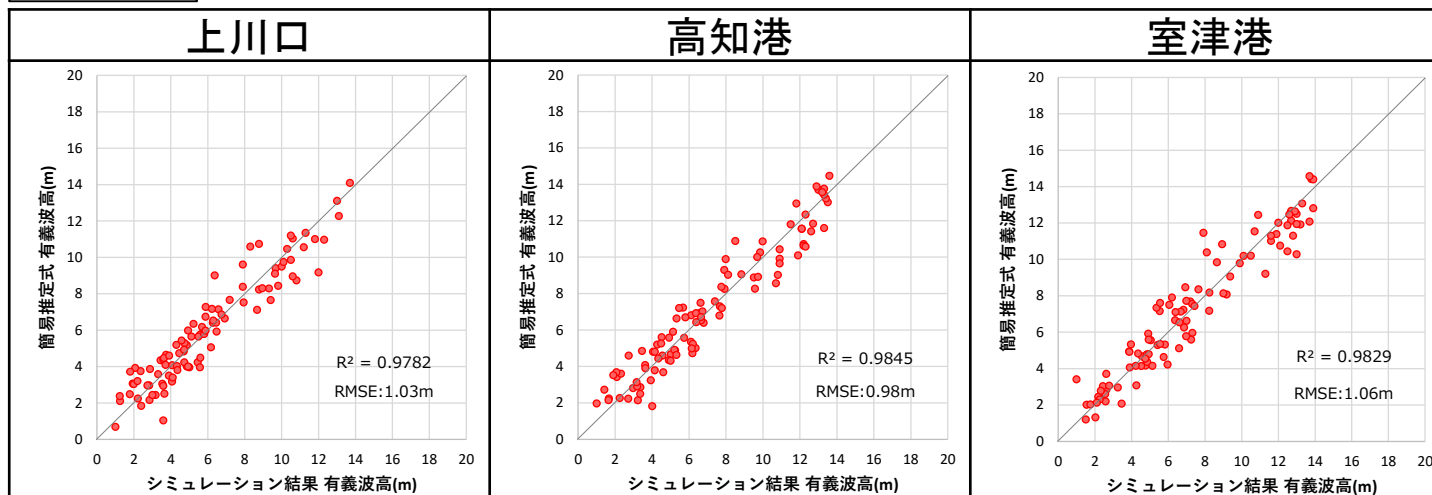
- 簡易推定式の構築に用いた台風100ケースを対象に、各観測地点の潮位偏差・波高について、簡易推定式により推算した値と高潮・波浪シミュレーション結果を比較し、精度検証を行った。
- いずれの地点でも、相関性は高く、構築した簡易推定式は概ね妥当であることが確認できる。

潮位偏差



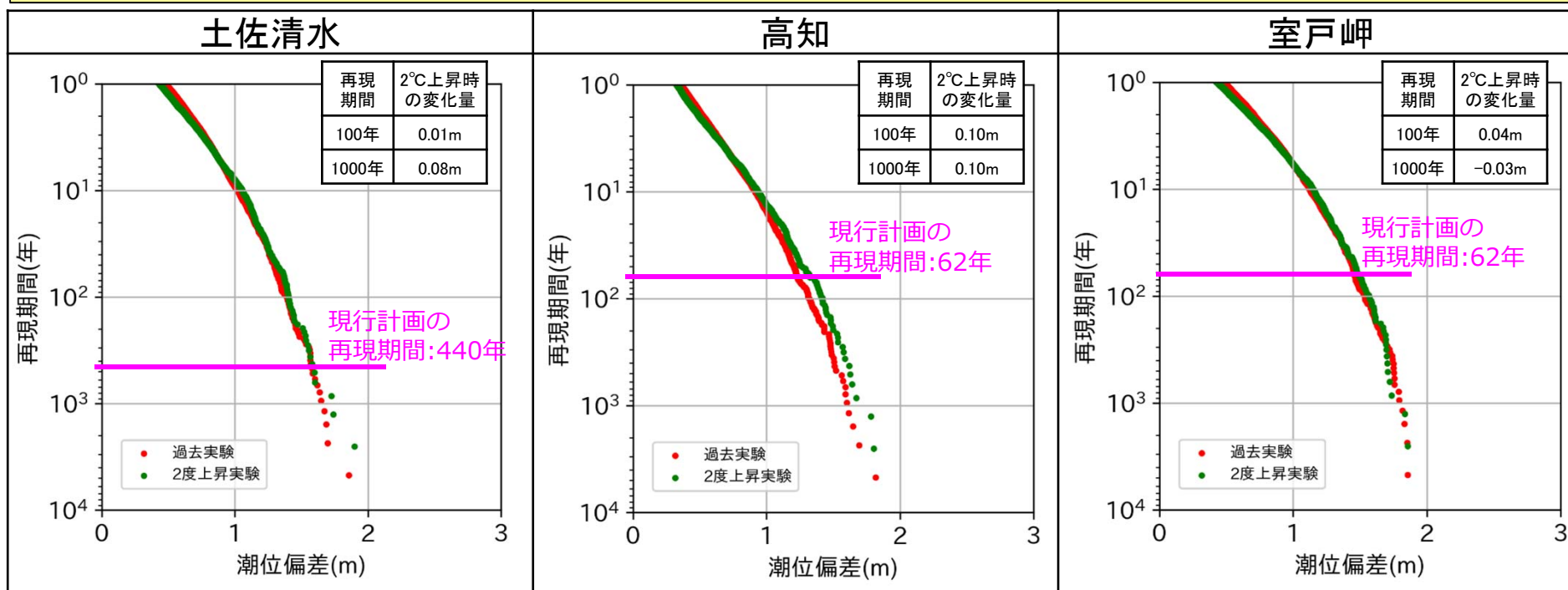
※RMSE(二乗平均平方根誤差)
: 誤差の大きさを表す指標であり、
値が小さいほど誤差が小さい。

有義波高



B-1: 確率評価(手順④)、気候変動後の潮位偏差の推算結果(手順⑤)

- 過去実験(20,554ケース)及び2°C上昇実験(9,097ケース)の台風を対象に、構築した簡易推定式を用いて各観測地点の潮位偏差を推算し、潮位偏差の確率評価を実施した。
- 各観測所における潮位偏差について、現行計画(潮位偏差: 1.46m)の再現期間では、過去実験から2°C上昇の変化量(変化率)は、高知0.09m(1.07倍)、土佐清水0.02m(1.01倍)、室戸岬0.03m(1.02倍)。
- 以上のとおり、現時点の知見に基づき推算した結果、現行計画と同確率となる気候変動後(2°C上昇時)の潮位偏差の上昇量は、0.02m~0.09m程度となる。

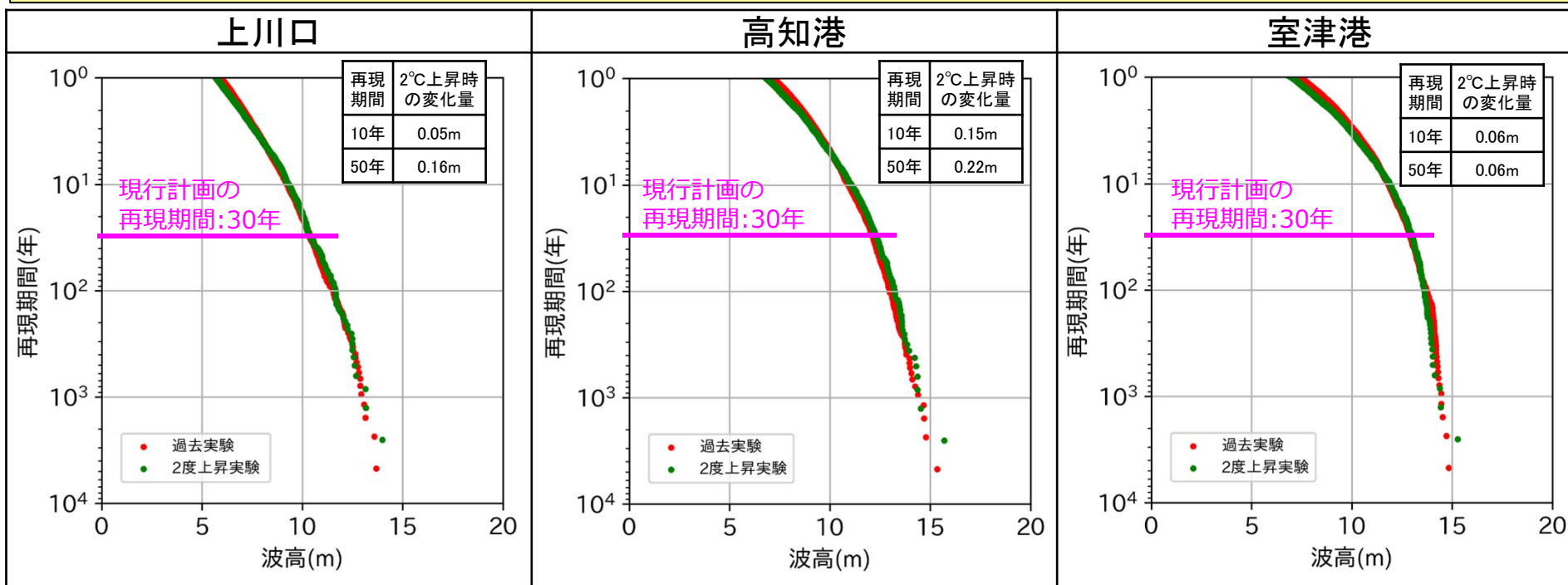


現行計画 再現期間	土佐清水 (440年)	高知 (62年)	室戸岬 (62年)
過去実験	1.57m	1.23m	1.46m
2°C上昇	1.59m	1.32m	1.49m
変化量 (変化率)	0.02m (1.01倍)	0.09m (1.07倍)	0.03m (1.02倍)



B-1: 確率評価(手順④)、気候変動後の波浪の推算結果(手順⑤)

- 過去実験(20,554ケース)及び2°C上昇実験(9,097ケース)の台風を対象に、構築した簡易推定式を用いて各観測地点の波高を推算し、波高の確率評価を実施した。
- 各観測所における波高について、現行計画(波浪: 30年確率)の再現期間では、過去実験から2°C上昇の変化量(変化率)は、高知港0.15m(1.01倍)、上川口-0.05m(1.00倍)、室津港0.10m(1.01倍)。
- 以上のとおり、現時点の知見に基づき推算した結果、現行計画と同確率となる気候変動後(2°C上昇時)の波高の上昇量は、-0.05m~0.15m程度となる。



現行計画 再現期間	上川口 (30年)	高知港 (30年)	室津港 (30年)
過去実験	10.37m	12.14m	12.89m
2°C上昇	10.32m	12.29m	12.99m
変化量 (変化率)	-0.05m (1.00倍)	0.15m (1.01倍)	0.10m (1.01倍)



A-1(パラメトリック台風モデルを活用する方法)による検討手順

■A-1(パラメトリック台風モデルを活用する方法)は、以下の手順①～⑥に基づき実施した。

①想定台風の設定

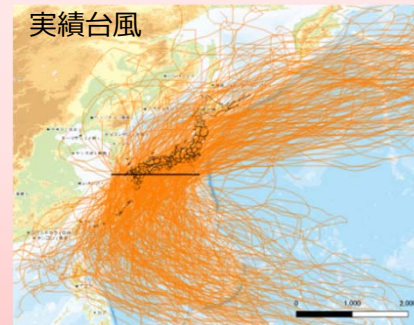
顕著な高潮・高波が発生した台風のうち、土佐湾沿岸全体で近年最大の平成16年台風23号を対象に、中心気圧を変化させた高潮・波浪シミュレーションを実施し潮位を推算

現行計画の潮位偏差1.46mと同程度の潮位偏差(高知検潮所)となる台風を想定台風として設定し、想定台風の中心気圧を確認。

②台風の抽出

気象庁ベストトラックデータより対象範囲を通過する実績台風を抽出 **312ケース**

実績台風

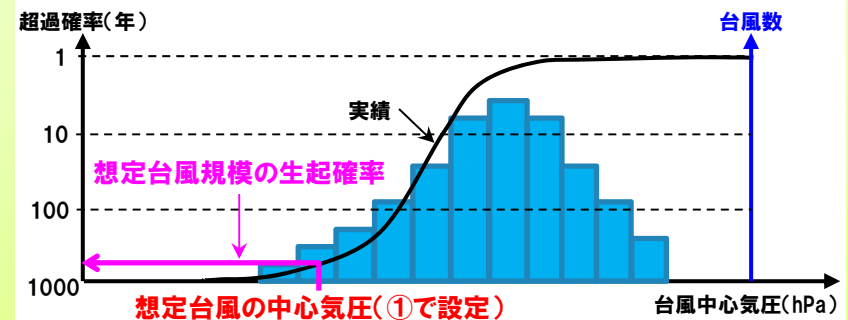


▶ 対象範囲は、足摺岬・室戸岬から東西に600kmの範囲で足摺岬の緯度を設定

③想定台風の中心気圧の生起確率の算出

②で抽出した312ケースの実績台風を対象に、中心気圧について極値統計解析による確率評価を実施

想定台風の中心気圧の生起確率を算出



次ページへ続く

A-1(パラメトリック台風モデルを活用する方法)による検討手順

■A-1(パラメトリック台風モデルを活用する方法)は、以下の手順①～⑥に基づき実施した。

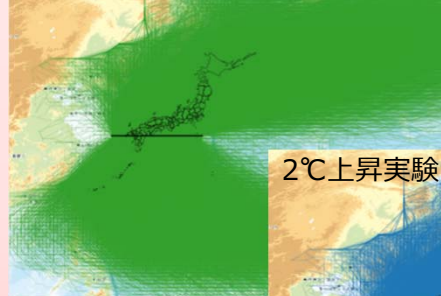
大規模アンサンブル気候予測データベース (d2PDF/d4PDF)

④台風の抽出

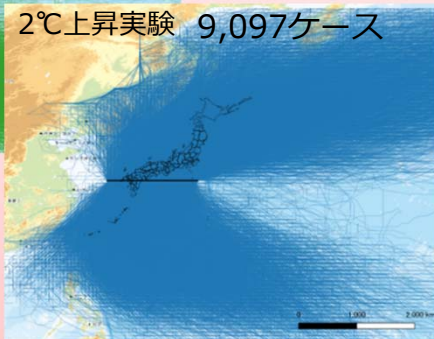
d2PDF/d4PDFから対象範囲を通過する台風を抽出 (詳細はP 5 参照) **合計29,651ケース**

- 対象範囲は、足摺岬・室戸岬から東西に600kmの範囲で足摺岬の緯度を設定
- 本検討では、2℃上昇時の計画外力を推算するため、過去実験と2℃上昇実験のデータを使用

過去実験 20,554ケース



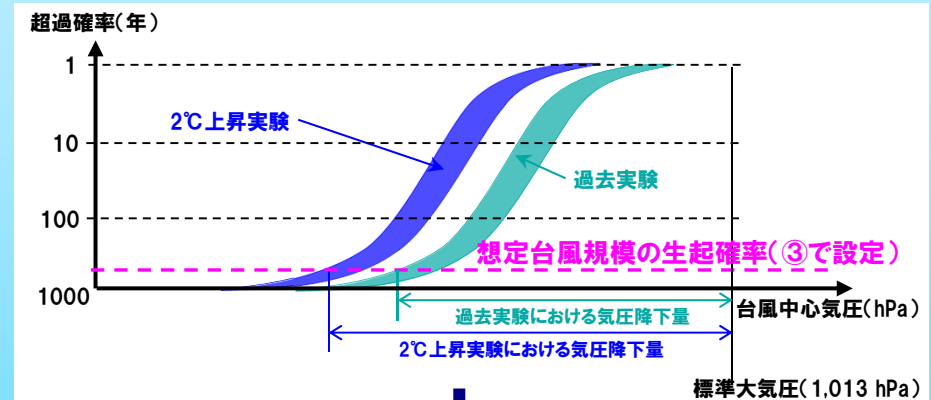
2℃上昇実験 9,097ケース



⑤過去実験に対する2℃上昇実験の変化量 (比率) の算出

④で抽出した過去実験と2℃上昇実験の台風を対象に、中心気圧について、極値統計解析による確率評価を実施

想定台風規模の生起確率 (③で設定) に相当する2℃上昇での台風中心気圧を算出し、当該中心気圧の過去実験からの変化量 (比率) を算出



⑥気候変動後の潮位偏差の推算

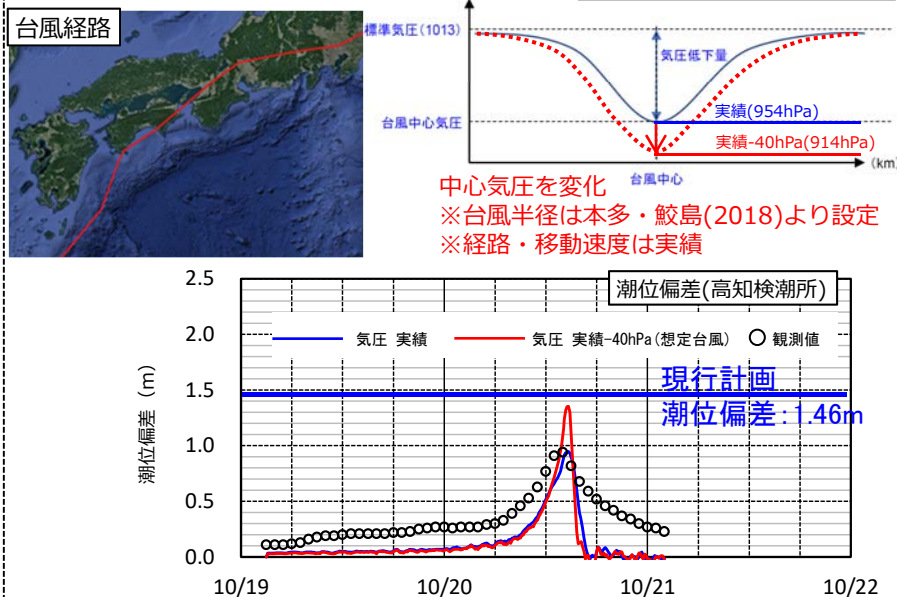
想定台風 (①で設定) に気候変動後の変化量 (⑤で算定) を考慮した台風で高潮・波浪シミュレーションを実施

気候変動後の潮位偏差を推算 (気候変動前後の差分値又は変化率を現行計画値に考慮等)

A-1:平成16年台風23号を対象とした推算結果(手順①~⑥)

- 土佐湾沿岸全体で近年最大の平成16年台風23号を対象に、中心気圧を変化させた高潮・波浪シミュレーションを実施し、高知検潮所で現行計画の潮位偏差(1.46m)と同程度の潮位偏差となる台風を想定台風として設定した。想定台風の中心気圧は、足摺岬の緯度通過時に914hPa(実績の中心気圧954hPaから40hPa低下)と確認した。(手順①)
- 実績台風の中心気圧について確率評価を行い、想定台風の中心気圧(914hPa)の再現期間は163年と確認した(手順②③)。この再現期間での過去実験から2℃上昇への変化量を算定すると9.9hPa(比率0.99倍)となる。(手順④⑤)
- 想定台風に算定した変化量(比率)を考慮した台風で高潮・波浪シミュレーションを実施した結果、高知検潮所における気候変動後(2℃上昇時)の潮位偏差の上昇量は、0.03m程度となる。(手順⑥)

手順①：想定台風の設定

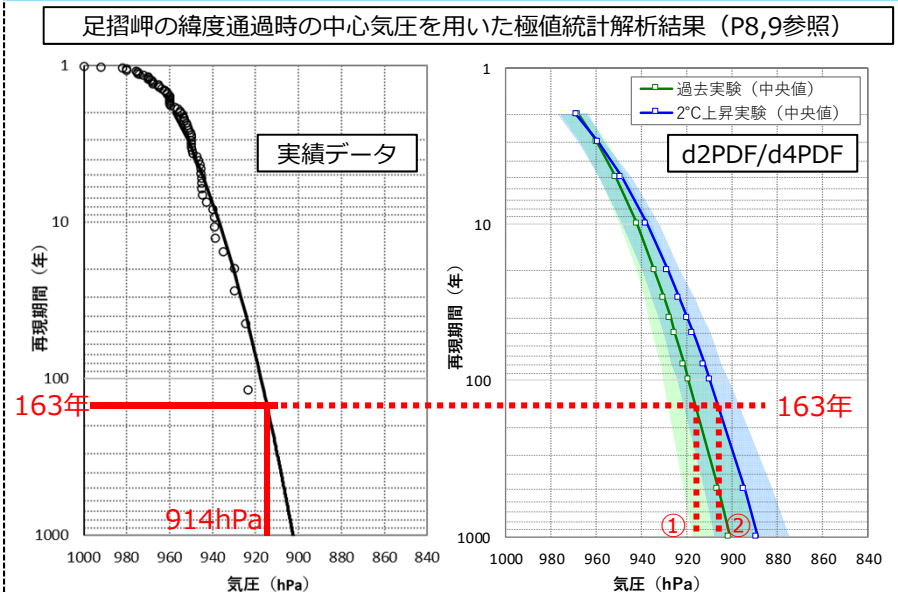


手順⑥：気候変動後の潮位偏差の推算(高知検潮所)

潮位偏差	想定台風※	2℃上昇	変化量(率)
高知検潮所	1.36m (914hPa)	1.39m (904.1hPa)	0.03m (1.02倍)

手順②③：実績データによる確率評価、想定台風の生起確率の算出

手順④⑤：想定台風規模の過去実験と2℃上昇時の変化量(比率)の算出



想定台風規模(再現期間163年)での過去実験と2℃上昇時の中心気圧の変化量(比率)

中心気圧	①過去実験	②2℃上昇	変化量(率)	想定台風※	2℃上昇
足摺岬の緯度通過時	917.1hPa	907.2hPa	9.9hPa (0.99倍)	914hPa	904.1hPa

※想定台風:高知検潮所で現行計画の潮位偏差(1.46m)と同程度となる中心気圧(足摺岬の緯度通過時の中心気圧:914hPa)

津波水位の検討結果【速報値】

気候変動を踏まえた津波水位の検討方法

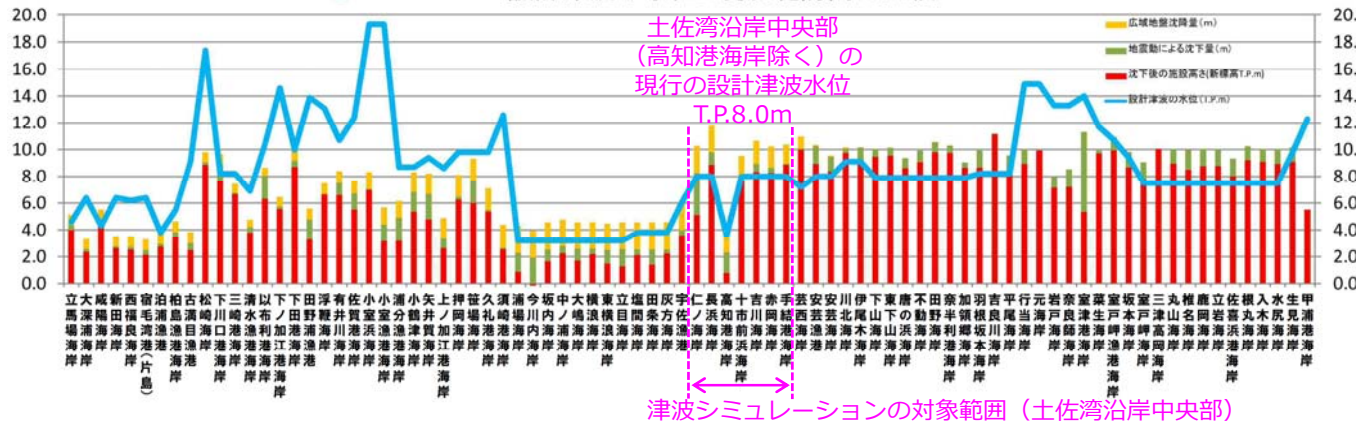
- 土佐湾沿岸中央部^{※1}を対象に、平均海面水位の上昇を考慮した津波シミュレーションを実施した。
- 検討方法は現行の設計津波水位の設定方法に準拠したうえで、初期潮位条件として既往の朔望平均満潮位^{※2}に、2100年に予測される平均海面水位の上昇量(2°C上昇時の平均:0.39m)^{※3}を加えた。

現行の設計津波水位



項目	解析条件 (現行計画に準拠)
支配方程式	非線形長波方程式
計算格子間隔	波源域から沿岸まで 2,430m→810m→270m→90m→30m→10m
海底地形条件	2012年内閣府公表データ
計算時間	6時間 (時間間隔:0.1秒)
堤防条件	現況の海岸堤防の位置において津波侵入を防ぐ境界条件を設定
初期潮位	現行の設計津波水位の設定に用いられた既往の朔望平均満潮位 ^{※2} に、2100年に予測される2°C上昇時の平均海面水位の上昇量(0.39m) ^{※3} を考慮
対象津波	2003年中央防災会議公表の 東南海・南海地震連動 ^{※4}

設計津波の水位と現況堤防高の比較



出典:「第3回 高知県地震・津波防災技術検討委員会(平成25年11月1日開催)

資料3 設計津波の水位の設定結果と海岸・河川堤防の今後の整備について p.2」

気候変動を踏まえた津波水位の検討結果【速報値】

- 土佐湾沿岸中央部を対象に、2100年に予測される平均海面水位の上昇量(2°C上昇時の平均:0.39m)を考慮した津波シミュレーションを実施した結果、2°C上昇時の津波水位の上昇量(地域海岸毎の平均値)は、高知中央地域海岸では0.37m、南国香南地域海岸では0.30mと試算される。
- 今回の試算結果では、2°C上昇時の津波水位の上昇量(地域海岸毎の平均値)は、平均海面水位の上昇量と同程度となった。
- 気候変動に伴い海面水位は上昇すると考えられ、その上昇量に応じて津波水位も変化するため、地域毎の特性や将来の地形変化等も踏まえて、詳細な検討(津波水位の上昇量の設定※、対策のあり方の検討等)を行って行く必要がある。

※海面水位の上昇量は2100年時点のもの(0.39m)を見込むのか、その他の時点のものを見込むのかは議論を要する

