



第3回

気候変動を考慮した愛媛県沿岸の 海岸保全施設の計画外力検討専門部会

－気候変動を考慮した波浪の解析－

日時： 令和5年11月30日 13:30～15:30

場所： 愛媛県庁第1別館5階第13会議室

目次

- 1. 主な確認事項**
- 2. 波浪推算モデルの構築**
- 3. 気候変動を考慮した波浪推算**

1. 主な確認事項

主な確認事項

①波浪推算モデルの設定

□ 最大旋衡風速半径 r_0 のモデル

- 本多モデルを使用し、パラメータは $F=0.9$ とした。

②対象擾乱の選定

□ d4PDFの計算対象の台風の選定

- 愛媛県沿岸を通過した台風で、中心気圧の低い(強い)順に選定した。
- 気圧と風速の関係は、バラつきが大きいものの、緩やかに対応していた。

③波浪推算結果の解析

□ 将来変化比の算定

- 6種のSSTから、SST平均の50年確率波高を算出した。参考として、SST最小・SST最大も算出した。
- SST平均を基本として将来変化比を算出した。

④設計波への反映

□ 将来変化比の考え方

- 海域平均の将来変化比を用いることとした。
- 気候変動の時間スケールを考慮する場合の考え方を整理した。

2. 波浪推算モデルの構築

No.	項目	内容
(1)	将来気候の設計波高の設定方針	全体の検討フロー
(2)	波浪推算モデルの設定	計算条件(計算メッシュ等)を設定する。
(3)	波浪推算モデルの検証	近年の台風で波浪推算精度を確認する。
(4)	経験的台風モデルの設定	最大旋衡風速半径を設定する。

(1) 将来気候の設計波高の設定方針

【波浪推算モデルの設定】

- 波浪推算の計算条件を設定する。
- 実績台風の再現計算により、経験的台風モデルの最大旋衡風速半径 r_0 を設定する。

経験的台風モデルのパラメータ調整

【d4PDFの分析とバイアス補正】

<バイアス補正> ※高潮モデルと同じ

【波浪推算：B-1の手法】

<擾乱の選定>

- 愛媛県沿岸周辺を通過したd4PDFの台風トラックデータを整理する。
- 計算ケースは現在気候：650ケース、将来気候：390ケース（65ケース×6種）。

擾乱は台風中心気圧をもとに選定

<気象場の推算>

- 経験的台風モデルを用いて、現在気候と将来気候の気象場（風場）を推算する（d4PDFのバイアス補正済み台風トラックデータを使用）。

<波浪推算の実施>

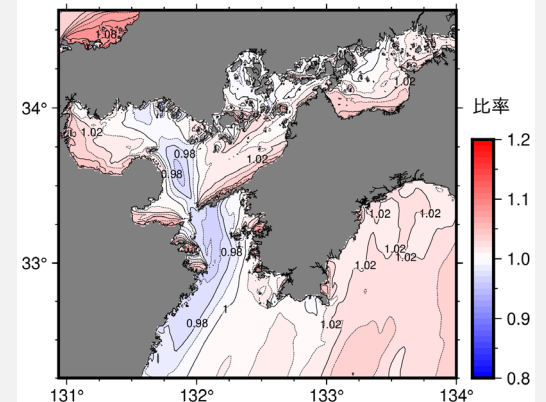
- 作成した気象場に対する波浪推算を実施する（計1040ケース）。

【結果の整理】

- 現在・将来の波浪推算結果から50年確率波高の平面分布を作成する。
- 50年確率波高の将来変化比（将来／現在）を整理し、将来の設計波高を算定する。

【波高の将来変化比のイメージ】

2K上昇(SST平均), 50年確率

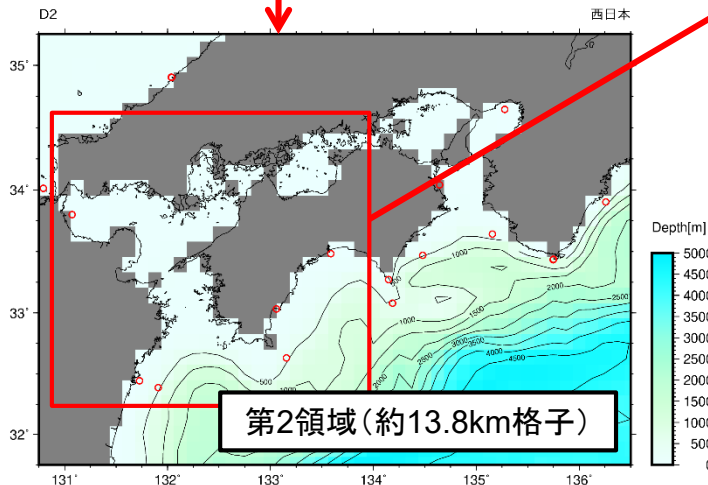
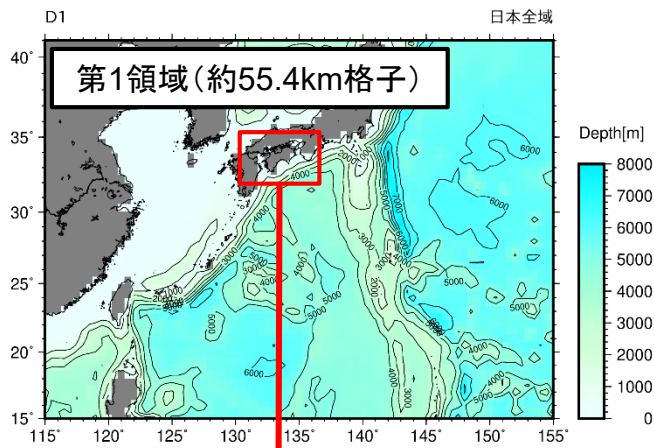


赤：将来気候において波高が上昇
青：将来気候において波高が減少

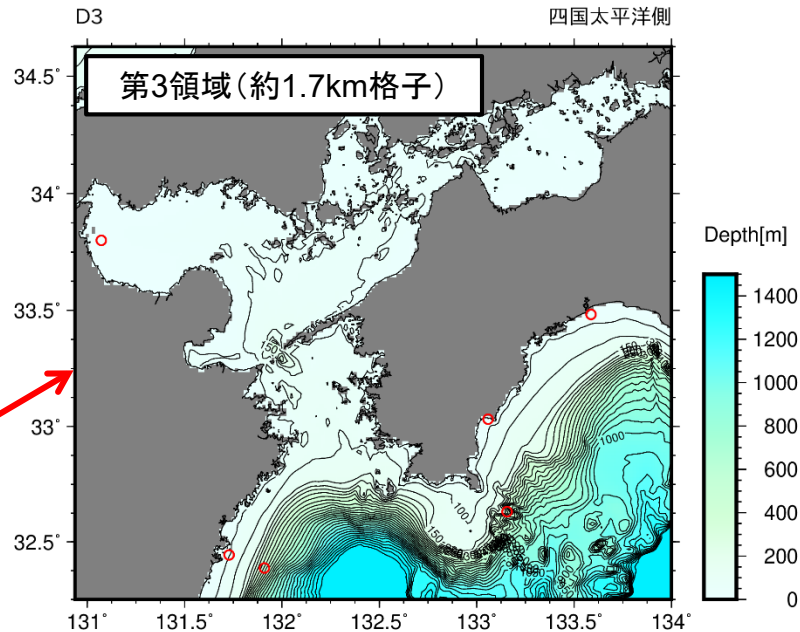
(2) 波浪推算モデルの設定： 計算メッシュ

- 外洋から愛媛県周辺の最小領域1.7km格子まで、徐々に格子を細かくするネスティング(格子幅が異なる領域間での時々刻々の計算結果の接続)の設定をした。

【外洋の領域】



【愛媛県周辺の領域】



【計算メッシュの諸元】

領域	$\Delta x(^{\circ})$	西端($^{\circ}$)	東端($^{\circ}$)	南端($^{\circ}$)	北端($^{\circ}$)	nx	ny
D1	1/2	115.000	155.000	15.000	41.000	81	53
D2	1/8	130.750	136.500	31.750	35.250	47	29
D3	1/64	130.9375	134.000	32.250	34.625	197	153

(2) 波浪推算モデルの設定： 計算条件

- 波浪推算モデルは、うねりの再現性が良いと言われている、WAVEWATCH III(ウェーブウォッチスリー)を使用した。
- 波浪推算モデルの計算条件は一般的な設定値とした。

【再現計算の計算条件】

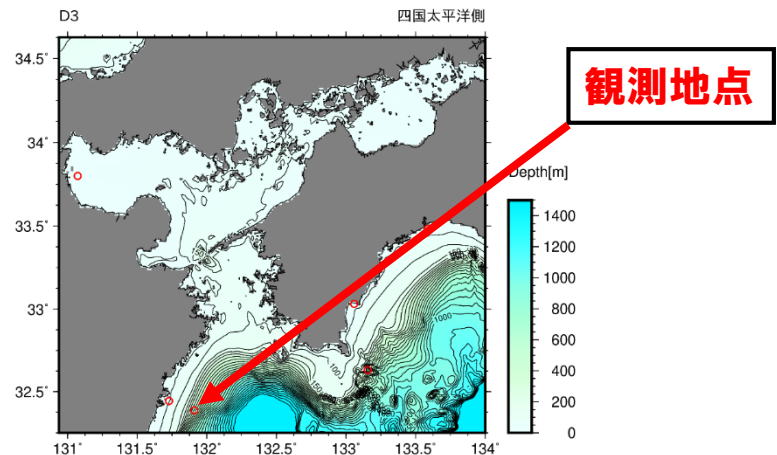
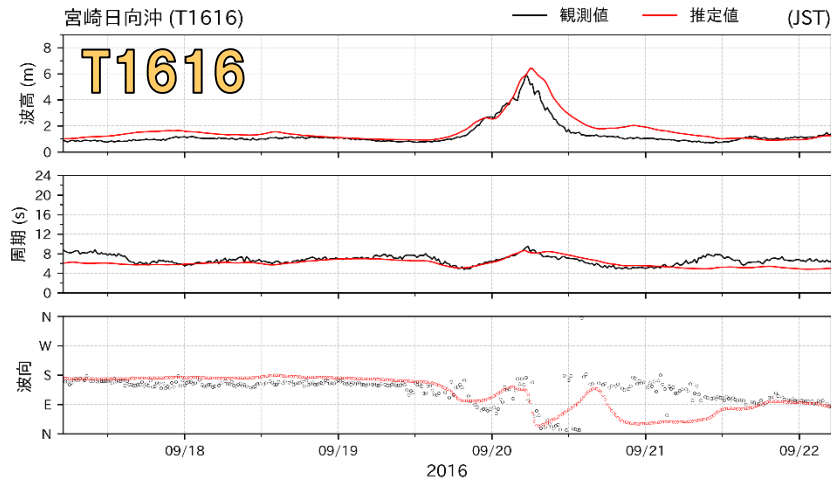
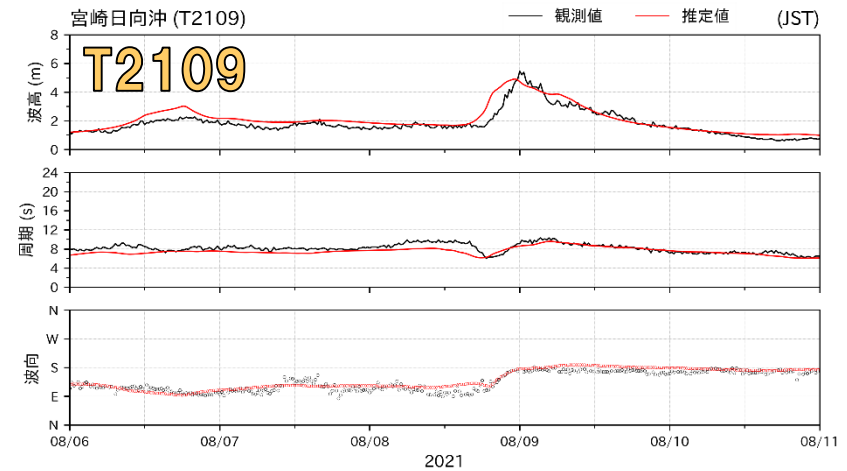
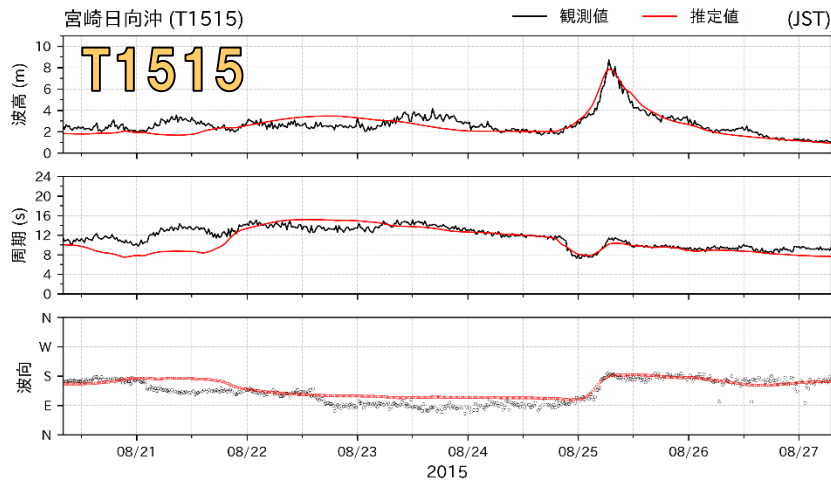
項目	設定	備考
波浪推算モデル	WAVEWATCH III (Ver.6.07)	第3世代波浪推算モデル
格子領域	1/2° ~1/64°	緯度経度の球面座標系
計算時間間隔	720~30s	出力は20分間隔
周波数分割数	35	周期24.3~0.95s
波向分割数	36	$\Delta \theta = 10^\circ$
生成項モデル	ST4	Ardhuinモデル
移流スキーム	UQ	3次精度スキーム
非線形相互作用	考慮	第3世代波浪推算モデル
水深	考慮	浅水効果、屈折を考慮
底面摩擦	考慮	JONSWAPモデル
地形性碎波	なし	碎波減衰は生じない

(3) 波浪推算モデルの検証: 宮崎日向沖

□ 実際の風速場に近い条件で計算した。

□ 外洋(D1):ERA5(約27km格子)、近海(D2-D3):LFM(局地数値予報データ、2km格子)

□ **いずれの台風に対してもピークを概ね再現できたことを確認した。⇒波浪推算モデルは問題なし**

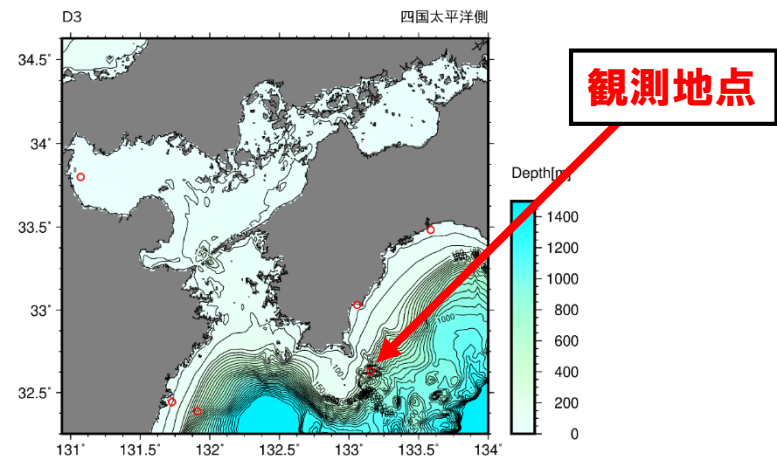
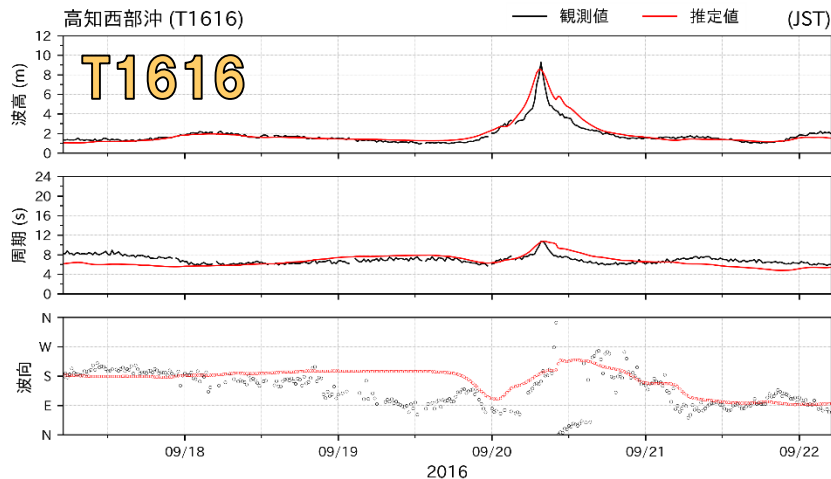
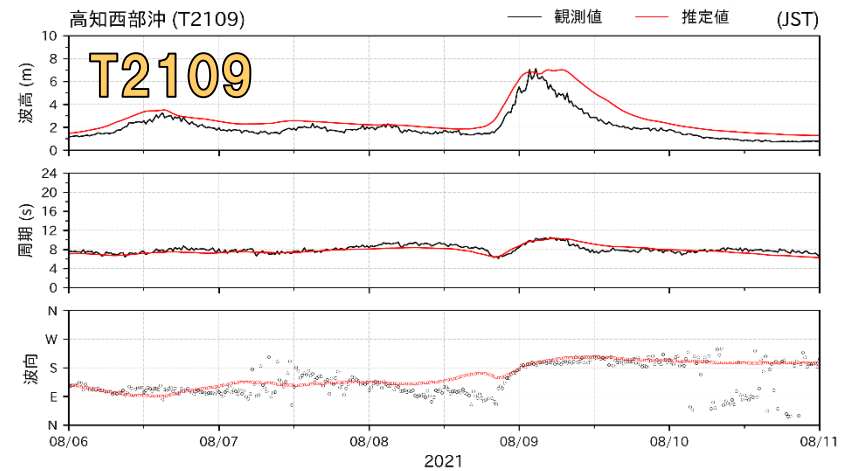
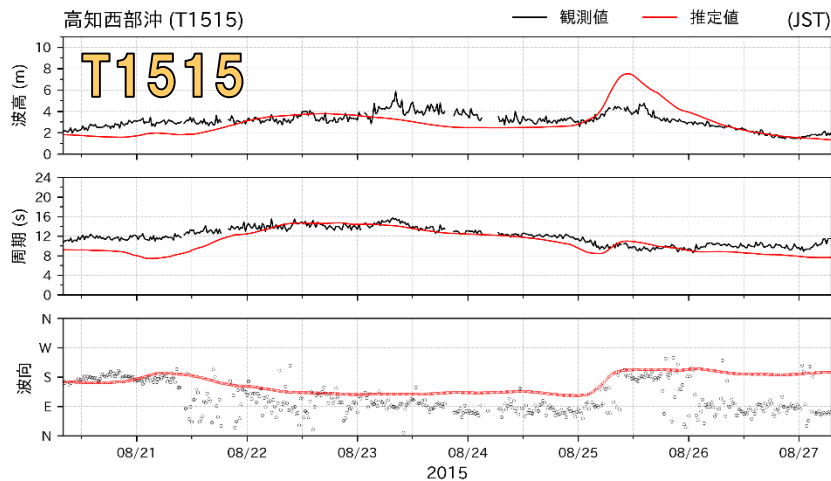


(3) 波浪推算モデルの検証: 高知西部沖

□ 実際の風速場に近い条件で計算した。

□ 外洋(D1):ERA5(約27km格子)、近海(D2-D3):LFM(局地数値予報データ、2km格子)

□ いずれの台風に対してもピークを概ね再現できたことを確認した。⇒波浪推算モデルは問題なし

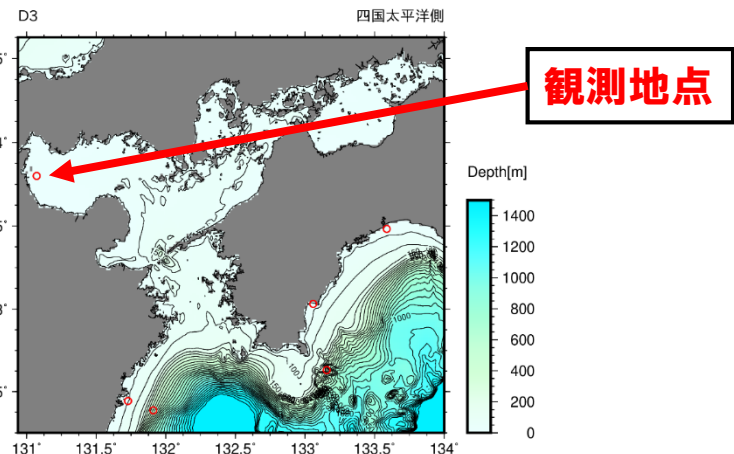
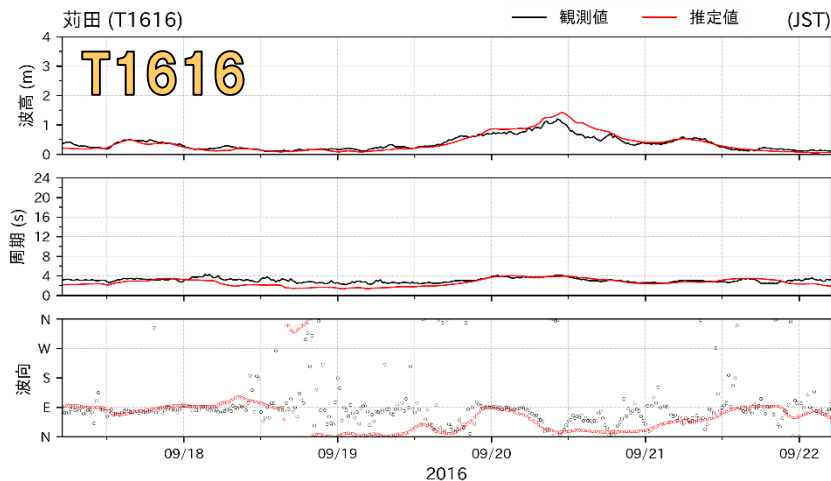
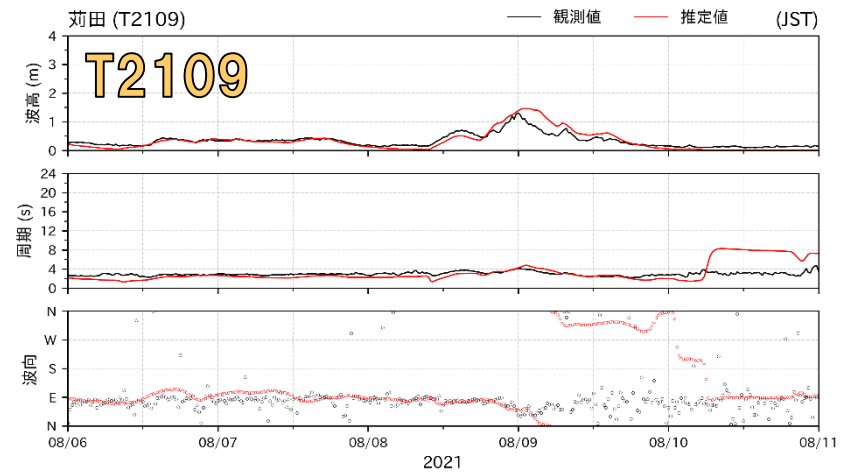
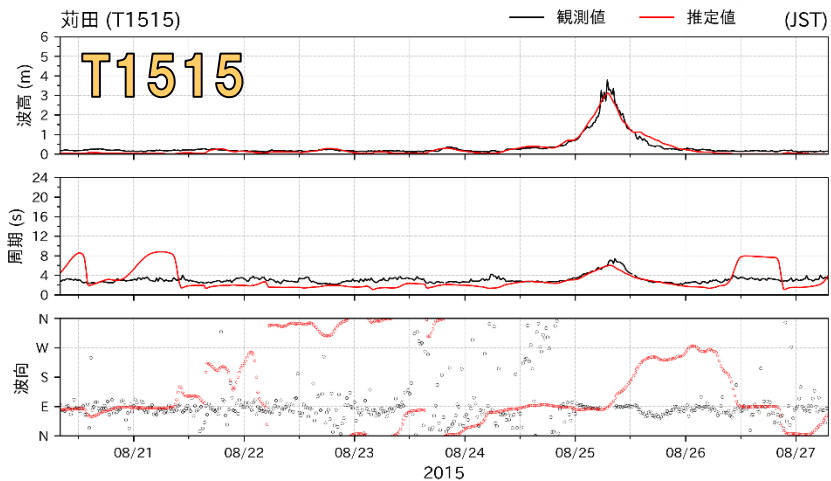


(3) 波浪推算モデルの検証: 苅田

□ 実際の風速場に近い条件で計算した。

□ 外洋(D1):ERA5(約27km格子)、近海(D2-D3):LFM(局地数値予報データ、2km格子)

□ いずれの台風に対してもピークを概ね再現できたことを確認した。⇒波浪推算モデルは問題なし



(4) 経験的台風モデルの設定： 最大旋衡風速半径 r_0

- 一般的に、経験的台風モデルを使用すると、**波浪が過小評価**となる。台風以外の風が無視されるため。
- 波浪を実態に近づけるため、経験的台風モデルの**最大旋衡風速半径(r_0)**を**本多モデルで調整**する。※実績台風は観測値を元に r_0 を調整できるが、d4PDFの台風ではモデル化が必要。

【本多モデル(2018)による r_0 算定】

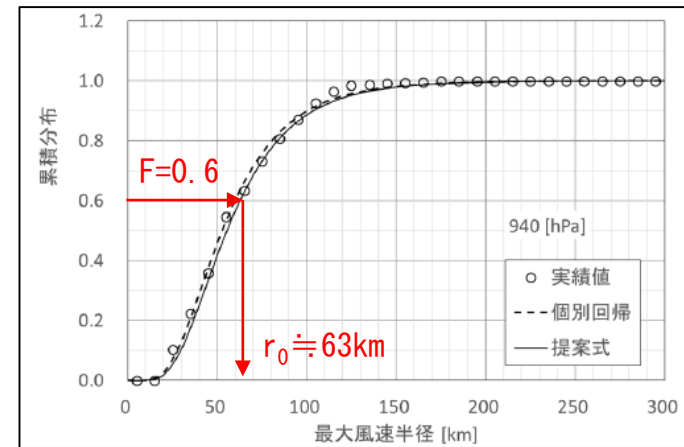
$$r_0 = \exp\{\mu + \sigma \cdot \Phi^{-1}(F)\}$$

$$\mu = \ln \left\{ \alpha_\mu \exp \left(\frac{p_c - \beta_\mu}{\gamma_\mu} \right) \right\}$$

$$\sigma = \ln \left\{ \alpha_\sigma \exp \left(\frac{p_c - \beta_\sigma}{\gamma_\sigma} \right) \right\}$$

Φ^{-1} は標準正規分布の逆関数, p_c は中心気圧

パラメータ	設定値 (全ステージ)
$\alpha_\mu, \beta_\mu, \gamma_\mu$	83.31, 967, 66.18
$\alpha_\sigma, \beta_\sigma, \gamma_\sigma$	1.819, 967, 247.8



図：本多モデルによる r_0 の分布

- 本多モデルは、 F を設定すれば、中心気圧に応じて r_0 が算出される。
- **最適な F 値を検討する。**

(4) 経験的台風モデルの設定:パラメータFの検討(高知西部沖)

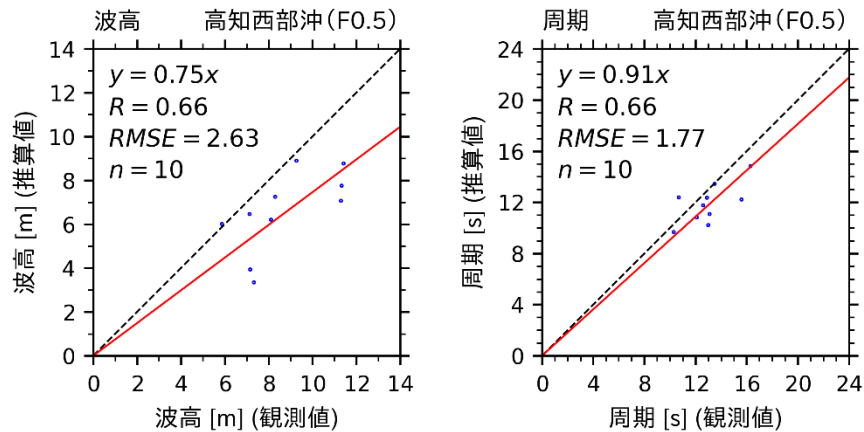


図1: 相関解析(F=0.5)

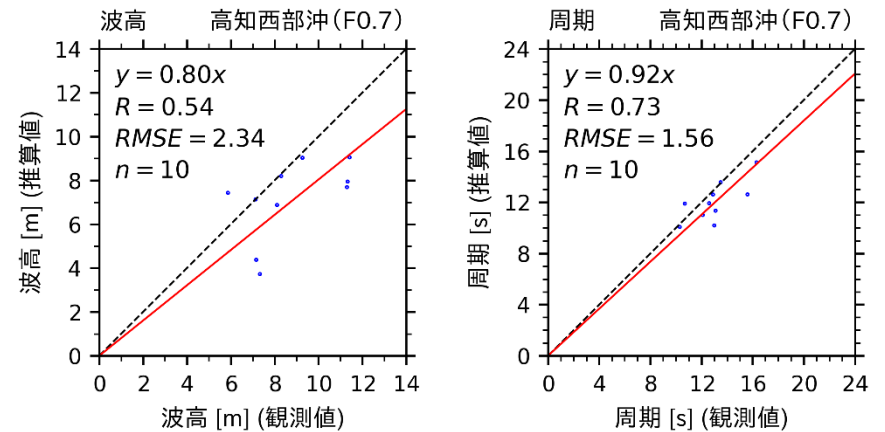


図2: 相関解析(F=0.7)

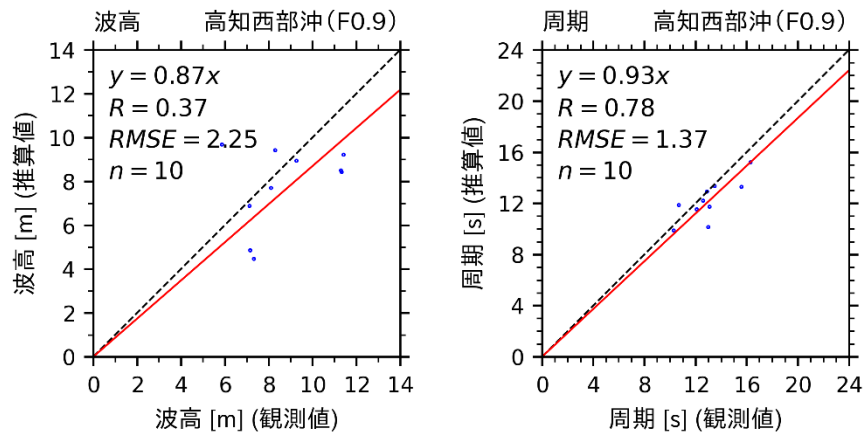


図3: 相関解析(F=0.9)

- F=0.5は波高が過小評価傾向
- F=0.9は、回帰係数(傾き)が1.0に近い。

(4) 経験的台風モデルの設定:パラメータFの検討(宮崎日向沖)

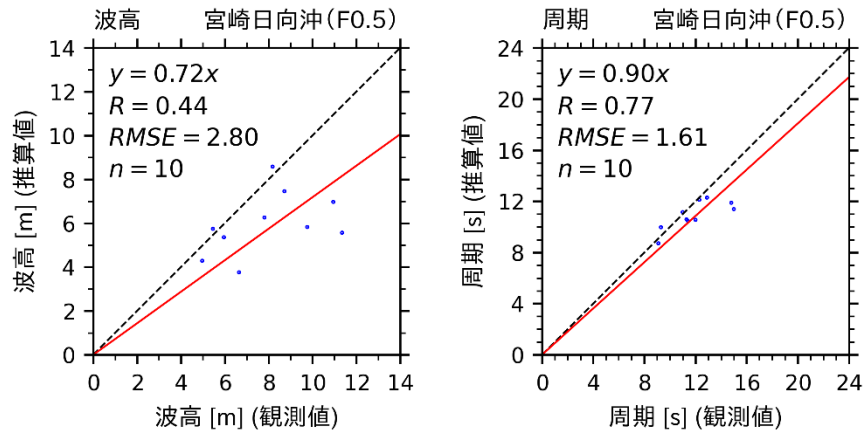


図1: 相関解析(F=0.5)

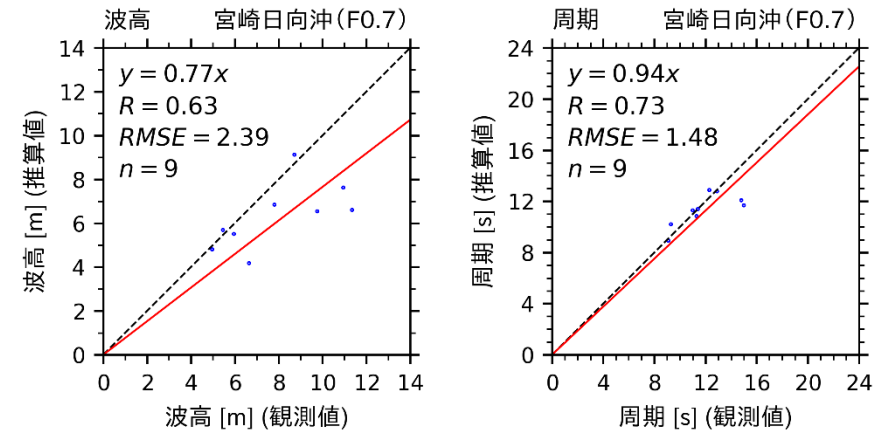


図2: 相関解析(F=0.7)

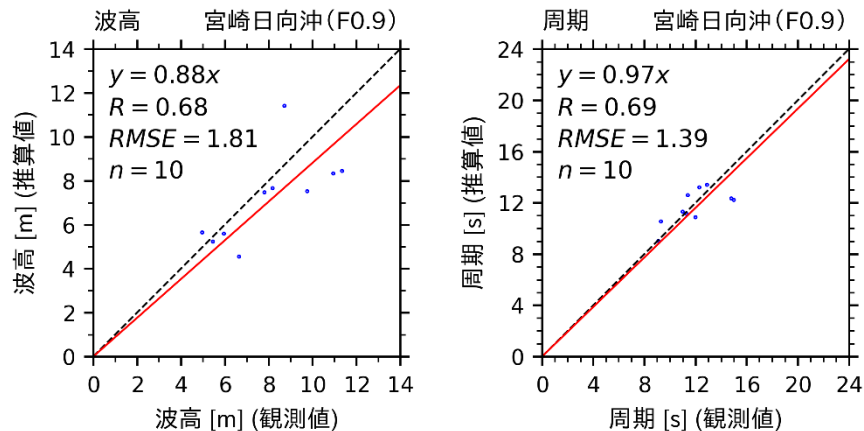


図3: 相関解析(F=0.9)

- F=0.5は波高が過小評価傾向
- F=0.9は、回帰係数(傾き)が1.0に近い。

(4) 経験的台風モデルの設定:パラメータFの検討(苅田)

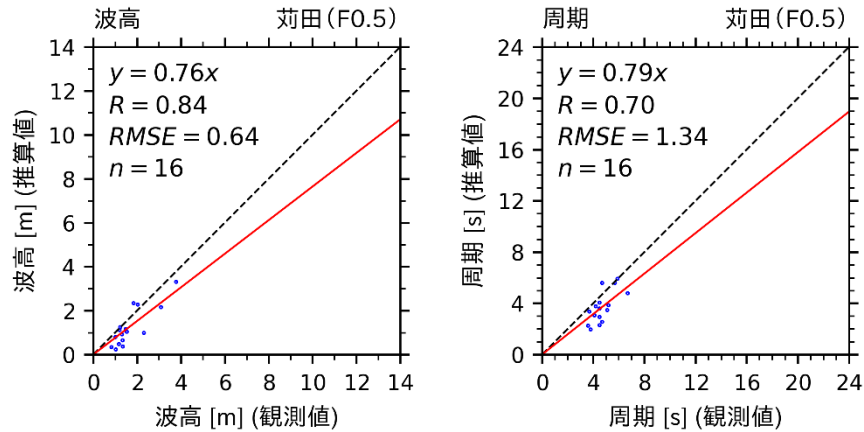


図1: 相関解析(F=0.5)

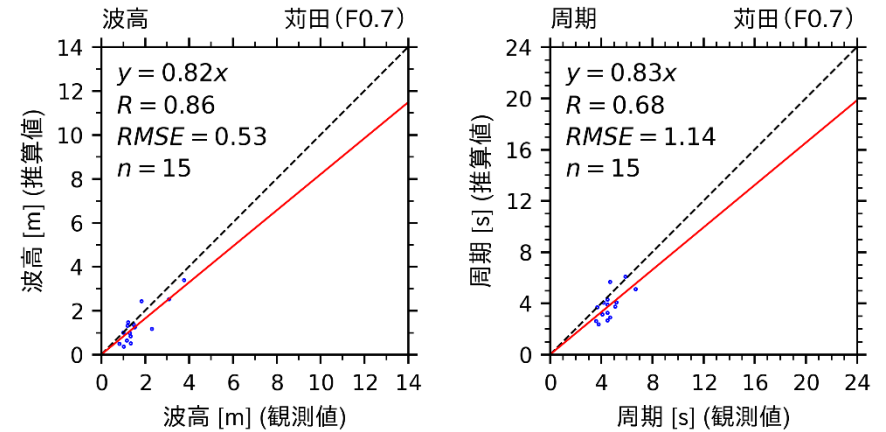


図2: 相関解析(F=0.7)

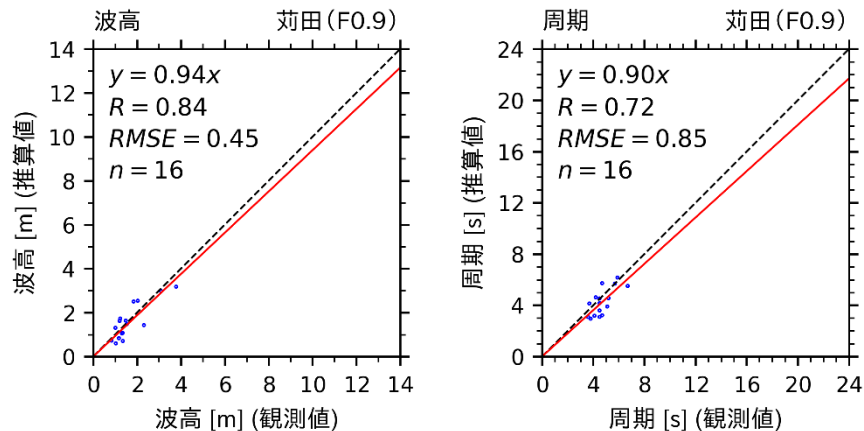


図3: 相関解析(F=0.9)

- F=0.5は波高が過小評価傾向
- F=0.9は、回帰係数(傾き)が1.0に近い。



本多モデルのパラメータは、**F=0.9**を採用する。

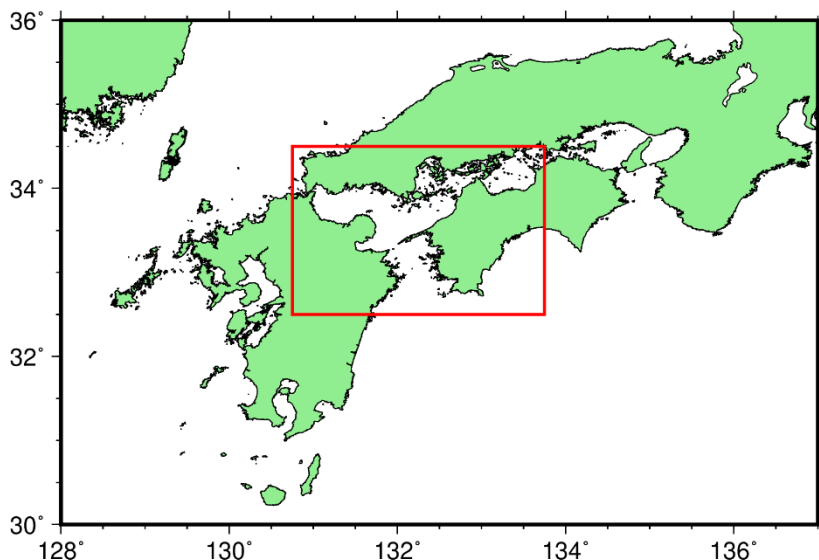
3. 気候変動を考慮した波浪推算

No.	項目	内容
(1)	計算ケースの設定	d4PDFの計算ケースを選定する。
(2)	波浪推算の実施	波浪推算を実施する。
(3)	波浪推算結果の解析	極値統計解析により確率波を算定する。
(4)	設計波への反映	解析結果を設計波に反映する。

(1) 計算ケースの設定： ケース数

- 愛媛県周辺を通過する台風のうち、中心気圧の低い台風を選定する。
- 検討ケース数は、10年確率値以上が算定できる個数を確保する(平均発生率 $\lambda > 0.1$)。

【台風の検討範囲(赤枠)】



<赤枠の範囲>

東経: 130.75~133.75°

北緯: 32.50~ 34.50°

※高潮の想定台風は範囲内に含まれる

表: 台風の採用ケース数

種類	年数	採用 ケース数	平均発生率 λ
d4PDF 過去実験	6000	650	0.108
d4PDF 2K上昇 (各SST)	549	65	0.118

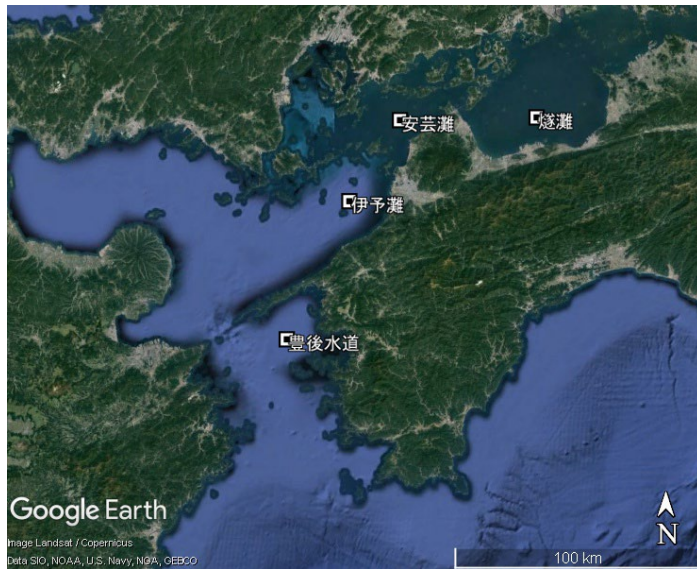
※2K上昇は、SST(表層海水温シナリオ)が6種類あるので、
全ケースは $65 \times 6 = 390$ ケース

- 検討範囲の通過する台風のうち、中心気圧の低い(強い)順に採用する。
- SSTは6種類をそれぞれ同数抽出する。

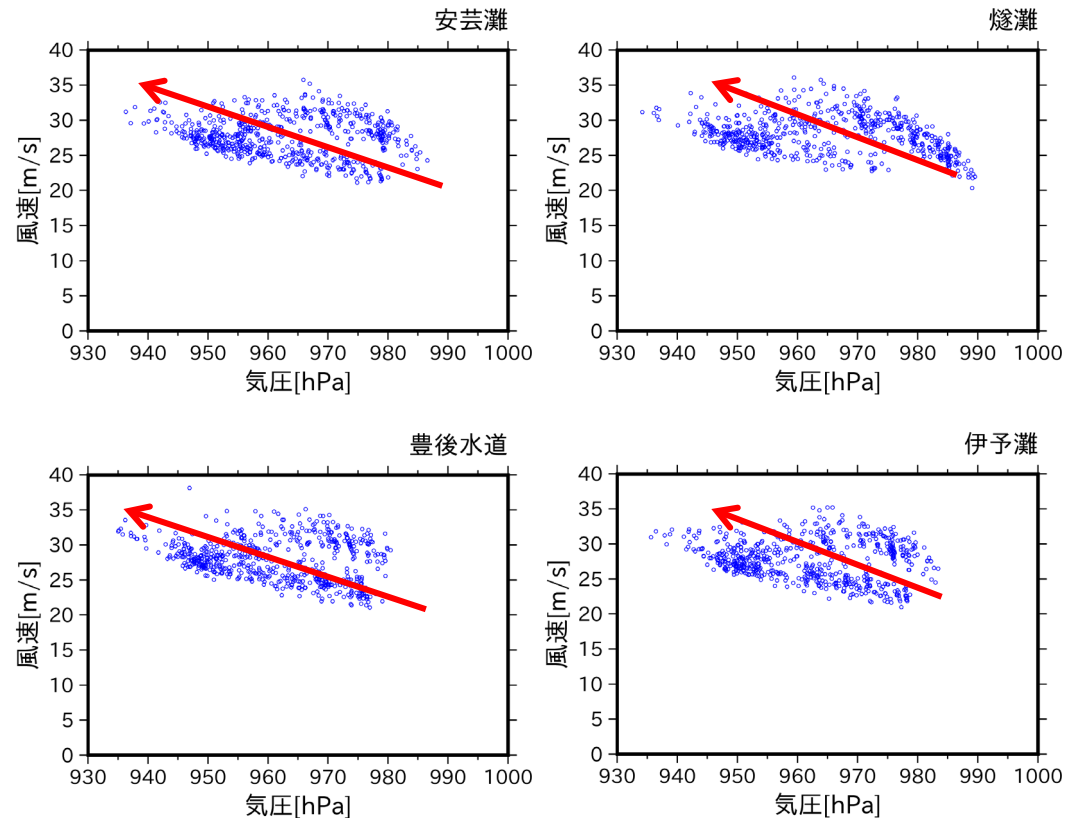
(1) 計算ケースの設定： 気圧と風速の関係【補足】

- 台風は、中心気圧をもとに選定したが、「中心気圧が低いほど風速が大きい」という仮定に基づいている。
- その妥当性について確認する。 ⇒ 代表地点で、各台風の最低気圧と最大風速を比較する。

【海域の代表地点】



【最低気圧と最大風速の関係】

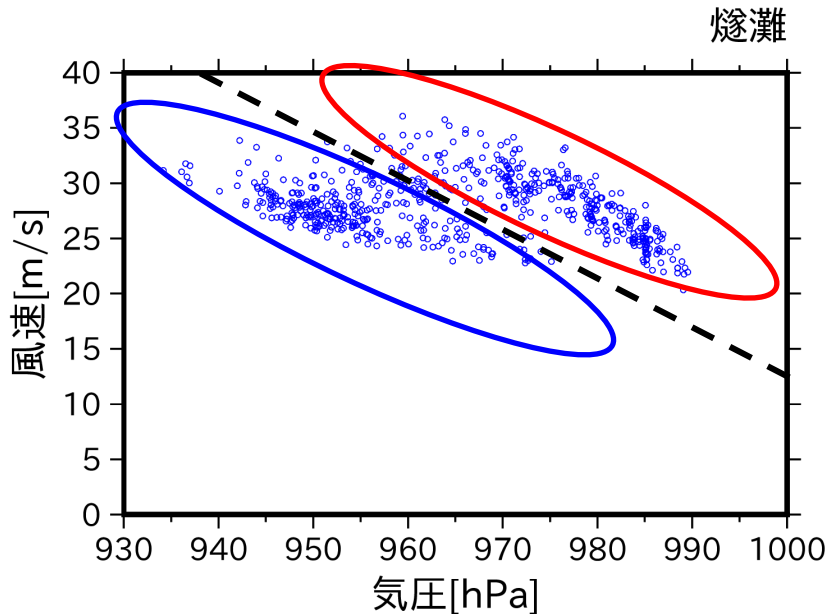


- 気圧と風速は緩やかな相関関係にあった。
- データのバラつきは台風経路の違いによるものであった(次スライド)。

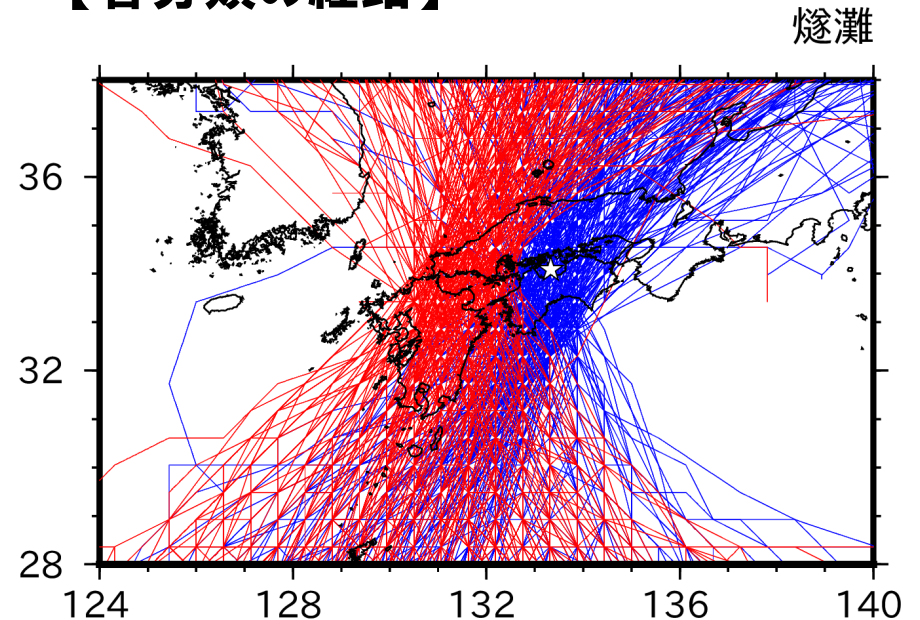
(1) 計算ケースの設定: 気圧と風速の関係【補足】

- 風速を2グループに分類し(赤:風速強、青:風速弱)、それぞれの経路を図化。

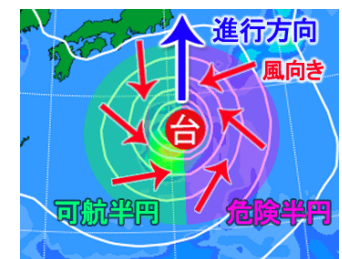
【最低気圧と最大風速の関係】



【各分類の経路】



- 海域代表点(右図の☆印)の西側を通過する台風は強風となる。
- 理由として、台風の危険半円側になるため。

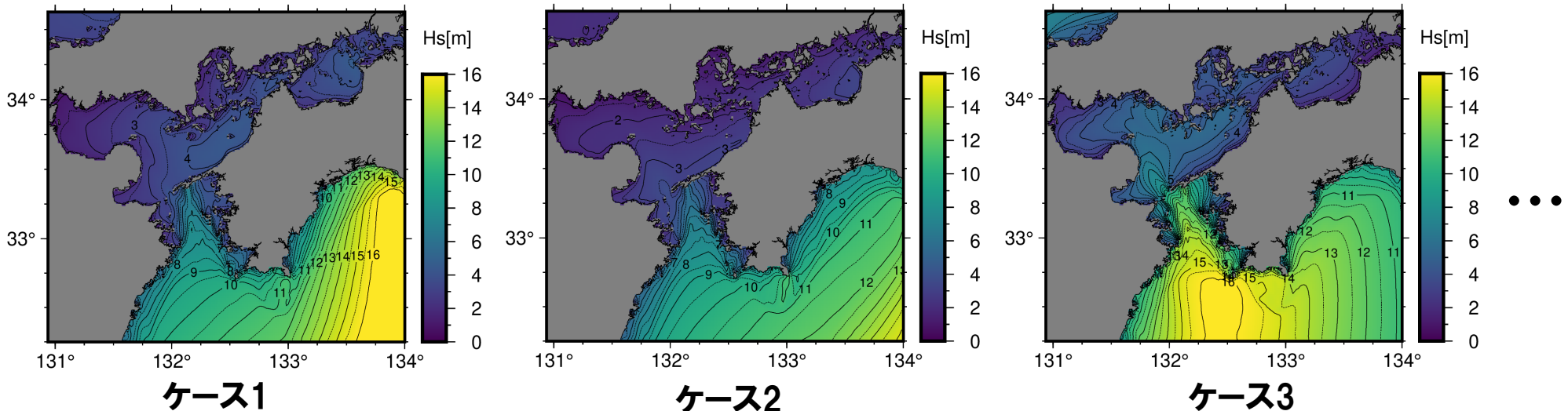


出典: お天気.com

(2) 波浪推算の実施

- 各台風について、経験的台風モデル(本多モデル, $F=0.9$)で海上風を推算する。
- 推定された風速データを入力値として、波浪推算を実施する。
- 各台風ケースについて、最大波高分布を整理する。

【最大波高分布の一例】

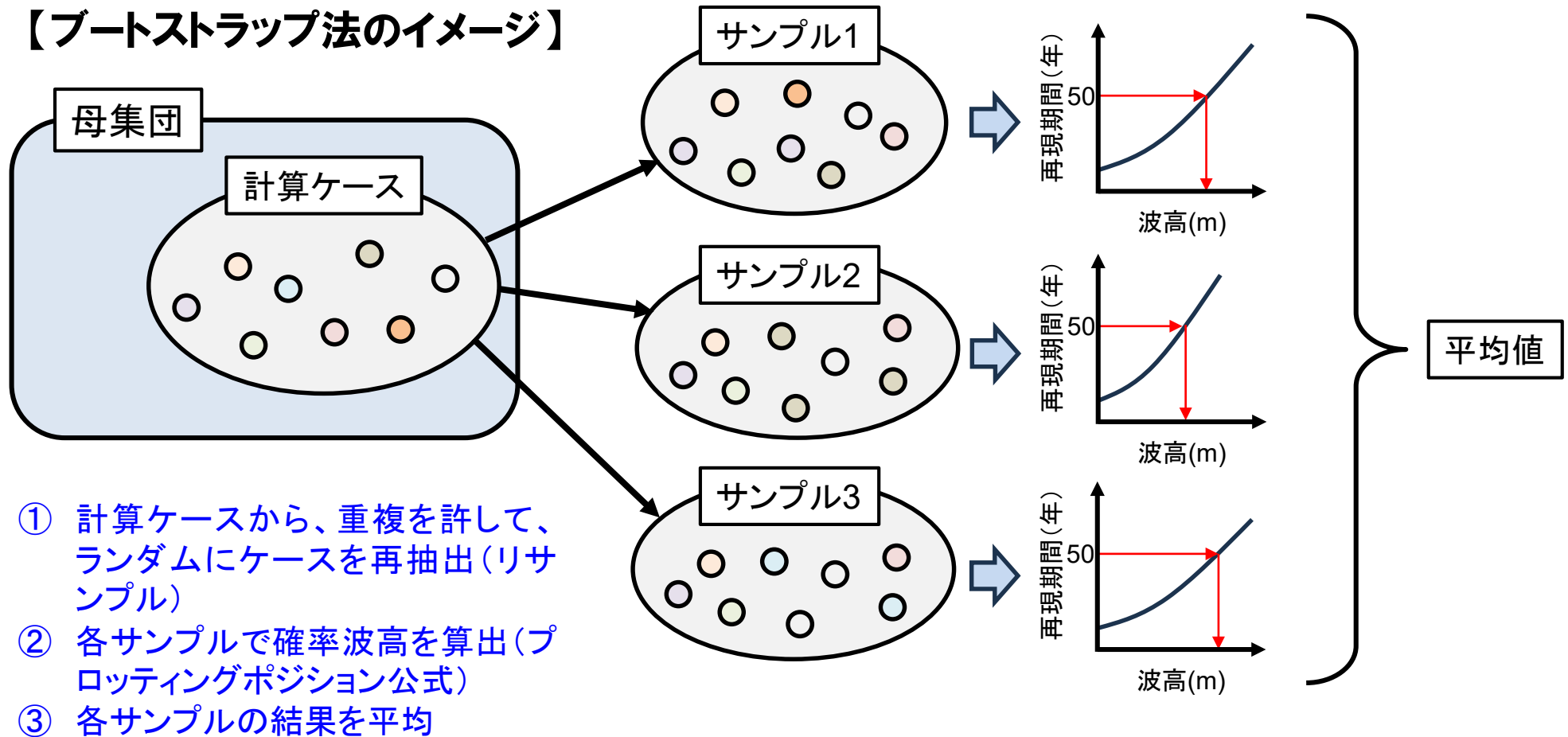


- 各ケースで、最大波高の分布は様々。
- これらを統計的に処理して、確率波を算定する。
- 確率波高の算出は、ノンパラメトリック法(ブートストラップ法)を用いる。

(2) 波浪推算の実施： ブートストラップ法【補足】

□ ブートストラップ法により、確率波高を算定する。

【ブートストラップ法のイメージ】



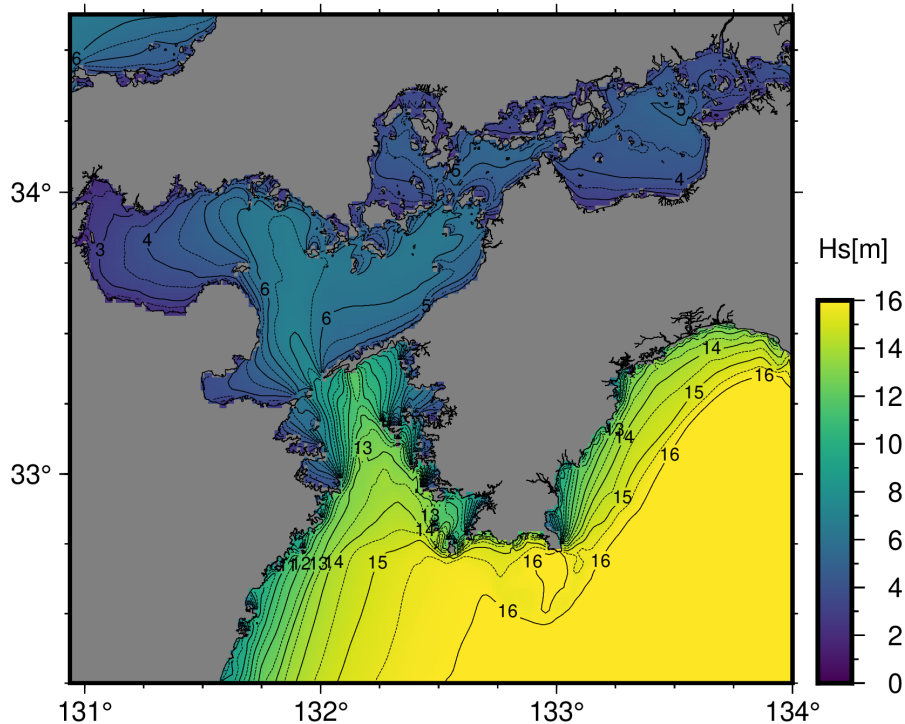
- ブートストラップ法は多数の計算ケース数を活かした算出方法

(3) 波浪推算結果の解析： 確率波高の算定

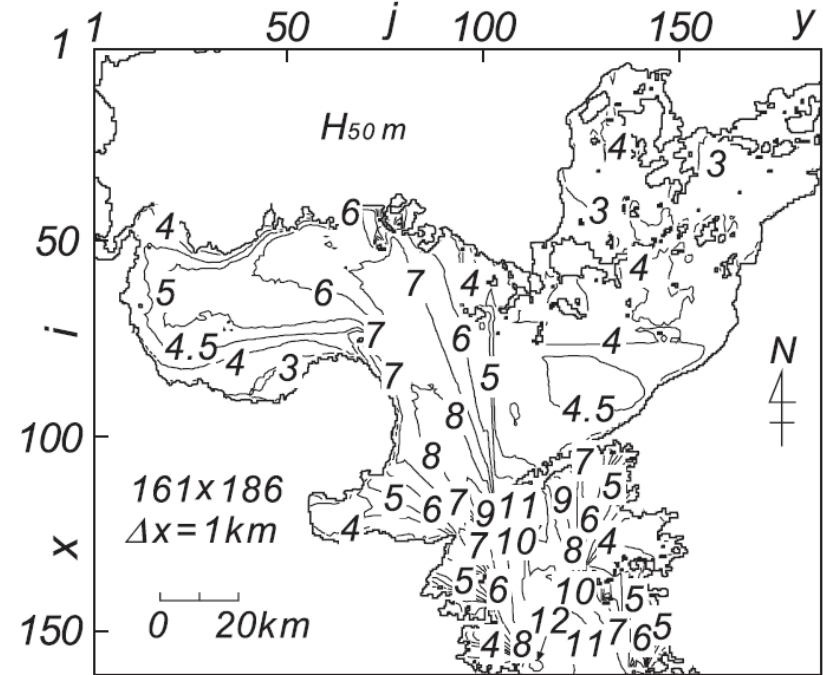
□ 各台風の最大波高をもとに、極値統計解析を行い、確率波高を算定する。

【50年確率波高：過去実験】

過去実験, 50年確率



【既往論文の50年確率波高】



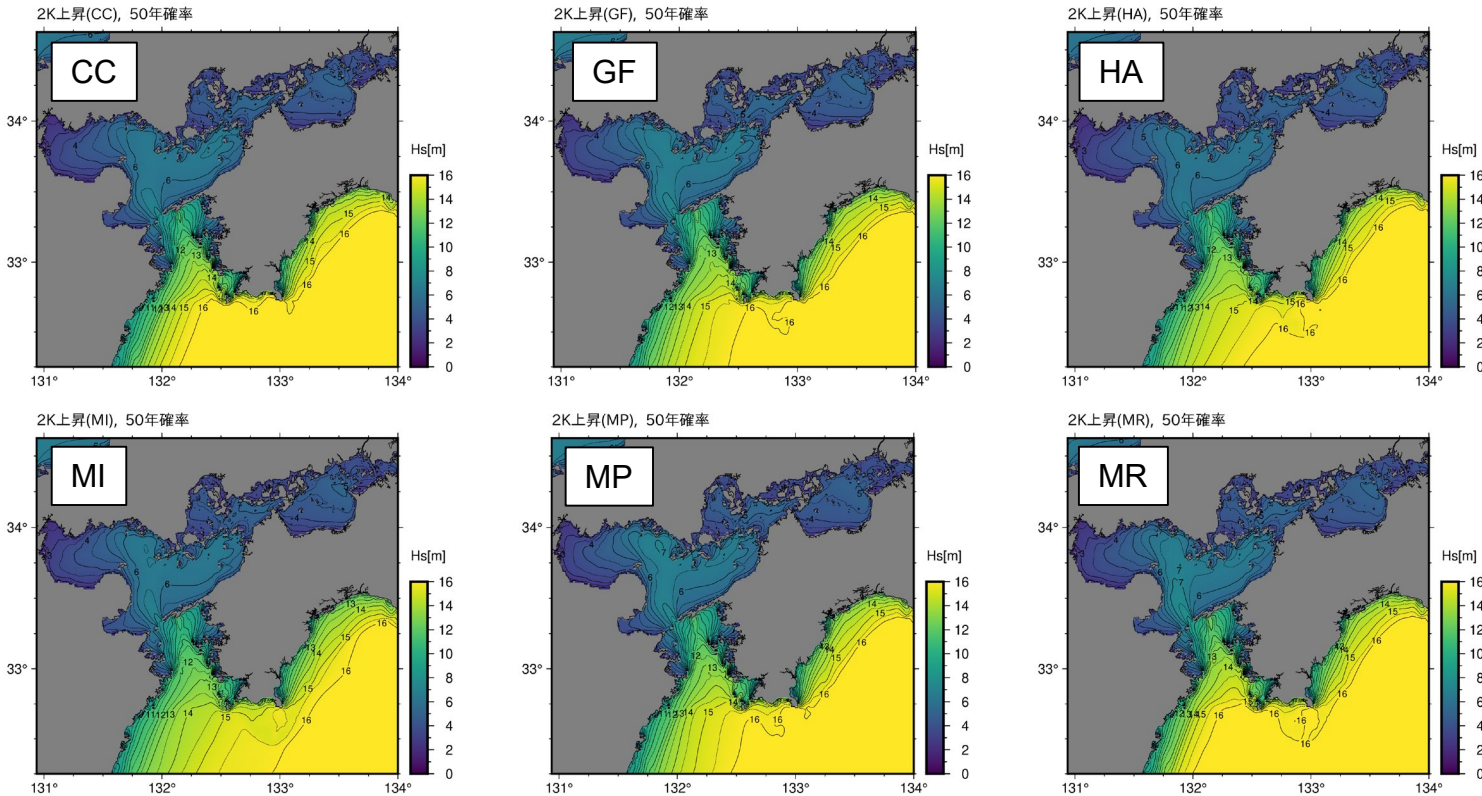
畑田ら(2010):瀬戸内海における波浪推算に基づく確率波高の推定, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.66, No.1, pp.126-130.

- 波高のオーダーは既往論文と一致していた。

(3) 波浪推算結果の解析： 確率波高の算定

□ 2K上昇の各SSTケースで、50年確率波高を算出する。

【50年確率波高：2K上昇(SST6種)】



※SSTは将来気候における海水面温度の予測値。d4PDFでは、6種類のSSTの結果がある。

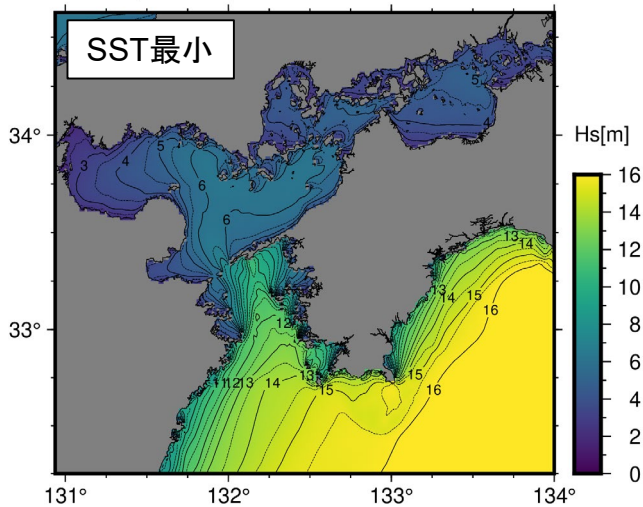
- 6種類のSSTをもとに、最小・平均・最大の50年確率波高を算出する。

(3) 波浪推算結果の解析： 確率波高の算定

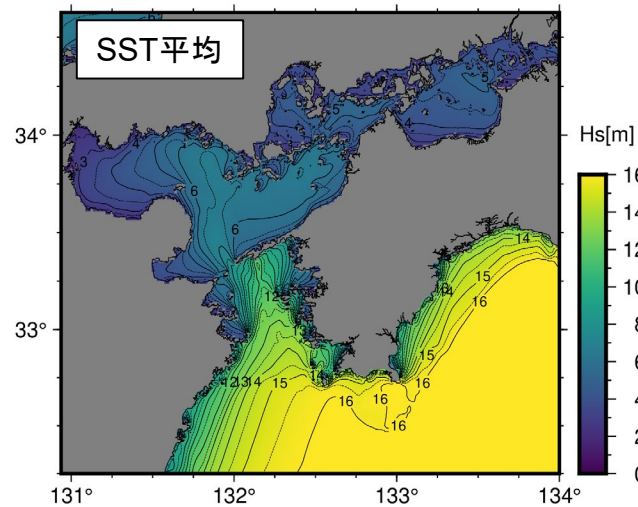
□ 6種のSSTケースの50年確率波高をもとに、各メッシュで、平均値・最小値・最大値を算出する。

【50年確率波高：2K上昇】

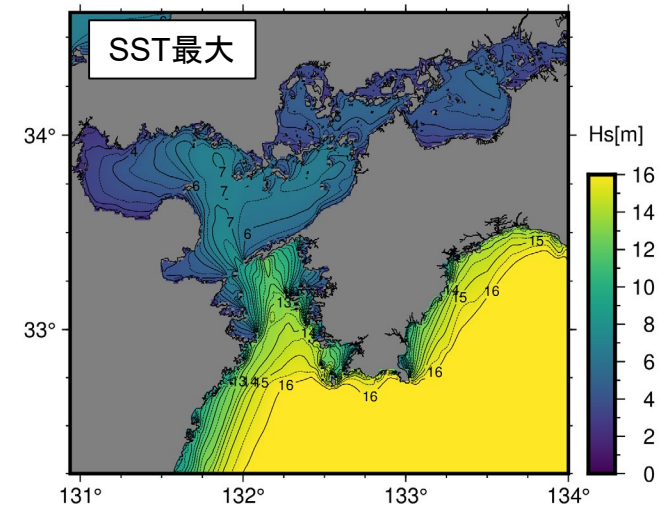
2K上昇(SST最小), 50年確率



2K上昇(SST平均), 50年確率



2K上昇(SST最大), 50年確率



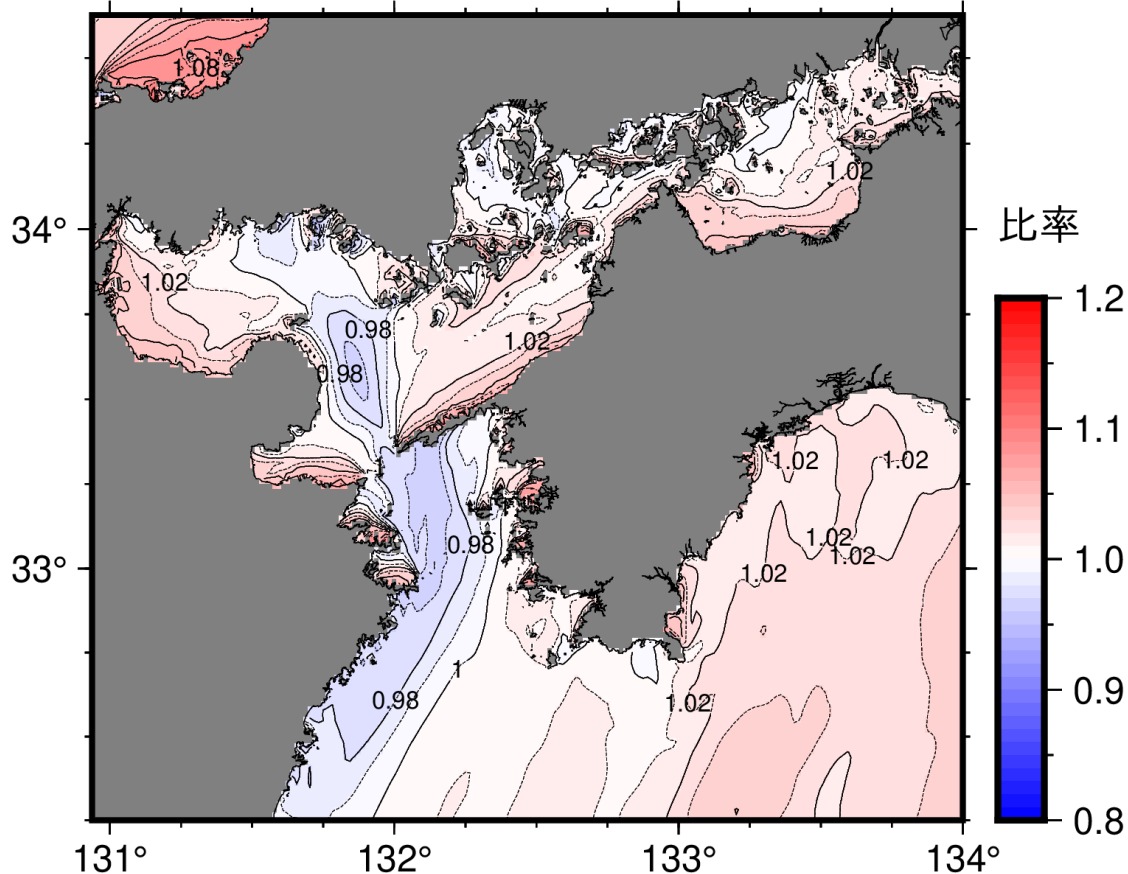
- SST最小とSST最大は将来気候の変動幅となる。

(3) 波浪推算結果の解析： 将来変化比の算定

□ 50年確率波高をもとに将来変化比を算出する。 将来変化比 = 2K上昇 / 過去実験

【50年確率波高の将来変化比:SST平均】

2K上昇(SST平均), 50年確率



【各海域の将来変化比の概略値】

海域	将来変化比
燧灘	1.01~1.04
安芸灘	0.99~1.02
伊予灘	1.00~1.03
豊後水道	0.97~1.00

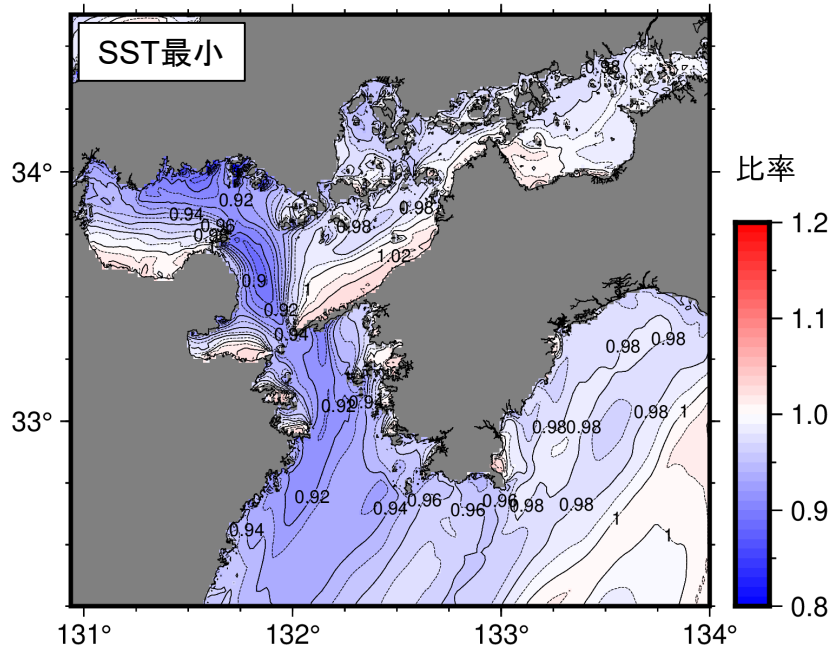
- 豊後水道は減少傾向。
- それ以外は、全体的に増加傾向。

(3) 波浪推算結果の解析： 将来変化比の算定

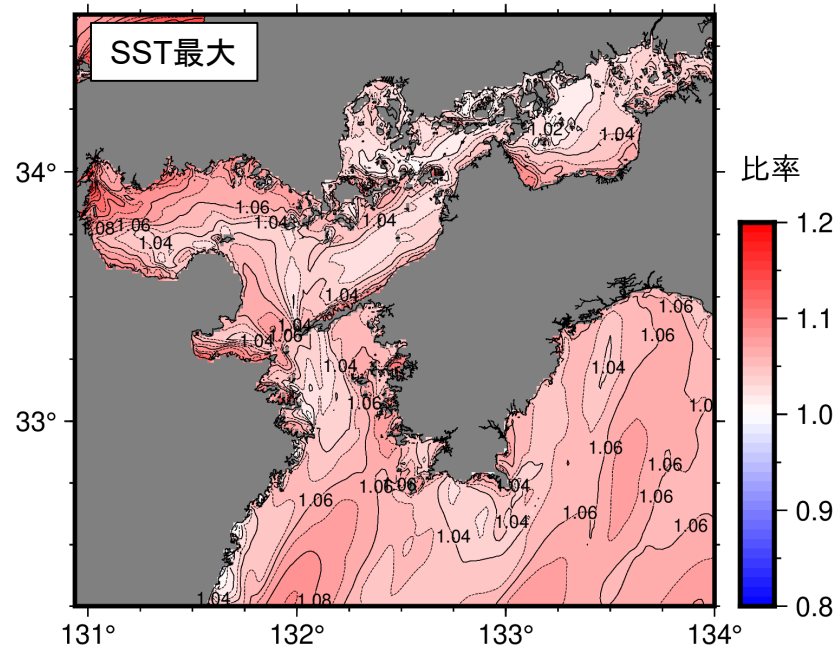
□ 50年確率波高をもとに将来変化比を算出する。 将来変化比 = 2K上昇 / 過去実験

【50年確率波高の将来変化比：将来気候の変動幅】

2K上昇(SST最小), 50年確率



2K上昇(SST最大), 50年確率



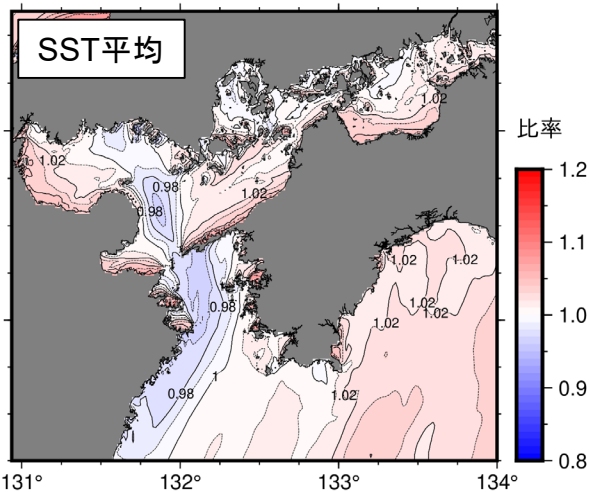
- SST最小では、燧灘～伊予灘の沿岸部以外は全体的に減少傾向
- SST最大では、全海域で増加(最大で1.06程度)

(4) 設計波への反映

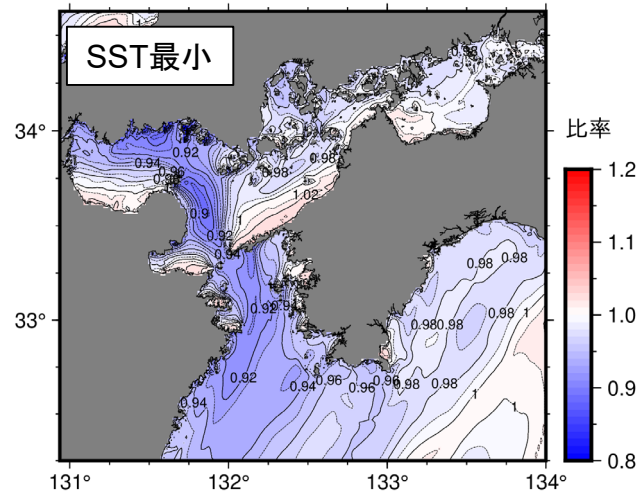
設計波への反映方針

- 愛媛県沿岸の特徴として、波高の将来変化比の絶対値は小さく、将来予測の変動幅は大きい。
- したがって、各海域での平均的な将来変化比を用いて将来の設計波を算定する。

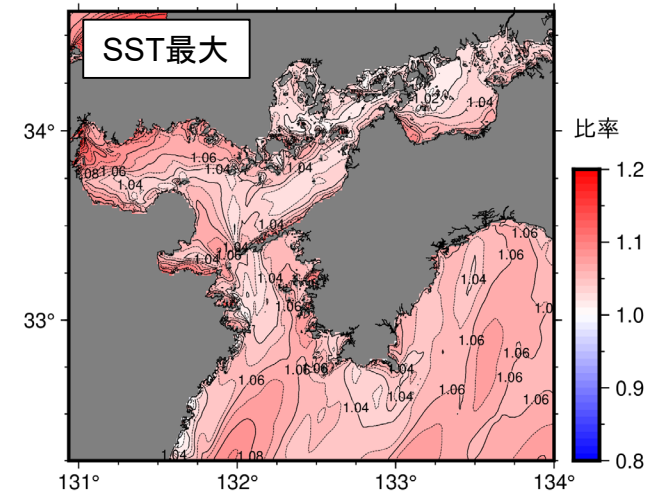
2K上昇(SST平均), 50年確率



2K上昇(SST最小), 50年確率

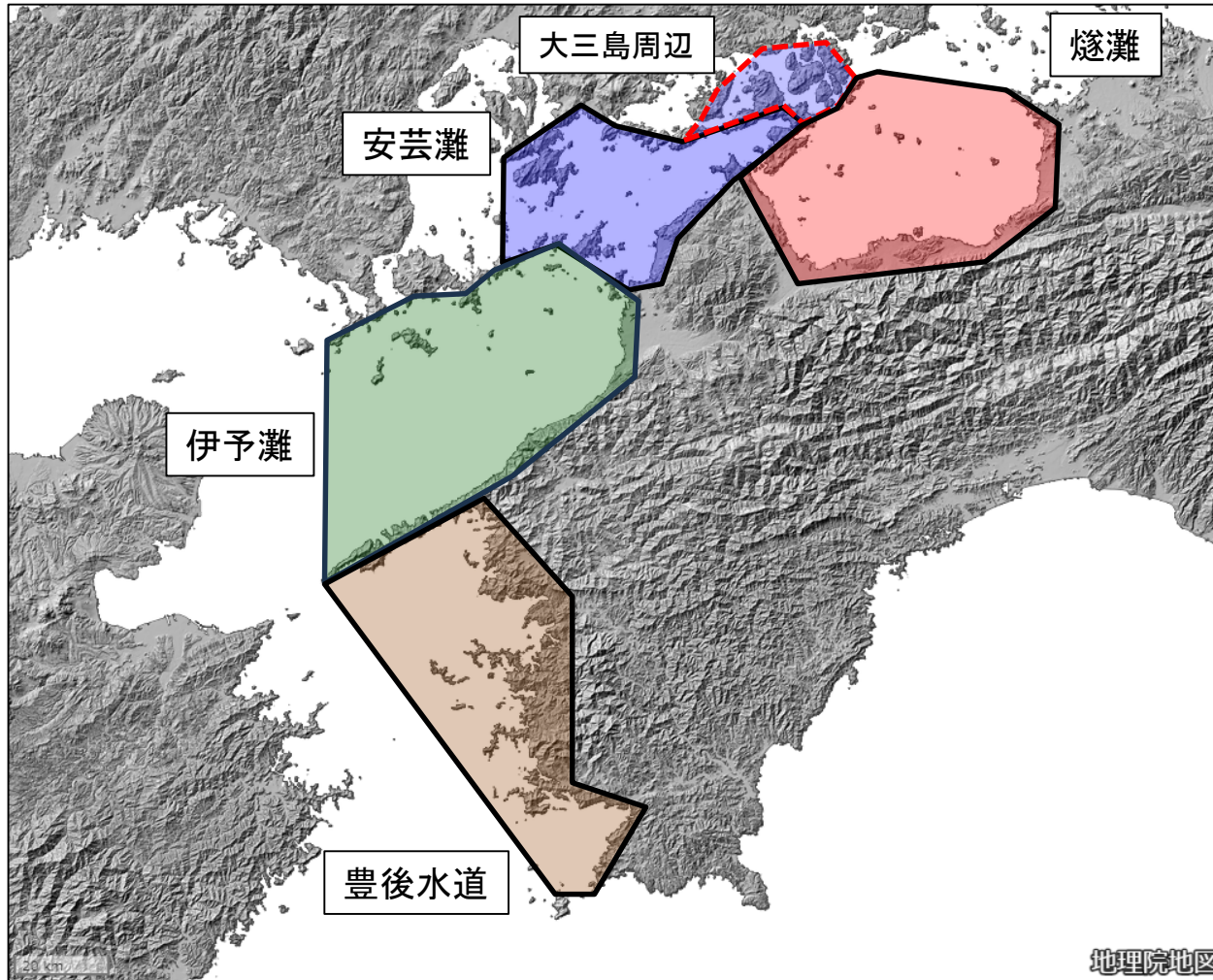


2K上昇(SST最大), 50年確率



(4) 設計波への反映： 各海域での算出

□ 海域を以下の4つに分割する。



□ 燧灘：

- 三崎～百貫島～弓削島～伯方島～大島～来島海峡を結ぶライン

□ 安芸灘：

- 来島海峡～伯方島～大三島～大崎下島～呉～江田島～柱島～周防大島～中島～興居島を結ぶライン

□ 伊予灘：

- 興居島～中島～周防大島～長島～佐田岬を結ぶライン

□ 豊後水道：

- 佐田岬～沖ノ島～柏島を結ぶライン

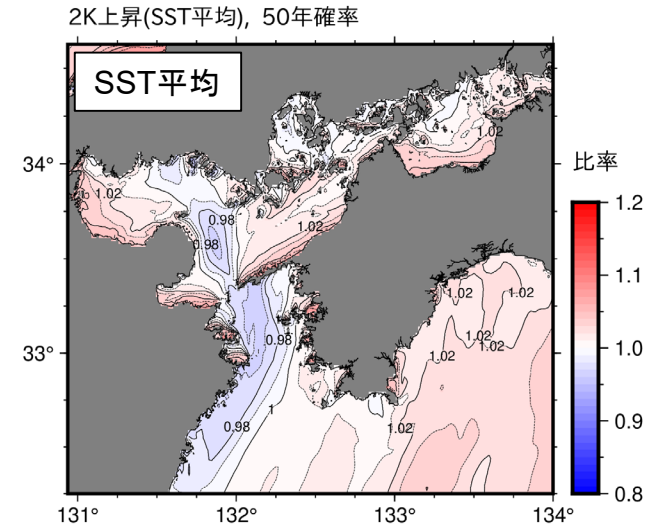
※大三島周辺(赤点線区域)は、保守側の値として、安芸灘の結果を流用する。

(4) 設計波への反映： 各海域での算出

□ 各海域での将来変化比を算出する。

【各海域での将来変化比】

海域	海域平均の将来変化比(50年確率波高)		
	SST平均	SST最小	SST最大
燧灘	1.02	0.99	1.04
安芸灘	1.01	0.99	1.03
伊予灘	1.02	0.99	1.04
豊後水道	1.00	0.95	1.05



波高の将来予測(2K上昇シナリオ)

- 愛媛県沿岸の50年確率波高は、瀬戸内海(燧灘、安芸灘、伊予灘)で1～2%程度の増加、豊後水道で変化なし、と予測される。
- ただし、将来予測シナリオによる変動が大きく、確信度は低い。

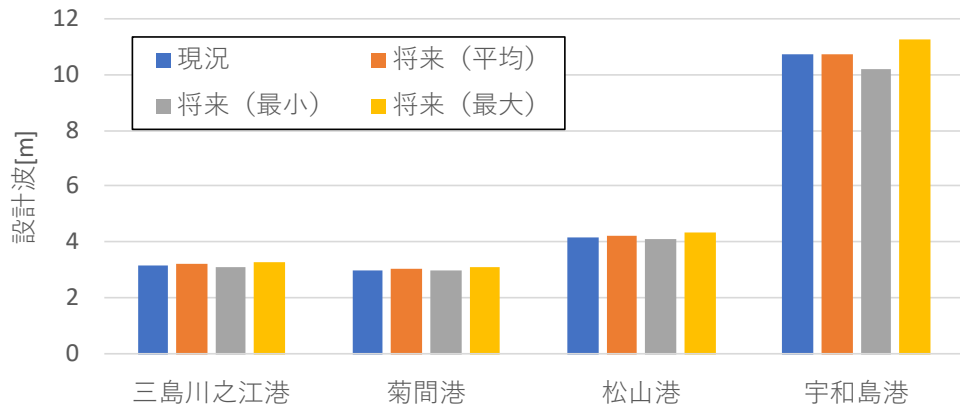
※波浪の経年変化のモニタリング結果や気候変動の新たな知見により、将来予測を定期的に見直す必要がある。

(4) 設計波への反映： 算出例

□ 将来変化比をもとに、将来の設計波(50年確率波高)を算出する。

【50年確率波高(設計沖波)の将来変化の算出例】

港湾	海域	SST平均の将来変化比 (最小～最大)	50年確率波高 [m]	
			現況	SST平均の将来値 (最小～最大)
三島川之江港沖	燧灘	1.02(0.99～1.04)	3.16	3.22(3.13～3.29)
菊間港沖	安芸灘	1.01(0.99～1.03)	3.01	3.04(2.98～3.10)
松山港沖	伊予灘	1.02(0.99～1.04)	4.16	4.24(4.12～4.33)
宇和島港沖	豊後水道	1.00(0.95～1.05)	10.73	10.73(10.19～11.27)



【補足：周期の算定方法】

□ 現況設計波の波形勾配と同じ、と仮定する。

$$H_{old}/L_{old} = H_{new}/L_{new}$$

$$L \doteq 1.56T^2 \quad \text{より、}$$

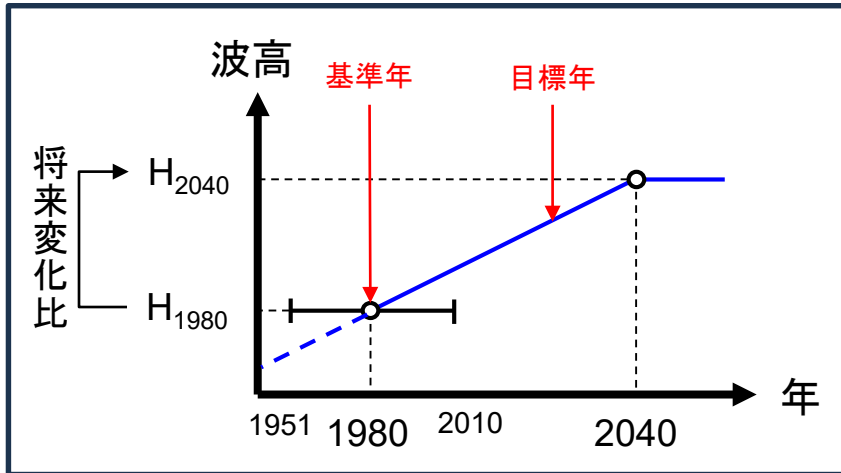
H : 波高、 L : 波長、
 T : 周期

□ 周期の将来変化比は、 \sqrt{r} となる(r は波高の将来変化比)。

(4) 設計波への反映： 時間スケールの設定方針

□ 気候変動の時間スケールを考慮する場合について、外力の設定方針を示す。

【波高外力の時間変化の考え方】



□ 将来変化比は、1980年と2040年の比率とする。

- d4PDFの過去実験は1951～2010年であり、平均すると1980年相当となる。
- 気温上昇は2040年から一定値(2K上昇)になると想定されており、2040年までは線形増加とする。

□ 目標年(設計供用期間末の年)が2040年以前であれば、左図をもとに算定する。

- 基準年(現況の設計外力の算定年)は、1980年とする。※ 海域によって算出年が異なるものの、平均水位のように明確な基準年を設定することが困難なため。

【各年の将来変化比】

西暦	将来変化比(1980年基準)	
	2040年に1.01	2040年に1.02
2020年	1.007	1.013
2025年	1.008	1.015
2030年	1.008	1.017
2035年	1.009	1.018
2040年～	1.010	1.020