ISSN 1346-7328
国総研資料 第1266号
令 和 6 年 1 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 1266 January 2024

３大湾内の港湾における高潮・波浪への気候変動の影響評価

本多和彦・成田裕也・岡本侃大・百海郁弥
平山克也・髙川智博・森 信人

Future Projections of Storm Surge and Wave Height
at Ports in Three Major Bays of Japan due to Climate Change

HONDA Kazuhiko, NARITA Yuuya, OKAMOTO Kanta, DOUKAI Fumiya
HIRAYAMA Katsuya, TAKAGAWA Tomohiro, MORI Nobuhito

国土交通省　国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所資料
No. 1266　　2024 年 1 月
(YSK-N-491)

３大湾内の港湾における高潮・波浪への気候変動の影響評価

本多和彦[1)]・成田裕也[2)]・岡本侃大[3)]・百海郁弥[4)]・平山克也[5)]・髙川智博[6)]・森　信人[7)]

要　旨

将来気候における高潮や高波のリスクを評価し，港湾地域での気候変動適応策を実施することや港湾施設を適切に設計することが重要である．これらの将来気候におけるリスク評価や港湾施設の設計には，将来気候における高潮偏差および波高の極値について，その変化を評価する必要がある．

本研究では，将来の３大湾における高潮偏差および波高について，将来気候の海水面温度パターンの違いも考慮し，再現期間に応じた将来変化比を算出した．また，本研究による高潮偏差および波高の将来変化比について，将来の港湾施設を設計する際に参考とする値を示すとともに，留意点についても示した．

キーワード：気候変動，高潮，波高，３大湾，港湾施設設計

1) 港湾・沿岸海洋研究部　港湾・沿岸防災研究室　室長
2) 港湾・沿岸海洋研究部　港湾・沿岸防災研究室　交流研究員（パシフィックコンサルタンツ株式会社）
3) 前 沿岸海洋・防災研究部　沿岸防災研究室　交流研究員（株式会社アルファ水工コンサルタンツ）
4) 前 沿岸海洋・防災研究部　沿岸防災研究室　研究員（北陸地方整備局　金沢港湾・空港整備事務所）
5) 港湾空港技術研究所　沿岸水工研究領域　波浪研究グループ　グループ長
6) 港湾空港技術研究所　沿岸水工研究領域　津波高潮研究グループ　グループ長
7) 京都大学防災研究所　教授・副所長

〒239-0826　横須賀市長瀬3-1-1　国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019　Fax：046−842−9265　e−mail：ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

Technical Note of NILIM
No. 1266 January 2024
(YSK-N-491)

Future Projections of Storm Surge and Wave Height at Ports in Three Major Bays of Japan due to Climate Change

HONDA Kazuhiko[1)]
NARITA Yuuya[2)]
OKAMOTO Kanta[3)]
DOUKAI Fumiya[4)]
HIRAYAMA Katsuya[5)]
TAKAGAWA Tomohiro[6)]
MORI Nobuhito[7)]

Synopsis

It is important to evaluate risks of storm surges and high waves in the future climate, and to conduct climate change adaptation measures in port areas and to design port facilities for the future climate. To evaluate these risks and design port facilities for the future, it is necessary to estimate future changes of extreme values of storm surges and high waves.

In this study, we evaluated future change ratio of storm surges and wave heights according to return period in the three major bays of Japan, considering the effect of six different sea surface temperature models. In addition, we proposed the future change ratio of storm surges and wave heights to design port facilities.

Key words: climate change, storm surges, wave heights, three major bays of Japan, design of port facilities

1) Head of Port and Coastal Disaster Prevention Division, Port, Coastal and Marine Department
2) Visiting Researcher, Port and Coastal Disaster Prevention Division, Port, Coastal and Marine Department (Pacific Consultants Co., Ltd.)
3) Ex-Visiting Researcher, Coastal Disaster Prevention Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department (Alpha Hydraulic Engineering Consultants Co., Ltd.)
4) Ex-Research Engineer, Coastal Disaster Prevention Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department (Engineering Official, Kanazawa Port and Airport Office, Hokuriku Regional Bureau)
5) Head of Wave Group, Coastal Hydraulic Engineering Department, Port and Airport Research Institute
6) Head of Tsunami and Storm Surge Group, Coastal Hydraulic Engineering Department, Port and Airport Research Institute
7) Deputy Director and Professor, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5019 Fax: +81-46-842-9265 e-mail: ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目　次

1. まえがき ····· 1

2. 数値解析手法 ····· 2
2.1　気圧場・風場の解析 ····· 2
2.2　高潮解析 ····· 6
2.3　波浪解析 ····· 11
2.4　現在気候および将来気候の台風データ ····· 15
2.5　極値統計解析 ····· 26
2.6　対象港湾 ····· 29

3. 高潮偏差の将来変化予測 ····· 30
3.1　東京湾 ····· 30
3.2　伊勢湾 ····· 34
3.3　大阪湾 ····· 36

4. 波高の将来変化予測 ····· 39
4.1　東京湾 ····· 39
4.2　伊勢湾 ····· 43
4.3　大阪湾 ····· 47

5. まとめ ····· 51

6. あとがき ····· 54

謝辞 ····· 55
参考文献 ····· 55

付録 A　高潮偏差の将来変化予測の詳細結果 ····· 58
付録 B　高潮偏差の極値統計解析結果 ····· 94

1. まえがき

気候変動による高潮および高波の将来変化を予測することは，日本における港湾等といった沿岸地域の持続可能な開発において，非常に大きな課題である．日本沿岸においては，地球温暖化に伴う海水面温度の上昇に伴う平均海面水位上昇の影響のほかに，台風（熱帯低気圧）の強大化によって，高潮および高波の規模が増大する可能性が示唆されている（文部科学省・気象庁，2020）．港湾において，このような高潮および高波の増大は，異常時における施設の安定性ならびに堤外地および背後域の安全性に影響を及ぼす．そのため，将来の高潮および高波の変化を定量的に評価し，それらに基づいて港湾地域における気候変動適応策を実施することが今後の重要な課題である．

そこで，本研究では，気候変動の影響を踏まえた港湾施設の設計に資するため，日本沿岸の港湾のうち，まずは３大湾（東京湾・伊勢湾・大阪湾）内の港湾を対象に，高潮および高波の変化を定量評価するための高潮偏差および波高の将来変化比を算出することを目的とする．なお，本稿において，とくに断りがない場合には，伊勢湾とは，三河湾と狭義の伊勢湾を合わせた広義の伊勢湾を意味することに注意されたい．

日本沿岸における高潮偏差および波高の将来変化の定量的な評価については，様々な研究の取り組みが行われている．たとえば，有吉ら（2018）および森ら（2021）は，台風の潜在的最大強度の理論に基づき，対象とする気候下における可能最大高潮偏差を推定する手法（森ら，2016）を用いて，将来における日本沿岸の海域毎の高潮偏差について，その将来気候下で当該海域の地形を考慮して発達しうる最大の値を評価した．しかし，日本の港湾施設の設計で用いている高潮偏差は，気候的可能最大高潮偏差ではなく，既往最大高潮偏差等といった値であるため，その評価に参考となる値として，例えば，再現期間に応じた高潮偏差を算出する必要がある．

Shimuraら（2021）は，産業革命以前と比べて2,100年に約4度上昇（放射強制力で8.5W/m^{2}上昇）する将来気候シナリオであるIPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書（2013）にあるRCP8.5シナリオをもとに気象研究所全球大気モデルMRI-AGCM3.2Sを用いた気候予測結果を対象に，日本沿岸における高潮偏差および再現期間50年の波高の将来変化を評価した．しかし，気候変動に関する国際的枠組みであるパリ協定においては，「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて2℃未満に抑え，1.5℃までに抑える努力をする」との目標を掲げ，日本を含め世界各国において温室効果ガスの排出抑制を進める緩和策が取られている．このため，港湾施設の設計に気候変動を考慮する際には，産業革命以降に2度上昇する将来気候を基本とすることが想定される．また，将来予測には，数値計算モデルや計算条件による予測モデル誤差が含まれることが想定されることから，将来予測の範囲も把握する必要がある．

気候変動による台風などの極端気象場の将来変化を予測するためには，十分なイベント数が必要となる．このため，我が国では，積分年数5000年を超える気候変動予測データである「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」（d4PDF．Mizutaら，2017）が開発され，様々な分野で応用されている（石井ら，2022）．d4PDFは，現在気候を表す過去実験，ならびに，将来気候を表す将来実験があるが，将来実験には，2度上昇（+2K）および4度上昇（+4K）の2種類があり，それぞれ，Mizutaら（2014）が多数モデルによるシナリオ実験CMIP5の主要な気候モデルの中からクラスター分析により選定した6つの異なる海面水温パターン（SST）を対象としたケースがあるため，予測モデル誤差の評価も可能である．

岡本ら（2023b）は，d4PDFおよび梅田ら（2019）が構築した確率台風モデルを用いて，将来の潮位偏差および波高を推定した．しかし，確率台風モデルの再現精度や高潮偏差および波高のバイアス補正についての信頼性の確認が十分でない．

以上のことから，本研究では，確率台風モデルではなく，d4PDFをもとにShimuraら（2016）の手法によって台風を抽出し作成したWebbら（2019）により提供された台風トラックデータを直接用いて，将来実験（+2Kおよび+4K）における３大湾における再現期間に応じた高潮偏差および波高の将来変化比について，6つのSST毎に算出することとした．

本研究は，**図−1.1**に示す検討フローのとおり，まず，現在気候および将来気候における台風擾乱の条件等を設定するとともに，解析対象とする台風擾乱を抽出し（第2.4節），台風による気圧場および風場を解析する（第2.1節）．次に，この気圧場および風場の解析結果を用いて，高潮解析（第2.2節）および波浪解析（第2.3節）を実施し，対象とする台風擾乱毎の高潮偏差および波高を算出する．そして，この高潮偏差および波高の算出結果に対して極値統計解析を実施し（第2.5節），高潮偏差の将来変化比（第3章）および波高の将来変化比（第4章）を算定する．

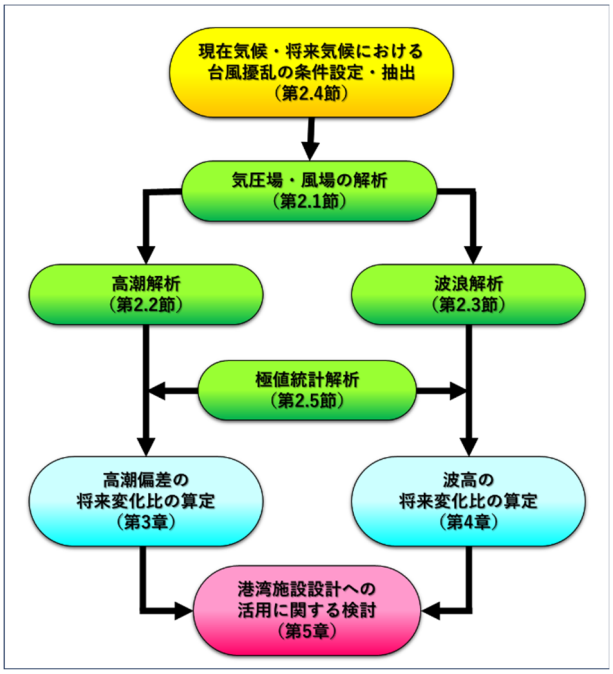


図-1.1　本研究における検討フロー

本稿の構成は，まず，第2章において，本研究に用いた数値解析手法を詳述する．次に，第3章および第4章に，それぞれ高潮偏差および波高に関する算定結果を示す．さらに，第5章の「まとめ」では，実際の港湾施設の設計に気候変動の影響を考慮する際に推奨する値および留意点を示す．

2. 数値解析手法

2.1　気圧場・風場の解析

(1)解析モデル

高潮および波浪を解析するにあたって，それらの入力条件となる台風の気圧場および風場を，経験的台風モデルを用いて算出した．

台風の気圧分布は、Myersの分布を仮定して次式により計算した．

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \tag{2.1}$$

ここに，p は台風の中心から距離 r だけ離れた点の気圧，Δp は気圧深度，r_0 は最大旋衡風速半径である．最大旋衡風速半径は，河合ら（2005）により提案された以下の式を用いて算出した．

$$r_0 = 94.89 \exp\left(\frac{p_c - 967}{61.5}\right) \tag{2.2}$$

海上における風場の計算に当たって，まず自由大気における傾度風速を，台風の移動に伴う移動座標系における力の釣り合いを考慮した以下の式で求めた（藤井ら，1986）．

$$V_{gr} = -\frac{fr - V_T \sin\gamma}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr - V_T \sin\gamma}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p}{\rho_a}\right)\cdot\left(\frac{r_0}{r}\right)\cdot \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \tag{2.3}$$

ここに，V_{gr} は台風の移動の効果を取り込んだ傾度風速，f はコリオリ係数（$= 2\omega \sin\theta$，ω：地球自転の角速度=7.29×10-5 rad/s，θ：緯度），V_T は台風の移動速度，γ は台風の進行方向と等圧線の曲率半径 r の時計回りの角度，ρ_a は大気の密度である．傾度風速から海上風速への補正は，以下の式を用いて行った．

$$V_1 = C_1 V_{gr} \tag{2.4}$$

ここに，V_1 は海上風速，C_1 は傾度風速から海上風速への補正係数である．本研究における C_1 の設定値を**表-2.1**に示す．また，風向は，傾度風の風向から台風中心に

表-2.1 高潮解析・波浪解析における C_1 の設定値

対象湾	高潮解析	波浪解析
東京湾	0.70	0.70
伊勢湾	0.70	0.70
大阪湾	0.70	0.70

向かって30°偏向するものとした．

(2)風場の補正

経験的台風モデルは，風速および風向の分布に対して地形の影響が考慮されないモデルである．本研究では，風場に対する地形の影響を考慮するため，井手ら（2017b）の検討を参考に，風速別・風向別に算出した補正係数から逆距離荷重法により海上風の補正を行った．なお，海上風の補正については，風速および風向の分布に対する地形の影響は現在と比較して将来も変化しないものと考え，第2.4節において詳述する現在気候および将来気候を表す，それぞれ過去実験および将来実験の両方に対して同様に補正を実施した．

補正方法は，まず検証のための既往台風を３大湾の海域毎に抽出し，それぞれの台風について，経験的台風モデルによる風場と，地形の影響が考慮されている局地数値予報モデルGPVであるDSJRA-55（1958年～2012年）およびLFM（2014年～2021年）の風場を比較検証することによって実施する．なお，抽出した既往台風は，東京湾で153擾乱，伊勢湾で138擾乱，大阪湾で153擾乱である．

次に，経験的台風モデルとGPVの風速および風向について，地点（風場推算の際の計算格子）毎に風速ランク別・風向別に比較することで，それぞれの風速ランク別・風向別の平面的な補正値を算出する．本研究では，風速の補正係数として相関解析による回帰係数を採用し，風向の補正値として風向差の平均値を採用した．なお，風速ランクは，6ランク（0-4m/s, 4-8m/s, 8-12m/s、10-12m/s, 12-16m/s，16m/s以上）とした．

風速・風向の平面的な風速・風向の比較結果の一例を，**図-2.1～図-2.3**に示す．経験的台風モデルから直接算出される風速・風向（補正なし）は，地形の影響による複雑な変化を示すことがなく，単調な分布となっていることが分かる．一方，経験的台風モデルによる結果を井手ら（2017b）を参考に補正した風速・風向（補正あり）は，単調な分布となっている「補正なし」の結果と比較して，GPVの結果に似た分布となっている．

最大風速発生時の風速・風向について，「補正あり」の結果とGPVとの比較結果を，**図-2.4～図-2.6**に示す．最大風速については，羽田では過大傾向となり，セントレアおよび関空島では過少傾向となっている．しかし，次節以降に示すように，高潮偏差および波高について，解析結果を補正することから，さらなる風速の補正を行わないこととした．風向については，いずれの地点においても，多くの擾乱で，風向差が45°以下に収まっている．

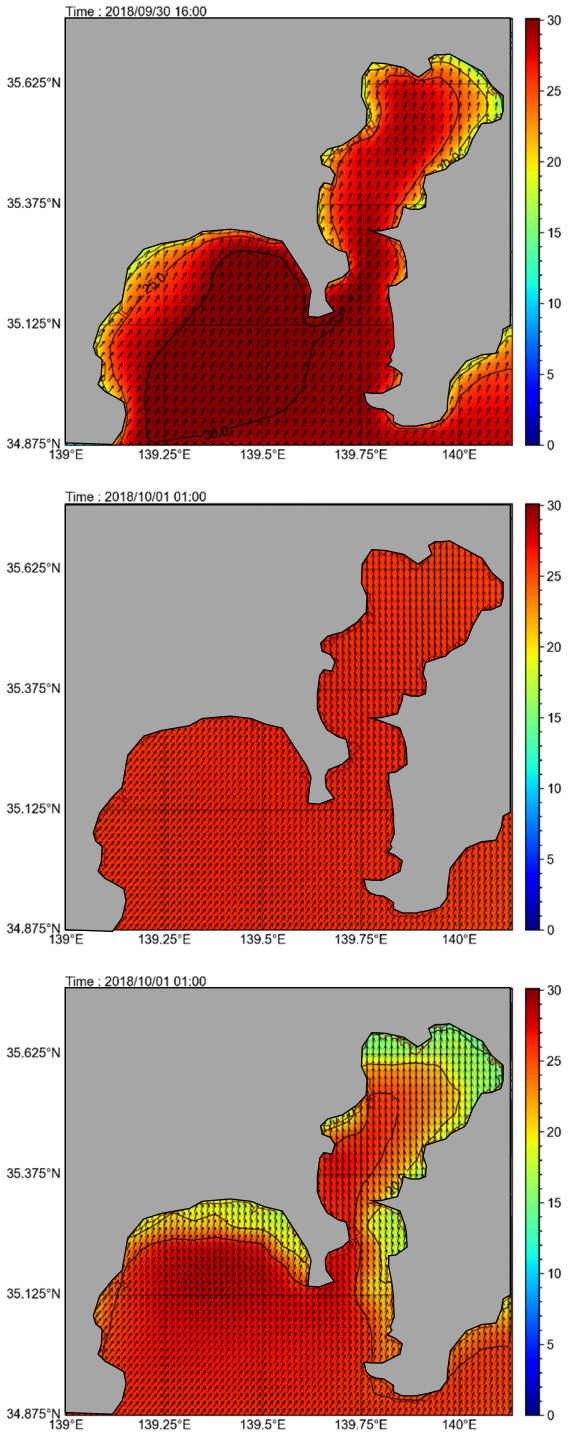


図-2.1 平面的な風場の補正結果の一例（東京湾）
（上段：GPV，中段：補正なし，下段：補正あり）

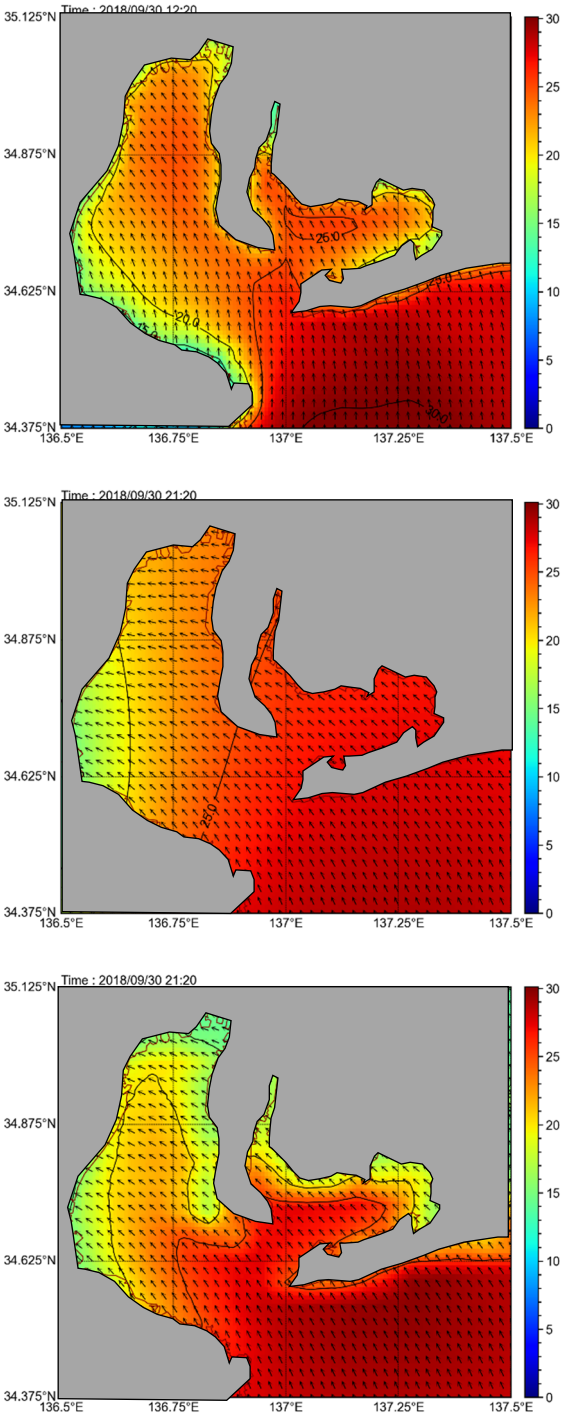


図-2.2　平面的な風場の補正結果の一例（伊勢湾）
（上段：GPV，中段：補正なし，下段：補正あり）

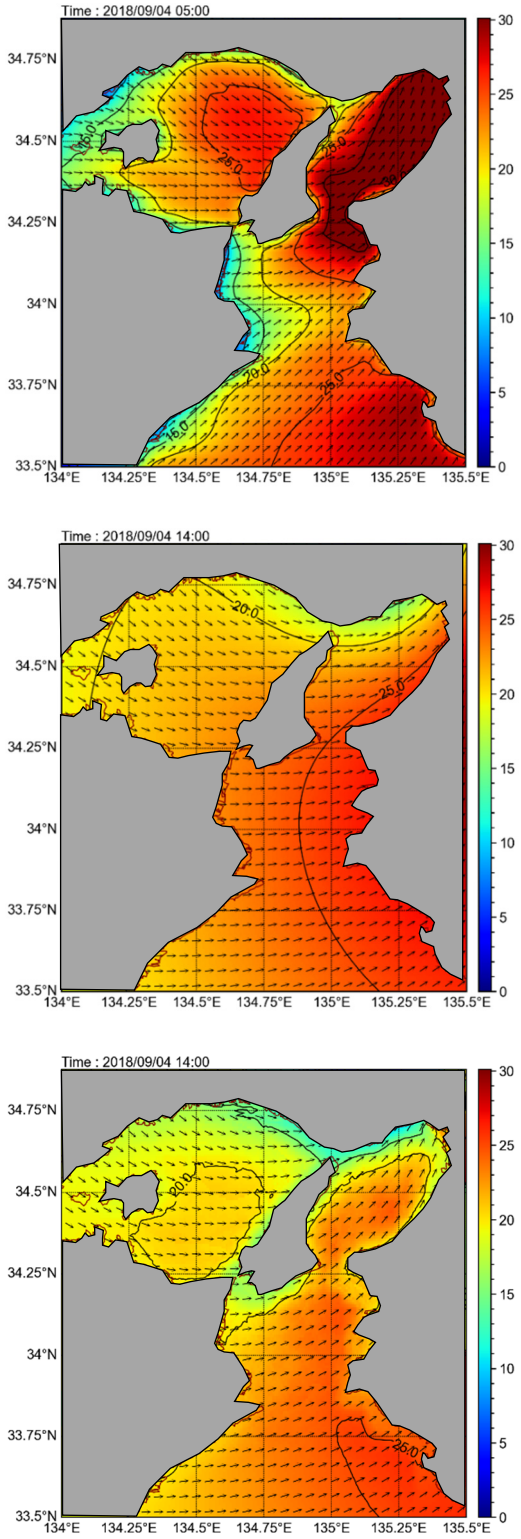


図-2.3　平面的な風場の補正結果の一例（大阪湾）
（上段：GPV，中段：補正なし，下段：補正あり）

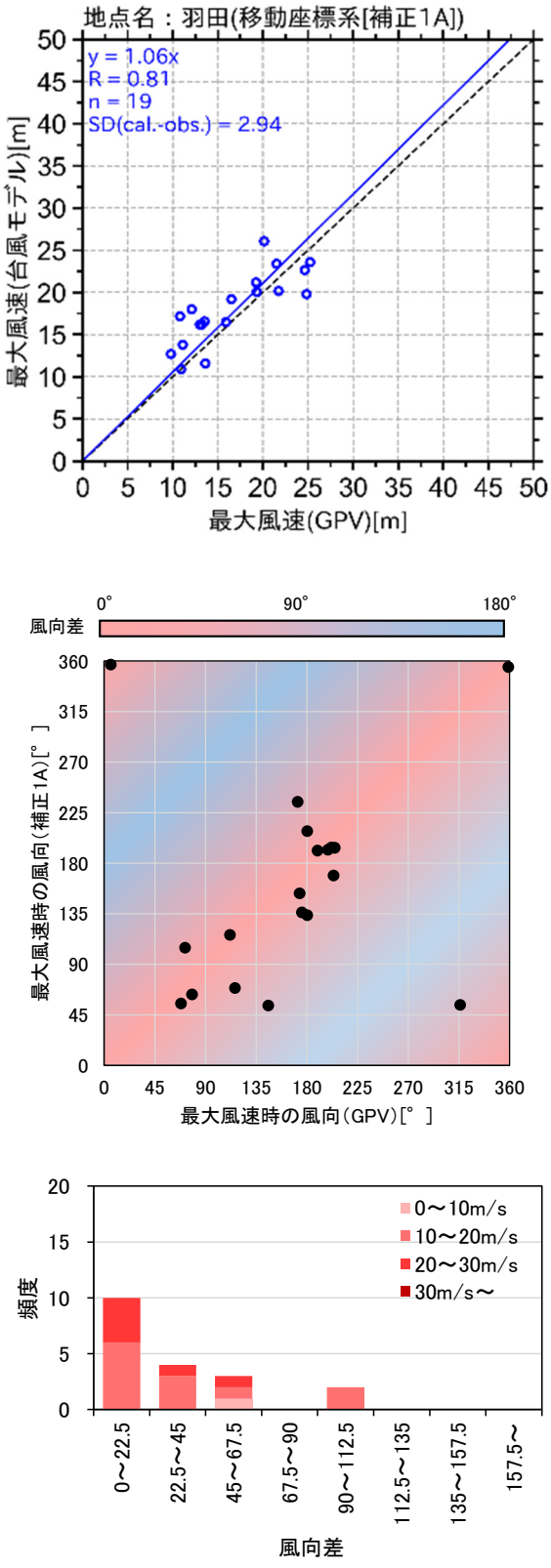


図-2.4　最大風速発生時の風速・風向の補正結果（羽田）

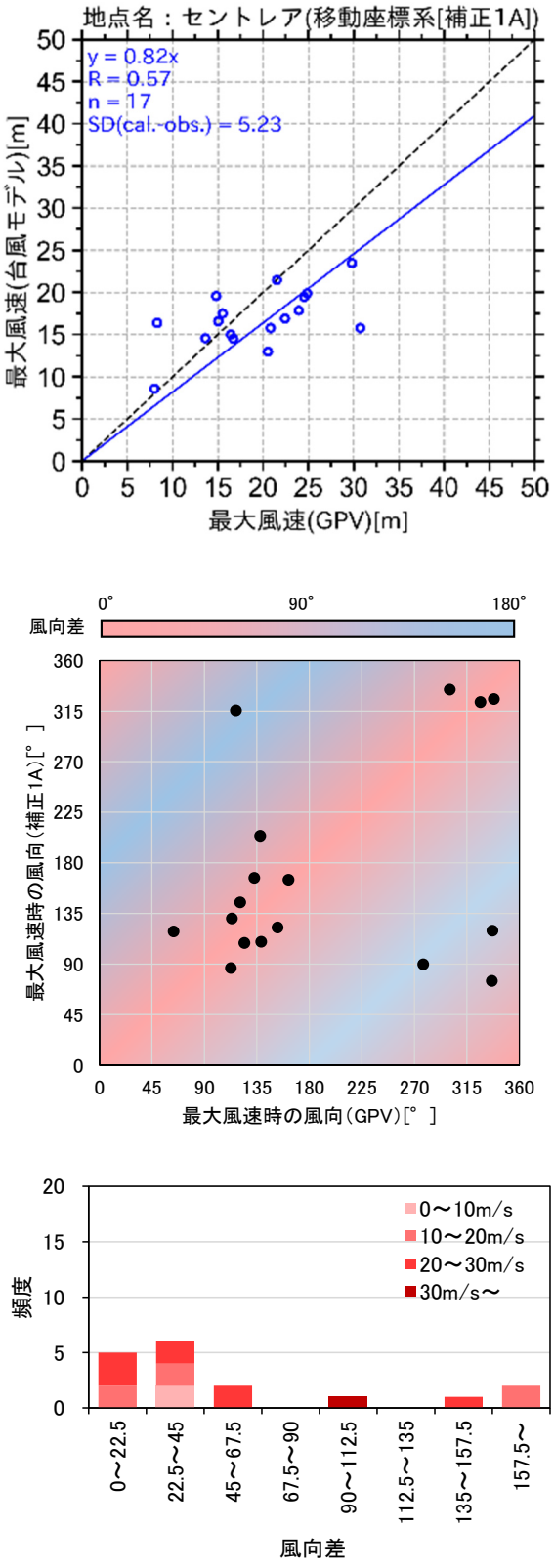
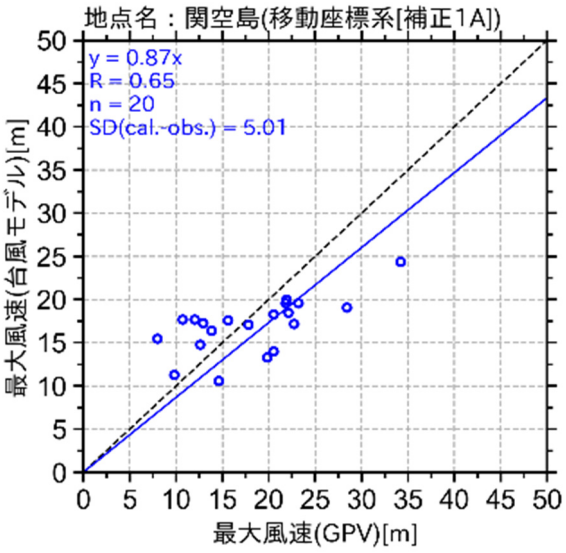
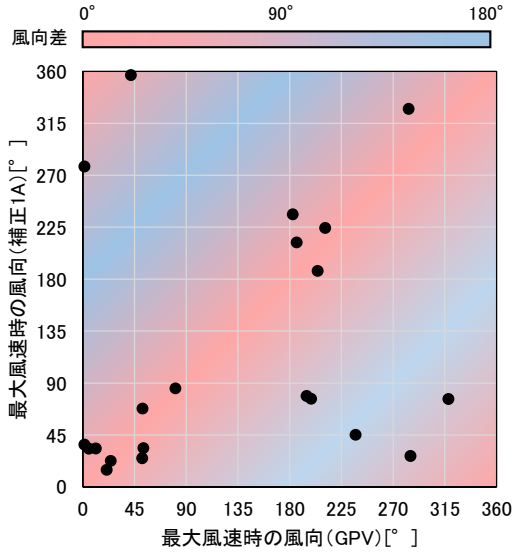


図-2.5　最大風速発生時の風速・風向の補正結果（セントレア）





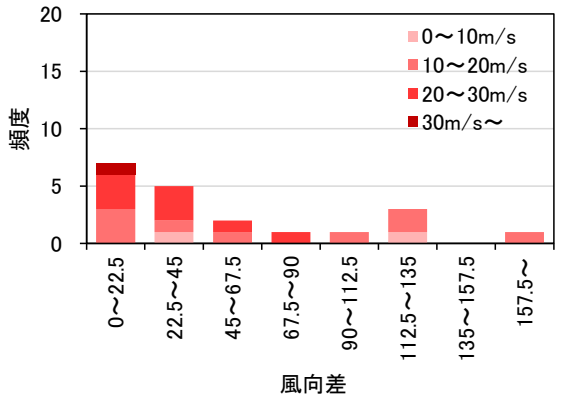


図-2.6　最大風速発生時の風速・風向の補正結果（関空島）

2.2　高潮解析

(1)解析方法

2.1節で算出した気圧場および風場を入力条件として高潮解析を実施する．なお，本研究では，非常に多くの台風ケースを対象とすることから，解析コストの低減を図るため，高潮解析と波浪解析を独立して実施するものとした．そのため，砕波に伴うWave-Setupを考慮していない．

高潮解析には，単層の線形長波方程式に基づく数値計算モデルを使用した．基礎方程式を以下に示す．

$$\frac{d\eta}{dt}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t}=fN-gD\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{D}{\rho_w}\frac{\partial p_0}{\partial x}+\frac{\tau_{sx}-\tau_{bx}}{\rho_w}+A_h\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right) \tag{2.6}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}=-fM-gD\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{D}{\rho_w}\frac{\partial p_0}{\partial y}+\frac{\tau_{sy}-\tau_{by}}{\rho_w}+A_h\left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right) \tag{2.7}$$

ここに，t は時刻，M および N は，それぞれx および y 方向の流量フラックス，g は重力加速度，D は全水深（=静水深 h + 高潮偏差 η），ρ_w は海水の密度，p_0 は海面気圧，A_h は水平渦動粘性係数である．また，τ_{sx} および τ_{sy} は，それぞれ，x および y 方向の海面せん断応力，τ_{bx} および τ_{by} は，それぞれ，x および y 方向の底面せん断応力であり，以下のように与えられる．

$$\tau_{sx}=\rho_a C_D W_x\sqrt{{W_x}^2+{W_y}^2} \tag{2.8}$$

$$\tau_{sy}=\rho_a C_D W_y\sqrt{{W_x}^2+{W_y}^2} \tag{2.9}$$

$$\tau_{bx}=\frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}}M\sqrt{M^2+N^2} \tag{2.10}$$

$$\tau_{by}=\frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}}N\sqrt{M^2+N^2} \tag{2.11}$$

ここに，W_x および W_y は，それぞれ，海上風速 W の x および y 方向成分，n はマニングの粗度係数である．C_D は海面抵抗係数であり，本多・光易（1980）による式を用いた．

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024W)/10^3 & : \quad (W < 8) \\ (0.581 + 0.063W)/10^3 & : \quad (W \geq 8) \end{cases} \qquad (2.12)$$

高潮解析では，直交座標系を適用し，格子間隔比1/3もしくは1/2で解析領域のネスティングを行った．高潮解析における解析条件を**表-2.2**に示すとともに，各湾の解析領域を**図-2.7**～**図-2.9**に示す．

(2) 高潮偏差の補正

高潮解析において，本研究で用いる解析モデルおよび解析条件には，モデルバイアスが含まれることが想定される．そのため，既往の擾乱を対象に，2.1節で算出した気圧場および風場を用いて高潮解析を実施し，その解析値と観測値を比較することにより，そのバイアスを把握するとともに，高潮偏差の解析値を補正するために乗じる補正係数について平面的に算出する．**図-2.10**～**図-2.12**に示すように，この平面的な補正値の算出イメージは，観測地点における解析値と観測値から得られる回帰係数を用いて，その逆数を当該観測地点での補正係数として設定し，それらの補正係数から平面的に線形に補間して設定する．なお，この高潮偏差の解析値の補正については，高潮解析に用いる解析モデル等によるモデルバイアスを想定していることから現在と比較して将来も変化しないものと考え，第2.4節において詳述する現在気候および将来気候を表す，それぞれ過去実験および将来実験の両方に対して同様に補正を実施した．

平面的な補正係数を算出するための各地点における高潮偏差の相関図を，**図-2.13**～**図-2.20**に示す．なお，三河については，**図-2.16**に示すとおり，台風0918号において，観測値が約2.6mに対して，解析値が約0.7mと非常に大きな差があり，これを含めると，相関係数0.49および回帰係数0.52となる．そこで，本研究では非常に多くの台風を対象にすること踏まえると，この台風0918号の特異な値を用いることで過剰な補正となる可能性があることから，補正係数を求めるための回帰係数は，この台風0918号を除いて算出することとした（**図-2.17**）．

これらの回帰係数の逆数を用いて，**図-2.10**～**図-2.12**に示す各地点での補正係数として設定し，海域内を線形補間することで平面的に補正係数を設定した結果を，**図-2.21**～**図-2.23**に示す．なお，伊勢湾については，狭義の伊勢湾と三河湾と２つの海域を有することから，**図-2.24**および**図-2.25**に示すように，それぞれの海域に対して算出し，海域内の任意の地点において補正係数が低い方を採用し，**図-2.22**のように設定した．

回帰係数の逆数として補正係数を乗じて解析値を補正しても，十分な相関係数でない場合には，解析対象の台風毎の個別の補正後の解析値の精度は低くなる．しかし，第2.4(4)項にて詳述するように，対象とする期間が非常に長く抽出する解析対象の台風のサンプル数が十分であるため，個別の解析値の精度が低くても，サンプル全体における補正後の解析値の集合の再現性が確保できると期待されることから，極値統計（第2.5節）による結果の信頼性は確保されるものと考えられる．

表-2.2　計算条件（高潮推算）

項　目	設定値
計算格子幅	32400 m，16200 m，5400 m，1800 m，600 m，200 m
計算時間間隔	3.0 s
沖側境界条件	他領域と水位・流量を結合 ※領域 1 のみ自由透過
陸側境界条件	完全反射
海底摩擦係数 n	0.025
海水密度 ρ_w	1026 kg/m^3
大気密度 ρ_a	1.22 kg/m^3

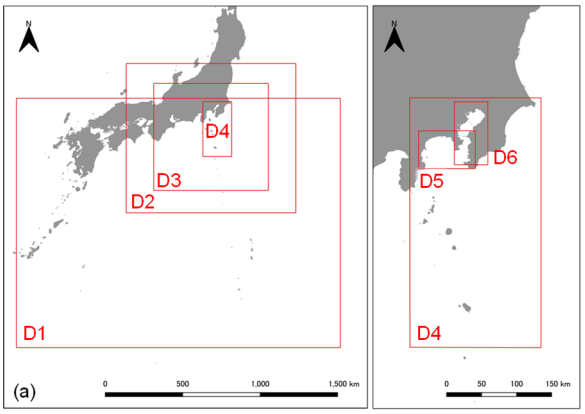


図-2.7　高潮解析における解析領域（東京湾）

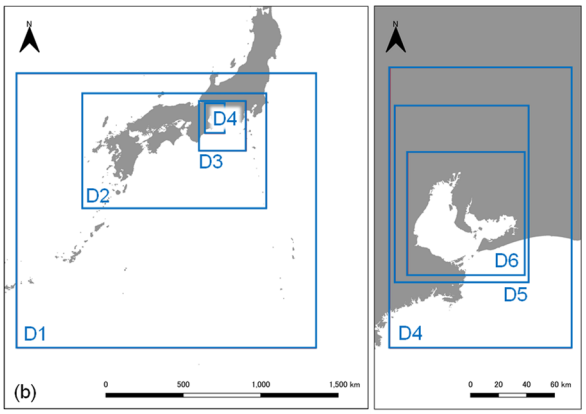


図-2.8　高潮解析における解析領域（伊勢湾）

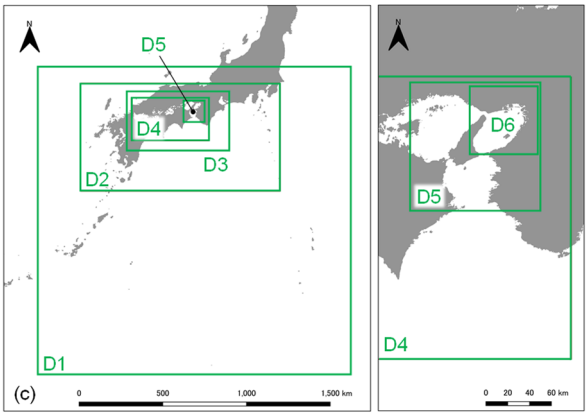


図-2.9　高潮解析における解析領域（大阪湾）

図-2.10　高潮偏差の補正係数の設定イメージ
（東京湾）

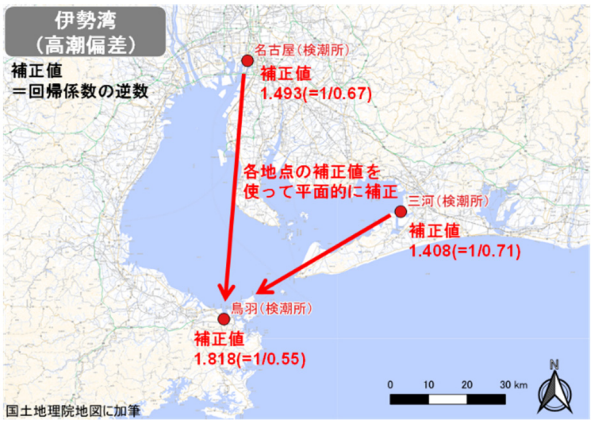


図-2.11　高潮偏差の補正係数の設定イメージ
（伊勢湾）

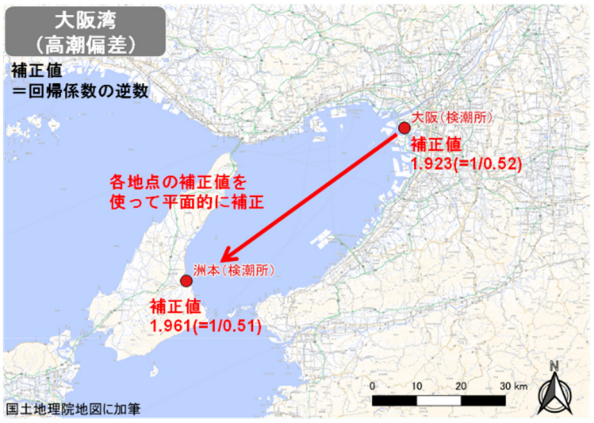


図-2.12　高潮偏差の補正係数の設定イメージ
（大阪湾）

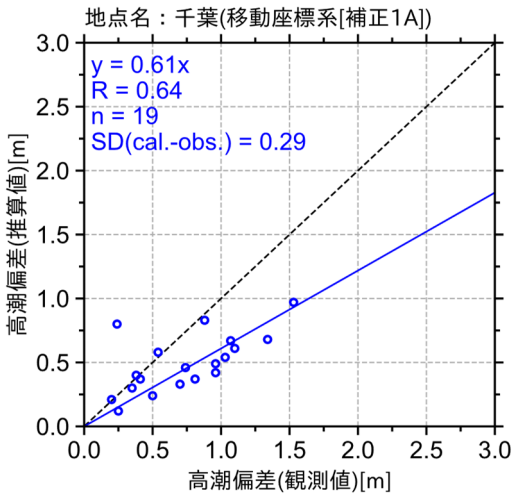


図-2.13　高潮偏差の相関図（東京湾：千葉灯標）

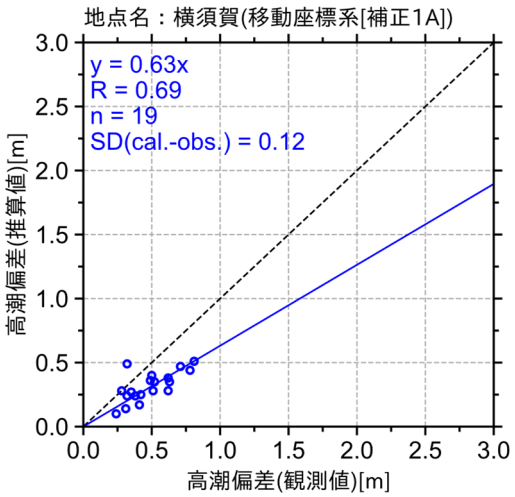


図-2.14　高潮偏差の相関図（東京湾：横須賀）

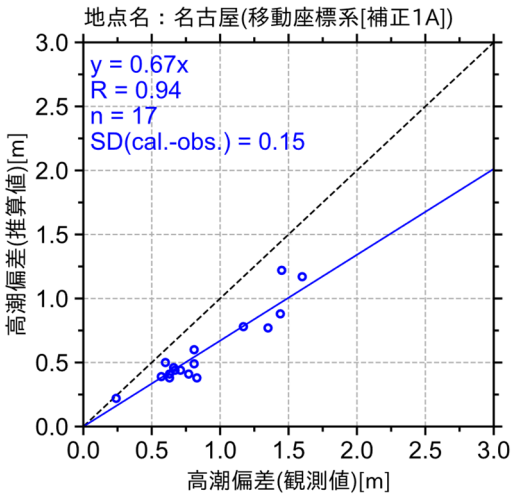


図-2.15　高潮偏差の相関図（伊勢湾：名古屋）

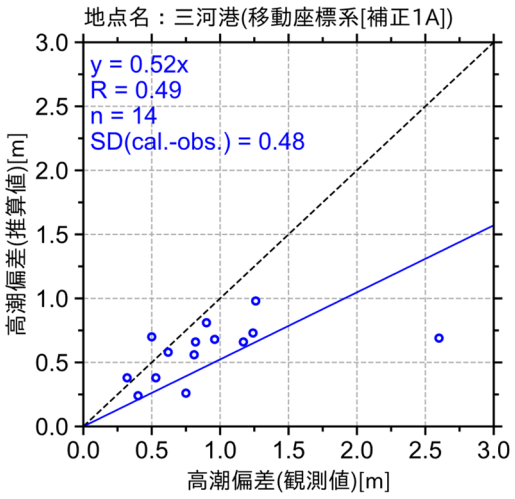


図-2.16　高潮偏差の相関図（伊勢湾：三河）

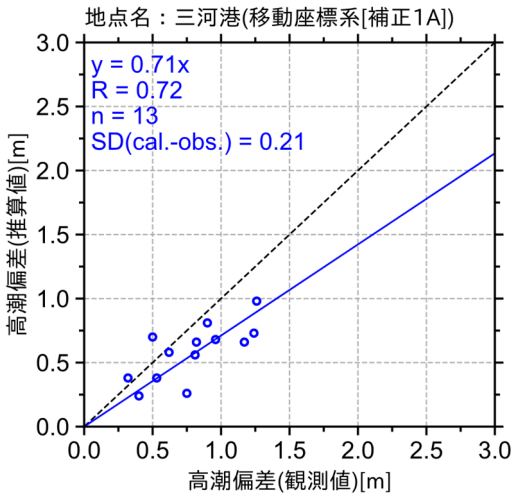


図-2.17　高潮偏差の相関図（伊勢湾：三河）
（台風 0918 号を除く）

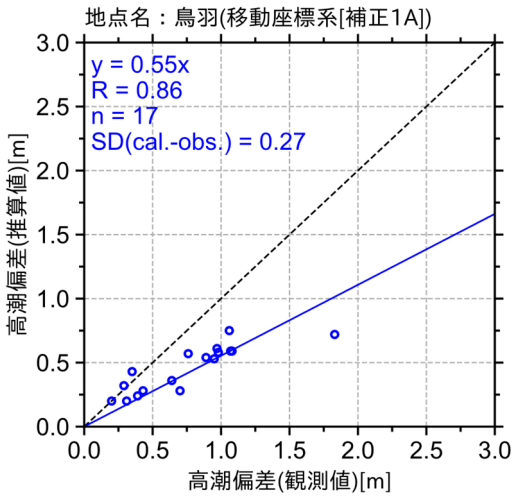


図-2.18　高潮偏差の相関図（伊勢湾：鳥羽）

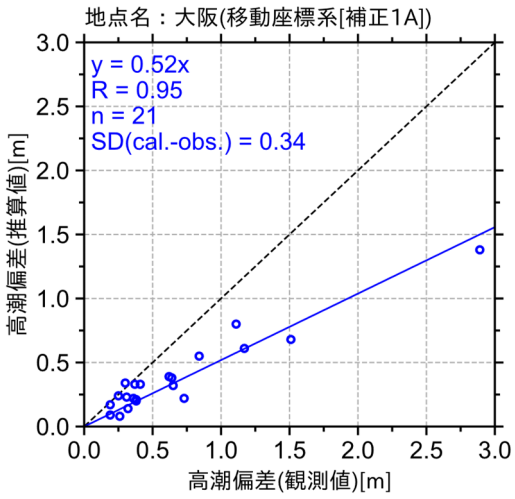


図-2.19　高潮偏差の相関図（大阪湾：大阪）

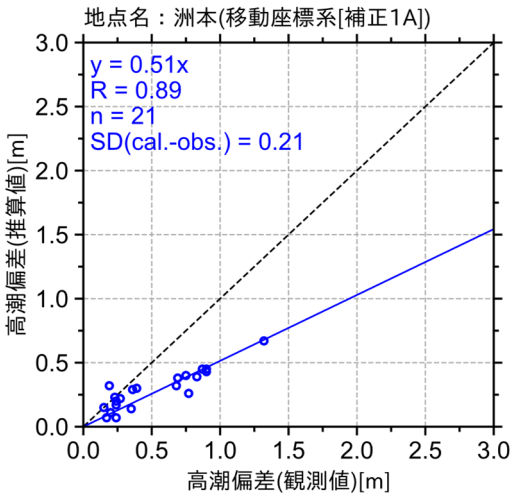


図-2.20　高潮偏差の相関図（大阪湾：洲本）

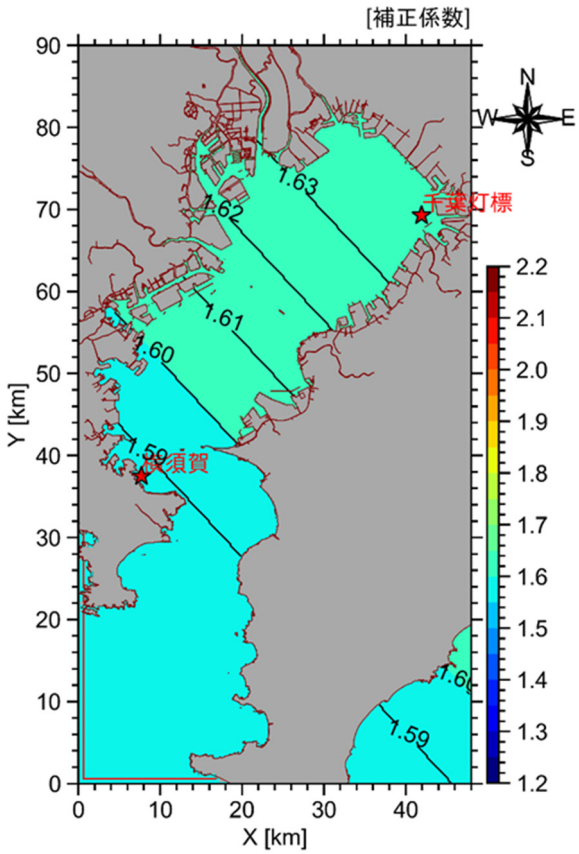


図-2.21　高潮偏差の補正係数の設定結果
（東京湾）

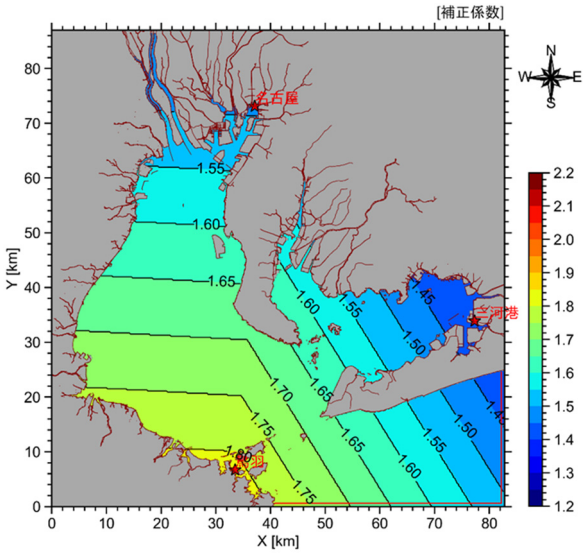


図-2.22　高潮偏差の補正係数の設定結果
（伊勢湾）

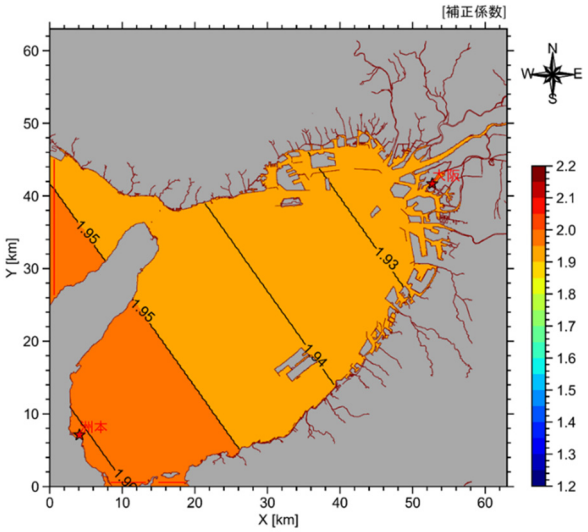


図-2.23　高潮偏差の補正係数の設定結果
（大阪湾）

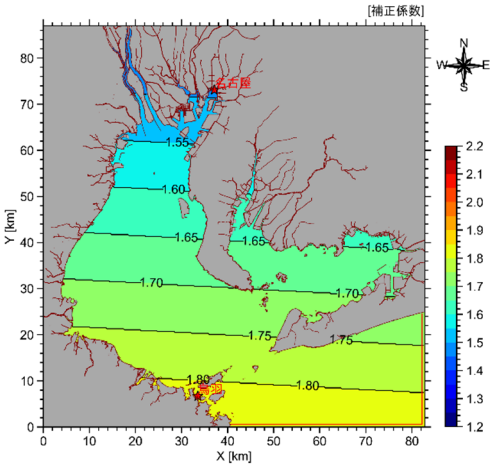


図-2.24　高潮偏差の補正係数の一時算定結果
（伊勢湾：名古屋～鳥羽）

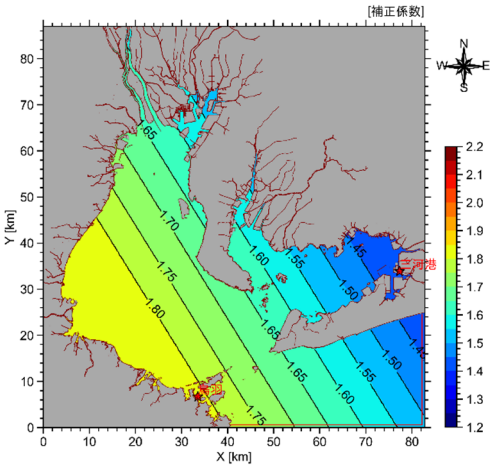


図-2.25　高潮偏差の補正係数の一時算定結果
（伊勢湾：三河～鳥羽）

表-2.3　計算条件（波浪解析）

項　目	設定値
計算格子幅	1/2°，1/8°，1/64° （東京湾，伊勢湾） 1/2°，1/8°，1/32°，1/64° （大阪湾）
計算時間間隔	60～720 s
方向分割数	36 ($\Delta\theta$ =10°)
周波数分割数	35 (0.042～1.11Hz)
エネルギー輸送と消散項	ST3

2.3　波浪解析

(1)解析方法

2.1節で算出した気圧場および風場を入力条件として波浪解析を実施する．

波浪解析には，第3世代波浪モデルWAVEWATCⅢ ver.5.16（ST4パッケージ）を用いた（以下，WW3）（WW3DG, 2019）．WW3では，球面座標系で波作用量平衡方程式を解くことによって，海面上の波の発生，発達および散逸を計算する．

$$\frac{\partial N_w}{\partial t}+\frac{1}{\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}\dot{\varphi}N_w\cos\theta+\frac{\partial}{\partial\lambda}\dot{\lambda}N_w+\frac{\partial}{\partial k}\dot{k}N_w+\frac{\partial}{\partial\theta}\dot{\theta}_g N_w=\frac{S}{\sigma} \tag{2.13}$$

ここに，N_w は波作用量，k は波数，θ は波向，φ は緯度，λ は経度，σ は相対角周波数，S はソース項である．

波浪解析では，緯度経度座標の球面座標系を適用し，格子間隔比1/8もしくは1/4で計算領域のネスティングを行った．波浪解析における計算条件を**表-2.3**に示すとともに，各湾の解析領域を**図-2.26**に示す．

(2)波高の補正

波浪解析においても，本研究で用いる解析モデルおよび解析条件には，モデルバイアスが含まれることが想定されるため，前述の高潮偏差の補正と同様に，補正係数を平面的に設定した．ただし，伊勢湾については，湾内に波浪観測地点が１か所しかないため，湾外の沖合の観測地点を用いている．

図-2.27～**図-2.29**に示すように，波高の平面的な補正値の算出イメージは，観測地点における解析値と観測値から得られる回帰係数を用いて，その逆数を当該観測地点での補正係数として設定し，それらの補正係数から平面的に線形に補間して設定する．なお，この波高の解析値の補正については，波浪解析に用いる解析モデル等によるモデルバイアスを想定しているため現在と比較して将来も変化しないものと考え，第2.4節において詳述する現在気候および将来気候を表す，それぞれ過去実験および将来実験の両方に対して同様に補正を実施した．

平面的な補正係数を算出するための各地点における波高の相関図を，**図-2.30**～**図-2.35**に示すとともに，これらの回帰係数の逆数を用いて，**図-2.27**～**図-2.29**に示す各地点での補正係数として設定し，海域内を線形補間することで平面的に補正係数を設定した結果を，**図-2.36**～**図-2.38**に示す．

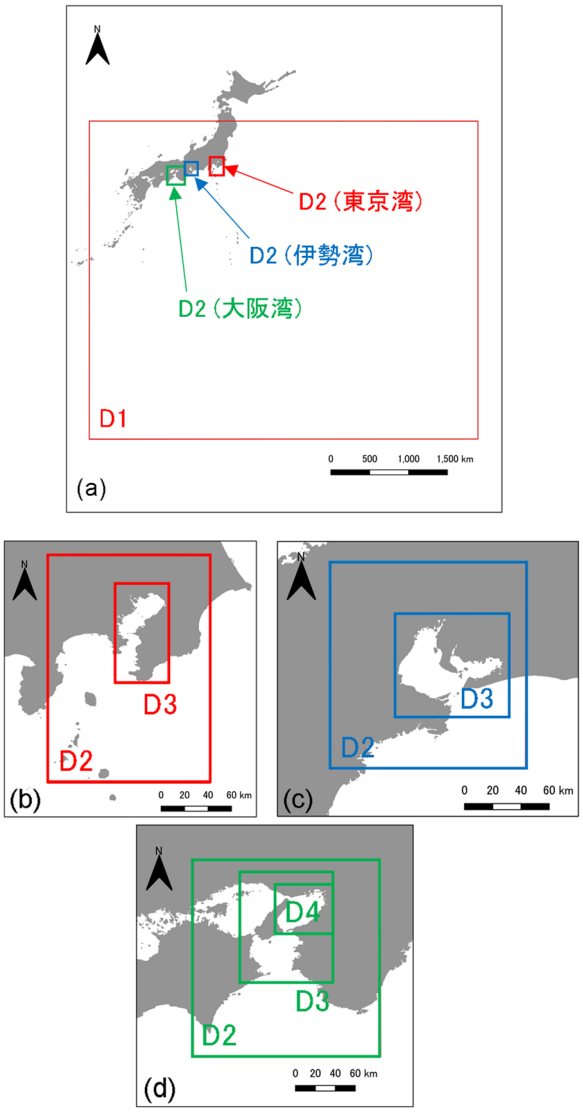


図-2.26　波浪解析における解析領域
（a）広域，（b）東京湾，（c）伊勢湾，（d）大阪湾

回帰係数の逆数として補正係数を乗じて解析値を補正しても，十分な相関係数でない場合には，解析対象の台風毎の個別の補正後の解析値の精度は低くなる．しかし，第2.4(4)項にて詳述するように，対象とする期間が非常に長く抽出する解析対象の台風のサンプル数が十分であるため，個別の解析値の精度が低くても，サンプル全体における補正後の解析値の集合の再現性が確保できると期待されることから，極値統計（第2.5節）による結果の信頼性は確保されるものと考えられる．

図-2.27　波高の補正係数の設定イメージ
（東京湾）

図-2.28　波高の補正係数の設定イメージ
（伊勢湾）

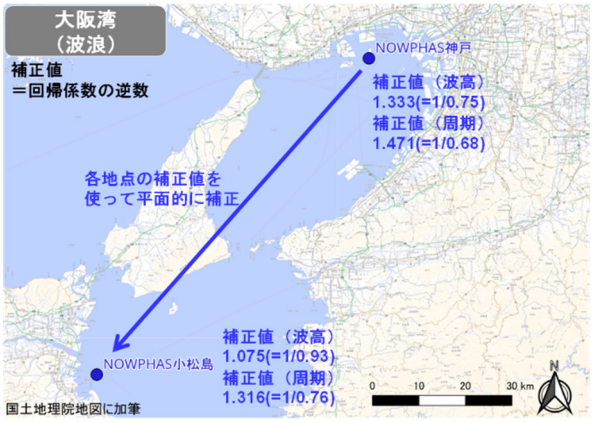


図-2.29　波高の補正係数の設定イメージ
（大阪湾）

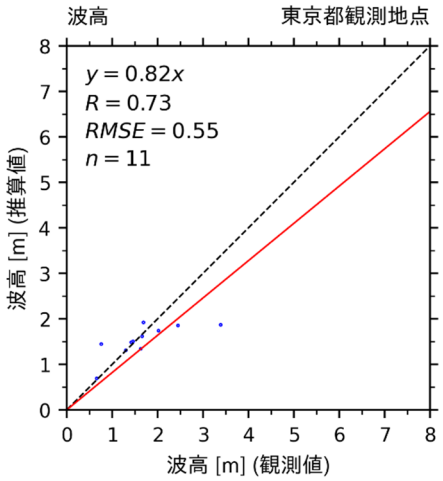


図-2.30　波高の相関図（東京湾：東京都波浪観測所）

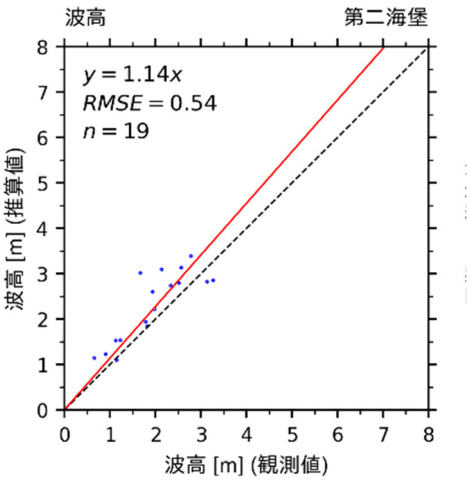


図-2.31　波高の相関図（東京湾：第二海堡）

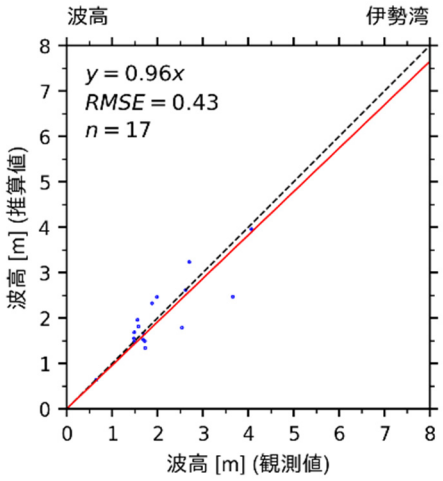


図-2.32　波高の相関図（伊勢湾：伊勢湾）

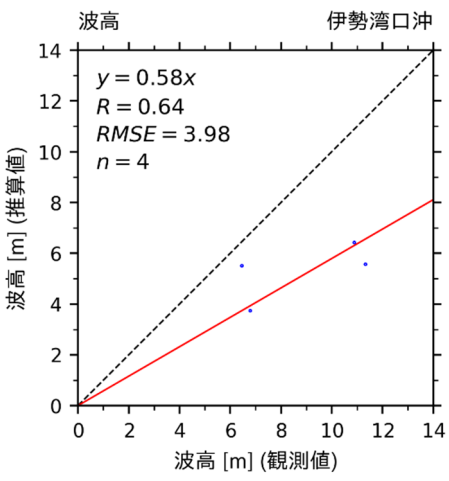


図-2.33　波高の相関図（伊勢湾：伊勢湾口沖）

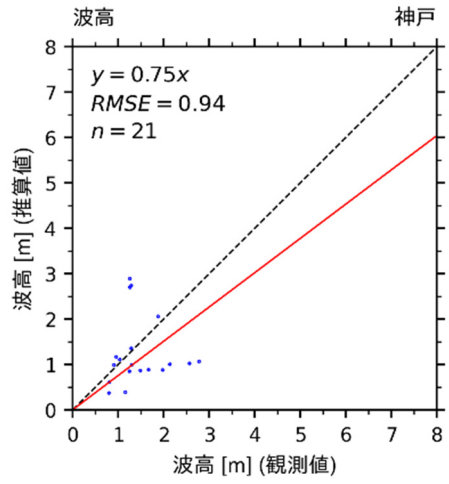


図-2.34　波高の相関図（大阪湾：神戸）

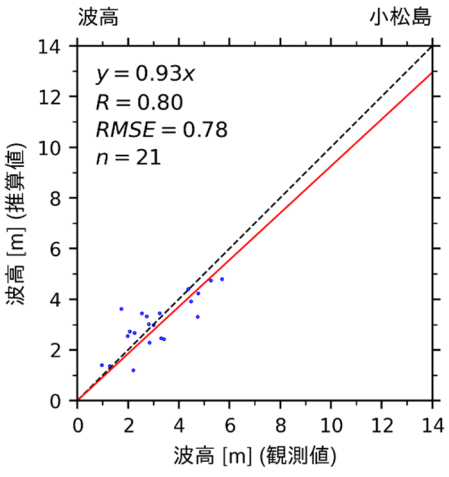


図-2.35　波高の相関図（大阪湾：小松島）

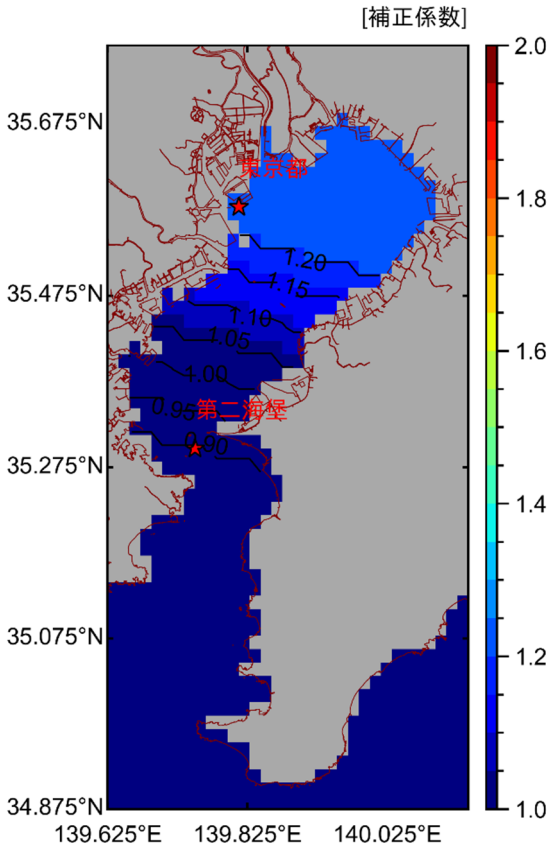


図-2.36　波高の補正係数の設定結果
（東京湾）

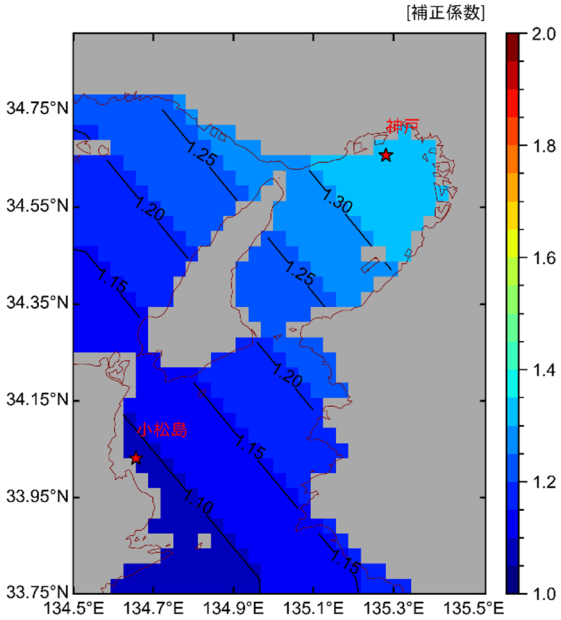


図-2.38　波高の補正係数の設定結果
（大阪湾）

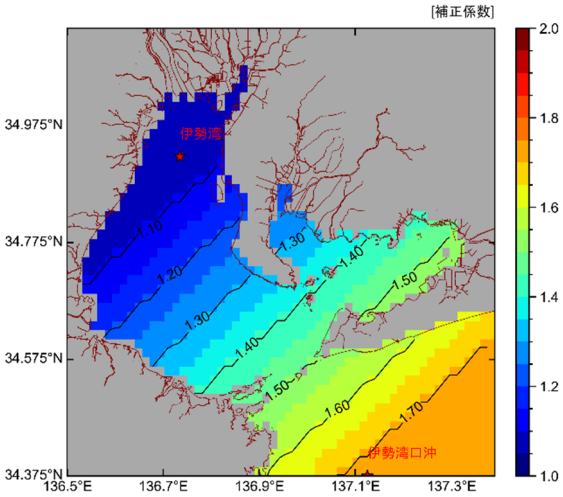


図-2.37　波高の補正係数の設定結果
（伊勢湾）

2.4 現在気候および将来気候の台風データ

本研究では，Webbら（2019）により提供された台風トラックデータを基本とした．この基本とする台風トラックデータについて，台風の中心気圧をバイアス補正し，対象湾毎に影響を与える台風を抽出する．その後，抽出した台風を用いて，対象湾毎に経験的台風モデルを用いて高潮解析および波浪解析を実施する．なお，台風の通過頻度のバイアス補正については，後述の第2.5節にて詳述する．

(1)使用する台風トラックデータの概要

本検討で用いた台風トラックデータ（Webbら，2019）は，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（d4PDF．Mizutaら（2017)）をもとに，Shimuraら（2016）の手法によって台風を抽出し作成したものである．

本検討で用いるd4PDFには，現在までの気候下における数値計算結果である過去実験と，将来気候下における数値計算結果である将来実験がある．また，将来実験には，全球の平均気温が産業革命以降に2度上昇した「2度上昇実験」(以降，図中等で「+2K」や「2K」と表記する）や4度上昇した「4度上昇実験」（以降，図中等で「+4K」や「4K」と表記する）等がある．また，これらの将来実験には，それぞれ，**表-2.4**に示す6種類の異なる海面水温（SST）の将来変化の空間パターンが用意されている．なお，これらは，IPCCの第5次報告書に貢献した代表的なプロジェクトのCMIP5に参加したものである．

さらに，d4PDFは，極端現象の検討に用いることができるように多数のアンサンブル実験を行ったものである．**表-2.5**に示すように，過去実験では，異なる初期値と摂動を与えた100メンバが含まれている．また，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）では，それぞれ，前述の6種類のSST毎に，異なる摂動を9メンバおよび15メンバを与えたものが含まれている．将来実験（+4K）は，IPCC第5次報告書のRCP8.5シナリオの2,090年時点の温室効果ガス濃度等の外部強制因子を与えたものであり，将来実験（+2K）は，RCP2.6シナリオの2,090年時点ではなく，RCP8.5シナリオの2,040年時点の外部強制因子を与えたものである（文部科学省ほか, 2022）．これは，RCP2.6シナリオでは，2,040年時点まではRCP8.5シナリオと同様の温暖化の状況であり，その後の温暖化の状況は概ね変化しないためである．そのため，将来実験（+2K）における本研究の結果は，2,040年時点と想定され，その後は概ね変化しないものと考えられる．

なお，本研究では，解析コスト低減を図るため，現在気候の解析に相当するd4PDF過去実験について，100メンバから17メンバ（=1,020年分）を選定することとした．

表-2.4 d4PDF 将来実験に用いられている SST モデル

CMIP5 モデル	実験名略称	機関名（国名）
CCSM4	CC	National Center for Atmospheric Research（米国）
GFDL-CM3	GF	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory（米国）
HadGEM2-AO	HA	Met Office Hadley Centre（英国）
MIROC5	MI	東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋研究開発機構（日本）
MPI-ESM-MR	MP	Max Planck Institute for Meteorology（独国）
MRI-CGCM3	MR	気象庁気象研究所（日本）

表-2.5 d4PDF の実験概要

実験	期間およびアンサンブル数
過去実験	1951～2010 年（1 メンバ 60 年間） ×100 メンバ
将来実験 （+2K）	2031～2091 年（1 メンバ 61 年間） ×6SST×9 メンバ
将来実験 （+4K）	2051～2110 年（1 メンバ 60 年間） ×6SST×15 メンバ

これらd4PDFの過去実験および将来実験は数値実験であるため，数値計算に用いたモデル等による誤差といったモデルバイアスが含まれていることが指摘されている．そのため，本検討で用いる1951年から2010年の60年間を対象とした全100アンサンブルメンバによるd4PDFの過去実験の台風トラックデータについて，台風の実績データと比較することにより，中心気圧および通過頻度のバイアスを把握するとともに，それらのバイアスを補正する必要がある．

気象庁が公表している台風のベストトラックデータ（1951年～2021年）と，本検討で用いるd4PDF過去実験の台風トラックデータについて，年平均通過個数，台風の中心気圧の平均値，および，10年毎に算出した台風の中心気圧の最低値の平均値を比較したものを，それぞれ，**図-2.39～図-2.41**に示す．

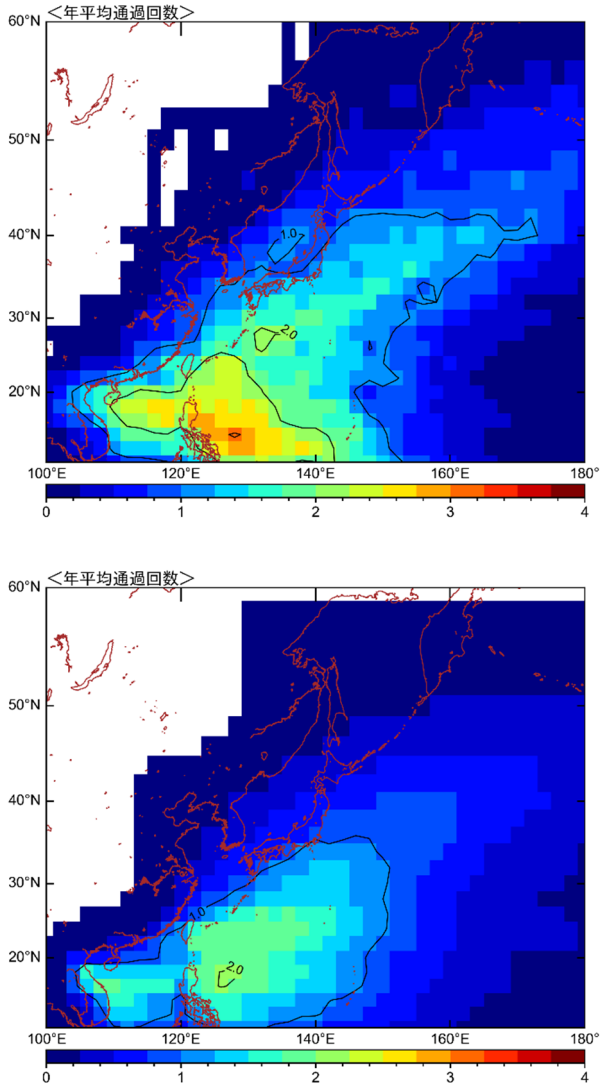


図-2.39 台風中心の年平均通過個数（上段：気象庁ベストトラック，下段：d4PDF 過去実験）

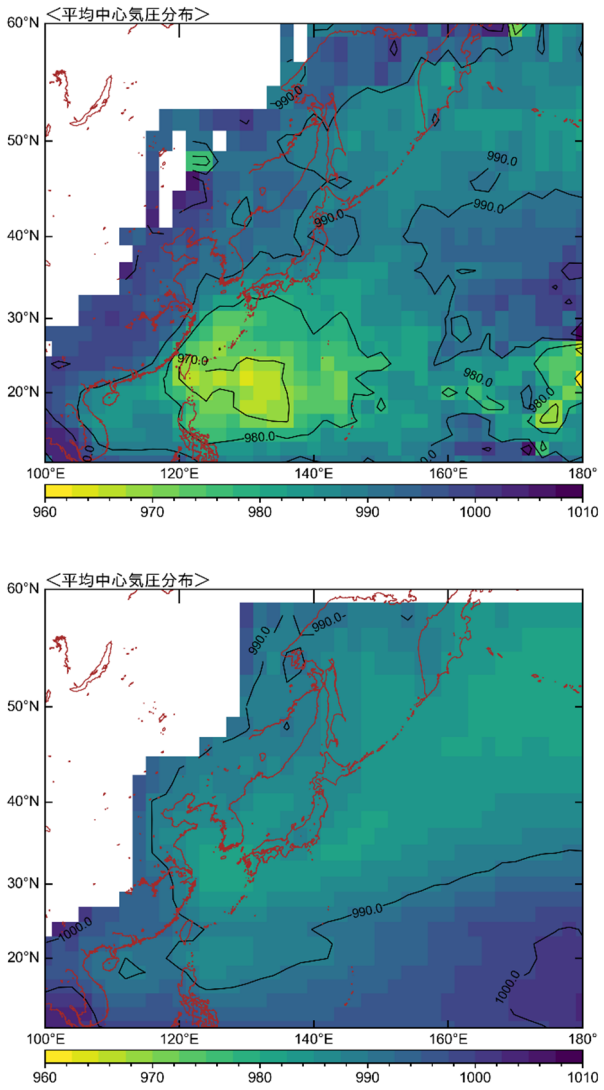


図-2.40 台風の中心気圧の平均値（上段：気象庁ベストトラック，下段：d4PDF 過去実験）

台風の通過頻度（年平均通過個数）について，台風の発生域である低緯度帯において，d4PDFの過去実験は台風の実績である気象庁ベストトラックよりも小さい結果となっている．また，本検討の対象である日本沿岸における台風の通過頻度についても，d4PDFの過去実験は，台風の実績よりも小さい結果となっている．この台風の通過頻度は，高潮偏差および波高の再現確率の評価に影響するものである．そのため，d4PDFの台風トラックデータを用いる場合は，この台風の通過頻度が小さいといったバイアスを補正する必要がある．なお，台風の通過頻度のバイアス補正については，後述の第2.5節にて詳述する．

次に，通過する台風中心の気圧の平均値についても，また，通過する台風中心の10年毎の最低値に対する平均値についても，台風の発生域のみならず，日本の関東から九州にかけての太平洋沿岸の近傍においても，d4PDFの過去実験は，台風の実績よりも気圧値が大きく，勢力が弱い結果となっている．そのため，d4PDFの台風トラックデータを用いる場合は，この台風の中心気圧が大きいといったバイアスを補正する必要がある．この台風の中心気圧のバイアス補正については，次項において詳述する．

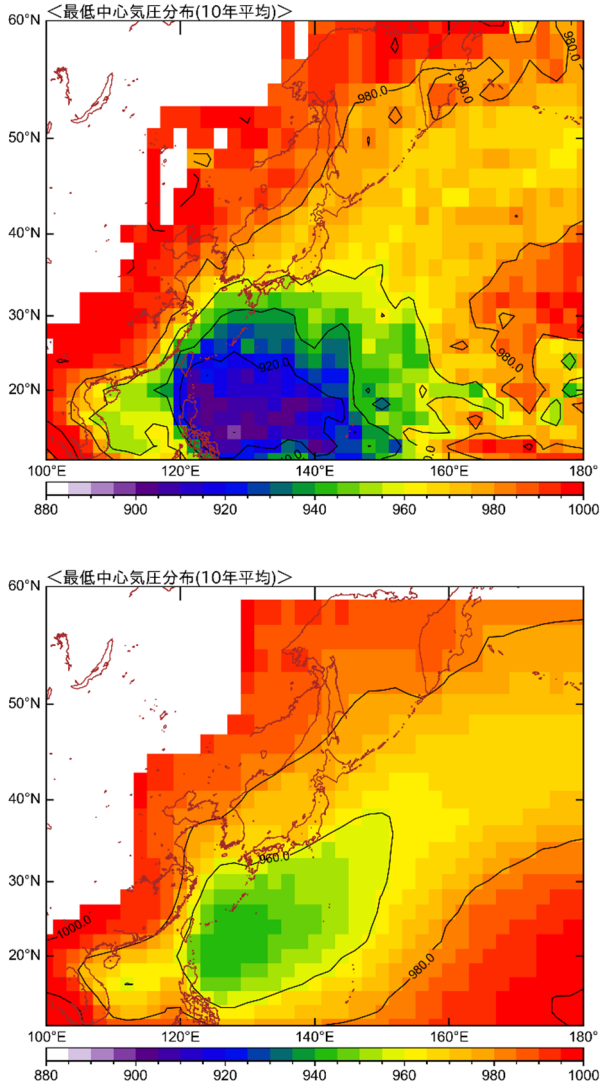


図-2.41 台風の 10 年最低中心気圧の平均値（上段：気象庁ベストトラック，下段：d4PDF 過去実験）

(2) 中心気圧のバイアス補正

前項のとおり，d4PDFの過去実験における台風トラックデータは，気象庁ベストトラックの実績と比較して，台風の勢力が弱い傾向があり，中心気圧が大きいといったバイアスが含まれている．そのため，井手ら（2017）を参考に，d4PDFの過去実験（6,000年分）の台風トラックデータと気象庁のベストトラックデータとの比較によりバイアス補正量を算出し，d4PDFの過去実験と将来実験の台風トラックデータの中心気圧のバイアス補正を実施する．

中心気圧のバイアス補正量は，d4PDFの過去実験と気象庁ベストトラックについて，中心気圧の累積分布を整理し，同じ累積分布となる中心気圧どうしを比較しバイアス補正を評価するクオンタイルマッピング法にて算出する．このとき，累積分布の整理およびバイアス補正量の算出は，北緯10°～50°の範囲を2.5°毎に分割し，それぞれ分割した緯度帯毎に実施する．

図-2.42の右図に示すとおり，累積分布のプロットにフィッティングする多項式で近似すると，中心気圧が非常に小さく頻度が小さい範囲の評価の信頼性が低くなる．そのため，**図-2.42**の左図に示すように，累積分布の対数値に対して多項式近似を行い，それらの近似した多項式を比較することにより，中心気圧が低い範囲における評価の信頼性を高めることとした．

一方，d4PDFの過去実験は6,000年分であり，気象庁ベストトラックと比較して，非常に長い期間を再現した数値実験である．そのことから，気象庁ベストトラックにおける緯度帯毎の中心気圧の下限値を下回る範囲には実績が無いため，その外挿範囲における多項式近似の精度を確認することができない．そのため，**図-2.43**に示すように，気象庁ベストトラックの実績がある範囲における中心気圧のバイアス補正量は，近似した多項式の比較から算出するものとし，気象庁ベストトラックの実績が無い範囲については，気象庁ベストトラックの下限値におけるバイアス補正量と同等であると仮定し，その値を外挿するものとした（**図-2.43**の左図の点線部）．

以上により算出した緯度帯毎の中心気圧のバイアス補正量を**図-2.44**～**図-2.47**に示す．また，バイアス補正後の台風の中心気圧の平均値および10年毎の中心気圧の最小値の平均値を，それぞれ**図-2.48**および**図-2.49**に示す．いずれにおいても，本検討における台風の中心気圧のバイアス補正により，d4PDF過去実験の再現性が向上したことが認められる．

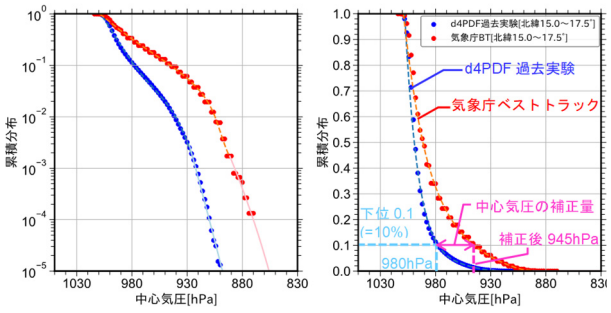


図-2.42　中心気圧の累積分布関数の一例（北緯15.0°～17.5°）

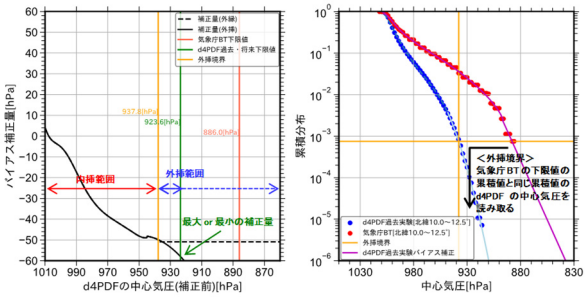
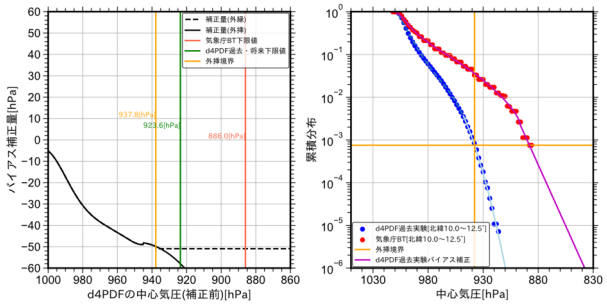
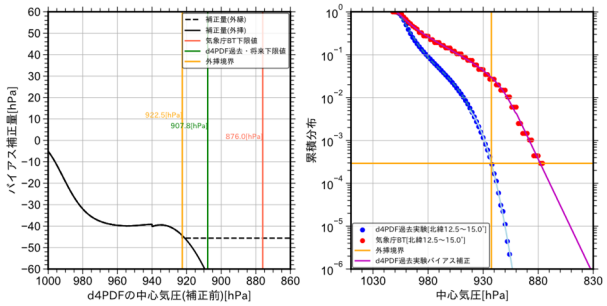


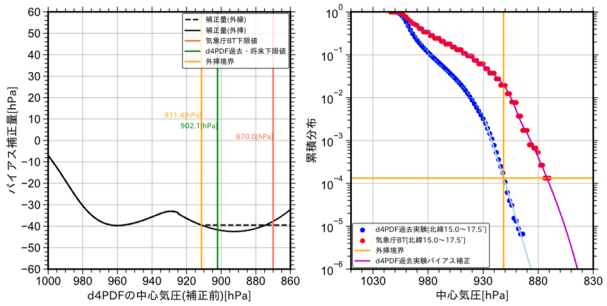
図-2.43　中心気圧のバイアス補正量の一例（北緯10.0°～12.5°）



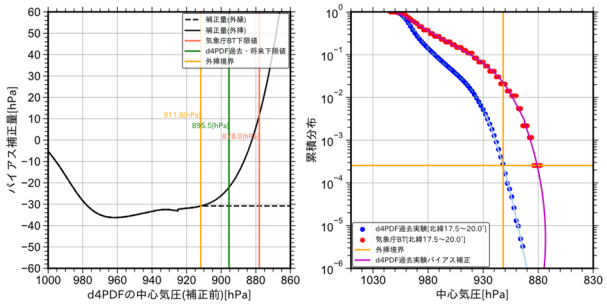
（北緯 10.0°～12.5°）



（北緯 12.5°～15.0°）

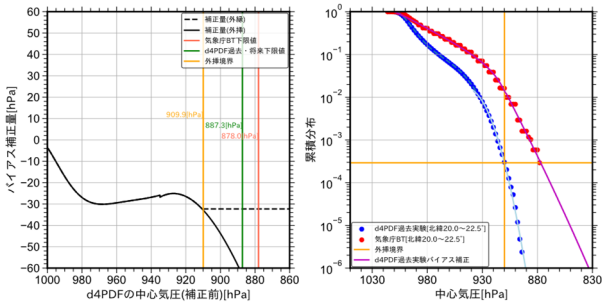


（北緯 15.0°～17.5°）

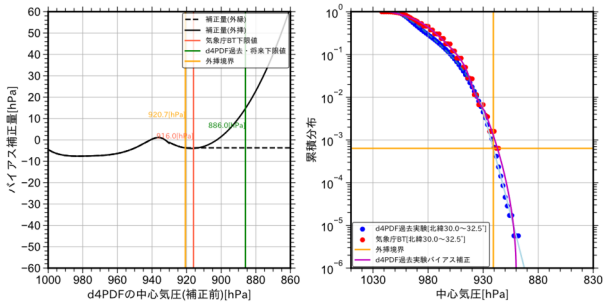


（北緯 17.5°～20.0°）

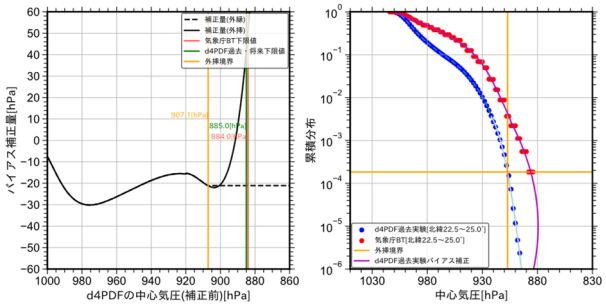
図-2.44　中心気圧のバイアス補正量（その１）



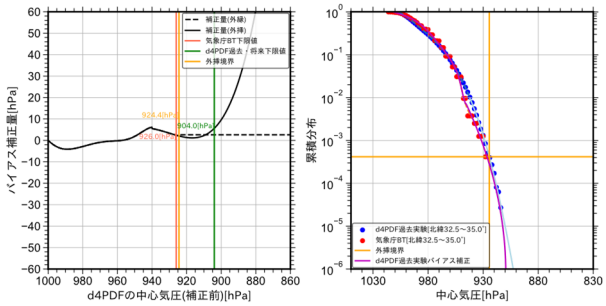
（北緯 20.0°～22.5°）



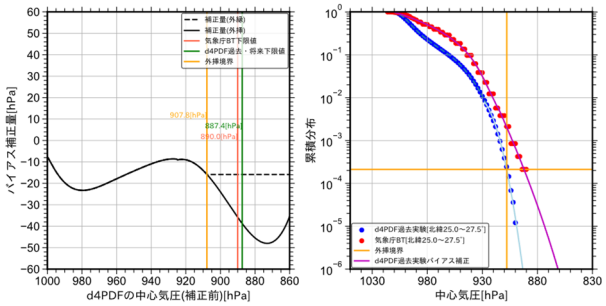
（北緯 30.0°～32.5°）



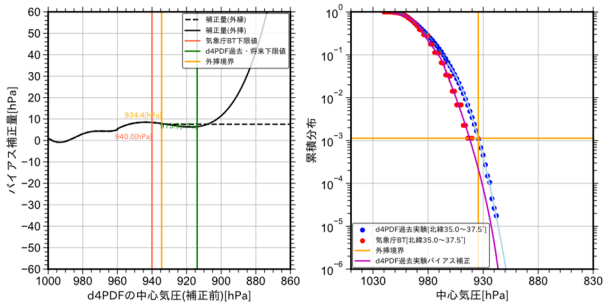
（北緯 22.5°～25.0°）



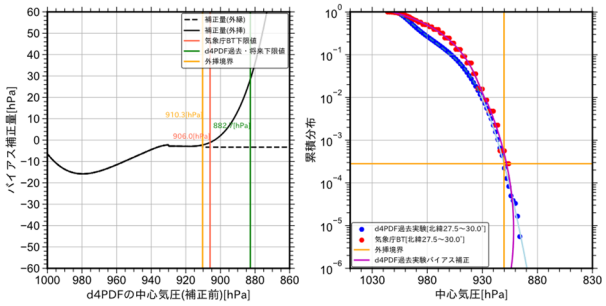
（北緯 32.5°～35.0°）



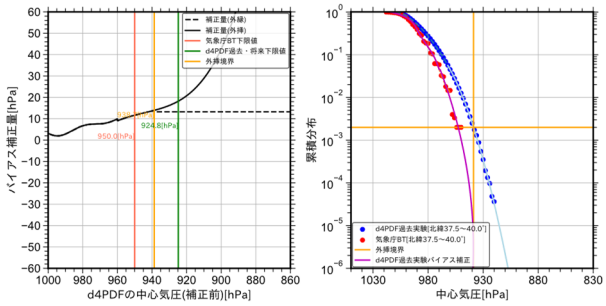
（北緯 25.0°～27.5°）



（北緯 35.0°～37.5°）



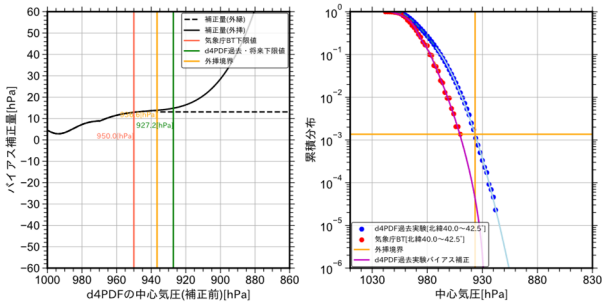
（北緯 27.5°～30.0°）



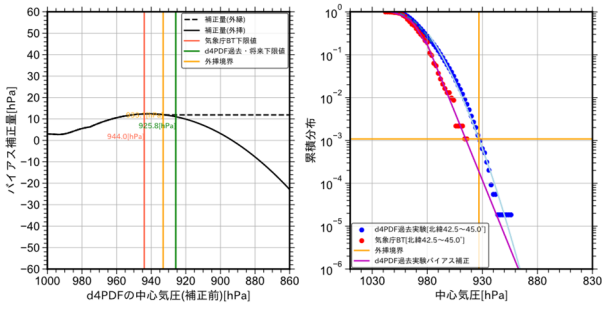
（北緯 37.5°～40.0°）

図-2.45　中心気圧のバイアス補正量（その２）

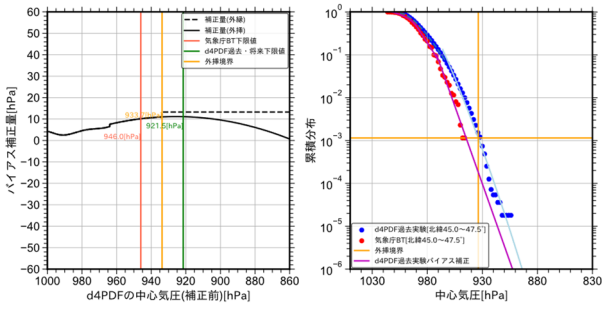
図-2.46　中心気圧のバイアス補正量（その３）



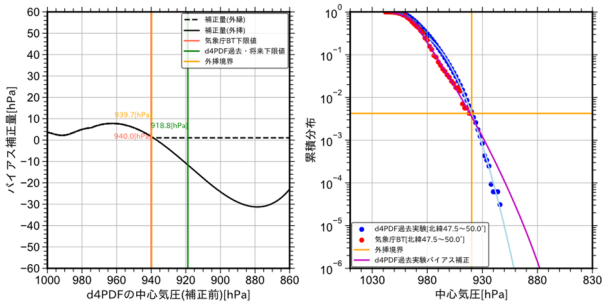
（北緯 40.0° ～42.5° ）



（北緯 42.5° ～45.0° ）



（北緯 45.0° ～47.5° ）



（北緯 47.5° ～50.0° ）

図-2.47　中心気圧のバイアス補正量（その４）

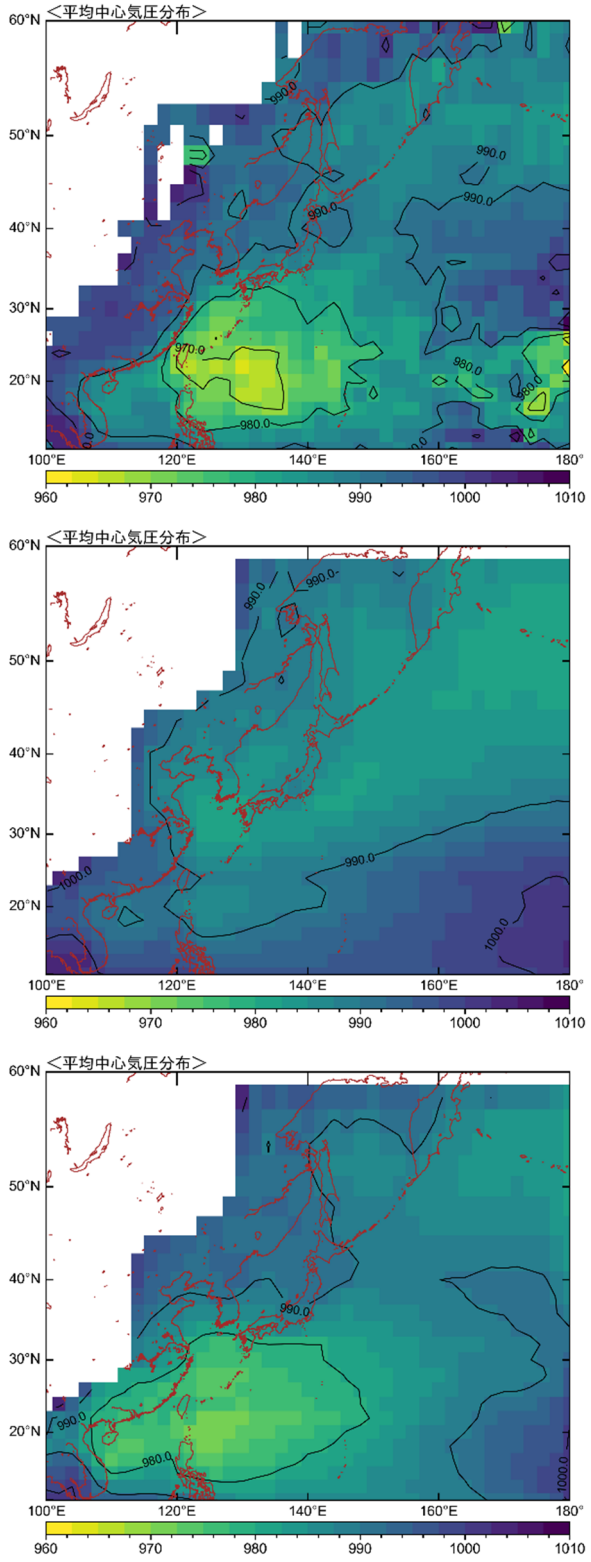


図-2.48　台風の中心気圧の平均値（上段：気象庁ベストトラック，中段：d4PDF 過去実験，下段：バイアス補正後の d4PDF 過去実験）

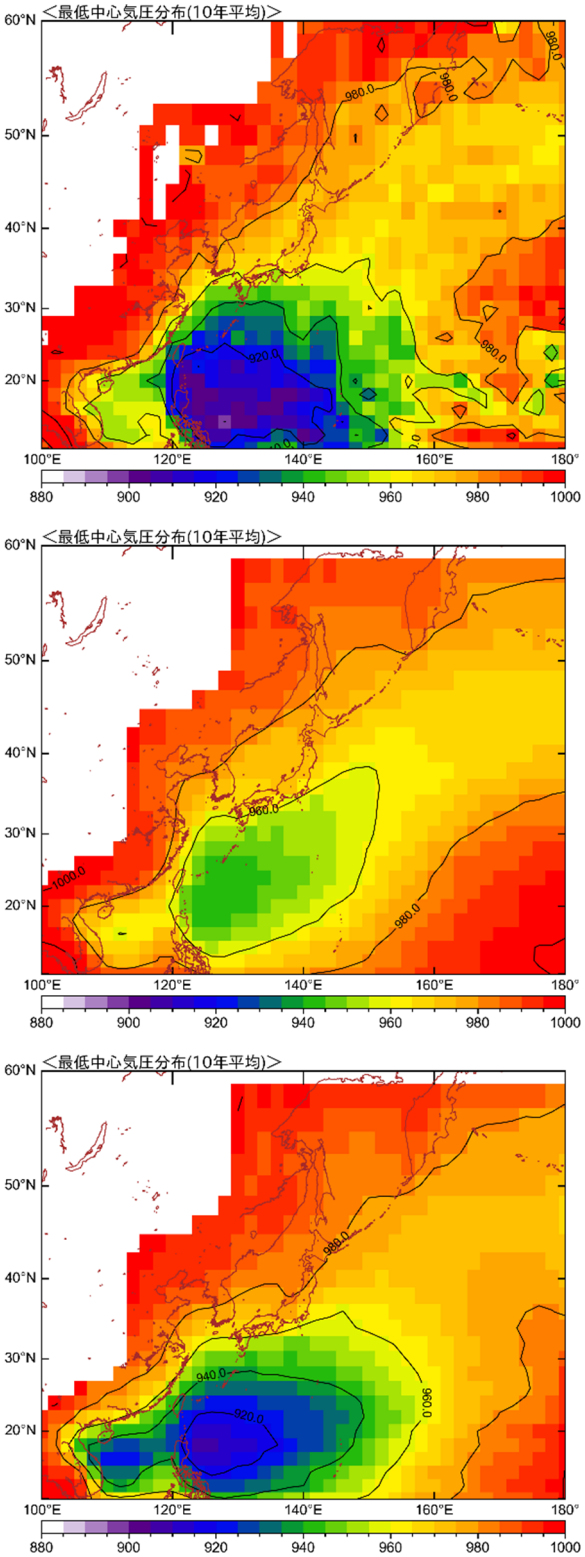


図-2.49 台風の 10 年最低中心気圧の平均値（上段：気象庁ベストトラック，中段：d4PDF 過去実験，下段：バイアス補正後の d4PDF 過去実験）

(3) d4PDF過去実験のアンサンブルメンバの選定

本検討では，主要擾乱である台風の中心気圧といった台風の強度を直接の対象としているのではなく，３大湾における高潮および波浪を対象としている．そのため，d4PDFの過去実験におけるアンサンブルメンバの選定においては，高潮に注目して100メンバから17メンバを選定することとした．なお，３大湾は閉鎖性が高い海域であることから，高潮および波浪のうち，発達が顕著な高潮が主要な作用であると考え，アンサンブルメンバの選定では，高潮のみに注目したものである．

高潮に着目したアンサンブルメンバの選定では，あくまでもメンバ選定が目的であり，詳細な高潮解析はメンバ選定後に実施することから，次式に示す経験的な高潮偏差簡易推定式を用いる．

$$H = a(1010 - P) + b\,W^2\cos\theta + c \qquad (2.14)$$

ここで，H：高潮偏差[cm]，P：気圧[hPa]，W：風速[m/s]，θ：主風向と最大風速Wのなす角，a ,b, c：各地点の定数である．また，各地点での定数は，**表-2.6**に示すとおり，気象庁が公表している値を用いた．なお，ここで用いる中心気圧は，前述のバイアス補正を実施した後の値とし，また，第2.1節にて詳述した経験的台風モデルにて気圧および風速分布を算出したものを用いている．

高潮偏差を簡易推定の対象とする台風擾乱は，**図-2.50**に示す湾毎の抽出範囲を通過する台風とし，また，その中心気圧が1,000hPa以下となる台風とする．これらの台風擾乱の抽出数は，d4PDF過去実験の60年間分の1アンサンブルメンバあたり，約50～100擾乱程度である．

表-2.6 高潮偏差の簡易推定式の定数

対象地点	a	b	c	主風向
東京	2.332	0.112	0.000	S29°W
名古屋	2.961	0.119	0.000	S33°E
鳥羽	1.825	0.001	0.000	ESE
淡輪	2.552	0.004	0.000	SSW
大阪	2.167	0.181	0.000	S6.3°E
神戸	3.370	0.087	0.000	S24°E
洲本	2.281	0.026	0.000	SSE

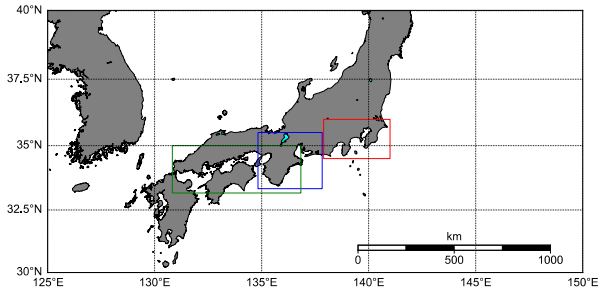


図-2.50　アンサンブルメンバ選定における湾毎の台風抽出範囲

高潮偏差の簡易推定による各アンサンブルメンバによる特徴を確認するため，経験的台風モデルによる時系列の気圧場および風場を用いて，最大高潮偏差時と最大風速時における高潮偏差について，各アンサンブルメンバにおける最大値，平均値および最小値を，参考までに整理した．それらの整理結果を，**図-2.51～図-2.57**に示す．いずれの地点においても，最大高潮偏差時および最大風速時における高潮偏差について，アンサンブルメンバの違いにおける平均値および最小値には大きな差異は認められない．一方，いずれの地点においても，最大高潮偏差時および最大風速時における高潮偏差のアンサンブルメンバ内での最大値（60年間の最大値）については，アンサンブルメンバの違いによって大きな差が生じている．そのため，とくに最大高潮偏差時の最大値の差が大きいことから，この値に着目して，d4PDF過去実験の全100アンサンブルメンバから，17メンバを選定することとした．

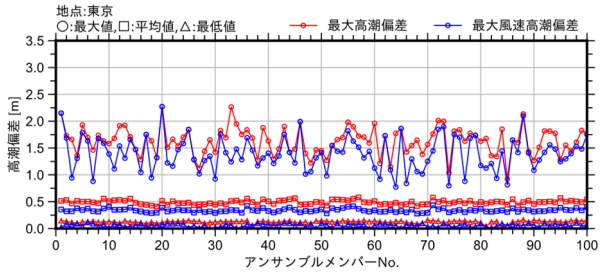


図-2.51　高潮偏差の簡易推定結果（東京）

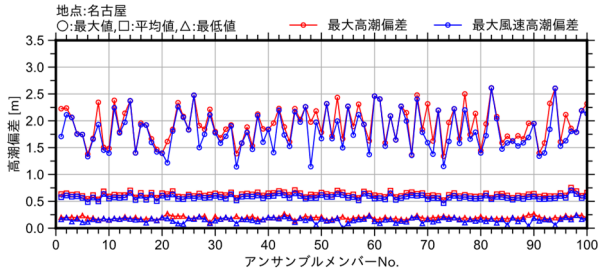


図-2.52　高潮偏差の簡易推定結果（名古屋）

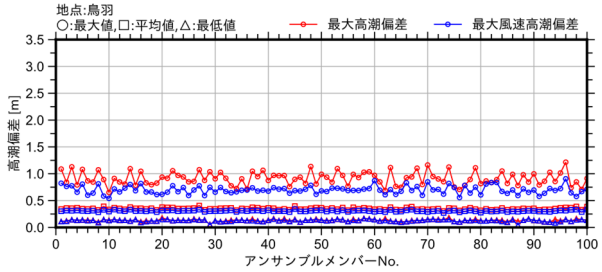


図-2.53　高潮偏差の簡易推定結果（鳥羽）

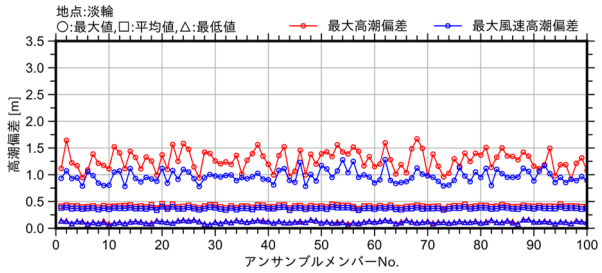


図-2.54　高潮偏差の簡易推定結果（淡輪）

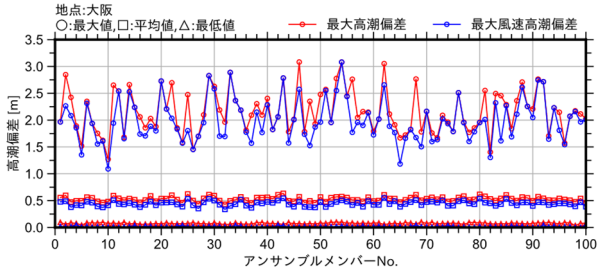


図-2.55　高潮偏差の簡易推定結果（大阪）

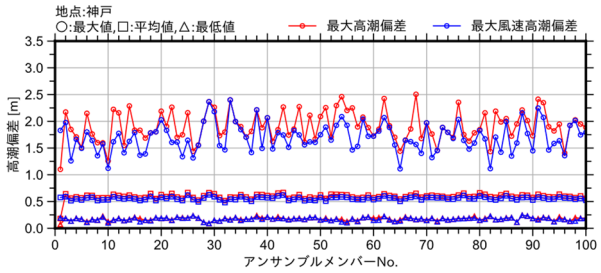


図-2.56　高潮偏差の簡易推定結果（神戸）

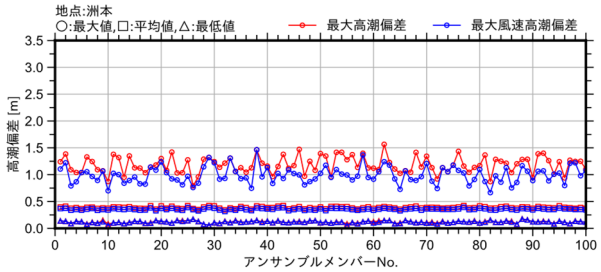


図-2.57　高潮偏差の簡易推定結果（洲本）

d4PDF過去実験の全100アンサンブルメンバから対象とする17アンサンブルメンバの選定方法は，以下のとおりである．

まず，高潮偏差の簡易推定の対象である全7地点において，全100アンサンブルメンバによる高潮偏差の極値分布と，任意の17アンサンブルメンバの組合せによる高潮偏差の極値分布を求める．このとき，未超過確率は，次式のカナンの式により求める．

$$\hat{F}_i = \frac{i-\alpha}{N_T+\beta} \tag{2.15}$$

ここで，N_T：極大値のデータ数，i：極大値の順位（昇順），$\hat{F}_i$：i番目のデータの未超過確率であり，カナンの式のモデル定数は，$\alpha = 0.4$ および $\beta = 0.2$ とした．

対象の全7地点における分布の一致度の指標として，次式により評価する．

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{i,17} - x_{i',100}\right)^2} \tag{2.16}$$

ここで，n：データ数，i：極値の順位（降順），$x_{i,17}$：対象17アンサンブルメンバにおける順位iの高潮偏差である．また，$x_{i',100}$は，対象17アンサンブルメンバの順位iの年超過確率と同等の年超過確率となる全100アンサンブルメンバにおける高潮偏差である．

本検討では，擾乱時における高潮偏差および波浪の極値のうち，比較的長い再現期間を対象とすることから，約50年から約1,000年の再現期間における極値分布の一致度に着目するため，上位20位までの極値のサンプルを対象とすることとし，$n=20$とした．これは，約50年以下の再現期間のサンプルも対象とした場合，それらの再現期間が比較的短いサンプルが非常に多いことから，再現期間が比較的長い極値分布の一致度が悪くなるためである．

次に，全7地点での式(2.16)を用いて，湾毎の重みを考慮したRMSEの総和を次式のとおり求める．

$$RMSE_{all} = \sum_{p=1}^{n_p}\sqrt{\frac{\kappa}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{p,i,17} - x_{p,i',100}\right)^2} \tag{2.17}$$

ここで，p：地点番号，n_p：地点数，κ：湾毎の地点数を考慮した重み付け係数である．なお，このκは，東京湾における地点数1，伊勢湾における地点数2，大阪湾における地点数4を考慮し，その逆数として設定した（東京湾：κ=1，伊勢湾：κ=0.5，大阪湾：κ=0.25）．

ここまでは，任意の17アンサンブルメンバの1つの組合せに対する評価である．そのため，全100アンサンブルメンバから重複を除いた17アンサンブルメンバの組合せをランダムに100万通り発生させ，それぞれに，式(2.17)による評価を実施し，それら100万通りの組合せの中から$RMSE_{all}$が最小となる組合せを選定した．なお，この組合せの試行数による最小となる$RMSE_{all}$の結果を図-2.58に示す．100万通りの試行では，平均して0.13mほどの差が生じていることが確認できる．

選定した17アンサンブルメンバと全100アンサンブルメンバの高潮偏差の極値分布の比較結果を図-2.59～図-2.65に示す．図中の実線が，選定した17アンサンブルメンバの結果であり，点線が全100アンサンブルメンバに

よる結果である．これらの結果から，再現期間約50年以上（年超過確率0.02以下）だけではなく，再現期間約50年以下（年超過確率0.02以上）の一致度も高いことが確認できる．

参考までに，d4PDF過去実験から選定した17アンサンブルメンバの番号は，6，10，11，17，24，47，48，56，61，63，65，83，87，88，91，95および98である．

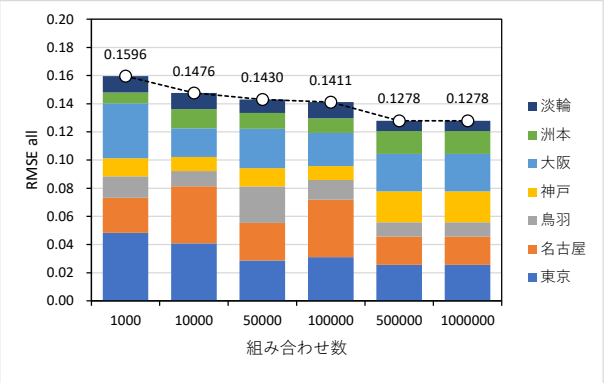


図-2.58　組合せ試行数による一致度の確認結果

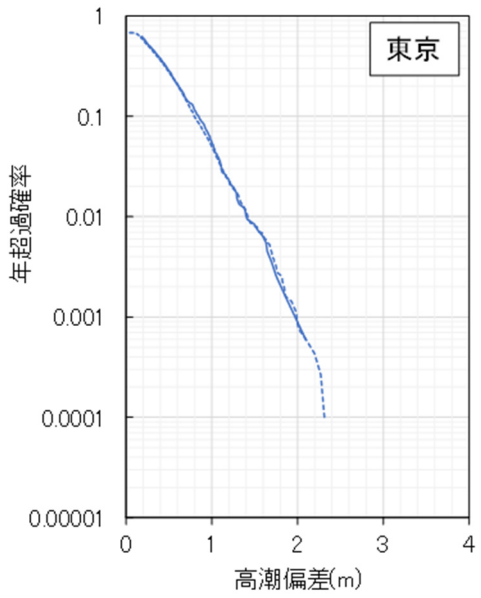


図-2.59　高潮偏差の極値分布の比較（東京）

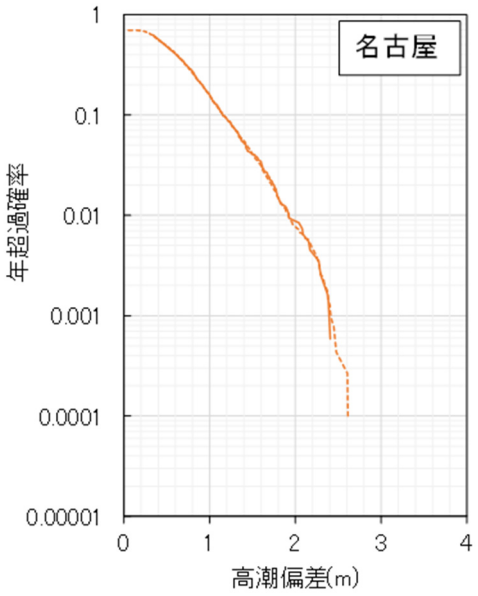


図-2.60　高潮偏差の極値分布の比較（名古屋）

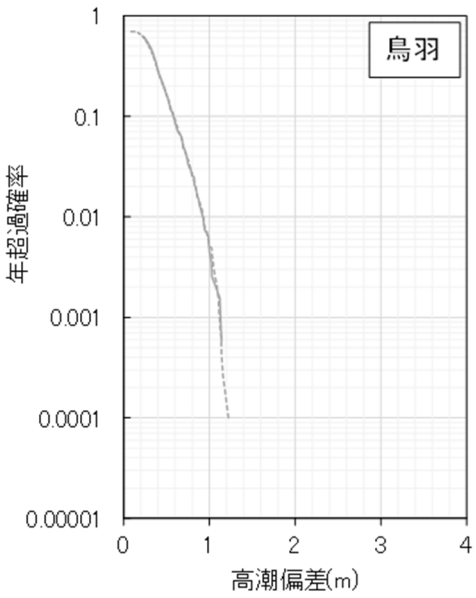


図-2.61　高潮偏差の極値分布の比較（鳥羽）

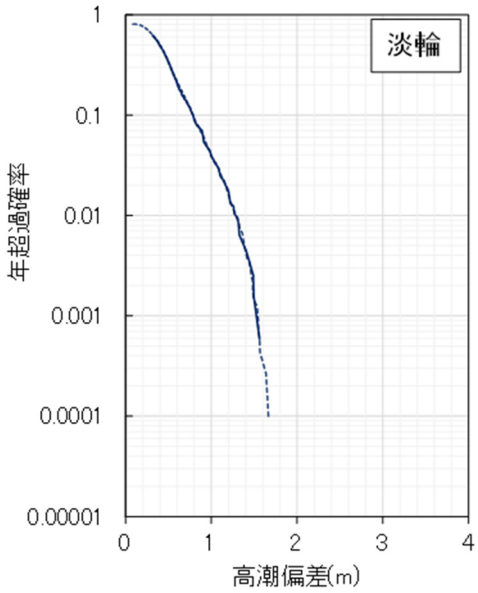


図-2.62　高潮偏差の極値分布の比較（淡輪）

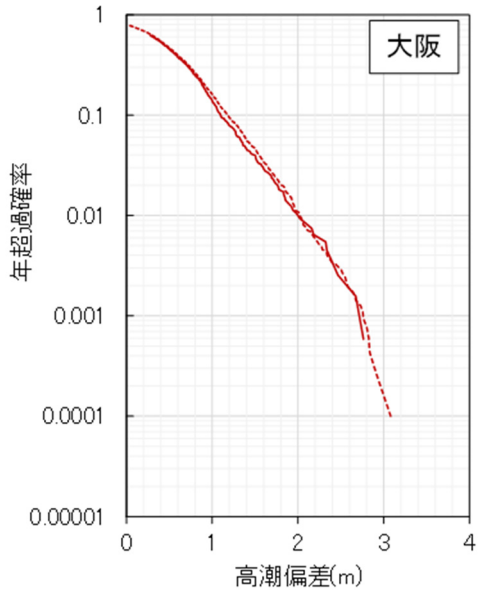


図-2.64　高潮偏差の極値分布の比較（大阪）

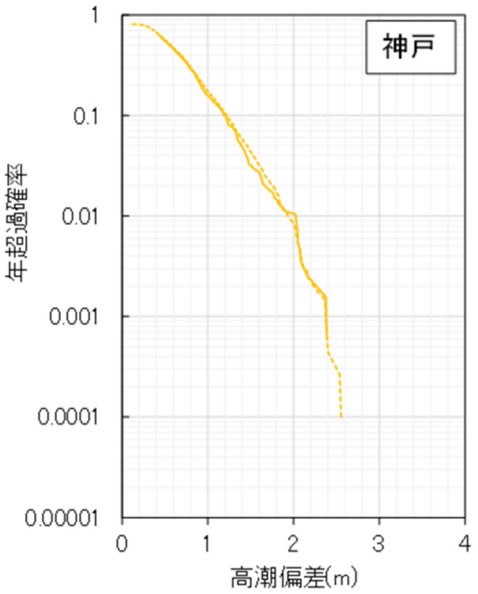


図-2.63　高潮偏差の極値分布の比較（神戸）

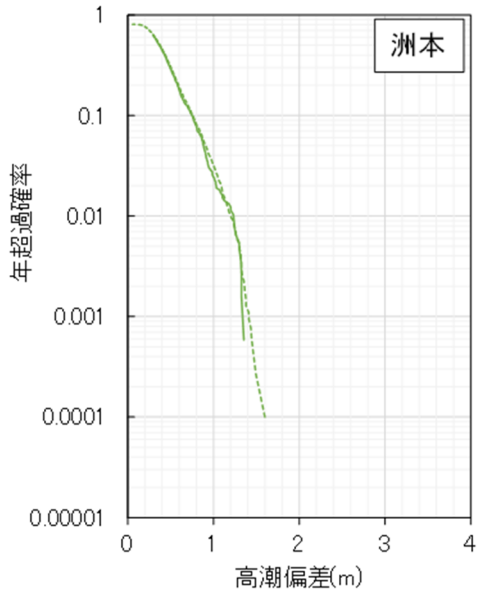


図-2.65　高潮偏差の極値分布の比較（洲本）

(4)解析対象の台風の抽出

本検討では，d4PDFの過去実験および将来実験の台風トラックデータの中心気圧のバイアス補正を実施し，それらを用いて経験的台風モデルにより気圧場および風場の分布の時系列データを算出し，高潮偏差および波浪を計算する．しかし，全ての台風トラックデータに対して，本検討で対象とする３大湾（東京湾・伊勢湾・大阪湾）における高潮および波浪を計算するには，非常に多くのコスト・時間を要する．そこで，対象とする３大湾の高潮および波浪に影響する台風を抽出することで，計算コストの低減を図る．具体的には，**図-2.66**に示す湾毎の台風の抽出範囲を設定し，この抽出範囲を台風の中心が通過した台風のうち，この抽出範囲内で中心気圧が980hPa以下となる台風とした．これにより湾毎に抽出した台風の数は，**表-2.7**のとおりである．過去実験および将来実験（+2K，+4K）を合わせて，東京湾では3,088擾乱，伊勢湾では3,815擾乱，大阪湾では6,190擾乱を抽出し，全体で13,093擾乱の台風を対象とした．

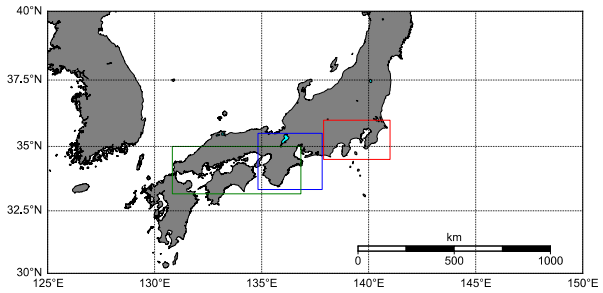


図-2.66　湾毎の台風抽出範囲

表-2.7　湾毎の台風の抽出数

d4PDF		東京湾	伊勢湾	大阪湾
過去実験		388	518	782
将来実験（+2K）	CC	198	268	405
	GF	192	219	354
	HA	197	226	397
	MI	148	179	304
	MP	191	231	400
	MR	214	292	483
将来実験（+4K）	CC	204	280	441
	GF	270	353	630
	HA	324	336	521
	MI	161	177	272
	MP	308	380	602
	MR	293	356	599

2.5　極値統計解析

港湾施設，海岸保全施設等の設計に用いられる高潮，波浪諸元は，長期間の観測値あるいは推算値によって得られる極値データについて統計処理を行い，再現期間毎の確率潮位偏差および確率波高として表すことが望ましい．本研究においては，前述の高潮推算，波浪推算結果による気象擾乱毎の最大値（最小領域の各メッシュの値）を極値データとして扱うこととする．

(1)解析方法（高潮偏差）

高潮偏差の極値データから確率潮位偏差を推定するに当たっては，Hosking（1990）の提案したL-モーメント法を用いた極値統計解析を実施することとする．高潮偏差の極値統計解析の概要を**図-2.67**に示すとともに，解析方法の詳細を後述する．

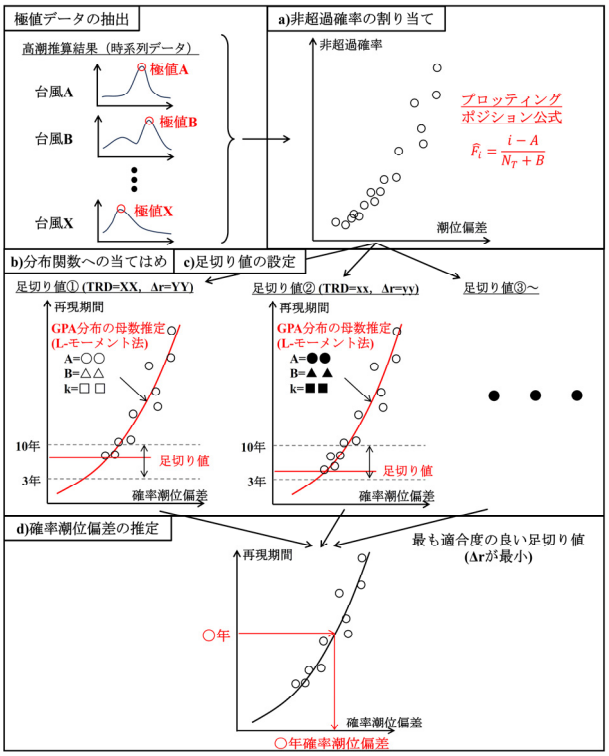


図-2.67　極値統計解析（高潮偏差）の概要

a)非超過確率の割り当て

まず，各地点の極値データを高潮偏差の小さい順に並べ替え，プロッティングポジション公式を用いて，各高潮偏差値に対する非超過確率を計算する．プロッティングポジション公式は，次式で表される．

$$\hat{F}_i = \frac{i-A}{N_T+B} \tag{2.18}$$

ここに，$\widehat{F_i}$ は非超過確率，i は極値データを昇順で並べた時の順位，N_T は極値データの個数，A およびB はモデル定数である．なお，モデル定数については，合田（2010）の数値実験に基づき，L-モーメント法による推定の偏りが小さいとされる提案式（$A = 0.45$，$B = 0$）を用いる．

b)分布関数への当てはめ（L-モーメント法）

高潮，波浪の極値統計では，確率潮位偏差，確率波高の母分布関数が不明であるため，複数の分布関数を標本に当てはめ，最も適合する分布関数を母分布関数とみなす方法が一般的である．

本研究では，ある閾値（足切り値）を超える高潮偏差の極値データを対象とすることから，閾値超過データの漸近分布として導かれる一般化パレート分布（以下, GPA分布）を当てはめる確率分布として取り上げる．GPA分布の分布関数$F(x)$および確率統計量xは，次式で表される．

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left[-\{1-k(x-B)/A\}^{1/k}\right] & (k \neq 0) \\ \exp\left[-\exp\{-(x-B)/A\}\right] & (k = 0) \end{cases} \tag{2.19}$$

$$x = \begin{cases} B + A\{1-(1-F(x))^k\}/k & (k \neq 0) \\ B - Aln(1-F(x)) & (k = 0) \end{cases} \tag{2.20}$$

ここに, A, B および k は分布関数のパラメータであり，それぞれ尺度母数，位置母数および形状母数である．なお，GPA分布は$k > 0$ のとき，上限値（$= B + Ak$）を持つことに留意が必要である．

標本に適合する分布関数の母数の推定方法としては，L-モーメント法を用いる．L-モーメント法では，地点毎の極値データについて，1～3次の標本L-モーメントl_1～l_3と標本L-モーメント比$t_3(= l_3/l_2)$を計算することで，GPA分布の尺度母数，位置母数，形状母数を次式より推定できる．

$$A = (1+k)(2+k)l_2 \tag{2.21}$$

$$B = l_1 - (2+k)l_2 \tag{2.22}$$

$$k = (1-3t_3)/(1+t_3) \tag{2.23}$$

なお, L-モーメント法の具体的な内容は，Hosking・Wallis（1997）あるいは合田・久高（2009）を参照されたい．

c)足切り値の設定

標本の足切りを行う閾値によって，当てはめる分布関数への適合度は変化するため，足切り値を変化させて比較検討を行い，最も適合度の良い値を設定する．

足切り値の検討における適合度の判定指標として，合田・久高（2009）が提案した，極値データの上位20個の二乗平均偏差TUD（Twenty-Up Deviation）を参考として，次式で表される指標TRD（Top Return period Deviation）を用いる．

$$TRD = \sqrt{\frac{1}{n_{TRD}} \sum_{m=1}^{n_{TRD}} {E_m}^2} \tag{2.24}$$

$$E_m = \left(\frac{x_{pred,m} - x_{obs,m}}{x_{obs,m}}\right) \times 100 \tag{2.25}$$

ここに，$x_{obs,m}$ は極値データを大きい順に並べたときの上から第 m 番目の順序統計量，$x_{pred,m}$ は第m番目の確率統計量，n_{TRD} は50年確率値以上の極値データの個数である．なお，n_{TRD} を算出するための50年確率値は式(2.18)を用いて求める．合田・久高（2009）のTUD と異なる点として，本研究では対象とする湾毎や将来気候条件によってデータ数が異なるため，一定の個数のデータではなく，再現期間の大きい（発生頻度の低い）確率統計量に着目し，50年確率値以上の極値データを対象とする．

また, もう一つの適合度の判定指標として, 合田 (2010) を参考に，次式で表される相関係数残差 Δr も用いる．

$$\Delta r = 1 - r \tag{2.26}$$

ここに，r は極値標本データと分布関数による推計値との相関係数である．r の上限値である1 からの残差 Δr が小さいほど，分布関数の適合度は良いと考えられる．

本研究では，将来気候条件や台風経路等により，各地点における高潮偏差値の幅が異なるため，足切り値は一定値ではなく，3年確率値から10年確率値の間で複数設定し，TRD と Δr を比較することとする．まず，湾毎にTRDと Δr の空間平均値（最小領域の全メッシュの平均値）を算出し，TRDの小さい3つの足切り値に絞り込む．その中で Δr が最も小さくなる足切り値を，最も適合度の良い値として設定する．なお，隣接地点との確率潮位偏差に不整合が生じることを避けるため，湾毎に海域全体で一律の足切り値を設定することとする．

d)確率潮位偏差の推定

足切りを行った標本に対して，当てはめた分布関数の母数が推定されると，所定の再現期間 R に対する確率潮位偏差xは，式(2.20)を用いて推定できる．その際の非超過確率$\hat{F}_i(=F(x))$は次式で与えられる．

$$\hat{F}_i = 1 - \frac{1}{\lambda R} \tag{2.27}$$

ここに，λ は極値データを発生させた台風の年平均通過個数である．なお，d4PDF過去実験の台風トラックデータには，台風の通過頻度のバイアスが含まれるため，気象庁ベストトラックを用いて補正を行う（補正方法は後述）．

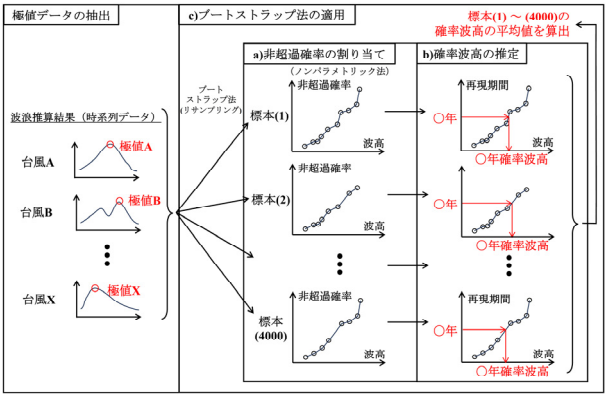


図-2.68　極値統計解析（波高）の概要

(2)解析方法（波高）

波高の極値データから確率波高を推定するに当たっては，寶（2006）によるノンパラメトリック法（以下，寶法）を用いる．ここで，本研究で用いる標本データは，統計期間が500年以上と標本サイズが大きく，施設設計に必要となる再現期間50年までの確率波高の統計的安定性は大きいと考えられる．従って，確率分布への当てはめの必要がなく，比較的簡易に確率波高を推定できる寶法を用いることとした．本研究における，波高の極値統計解析の概要を図-2.68に示すとともに，解析方法の詳細を後述する．

a)非超過確率の割り当て

確率潮位偏差の場合と同様に，極値データを波高の小さい順に並べ替え，式(2.18)を用いて，各波高値に対する非超過確率を計算する．ただし，モデル定数については，寶(2006)と同様に，近年よく用いられるカナン公式($A = 0.4$，$B = 0.2$）を用いる．なお，寶法では確率波高が足切り値に関わらず推定されるため，標本の足切りは行わないこととする．

b)確率波高の推定

所定の再現期間Rに対する非超過確率を，式(2.18)を用いて，割り当てた非超過確率を線形補間することにより求め，確率潮位偏差の場合と同様に，式(2.27)より，その非超過確率に対する確率波高を推定する．

c)ブートストラップ法の適用

ノンパラメトリック法を，ある1組の標本に対してのみ適用すると，例えば，標本の第1位と第2位の波高が近い値となる場合等において，偏りのある確率波高が推定される可能性があるため，ブートストラップ法を適用することで偏りを抑えることとする．各地点の標本データに対して，ブートストラップ法による4000回のリサンプリングを行い，各標本から得られる確率波高の平均値を算出する．なお，ブートストラップ法の具体的な内容については，岡本ら（2023b）を参照されたい．

(3)台風の通過頻度のバイアス補正

気象庁ベストトラック（1951年から2010年まで）とd4PDF過去実験の台風トラックデータでは，第2.4節にて抽出した湾毎の台風の年平均通過個数に大きな差異が生じている（**表-2.8**）．これは，d4PDFの気候予測モデルの特性に基づくものであると考えられる．そのため，この台風の通過頻度のバイアスは，高潮偏差および波高の極値統計解析において，再現期間のバイアスとして残る問題がある．

そこで，この年平均通過個数のバイアスを補正するため，気象庁ベストトラックとd4PDF過去実験の年平均通過個数の比αを，d4PDFの各気候条件の年平均通過個数λに乗じ，次式のとおり再現期間Rのバイアスを補正する．

$$R = \frac{1}{\alpha\lambda\left(1-\hat{F}_i\right)} \tag{2.28}$$

所定の再現期間における確率統計量を求める際は，式(2.27)の λ に α を乗じて補正を行う．なお，d4PDFの将来実験における台風の通過頻度のバイアスを推定することは困難であることから，d4PDFの過去実験も将来実験も同等の台風の通過頻度のバイアスが含まれるものと仮定し，d4PDFの過去実験および将来実験に対して同じバイアス補正を実施する．

表-2.8　台風の年平均通過個数

対象湾	気象庁ベストトラック ①	d4PDF 過去実験 ②	α ＝①／②
東京湾	0.78	0.38	2.06
伊勢湾	0.92	0.51	1.81
大阪湾	1.35	0.77	1.76

2.6　対象港湾

本検討では，３大湾の重要港湾以上の港湾を対象に高潮偏差および波高の将来変化を算定することを目的としている．とくに，それらの港湾の波高の将来変化を評価するため，代表地点を設定した．設定した代表地点の位置図について，**図-2.69～図-2.71**に示すとともに，代表地点の座標を**表-2.9**に示す．

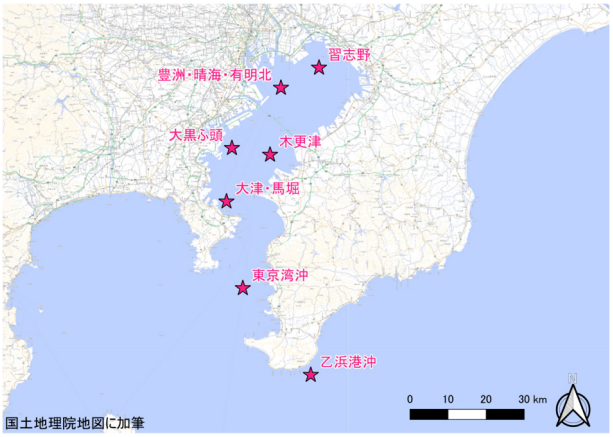


図-2.69　代表地点（東京湾）

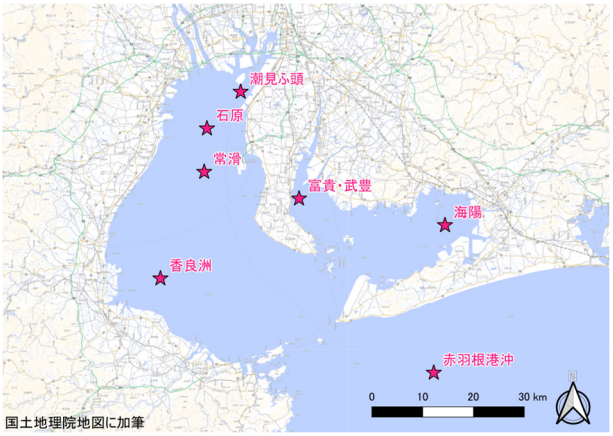


図-2.70　代表地点（伊勢湾）

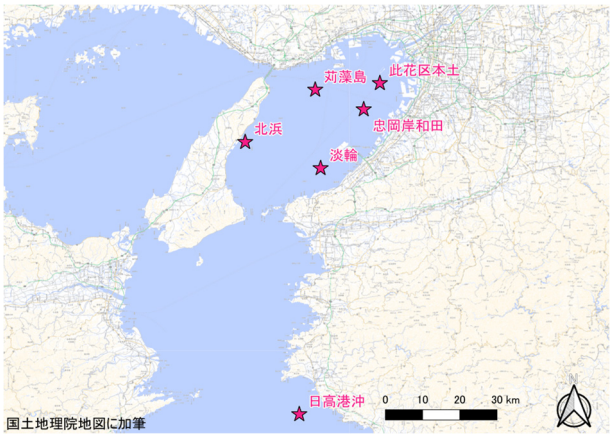


図-2.71　代表地点（大阪湾）

表-2.9　代表地点の座標

対象湾	地点名	緯度経度（度）	
		緯度	経度
東京湾	大津・馬堀	35.29688	139.70313
	大黒ふ頭	35.42188	139.71875
	豊洲・晴海・有明北	35.56250	139.85938
	習志野	35.60938	139.96875
	木更津	35.40625	139.82813
	東京湾沖	35.09380	139.75000
	乙浜港沖	34.89000	139.94500
伊勢湾	潮見ふ頭	34.98438	136.81250
	常滑	34.84375	136.73438
	富貴・武豊	34.79688	136.93750
	海陽	34.75000	137.25000
	石原	34.92000	136.74028
	香良洲	34.65625	136.64063
	赤羽根港沖	34.49000	137.22600
大阪湾	苅藻島	34.57813	135.15625
	北浜	34.45313	134.95313
	此花区本土	34.59375	135.34375
	忠岡岸和田	34.53125	135.29688
	淡輪	34.39063	135.17188
	日高港沖	33.80000	135.11000

3. 高潮偏差の将来変化予測

第2章に示したように，抽出した対象の台風擾乱を対象に，気圧場・風場，高潮の数値解析手法を用いて，高潮偏差を算出し，極値統計解析を実施した．なお，極値統計解析の詳細な結果は，付録Bに示す．

3.1　東京湾

東京湾における再現期間100年の高潮偏差の分布について，d4PDFの過去実験による高潮偏差の結果を**図-3.1**に示すとともに，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の6つのSSTによる高潮偏差の平均値の結果を，それぞれ，**図-3.2**および**図-3.3**に示す．いずれの結果においても，東京湾の湾奥に向かって，高潮偏差が大きくなっている．また，現在気候を表す過去実験と比較して，いずれの将来実験の高潮偏差は大きい．

また，これらの結果を用いて，将来実験における高潮偏差を過去実験における高潮偏差で除した将来変化比を算出した．将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の再現期間100年の高潮偏差の将来変化比を，それぞれ，**図-3.4**および**図-3.5**に示す．将来実験（+2K）と比較して，気温上昇が大きい将来実験（+4K）の高潮偏差の方が大きくなっていることが確認できる．また，いずれの将来実験の高潮偏差の将来変化比も，川崎港，横浜港および横須賀港の近傍の値が大きくなる傾向があるが，これは，東京湾の特性によるものとも考えられるが，高潮偏差は台風経路に大きく影響されることから，全ての将来変化比に共通して除算に用いられている過去実験の台風経路の傾向によるものとも考えられる．そのため，この将来変化比の分布を施設毎の設計等に用いるには，更なる検討が必要である．

これらの再現期間毎の高潮偏差や将来変化比の分布については，付録Aを参照されたい．

次に，再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の東京湾内の分布から算出した空間平均について，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の結果を，それぞれ，**図-3.6**および**図-3.7**に示す．図中の6つの灰色の実線は6つのSSTにおける結果を示し，青色の実線は6つのSSTの平均を示している．なお，空間平均を算出した範囲は，**図-3.4**および**図-3.5**の海域の範囲である．いずれの将来実験も，海面水温の分布モデルである6つのSSTの違いにより，将来変化比の結果が大きく異なっている．また，将来実験（+2K）と比較して，将来実験（+4K）の高潮偏差の将来変化比は大きくなる傾向を示している．

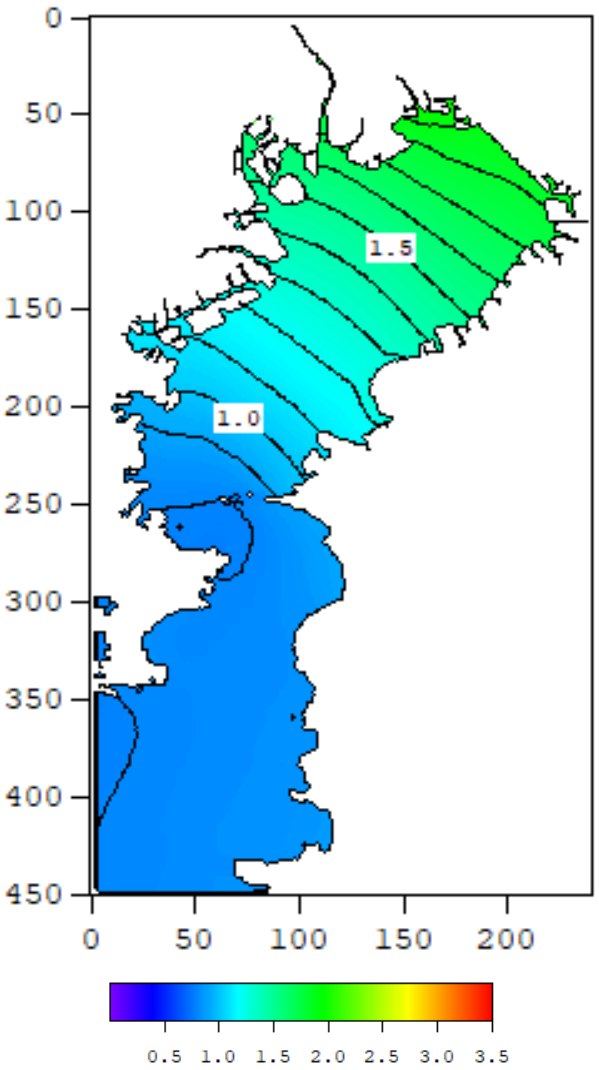


図-3.1　再現期間 100 年の高潮偏差（東京湾）（過去実験）

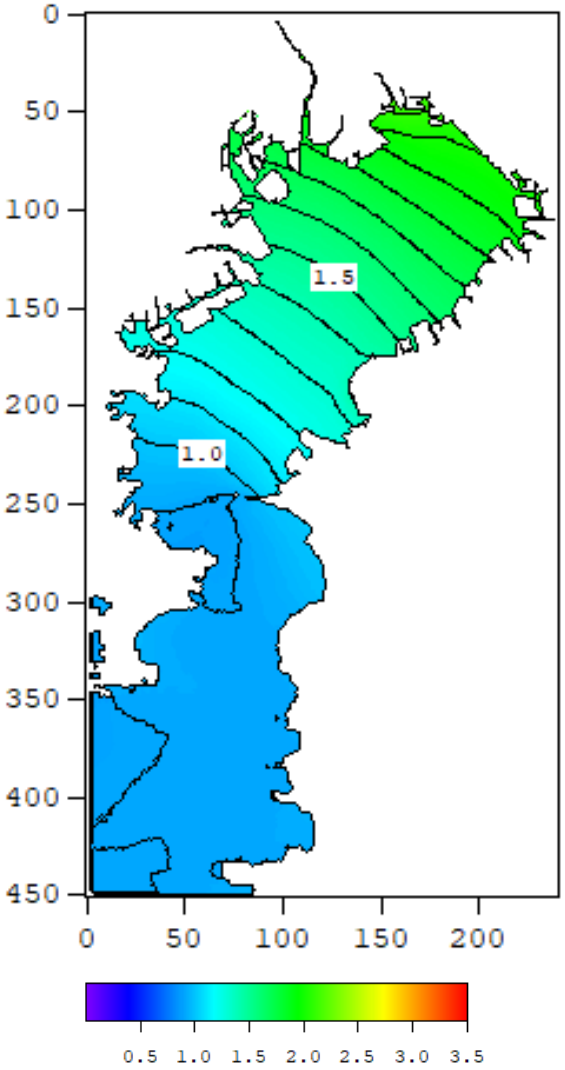


図-3.2　再現期間 100 年の高潮偏差（東京湾）（将来実験（+2K））

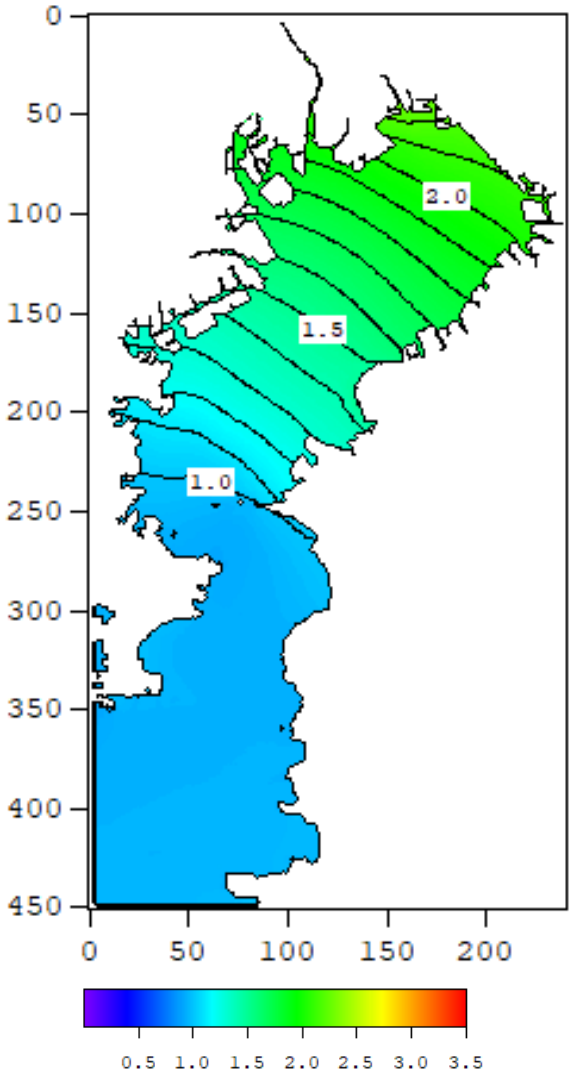


図-3.3　再現期間 100 年の高潮偏差（東京湾）（将来実験（+4K））

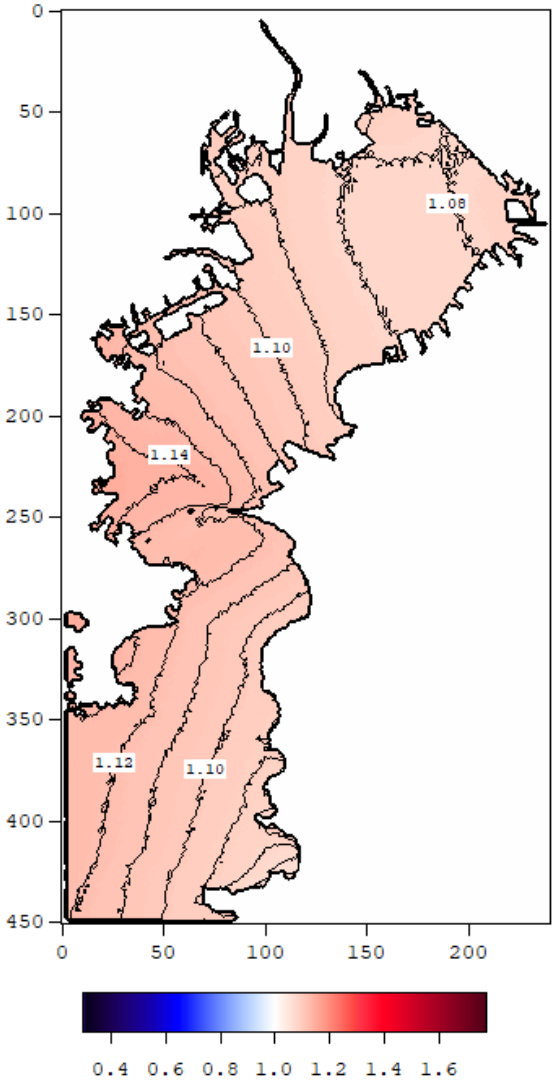


図-3.4　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（東京湾）（将来実験（+2K））

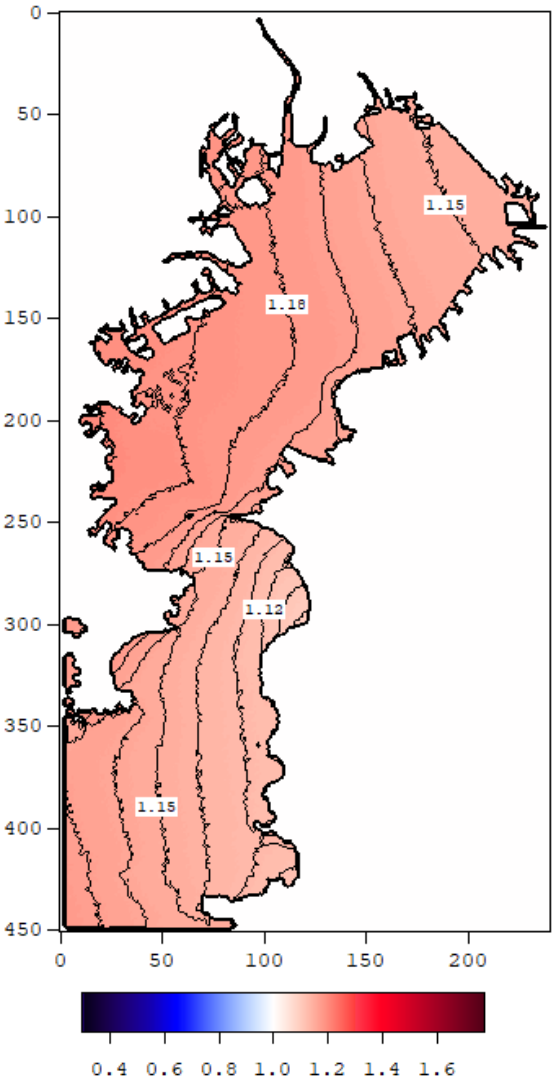


図-3.5　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（東京湾）（将来実験（+4K））

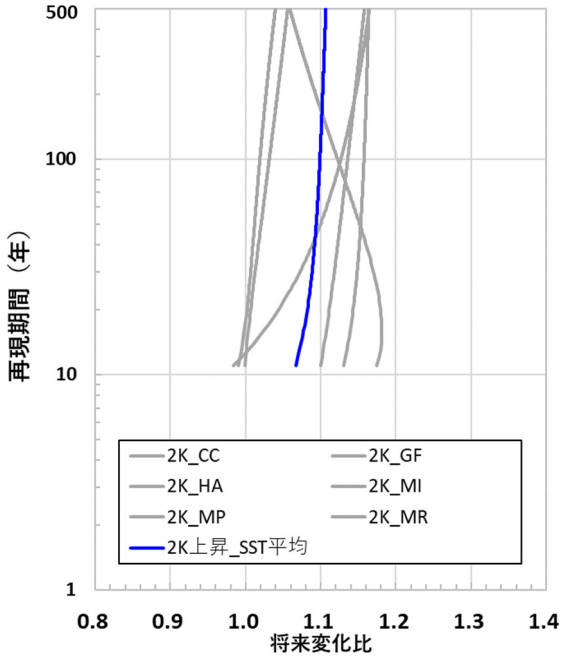


図-3.6　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（東京湾）（将来実験（+2K））

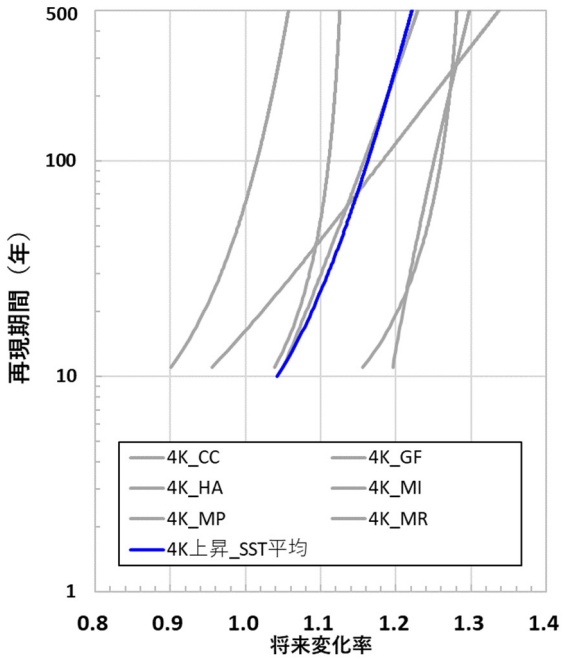


図-3.7　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（東京湾）（将来実験（+4K））

3.2　伊勢湾

伊勢湾における再現期間100年の高潮偏差の分布について，d4PDFの過去実験による高潮偏差の結果を**図-3.8**に示すとともに，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の6つのSSTによる高潮偏差の平均値の結果を，それぞれ，**図-3.9**および**図-3.10**に示す．いずれの結果においても，伊勢湾および三河湾の湾奥に向かって，高潮偏差が大きくなっている．また，現在気候を表す過去実験と比較して，将来実験（+2K）の名古屋港内を除き，いずれの将来実験の高潮偏差は大きい．

また，これらの結果を用いて，将来実験における高潮偏差を過去実験における高潮偏差で除した将来変化比を算出した．将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の再現期間100年の高潮偏差の将来変化比を，それぞれ，**図-3.11**および**図-3.12**に示す．将来実験（+2K）と比較して，気温上昇が大きい将来実験（+4K）の高潮偏差の方が大きくなっていることが確認できる．また，いずれの将来実験の高潮偏差の将来変化比も，津松阪港以南の沿岸の値が大きくなる傾向がある．しかし，東京湾における川崎港，横浜港および横須賀港の近傍の傾向と同様に，伊勢湾の特性によるものとも考えられるが，高潮偏差は台風経路に大きく影響されることから，全ての将来変化比に共通して除算に用いられている過去実験の台風経路の傾向によるものとも考えられるため，この将来変化比の分布を施設毎の設計等に用いるには，更なる検討が必要である．

これらの再現期間毎の高潮偏差や将来変化比の分布については，付録Aを参照されたい．

次に，再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の伊勢湾内の分布から算出した空間平均について，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の結果を，それぞれ，**図-3.13**および**図-3.14**に示す．なお，空間平均を算出した範囲は，伊勢湾の内外で大きく異なる傾向があることから，**図-3.15**に示す範囲とした．いずれの将来実験も，海面水温の分布モデルである6つのSSTの違いにより，将来変化比の結果が大きく異なっており，とくに将来実験（+4K）において顕著である．また，将来実験（+2K）と比較して，将来実験（+4K）の高潮偏差の将来変化比は大きくなる傾向を示している．

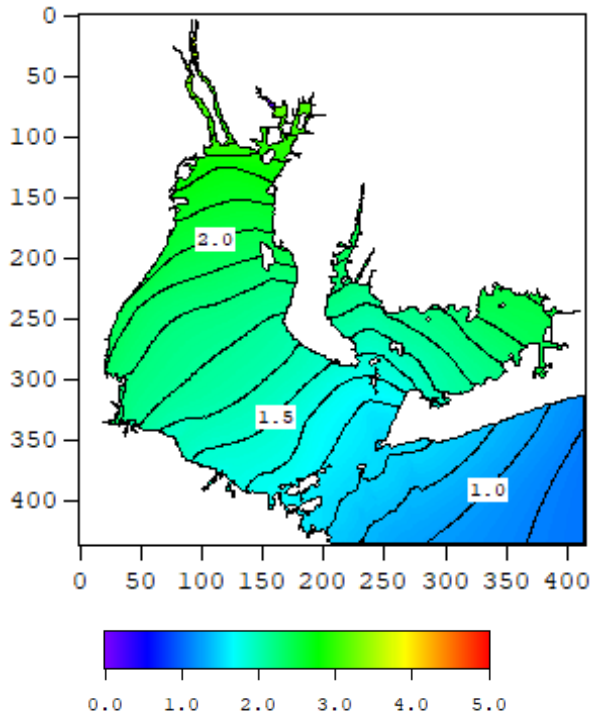


図-3.8　再現期間 100 年の高潮偏差（伊勢湾）（過去実験）

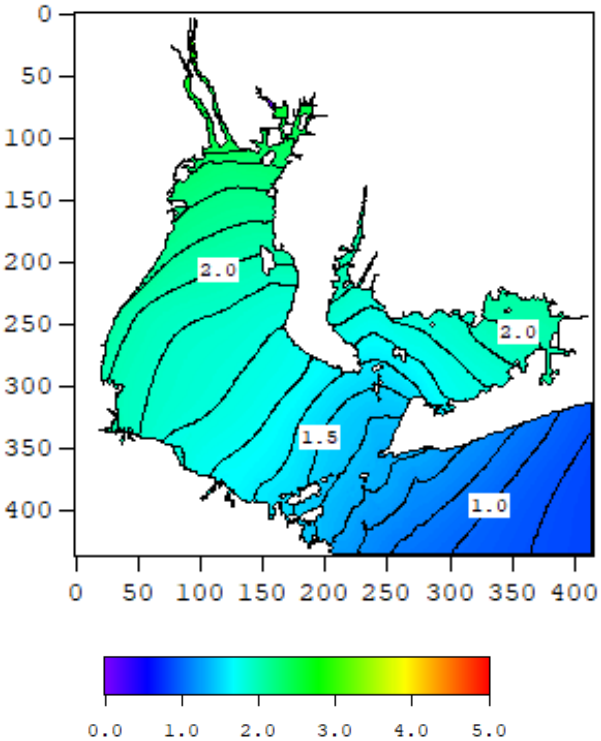


図-3.9　再現期間 100 年の高潮偏差（伊勢湾）（将来実験（+2K））

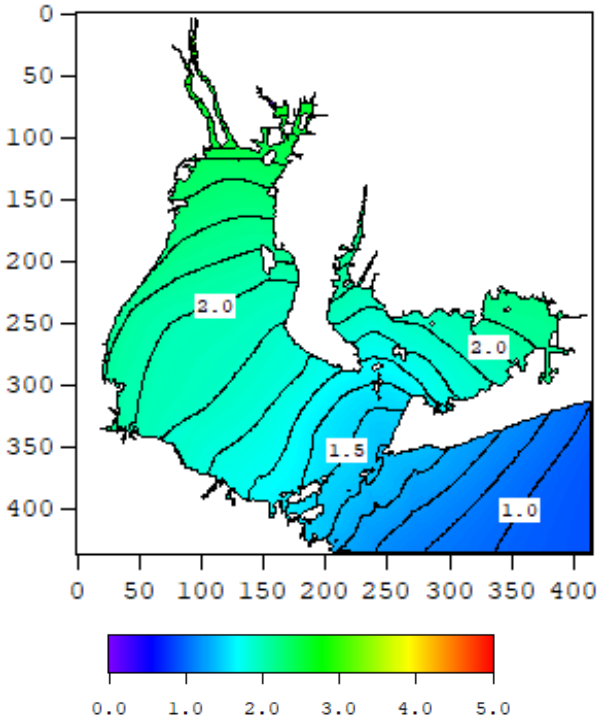


図-3.10　再現期間 100 年の高潮偏差（伊勢湾）（将来実験（+4K））

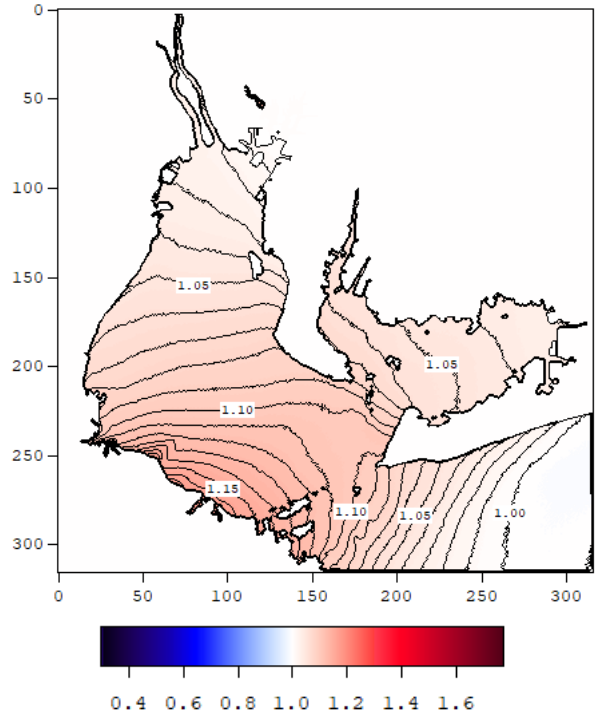


図-3.11　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+2K））

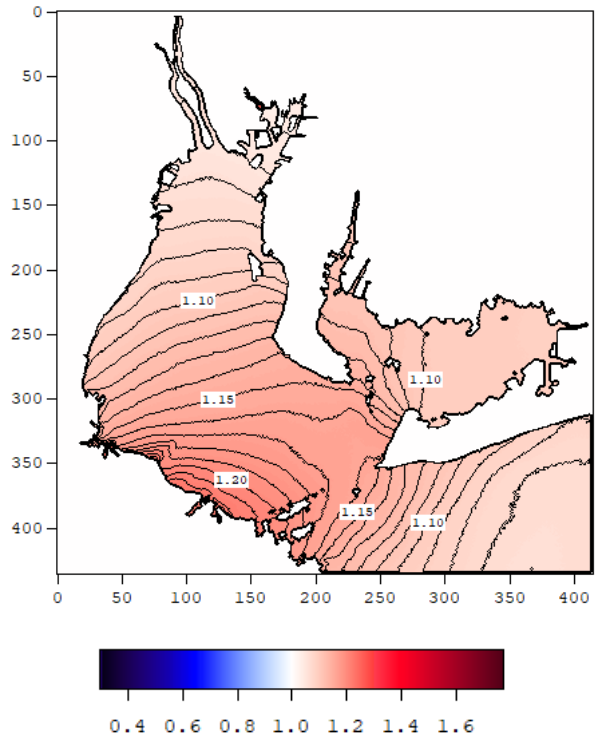


図-3.12　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+4K））

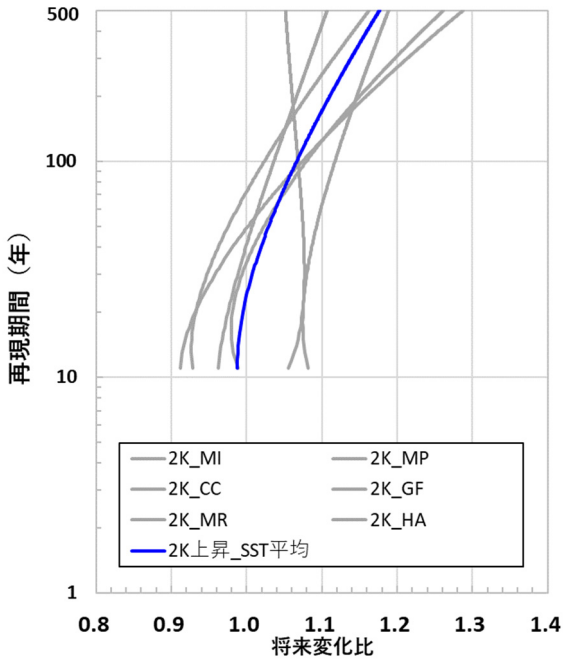


図-3.13　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（伊勢湾）（将来実験（+2K））

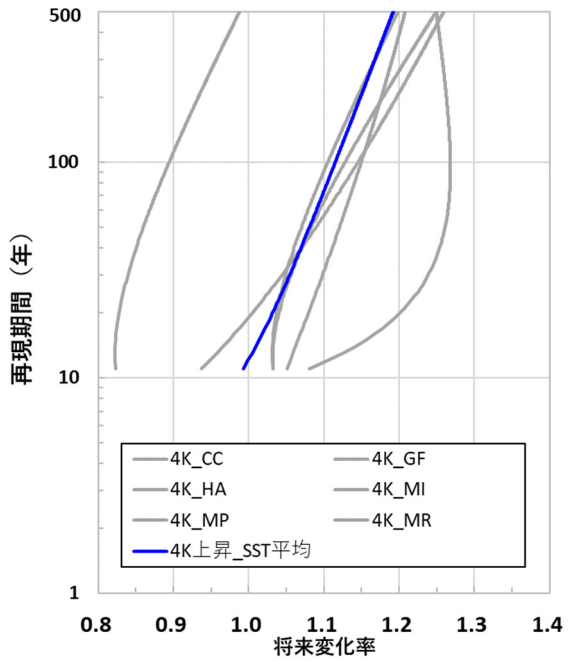


図-3.14　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（伊勢湾）（将来実験（+4K））

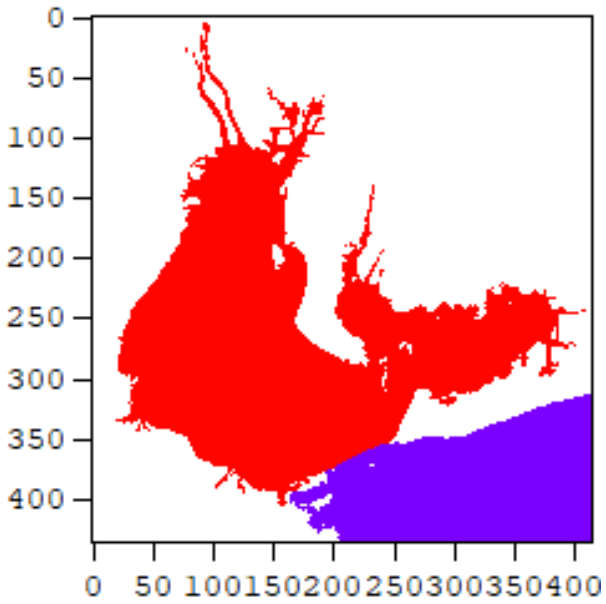


図-3.15　伊勢湾における高潮偏差の将来変化比の空間平均の算出範囲（赤色の範囲）

3.3　大阪湾

大阪湾における再現期間100年の高潮偏差の分布について，d4PDFの過去実験による高潮偏差の結果を図-3.16に示すとともに，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の6つのSSTによる高潮偏差の平均値の結果を，それぞれ，図-3.17および図-3.18に示す．いずれの結果においても，大阪港が位置する大阪湾の湾奥に向かって，高潮偏差が大きくなっている．また，現在気候を表す過去実験と比較して，いずれの将来実験の高潮偏差は大きい．

また，これらの結果を用いて，将来実験における高潮偏差を過去実験における高潮偏差で除した将来変化比を算出した．将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の再現期間100年の高潮偏差の将来変化比を，それぞれ，図-3.19および図-3.20に示す．将来実験（+2K）と比較して，気温上昇が大きい将来実験（+4K）の高潮偏差の方が大きくなっていることが確認できる．しかし，東京湾および伊勢湾とは異なり，いずれの将来実験の高潮偏差の将来変化比も，一部の沿岸の近傍の値が大きくなるといった顕著な傾向は認められず，大阪湾全体で緩やかな分布となっている．

これらの再現期間毎の高潮偏差や将来変化比の分布については，付録Aを参照されたい．

次に，再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の東京湾内の分布から算出した空間平均について，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の結果を，それぞれ，図-3.21および図-3.22に示す．なお，空間平均を算出した範囲は，図-3.19および図-3.20の海域の範囲である．いずれの将来実験も，海面水温の分布モデルである6つのSSTの違いにより，将来変化比の結果が大きく異なっている．また，将来実験（+2K）と比較して，将来実験（+4K）の高潮偏差の将来変化比は大きくなる傾向を示している．

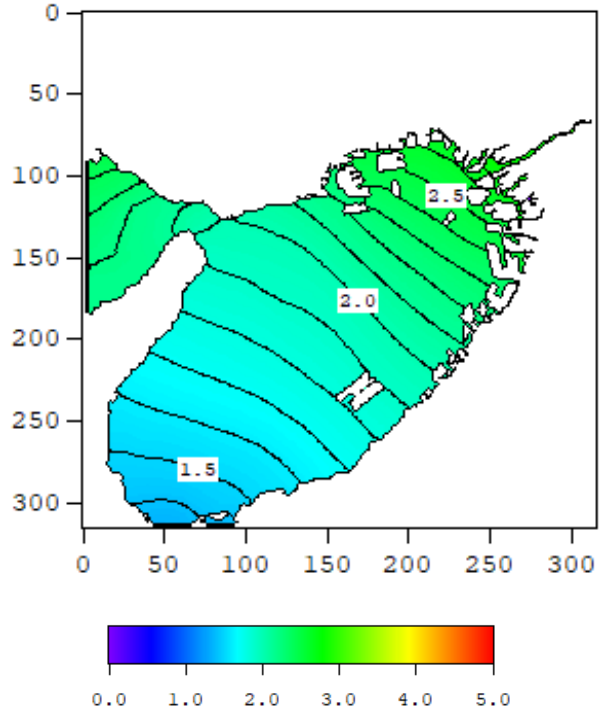


図-3.16　再現期間 100 年の高潮偏差（大阪湾）（過去実験）

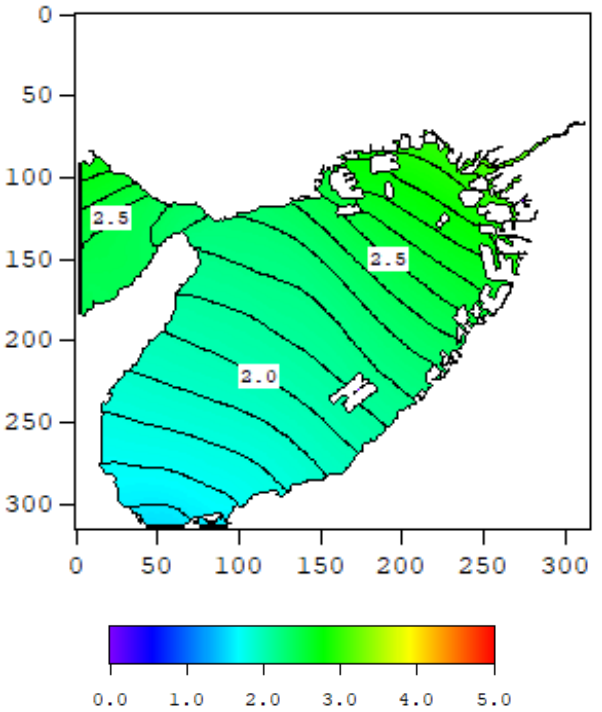


図-3.18　再現期間 100 年の高潮偏差（大阪湾）（将来実験（+4K））

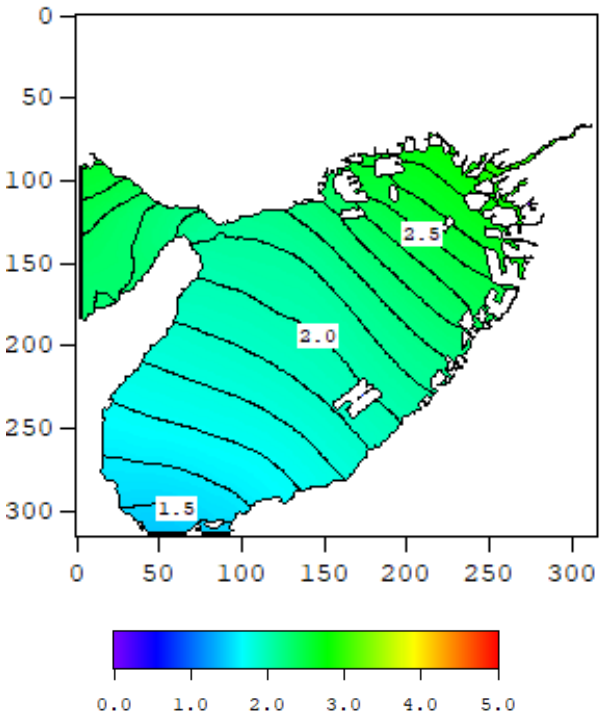


図-3.17　再現期間 100 年の高潮偏差（大阪湾）（将来実験（+2K））

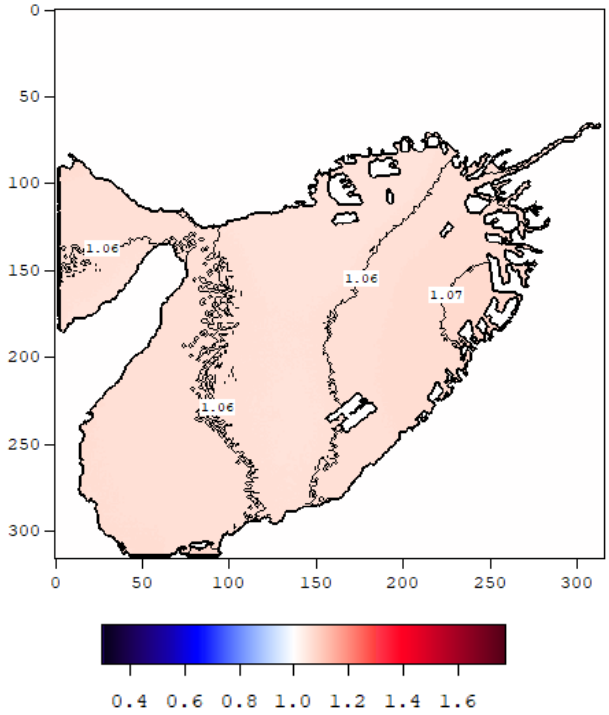


図-3.19　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+2K））

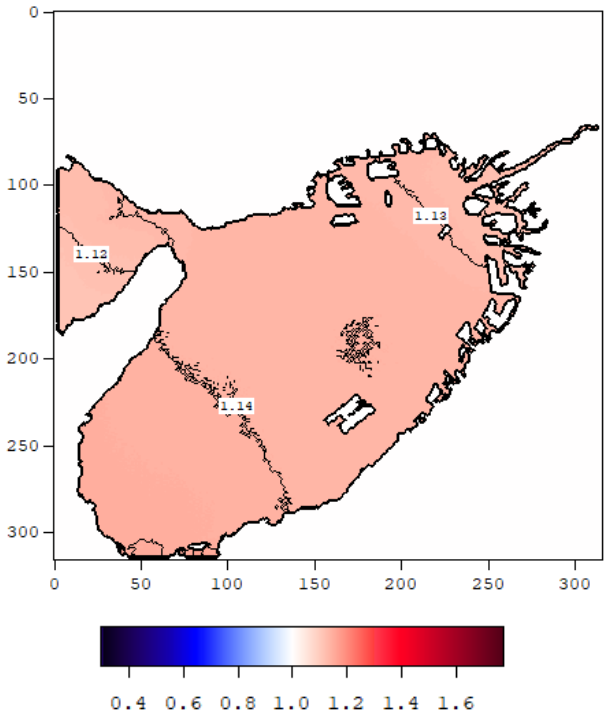


図-3.20　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+4K））

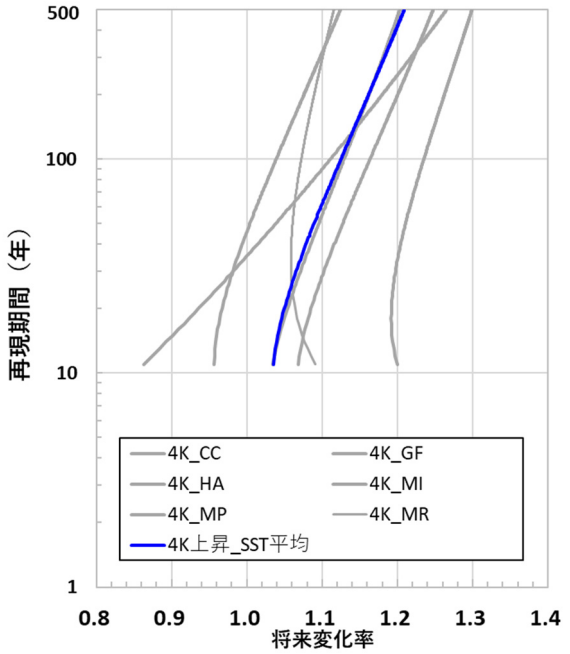


図-3.22　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（大阪湾）（将来実験（+4K））

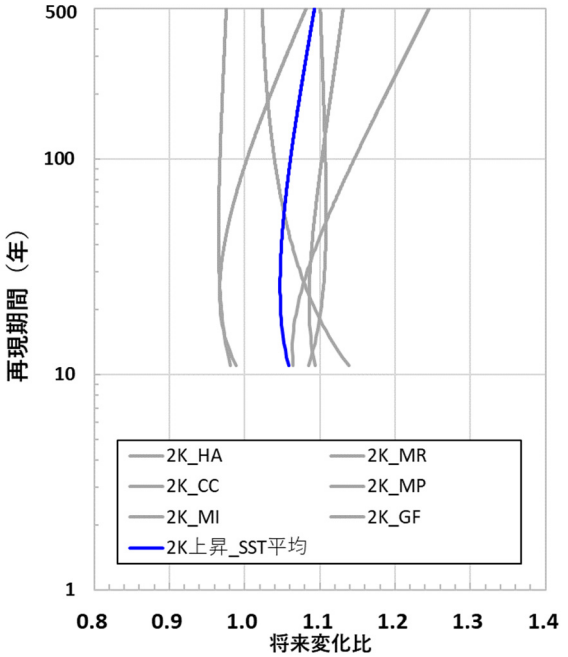


図-3.21　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（大阪湾）（将来実験（+2K））

4. 波高の将来変化予測

4.1 東京湾

第2章に示したように，抽出した台風擾乱を対象に，気圧場・風場，波浪の数値解析手法を用いて，波高を算出し，極値統計解析を実施した．

港湾施設の設計波として広く用いられている再現期間50年の波高について着目する．

東京湾における再現期間50年の波高について，将来実験における波高を過去実験における波高で除した将来変化比を算出した．将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の再現期間50年の波高の将来変化比の結果について，6つのSSTを平均した分布を，それぞれ，**図-4.1**および**図-4.2**に示す．将来実験（+2K）と比較して，気温上昇が大きい将来実験（+4K）の波高の方が大きくなっていることが確認できる．さらに，同様に算出した将来実験（+2K）のSST毎の再現期間50年の波高の将来変化比の分布を，**図-4.3**～**図-4.8**に示す．SSTモデルがMIおよびMPでは，東京湾内の広い範囲で，再現期間50年の波高の将来変化比が1.0を下回り，現在気候を表す過去実験と比較して波高が減少している．一方，SSTモデルがHAおよびMRでは，東京湾内の広い範囲で，将来変化比が1.0を上回り，過去実験と比較して波高が増加している．このように，SSTモデルの違いにより，再現期間50年の波高の将来変化比は異なる傾向を示す．

再現期間50年の波高の将来変化比について，将来実験（+4K）のみならず，将来実験（+2K）の全てのSSTの結果によると，横須賀港の近傍の値が大きくなり，また，横浜港の近傍の値が比較的小さくなる共通の傾向が認められる．これは，高潮偏差の将来変化比と同様に，東京湾の特性によるものとも考えられるが，東京湾は閉鎖性の高い海域であることから，湾内で発達する波浪には吹送距離および風向きとの関係が非常に強く影響するため，全ての将来変化比に共通して除算に用いられている過去実験の台風経路の傾向によるものとも考えられる．そのため，この将来変化比の分布を参考に施設毎の設計等に用いるには，過去実験および将来実験（+2K，+4K）における台風シナリオ毎の東京湾内での波浪の発達，ならびに，東京湾における波浪の一般的な発達特性について，更なる検討が必要である．

本検討で用いた解析モデルの特性から，波浪解析では，沿岸に近い海域での波高の結果の信頼性が低い．そのため，**図-2.69**で示した代表地点における将来実験（+2K）におけるSST毎および再現期間毎の波高の将来変化比を，**図-4.9**～**図-4.14**に示すとともに，これらの6つの代表地点の将来気候（+2K）における波高の将来変化比の結果を平均したものを**図-4.15**に示す．いずれの将来実験（+2K）も，6つのSSTの違いにより，将来変化比の結果が大きく異なっている．また，いずれの代表地点でも，再現期間が長くなると，6つのSSTの将来変化比の平均は1.0に近付き，現在気候を表す過去実験と同等となる傾向を示している．横須賀港の近傍の代表地点である大津・馬堀については，他の代表地点と比較して，将来変化比が大きい傾向を示している．

6つのSSTの波高の将来変化比で平均し，さらに，6つの代表地点の波高の将来変化比の平均したものについて，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）を比較したものを，**図-4.16**に示す．将来実験（+2K）と比較して，将来実験（+4K）の高潮偏差の将来変化比は大きくなる傾向を示している．

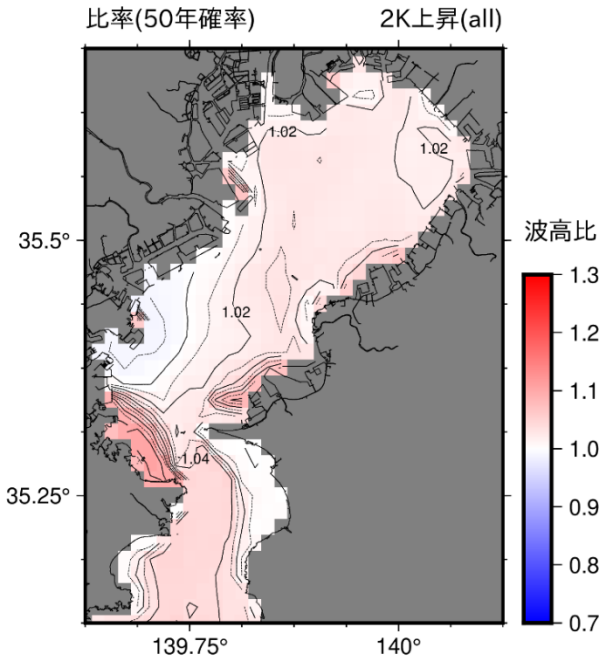


図-4.1 再現期間 50 年の波高の将来変化比（東京湾）（将来実験（+2K））（6SST 平均）

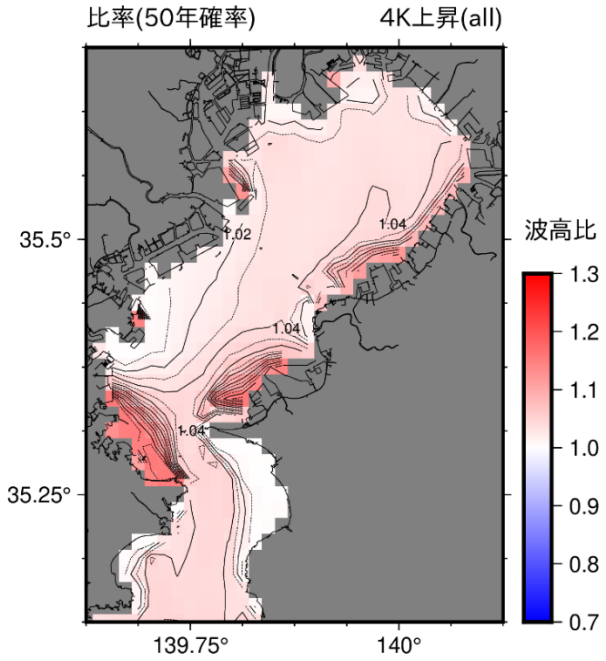


図-4.2　再現期間 50 年の波高の将来変化比（東京湾）（将来実験（+4K））（6SST 平均）

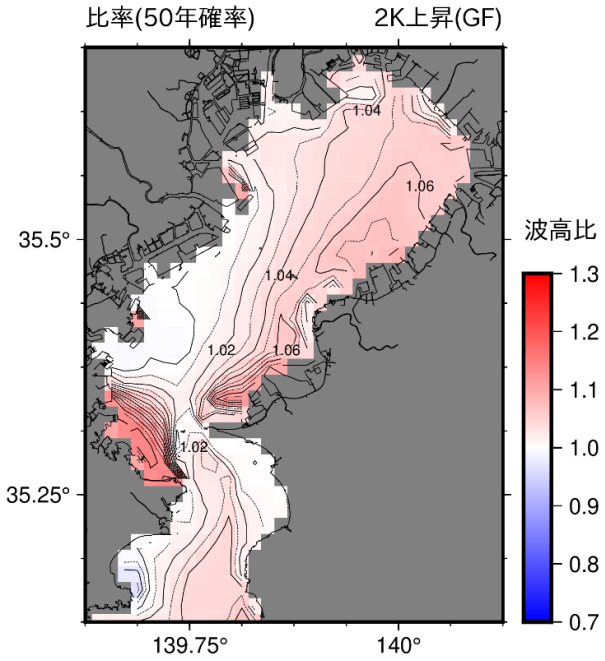


図-4.4　再現期間 50 年の波高の将来変化比（東京湾）（将来実験（+2K））（SST:GF）

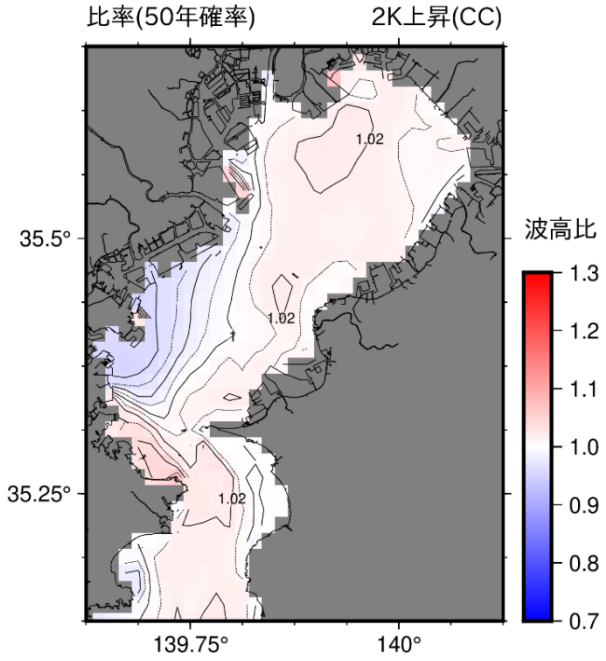


図-4.3　再現期間 50 年の波高の将来変化比（東京湾）（将来実験（+2K））（SST:CC）

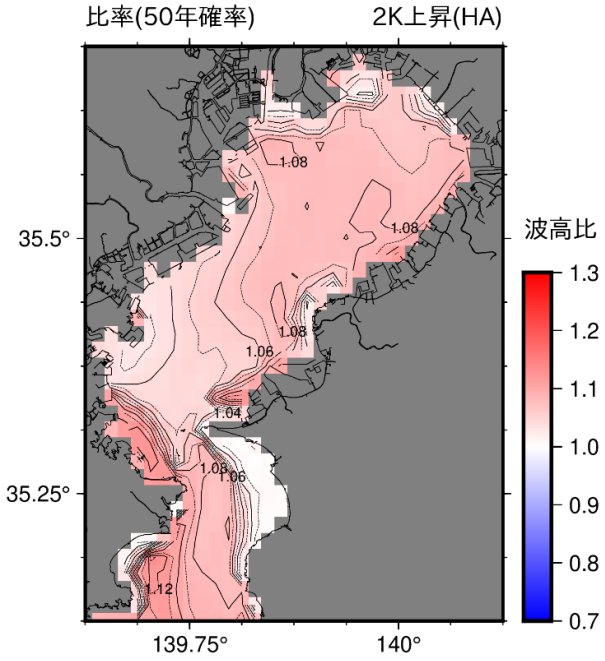


図-4.5　再現期間 50 年の波高の将来変化比（東京湾）（将来実験（+2K））（SST:HA）

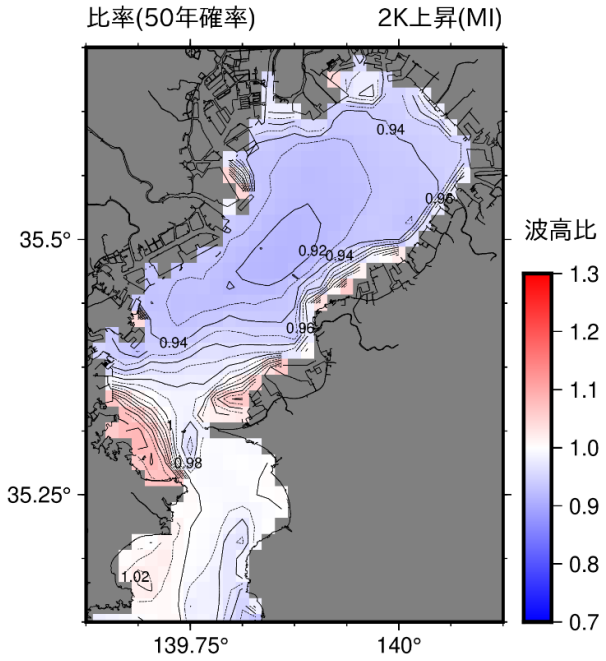


図-4.6　再現期間 50 年の波高の将来変化比（東京湾）（将来実験（+2K））（SST:MI）

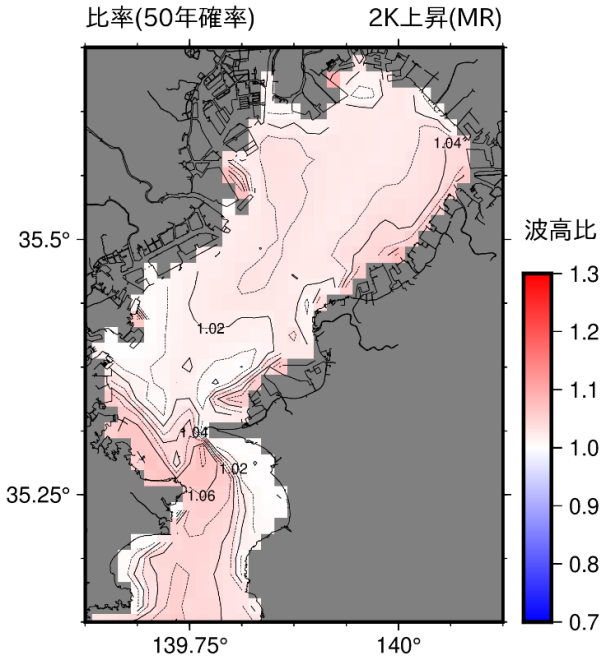


図-4.8　再現期間 50 年の波高の将来変化比（東京湾）（将来実験（+2K））（SST:MR）

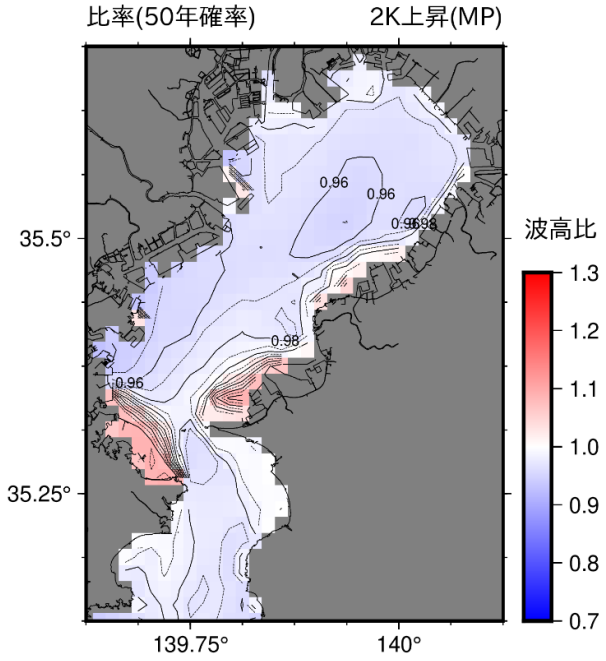


図-4.7　再現期間 50 年の波高の将来変化比（東京湾）（将来実験（+2K））（SST:MP）

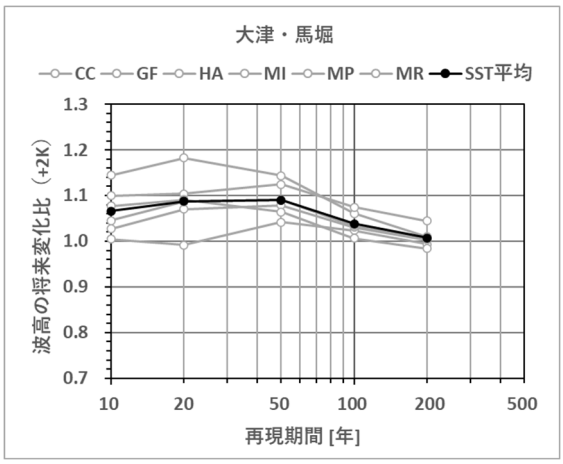


図-4.9　再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（大津・馬堀）（将来実験（+2K））

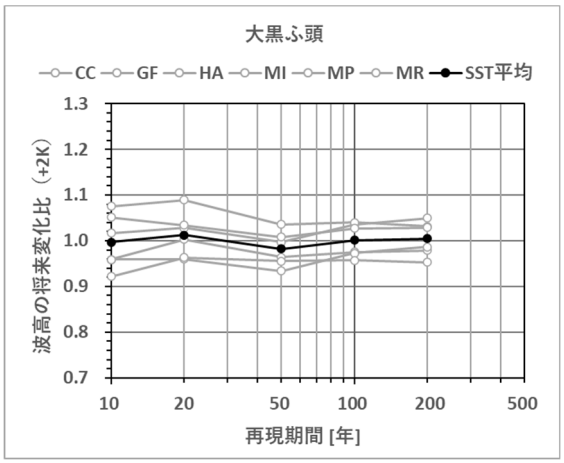


図-4.10 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（大黒ふ頭）（将来実験（+2K））

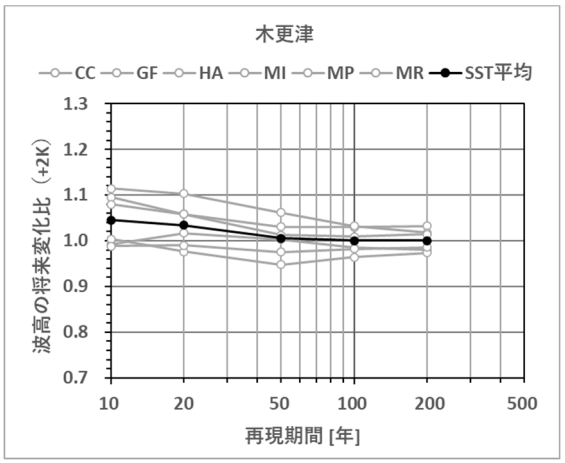


図-4.13 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（木更津）（将来実験（+2K））

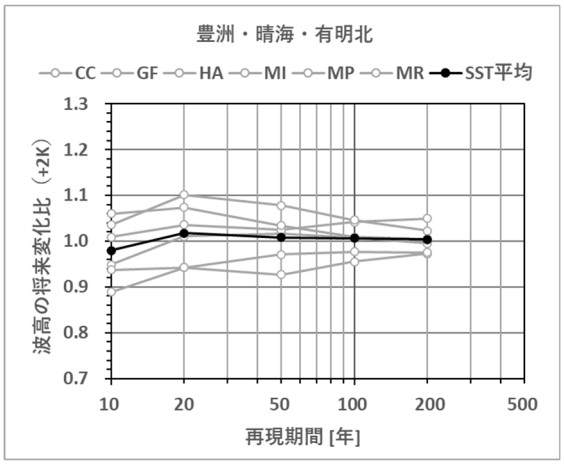


図-4.11 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（豊洲・晴海・有明北）（将来実験（+2K））

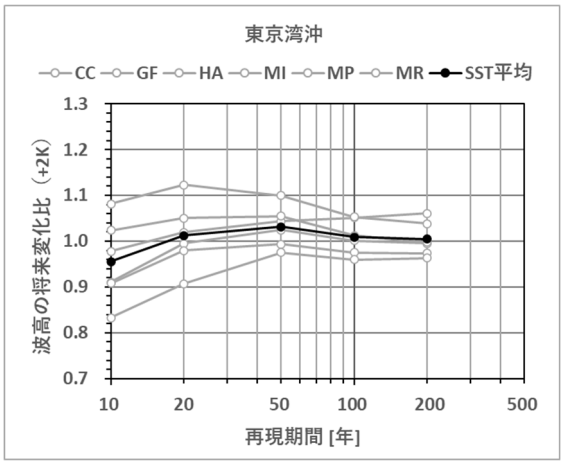


図-4.14 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（東京湾沖）（将来実験（+2K））

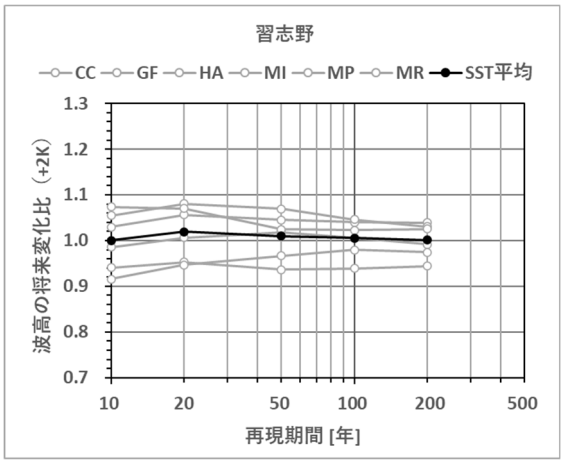


図-4.12 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（習志野）（将来実験（+2K））

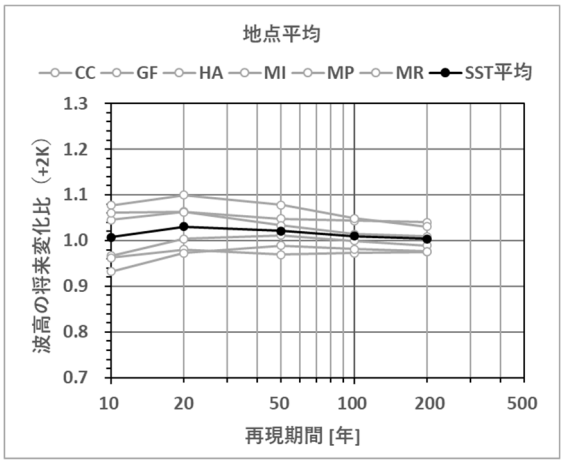


図-4.15 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比の代表地点平均（東京湾）（将来実験（+2K））

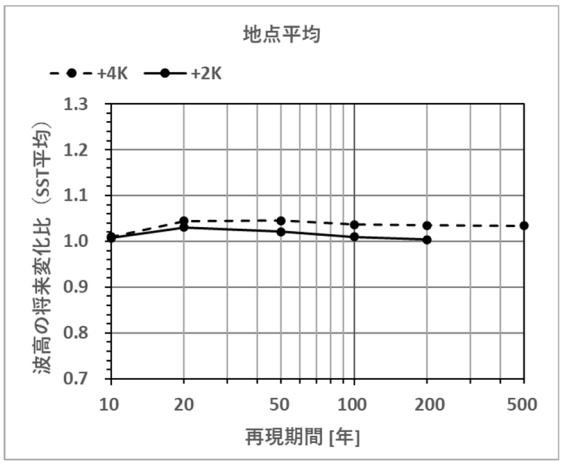


図-4.16 再現期間毎の波高の将来変化比の代表地点平均の将来実験（+2K）と将来実験（+4K）の比較（東京湾）

4.2 伊勢湾

伊勢湾および三河湾における再現期間50年の波高について，将来実験における波高を過去実験における波高で除した将来変化比を算出した．将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の再現期間50年の波高の将来変化比の結果について，6つのSSTを平均した分布を，それぞれ，**図-4.17**および**図-4.18**に示す．将来実験（+2K）と比較して，気温上昇が大きい将来実験（+4K）の波高の方が大きくなっていることが確認できる．さらに，同様に算出した将来実験（+2K）のSST毎の再現期間50年の波高の将来変化比の分布を，**図-4.19**～**図-4.24**に示す．SSTモデルがGFおよびHAでは，伊勢湾および三河湾内の広い範囲で，再現期間50年の波高の将来変化比が1.0を下回り，現在気候を表す過去実験と比較して波高が減少している．SSTモデルがMPでは，伊勢湾内の広い範囲で1.0を下回っているが，三河湾内では1.0を上回っている．一方，SSTモデルがMIおよびMRでは，伊勢湾および三河湾内の広い範囲で，将来変化比が1.0を上回り，過去実験と比較して波高が増加している．このようにSSTモデルの違いにより，再現期間50年の波高の将来変化比は異なる傾向を示す．

再現期間50年の波高の将来変化比について，将来実験（+4K）のみならず，将来実験（+2K）の全てのSSTの結果によると，津松阪港以南の沿岸や三河港の近傍の値が大きくなる共通の傾向が認められる．これは，高潮偏差の将来変化比と同様に，伊勢湾および三河湾の特性によるものとも考えられるが，伊勢湾および三河湾は閉鎖性の高い海域であることから，湾内で発達する波浪には吹送距離および風向きとの関係が非常に強く影響するため，全ての将来変化比に共通して除算に用いられている過去実験の台風経路の傾向によるものとも考えられる．そのため，この将来変化比の分布を参考に施設毎の設計等に用いるには，過去実験および将来実験（+2K，+4K）における台風シナリオ毎の伊勢湾内での波浪の発達，ならびに，伊勢湾における波浪の一般的な発達特性について，更なる検討が必要である．

本検討で用いた解析モデルの特性から，波浪解析では，沿岸に近い海域での波高の結果の信頼性が低いため，**図-2.70**で示した代表地点における将来実験（+2K）におけるSST毎および再現期間毎の波高の将来変化比を，**図-4.25**～**図-4.30**に示すとともに，これらの6つの代表地点の将来気候（+2K）における波高の将来変化比の結果を平均したものを**図-4.31**に示す．いずれの将来実験（+2K）も，6つのSSTの違いにより，将来変化比の結果が大きく異なっている．また，いずれの代表地点でも，再現期間

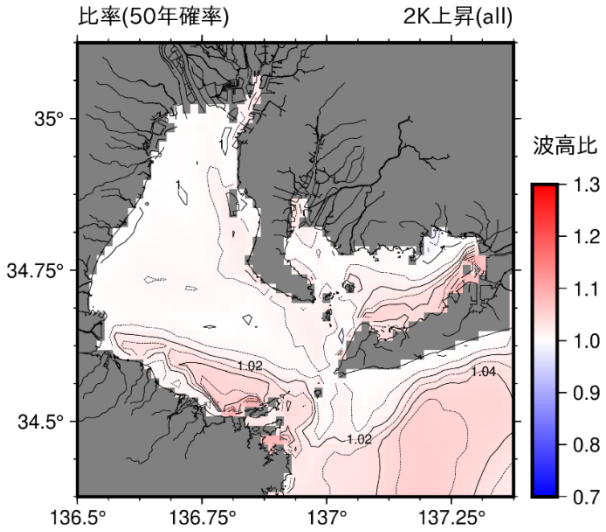


図-4.17 再現期間 50 年の波高の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+2K））（6SST 平均）

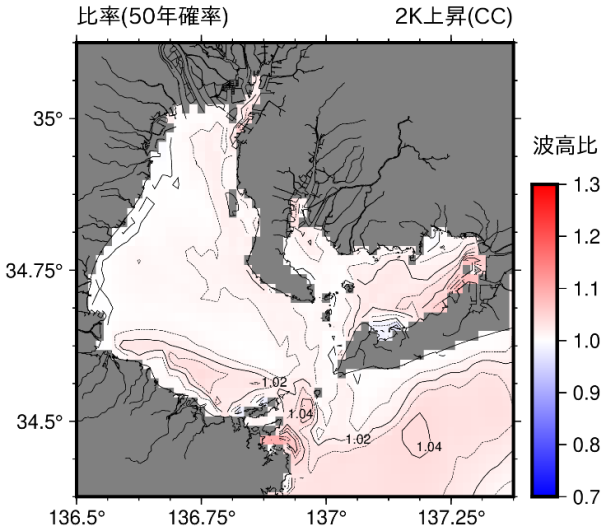


図-4.19 再現期間 50 年の波高の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+2K））（SST:CC）

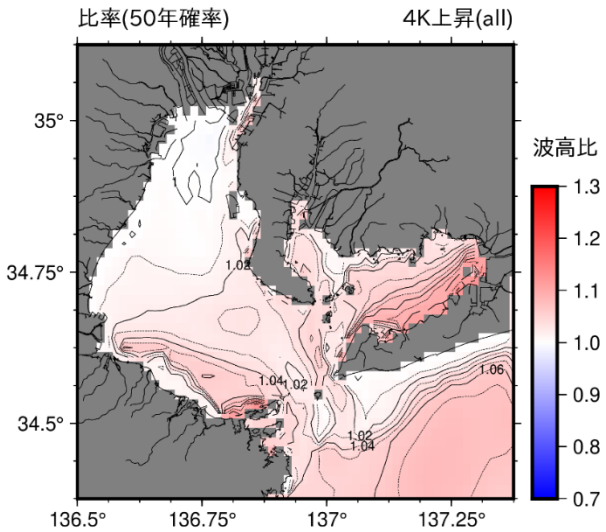


図-4.18 再現期間 50 年の波高の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+4K））（6SST 平均）

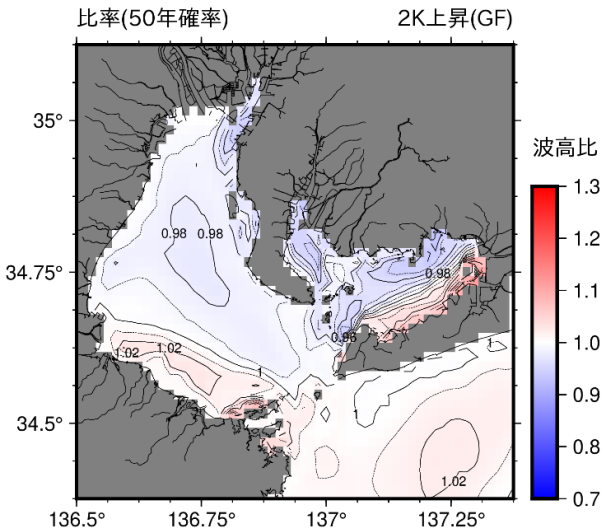


図-4.20 再現期間 50 年の波高の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+2K））（SST:GF）

100年以下の波高に対する6つのSSTの将来変化比の平均は，ほぼ同様に1.0に近い値を示しており，現在気候を表す過去実験と大きな差異が生じない傾向を示している．

6つのSSTの波高の将来変化比で平均し，さらに，6つの代表地点の波高の将来変化比の平均したものについて，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）を比較したものを，**図-4.32**に示す．将来実験（+2K）と比較して，将来実験（+4K）の高潮偏差の将来変化比は大きくなる傾向を示している．

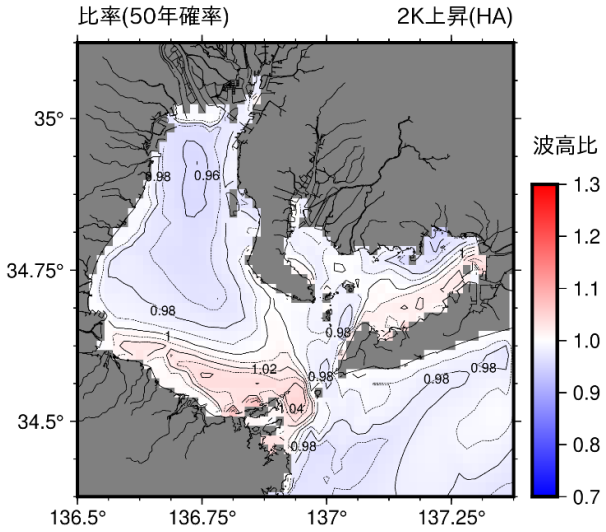


図-4.21 再現期間 50 年の波高の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+2K））（SST:HA）

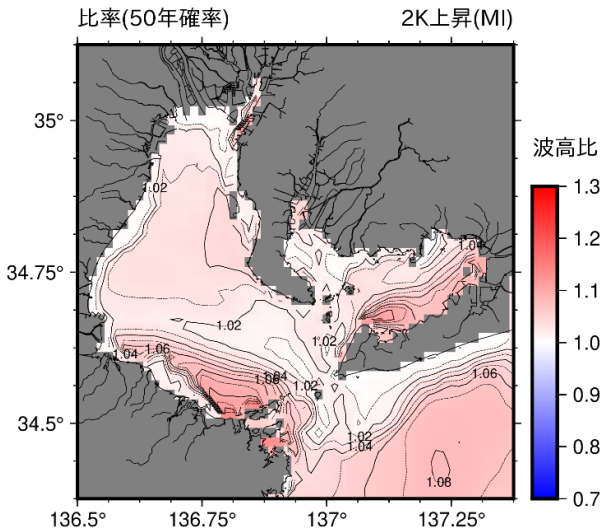


図-4.22 再現期間 50 年の波高の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+2K））（SST:MI）

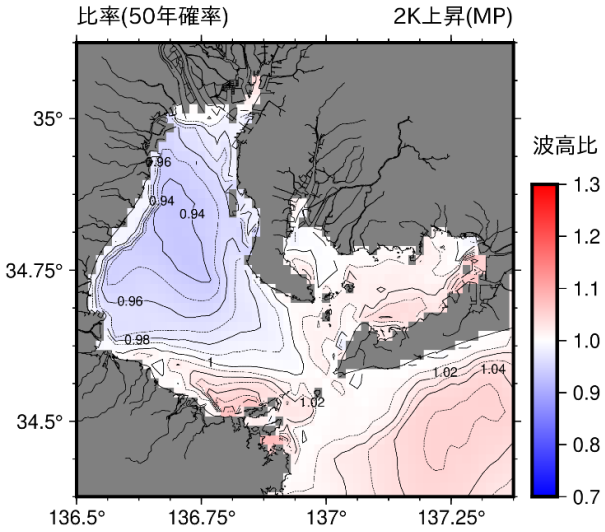


図-4.23 再現期間 50 年の波高の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+2K））（SST:MP）

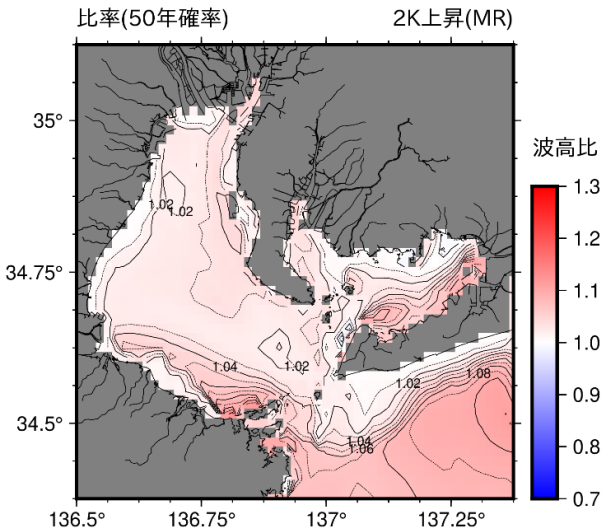


図-4.24 再現期間 50 年の波高の将来変化比（伊勢湾）（将来実験（+2K））（SST:MR）

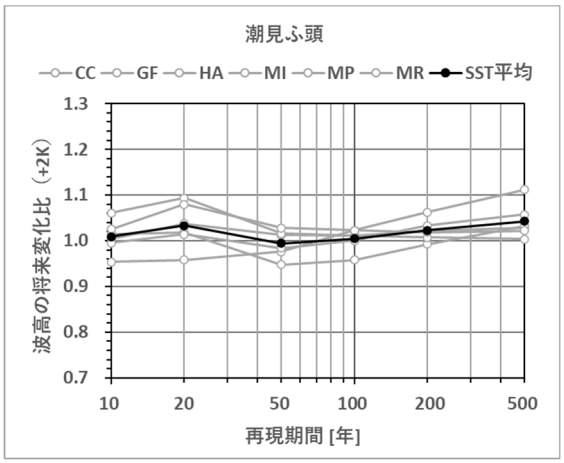


図-4.25 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（潮見ふ頭）（将来実験（+2K））

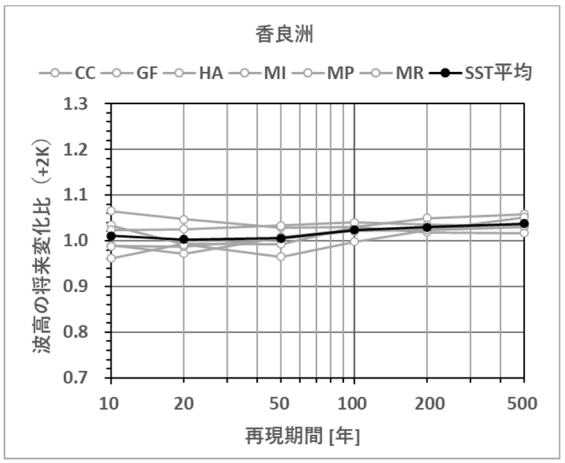


図-4.28 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（香良洲）（将来実験（+2K））

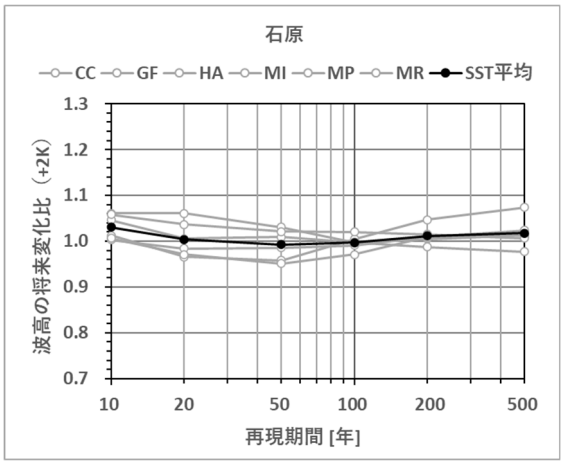


図-4.26 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（石原）（将来実験（+2K））

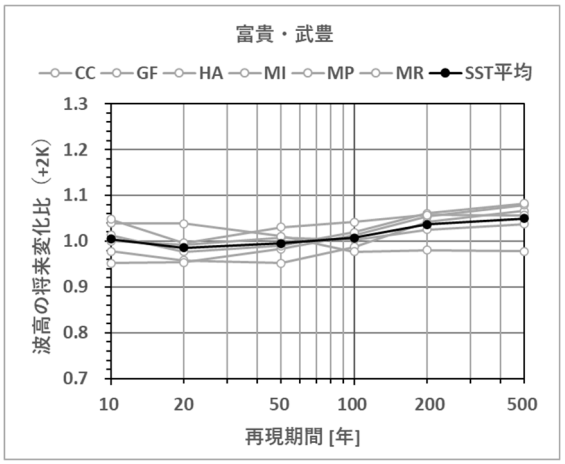


図-4.29 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（富貴・武豊）（将来実験（+2K））

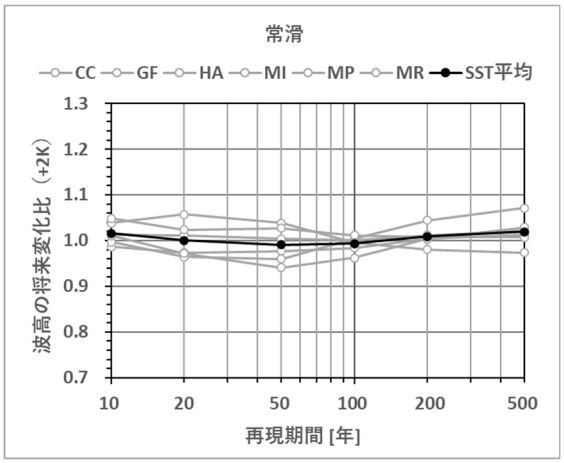


図-4.27 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（常滑）（将来実験（+2K））

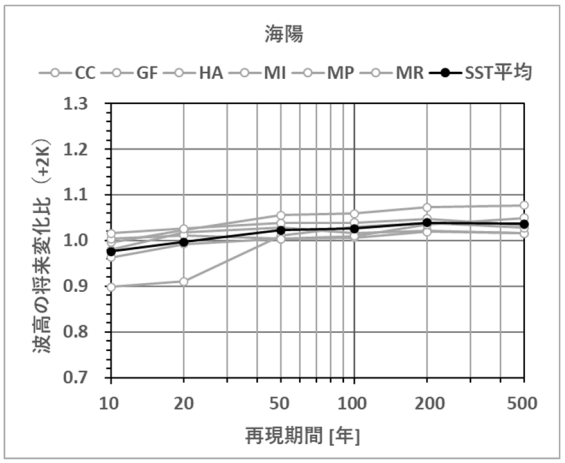


図-4.30 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（海陽）（将来実験（+2K））

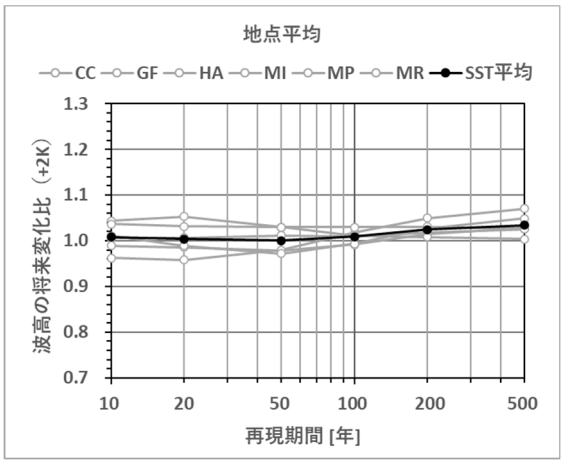


図-4.31 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比の代表地点平均（伊勢湾）（将来実験（+2K））

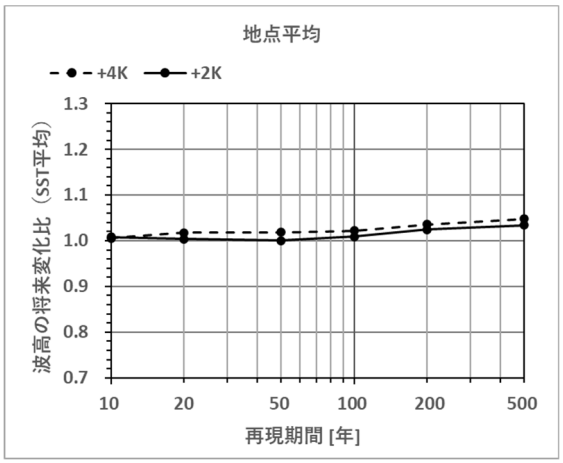


図-4.32 再現期間毎の波高の将来変化比の代表地点平均の将来実験（+2K）と将来実験（+4K）の比較（伊勢湾）

4.3 大阪湾

大阪湾における再現期間50年の波高について，将来実験における波高を過去実験における波高で除した将来変化比を算出した．将来実験（+2K）および将来実験（+4K）の再現期間50年の波高の将来変化比の結果について，6つのSSTを平均した分布を，それぞれ，**図-4.33**および**図-4.34**に示す．将来実験（+2K）と比較して，気温上昇が大きい将来実験（+4K）の波高の方が大きくなっていることが確認できる．さらに，同様に算出した将来実験（+2K）のSST毎の再現期間50年の波高の将来変化比の分布を，**図-4.35～図-4.40**に示す．SSTモデルがMPでは，大阪湾内の広い範囲で，再現期間50年の波高の将来変化比が1.0を下回り，現在気候を表す過去実験と比較して波高が減少している．SSTモデルがCCでは，大阪湾の西側で1.0を下回っているが，東側では1.0を上回っている．一方，SSTモデルがGF，HA，MIおよびMRでは，大阪湾内の広い範囲で，将来変化比が1.0を上回り，過去実験と比較して波高が増加している．このように，SSTモデルの違いにより，再現期間50年の波高の将来変化比は異なる傾向を示す．

再現期間50年の波高の将来変化比について，将来実験（+4K）のみならず，将来実験（+2K）のCCを除く全てのSSTの結果によると，淡路島の南東岸や淡輪の近傍の値が大きくなる共通の傾向が認められる．これは，大阪湾の特性によるものとも考えられるが，大阪湾も閉鎖性の高い海域であることから，湾内で発達する波浪には吹送距離および風向きとの関係が非常に強く影響するため，全ての将来変化比に共通して除算に用いられている過去実験の台風経路の傾向によるものとも考えられる．しかし，大阪湾内の高潮偏差の将来変化比では，このような共通の傾向は認められていない．そのため，この将来変化比の分布を参考に施設毎の設計等に用いるには，過去実験および将来実験（+2K，+4K）における台風シナリオ毎の大阪湾内での波浪の発達，ならびに，大阪湾における波浪の一般的な発達特性について，更なる検討が必要である．

本検討で用いた解析モデルの特性から，波浪解析では，沿岸に近い海域での波高の結果の信頼性が低い．そのため，**図-2.71**で示した代表地点における将来実験（+2K）におけるSST毎および再現期間毎の波高の将来変化比を，**図-4.41～図-4.45**に示すとともに，これらの5つの代表地点の将来気候（+2K）における波高の将来変化比の結果を平均したものを**図-4.46**に示す．いずれの将来実験（+2K）も，6つのSSTの違いにより，将来変化比の結果が大きく異なっている．また，いずれの代表地点でも，

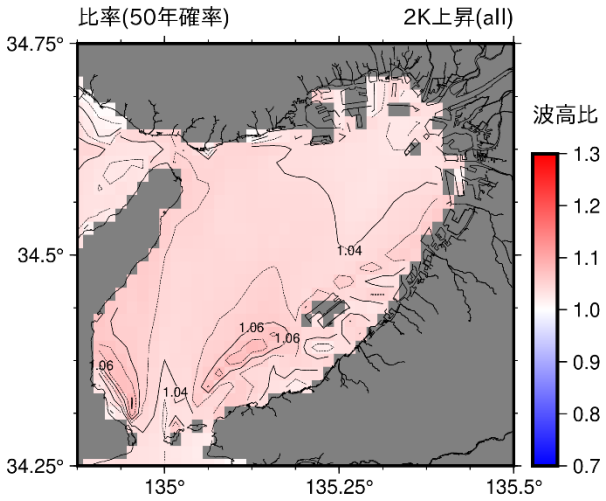


図-4.33 再現期間 50 年の波高の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+2K））（6SST 平均）

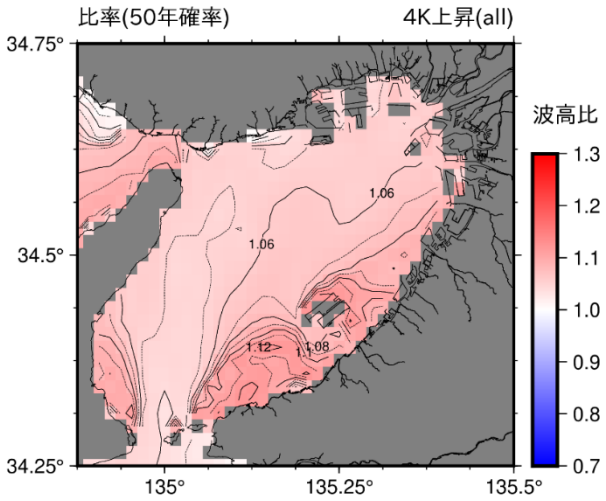


図-4.34 再現期間 50 年の波高の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+4K））（6SST 平均）

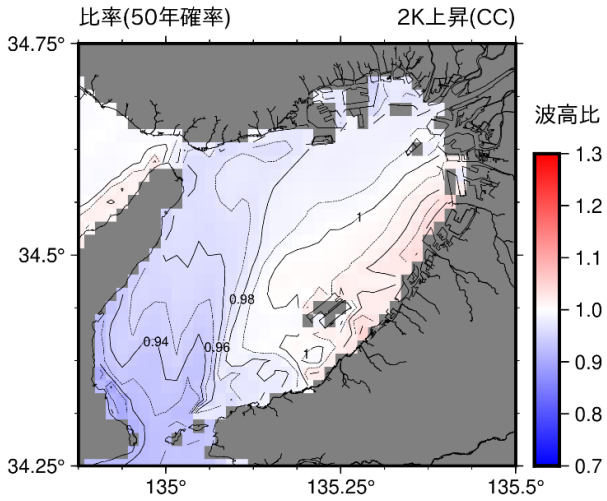


図-4.35 再現期間 50 年の波高の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+2K））（SST:CC）

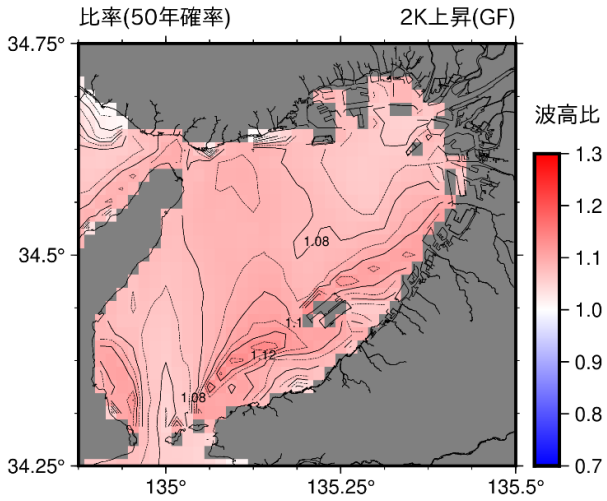


図-4.36 再現期間 50 年の波高の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+2K））（SST:GF）

再現期間が長くなると，6つのSSTの将来変化比の平均は1.0 に近付き，現在気候を表す過去実験と同等となる傾向を示している．また，いずれの代表地点でも，再現期間100年以下の波高に対する6つのSSTの将来変化比の平均は，ほぼ同様に1.0を超える値を示しており，現在気候を表す過去実験よりも波高が大きい傾向を示し，再現期間が100年を超える，6つのSSTの将来変化比の平均は1.0に近付き，現在気候を表す過去実験と同等となる傾向を示している．

6つのSSTの波高の将来変化比で平均し，さらに，6つの代表地点の波高の将来変化比の平均したものについて，将来実験（+2K）および将来実験（+4K）を比較したものを，**図-4.47**に示す．将来実験（+2K）と比較して，将来実験（+4K）の高潮偏差の将来変化比は大きくなる傾向を示している．

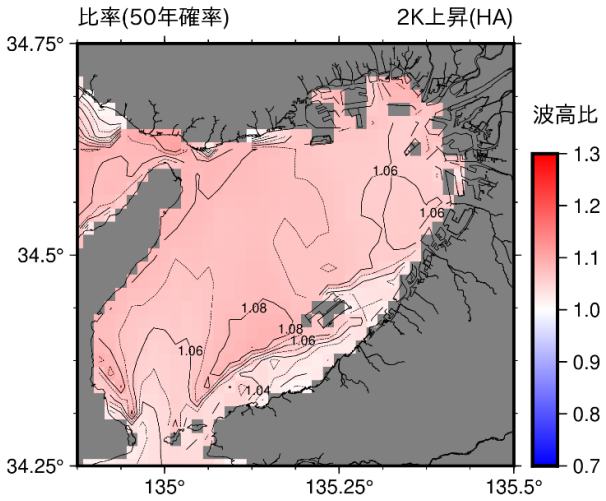


図-4.37 再現期間 50 年の波高の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+2K））（SST:HA）

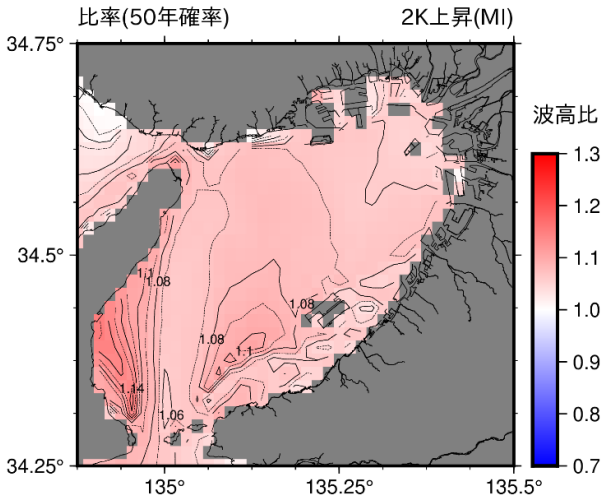


図-4.38 再現期間 50 年の波高の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+2K））（SST:MI）

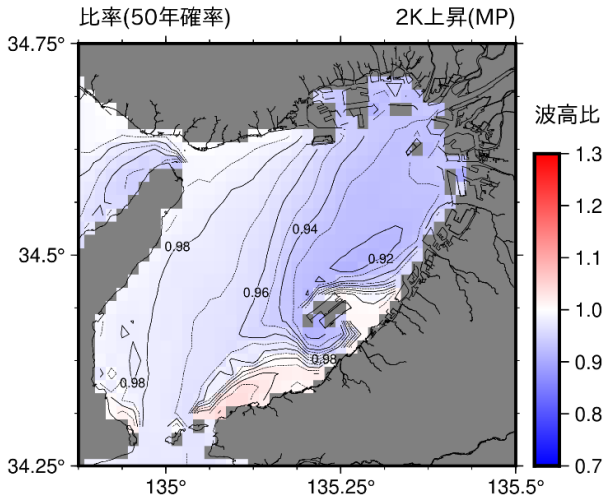


図-4.39 再現期間 50 年の波高の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+2K））（SST:MP）

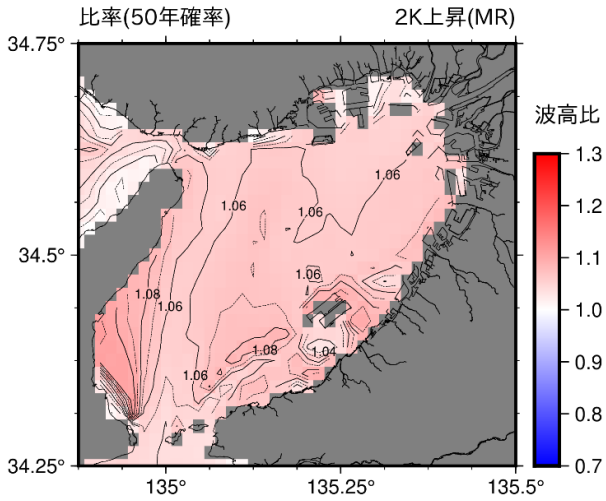


図-4.40 再現期間 50 年の波高の将来変化比（大阪湾）（将来実験（+2K））（SST:MR）

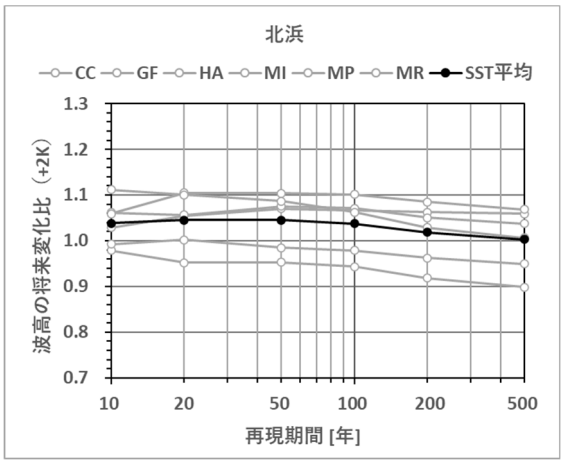


図-4.41 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（北浜）（将来実験（+2K））

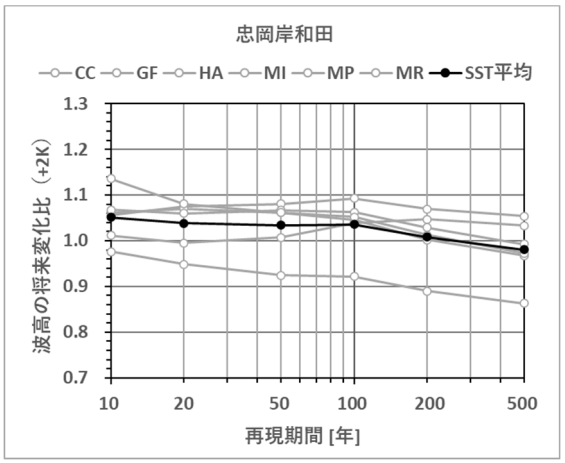


図-4.44 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（忠岡岸和田）（将来実験（+2K））

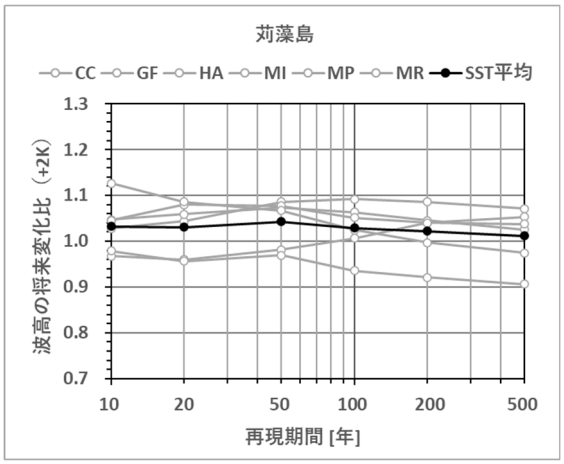


図-4.42 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（苅藻島）（将来実験（+2K））

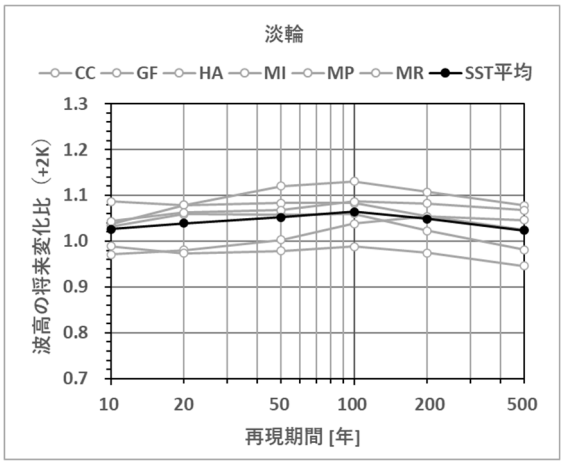


図-4.45 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（淡輪）（将来実験（+2K））

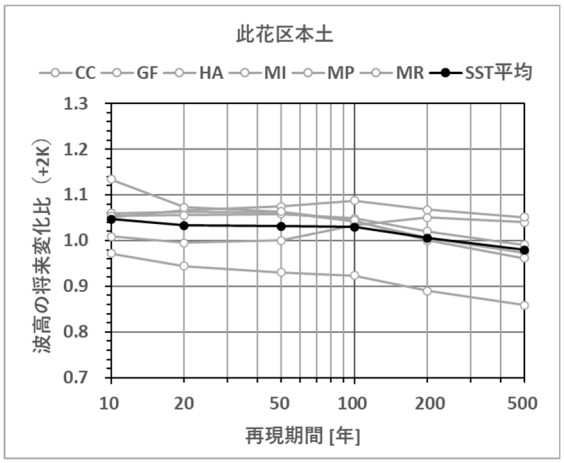


図-4.43 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比（此花区本土）（将来実験（+2K））

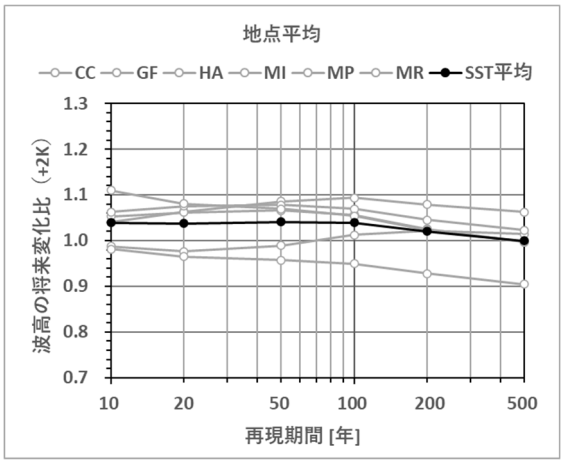


図-4.46 再現期間毎および SST 毎の波高の将来変化比の代表地点平均（大阪湾）（将来実験（+2K））

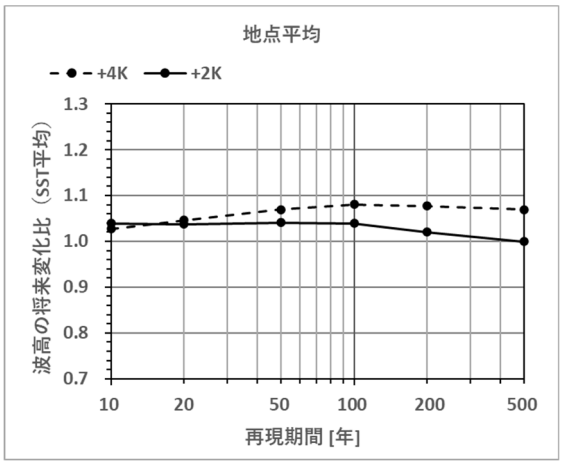


図-4.47 再現期間毎の波高の将来変化比の代表地点平均の将来実験（+2K）と将来実験（+4K）の比較（大阪湾）

5. まとめ

本研究では，第2章に示したように，抽出した台風擾乱を対象に，気圧場・風場，高潮および波浪の数値解析手法を用いて，３大湾内の高潮偏差および波高を算出するとともに，極値統計解析を実施し，それらの結果を第3章および第4章に示した．

気候変動に関する国際的枠組みであるパリ協定においては，「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて2℃未満に抑え，1.5℃までに抑える努力をする」との目標を掲げ，日本を含め世界各国において温室効果ガスの排出抑制を進められている．そのため，港湾施設の設計に気候変動を考慮する際には，本研究において対象とした2ケースの将来実験(+2K, +4K)のうち, 将来実験(+2K)を基本とすることが妥当であると考えられる．しかし，2℃以上の世界の平均気温の上昇も否定できないことから，将来予測の上振れリスクの考慮等においては，本研究における将来実験（+4K）の結果を参考とすることも必要である．

そこで，本章では，本研究の結果を用いて実際の港湾施設の設計に気候変動の影響を考慮する際について，将来実験（+2K）に着目して，参考とする値や留意点を述べる．

将来実験（+2K）による３大湾の将来変化比の空間分布について，高潮偏差は，**図-3.4**，**図-3.11**および**図-3.19**，波高は，**図-4.1**，**図-4.17**および**図-4.33**に示すように，湾内の全体に渡って緩やかな分布となっている大阪湾の高潮偏差の将来変化比を除いて，湾内の一部の沿岸で大きくなるといった傾向が確認された．これは，各湾の形状等といった特性によるものとも考えられるが，３大湾は閉鎖性が高い海域であり，高潮偏差および波高は台風経路の傾向に非常に大きく影響していることも否定できない．これらの将来変化比は，本研究で用いた過去実験の結果によって将来実験の結果を除して算出したことから，過去実験の台風経路の傾向や，長い再現期間でサンプル数が少ない将来実験の台風経路の傾向によって影響していることが考えられる．このことから，これらの台風経路の傾向の信頼性を確認せず，本研究における将来変化比の分布を参考に，３大湾内の港湾施設毎にその将来変化比の分布における当該施設の値をそのまま設計に用いることは適切ではない．

しかし，本研究の結果は，各湾内における将来変化比の分布についての台風経路の傾向の信頼性の更なる確認が必要であるものの，各湾の全体としての将来変化比の変化傾向は評価できているものと考えられる．そこで，

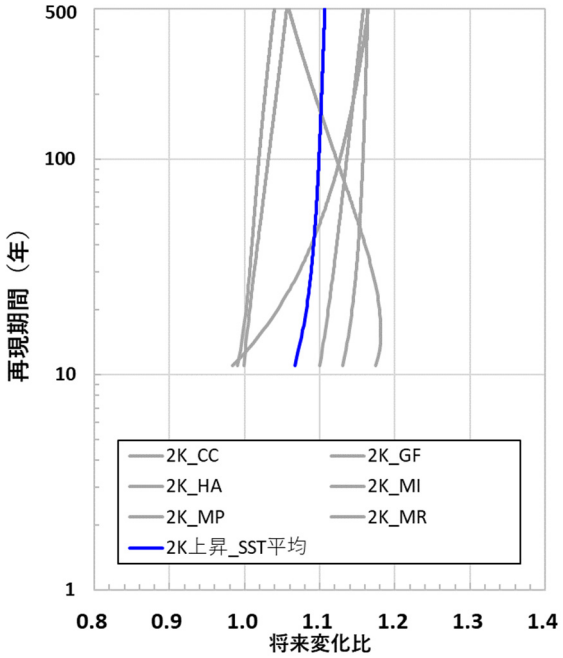


図-5.1　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（東京湾）（将来実験（+2K））（再掲）

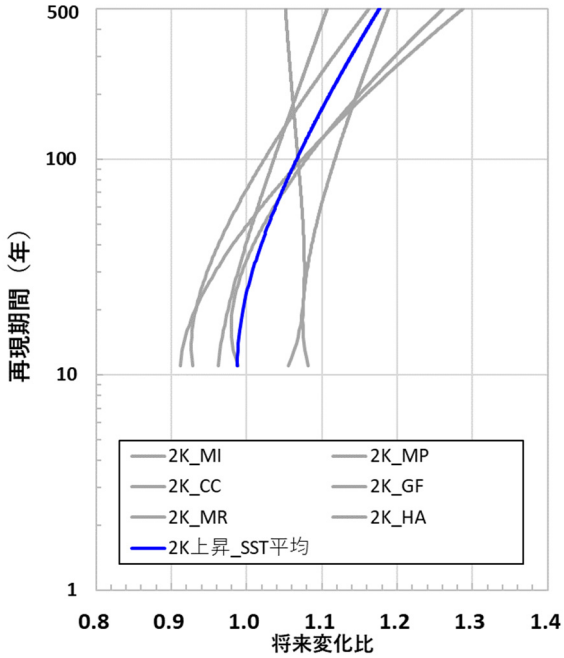


図-5.2　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（伊勢湾）（将来実験（+2K））（再掲）

高潮偏差については，湾毎の将来変化比の空間平均を算出し，波高については，湾毎の将来変化比の代表地点に対する平均を算出した．港湾施設の設計に気候変動の影響を考慮する際において，各湾内における将来変化比の分布についての台風経路の傾向の信頼性の更なる確認を実施できない場合には，これらの湾毎の将来変化比の空間平均または代表地点に対する平均を，当該湾における代表値として用いることが考えられる．

将来実験（+2K）について，再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均の３大湾の湾毎の結果（図-3.6，図-3.13および図-3.21）を，図-5.1～図-5.3に再掲する．東京湾および大阪湾については，再現期間による高潮偏差の将来変化比の変化は比較的小さいものの，伊勢湾については，とくに再現期間100年以上における再現期間に応じた変化が大きくなっている．これは，将来実験（+2K）の6つの各SSTにおける再現期間100年以上のサンプル数は，高々5つのサンプル程度であることから，統計的安定性を踏まえると，再現期間100年以上の将来変化比の信頼性が低いことが考えられる．そのため，本研究の高潮偏差の将来変化比の結果を参考にする際には，再現期間100年以下を対象とする必要がある．一方，確率台風モデルを用いて高潮偏差を確率評価した河合（2010）によると，３大湾の代表港湾における高潮偏差の設計値の再現期間は，伊勢湾および大阪湾では100年程度で，東京湾では1,000年程度であると推定されている．そのため，

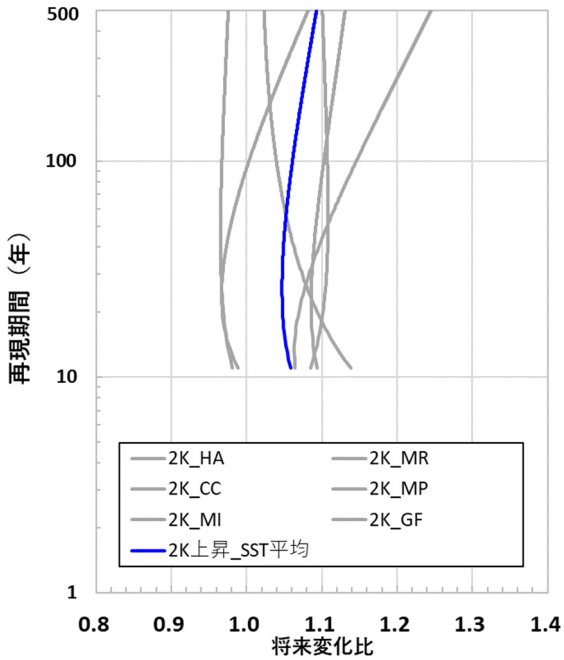


図-5.3　再現期間毎の高潮偏差の将来変化比の空間平均（大阪湾）（将来実験（+2K））（再掲）

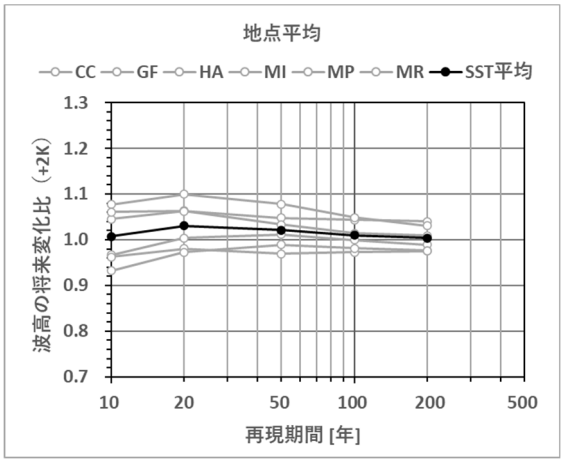


図-5.4　再現期間毎の波高の将来変化比の代表地点平均（東京湾）（将来実験（+2K））（再掲）

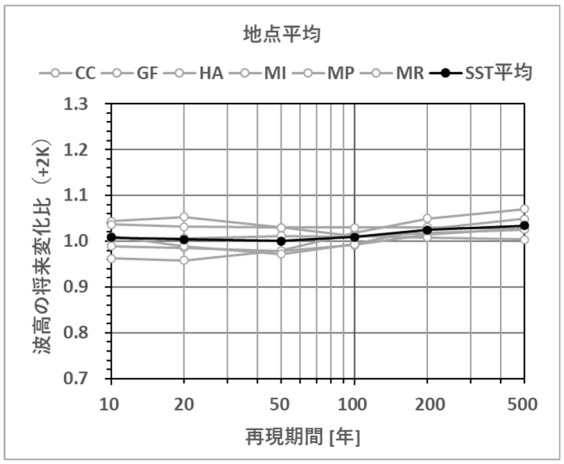


図-5.5　再現期間毎の波高の将来変化比の代表地点平均（伊勢湾）（将来実験（+2K））（再掲）

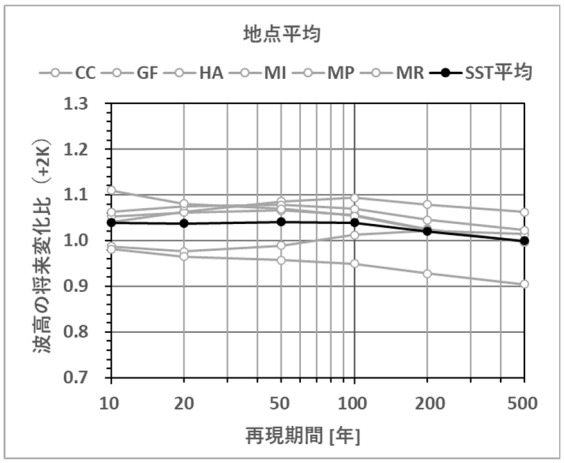


図-5.6　再現期間毎の波高の将来変化比の代表地点平均（大阪湾）（将来実験（+2K））（再掲）

東京湾での高潮偏差の将来変化比は，再現期間1,000年程度を参考にする必要がある．しかし，**図-5.1**によると，サンプル数が少なく統計的な信頼性が低いものの，東京湾における再現期間100年以上の高潮偏差の将来変化比は，6つのSSTの全て結果の平均やばらつきには，大きな変化は認められないため，東京湾においても，再現期間100年の高潮偏差の将来変化比を参考にすることができると考えられる．

次に，将来実験（+2K）の再現期間毎の波高の将来変化比について，３大湾の湾毎の代表地点に対する平均の結果（**図-4.15**，**図-4.31**および**図-4.46**）を，**図-5.4**～**図-5.6**に再掲する．一般的に，港湾施設の設計に用いる波高の再現期間は50年であり，また，施工時に想定する波高の再現期間は10年である．これらの再現期間における波高の将来変化比は，十分なサンプル数となる再現期間の範囲における結果であり，前述の高潮偏差の将来変化比における統計的安定性を踏まえると，信頼性は高い結果であることから，本研究の結果を参考にできると考えられる．

以上のことを踏まえて，将来変化比について，高潮偏差では再現期間100年，波高では一般的に設計に用いられている再現期間50年に着目する．**図-5.1**～**図-5.3**および**図-5.4**～**図-5.6**を確認すると，再現期間100年の高潮偏差についても，再現期間50年の波高についても，将来実験（+2K）の6つのSST毎の結果に差異が生じている．一般的に，不確実性には2種類あり，サイコロの目のような偶然的不確実性と，予測モデルの差異といったような認識論的不確実性がある．この6つのSST毎の結果の差異は，認識論的不確実性であり，これらSSTの設定によって，本研究による高潮偏差および波高の将来変化比について予測にばらつきの範囲が生じている．対象とする港湾施設の設計によっては，予測が上振れするリスクを考慮する必要があることから，将来の高潮偏差および波高の予測範囲も評価する必要がある．

そのため，6つのSSTによる高潮偏差および波高の将来変化比について，それらの平均値のみならず，予測の上振れリスクに対応するために，予測範囲の指標として10%tileおよび90%tileについても算出した．具体的には，再現期間100年の高潮偏差および再現期間50年の波高の将来変化比について，それぞれの最大値を100%tileとし，最小値を0%tileとし，6つのSSTによる結果を用いて10%tileおよび90%tileを算出した．

３大湾の湾内の将来実験（+2K）における代表値として，再現期間100年の高潮偏差の湾内の空間平均および再現期間50年の波高の代表地点平均を算出した結果を

表-5.1および**表-5.2**に示す．実際の港湾施設の設計に気候変動の影響を考慮する際には，これらの表に示す値を用いることを推奨する．

なお，本研究の結果では，例えば高潮偏差の将来予測において，将来実験（+2K）の高潮偏差の予測値そのものも示している．しかし，実際の港湾施設の設計に気候変動の影響を考慮する際には，この高潮偏差の予測値そのものではなく，将来変化比を用いることを推奨する．これは，本研究における高潮偏差および波高の計算に用いた計算モデル等にモデルバイアスが含まれていることが否定できないため，結果の過去実験の結果に対する将来実験の結果の比を用いることで，このモデルバイアスを極力低減することが期待できることが理由である．そのため，現在の港湾施設の設計値に対して，高潮偏差および波高の将来変化比を用いて将来気候下における設計値を評価することを推奨する．

将来実験（+4K）は，IPCC第5次報告書のRCP8.5シナリオの2,090年時点を想定したものであり，一方，将来実験（+2K）は，RCP8.5シナリオの2,040年時点の温室効果ガス等の外部強制因子を与えたものである（文部科学省ほか，2022）．これは，RCP2.6シナリオでは，2,040年時点まではRCP8.5シナリオと同様の温暖化の状況であり，その後の温暖化の状況は概ね変化しないためである．そのため，将来実験（+2K）における本研究の結果は，2,040年時点と想定され，その後は概ね変化しないものと考えられることに留意が必要である．

表-5.1　高潮偏差の将来変化比の空間平均

対象湾	100 年確率			（参考）50 年確率
	平均値	10%tile	90%tile	平均値
東京湾	1.10	1.03	1.15	1.09
伊勢湾	1.07	1.03	1.10	1.03
大阪湾	1.06	0.99	1.13	1.05

表-5.2　波高の将来変化比の代表地点平均

対象湾	50 年確率		
	平均値	10%tile	90%tile
東京湾	1.02	0.98	1.06
伊勢湾	1.00	0.98	1.03
大阪湾	1.04	0.97	1.08

6. あとがき

本研究では，実際の港湾施設の設計に気候変動の影響を考慮する際に参考となることを目的とし，３大湾における高潮偏差および波高の将来変化比を算出した．その概要を以下に示す．

３大湾の高潮および波浪の主要擾乱である台風を対象に，高潮および波浪への作用である風場・気圧場について，経験的台風モデルを用いて算出した．一般的な経験的台風モデルは，風速・風向に対する地形の影響を考慮できない．そのため，過去の台風擾乱を対象に，風速・風向の実績と経験的台風モデルの結果を比較し，風速ランク別の風速・風向について逆距離荷重法により，海上風の風速・風向の補正係数を算出し，この補正係数を用いた経験的台風モデルによる風場・気圧場を算出することとした．

この風場を補正する経験的台風モデルによって算出した風場・気圧場を用いて，一般的に実務で用いられている単層の線形長波方程式に基づく数値計算モデルおよび第3世代波浪モデルWAVE WATCH III（Ver.5.16）により，高潮偏差および波高を算出した．これらの高潮偏差および波高には，本研究で用いた数値計算モデルが潜在的に有しているモデルバイアスが含まれていることが想定されるため，過去の観測実績と本研究で用いた数値計算モデルによる結果を比較し，平面的に補正係数を設定し，数値計算モデルによって算出される高潮偏差および波高を補正するものとした．

対象とする台風データについては，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（d4PDF．Mizutaら（2017））をもとに，Shimuraら（2016）の手法によって台風を抽出し作成したWebbら（2019）により提供された台風トラックデータを基本とした．なお，現在気候としては，d4PDFの過去実験を対象とし，将来気候としては，d4PDFの将来実験（+2Kおよび+4Kの2ケース）を対象とした．なお，d4PDFにおける過去実験では，台風の実績と比較して中心気圧が大きい傾向を示すバイアスが含まれているため，台風実績と過去実験とを比較することにより，クオンタイルマッピング法を用いて緯度帯毎に中心気圧のバイアス補正量を算出し，このバイアス補正量を用いてd4PDFによる過去実験および将来実験の台風の中心気圧のバイアスを補正した．

中心気圧のバイアスを補正した台風データを用いて，風速・風向を補正する経験的台風モデル，および，高潮波浪の数値計算モデルにより算出し補正した高潮偏差および波高に対して，極値統計解析を実施し，３大湾の

各湾における高潮偏差および波高の再現期間毎の将来変化比を算出した．なお，将来予測の上振れリスクを評価するために，これらの将来変化比については，将来実験（+2K，+4K）に含まれる6つのSSTといったモデル別に算出した．

将来実験（+2K，+4K）による３大湾の高潮偏差および波高の将来変化比の空間分布は，湾内の全体に渡って緩やかな分布となっている大阪湾の高潮偏差の将来変化比を除いて，湾内の一部の沿岸で大きくなるといった傾向が確認された．この要因については，過去実験および将来実験（+2K，+4K）における台風シナリオ毎の湾内の高潮・波浪の発達，ならびに，湾内における高潮・波浪の一般的な発達特性を踏まえた更なる検討が必要であり，今後の課題として挙げられる．また，高潮偏差および波高の将来変化比は，いずれも，将来実験（+2K）と比較して，将来実験（+4K）の方が大きくなる傾向が確認された．

３大湾の湾内の将来実験（+2K）における代表値として，再現期間100年の高潮偏差の湾内の空間平均および再現期間50年の波高の代表地点平均を算出した．これらの結果は，6つのSSTによって差異が生じていることが確認された．そのため，これら6つの平均値のみならず，予測の上振れリスクに対応する検討に資するため，90%tileについても示した．実際の港湾施設の設計に気候変動の影響を考慮する際には，これらの値を参考とすることを推奨する．

本研究では，実際の港湾施設の設計に気候変動の影響を考慮する際に参考となることを目的としたが，本研究で提示した結果は，高潮偏差および波高の将来変化であり，港湾施設の設計に必要な波浪の周期および波向の将来変化を示していない．そのため，これら波浪の周期および波向の将来変化については，今後の課題としたい．

（2023 年 11 月 28 日受付）

謝辞

本研究では，文部科学省・気象庁の「気候予測データセット2022」に収録されているd4PDF熱帯低気圧トラックデータ（Webbら（2019））を利用した．また気候予測データセット2022は，文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で，収集・提供されたものである．

参考文献

有吉　望・森　信人（2018）：北西太平洋の台風の最大潜在強度を用いた３大湾における高潮偏差の将来変化予測，土木学会論文集 B2(海岸工学)，74(2)，pp.I_619-I_624.

石井正好・森　信人（2022）：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の開発と気候変動リスク評価研究成果の社会実装，気象学会，天気，69 巻 8 号, pp.413-430.

井手喜彦・一色勇志・児玉充由・橋本典明・山城賢 (2017a)：将来気候データにおける台風中心気圧のバイアス補正手法に関する検討，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.73，No.2，pp．I_1417-I_1422.

井手喜彦・山上澪・山城賢・橋本典明 (2017b)：経験的台風モデルにより推算された風場の補正法の構築，土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.73, No.2, pp. I_144-I_149.

梅田尋慈・中條壮大・森信人（2019）：大規模アンサンブル気候予測データ(d4PDF)を用いた全球確率台風モデルの開発, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.75, No.2，I_1195-1200.

岡本侃大・本多和彦・百海郁弥(2023a)：ブートストラップ法を用いた高潮・高波の偶然的不確実性の評価，国土技術政策総合研究所研究報告，No.71，22p.

岡本侃大・百海郁弥・本多和彦 (2023b)：将来気候における高潮・高波の不確実性の評価，国土技術政策総合研究所資料，No.1248，51p.

河合弘泰・本多和彦・富田孝史・柿沼太郎 (2005)：2004 年に発生した台風の特徴と高潮の予測・再現計算，港湾空港技術研究所資料，No.1103，34p.

河合弘泰(2010)：高潮数値計算技術の高精度化と気候変動に備えた防災への適用，港湾空港技術研究所資料，No.1210，97p.

河合弘泰・合田良実・久高将信・仲井圭二（2010）：地域頻度解析手法による我が国沿岸の高潮偏差の極値統計解析，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.66，No.1，pp. 121-125.

気候変動を踏まえた海岸保全のあり方検討委員会（2020）：気候変動を踏まえた海岸保全のあり方 提言（令和 2 年 7 月），20p.

気候予測データセット（DS2022）：https://diasjp.net/ds2022/（閲覧日：2023 年 5 月 31 日）

北野利一・間瀬 肇・喜岡 渉・矢野陽一郎（2002）：一般化パレート分布による極値波浪解析－拡張形状母数の推定－, 海岸工学論文集, 第 49 巻， pp. 161-165.

局地数値予報モデル GPV（LFM）：http://www.jmbsc.or.jp/jp/online/file/f-online10300.html（閲覧日：2023 年 5 月 31 日）

合田良実・久高将信（2009）：高波の極値統計解析に対する L-moments 法の適用と分布関数の選択について，ECOH/YG 技術論文，No. 10，12p.

合田良実・久高将信・河合弘泰（2009）：L-moments 法を用いた波浪の極値統計解析について，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.65，No.1，pp. 161-165.

合田良実・久高将信（2010）：L-モーメント法による日本海沿岸の高波の地域頻度解析について，ECOH/YG 技術論文，No. 12，13p.

合田良実（2010）：L-モーメント法を用いた高波の極値統計解析におけるプロッティングポジション公式の選択と各種統計量の信頼区間，ECOH/YG 技術論文 No. 13，29p.

合田良実・久高将信（2011）：L-モーメント法による日本海沿岸の高波の地域頻度解析について（その 2），ECOH/YG 技術論文，No. 15，17p.

寶馨（2006）：大標本時代の水文頻度解析手法 ―リターンピリオドを超えるようなサイズの標本に対する極値データ解析―，京都大学防災研究所年報，第49号B，pp.7-12.

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（d4PDF）：https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/index.html（閲覧日:2023 年 5 月 31 日）

野村明弘・佐藤典之・石川浩希・早川哲也・岩崎慎介・大塚淳一・森 信人・渡部 靖憲（2022）：d4PDF を用いた設計波高の将来変化の効率的な推定手法，土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.78, No.2, I_937-I_942.

藤井健・光田寧 (1986)：台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレイション，京都大学防災研究所年報，第 29 号，B-1，pp.229-239.

森壮太郎・森　信人・志村智也・宮下卓也（2021）：気候変動による日本主要湾における可能最大クラス高潮の長期変化，土木学会論文集 B2(海岸工学), 77(2), pp.I_937-I_942.

森　信人・有吉　望・安田誠宏・間瀬　肇（2016）：台風の最大潜在強度にもとづく高潮偏差の長期変動評価，土木学会論文集 B2(海岸工学)，72(2)，pp.I_1489-I_1494.

文部科学省・気象庁気象研究所・東京大学大気海洋研究所・京都大学防災研究所・国立環境研究所・筑波大学・海洋研究開発機構（2023）：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 database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) 利用手引き（抜粋）2022 年 10 月 21 日版，https://www.miroc-gcm.jp/d4PDF/index.html（閲覧日：2023 年 5 月 31 日）

Hosking，J．R．M．（1990）：L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics，J. Roy. Statistical Soc.，Series B，52，pp.105-124.

Hosking，J．R．M．　and J．R．Wallis（1997）：Regional Frequency Analysis，Cambridge Univ. Press，224p.

IPCC-AR5 WG1 (2013)：The physical science basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1535.

JRA-55 領域ダウンスケーリング（DSJRA-55）：https://jra.kishou.go.jp/DSJRA-55/index_ja.html（閲覧日：2023 年 5 月 31 日）

Mizuta, R, Arakawa, O, Ose, T, Kusunoki, S, Endo, H, and Kitoh A (2014)：Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes, *SOLA*, Vol.10, 167-171.

Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogama, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sasaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, M. Kimoto (2017)：Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, The Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS), July, pp.1383-1398.

Mori, N., Shimura, T., Yoshida, K., Miauta, R., Okada, Y., Fujita, M., Khujanazarov, T., and Nakakita, E. (2019). “Future changes in extreme storm surges based on mega-ensemble projection using 60-km resolution atmospheric global circulation model,” Coastal Eng. J, 61, 3, 295-307.

Okamoto, K, Doukai, F, and Honda, K (2023a)：Uncertainty of extreme value of storm urges and high waves due to tropical cyclones in the future climate, *Proc. the 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference*, Otawa, Canada, ISOPE, pp.2731-2736.

Okamoto, K, Honda, K and Doukai, F (2023b)：Storm surges and high wave due to typhoons in three major bays of Japan in the future climate, *Proc. the 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference*, Otawa,

Canada, ISOPE, pp.2737-2744.

Shimura, T., N. Mori and M. A. Hemer（2016）: Projection of tropical cyclone-generated extreme wave climate based on CMIP5 multi-model ensemble in the Western North Pacific, Climate Dynamics, Vol.49(4), pp.1449-1462.

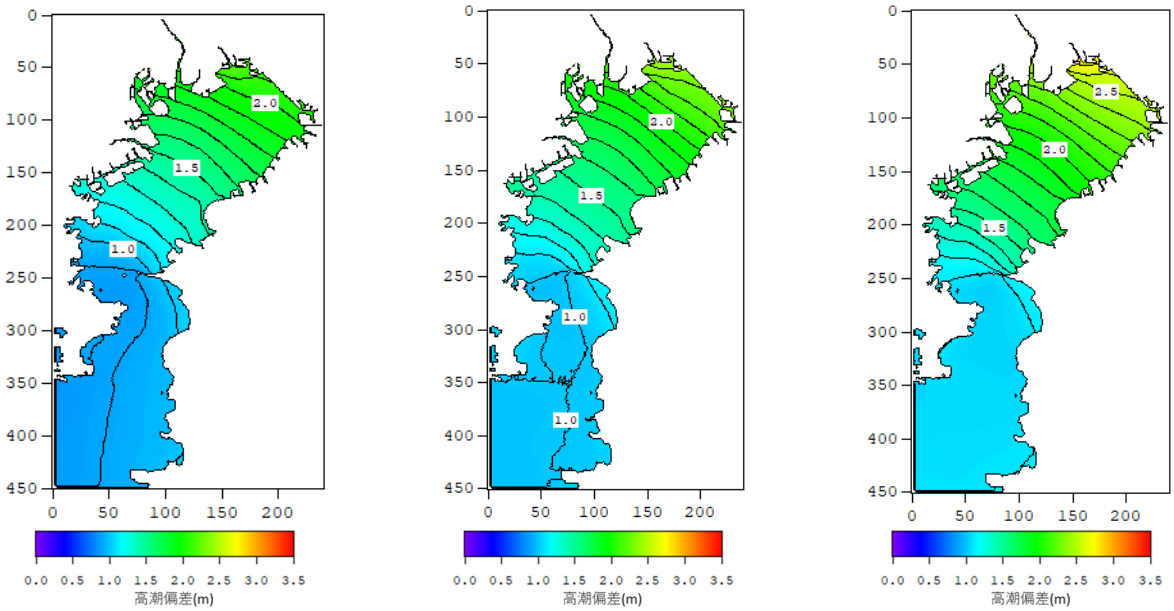
Shimura, T., W. J. Pringle, N. Mori, T. Miyashita, K. Yoshida（2022）: Seamless projections of global storm surge and ocean waves under a warming climate, Geophysical Research Letters, 49, e2021GL097427.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012) : An overview of CMIP5 and the experiment design,” Bulletin of the American Meteorological Society, 93, 4, 485‐498.

WW3DG (2016) : User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 5.16, The WAVEWATCH III Development Group. Tech. Note 329. NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

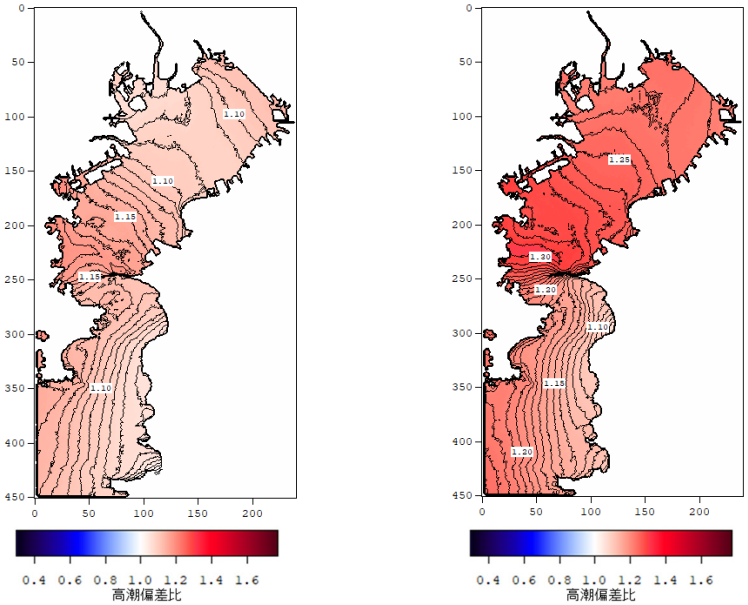
Webb, A., T. Shimura, N. Mori （2019）: Global Tropical Cyclone Track Detection and Analysis of the d4PDF Mega-ensemble Projection, Vol.75/2, p. I_1207-I_1212

付録A　高潮偏差の将来変化予測の詳細結果



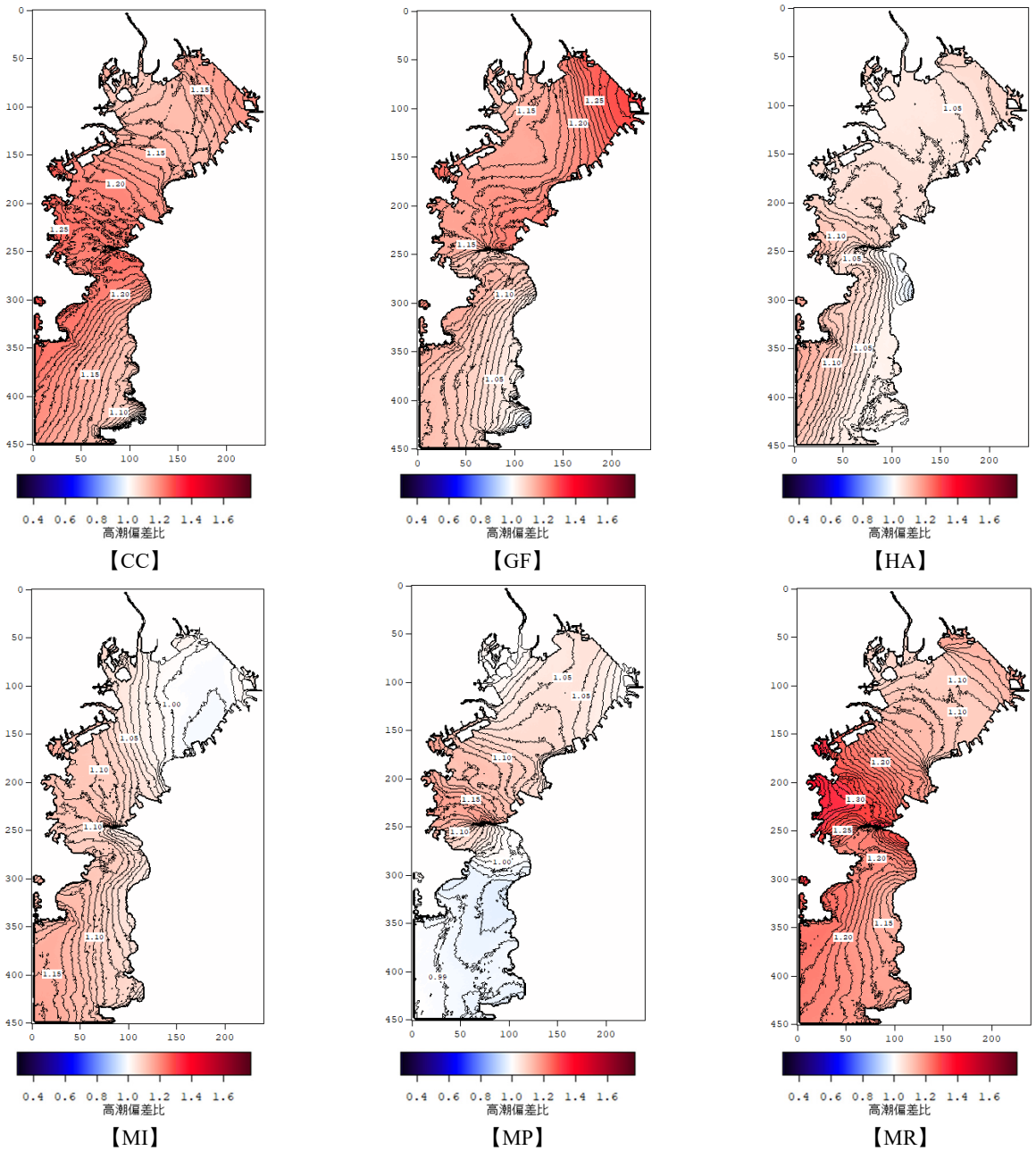
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.1　再現期間 500 年の高潮偏差（東京湾）



【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

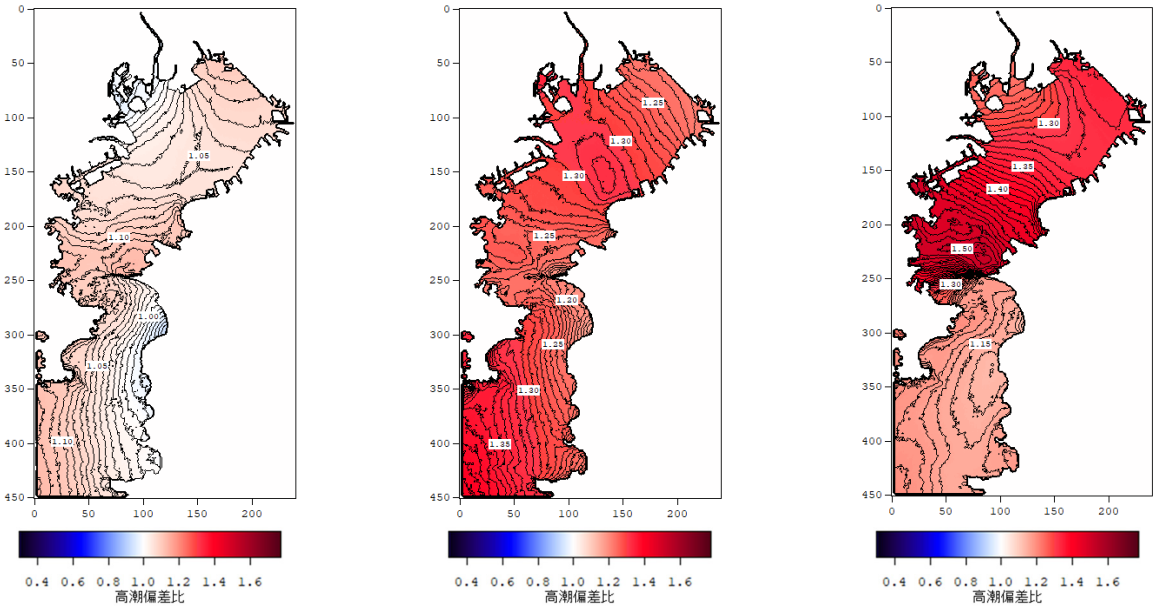
図-A.2　再現期間 500 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（東京湾）



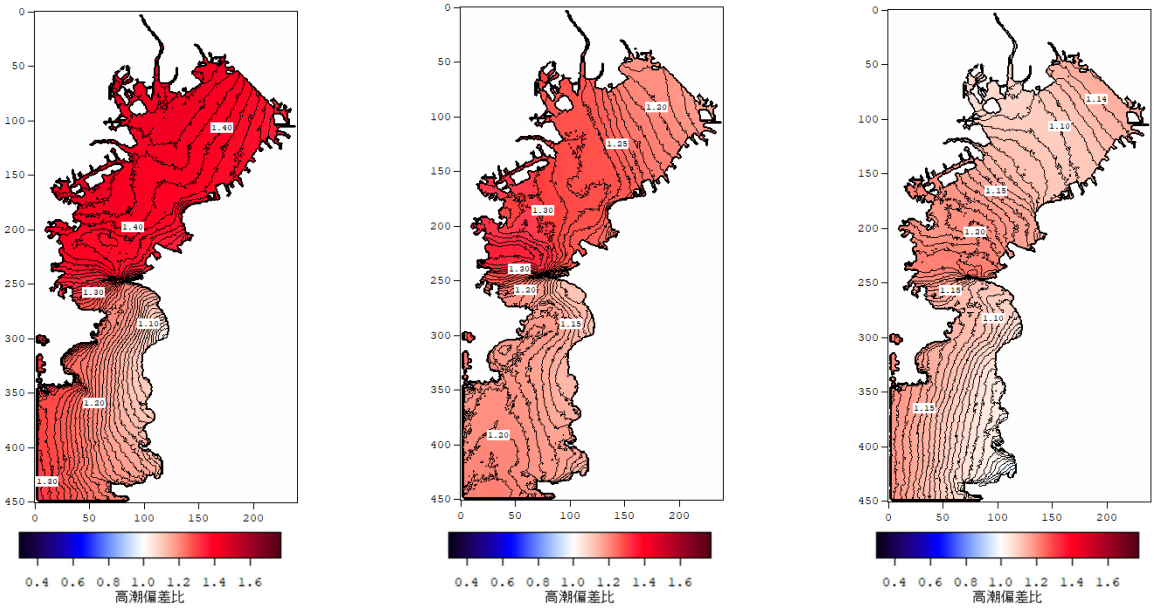
【CC】 【GF】 【HA】

【MI】 【MP】 【MR】

図-A.3　再現期間 500 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（東京湾）

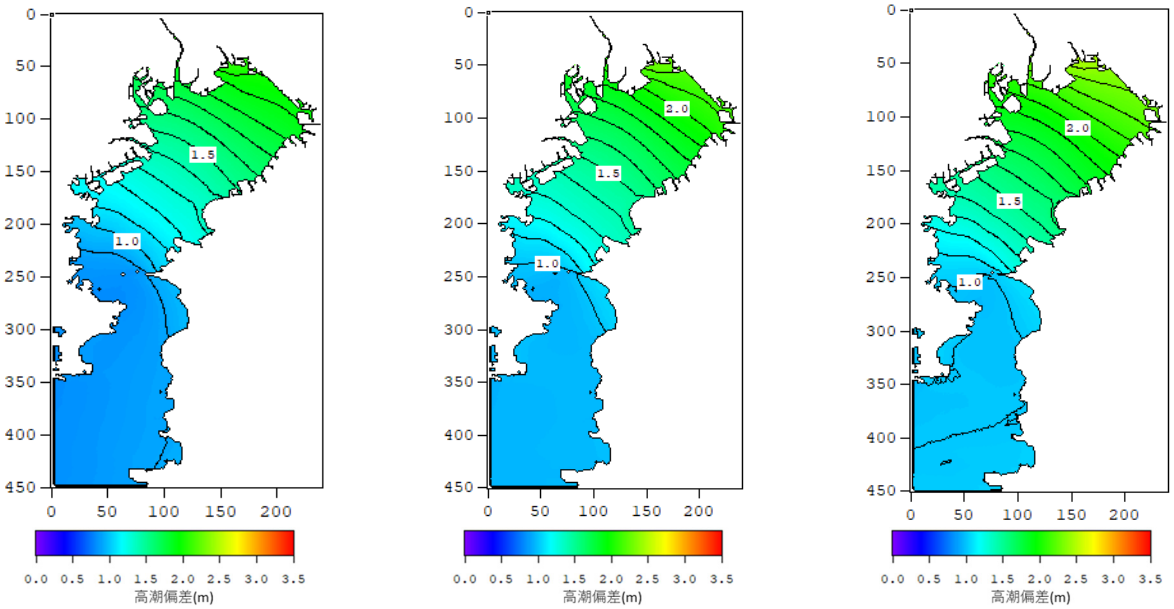


【CC】　【GF】　【HA】



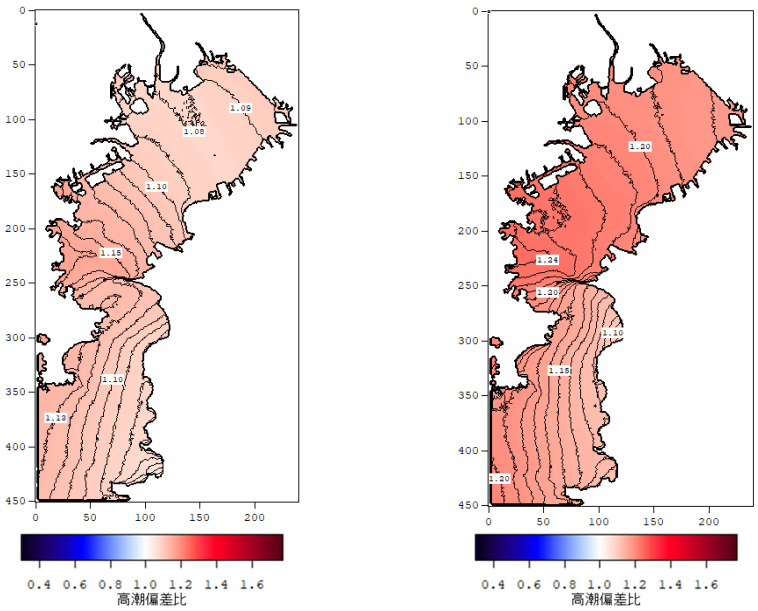
【MI】　【MP】　【MR】

図-A.4　再現期間 500 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（東京湾）



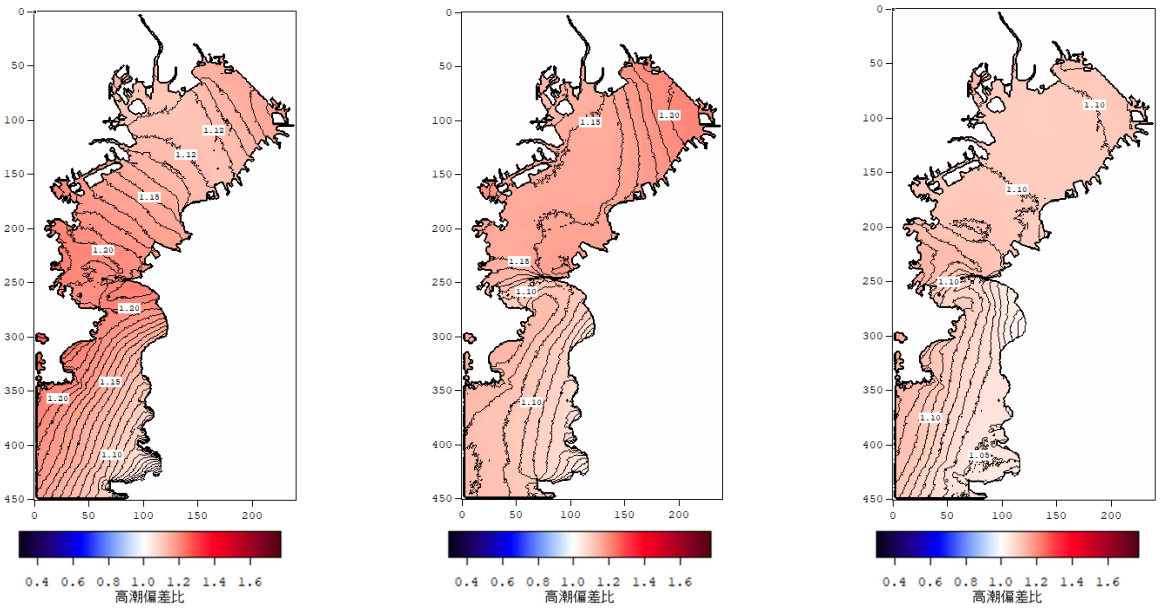
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.5　再現期間 200 年の高潮偏差（東京湾）

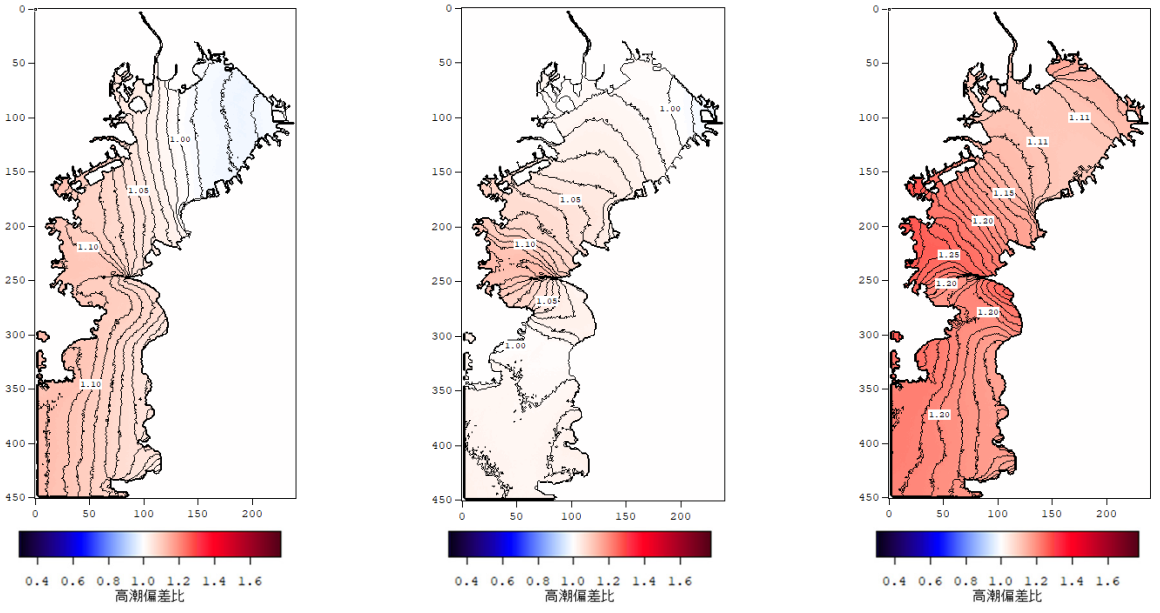


【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.6　再現期間 200 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（東京湾）

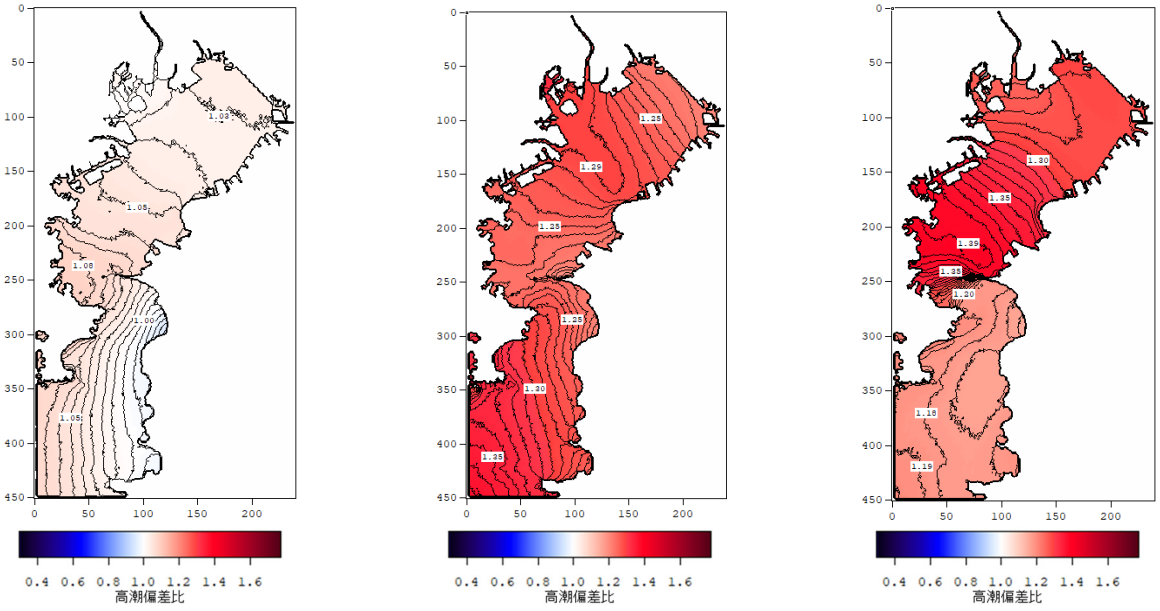


【CC】　【GF】　【HA】

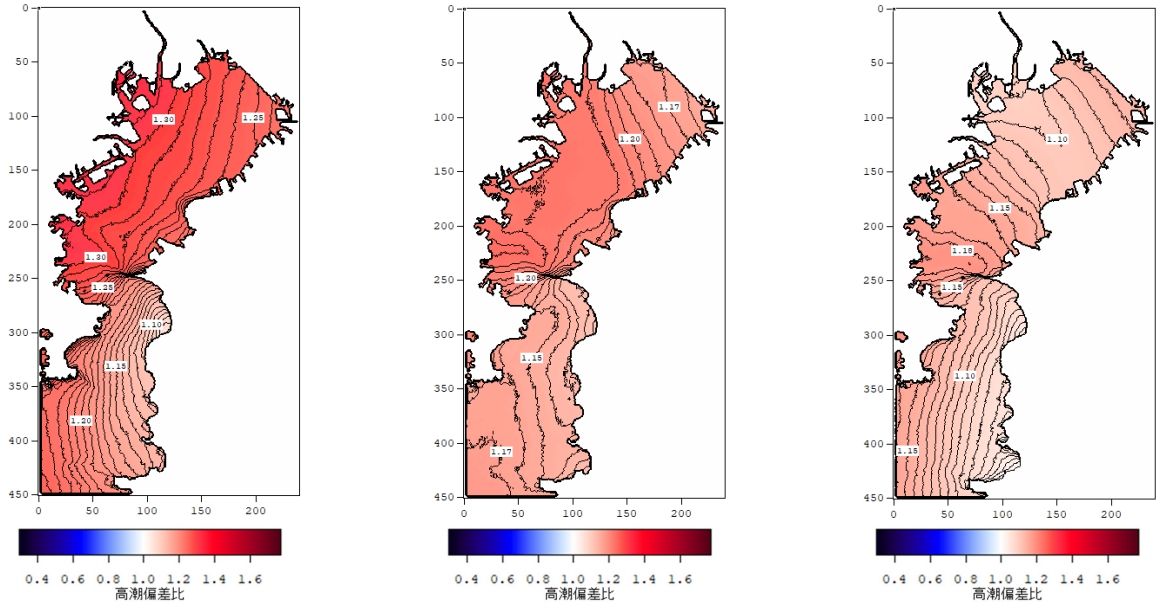


【MI】　【MP】　【MR】

図-A.7　再現期間 200 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（東京湾）

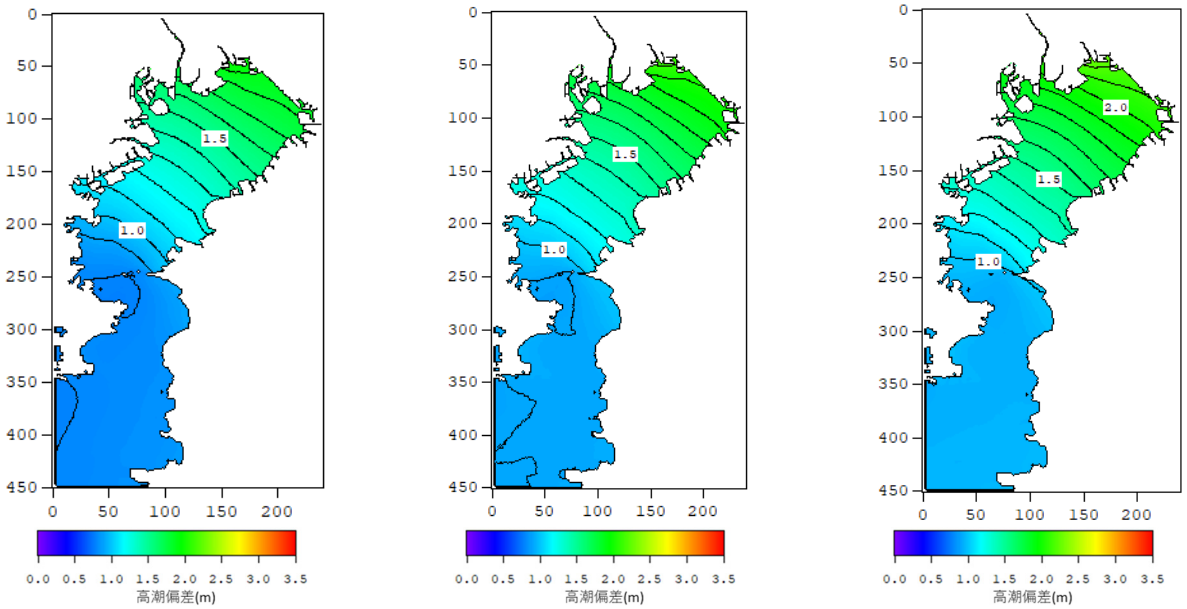


【CC】　【GF】　【HA】



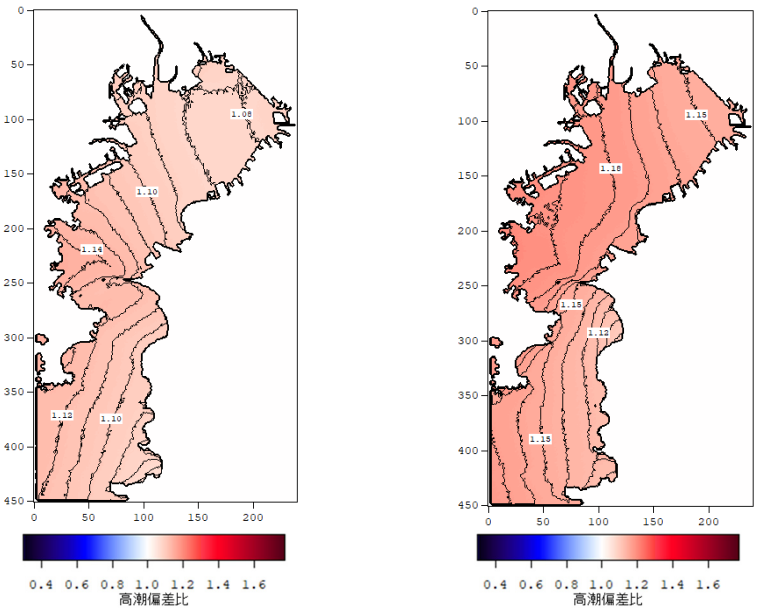
【MI】　【MP】　【MR】

図-A.8　再現期間 200 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（東京湾）



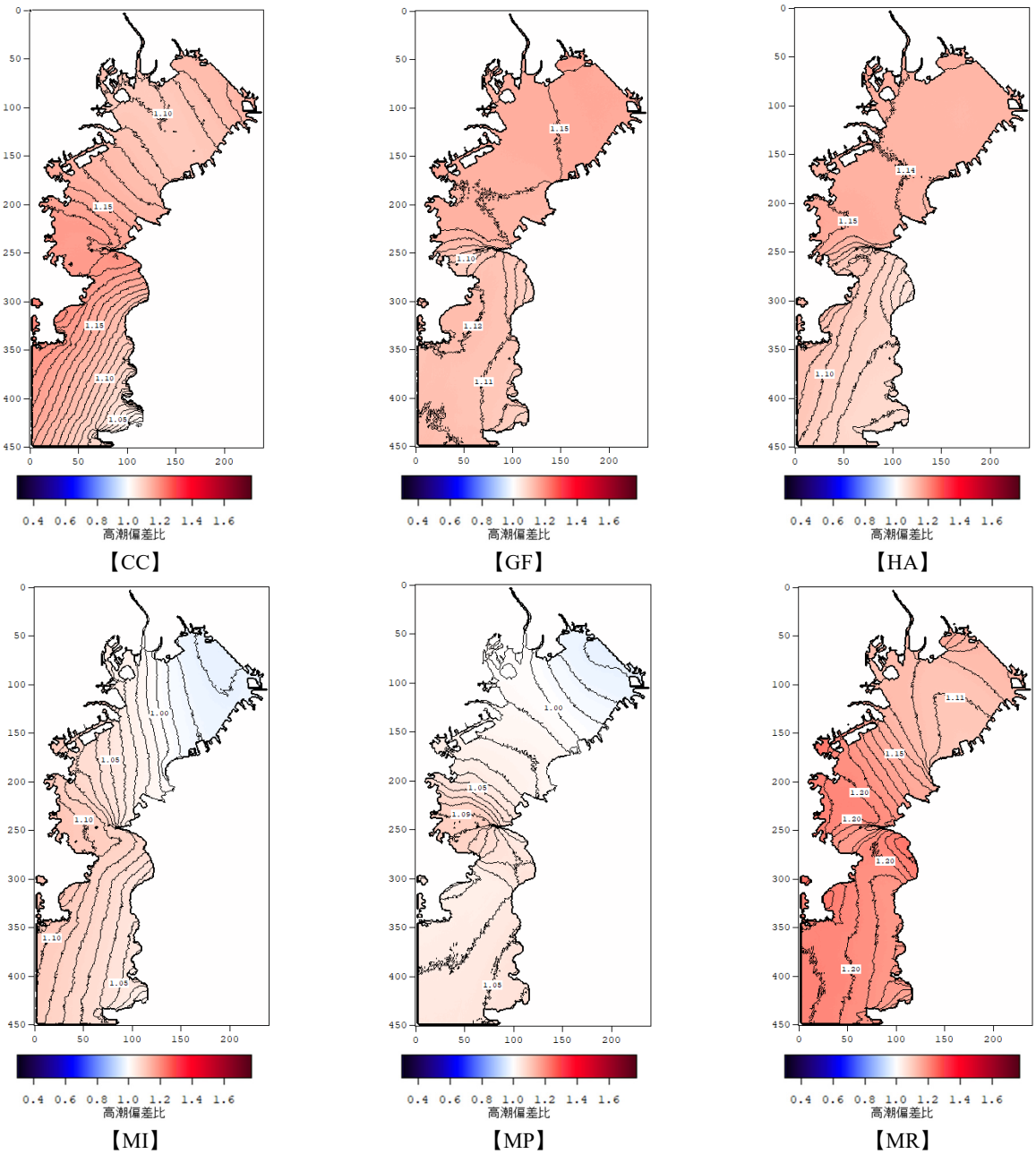
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.9　再現期間 100 年の高潮偏差（東京湾）



【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

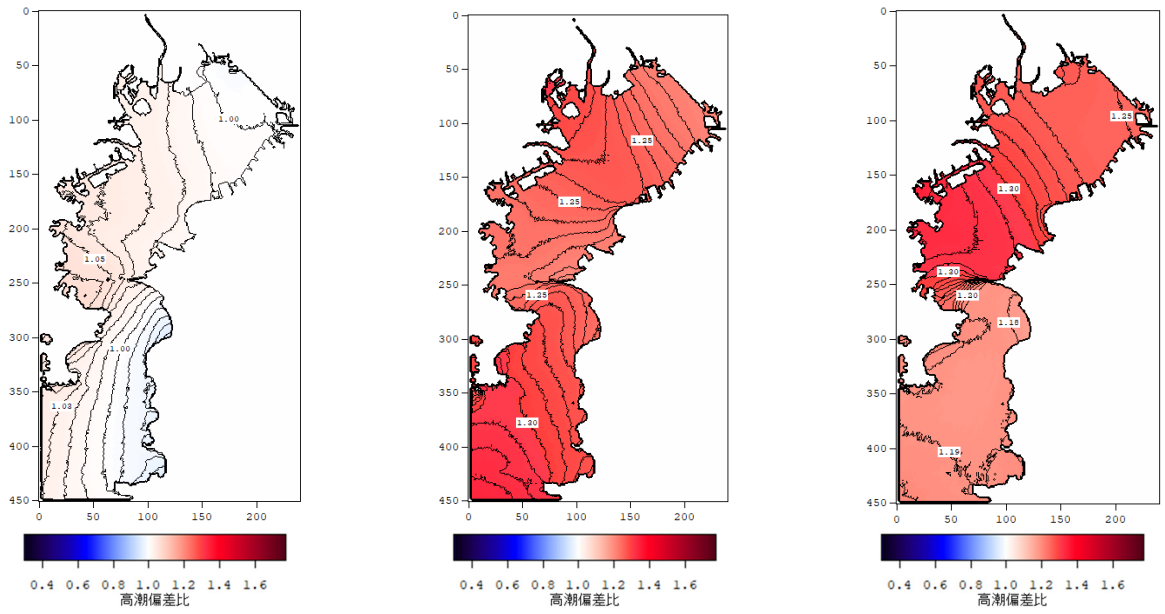
図-A.10　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（東京湾）



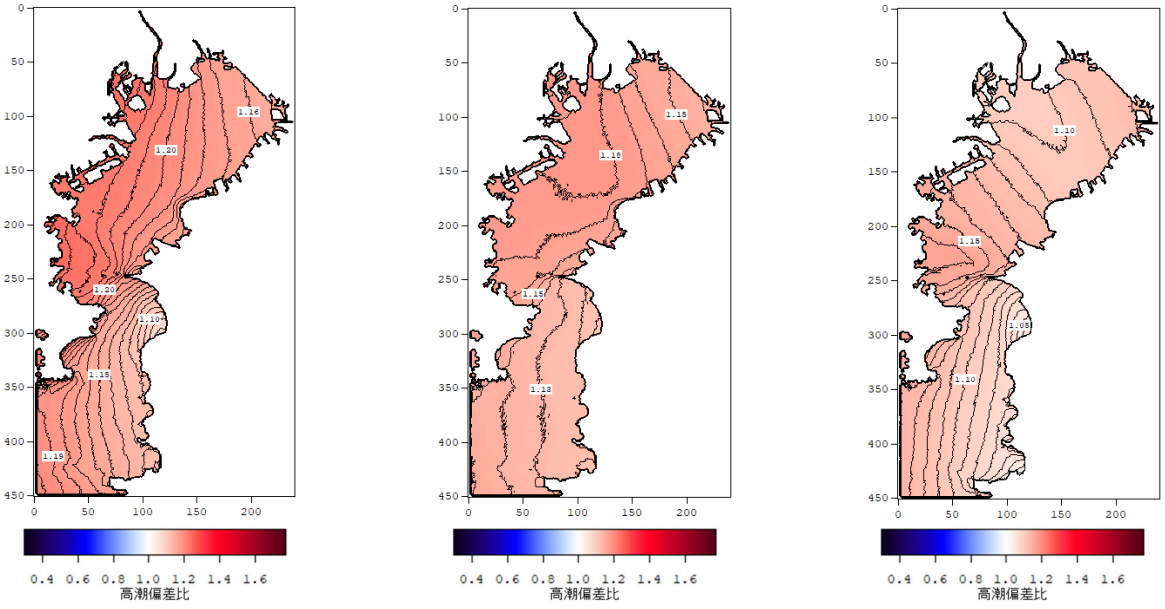
【CC】 【GF】 【HA】

【MI】 【MP】 【MR】

図-A. 11　再現期間 100 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（東京湾）

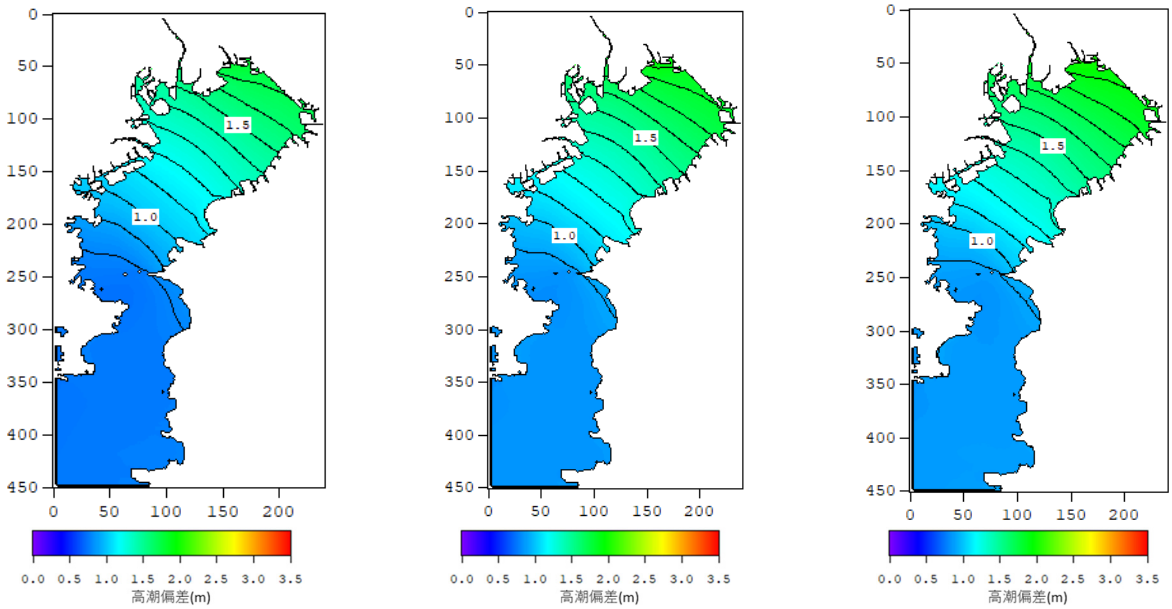


【CC】　【GF】　【HA】



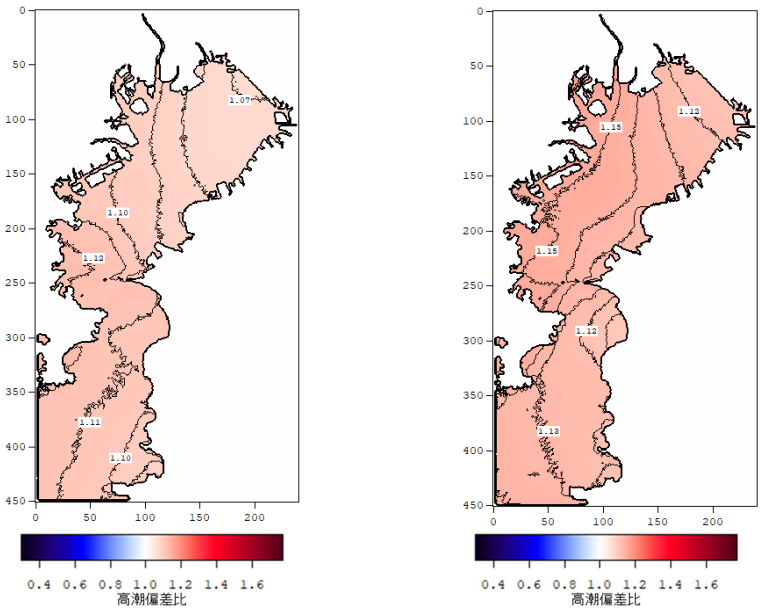
【MI】　【MP】　【MR】

図-A.12　再現期間 100 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（東京湾）



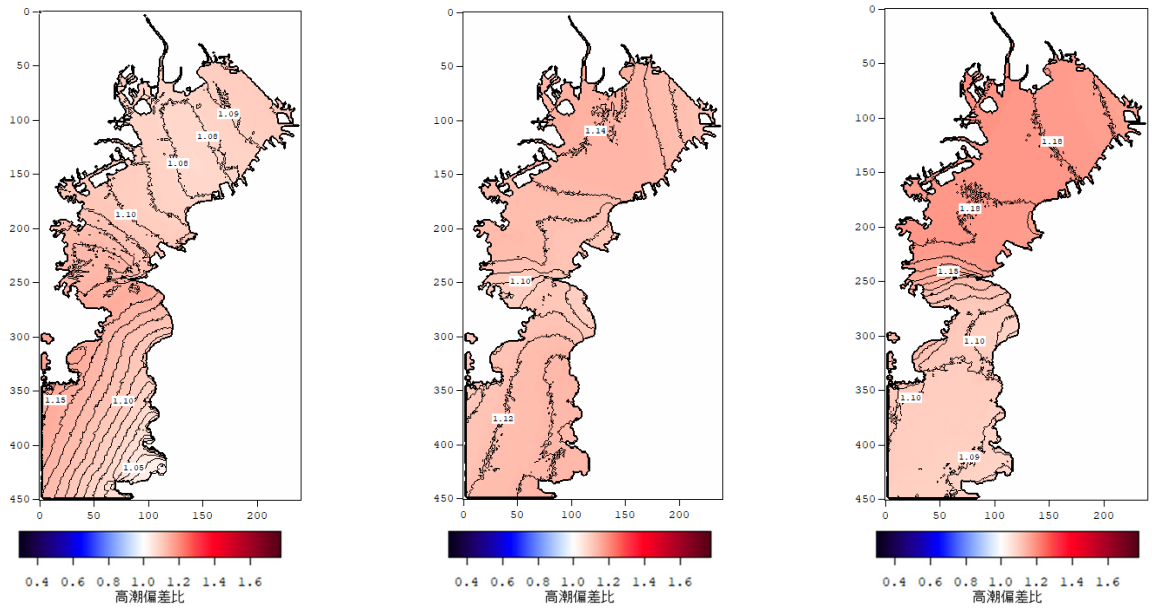
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A. 13　再現期間 50 年の高潮偏差（東京湾）

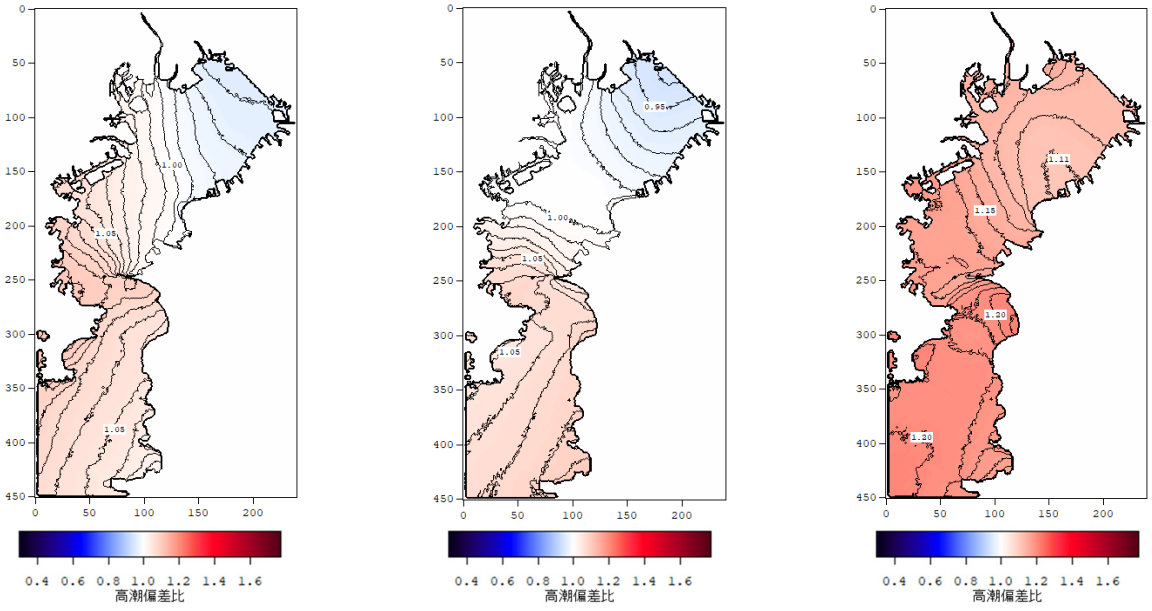


【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A. 14　再現期間 50 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（東京湾）

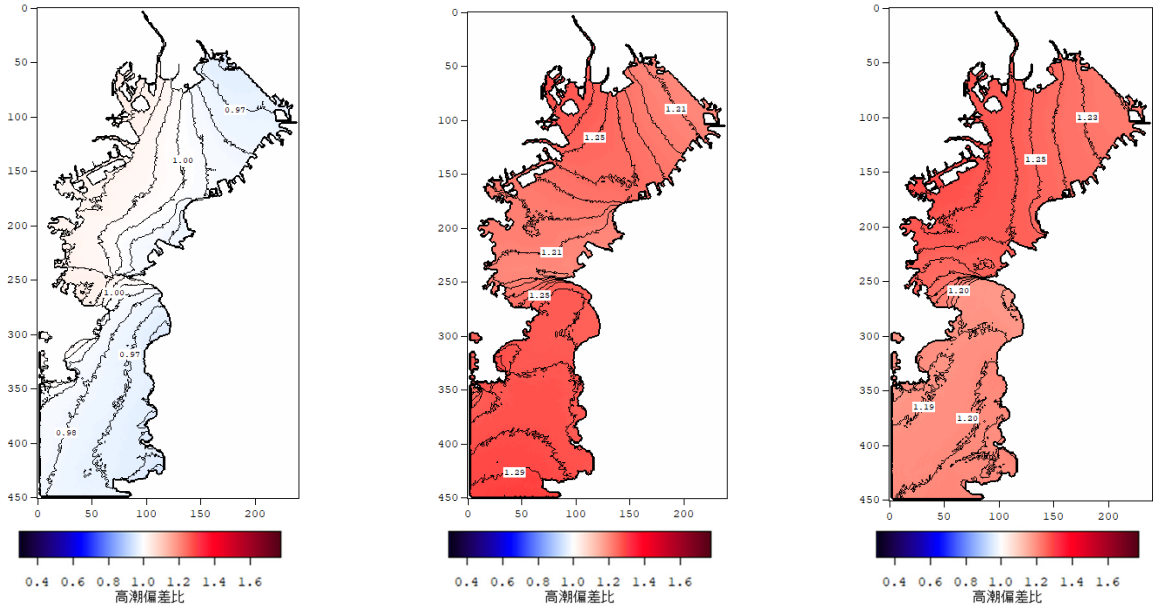


【CC】　【GF】　【HA】

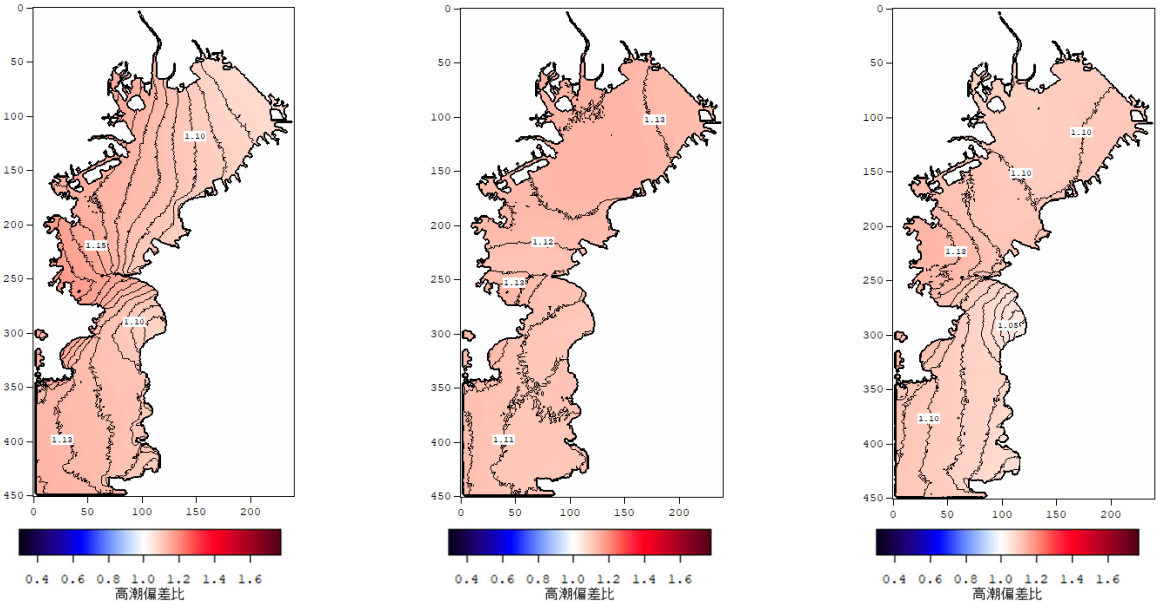


【MI】　【MP】　【MR】

図-A.15　再現期間 50 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（東京湾）

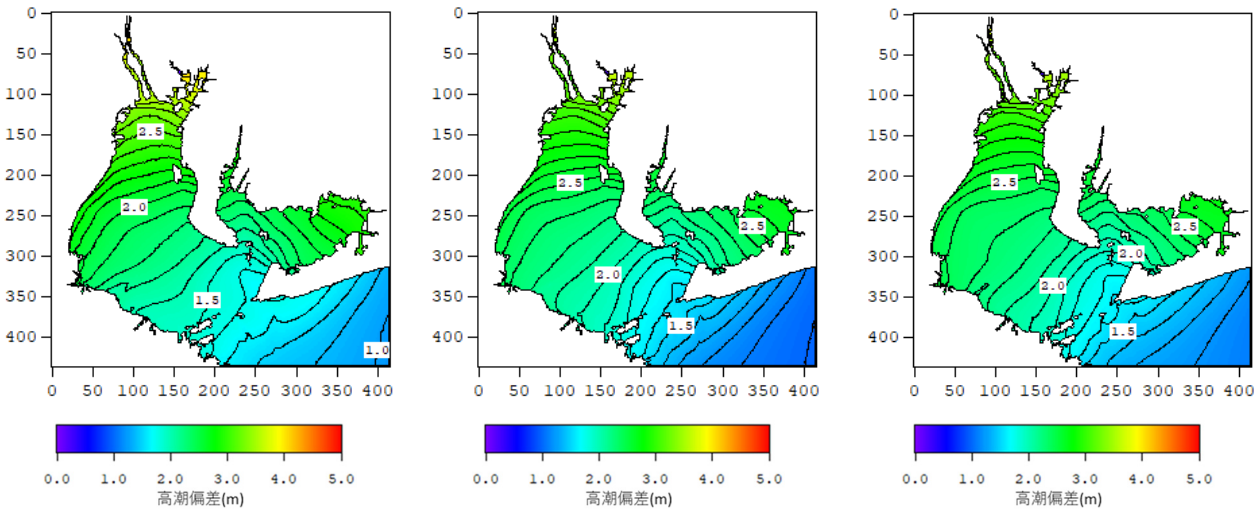


【CC】　【GF】　【HA】



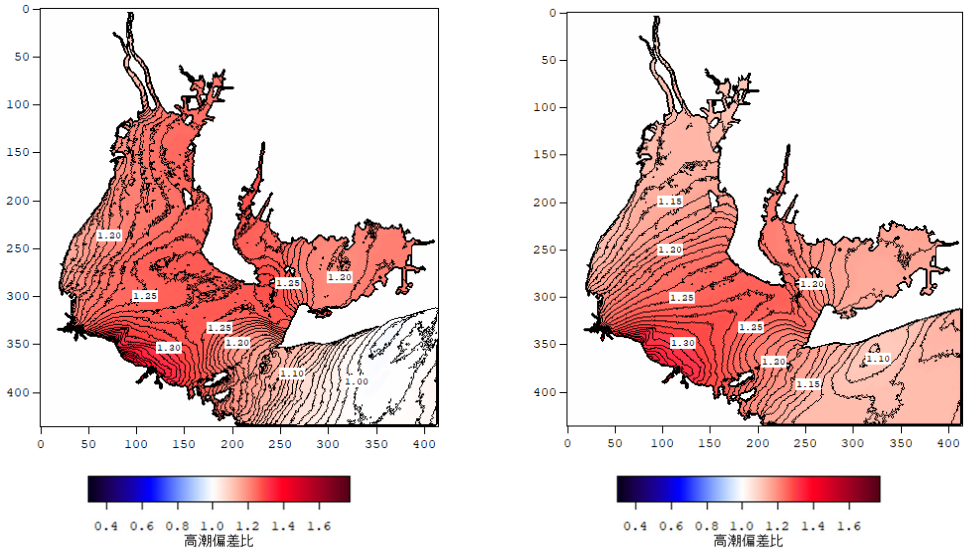
【MI】　【MP】　【MR】

図-A.16　再現期間 50 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（東京湾）



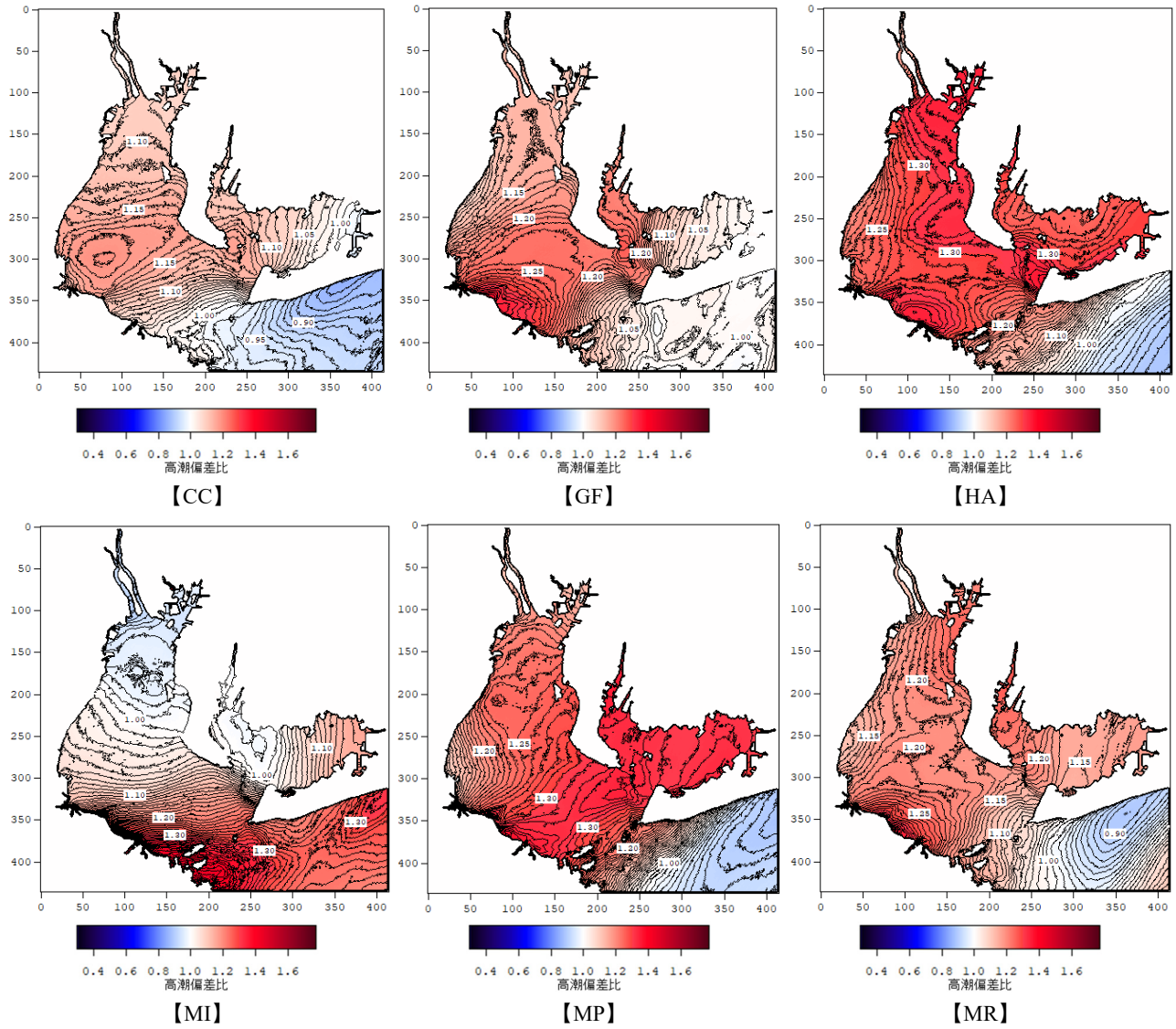
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.17　再現期間 500 年の高潮偏差（伊勢湾）



【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

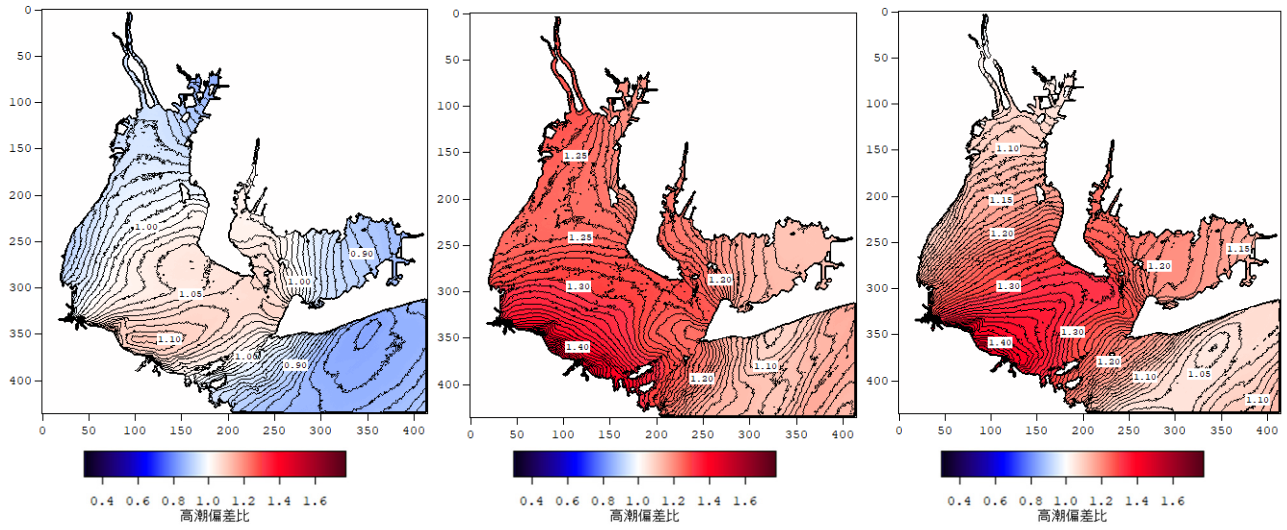
図-A.18　再現期間 500 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（伊勢湾）



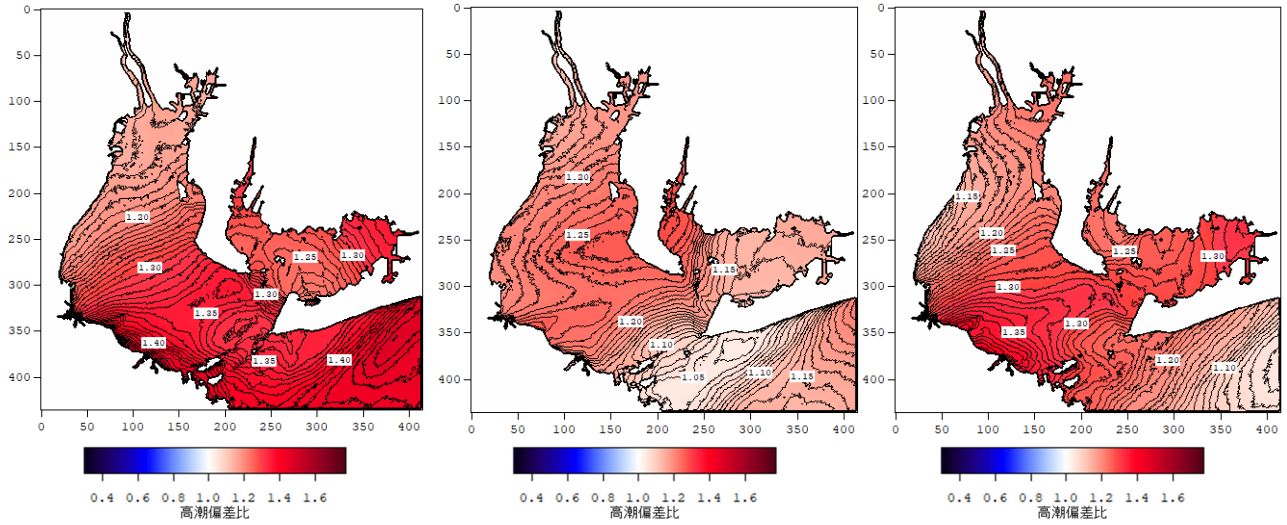
【CC】 【GF】 【HA】

【MI】 【MP】 【MR】

図-A.19 再現期間 500 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（伊勢湾）

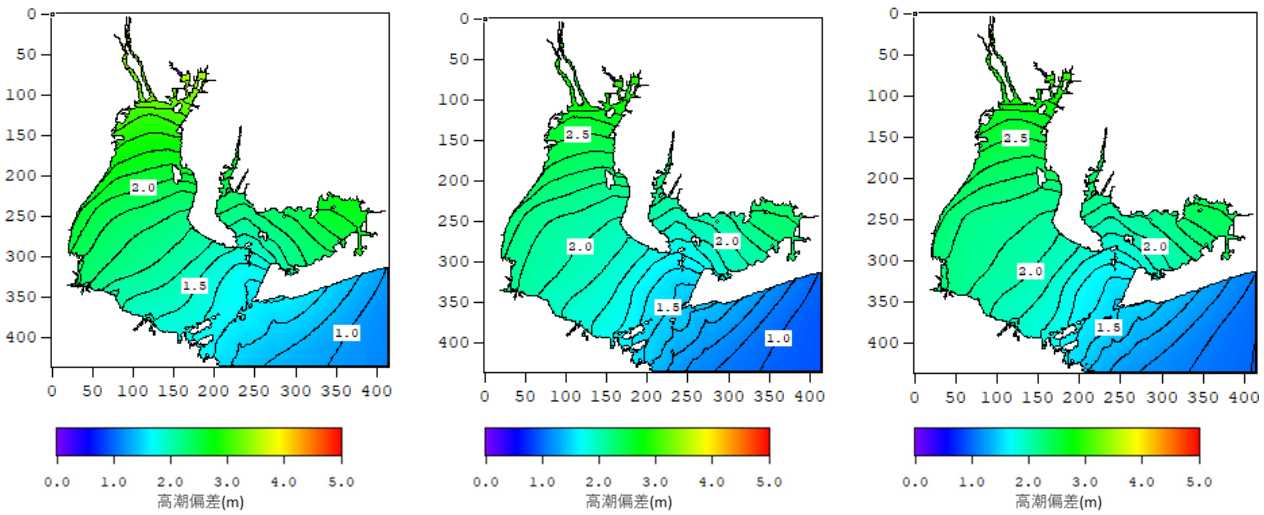


【CC】 【GF】 【HA】



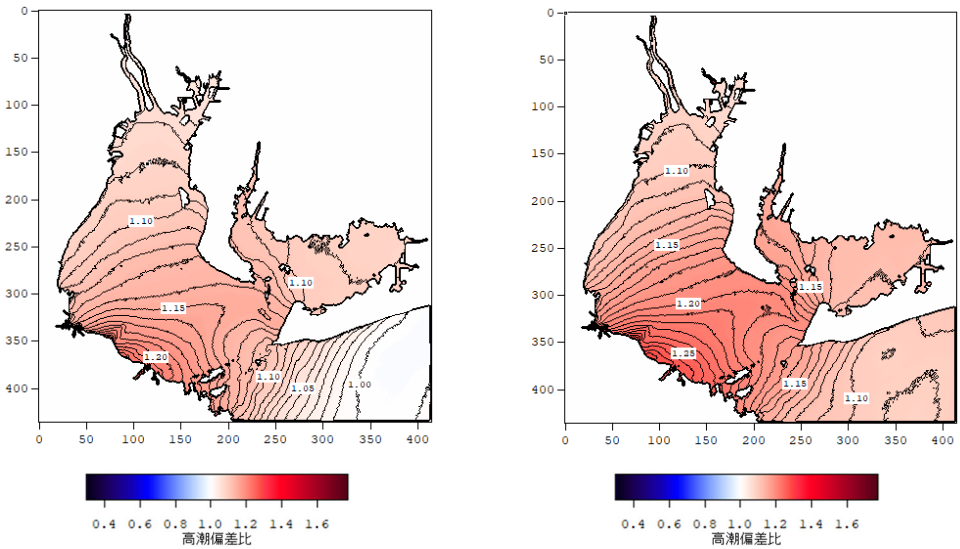
【MI】 【MP】 【MR】

図-A.20　再現期間 500 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（伊勢湾）



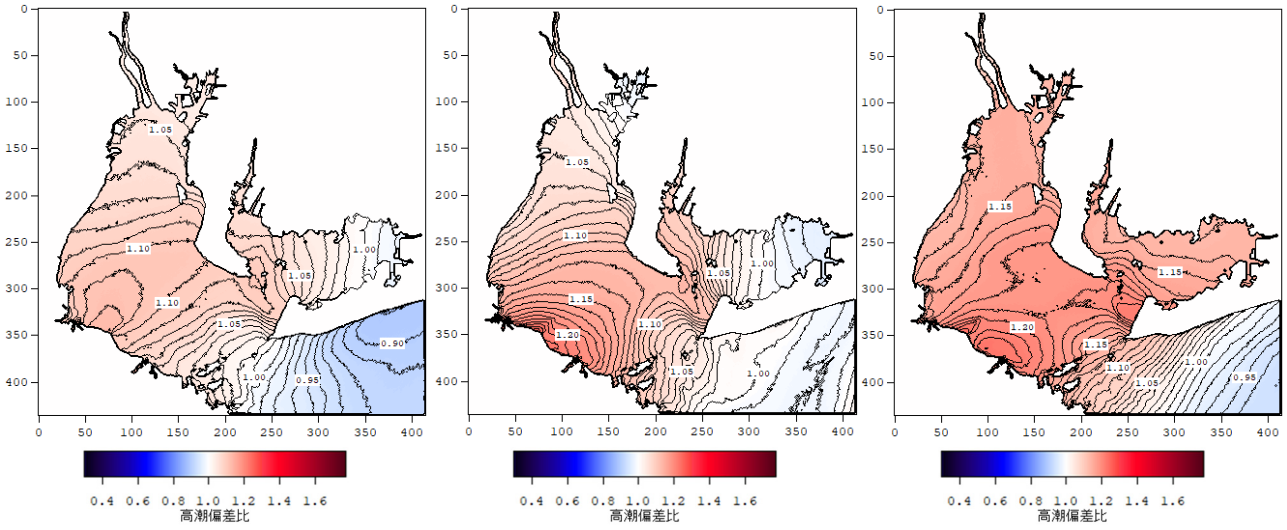
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A. 21　再現期間 200 年の高潮偏差（伊勢湾）

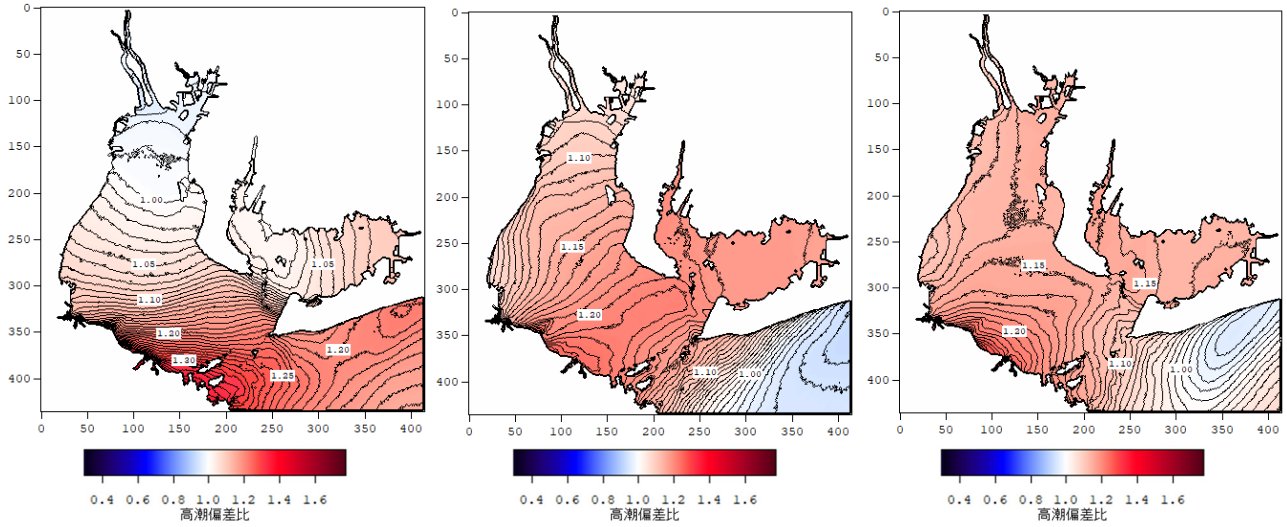


【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A. 22　再現期間 200 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（伊勢湾）

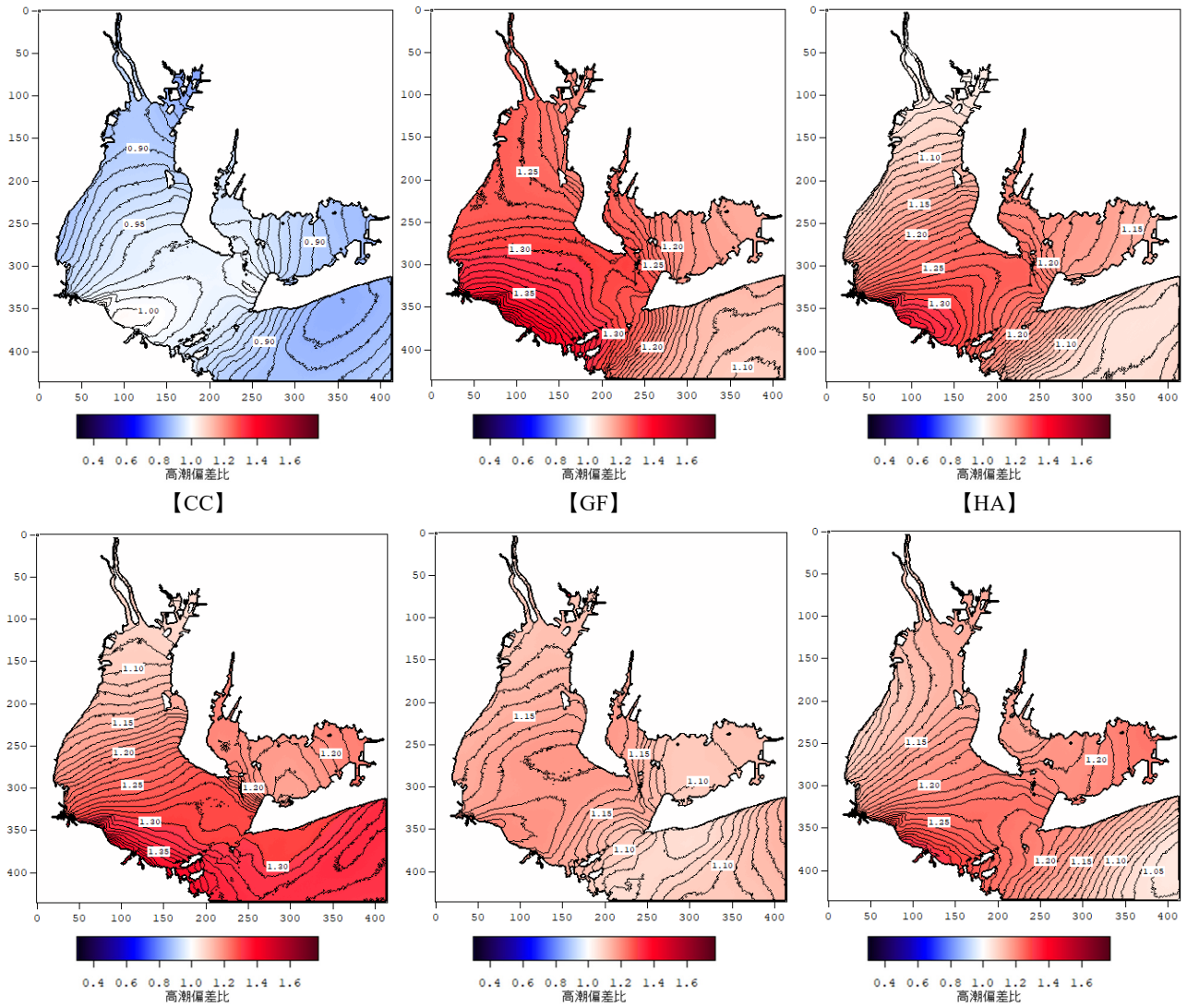


【CC】　【GF】　【HA】



【MI】　【MP】　【MR】

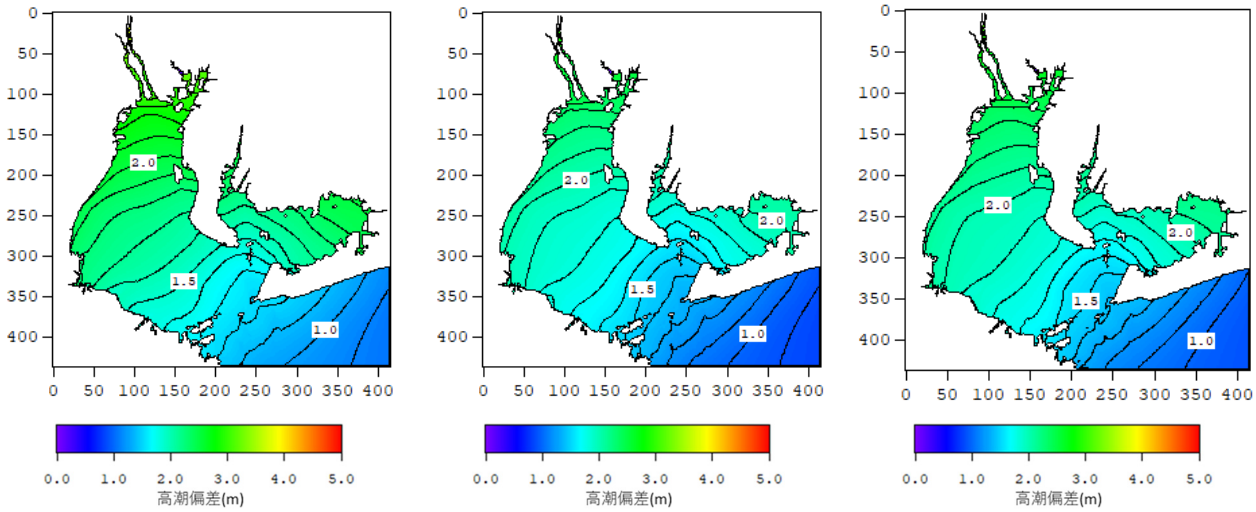
図-A.23　再現期間 200 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（伊勢湾）



【CC】 【GF】 【HA】

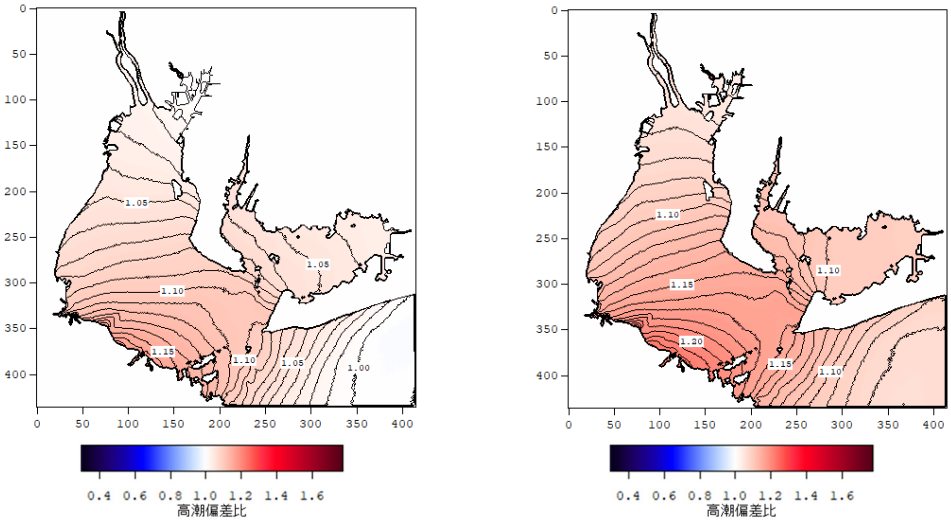
【MI】 【MP】 【MR】

図-A. 24　再現期間 200 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（伊勢湾）



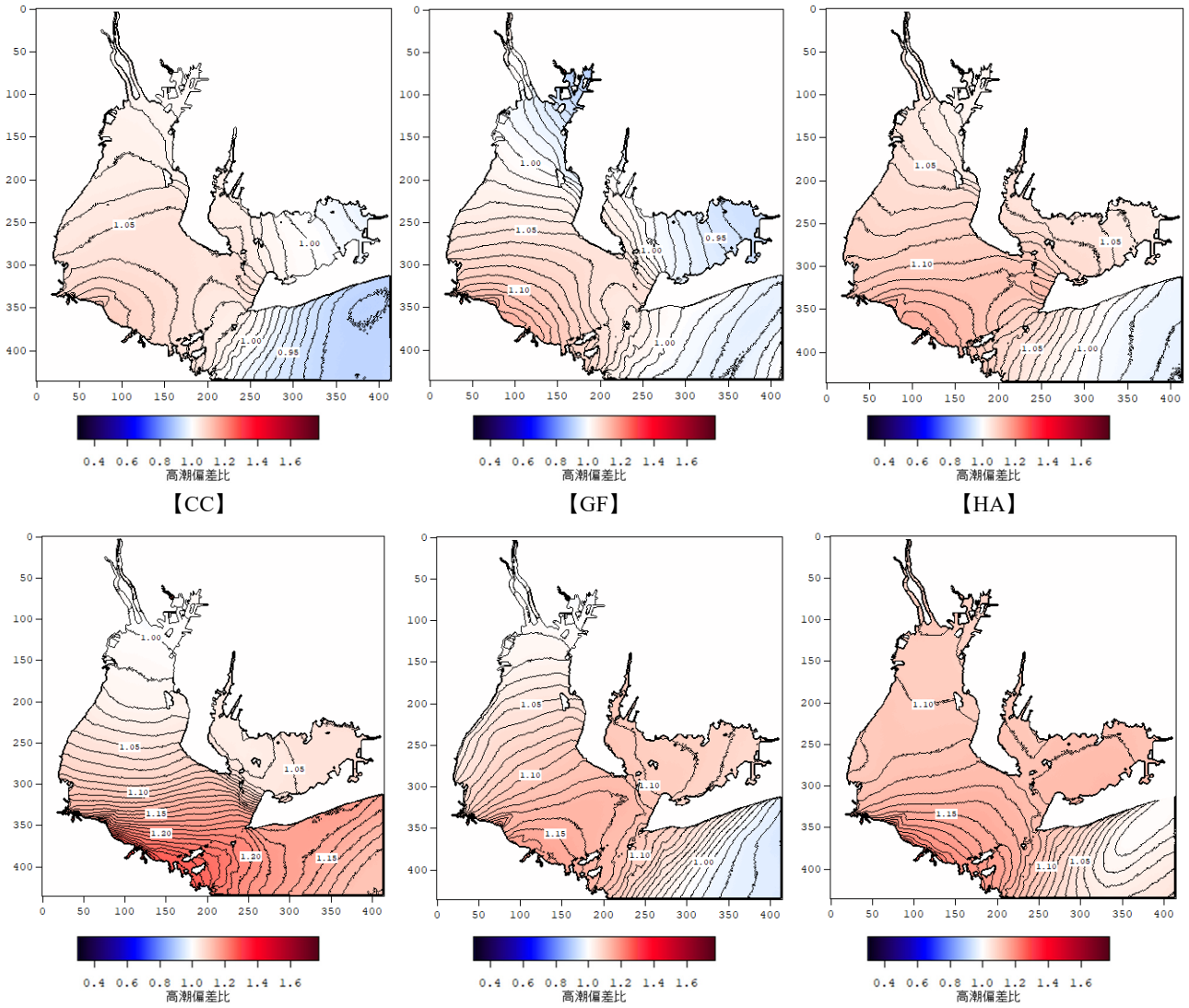
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.25　再現期間 100 年の高潮偏差（伊勢湾）



【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

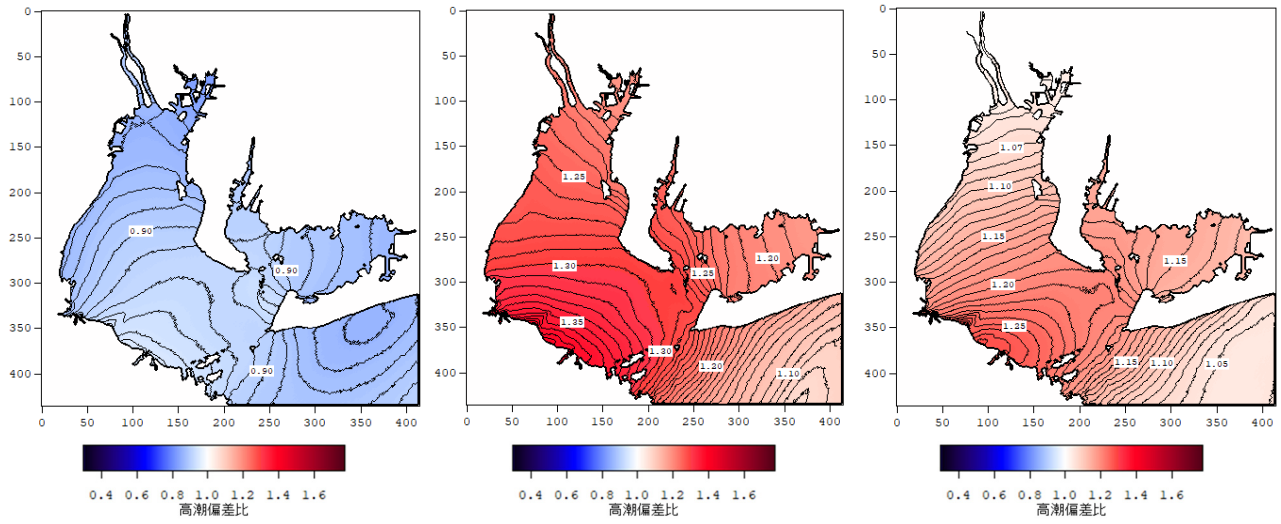
図-A.26　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（伊勢湾）



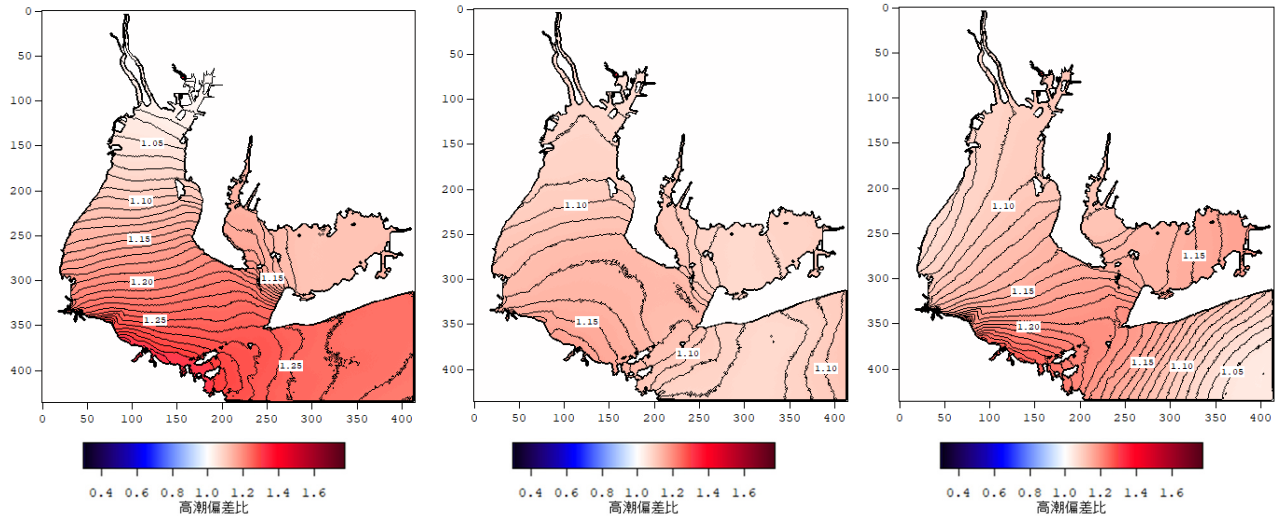
【CC】 【GF】 【HA】

【MI】 【MP】 【MR】

図-A.27　再現期間 100 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（伊勢湾）

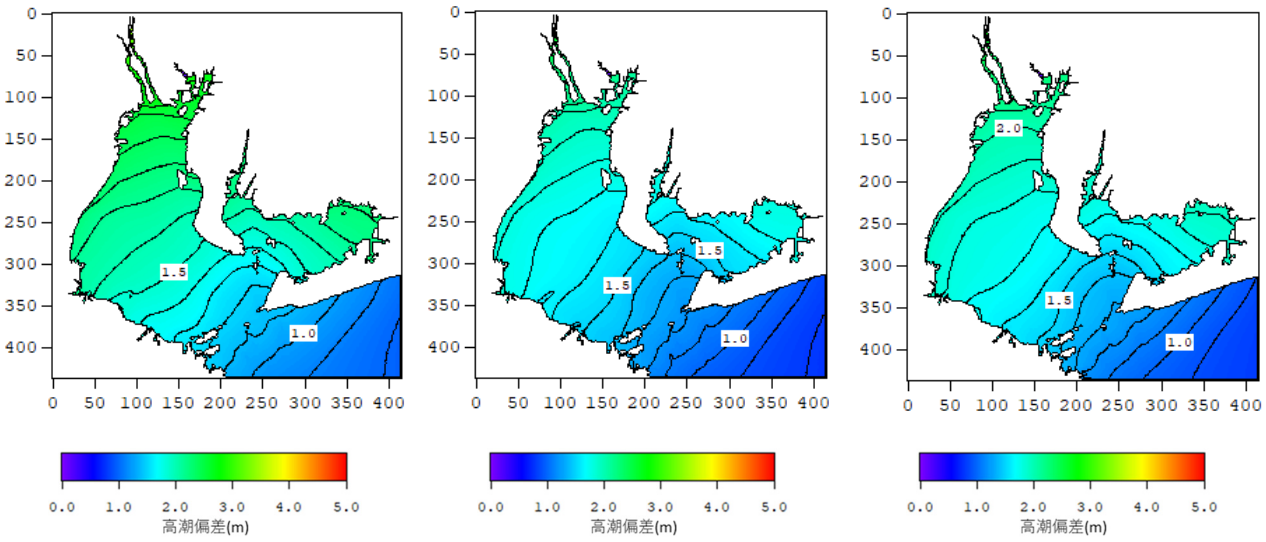


【CC】　【GF】　【HA】



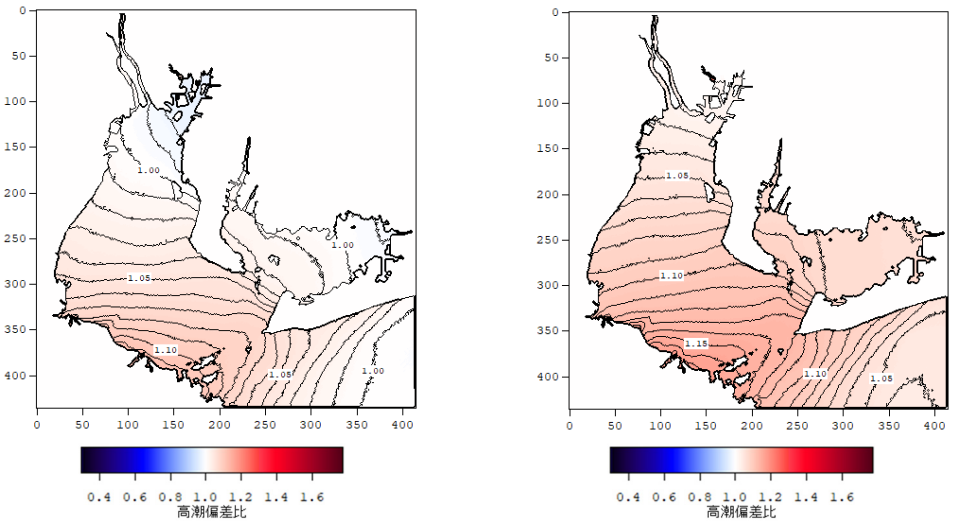
【MI】　【MP】　【MR】

図-A.28　再現期間 100 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（伊勢湾）



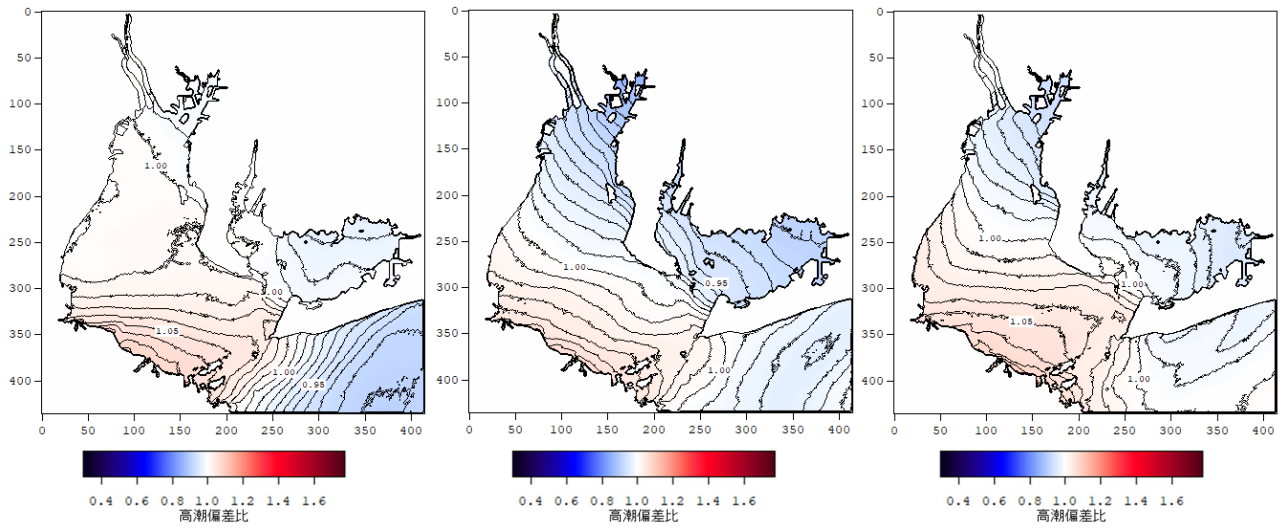
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.29　再現期間 50 年の高潮偏差（伊勢湾）

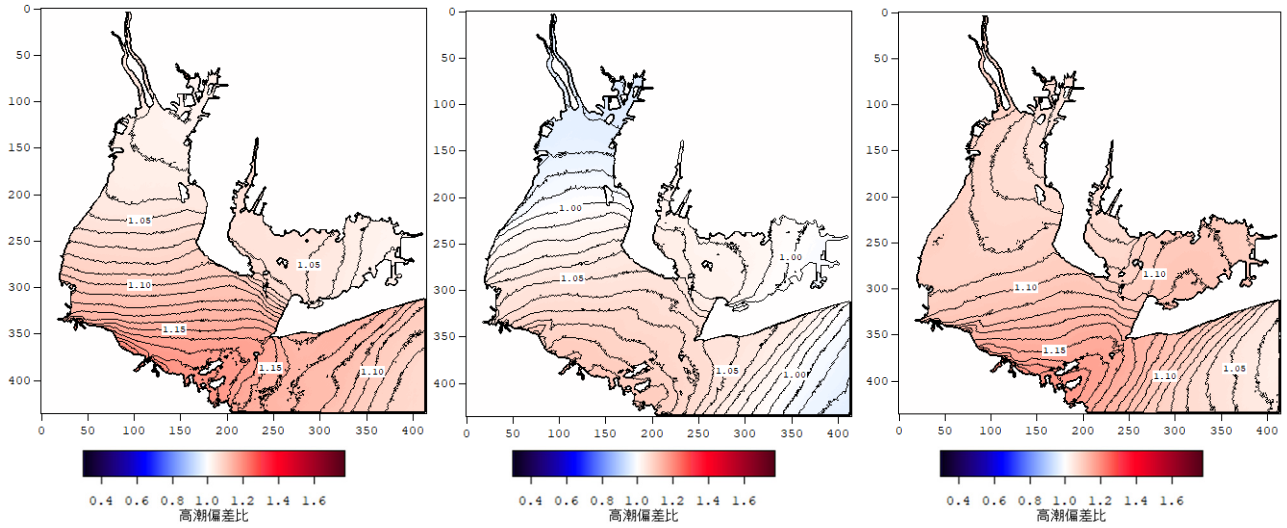


【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.30　再現期間 50 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（伊勢湾）



【CC】　【GF】　【HA】



【MI】　【MP】　【MR】

図-A.31　再現期間 50 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（伊勢湾）

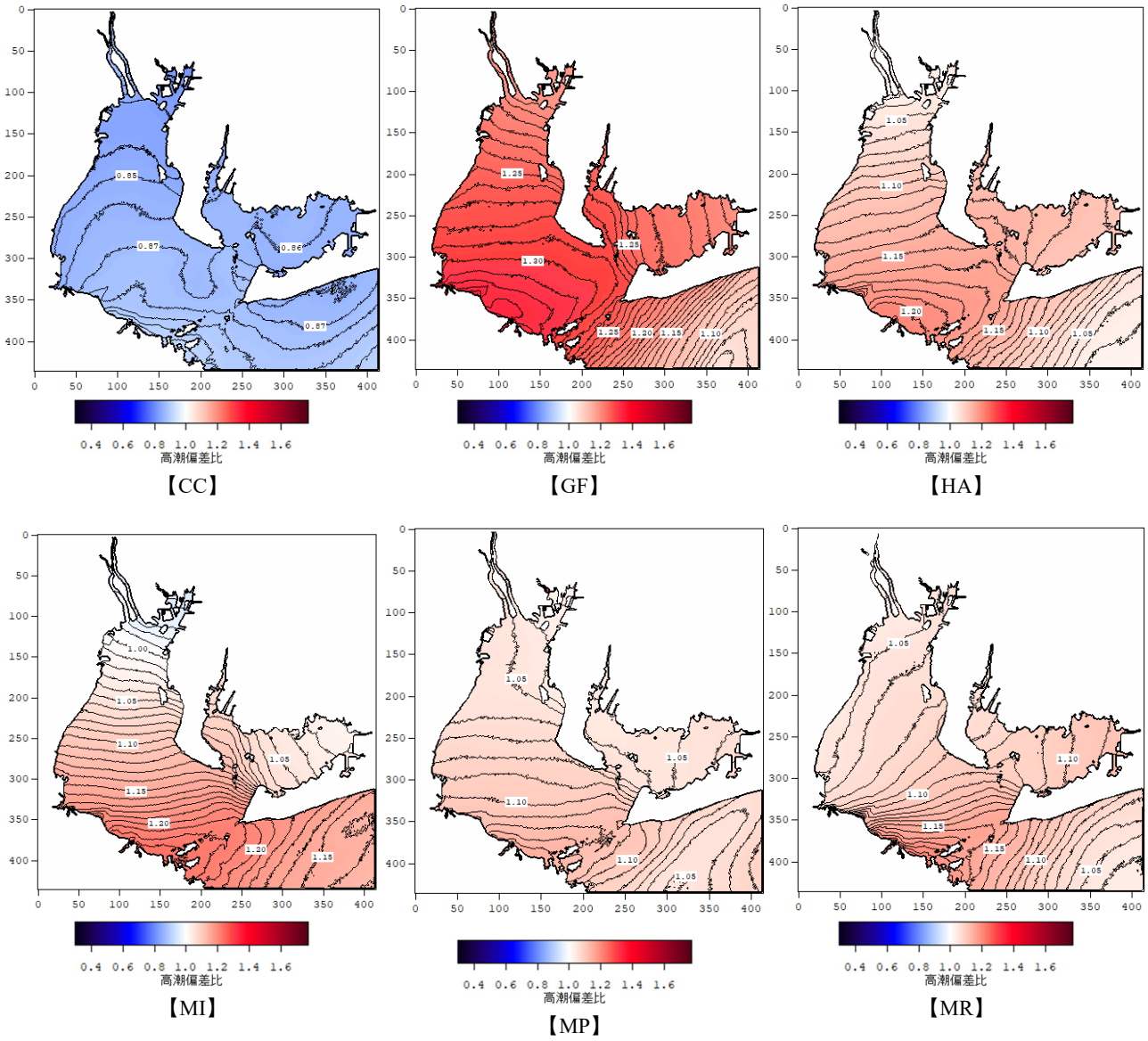
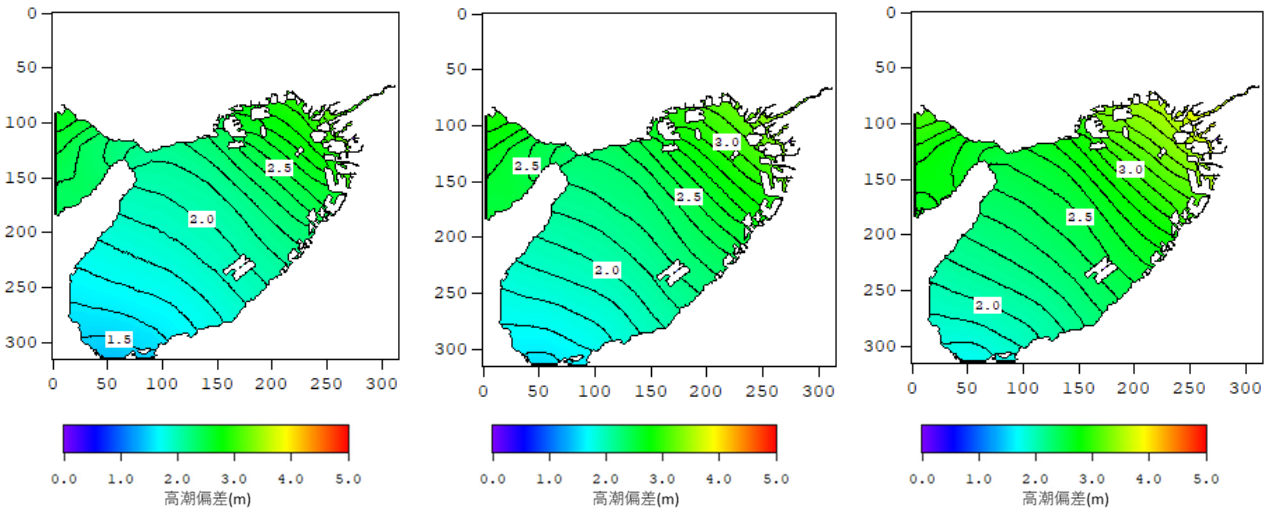
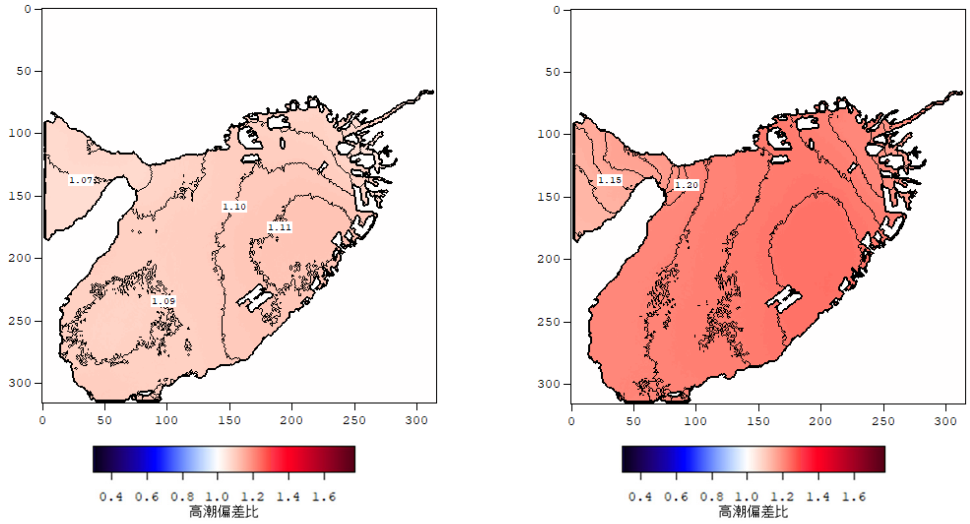


図-A.32　再現期間 50 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（伊勢湾）



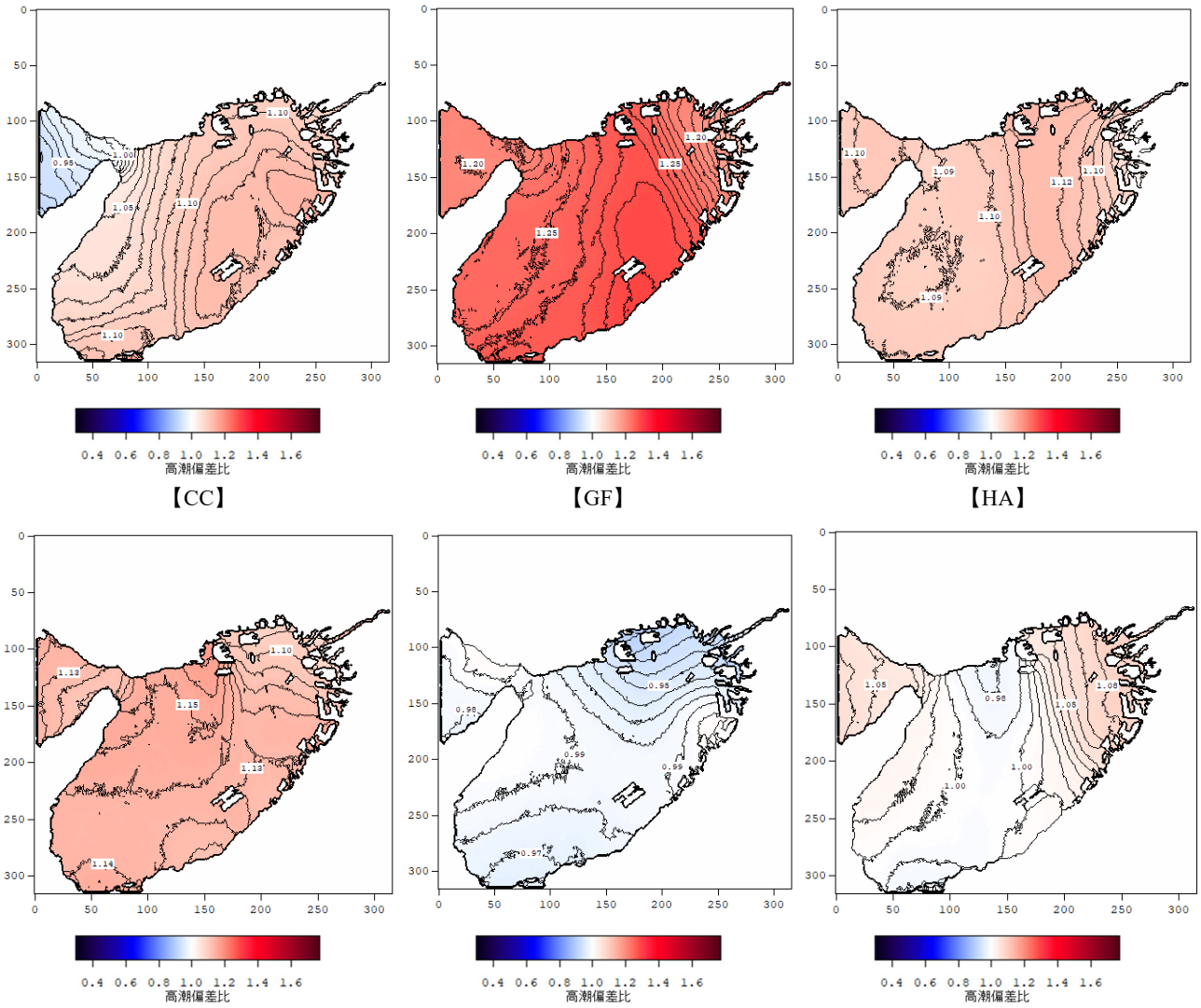
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.33　再現期間 500 年の高潮偏差（大阪湾）



【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

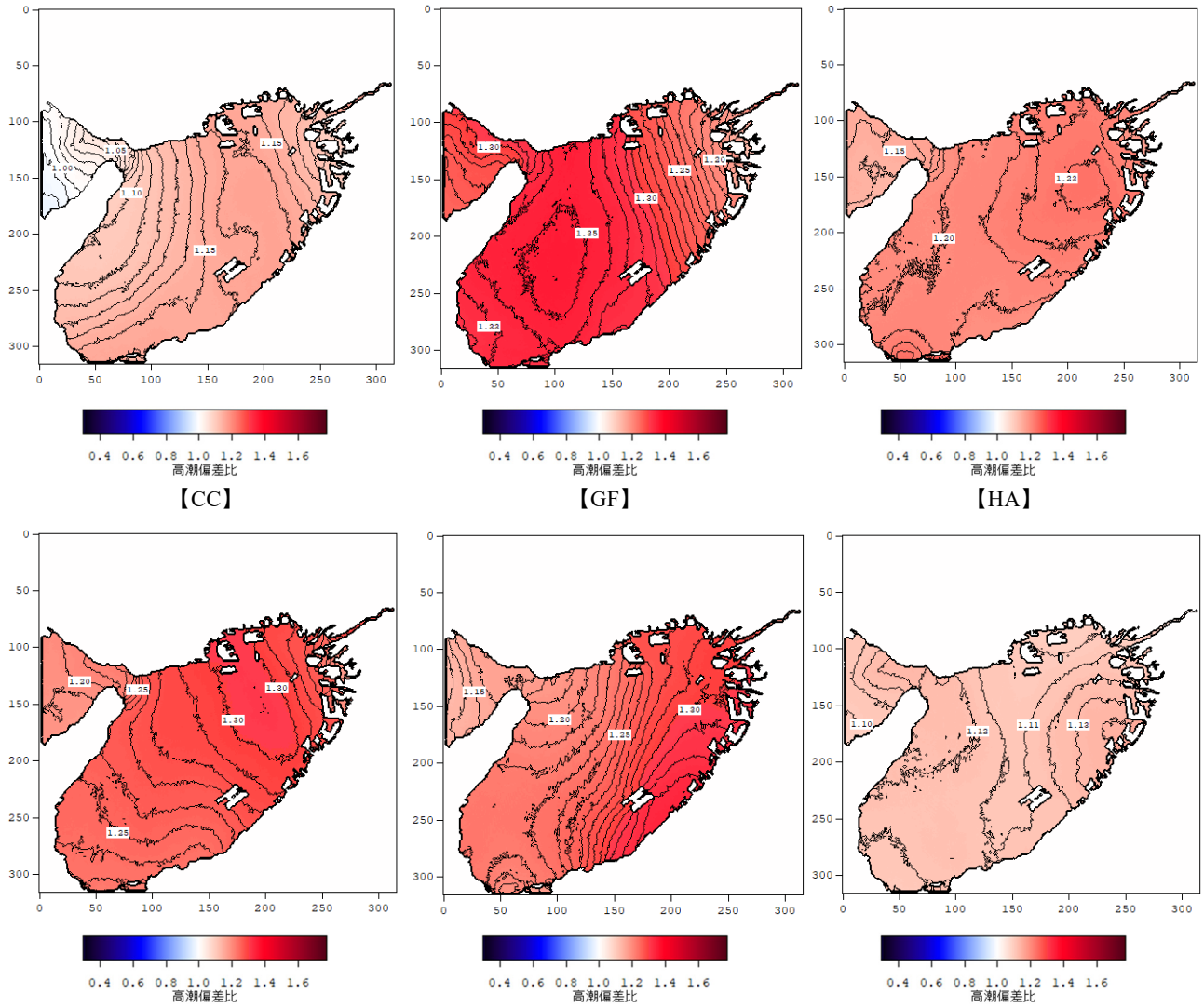
図-A.34　再現期間 500 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（大阪湾）



【CC】 【GF】 【HA】

【MI】 【MP】 【MR】

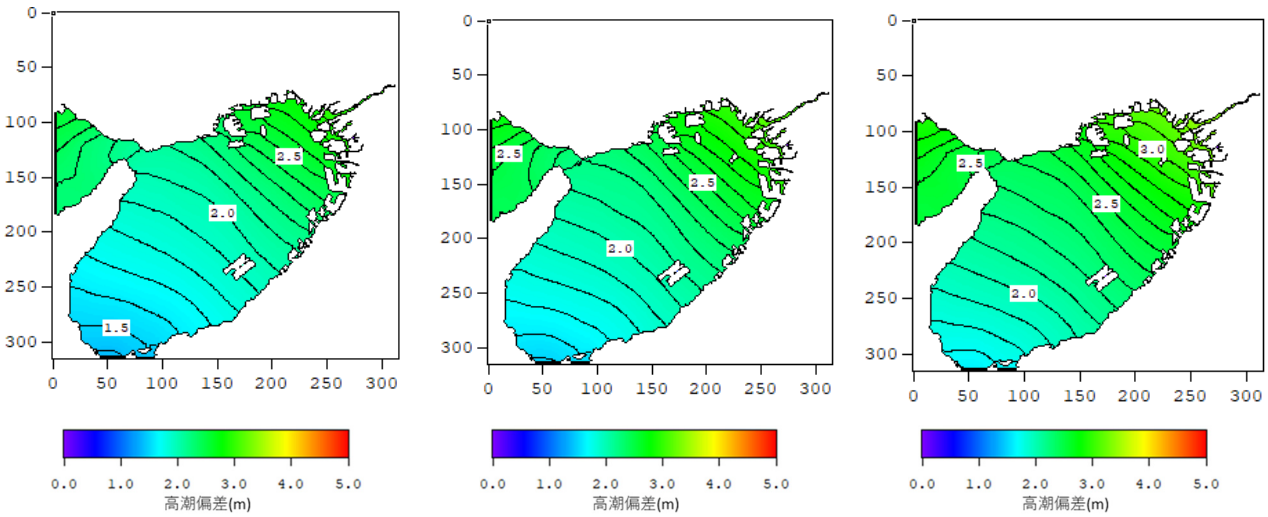
図-A.35　再現期間 500 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（大阪湾）



【CC】　【GF】　【HA】

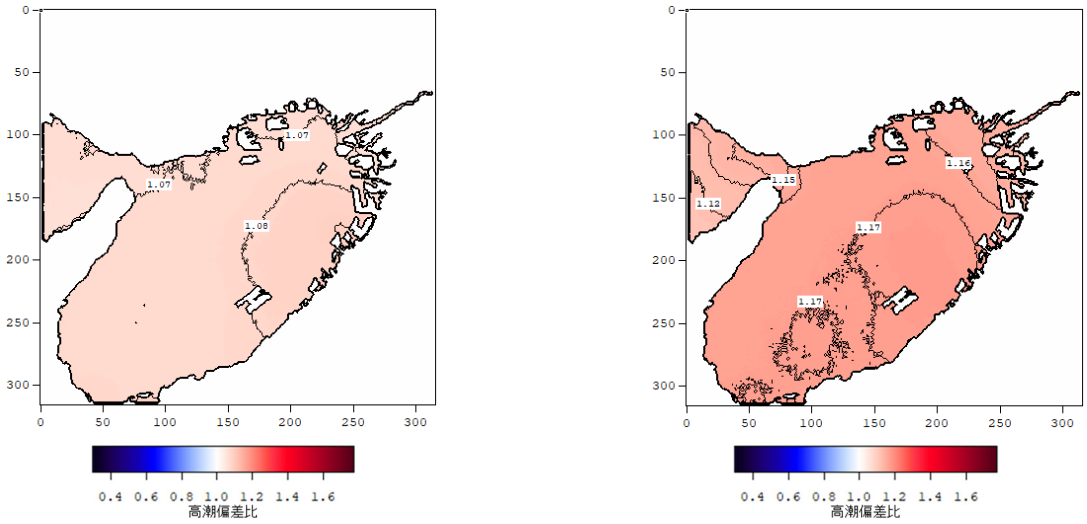
【MI】　【MP】　【MR】

図-A.36　再現期間 500 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（大阪湾）



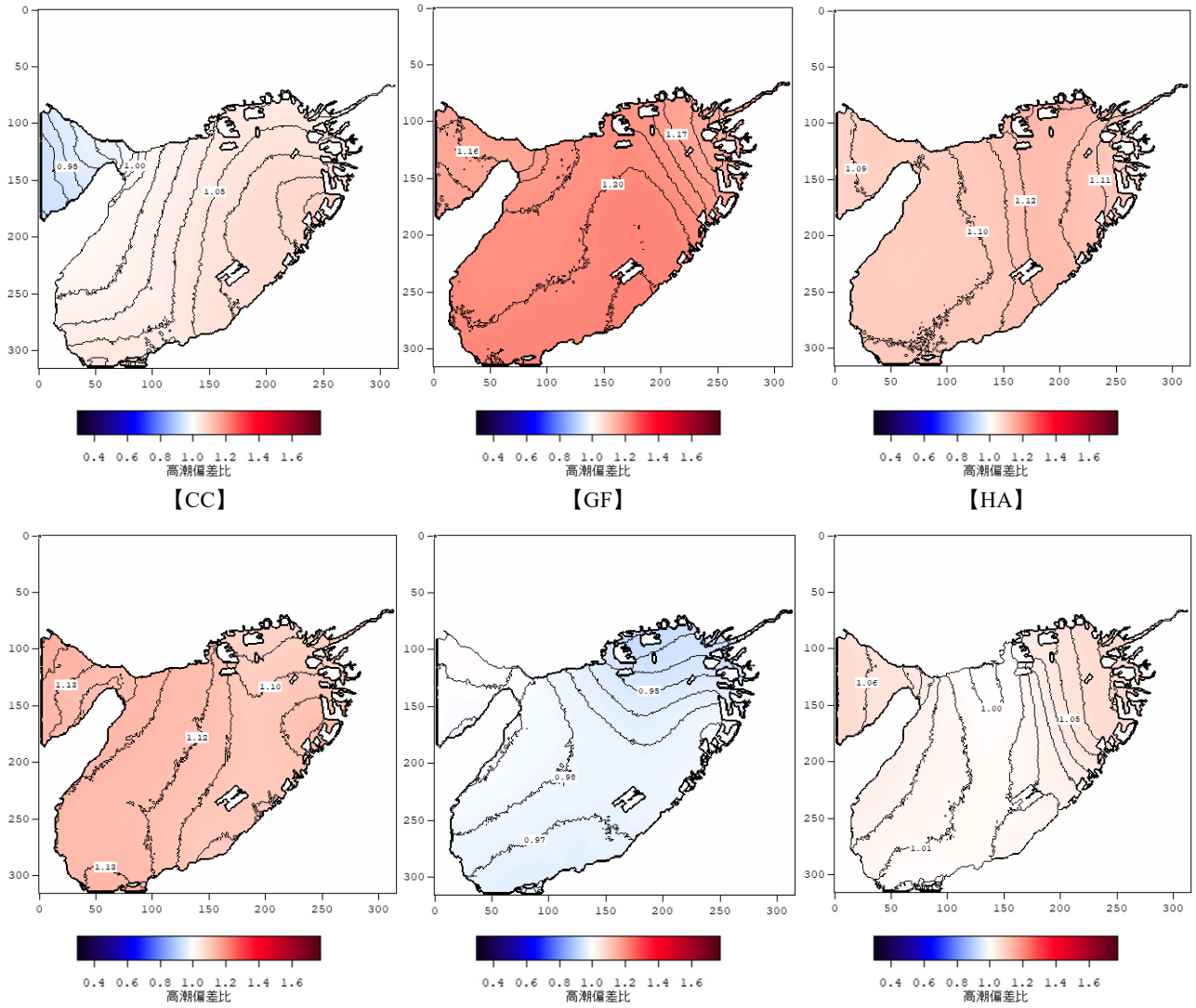
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.37　再現期間 200 年の高潮偏差（大阪湾）



【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

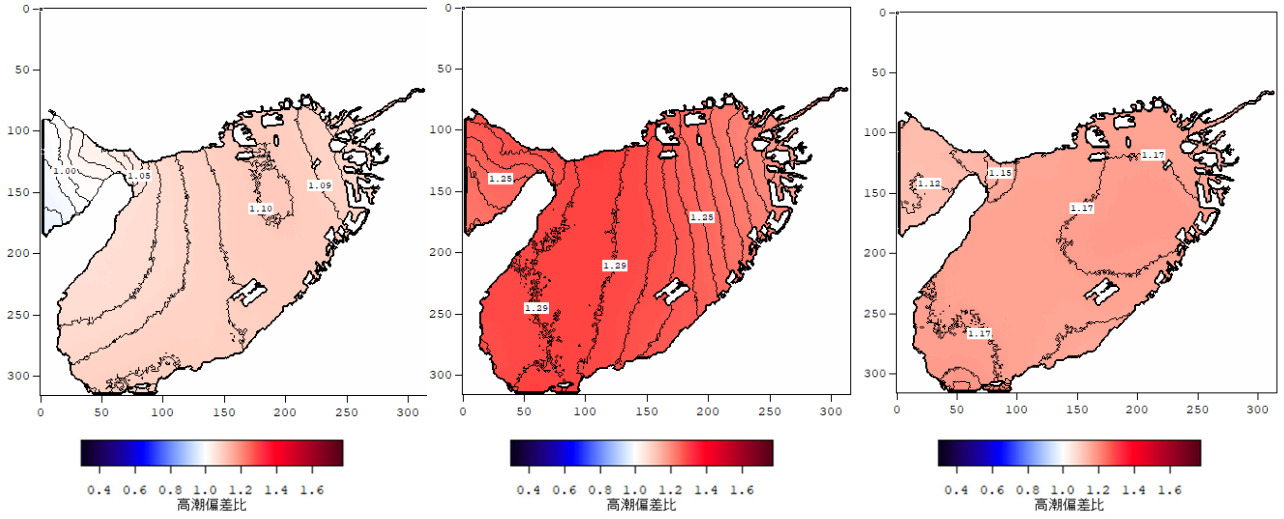
図-A.38　再現期間 200 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（大阪湾）



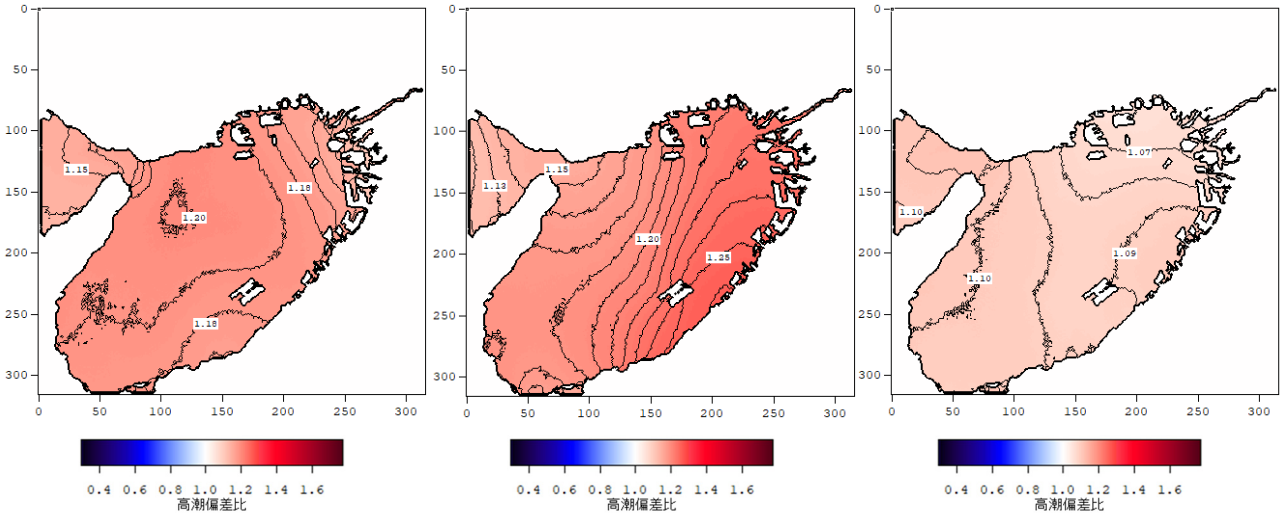
【CC】　【GF】　【HA】

【MI】　【MP】　【MR】

図-A.39　再現期間 200 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（大阪湾）

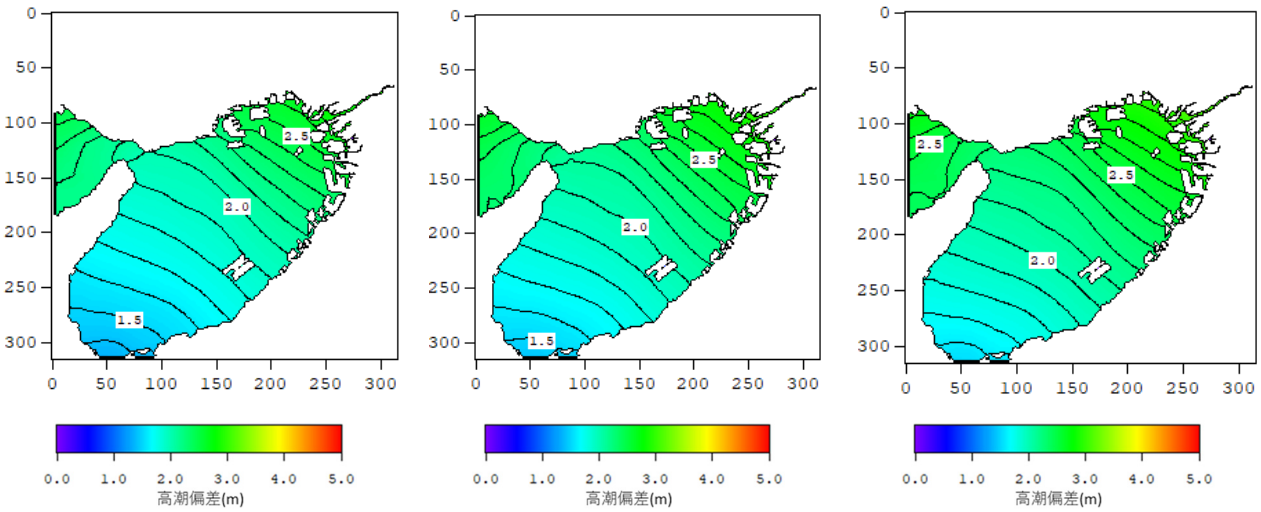


【CC】　【GF】　【HA】



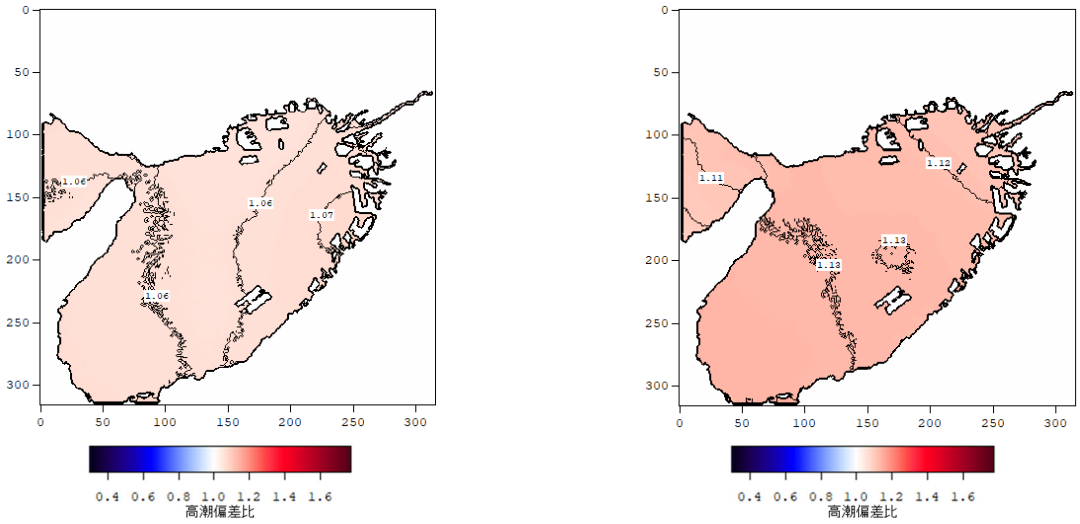
【MI】　【MP】　【MR】

図-A. 40　再現期間 200 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（大阪湾）



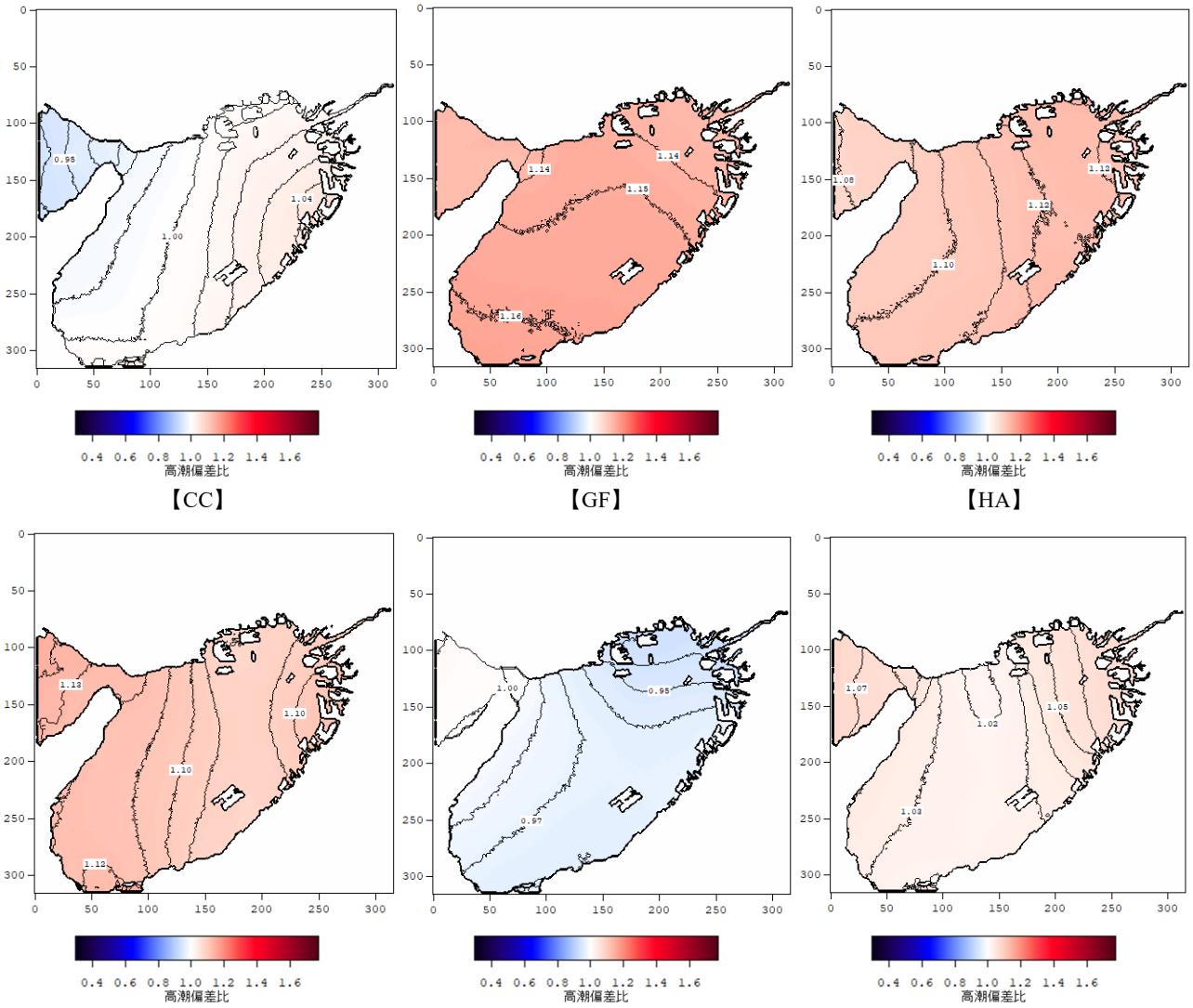
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A.41　再現期間 100 年の高潮偏差（大阪湾）



【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

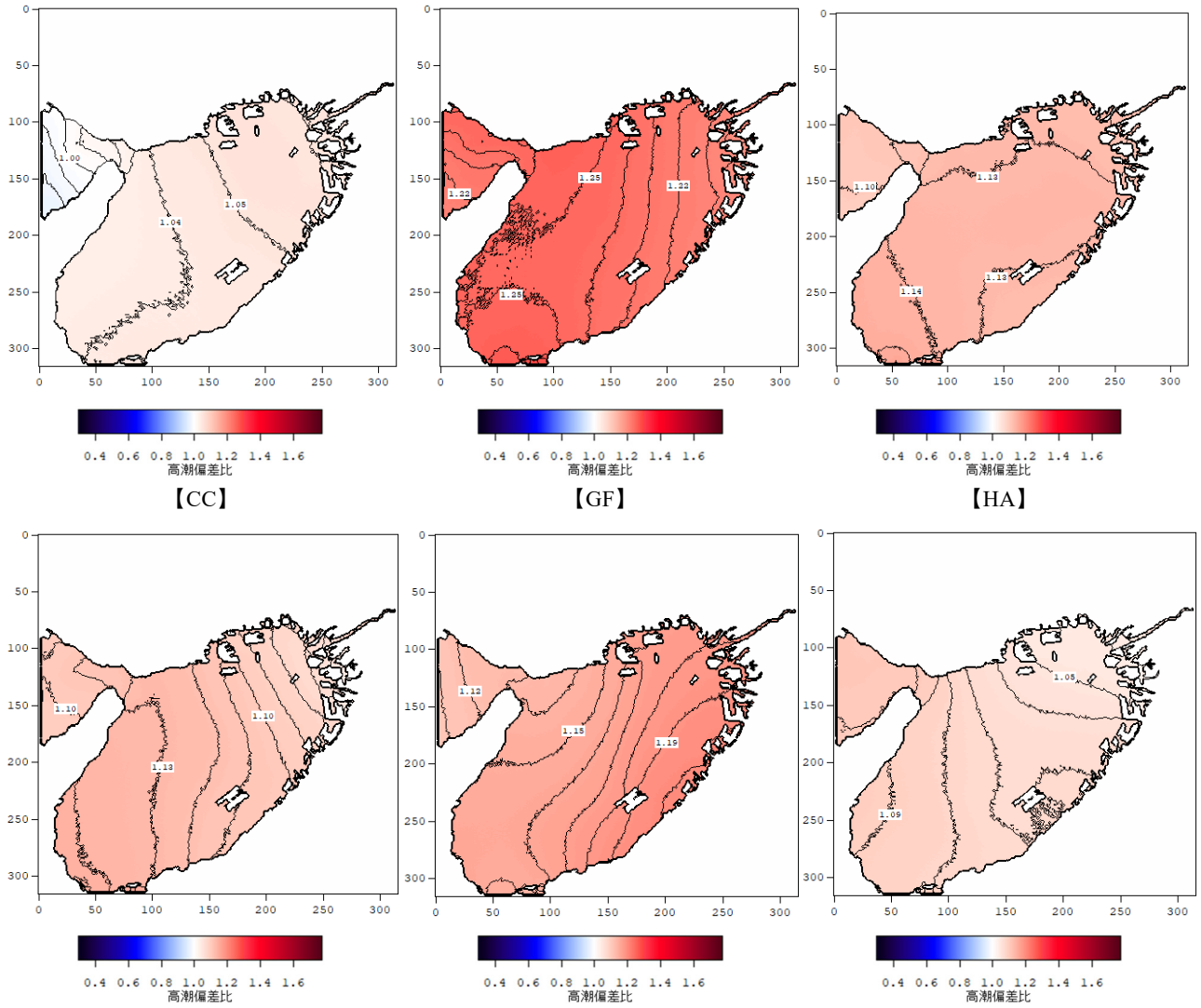
図-A.42　再現期間 100 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（大阪湾）



【CC】 【GF】 【HA】

【MI】 【MP】 【MR】

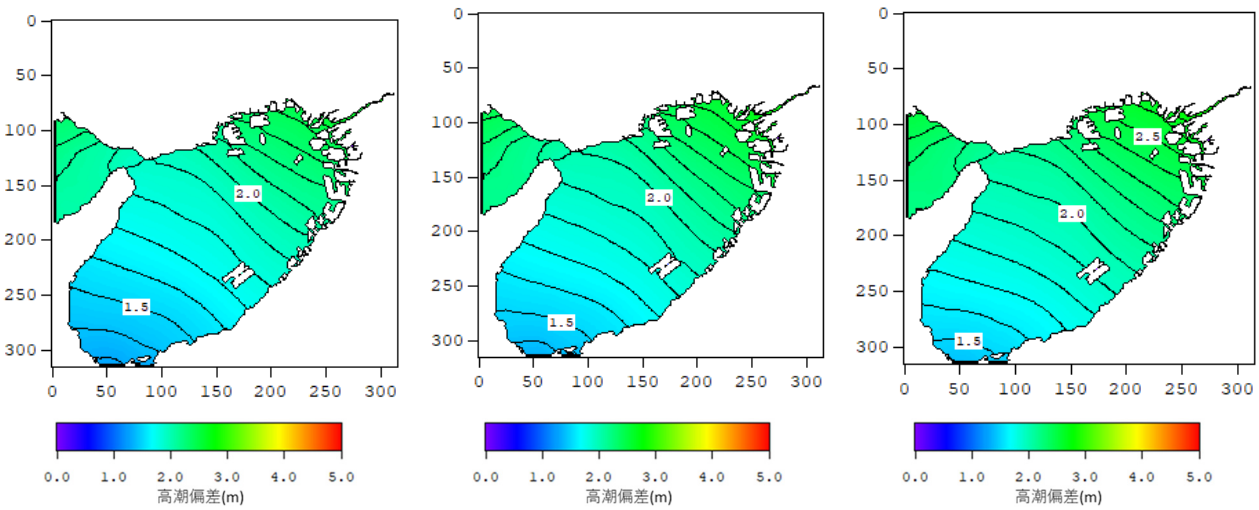
図-A.43 再現期間 100 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（大阪湾）



【CC】 【GF】 【HA】

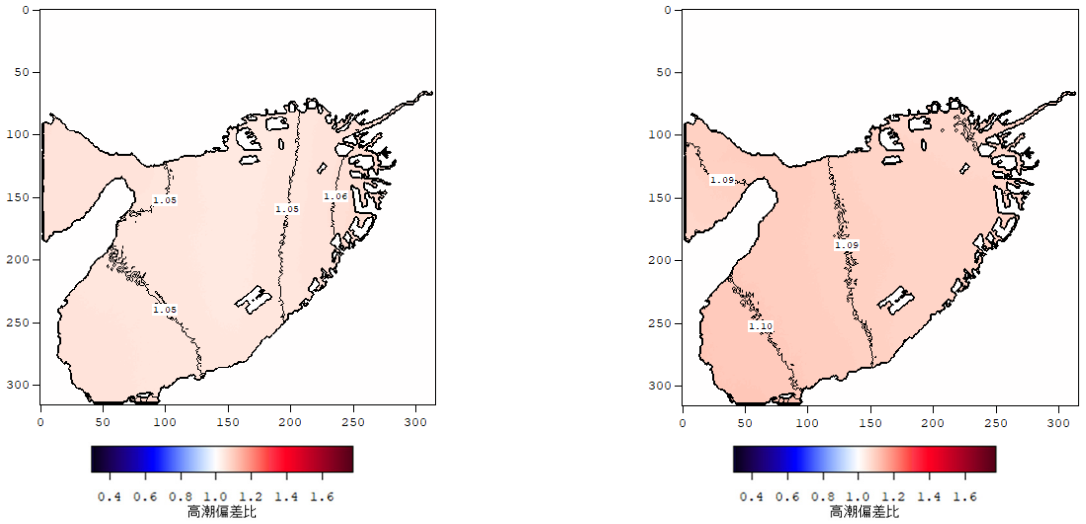
【MI】 【MP】 【MR】

図-A.44 再現期間 100 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（大阪湾）



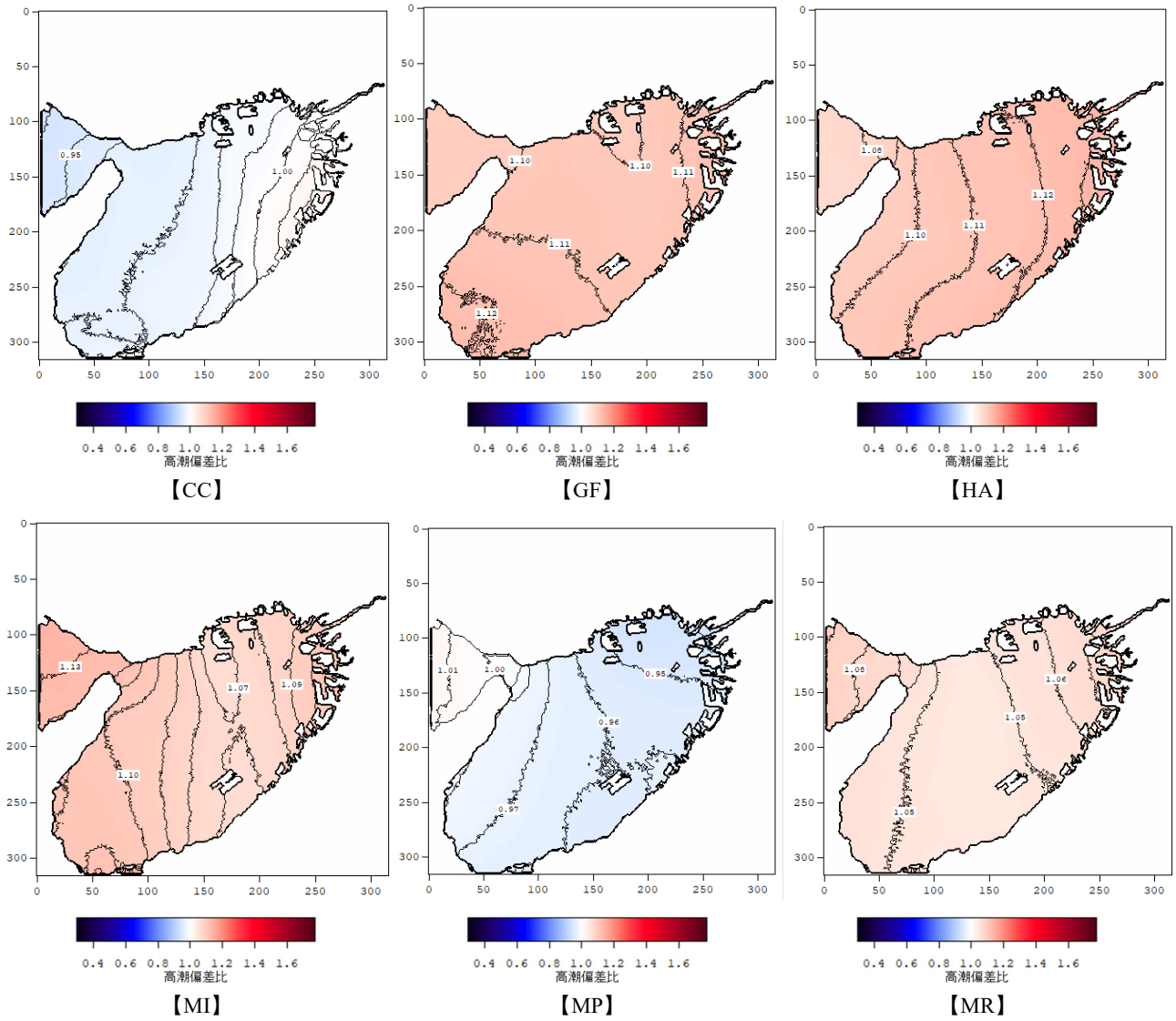
【過去実験】　【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

図-A. 45　再現期間 50 年の高潮偏差（大阪湾）



【将来実験（+2K）】　【将来実験（+4K）】

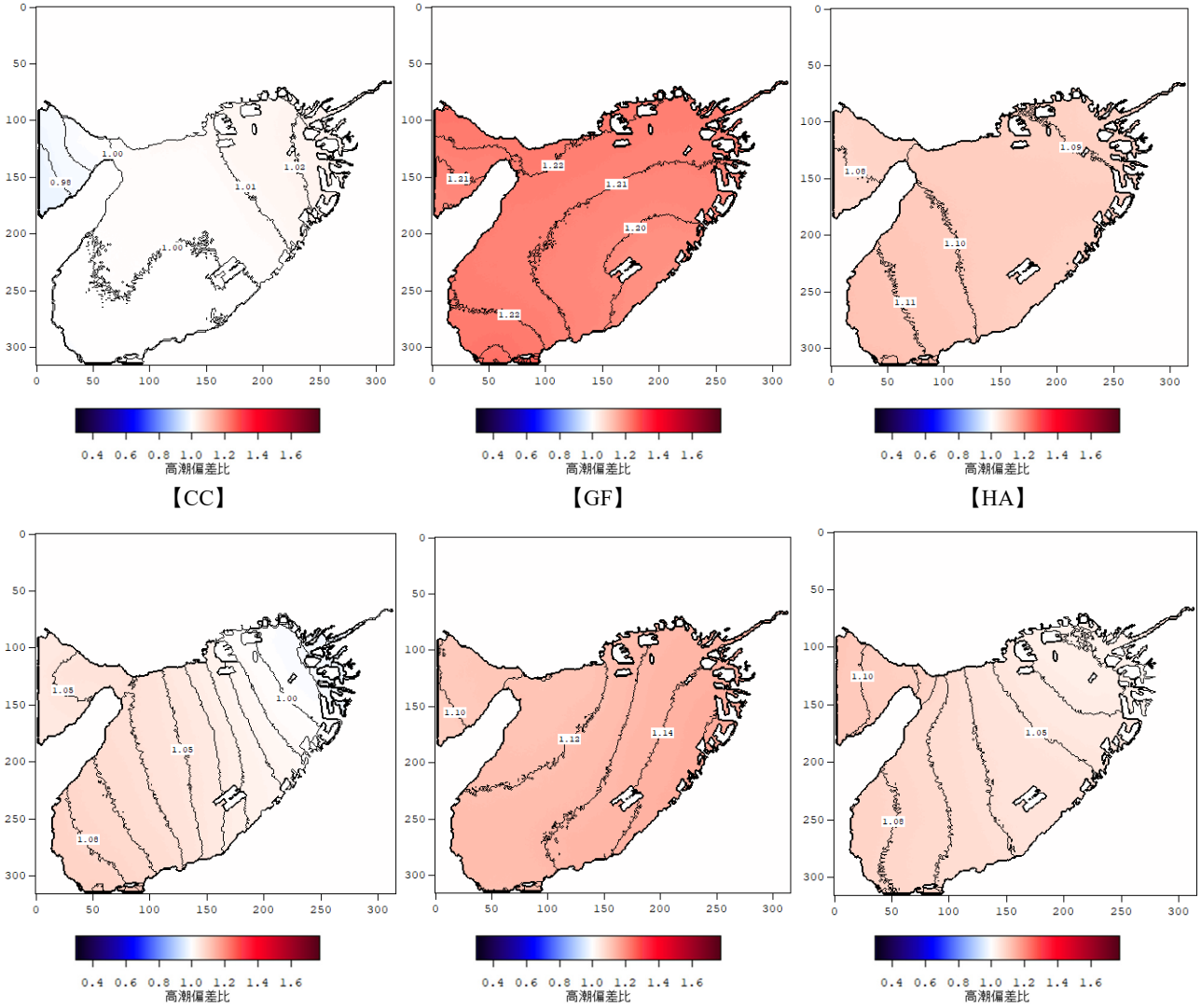
図-A. 46　再現期間 50 年の高潮偏差の将来変化比（6SST 平均）（大阪湾）



【CC】 【GF】 【HA】

【MI】 【MP】 【MR】

図-A.47 再現期間 50 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+2K））（大阪湾）

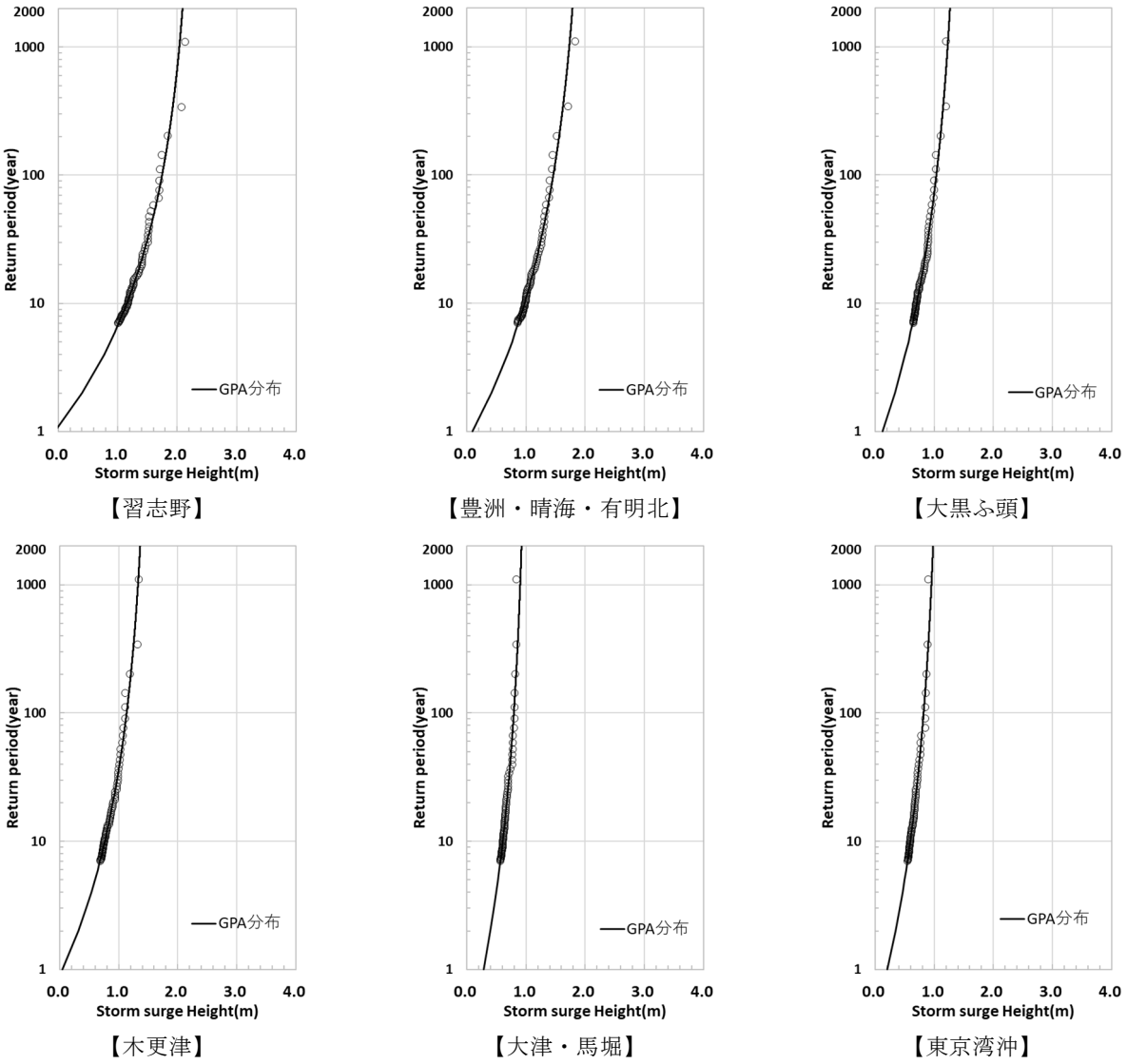


【CC】 【GF】 【HA】

【MI】 【MP】 【MR】

図-A.48 再現期間 50 年の高潮偏差の SST 毎の将来変化比（将来実験（+4K））（大阪湾）

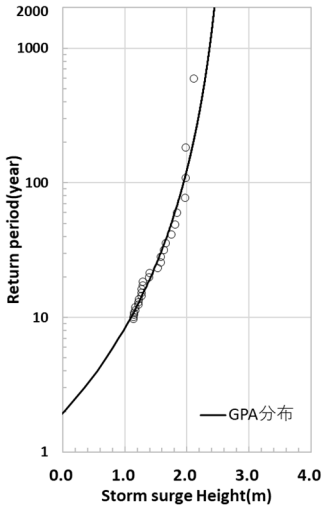
付録B　高潮偏差の極値統計解析結果



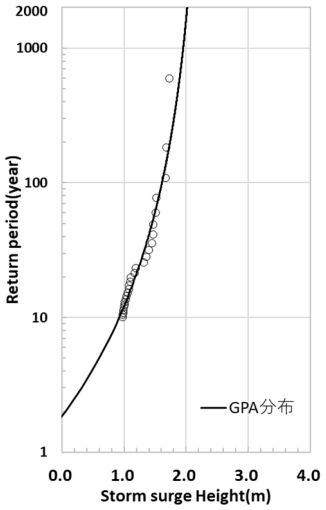
【習志野】　【豊洲・晴海・有明北】　【大黒ふ頭】

【木更津】　【大津・馬堀】　【東京湾沖】

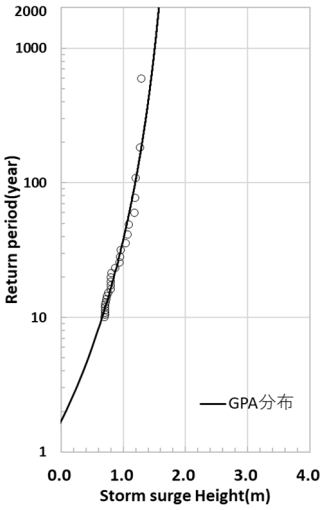
図-B.1　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（過去実験）（東京湾）



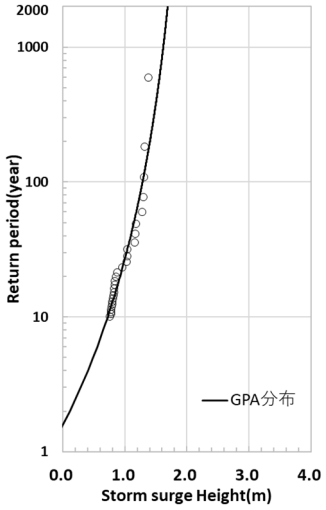
【習志野】



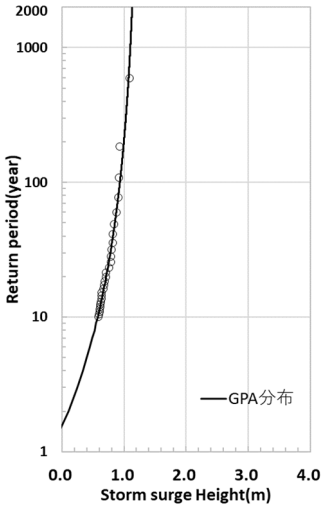
【豊洲・晴海・有明北】



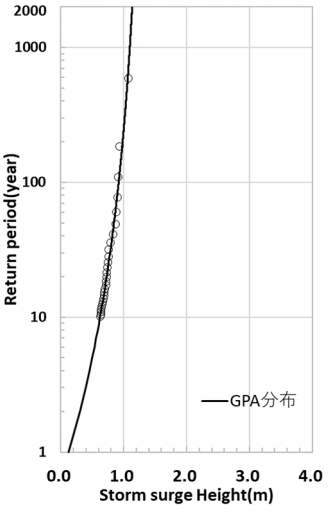
【大黒ふ頭】



【木更津】

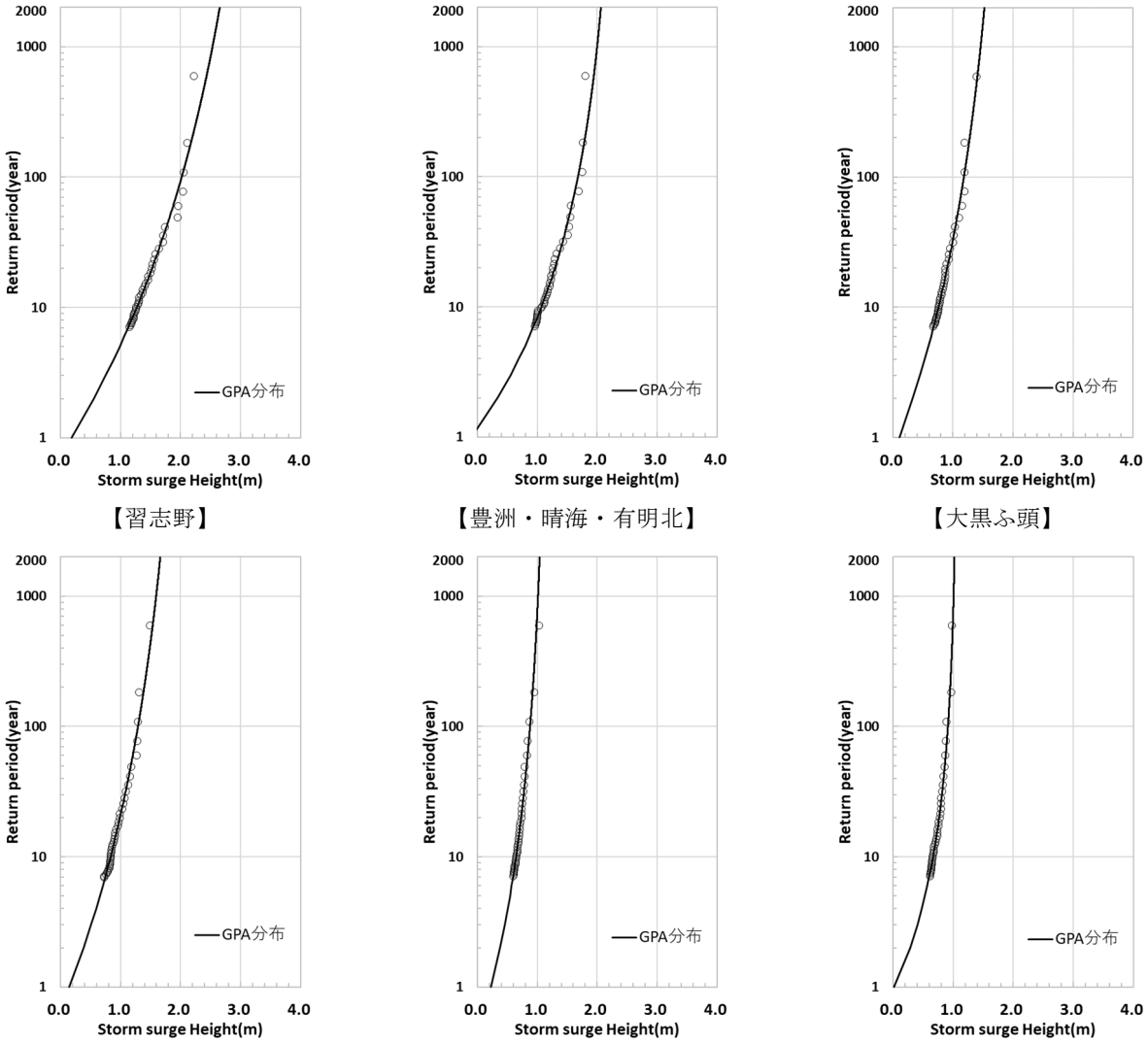


【大津・馬堀】



【東京湾沖】

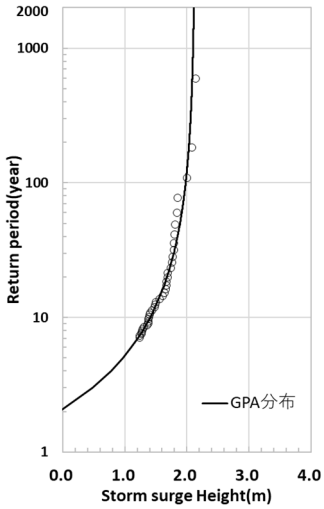
図-B.2　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：CC）（東京湾）



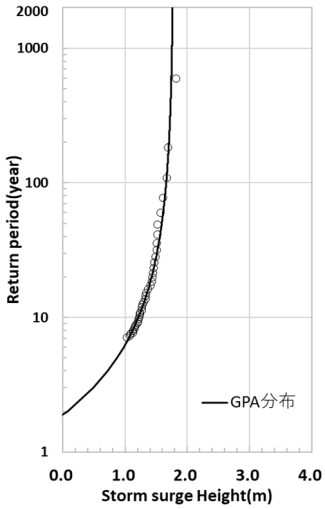
【習志野】　【豊洲・晴海・有明北】　【大黒ふ頭】

【木更津】　【大津・馬堀】　【東京湾沖】

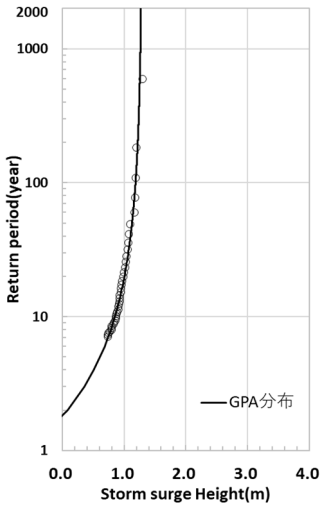
図-B.3　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：GF）（東京湾）



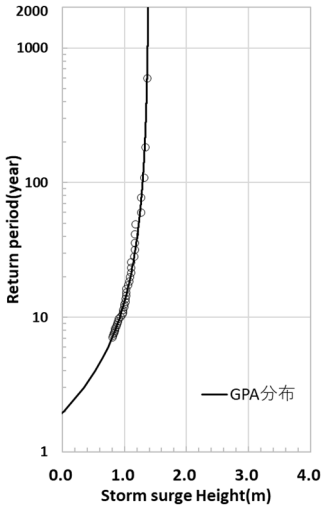
【習志野】



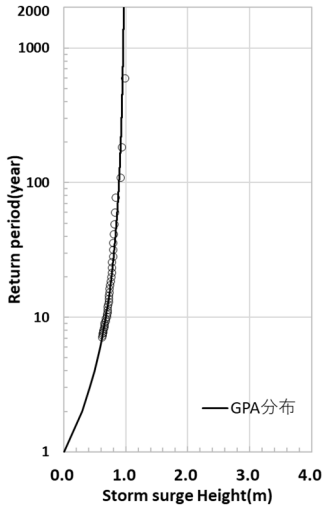
【豊洲・晴海・有明北】



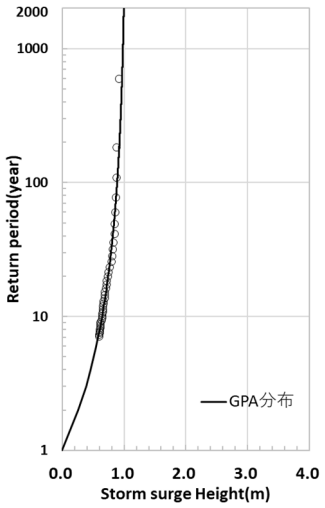
【大黒ふ頭】



【木更津】

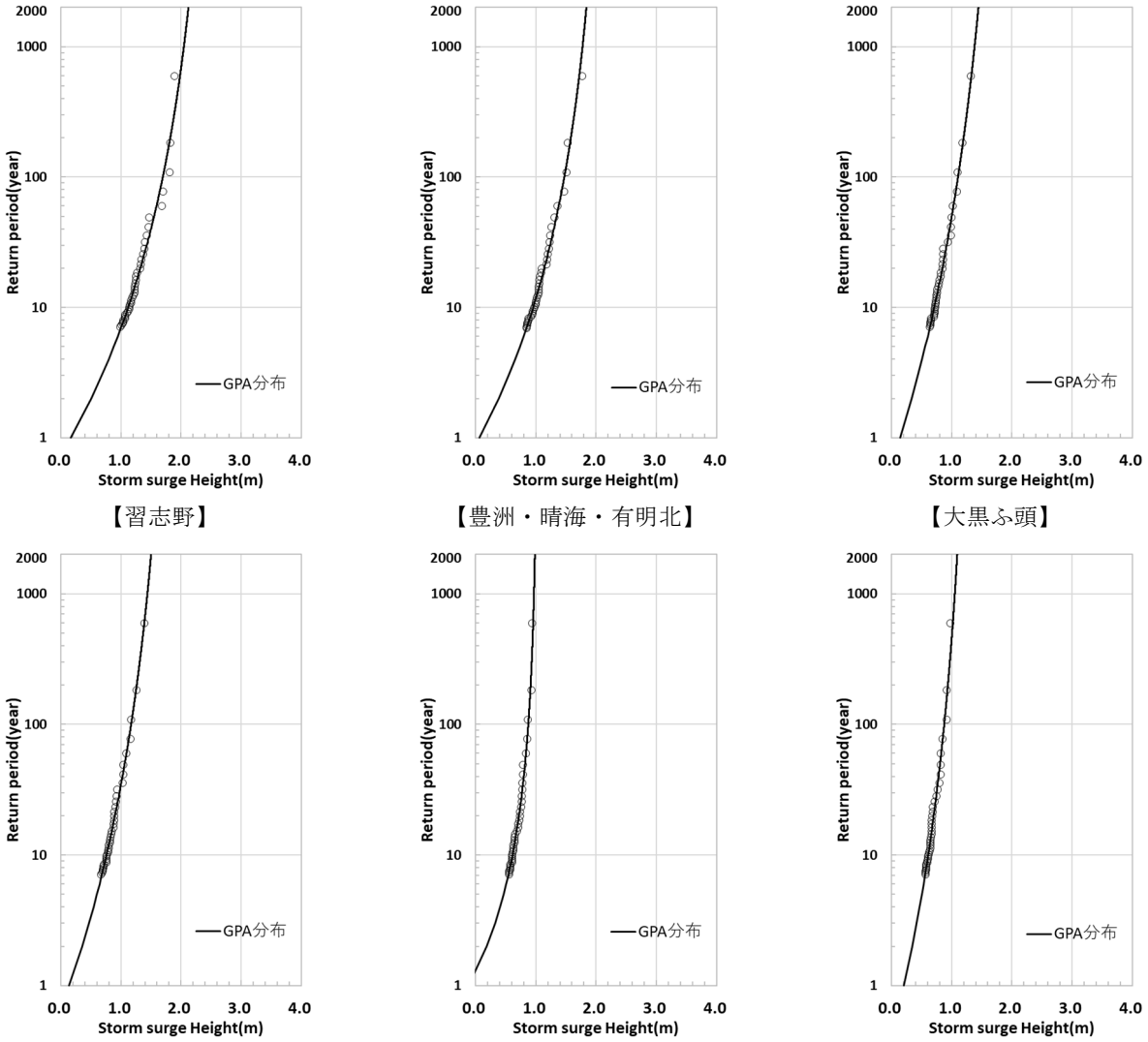


【大津・馬堀】



【東京湾沖】

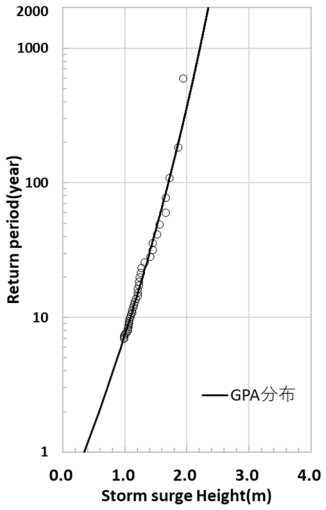
図-B.4　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：HA）（東京湾）



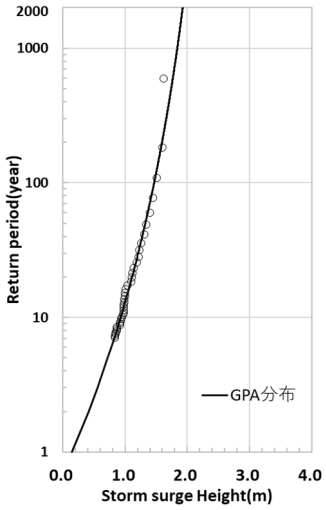
【習志野】　【豊洲・晴海・有明北】　【大黒ふ頭】

【木更津】　【大津・馬堀】　【東京湾沖】

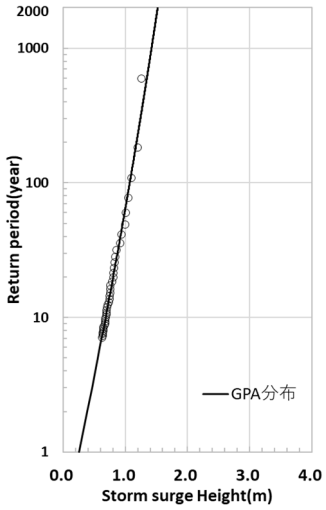
図-B.5　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MI）（東京湾）



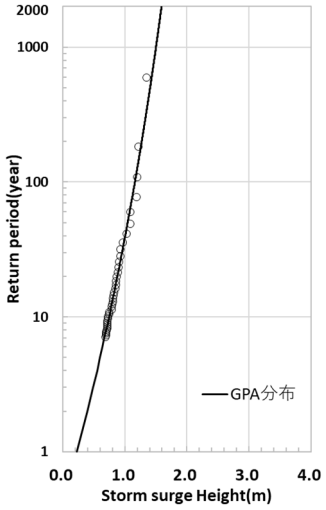
【習志野】



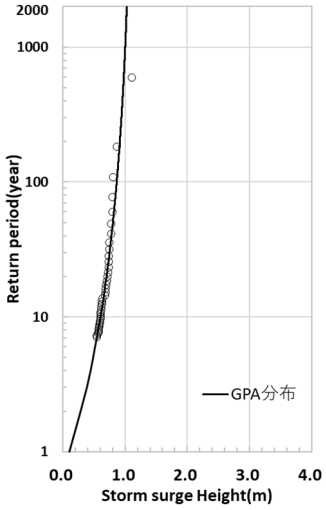
【豊洲・晴海・有明北】



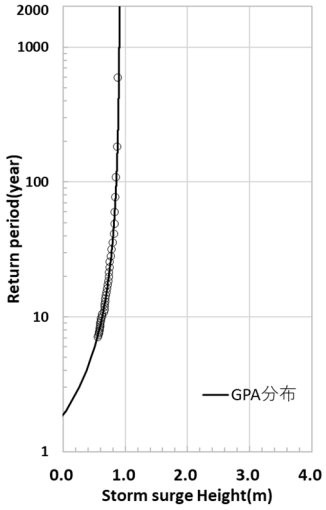
【大黒ふ頭】



【木更津】

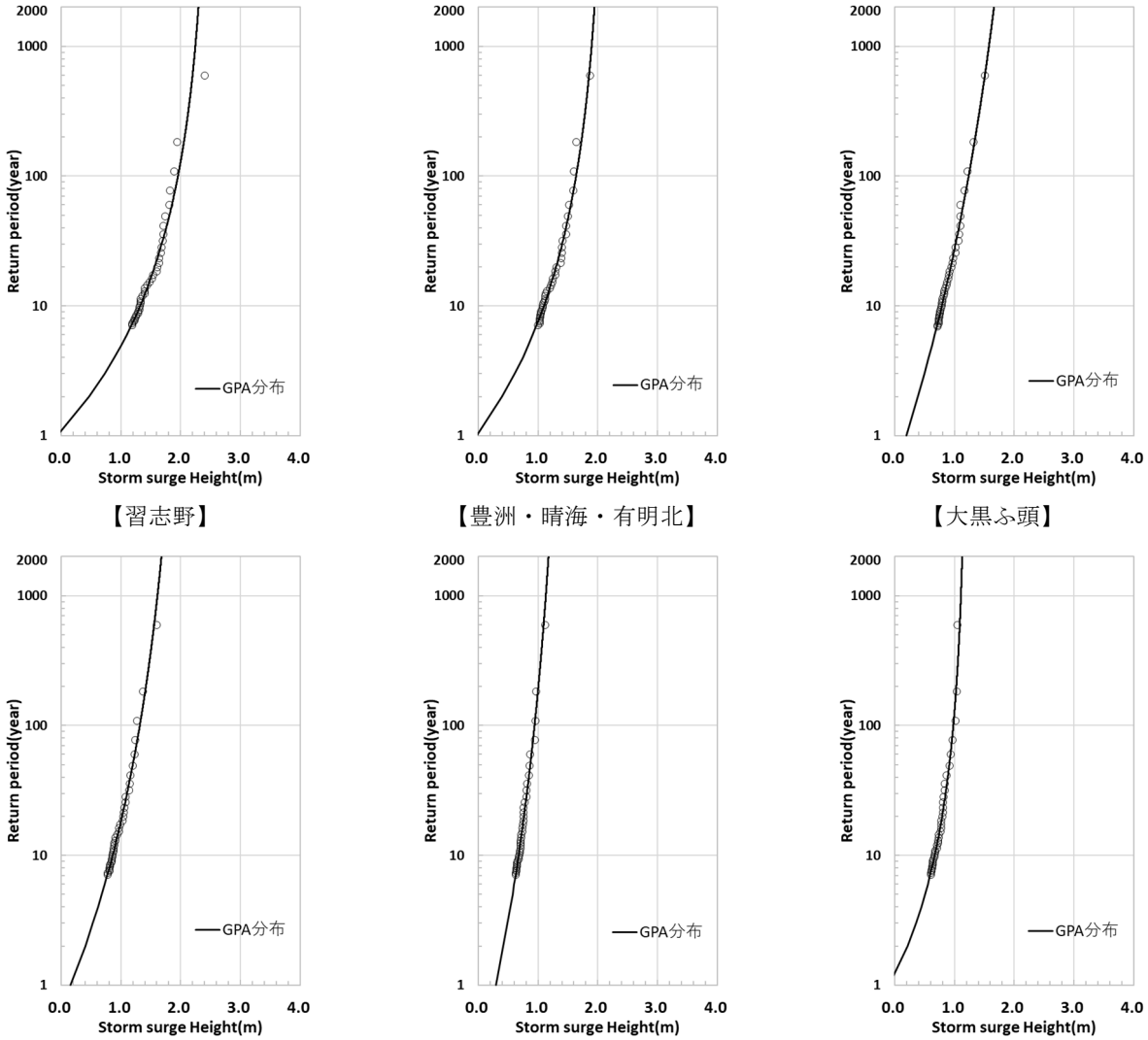


【大津・馬堀】



【東京湾沖】

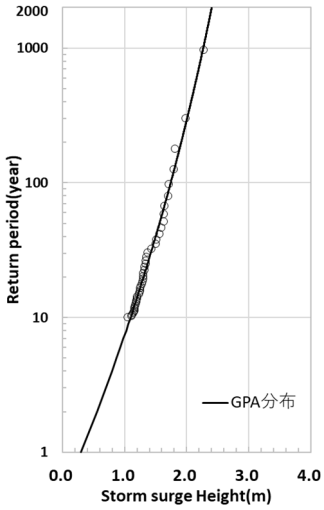
図-B.6　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MP）（東京湾）



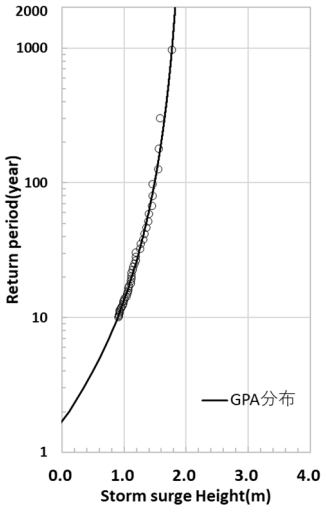
【習志野】　【豊洲・晴海・有明北】　【大黒ふ頭】

【木更津】　【大津・馬堀】　【東京湾沖】

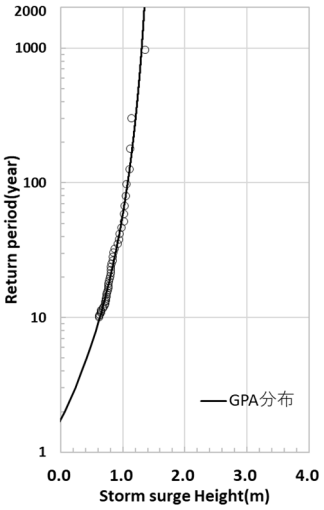
図-B.7　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MR）（東京湾）



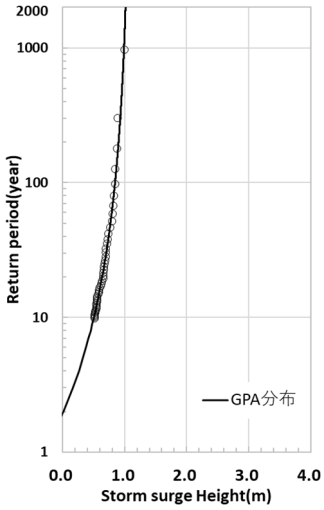
【習志野】



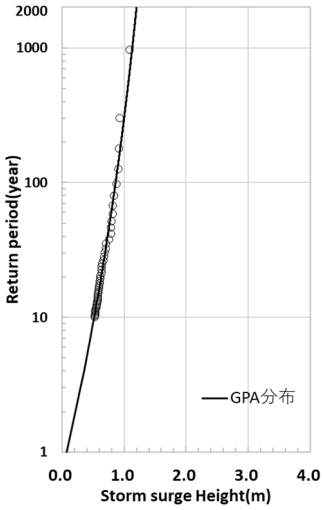
【豊洲・晴海・有明北】



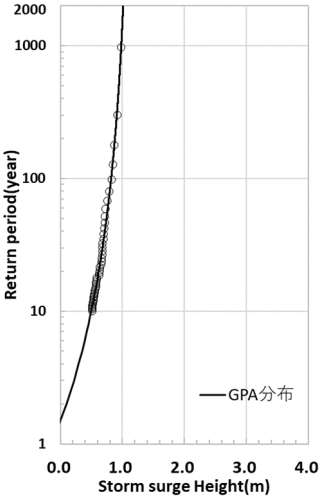
【大黒ふ頭】



【木更津】

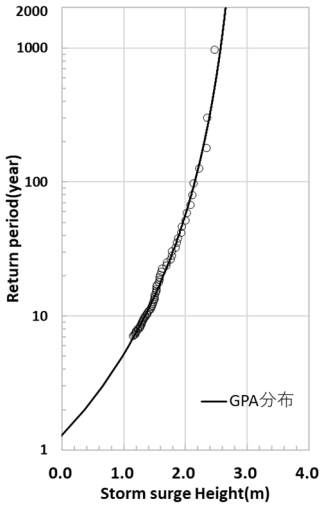


【大津・馬堀】

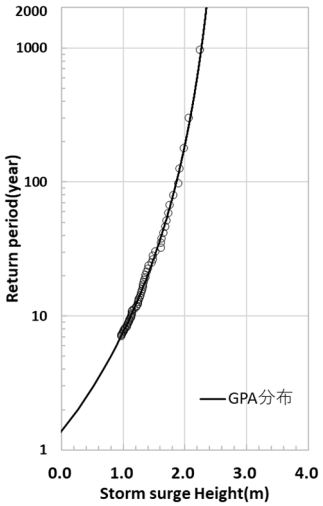


【東京湾沖】

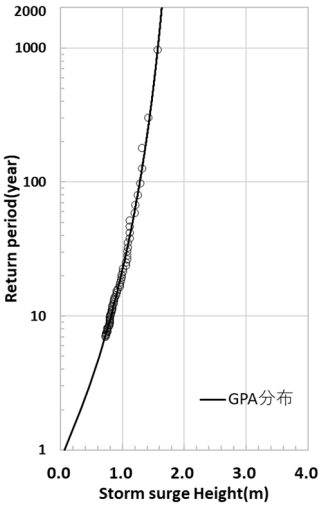
図-B.8　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：CC）（東京湾）



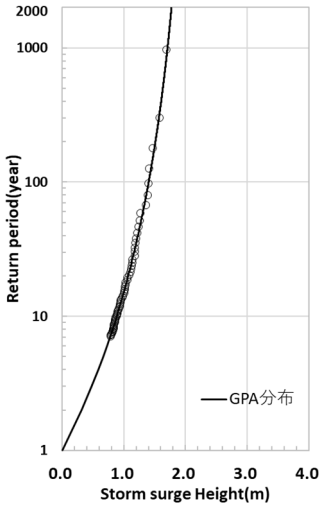
【習志野】



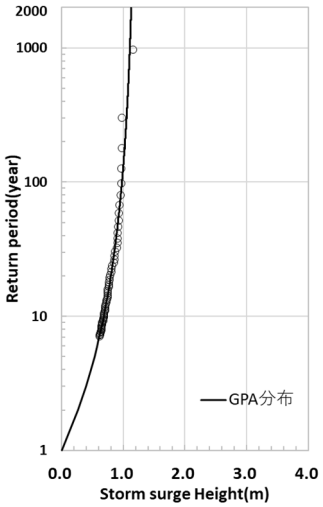
【豊洲・晴海・有明北】



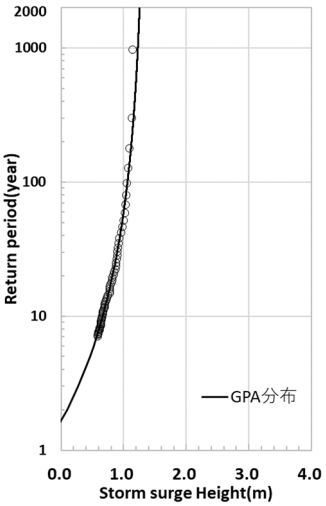
【大黒ふ頭】



【木更津】

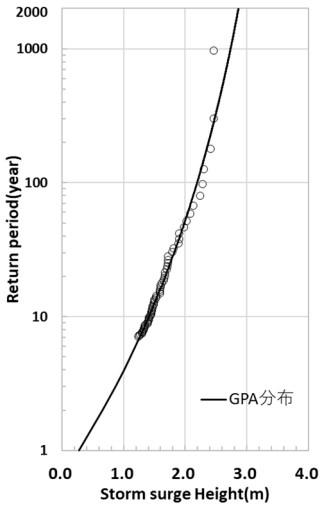


【大津・馬堀】

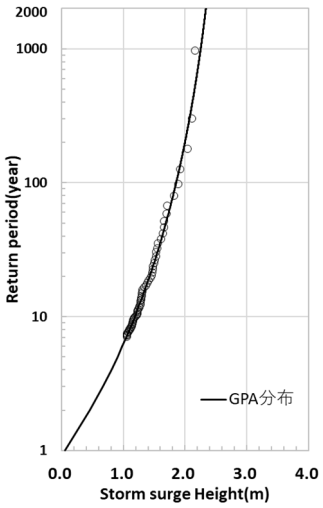


【東京湾沖】

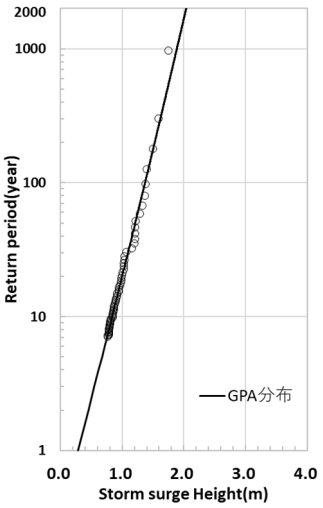
図-B.9　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：GF）（東京湾）



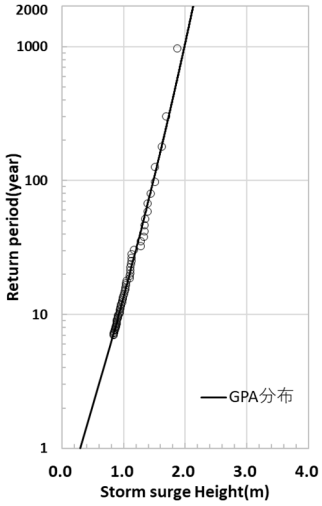
【習志野】



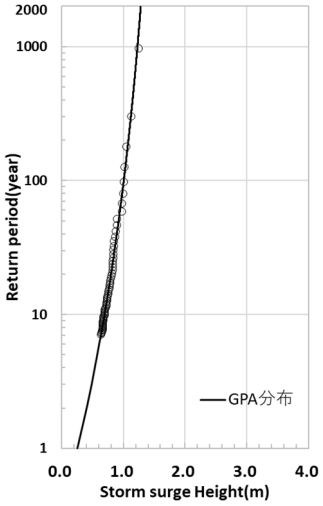
【豊洲・晴海・有明北】



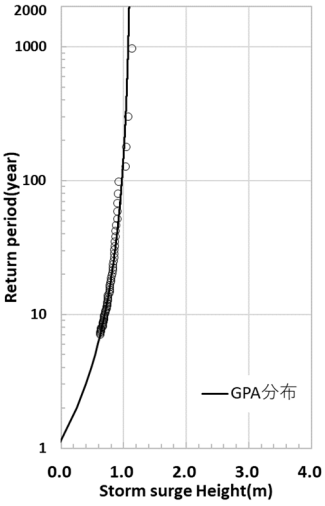
【大黒ふ頭】



【木更津】

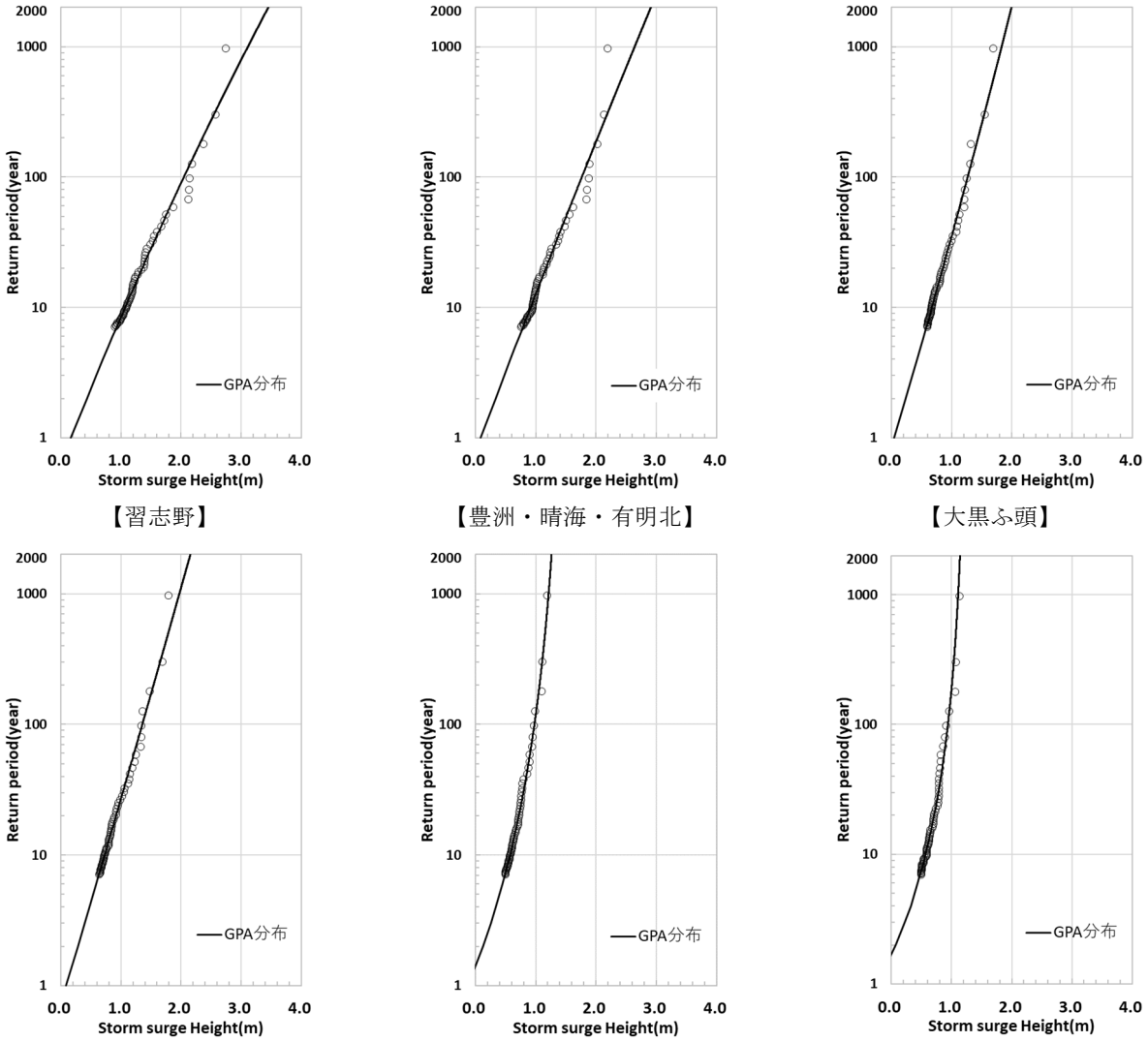


【大津・馬堀】



【東京湾沖】

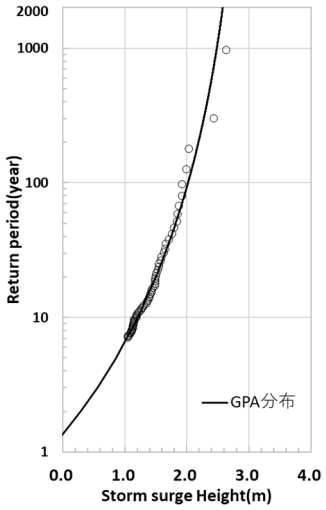
図-B.10　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：HA）（東京湾）



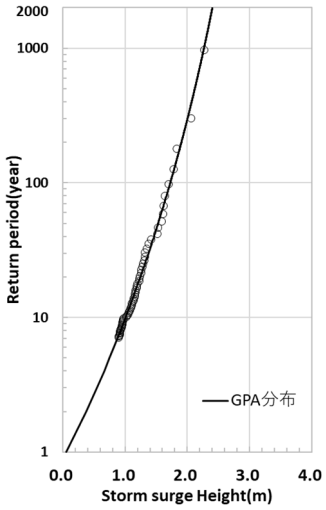
【習志野】　【豊洲・晴海・有明北】　【大黒ふ頭】

【木更津】　【大津・馬堀】　【東京湾沖】

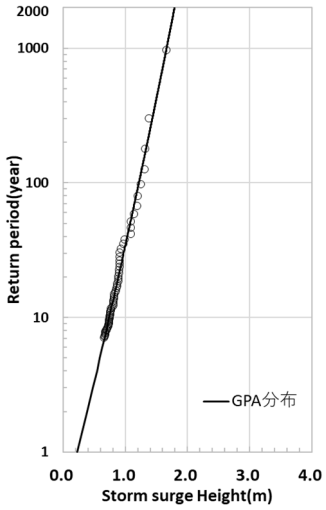
図-B.11　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MI）（東京湾）



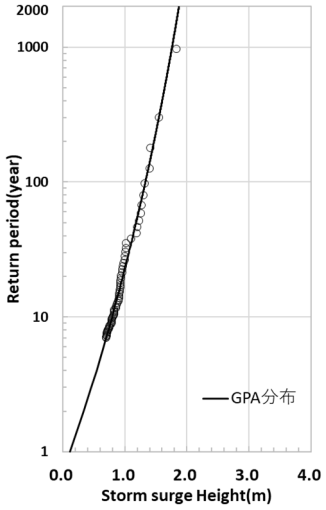
【習志野】



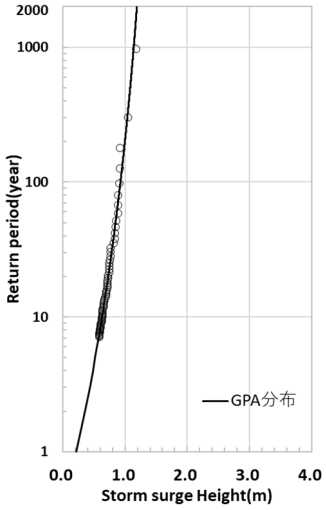
【豊洲・晴海・有明北】



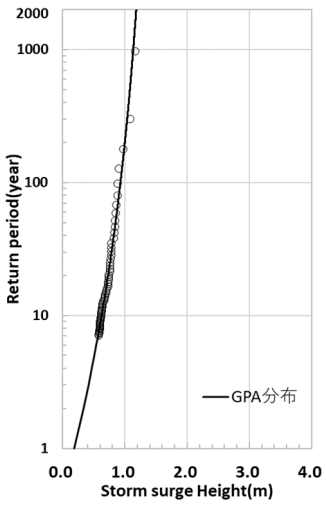
【大黒ふ頭】



【木更津】

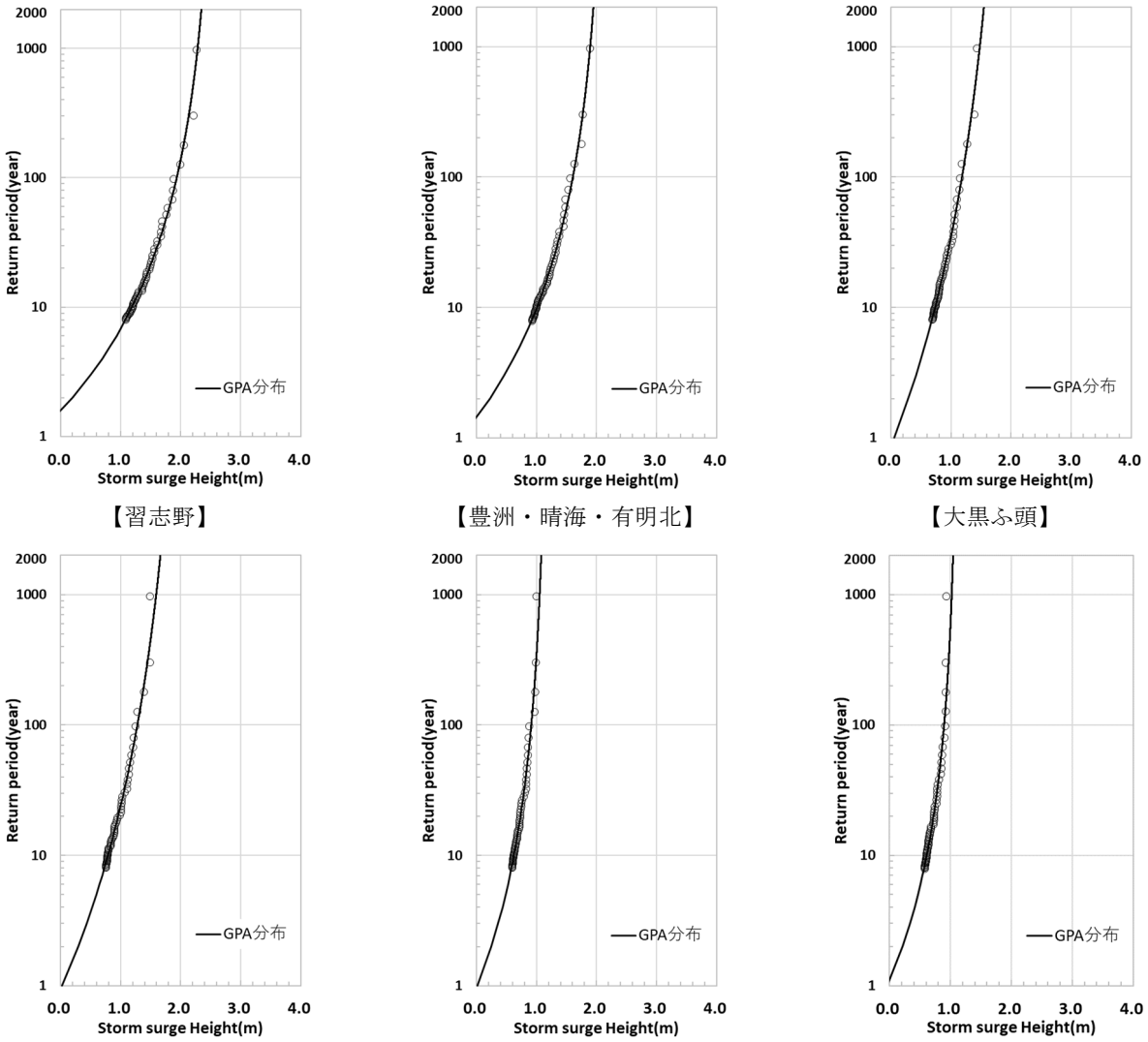


【大津・馬堀】



【東京湾沖】

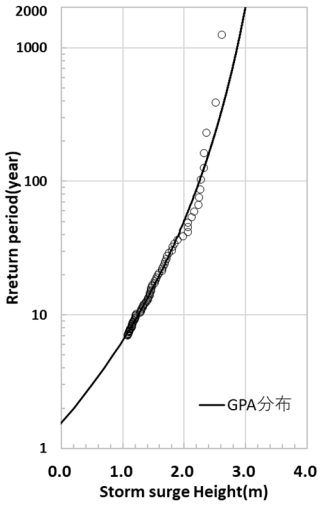
図-B.12　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MP）（東京湾）



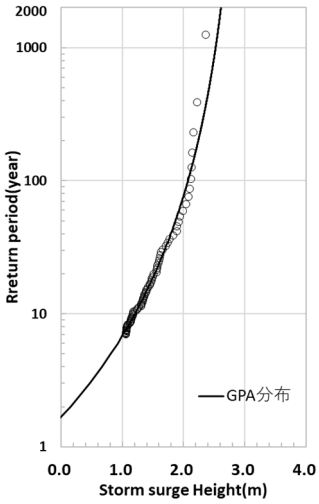
【習志野】　【豊洲・晴海・有明北】　【大黒ふ頭】

【木更津】　【大津・馬堀】　【東京湾沖】

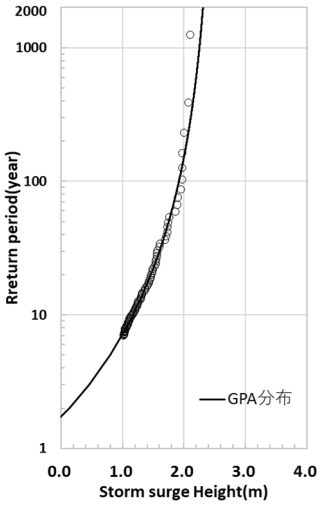
図-B.13　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MR）（東京湾）



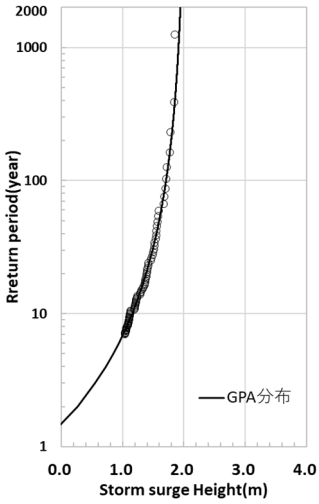
【潮見ふ頭】



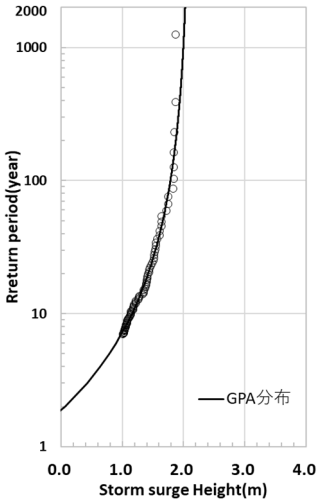
【石原】



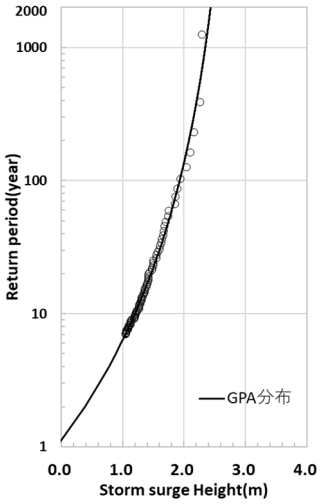
【常滑】



【香良洲】

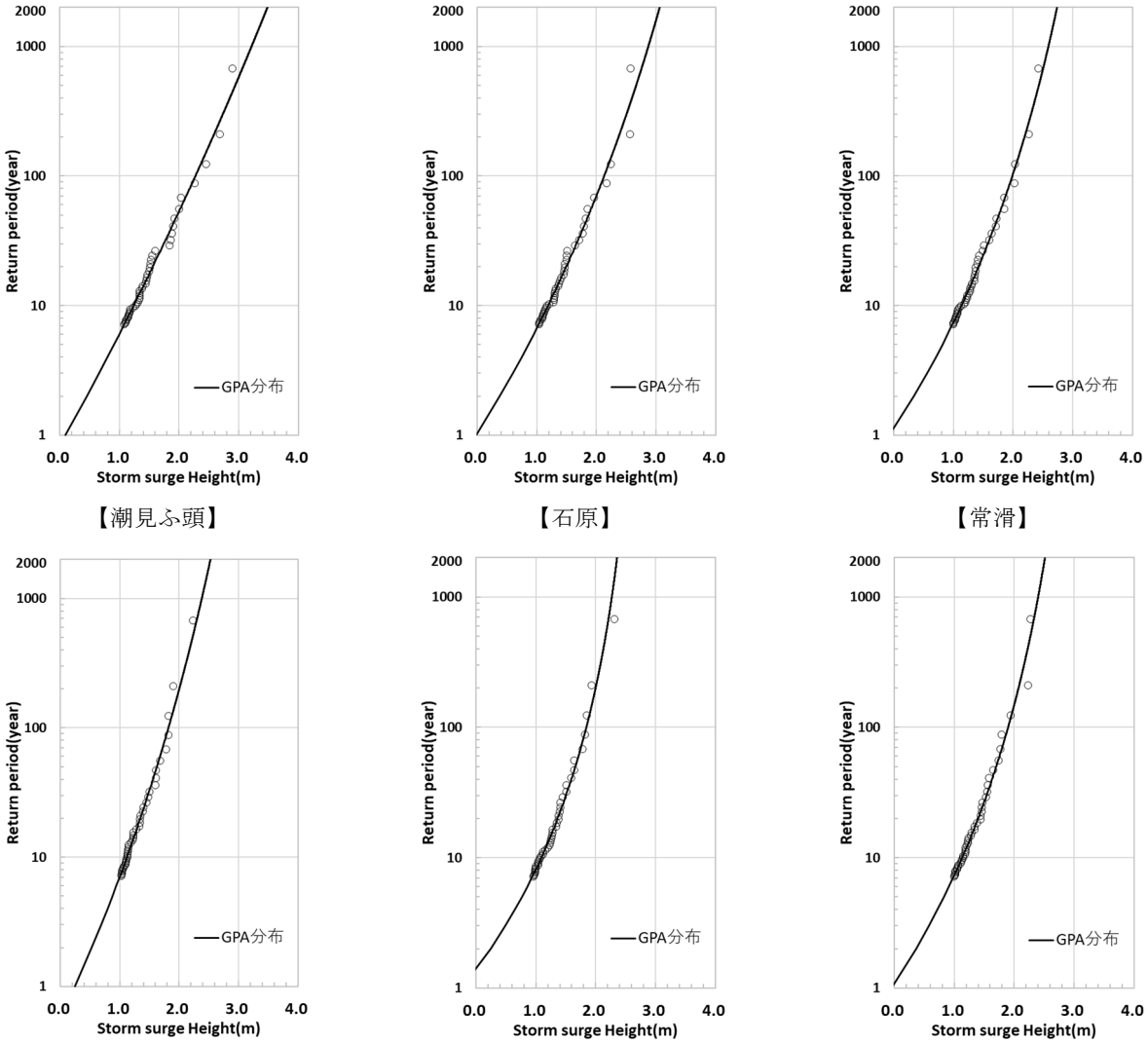


【富貴・武豊】



【海陽】

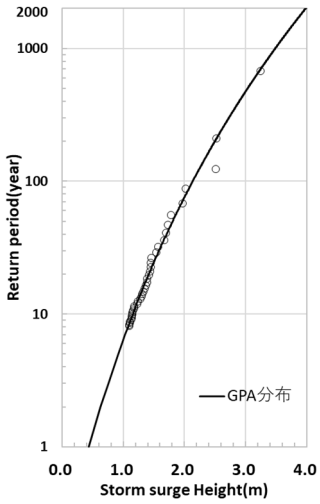
図-B. 14　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（過去実験）（伊勢湾）



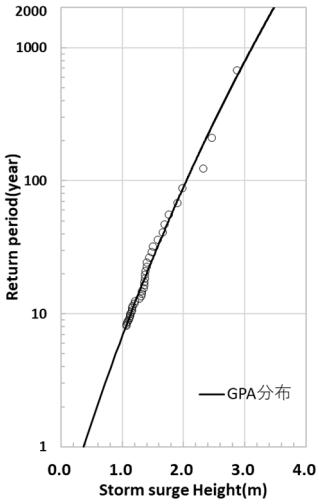
【潮見ふ頭】　【石原】　【常滑】

【香良洲】　【富貴・武豊】　【海陽】

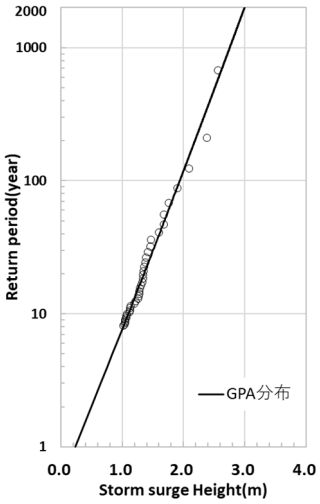
図-B.15　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：CC）（伊勢湾）



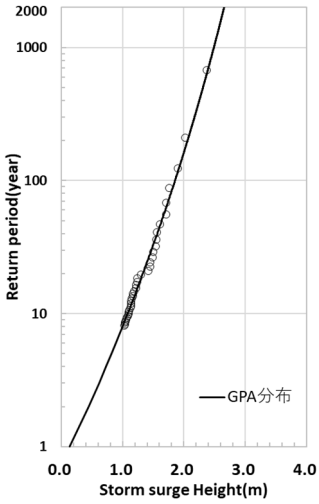
【潮見ふ頭】



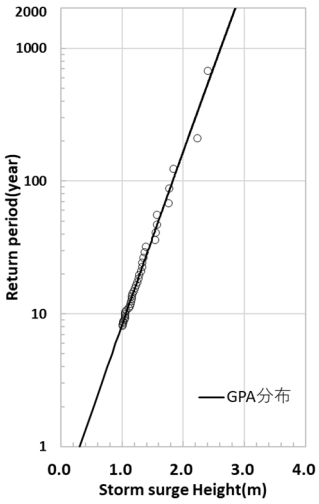
【石原】



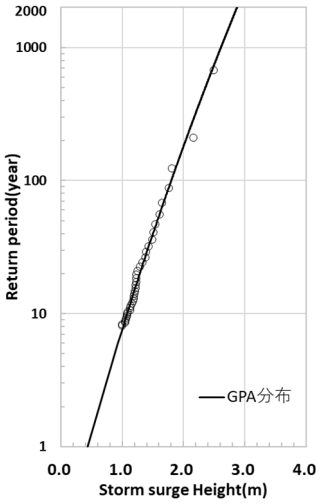
【常滑】



【香良洲】

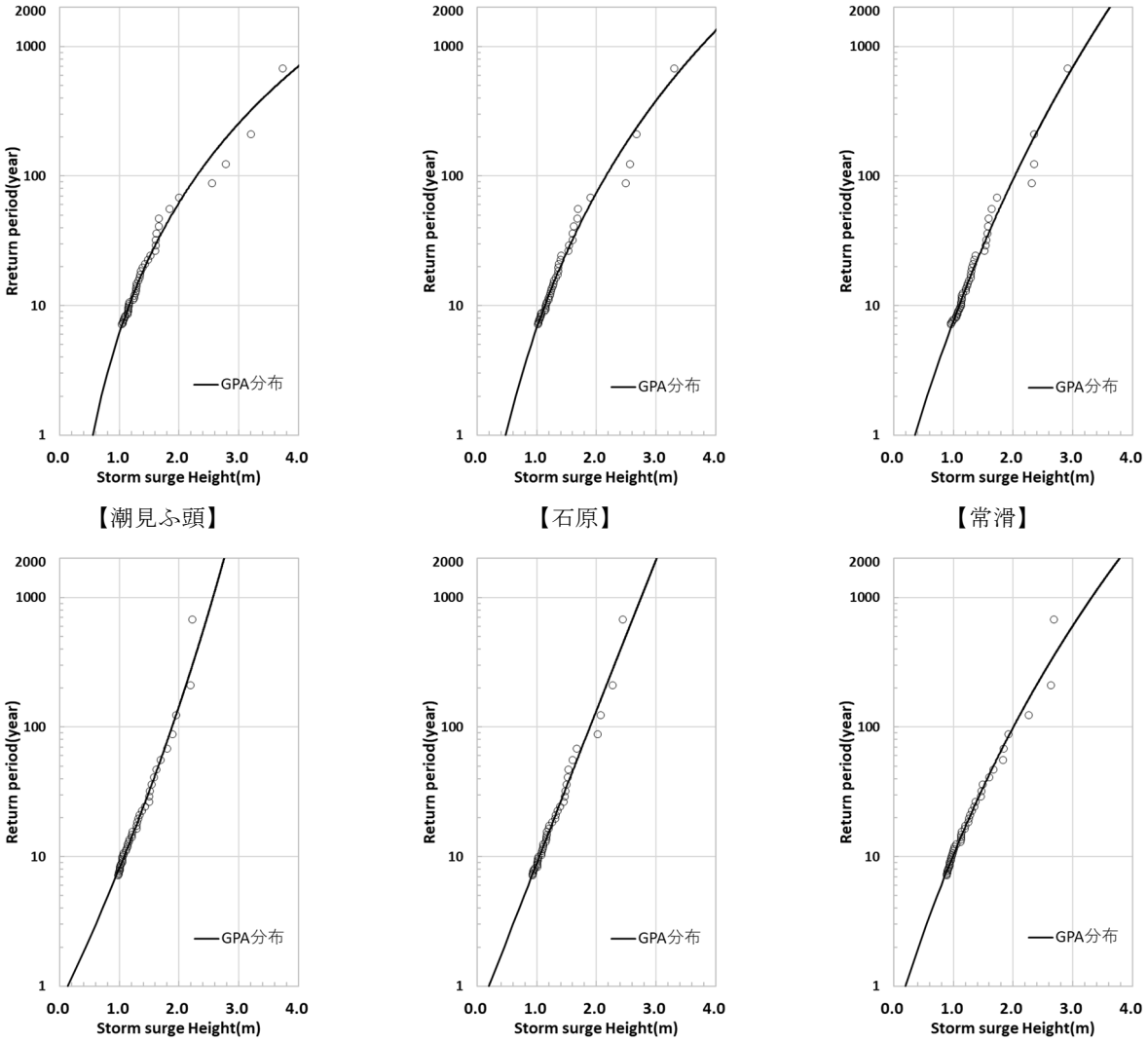


【富貴・武豊】



【海陽】

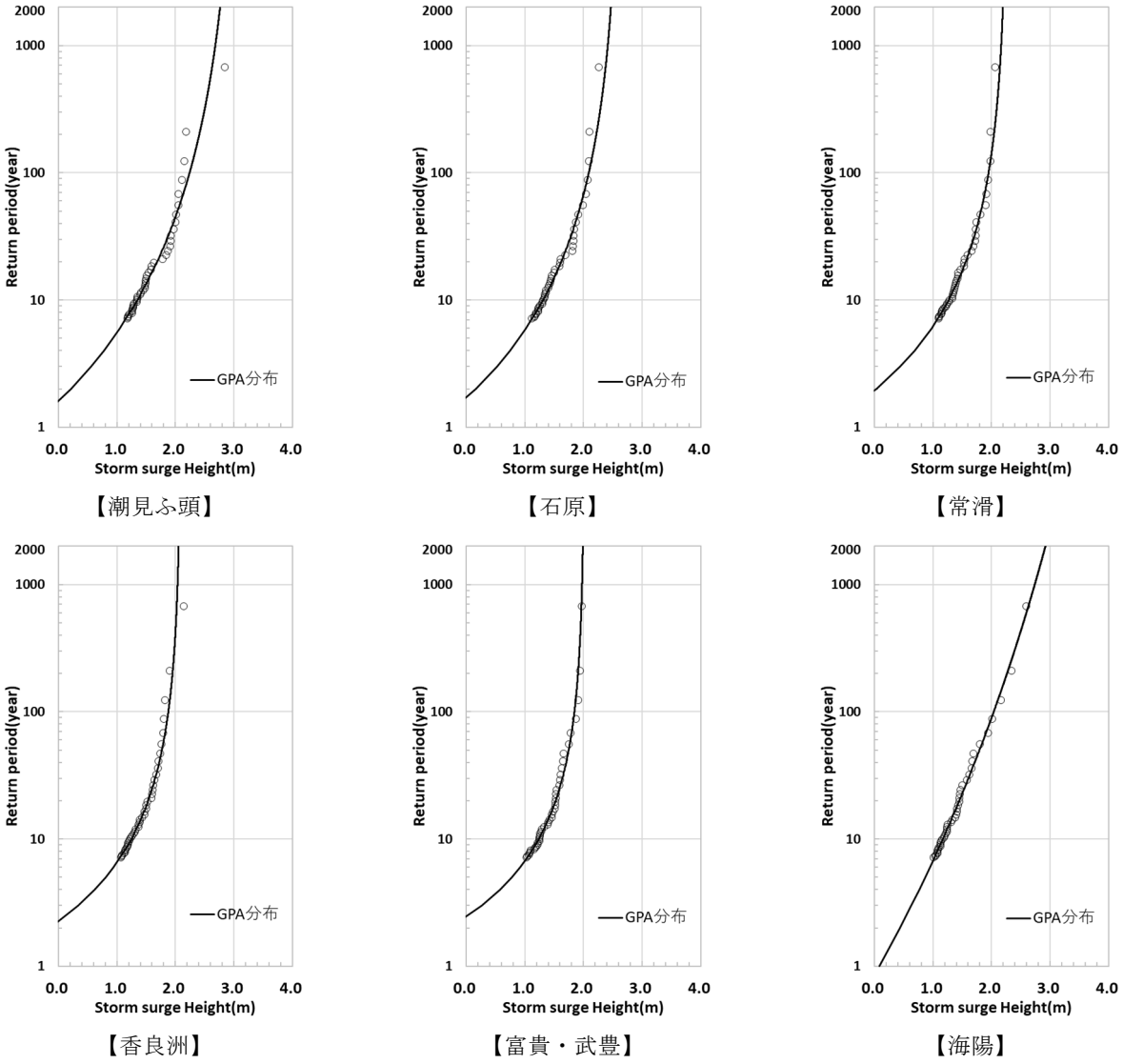
図-B.16　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：GF）（伊勢湾）



【潮見ふ頭】　【石原】　【常滑】

【香良洲】　【富貴・武豊】　【海陽】

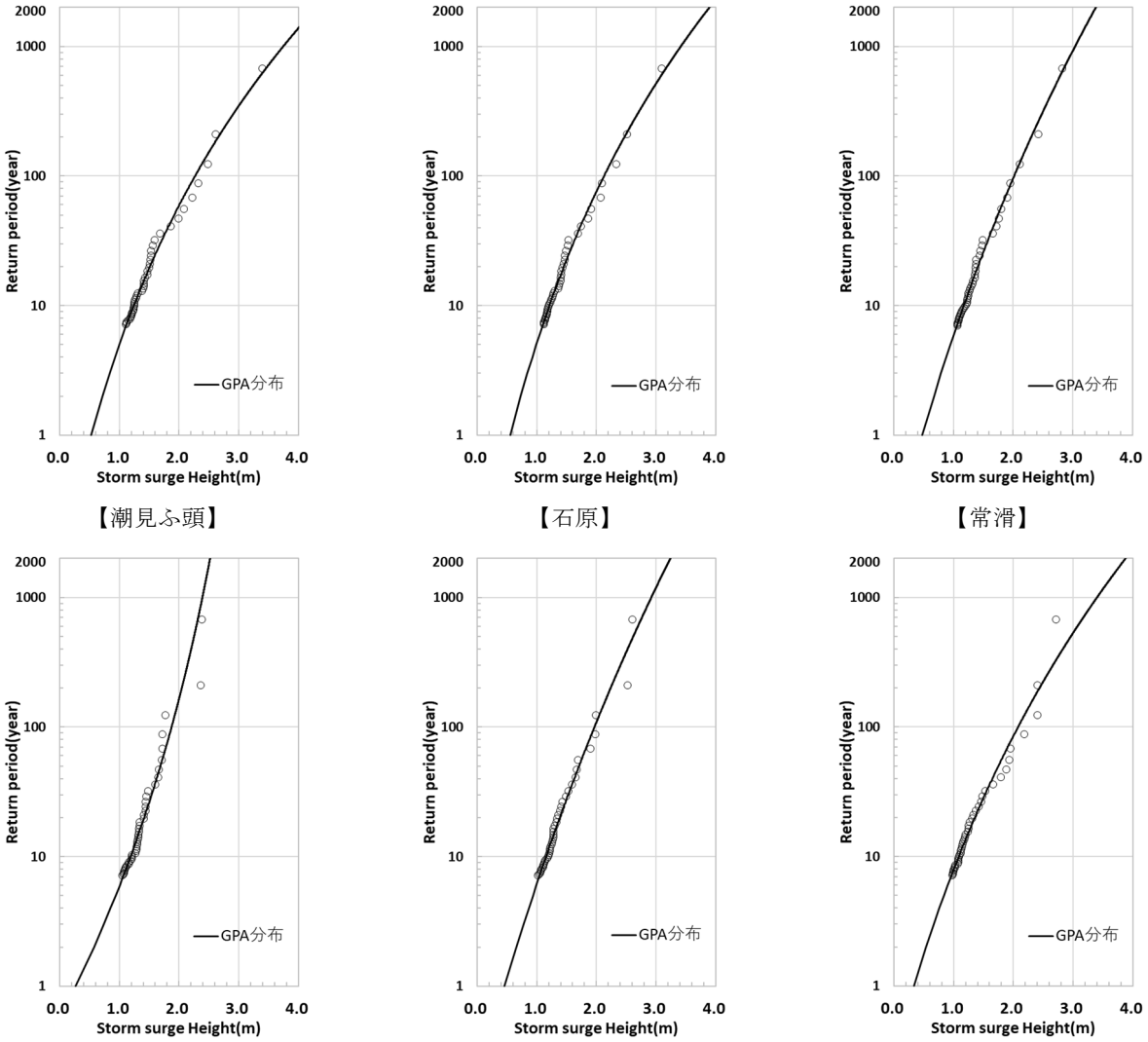
図-B.17　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：HA）（伊勢湾）



【潮見ふ頭】　【石原】　【常滑】

【香良洲】　【富貴・武豊】　【海陽】

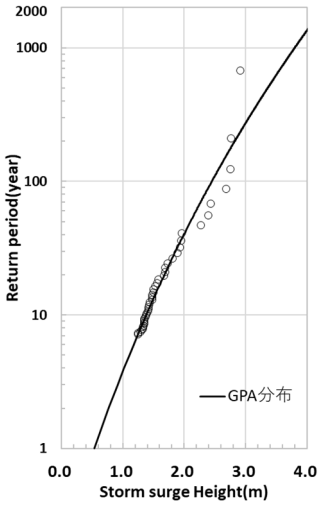
図-B.18　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MI）（伊勢湾）



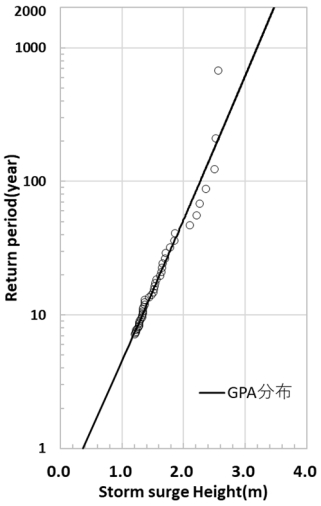
【潮見ふ頭】　【石原】　【常滑】

【香良洲】　【富貴・武豊】　【海陽】

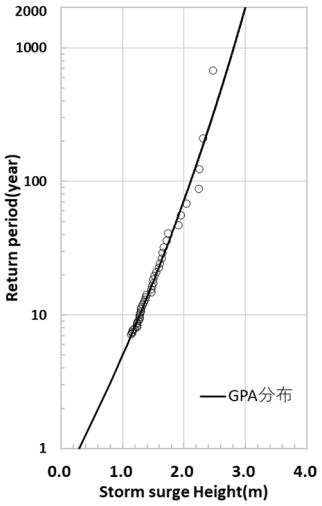
図-B.19　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MP）（伊勢湾）



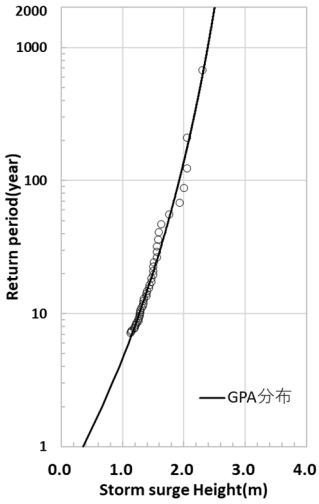
【潮見ふ頭】



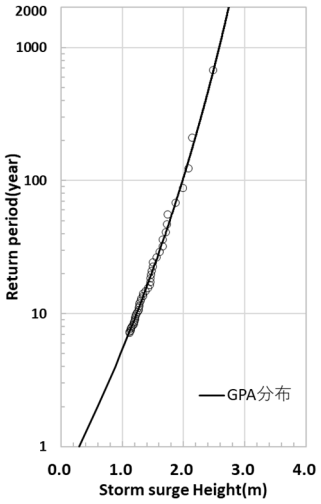
【石原】



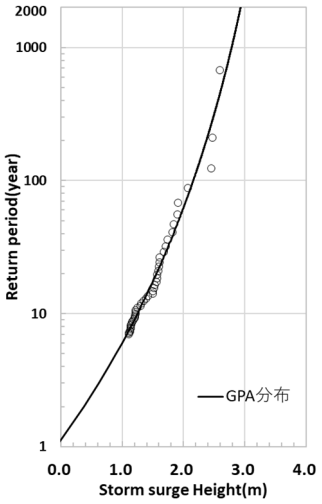
【常滑】



【香良洲】

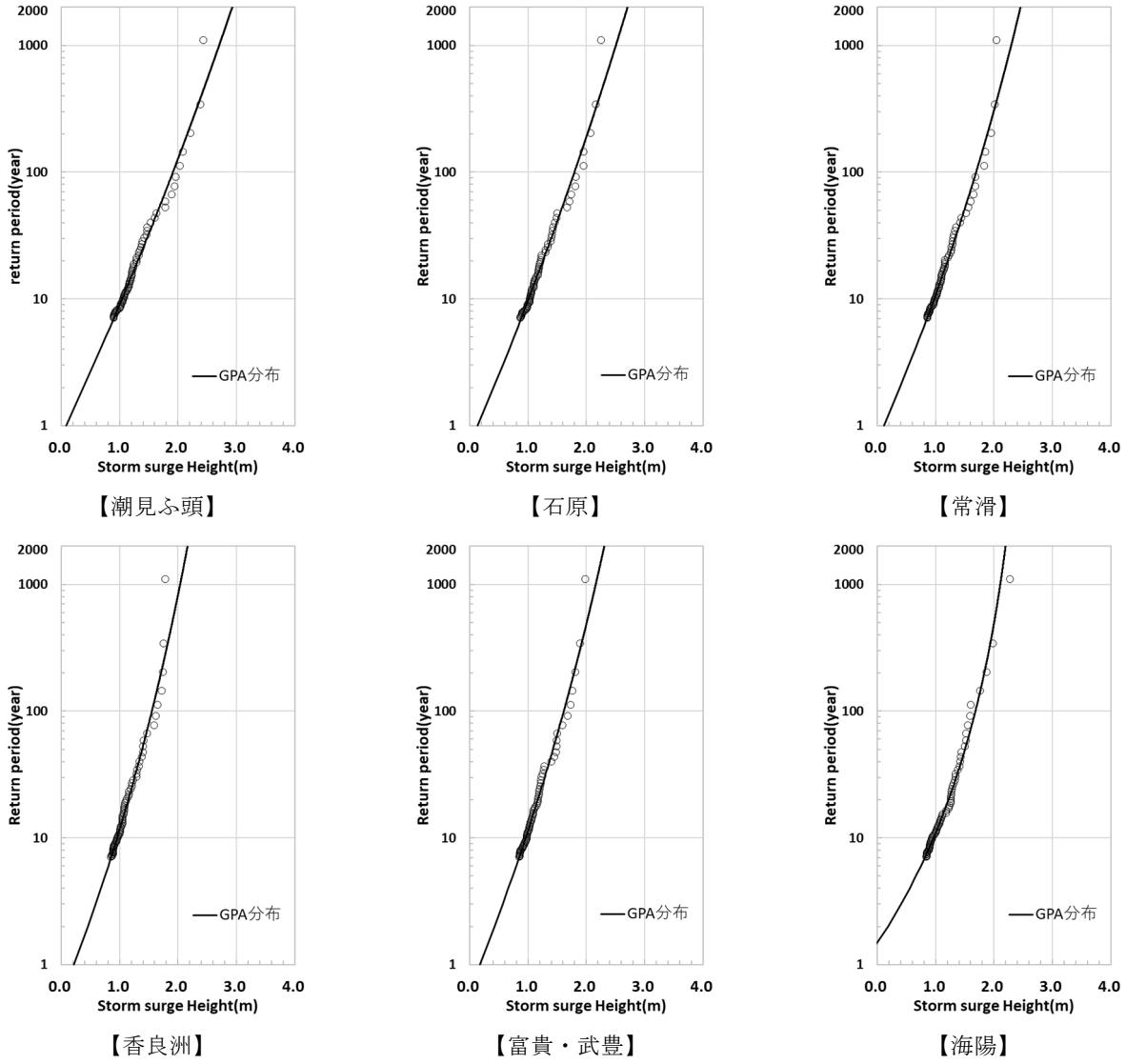


【富貴・武豊】



【海陽】

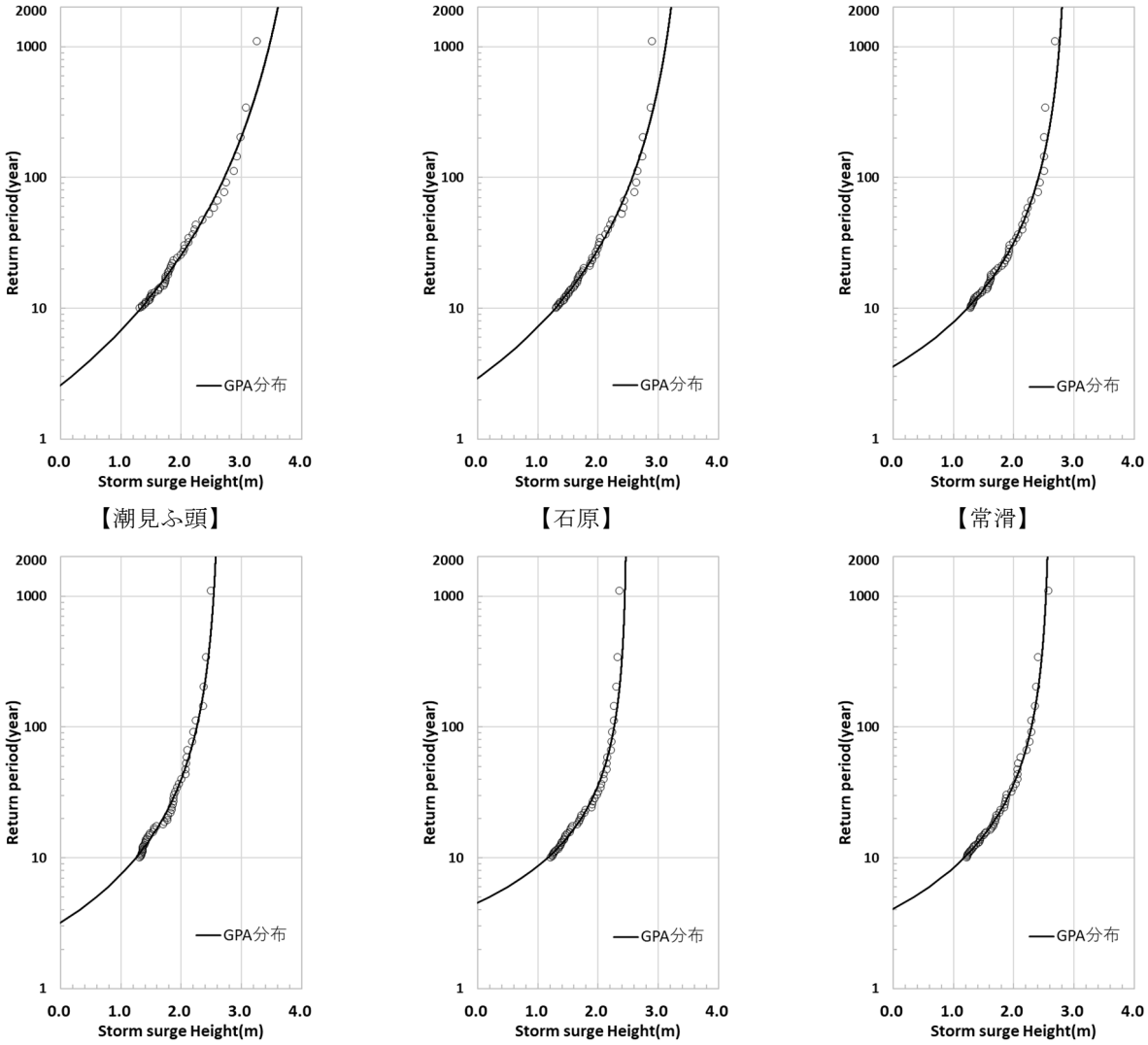
図-B. 20　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MR）（伊勢湾）



【潮見ふ頭】　【石原】　【常滑】

【香良洲】　【富貴・武豊】　【海陽】

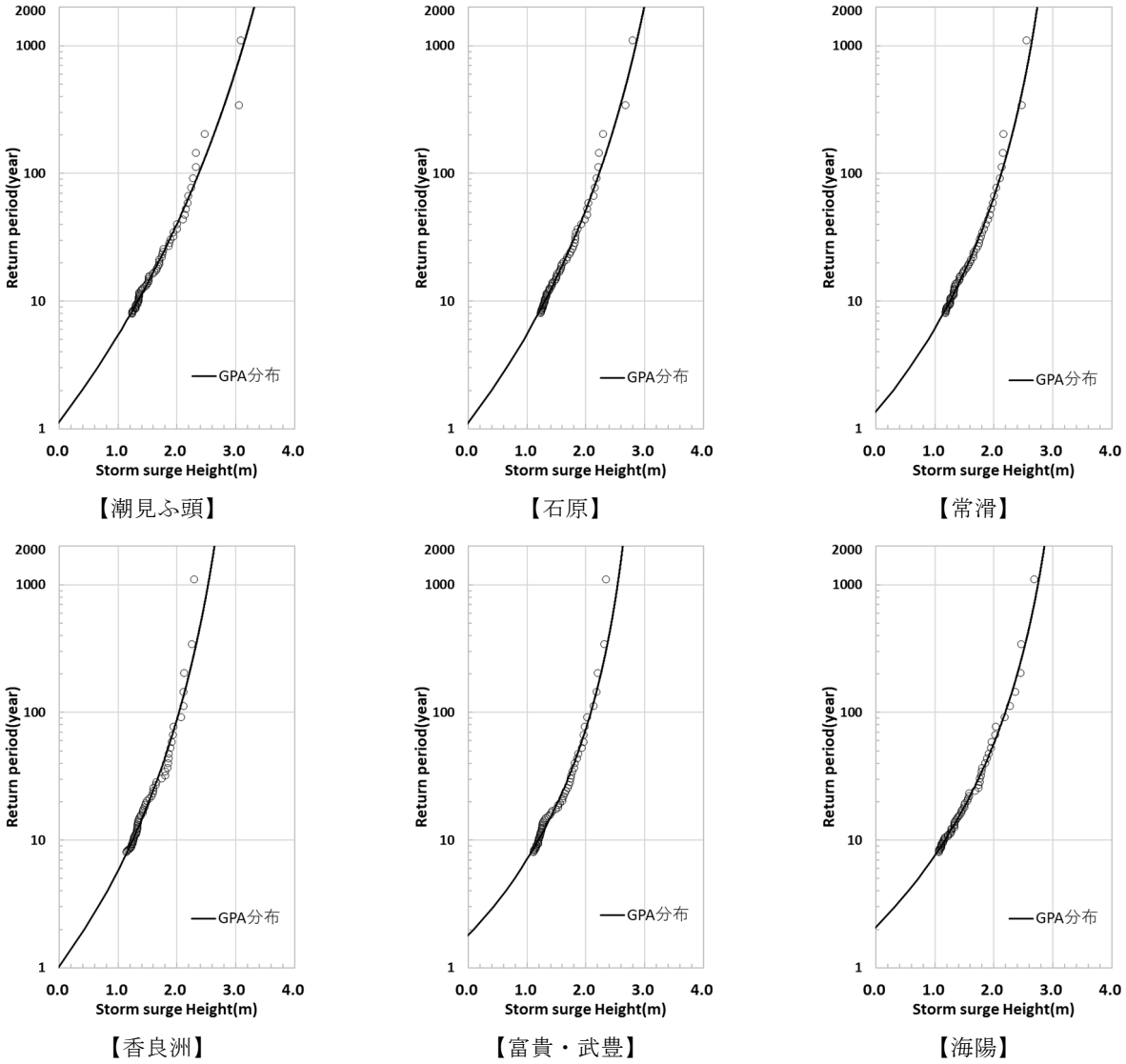
図-B. 21　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：CC）（伊勢湾）



【潮見ふ頭】　【石原】　【常滑】

【香良洲】　【富貴・武豊】　【海陽】

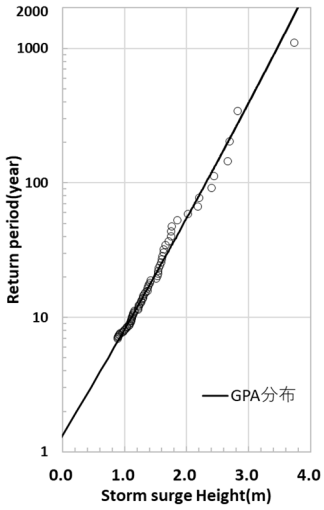
図-B. 22　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：GF）（伊勢湾）



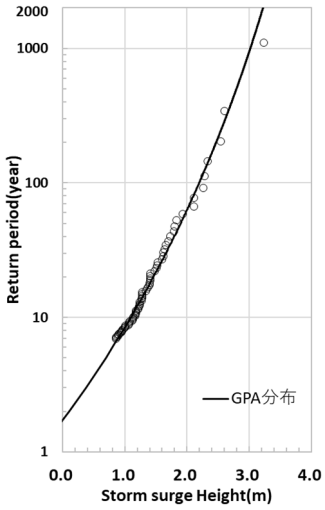
【潮見ふ頭】　【石原】　【常滑】

【香良洲】　【富貴・武豊】　【海陽】

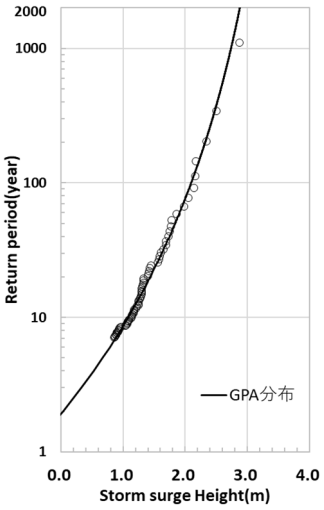
図-B.23　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：HA）（伊勢湾）



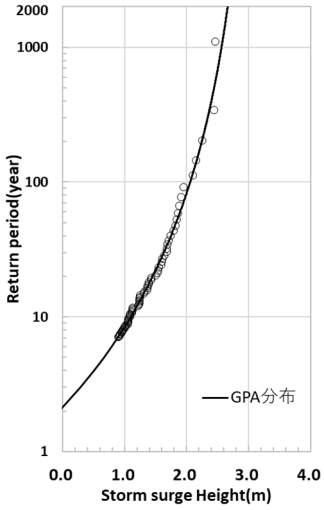
【潮見ふ頭】



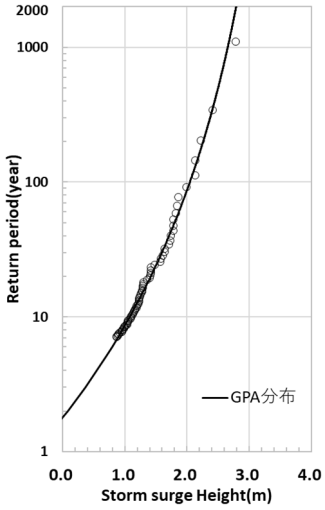
【石原】



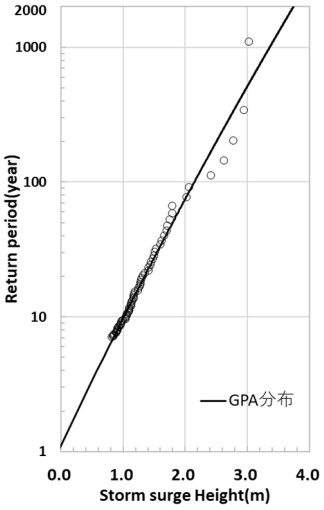
【常滑】



【香良洲】

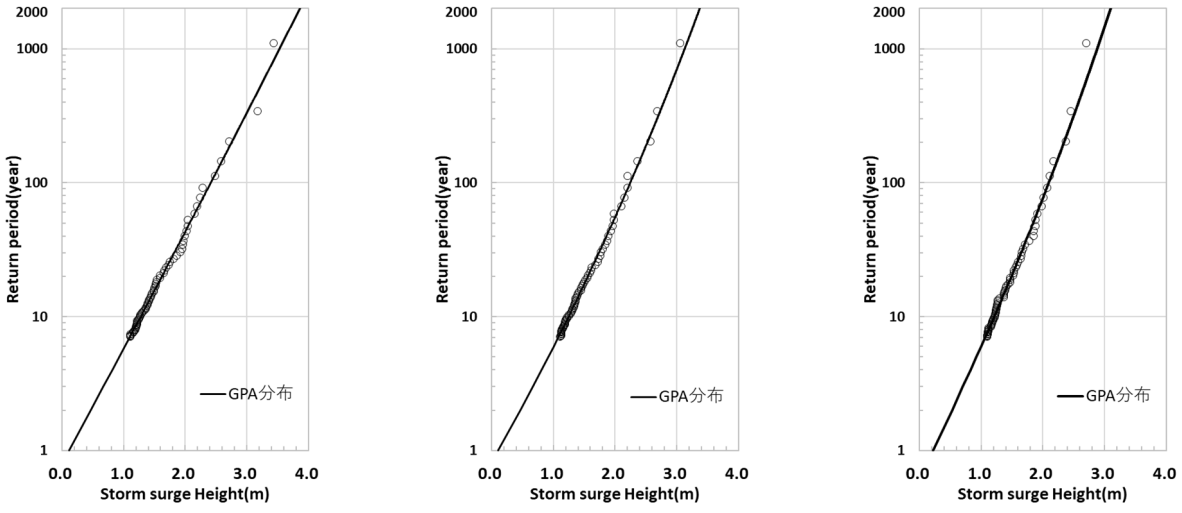


【富貴・武豊】

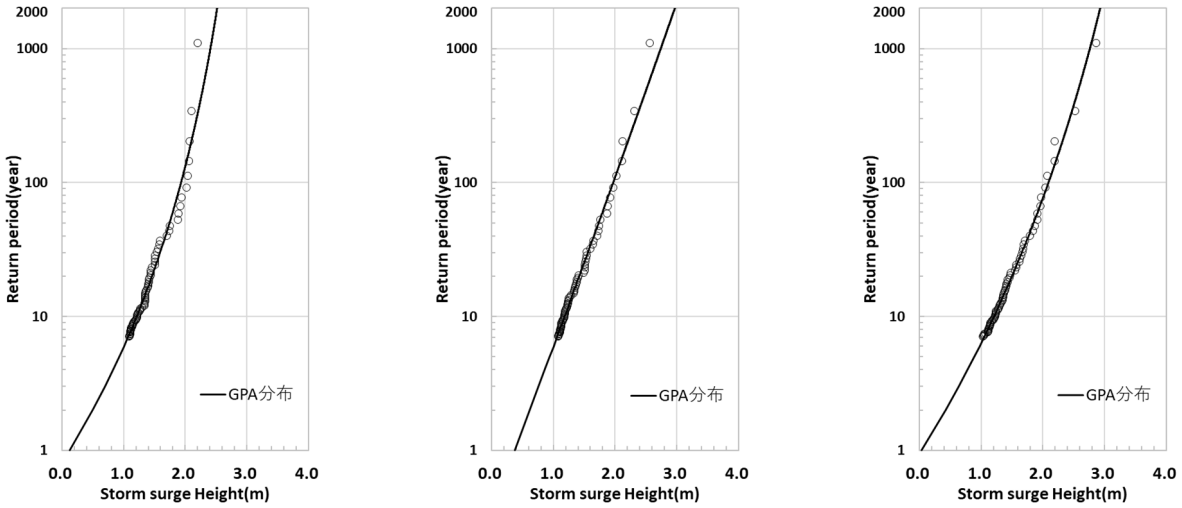


【海陽】

図-B. 24　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MI）（伊勢湾）

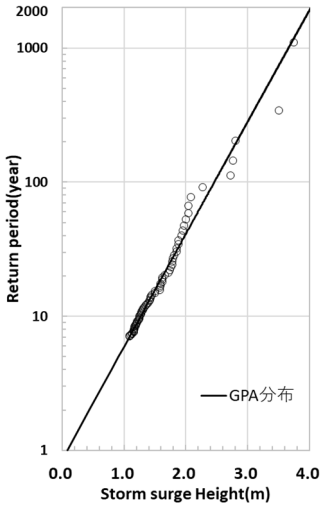


【潮見ふ頭】　【石原】　【常滑】

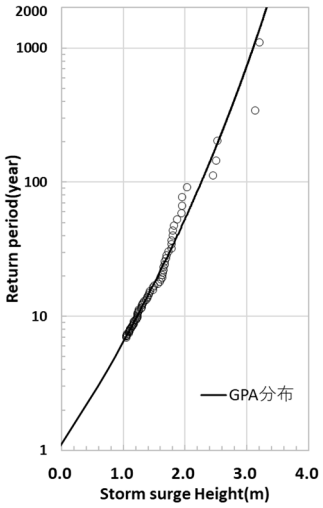


【香良洲】　【富貴・武豊】　【海陽】

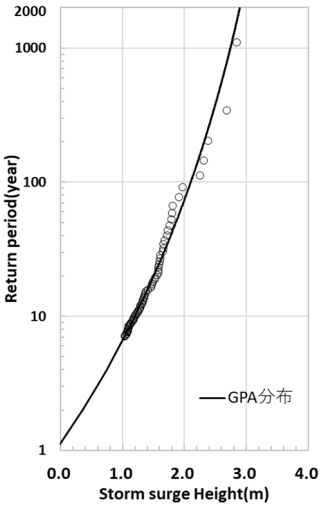
図-B.25　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MP）（伊勢湾）



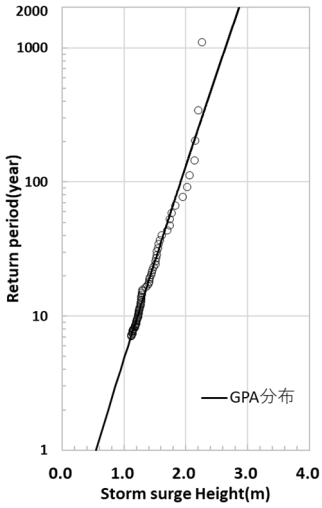
【潮見ふ頭】



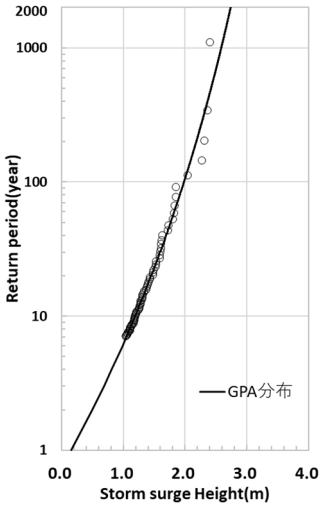
【石原】



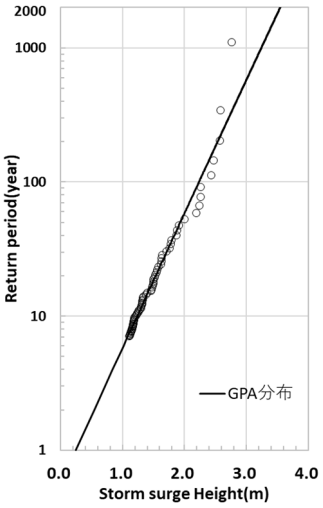
【常滑】



【香良洲】

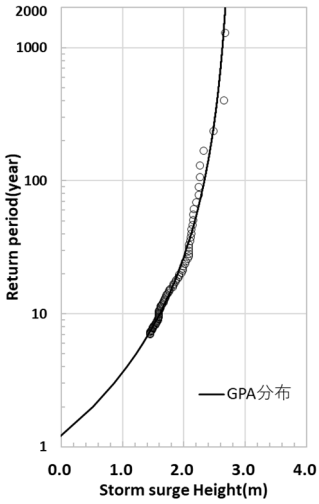


【富貴・武豊】

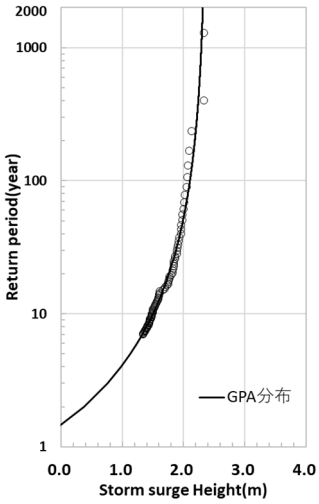


【海陽】

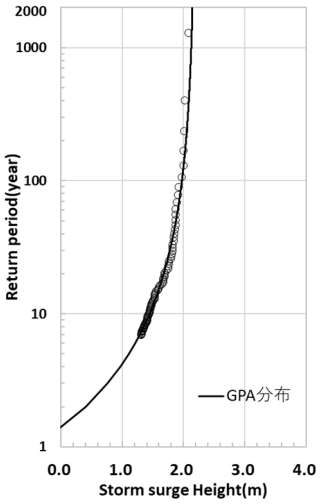
図-B.26　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MR）（伊勢湾）



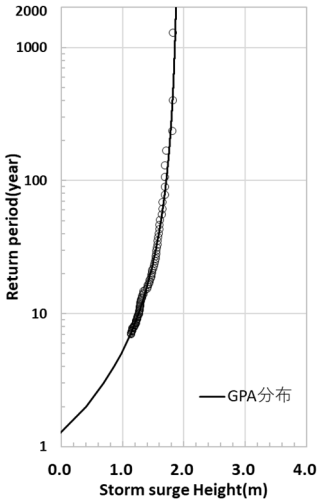
【此花区本土】



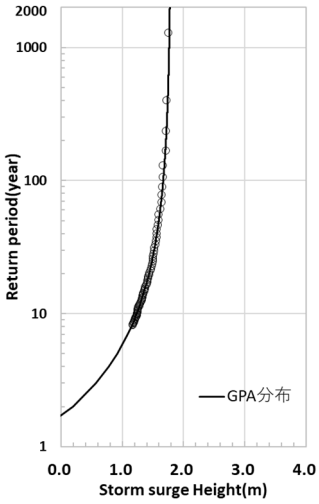
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

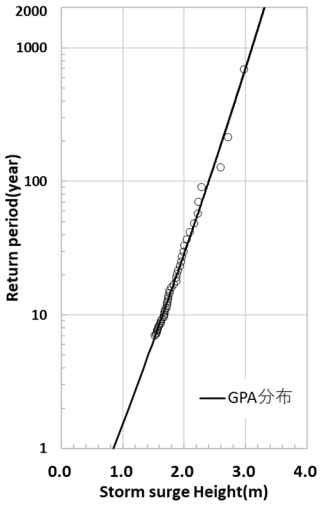


【淡輪】

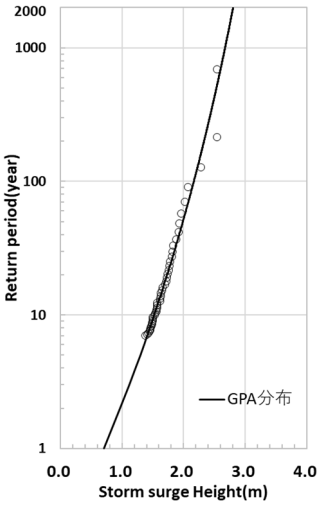


【北浜】

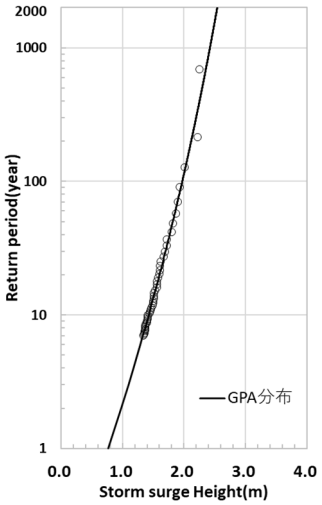
図-B. 27　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（過去実験）（大阪湾）



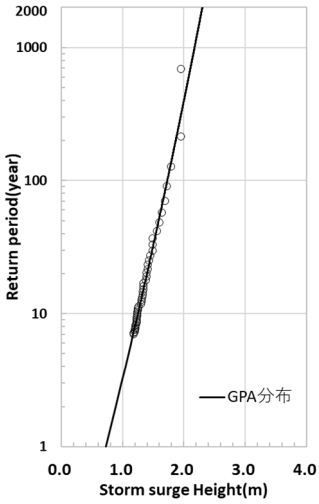
【此花区本土】



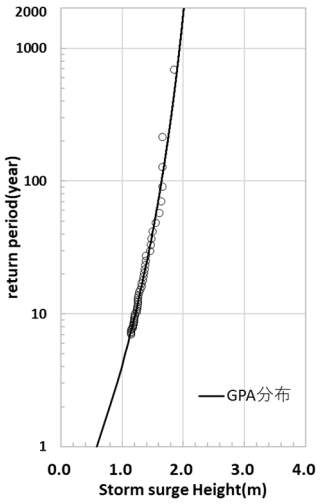
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

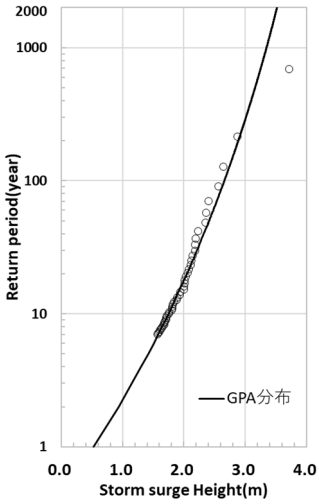


【淡輪】

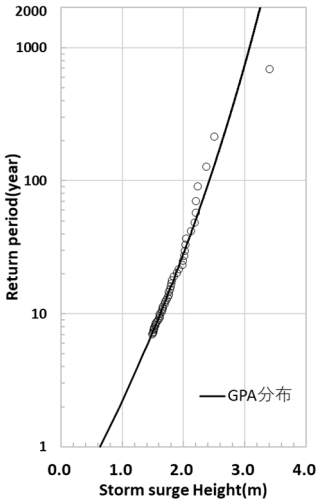


【北浜】

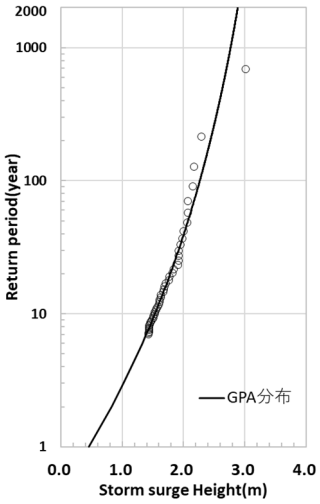
図-B. 28　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：CC）（大阪湾）



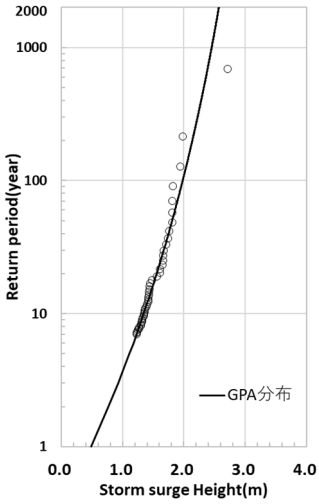
【此花区本土】



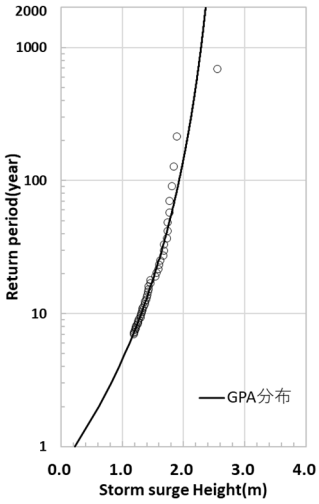
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

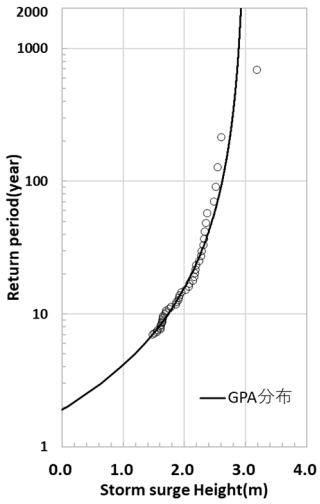


【淡輪】

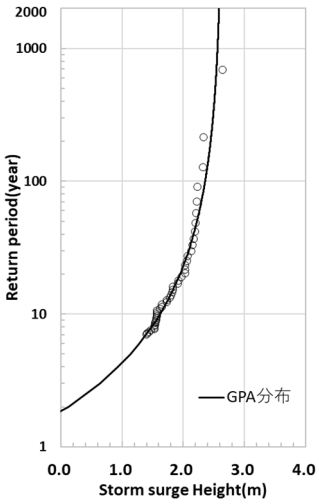


【北浜】

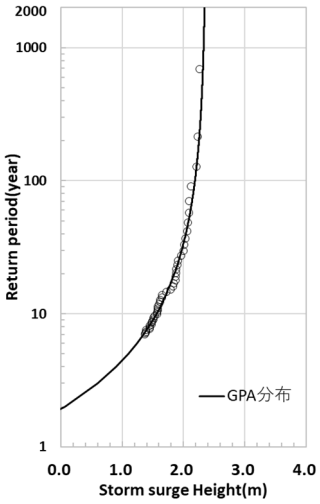
図-B.29 地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：GF）（大阪湾）



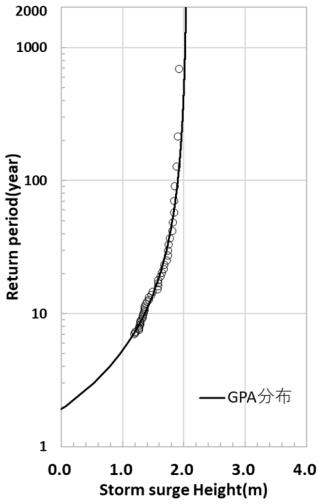
【此花区本土】



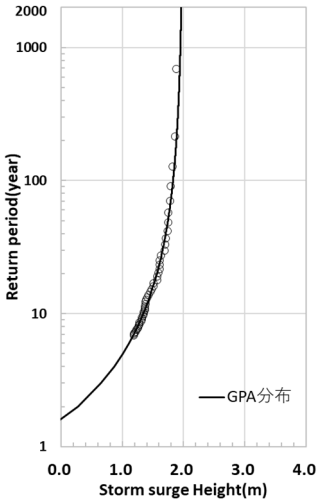
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

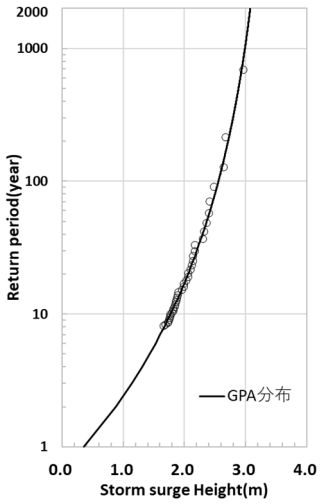


【淡輪】

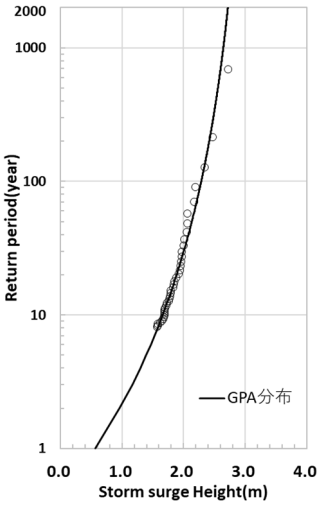


【北浜】

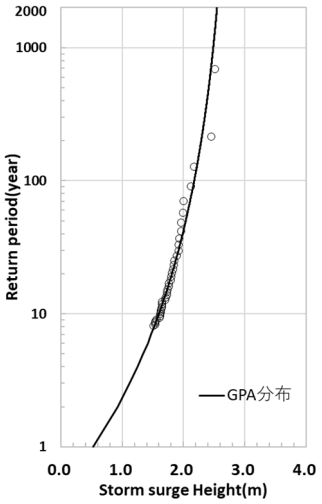
図-B.30　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：HA）（大阪湾）



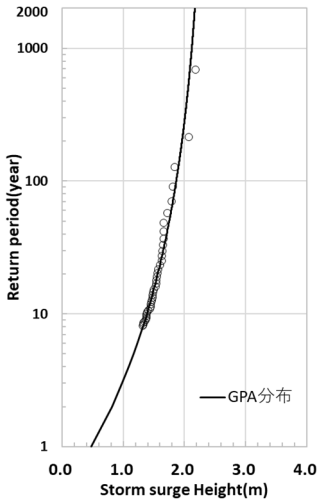
【此花区本土】



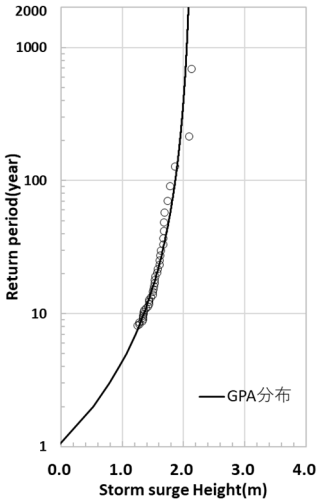
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

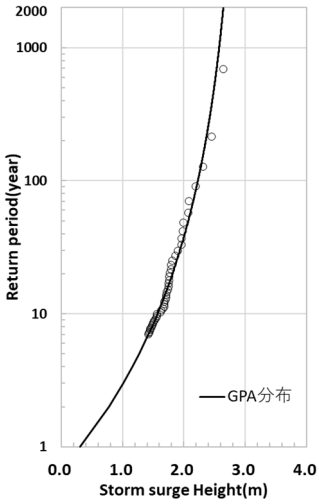


【淡輪】

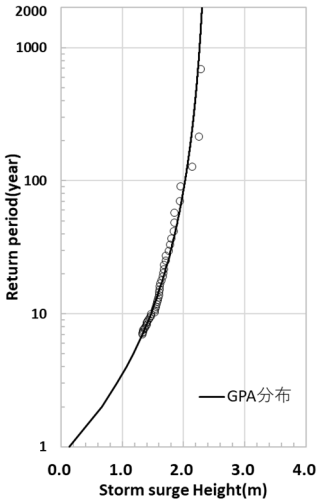


【北浜】

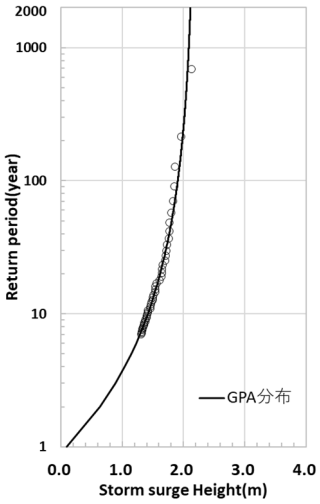
図-B.31　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MI）（大阪湾）



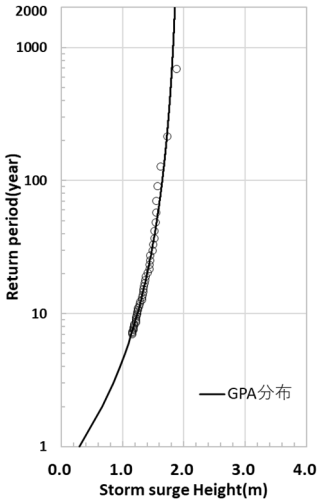
【此花区本土】



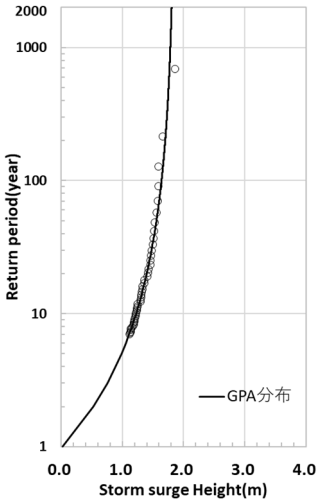
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

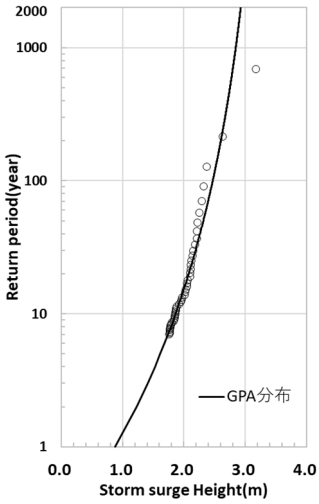


【淡輪】

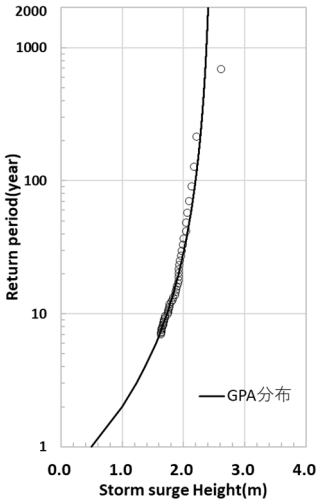


【北浜】

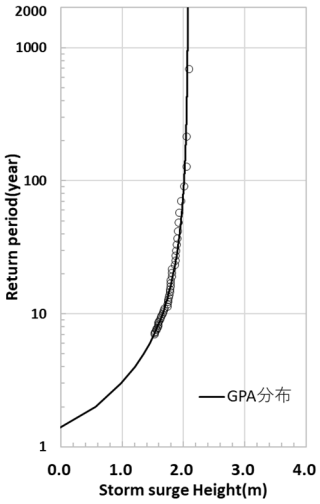
図-B.32　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MP）（大阪湾）



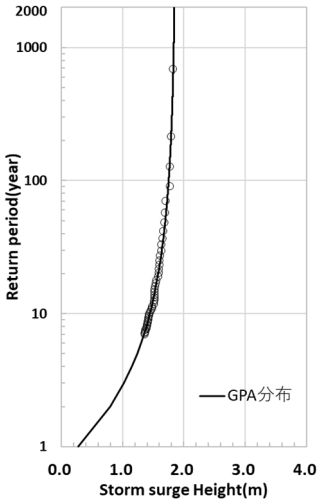
【此花区本土】



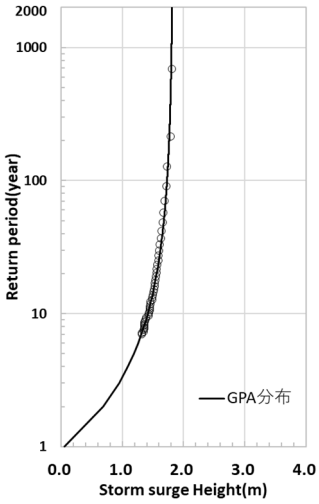
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

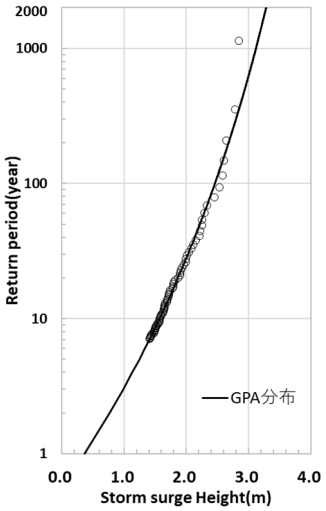


【淡輪】

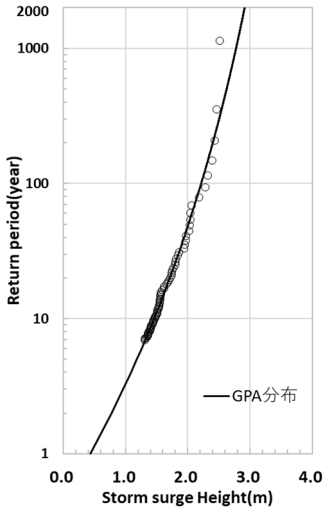


【北浜】

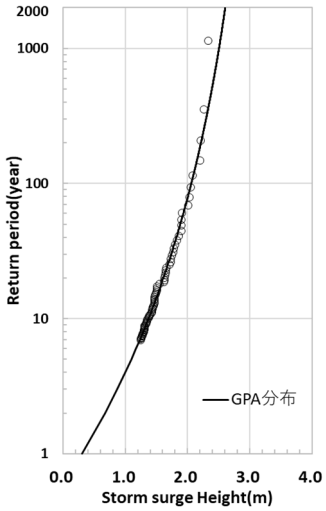
図-B.33　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+2K）：MR）（大阪湾）



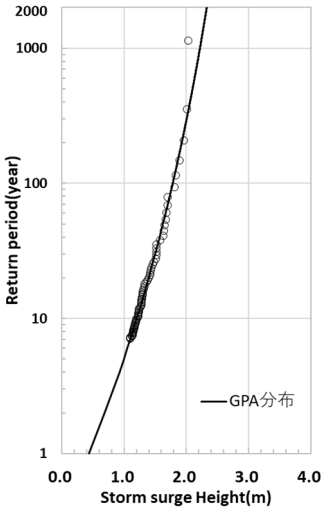
【此花区本土】



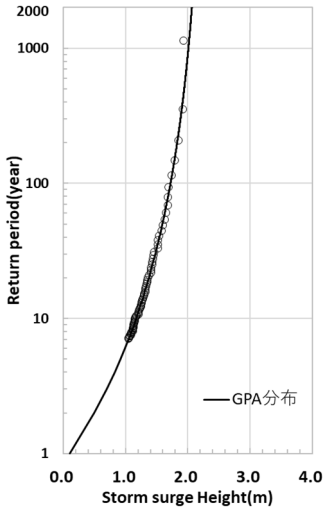
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

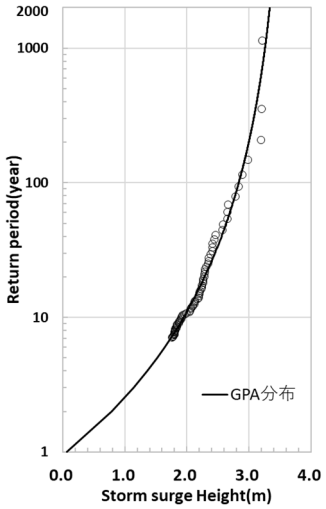


【淡輪】

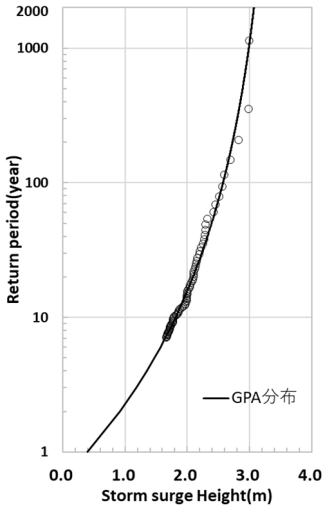


【北浜】

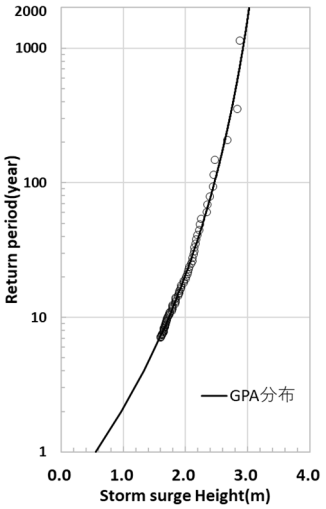
図-B. 34　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：CC）（大阪湾）



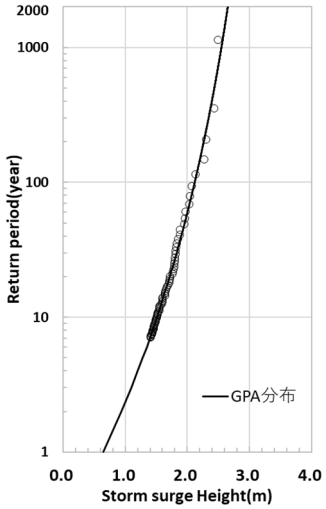
【此花区本土】



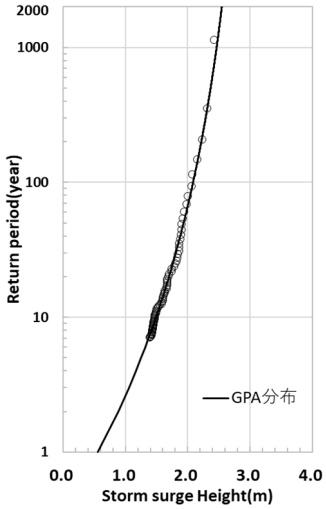
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

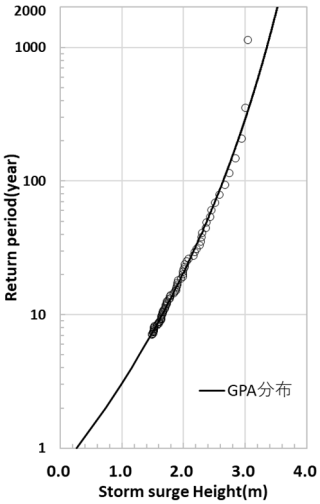


【淡輪】

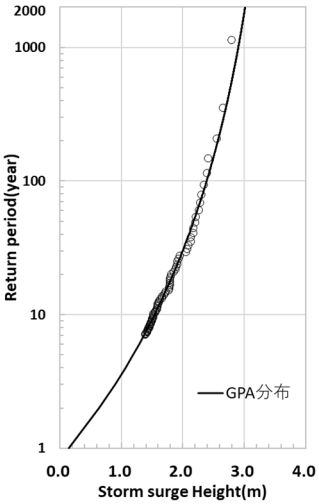


【北浜】

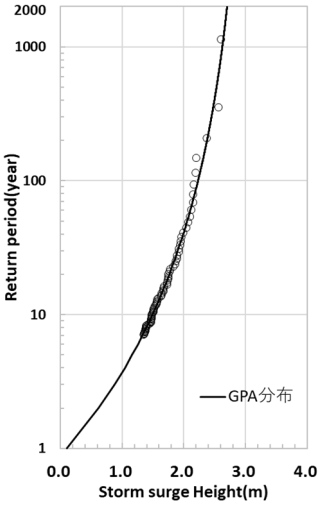
図-B.35 地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：GF）（大阪湾）



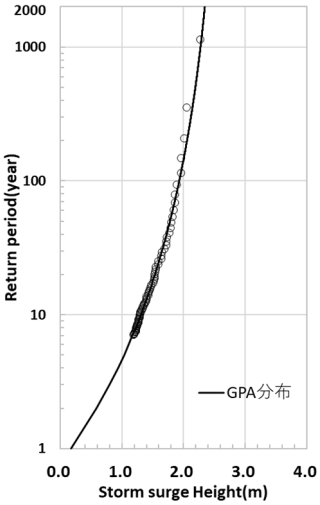
【此花区本土】



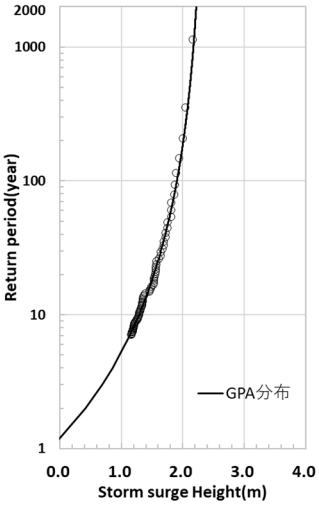
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

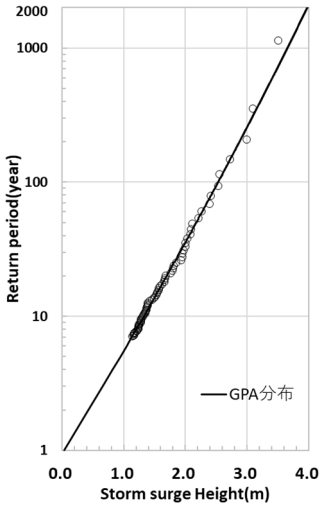


【淡輪】

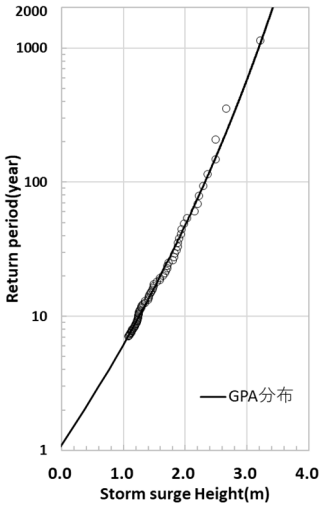


【北浜】

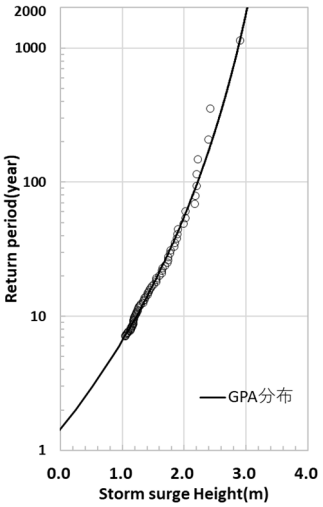
図-B.36　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：HA）（大阪湾）



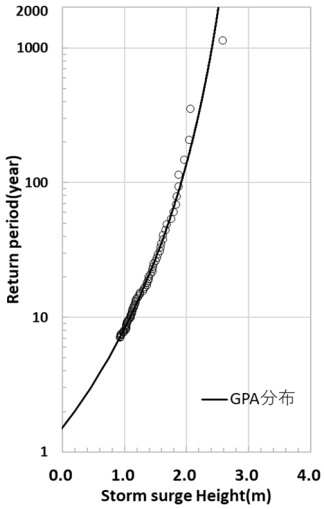
【此花区本土】



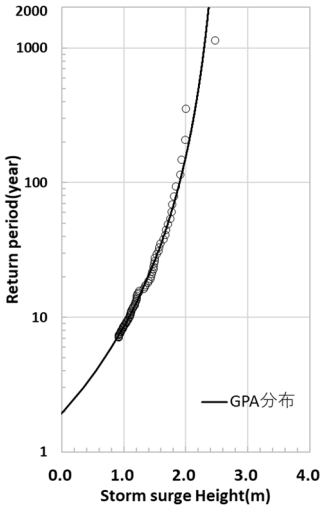
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

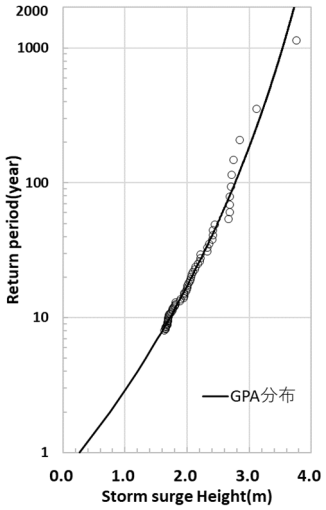


【淡輪】

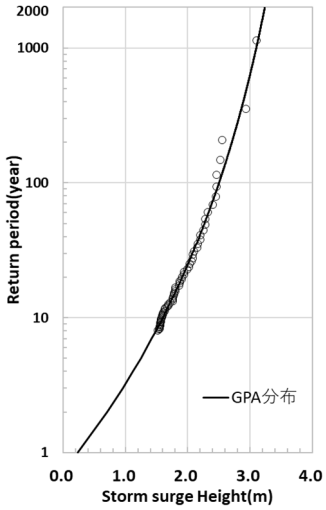


【北浜】

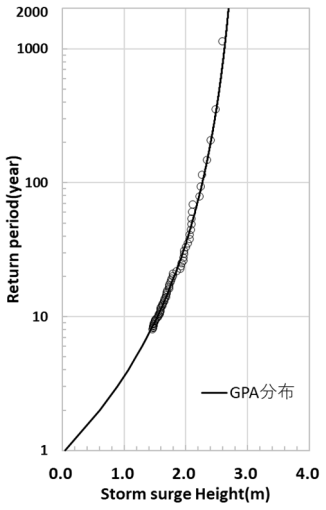
図-B.37　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MI）（大阪湾）



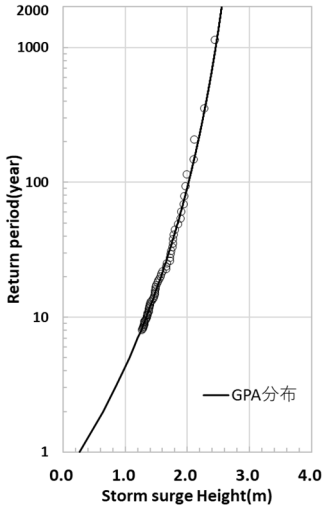
【此花区本土】



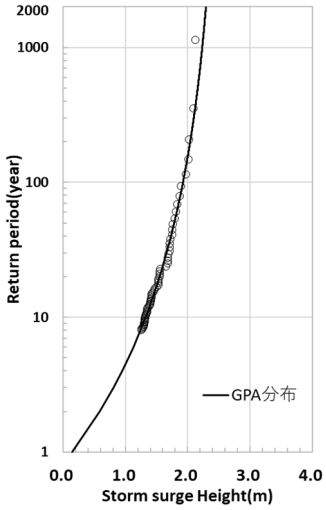
【忠岡岸和田】



【苅藻島】

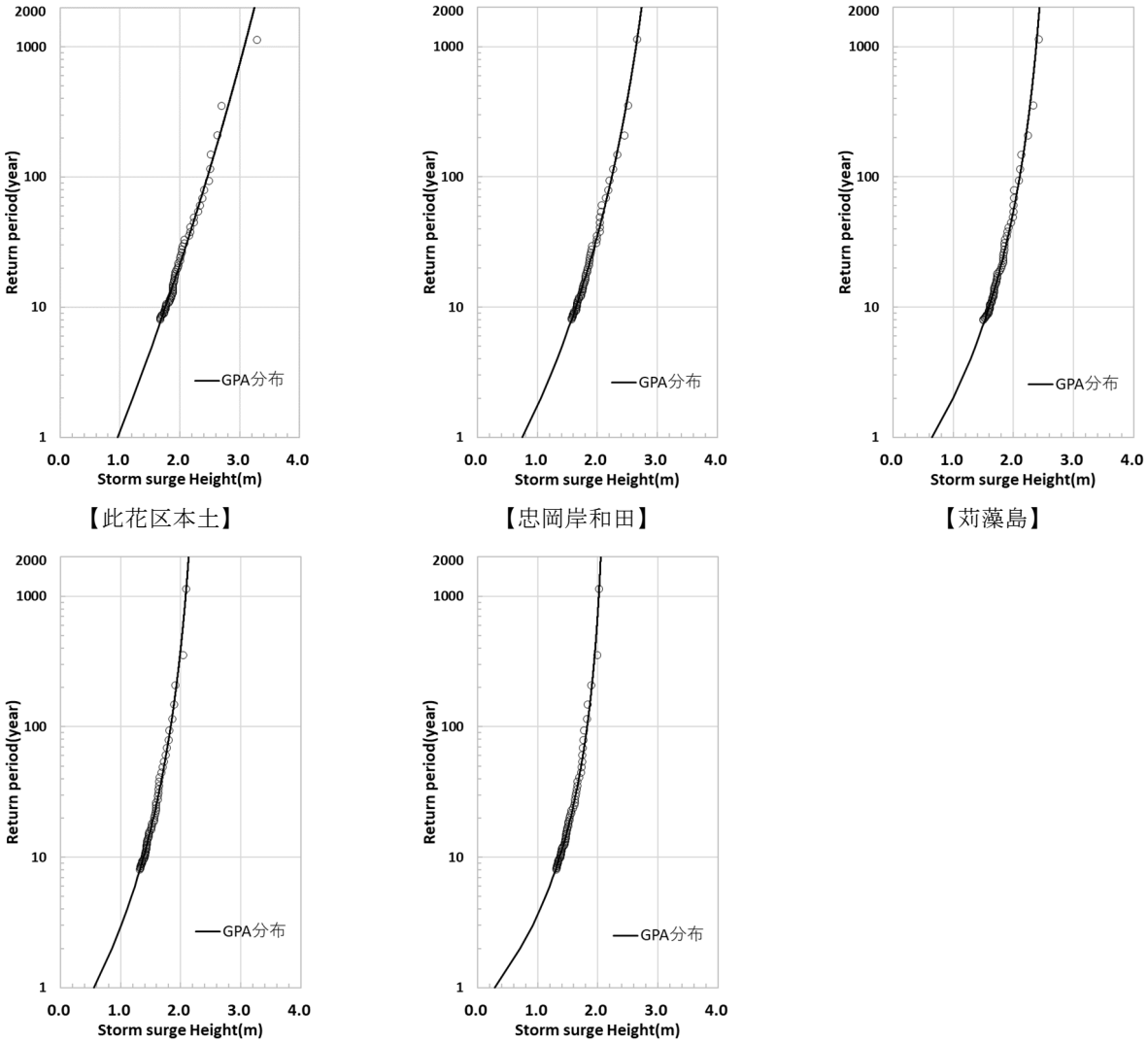


【淡輪】



【北浜】

図-B.38　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MP）（大阪湾）



【此花区本土】　【忠岡岸和田】　【苅藻島】

【淡輪】　【北浜】

図-B.39　地点別の高潮偏差の極値統計解析結果（将来実験（+4K）：MR）（大阪湾）

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of ＮＩＬＩＭ

No. 1266　　January 2024

編集・発行　©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課　電話：046-844-5019
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

国土技術政策総合研究所資料　No.1266

3大湾内の港湾における高潮・波浪への気候変動の影響評価

January 2024