

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1248

July 2023

将来気候における高潮・高波の不確実性の評価

岡本侃大・百海郁弥・本多和彦

Uncertainty of Extreme Value of Storm Surges and High Waves
due to Tropical Cyclones in the Future Climate

OKAMOTO Kanta, DOUKAI Fumiya, HONDA Kazuhiko

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

将来気候における高潮・高波の不確実性の評価

岡本侃大*・百海郁弥**・本多和彦***

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が重要である。これらのリスクを評価するためには、高潮や高波の極値を推定するだけでなく、それらの極値の不確実性を評価する必要がある。

本研究では、将来の高潮及び高波について、将来気候の海水面温度（SST：Sea Surface Temperature）パターンの違いに伴う認識論的不確実性及び台風のランダム性に伴う偶然的不確実性の2つの不確実性を評価した。さらに、それら評価結果に基づいて、気候変動を考慮した港湾施設の設計への活用に資することを目的に、不確実性を考慮した将来の潮位偏差及び波高の推定手法を提案した。

キーワード：気候変動，SST，確率台風モデル，潮位偏差，波高，偶然的不確実性，認識論的不確実性

* 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）
** 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）
*** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾・沿岸防災研究室 室長

Uncertainty of Extreme Value of Storm Surges and High Waves due to Tropical Cyclones in the Future Climate

OKAMOTO Kanta*
DOUKAI Fumiya**
HONDA Kazuhiko***

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. In order to evaluate these risks, it is necessary not only to estimate extreme values of storm surges and high waves but also to evaluate the uncertainty of those extreme values.

In this study, we evaluated the dispersion related to two kinds of uncertainty: the uncertainty of future SST conditions, and the aleatory uncertainty of storm surges and wave heights. In addition, we proposed a simple design method for storm surges and wave heights considering climate change and these two kinds of uncertainty.

Key words: climate change, SST, STM, storm surges, wave heights, aleatory uncertainty, epistemic uncertainty

* Ex-Visiting Researcher, Coastal Disaster Prevention Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department (Alpha Hydraulic Engineering Consultants Co., Ltd.)

** Ex-Research Engineer, Coastal Disaster Prevention Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department (Engineering Official, Kanazawa Port and Airport Office, Hokuriku Regional Bureau)

*** Head of Port and Coastal Disaster Prevention Division, Port, Coastal and Marine Department

目 次

1. まえがき	1
2. 使用データ	1
3. 将来の気候条件予測に伴う高潮及び高波の認識論的不確実性	2
3.1 認識論的不確実性	2
3.2 2 標本コルモゴロフ-スミルノフ検定	3
3.3 検定結果	3
4. 台風特性のランダム性に伴う高潮及び高波の偶然的な不確実性	5
4.1 偶然的な不確実性	5
4.2 ブートストラップ法	6
4.3 ブートストラップ法の適用結果	6
5. 不確実性を考慮した将来の潮位偏差及び波高の推定	9
6. まとめ	10
7. あとがき	10
参考文献	11
付録 A 将来気候及び現在気候における潮位偏差の推定誤差及び潮位偏差比	12
付録 B 将来気候及び現在気候における波高の推定誤差及び波高比	32

1. まえがき

気候変動による高潮及び高波の変化は、港湾などの沿岸地域の持続可能な開発にとって大きな問題である。日本沿岸においては、地球温暖化に伴う海面温度の上昇等の影響による熱帯低気圧（台風）の強大化によって、高潮及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、このような高潮及び高波の増大は、異常時における施設の安定性並びに堤外地及び背後地の安全性に影響を及ぼす。そのため、将来の高潮及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。

将来の高潮及び高波を評価するに当たって、その不確実性を定量的に評価することが重要である。将来の気候条件は、様々な不確実な要素を持っている。特に、高潮及び高波は気候条件によって大きく変化するため、将来の高潮及び高波も同様に不確実性を有している。この不確実性の評価は、港湾施設の整備に当たって、施設の配置、規模、構造形式等を、施設の破堤及び背後地の浸水のリスクに基づいて決定していくために重要な情報である。しかしながら、将来の高潮及び高波を評価するに当たって、それらの不確実性を評価している事例は少ない。

将来の高潮及び高波の不確実性を評価するに当たって考慮すべき気候条件の不確実性のひとつとして、将来の気候条件予測に伴う認識論的不確実性が挙げられる。将来の気候条件は、今後の人間活動及び自然変動によって変化するため、どのような気候条件となるかは不確実である。現在、将来の気候条件を予測するうえで、人間活動に伴う温室効果ガス等の大気中の濃度による様々な将来気候シナリオが想定されている（IPCC-AR5 WG1, 2013）。加えて、複数の機関が、各気候シナリオをインプット条件として、それぞれが有する気候モデルを用いて将来の気候条件を予測している（Taylorら，2012）。これら複数の気候条件によって予測される結果のばらつきが、将来の気候条件予測に伴う高潮及び高波の不確実性である。

もうひとつの考慮すべき不確実性として、台風特性のランダム性に伴う偶然的な不確実性がある。日本沿岸、特に東北地方以南においては、顕著な高潮及び高波は台風によって引き起こされる。高潮及び高波の規模は台風の強度、移動経路、移動速度等によって変化するが、これら台風の特性は個々の台風によって様々である。また、ある期間に発生した台風について、次の同じ期間におい

ても同じ特性を持つ台風が発生するとは限らない。そのため、高潮及び高波の評価に当たっては、評価に用いる台風によって、異なる評価結果が得られることとなる。これが、台風特性のランダム性に伴う高潮及び高波の不確実性である。

本研究では、将来の高潮や高波の不確実性の評価に当たって、上記に示した、将来の気候条件予測に伴う認識論的不確実性及び台風の強度、移動経路、移動速度等の台風特性のランダム性に伴う偶然的な不確実性の2種類の不確実性を評価した。さらに、港湾施設の将来の設計外力の設定に対して有用な情報となるように、それらの評価結果に基づいて、これら2つの不確実性と気候変動を考慮した将来の潮位偏差及び波高の推定方法を提案した。

なお、本稿は、Okamotoら（2023a）の内容に補足説明を追加したものである。そのため、本研究を引用する際には、Okamotoら（2023a）も参考文献に挙げられたい。

2. 使用データ

本研究では、高潮及び高波の不確実性の評価に当たって、Okamotoら（2023b）（以下、Okamotoらと示す場合はOkamotoら（2023b）を指す）によって推定された三大湾（東京湾、伊勢湾及び大阪湾）沿いの港湾地域における潮位偏差及び波高の極値データを使用した。Okamotoらによる潮位偏差及び波高の極値の推定方法を図-2.1、潮位偏差及び波高の推算地点を図-2.2に示す。

Okamotoらは、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（以下、d4PDF）を用いて構築し

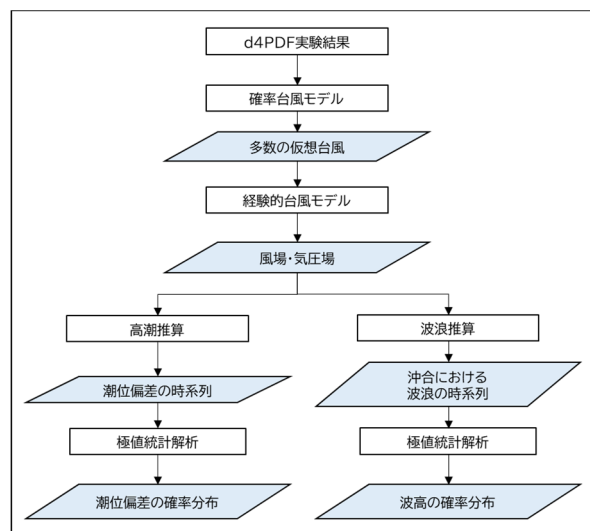


図-2.1 潮位偏差及び波高の極値の推定方法

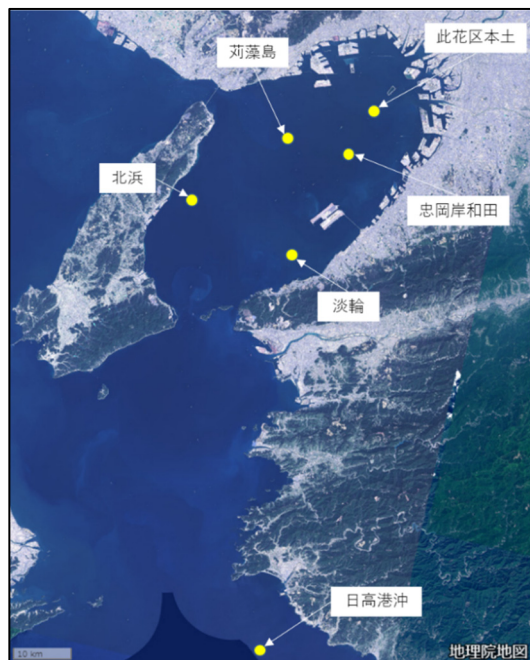
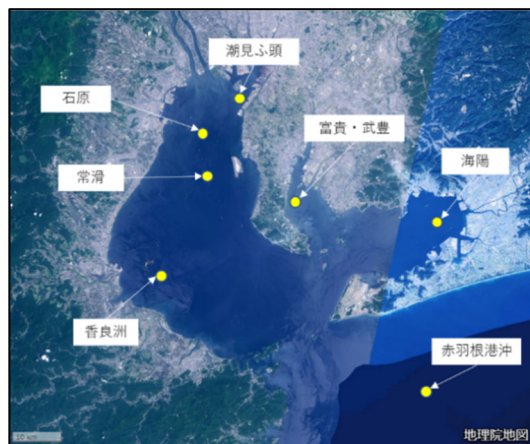


図-2.2 潮位偏差及び波高の推算地点

表-2.1 d4PDF で使用された気候モデル

モデル名	略称	機関名
CCSM4	CC	大気科学研究所
GFDL-CM3	GF	地球物流流体研究所
HadGEM2-AO	HA	気象ハードレーセンター
MIROC5	MI	海洋研究開発機構
MPI-ESM-MR	MP	マックスプランク研究所
MRI-CGCM3	MR	気象庁気象研究所

た確率台風モデル（梅田ら，2019）を用いて，将来の潮位偏差及び波高を推定した．d4PDFは，気候変動リスクを評価するために，文科省・気候変動リスク情報創生プログラムによって作成されたデータベースであり（Mizutaら，2017），表-2.1に示す6個の気候モデルそれぞれから得られた海水面温度（Sea Surface Temperature）昇温パターン（以下，SST昇温パターン）における将来気候予測データが含まれている．各気候モデルは，多数モデルによるシナリオ実験CMIP5のRCP8.5実験（4℃上昇実験）の主要な気候モデルの中から，SST昇温パターンのクラスター分析（Mizutaら，2014）の結果をもとに選定されたモデルである．

Okamotoらによる確率台風モデルを用いた潮位偏差及び波高の推定方法の概要を以下に示す．まず，d4PDFの各SST昇温パターンの結果を用いてそれぞれ構築した確率台風モデル（Stochastic Typhoon Model，以下STM）を用いて1,000年分の台風を作成する．作成した台風について，経験的台風モデルを用いて風場及び気圧場を計算し，それら気圧場及び風場を入力条件として，波浪推算及び高潮推算を実施する．Okamotoらは，高潮推算には単層の線形長波方程式に基づく数値計算モデル，波浪推算には第3世代波浪モデルであるWAVEWATCH III（version 5.16）を用いている．波浪推算及び高潮推算から得られた波浪（波高，周期，及び波向）及び潮位偏差の時系列データを用いて，ノンパラメトリック法に基づく極値統計解析（寶，2006）により，将来の潮位偏差及び波高の極値を推定する．極値の推定方法の詳細は，Okamotoら（2023b）を参照されたい．

3. 将来の気候条件予測に伴う高潮及び高波の認識論的不確実性

3.1 認識論的不確実性

将来の高潮及び高波は，SST昇温パターンによって異なる．図-3.1及び図-3.2は，それぞれ伊勢湾の海陽における潮位偏差及び波高の極値分布を示したものである．

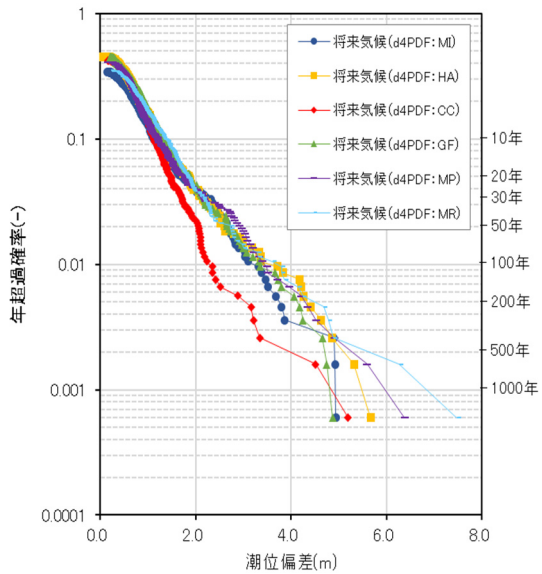


図-3.1 各 SST 昇温パターンにおける潮位偏差の極値分布（伊勢湾，海陽）

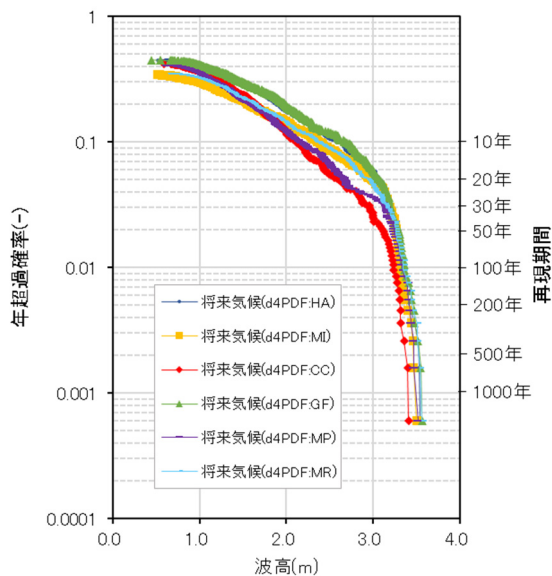


図-3.2 各 SST 昇温パターンにおける波高の極値分布（伊勢湾，海陽）

両図から，SST昇温パターンによって潮位偏差及び波高の極値分布が異なることが分かる。

OkamotoらはSST昇温パターンごとにそれぞれの高潮及び高波の極値分布を評価している一方で，野村ら(2022)はSST昇温パターンを区別せずに，すべてのSST昇温パターンの高潮及び高波の極値データをひとつの極値データとしてまとめたうえで極値分布を評価している。図-3.3は，伊勢湾の海陽の潮位偏差について，各SST昇温パターンの極値分布と合わせて，野村らの方法

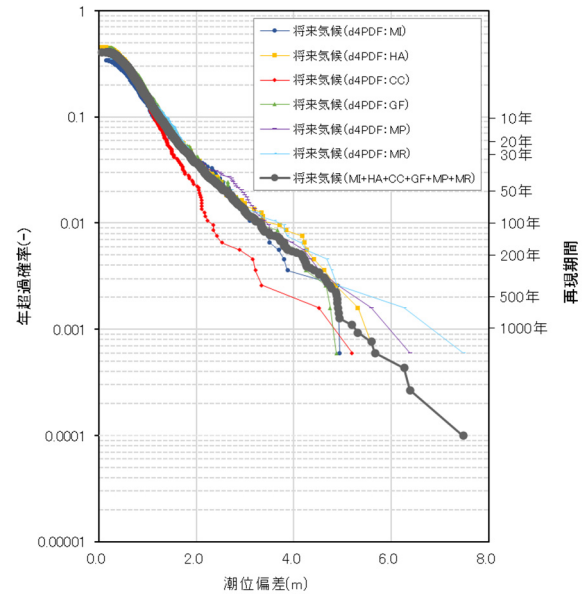


図-3.3 潮位偏差に関する各 SST 昇温パターンの極値分布及び SST 昇温パターンをまとめて評価した場合の極値分布（伊勢湾，海陽）

を参考に，すべてのSST昇温パターンをまとめることで得られた極値分布を示したものである。SST昇温パターンの違いを考慮せずに，1つのSST昇温パターンとしてまとめて評価する利点は，より再現期間の長い潮位偏差及び波高を推定できることである。ただし，SST昇温パターンの予測に伴う不確実性は考慮できない。

本研究では，将来のSST昇温パターンすなわち将来の気候条件予測に伴う高潮及び高波の認識論的不確実性を評価するに当たって，まず各SST昇温パターンを別々で扱うことの妥当性を評価した。

3.2 2標本コロモゴロフ-スミルノフ検定

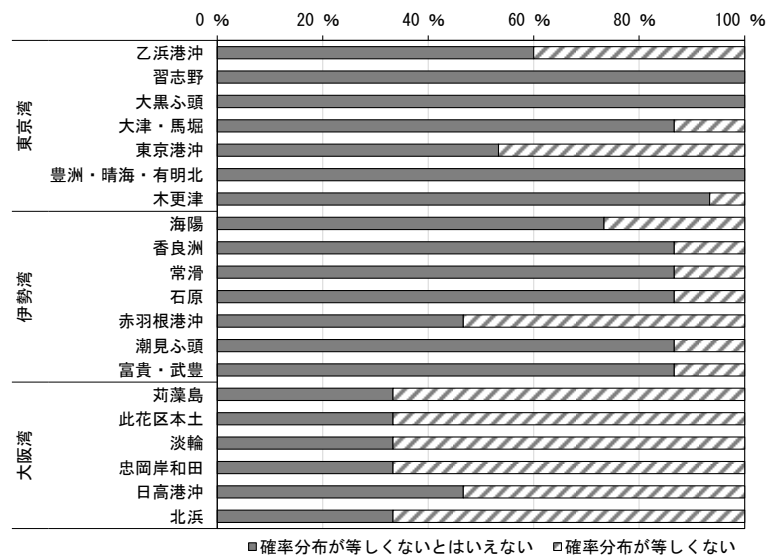
本研究では，各SST昇温パターンを別々で扱うことの妥当性を評価するため，2標本コロモゴロフ-スミルノフ検定（以下，2標本KS検定）を実施した。2標本KS検定は，2つの異なる標本が同じ確率分布をしているといえるかを検定するノンパラメトリック検定である。すなわち，2標本KS検定では，「2つの標本の確率分布は等しい」という帰無仮説が，任意の有意水準において棄却されるかどうかを評価する。本研究では，有意水準を1.0%と設定した。よって，2標本KS検定において得られたp値が1.0未満の場合，帰無仮説は棄却される。

3.3 検定結果

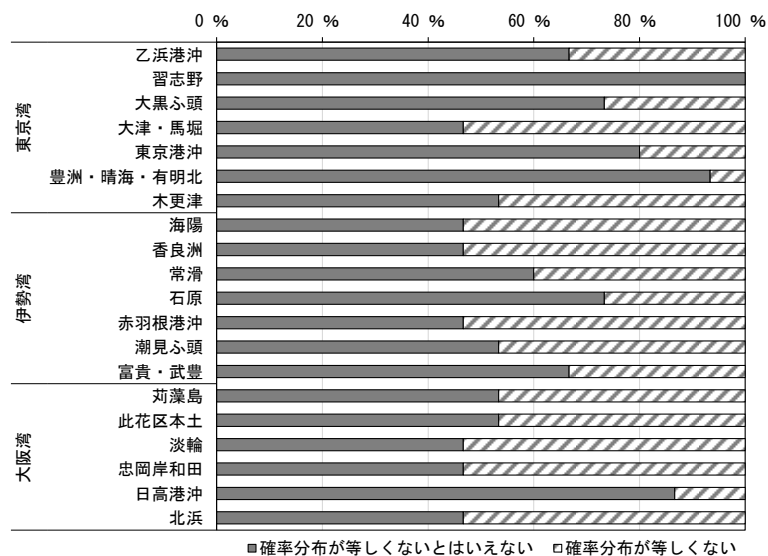
伊勢湾の海陽における潮位偏差及び波高に関する2標

表-3.1 2 標本 KS 検定における SST 昇温パターンの任意の 2 組に対する p 値 (伊勢湾, 海陽)

(a)潮位偏差						(b)波高					
SST	HA	CC	GF	MP	MR	SST	HA	CC	GF	MP	MR
MI	9.9	7.6	89.0	22.0	1.7	MI	39.0	0.0	38.0	0.0	45.0
HA	—	1.8	2.0	2.7	0.0	HA	—	0.1	28.0	0.0	49.0
CC	—	—	13.0	51.0	0.0	CC	—	—	0.0	80.0	0.0
GF	—	—	—	11.0	0.1	GF	—	—	—	0.0	82.0
MP	—	—	—	—	0.0	MP	—	—	—	—	0.1



(a)潮位偏差



(b)波高

図-3.4 2 標本 KS 検定における全 SST の組合せに対する帰無仮説が棄却される SST の組合せの割合

本KS検定の結果を表-3.1に示す。表中の着色箇所は、帰無仮説が棄却されたSST昇温パターンの組み合わせを示す。表-3.1より、潮位偏差及び波高のいずれについても、確率分布が異なるSST昇温パターンの組み合わせを有することが確認できる。さらに、全地点の潮位偏差及び波高について、SST昇温パターンの全ての組合せに対して、帰無仮説が棄却されない組合せ及び帰無仮説が棄却される組合せの割合を求めた結果を図-3.4に示す。同図より、ほとんどの地点において、帰無仮説が棄却されるSST昇温パターンの組み合わせを有する。

以上の結果から、高潮及び高波の極値を評価するに当たっては、SST昇温パターンを別々に扱うべきであると考えられる。なぜなら、極値統計解析を行う場合、すべての極値標本は、等質性を満たさなければならない。言い換えると、すべての標本は、同じ母集団から得られた標本でなければならない。2つの極値標本の確率分布が異なる場合、それぞれの標本が同じ母集団から得られた標本であると判断することは難しい。そのため、本検討結果より、将来の高潮及び高波の極値を評価する場合、各SST昇温パターンを別々に評価することが望ましいと考えられる。

4. 台風特性のランダム性に伴う高潮及び高波の偶然的不確実性

4.1 偶然的な不確実性

台風の強度、移動経路、移動速度等の台風特性は、発生した台風によってそれぞれ異なる。ある期間に発生した台風について、次の同じ期間においても同じ頻度及び同じ規模の台風が発生するとは限らない。このような台風の持つランダム性は、台風によって生じる高潮及び高波の不確実性の大きな要因となる。確率台風モデルから作成する台風についても上記と同様のランダム性を持っている。台風のランダム性に伴う高潮の不確実性のイメージを図-4.1に示す。図中の赤色及び水色の着色範囲は、それぞれSST昇温パターンのCC及びMRについて台風のランダム性に伴う潮位偏差の極値分布のばらつきを示したものである。すなわち、STMを用いて1,000年分の台風を作成し、潮位偏差の極値分布を推定する作業を何度も繰り返した場合、それぞれの極値分布は必ずしも同じ分布を示さず、図中の着色範囲のように幅を持って分布すると考えられる。この分布のばらつきを評価するためには、STMを用いて台風を作成し、潮位偏差及び波高を算定する作業を繰り返し実施することが理想的である。しかしながら、この作業は、作業に要する時間及

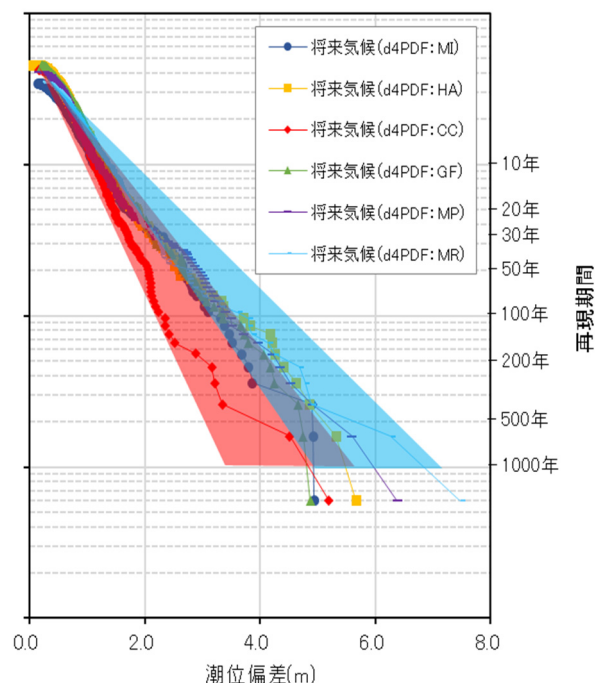


図-4.1 台風のランダム性に伴う潮位偏差の極値分布のばらつきのイメージ

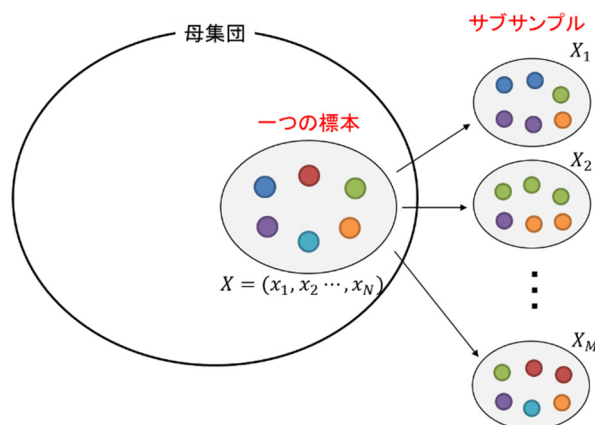


図-4.2 ブートストラップ法におけるリサンプリング方法のイメージ

びコストを考慮すると現実的とはいえない。

上記の問題を解決したうえで、台風特性のランダム性に伴う高潮及び高波の不確実性を評価するために、本研究では、リサンプリング手法の一つであるブートストラップ法を用いた。水文統計の分野において、上記のようなばらつきを評価するうえで、ブートストラップ法は効率的な方法であると報告されている（實，2006；石橋ほか，2008；葛葉，2015）。

本章では、ブートストラップ法を用いた高潮及び高波の不確実性の評価方法及びその適用結果を示す。

4.2 ブートストラップ法

ブートストラップ法は、推定量の誤差評価のためのノンパラメトリックな統計手法である (Efron, 1979)。一般的に用いられるパラメトリックな統計では、ある母集団から抽出した標本から得られる推定量の統計的誤差を、母集団の確率的な変動をなんらかの分布で仮定することによって評価する。このパラメトリックな統計方法は、複雑な理論や数式に基づく解析によって統計的誤差を評価する必要がある。これに対して、そのような複雑な解析を、計算機を用いた大量の反復計算で置き換える方法として提案されたのが、ブートストラップ法である。

ブートストラップ法の最大の特徴は、母集団から抽出したある標本を疑似的な母集団と見なし、その疑似母集団からリサンプリングを行うことによって、推定量の統計的誤差を評価する点である。ブートストラップ法におけるリサンプリングのイメージを図-4.2に示す。ある母集団から得られた標本 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ から、重複を許して同じ標本数をサンプリングすることでサブサンプル $X_1 = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*\}$ を得る。この操作を M 回繰り返すことで、 M 個のサブサンプルを得る。以上が、ブートストラップ法におけるリサンプリング方法である。ある推定量の統計的誤差は、それら M 個のサブサンプルそれぞれに対して、その推定量を求め、そのばらつきを算定することによって評価できる。

以上で説明したとおり、ブートストラップ法は、推定量の統計的誤差を評価するために、本来の母集団から繰り返し標本を抽出する必要がある。そのため、ブートストラップ法を用いることで、STMから台風を作成しその高潮及び高波を推算するといった、標本抽出に多大な労力と時間を要する作業を省力化及び短縮し、台風のランダム性に伴う高潮及び高波の不確実性を効率的に評価できる。

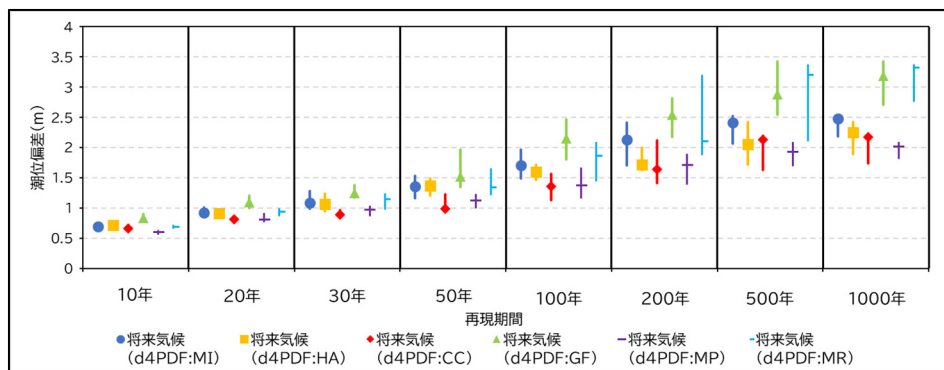
4.3 ブートストラップ法の適用結果

本検討では、確率台風モデルを用いて作成した1,000年分の台風による高潮及び高波の極値データを疑似母集

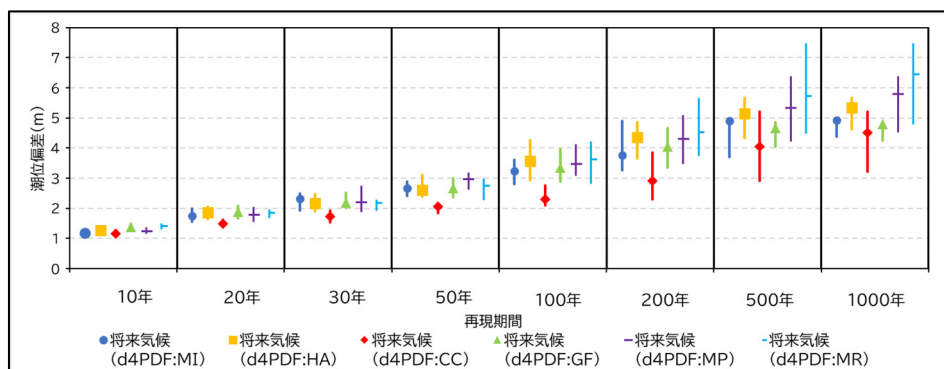
団としリサンプリングを行なうことで、任意の再現期間における潮位偏差及び波高の推定誤差を評価した。推定誤差の評価指標には、推定量の5パーセンタイル及び95パーセンタイル値を用いた。ブートストラップ法において推定量のパーセンタイル値を求める場合、リサンプリングの回数は1,000～2,000回必要であるとされている (小西ら, 2008)。本検討では、余裕をもってリサンプリング回数を4,000回とした。東京湾の大津・馬堀、伊勢湾の海陽及び大阪湾の日高港沖における各再現期間、各SST昇温パターンの潮位偏差及び波高の推定誤差の評価結果を、それぞれ、図-4.3及び図-4.4に示す。その他の地点の結果は付録Aに示す。

潮位偏差について、すべての地点で、再現期間が長くなるほど推定誤差が大きくなることが確認できる。再現期間が長くなるほど、その再現レベルの推定誤差が大きくなることは極値分布の一般な特徴であるが、本結果はブートストラップ法によって、その特徴が示されたものと推察される。

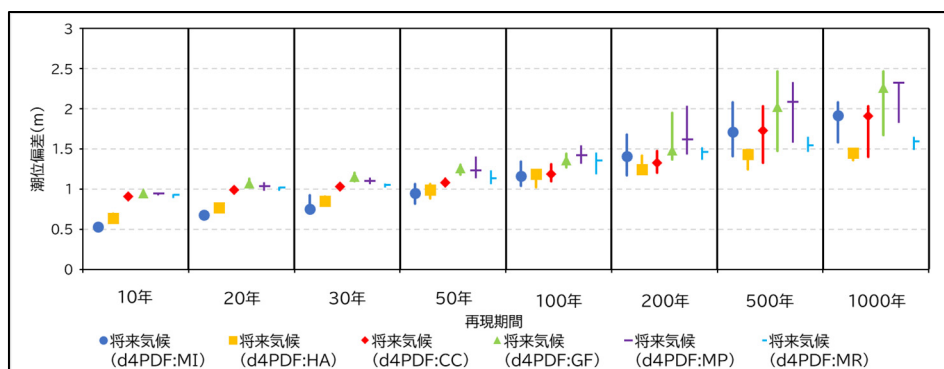
その一方で、波高については、再現期間が長くなるにつれて推定誤差が小さくなる地点が存在する。この結果は、推算地点が閉鎖的で水深の浅い海域に位置していることが原因と考えられる。そのような海域では、波の発達がフェッチの長さ、地形性の碎波等によって制限され、その結果として、波高はある値を超えて増大しないと考えられる。そのため、再現期間が長くなるほど、波高はその頭打ちとなる値に収束していき、その推定誤差は小さくなる。上記の根拠として、水深9.1mの地点に位置する海陽での波高の推定誤差は、水深30m以上の地点に位置する大津・馬堀及び日高港沖の推定誤差に比べて、極めて小さい。ただし、外洋に位置する日高港沖と内湾に位置する大津・馬堀での波高の推定誤差の比較から分かるとおり、内湾と外洋のフェッチの長さによって、波高の推定誤差に顕著な違いは確認できなかった。



(a)大津・馬堀（東京湾）

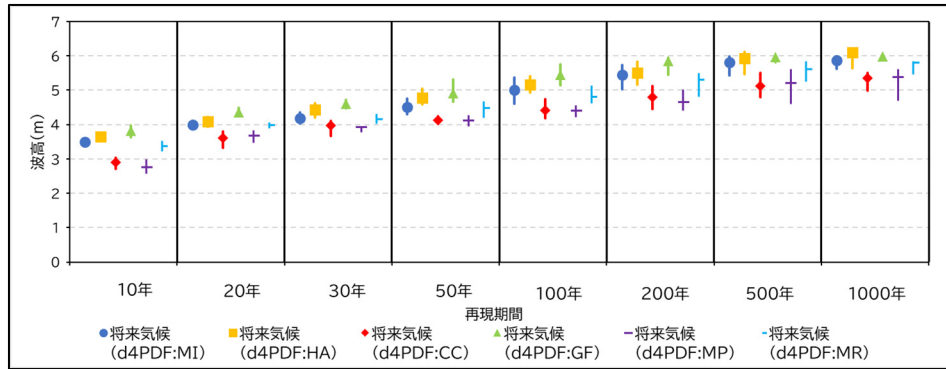


(b)海陽（伊勢湾）

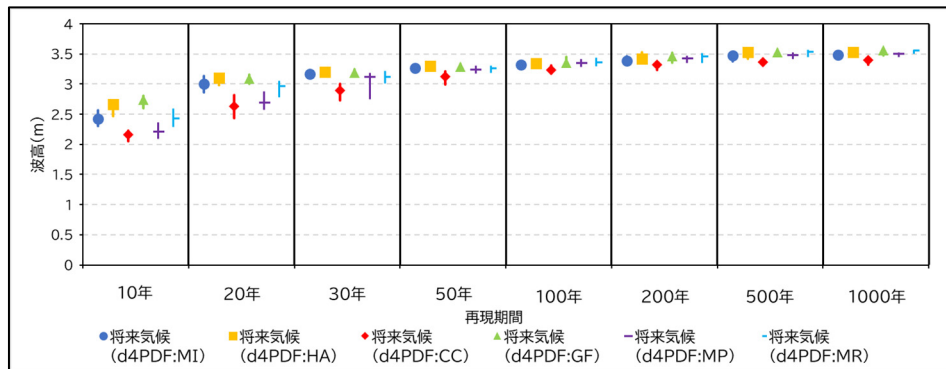


(c)日高港沖（大阪湾）

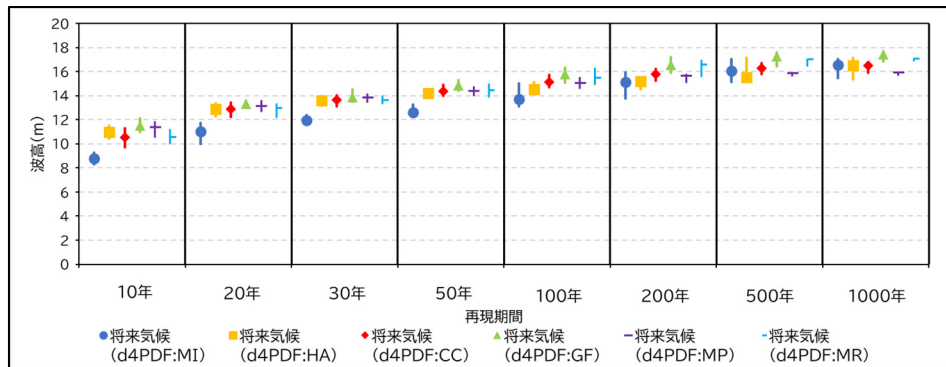
図-4.3 台風のランダム性に伴う各再現期間の潮位偏差の推定誤差



(a)大津・馬堀（東京湾）



(b)海陽（伊勢湾）



(c)日高港沖（大阪湾）

図-4.4 台風のランダム性に伴う各再現期間の波高の推定誤差

5. 不確実性を考慮した将来の潮位偏差及び波高の推定

現在、日本の港湾施設の多くについては、将来の気候変動を考慮した設計がなされていない。本章では、本研究で評価した高潮及び高波の不確実性を考慮した、港湾施設の設計における将来の潮位偏差及び波高の推定方法を提案する。

高潮及び高波の不確実性を考慮した将来の潮位偏差及び波高の推定は、以下のとおりに実施する。まず、現在気候及び各SST昇温パターンの高潮及び高波の極値データについて、ブートストラップ法を適用する。次に、各SST昇温パターンのいずれかが将来のSST昇温条件となる確率がすべてのSST昇温パターンで等しいと仮定して、各SST昇温パターンにおいてブートストラップ法で得られた各再現期間の潮位偏差又は波高の推定値をひとつのデータとしてまとめる。上記のデータを値の降順に並び替え、任意のパーセンタイル値をとることで、潮位偏差又は波高の推定誤差を算定する。以上で算定した潮位偏差及び波高の推定誤差は、将来のSST昇温パターンの予測に伴う認識論的不確実性及び台風特性のランダム性に伴う偶然的な不確実性を考慮した推定誤差である。

算定結果の1例として、伊勢湾の海陽における現在気候及び将来気候の潮位偏差及び波高の推定誤差を、それぞれ、図-5.1及び図-5.2に示す。図中のプロットは中央

値（50パーセンタイル値）を示し、縦棒は5パーセンタイル値と95パーセンタイル値の幅（90%信頼区間）を示す。本評価地点の場合、潮位偏差について、中央値は将来気候と現在気候を比べると大きな違いは見られない。その一方で、95パーセンタイル値は、いずれの再現期間においても、将来気候の方が現在気候に比べて大きいことがわかる。この結果は、潮位偏差は将来気候の平均的な条件において現在気候から大きく変化しない一方で、気候シナリオによっては現在気候よりも増大する可能性があることを示唆している。波高については、いずれの気候条件においても、その推定誤差が小さい。これは、前述した内湾に伴う波高の発達制限によるものと考えられる。結果として、波高は、現在気候から将来気候にかけて変化しないと考えられる。

最後に、各気候の同じパーセンタイル値について、各再現期間の潮位偏差及び波高の比（現在気候に対する将来気候の比）を算定する。その比を現在の港湾施設の設計条件に乗ずることによって、気候変動を考慮した港湾施設の設計に用いる将来の潮位偏差及び波高を推定することが可能となる。図-5.3及び図-5.4は、それぞれ、海陽における潮位偏差及び波高について、中央値、5パーセンタイル値及び95パーセンタイル値について、現在気候に対する将来気候の比をそれぞれ示したものである。その他の地点の潮位偏差及び波高の結果は、それぞれ、付録A及び付録Bに示す。

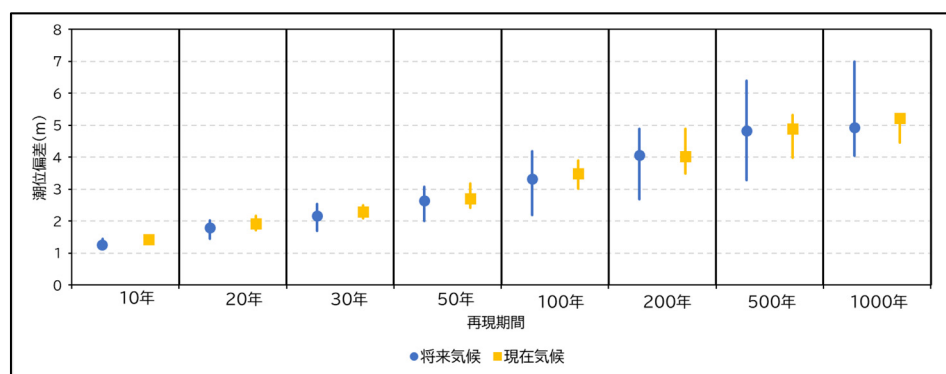


図-5.1 SST 昇温パターンの予測及び台風のランダム性に伴う不確実性を考慮した各再現期間の潮位偏差の推定誤差（伊勢湾，海陽）

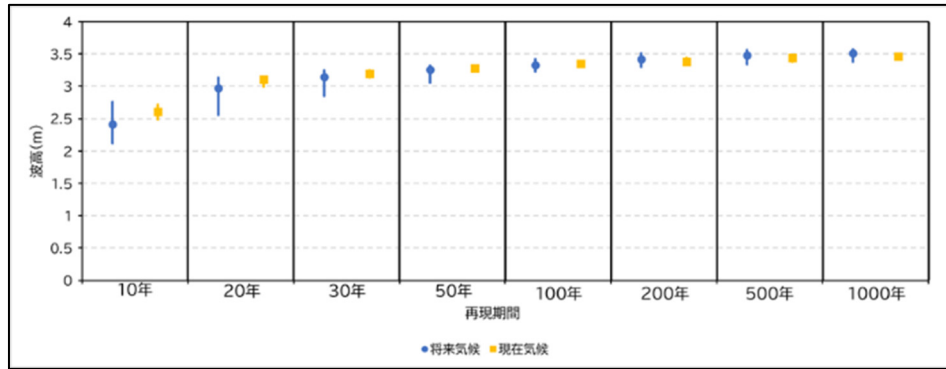


図-5.2 SST 昇温パターンの予測及び台風のランダム性に伴う不確実性を考慮した各再現期間の波高の推定誤差（伊勢湾，海陽）

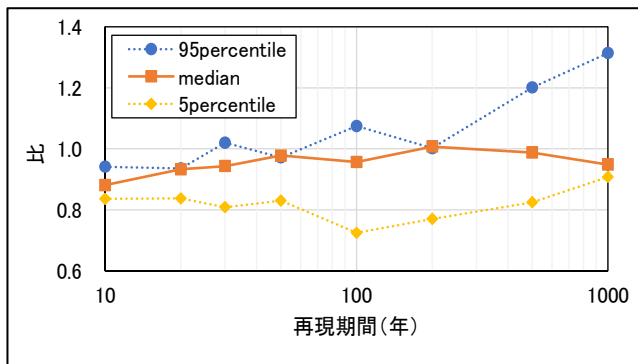


図-5.3 5, 50 及び 95 パーセンタイル値における各再現期間の現在気候に対する将来気候の潮位偏差比（伊勢湾，海陽）

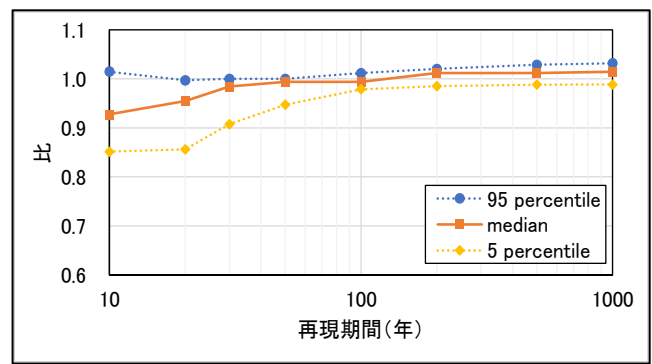


図-5.4 5, 50 及び 95 パーセンタイル値における各再現期間の現在気候に対する将来気候の波高比（伊勢湾，海陽）

6. まとめ

本研究では、特に台風によって生じる高潮及び高波について、将来の気候条件予測に伴う認識論的不確実性及び台風特性のランダム性に伴う偶然的な不確実性の2種類の不確実性を評価した。本研究の主な結論は、次のように要約できる。

- 将来の気候条件予測に伴う高潮及び高波の認識論的不確実性の評価に当たって、各 SST 昇温パターンにおける高潮及び高波の極値データは、すべてひとつの SST 昇温条件としてまとめて扱うのではなく、別々に扱うことが望ましい。
- 台風特性のランダム性に伴う高潮及び高波の偶然的な不確実性は、それぞれ異なる特徴を示す。特に、波高は、その発達メカニズムによって、一般的な極値の不確実性とは異なる特徴を示す。

7. あとがき

本研究で用いたブートストラップ法は、出来る限り母集団の特性に近い標本を、リサンプリングのための疑似母集団として用いることが望ましい。そのため、求めるべき再現期間に応じて、統計期間等の標本の抽出方法を適切に行わなければならない。本研究では、現在気候及び将来気候ともに1,000年分の確率台風モデルによる潮位偏差及び波高の極値を用いたが、それ以上の統計期間の標本を必要とする再現期間を対象とする場合には、新たに潮位偏差及び波高を算定されたい。

本研究で参照したOkamotoら（2023b）による確率台風モデルを用いた潮位偏差及び波高に関する極値の推定値について、モデルバイアスが含まれている可能性があるため、本研究で示した潮位偏差及び波高の値をそのまま参照することは適切ではない。しかし、5章で記したよ

うに、各再現期間の潮位偏差及び波高について、現在気候に対する将来気候の変化比を算出することで、モデルバイアスを相殺し、この将来変化比を現在の設計値に乘じる等の対応が考えられる。

本研究では、認識論的不確実性及び偶然的な不確実性の2つの不確実性を考慮した将来の潮位偏差及び波高の推定方法を提案した。今後、本提案手法が、気候変動を考慮した港湾施設等の設計の進展に貢献できることを期待したい。

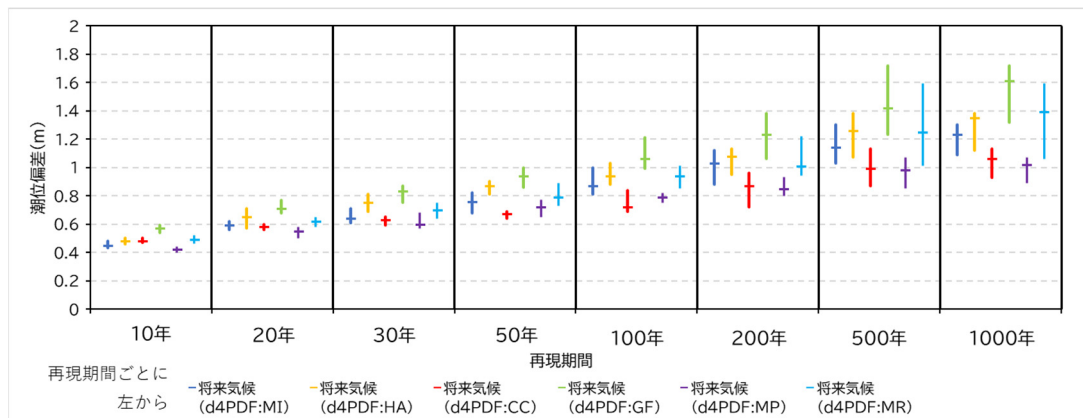
実際の将来時点での潮位偏差及び波高は、現時点で確定論的に予測した将来の潮位偏差及び波高に対し、上振れすることや下振れすることが想定される。上振れした場合には、それまでに気候変動への適応対策を実施した港湾施設の更なる嵩上げ等といった対応が必要となる。また、下振れした場合には、それまでに実施した適応対策が過大となることが考えられる。しかし、本研究で提案した2つの不確実性を考慮した将来の潮位偏差及び波高の推定手法を用いることにより、例えば、1つの方法として、安全側を考慮して外力が最大となるSST昇温パターンを用いるなど、このような上振れリスク及び下振れリスクに対応した検討に活用することが可能となる。

(2023年5月31日受付)

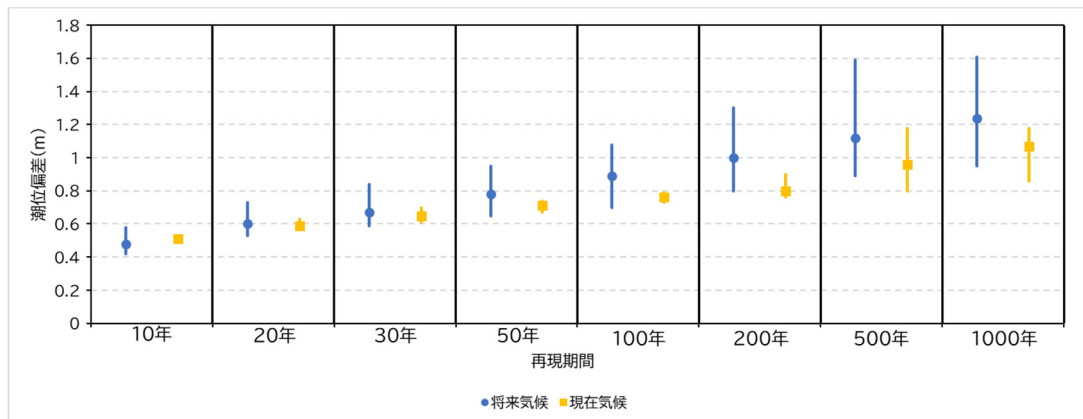
参考文献

- 石原幸司・仲江川敏之 (2008) : 全国 51 地点におけるノンパラメトリック手法を用いた確率降水量の算出, 水文・水資源学会誌 Vol. 21, No.6, pp.459-463.
- 梅田尋慈・中條壯大・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.
- 葛葉泰久 (2015) : 確率水量の算定—ノンパラメトリック法と bootstrap 法—, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.71, No.4, I_355-I_360.
- 小西貞則・越智義道・大森裕浩 (2008) : 計算統計学の方法—ブートストラップ・EM アルゴリズム・MCMC—, 朝倉書店, 223p.
- 寶馨 (2006) : 大標本時代の水文頻度解析手法—リターンペ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.
- 文部科学省・気象庁 (2020) : 日本の気候変動 2020 - 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書 -, 49.
- 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.
- Efron, B (1979) : Bootstrap methods : Another look at the jackknife, The Annals of Statistics, 7, 1-26.
- IPCC-AR5 WG1 (2013) : *The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1535.
- 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, Murata, A, Ishii, M, Shiogama, H, Hibino, K, Mori, N and Arakawa, O (2017) : Over 5000 years of ensemble future climates simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models, *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, July, 1383-1398.
- Okamoto, K, Doukai, F, and Honda, K (2023a) : Uncertainty of extreme value of storm surges and high waves due to tropical cyclones in the future climate, *Proc. the 33rd International Ocean and Polar Engineering Conference*, Ottawa, 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*, Ottawa, Canada, ISOPE, pp.2737-2744.
- 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.

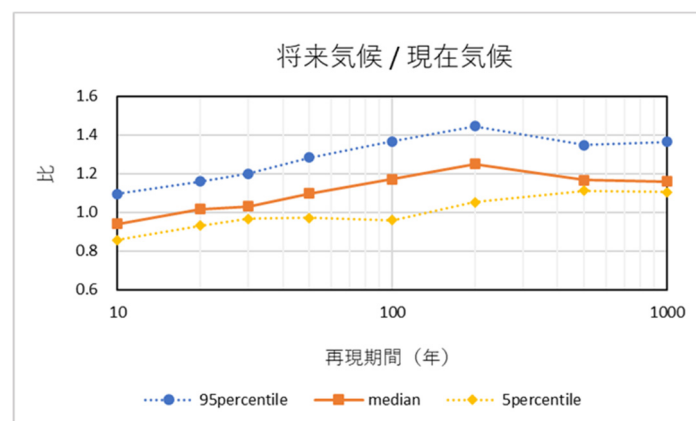
付録A 将来気候及び現在気候における潮位偏差の推定誤差及び潮位偏差比



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

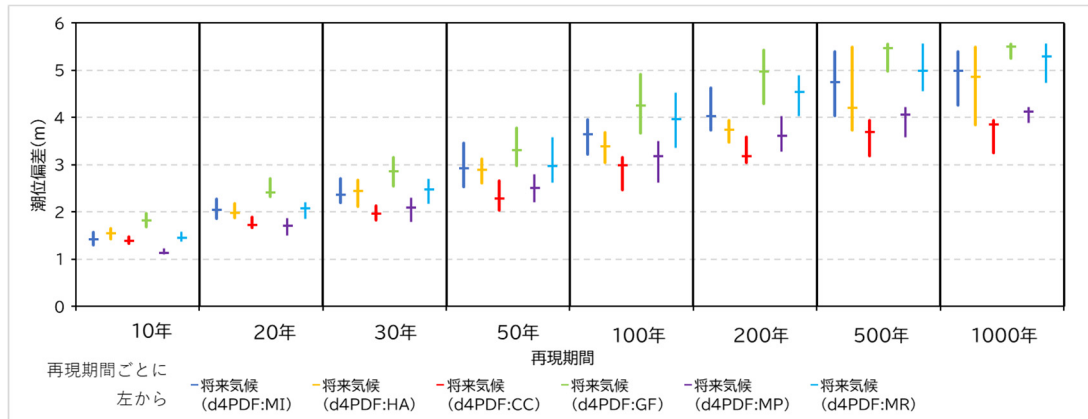


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

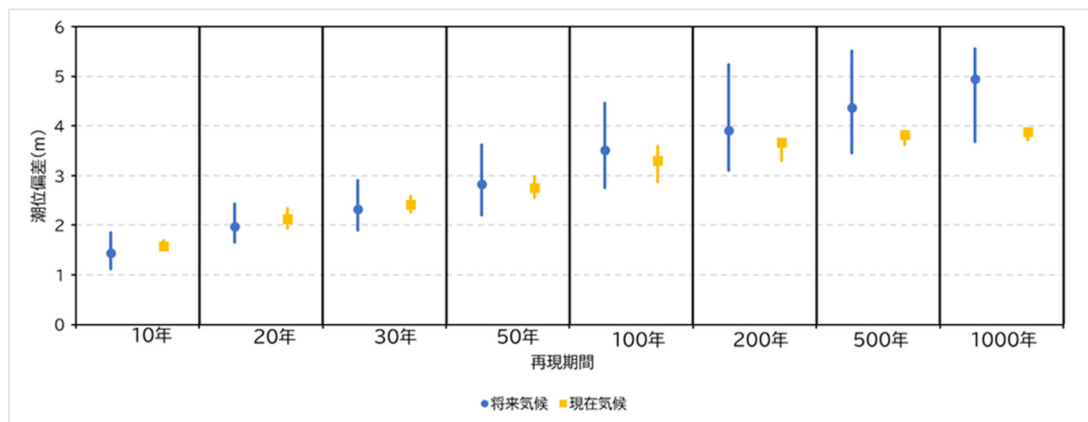


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

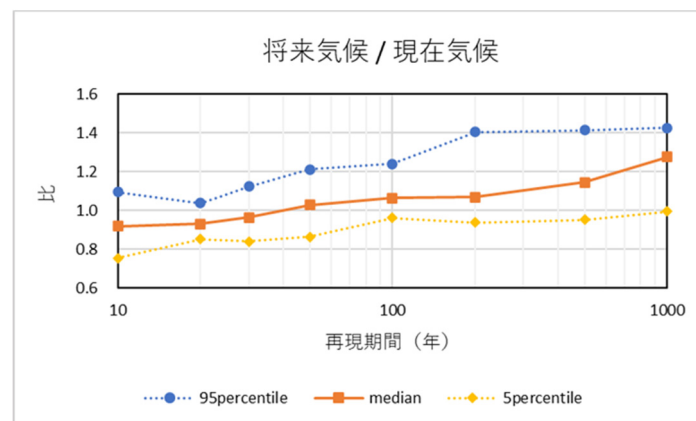
図-A.1 潮位偏差の結果（東京湾 乙浜港沖）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

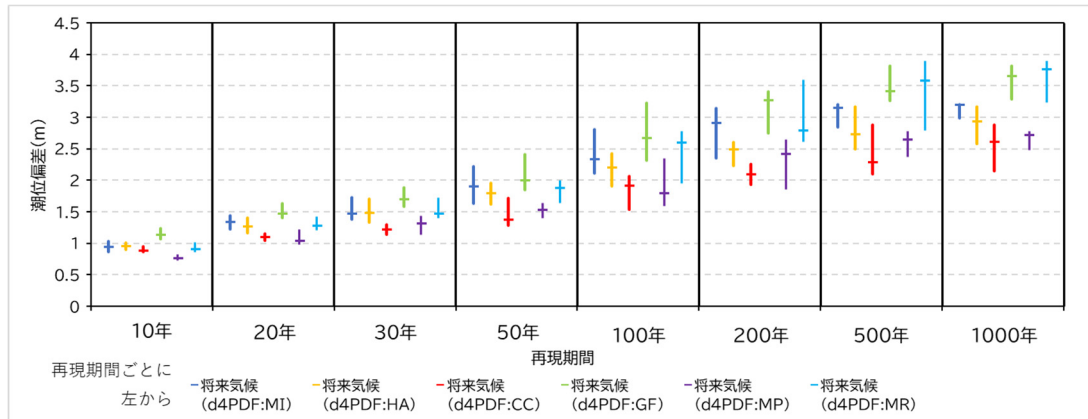


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

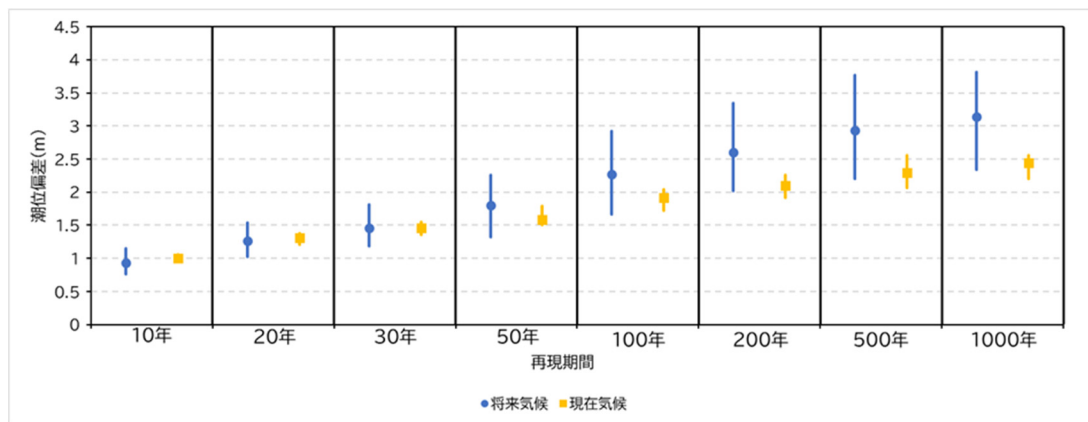


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

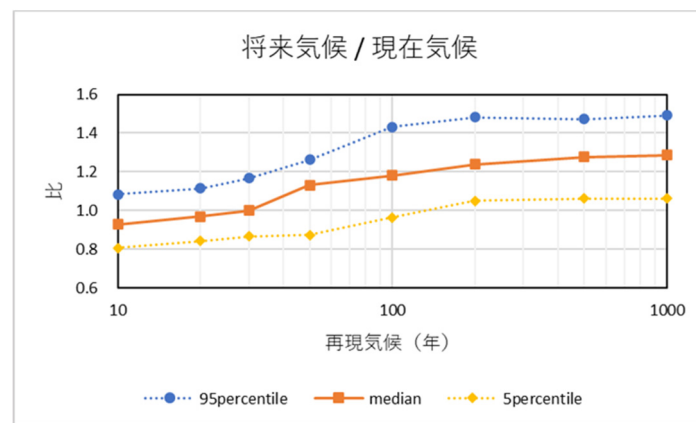
図-A.2 潮位偏差の結果（東京湾 習志野）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

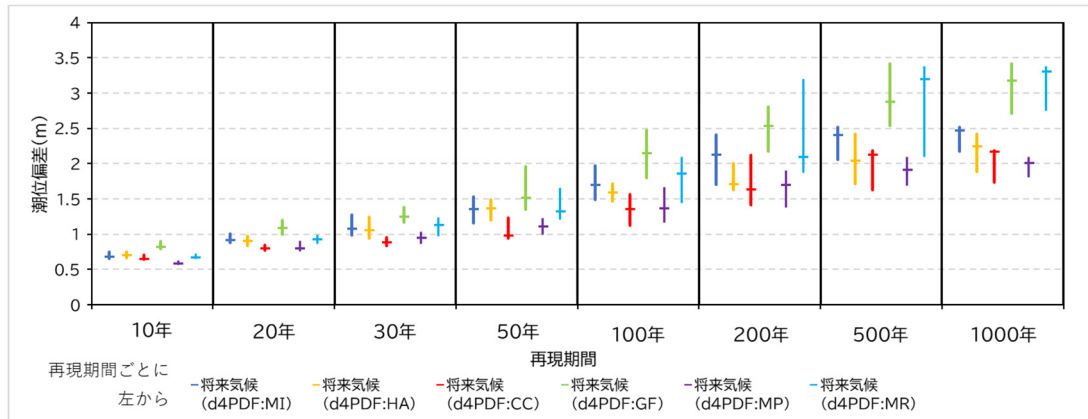


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

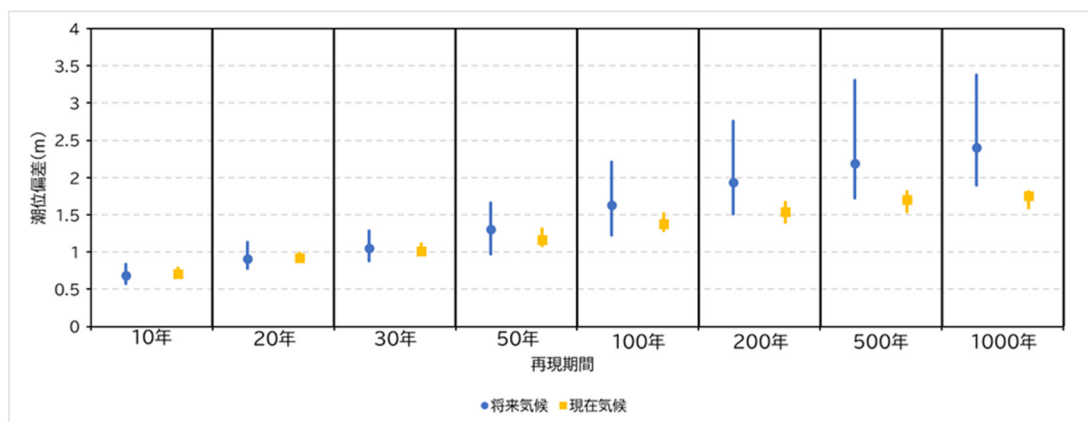


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

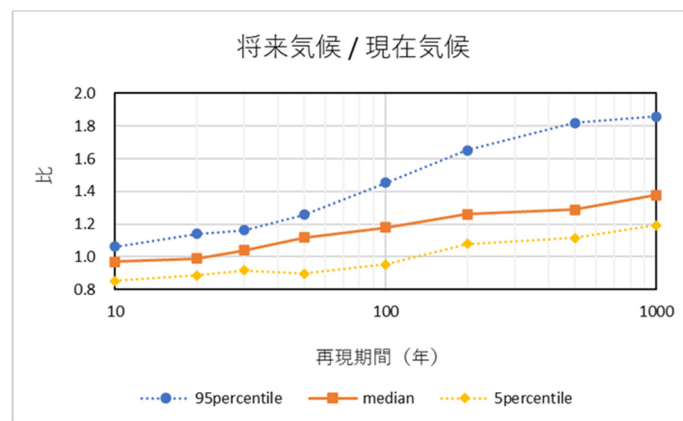
図-A.3 潮位偏差の結果（東京湾 大黒ふ頭）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

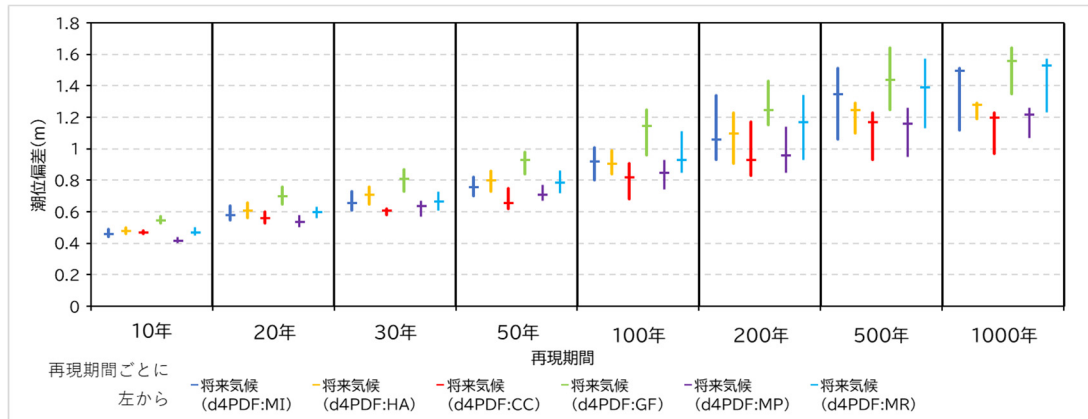


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

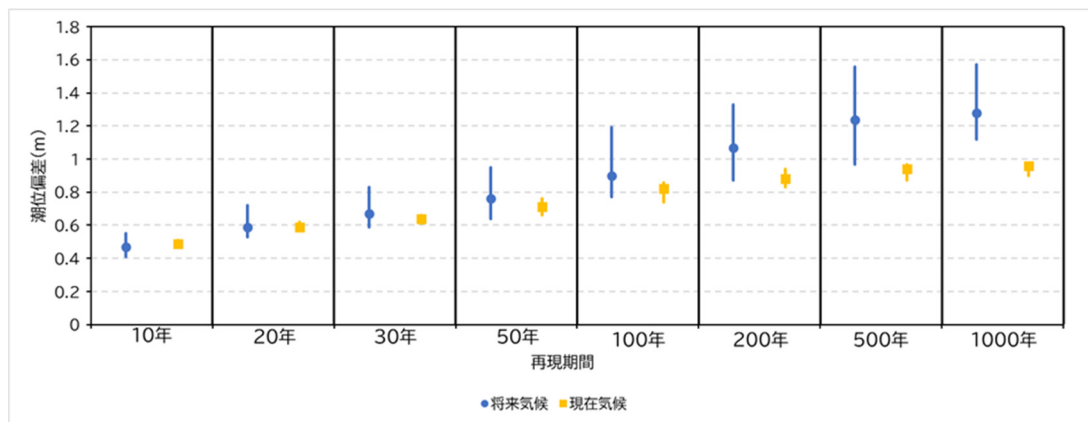


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

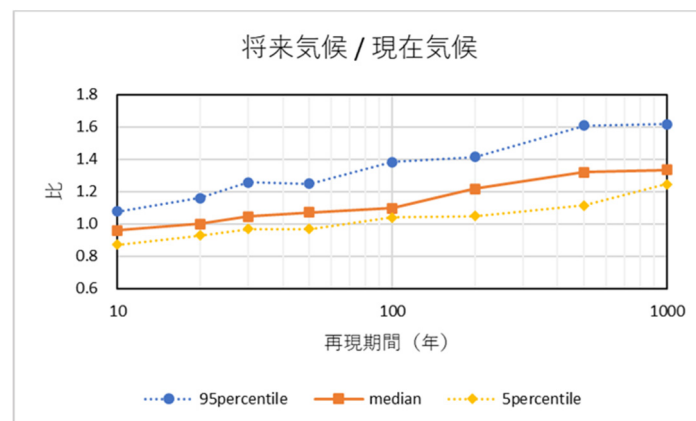
図-A.4 潮位偏差の結果（東京湾 大津・馬堀）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

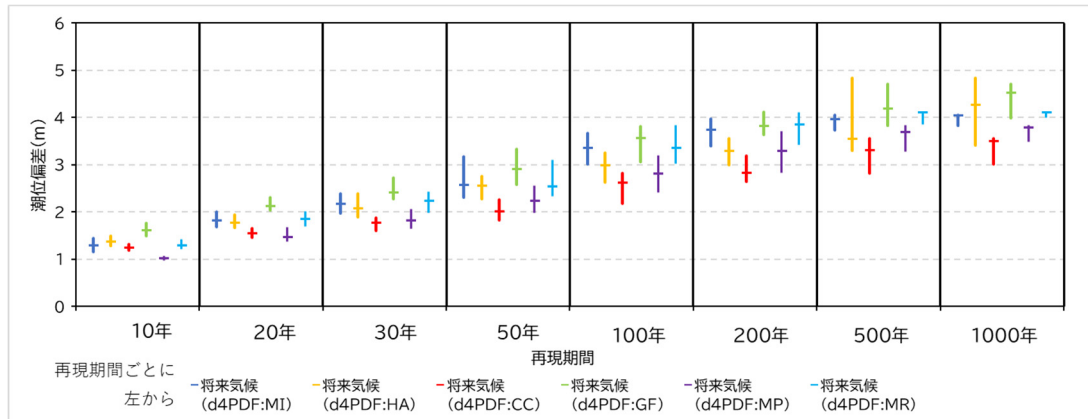


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

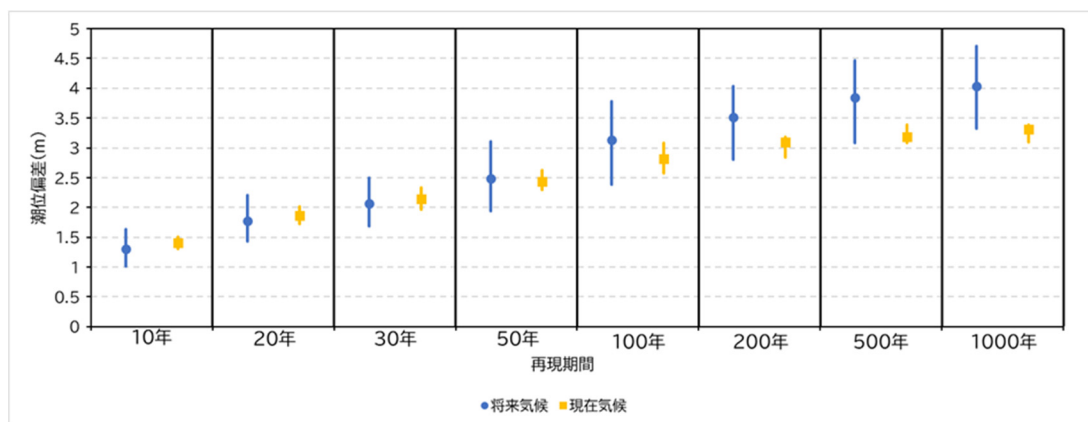


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

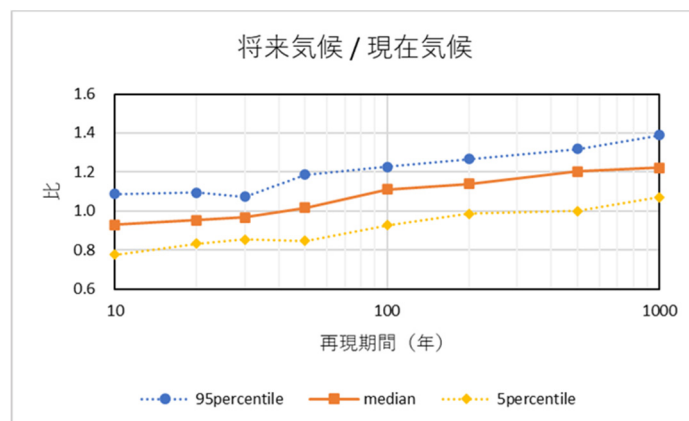
図-A.5 潮位偏差の結果（東京湾 東京湾沖）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

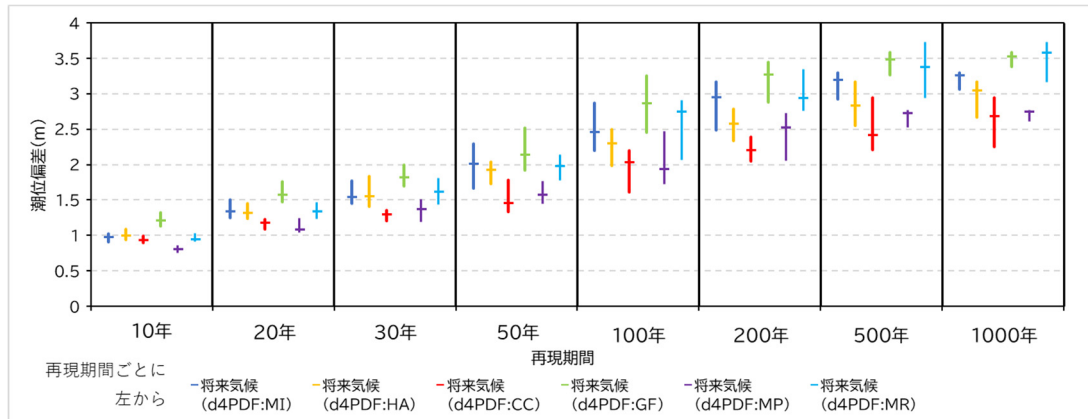


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

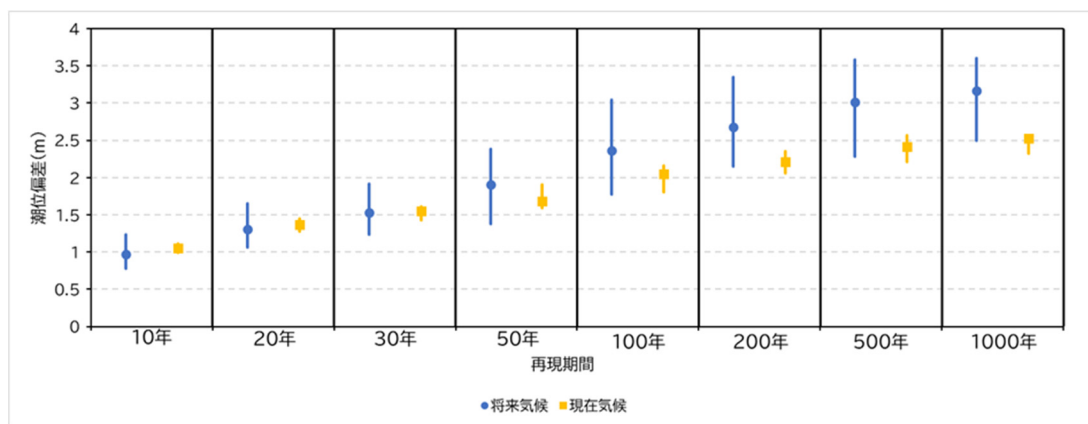


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

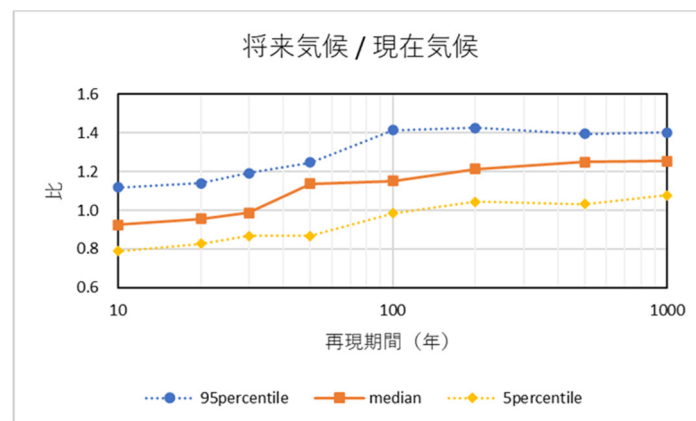
図-A.6 潮位偏差の結果（東京湾 豊洲・晴海・有明北）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

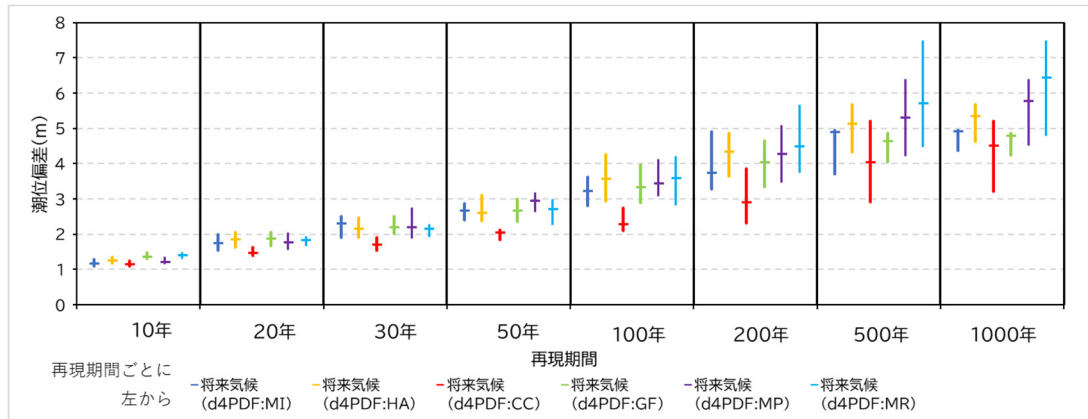


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

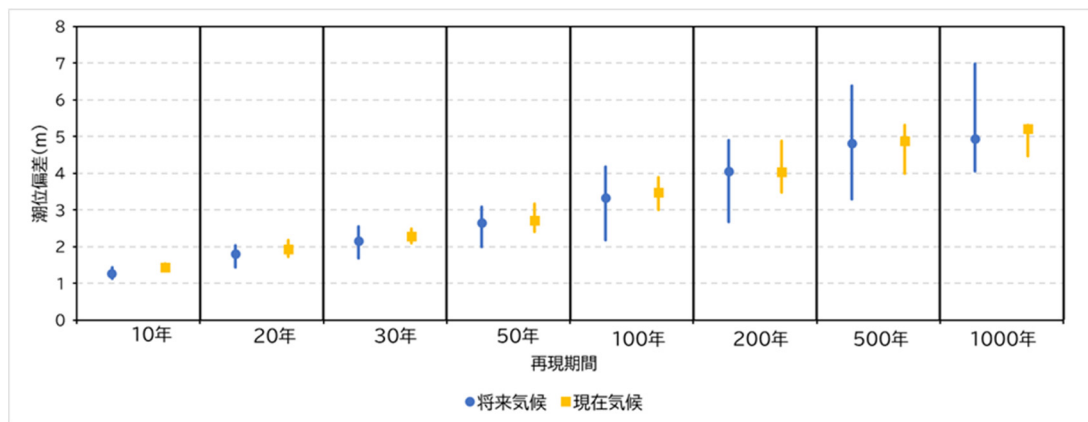


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

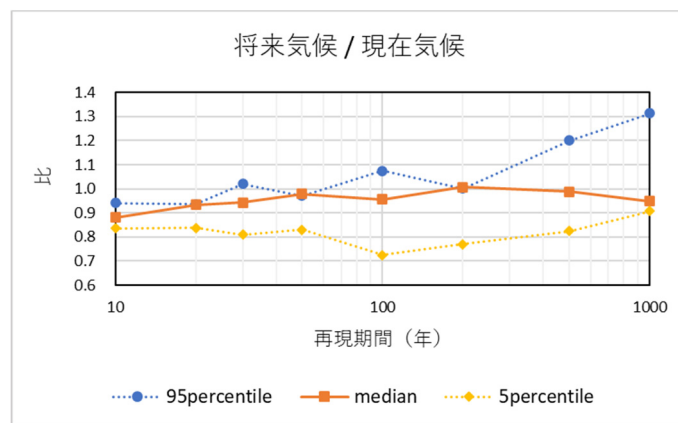
図-A.7 潮位偏差の結果（東京湾 木更津）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

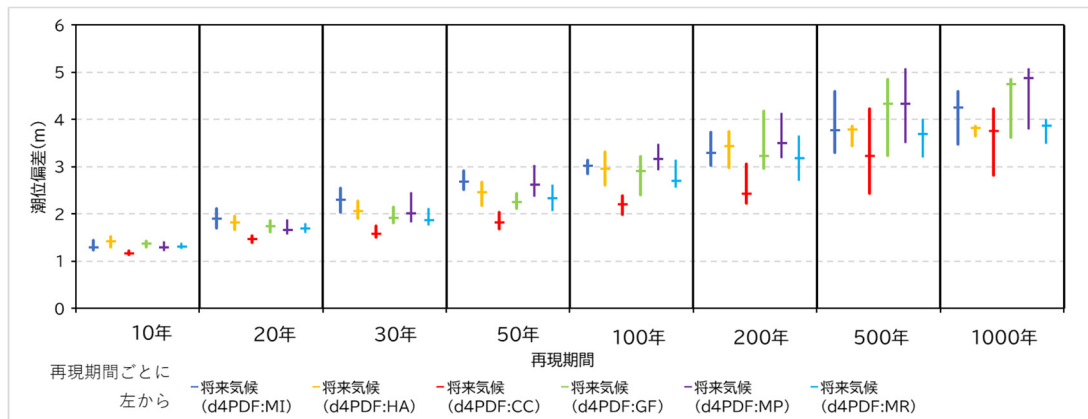


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

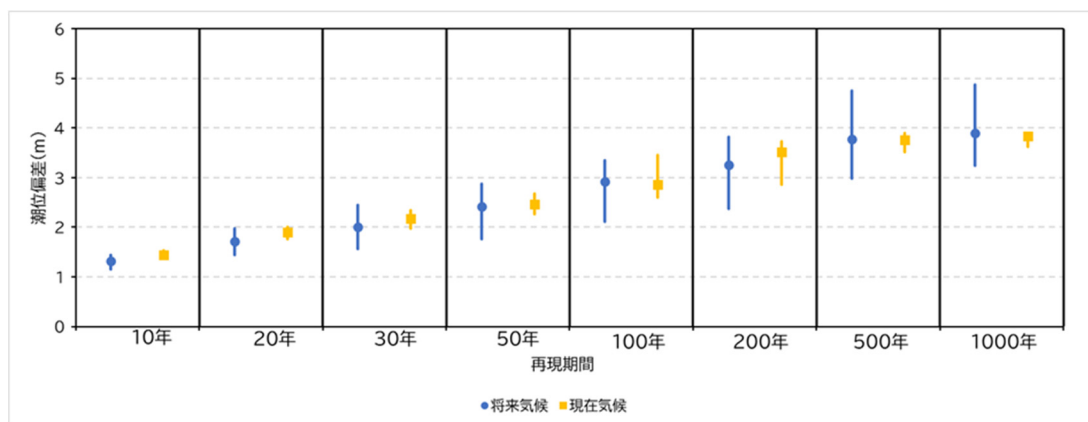


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

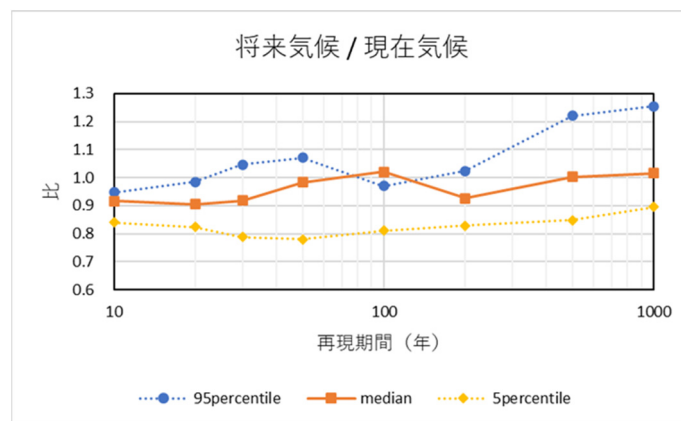
図-A.8 潮位偏差の結果（伊勢湾 海陽）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

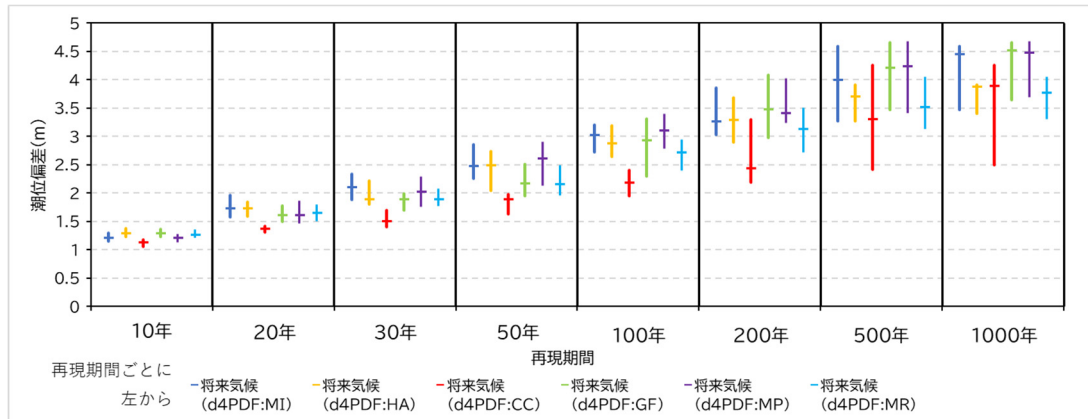


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

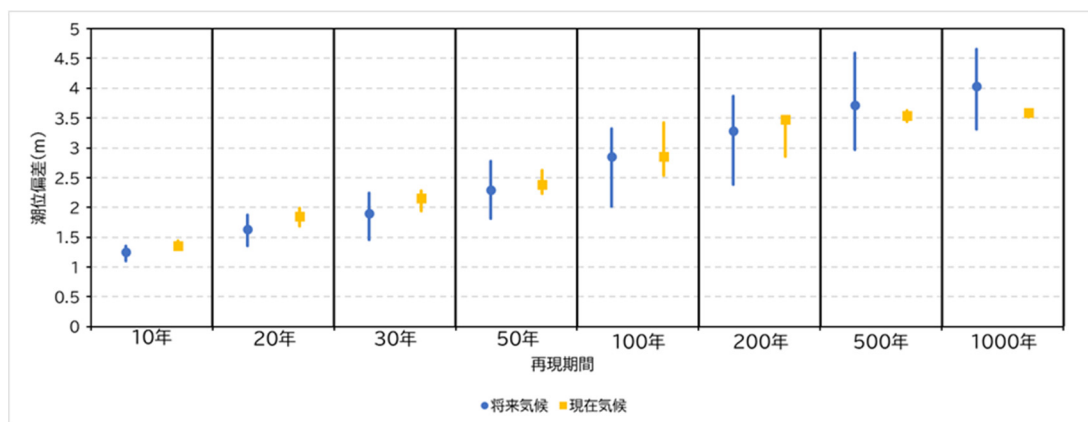


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

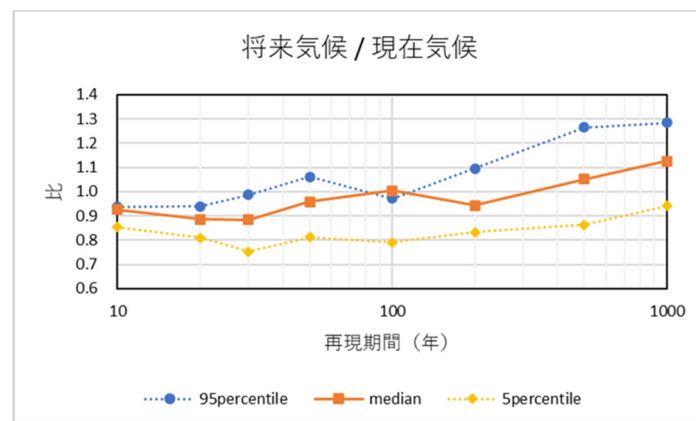
図-A.9 潮位偏差の結果（伊勢湾 香良洲）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

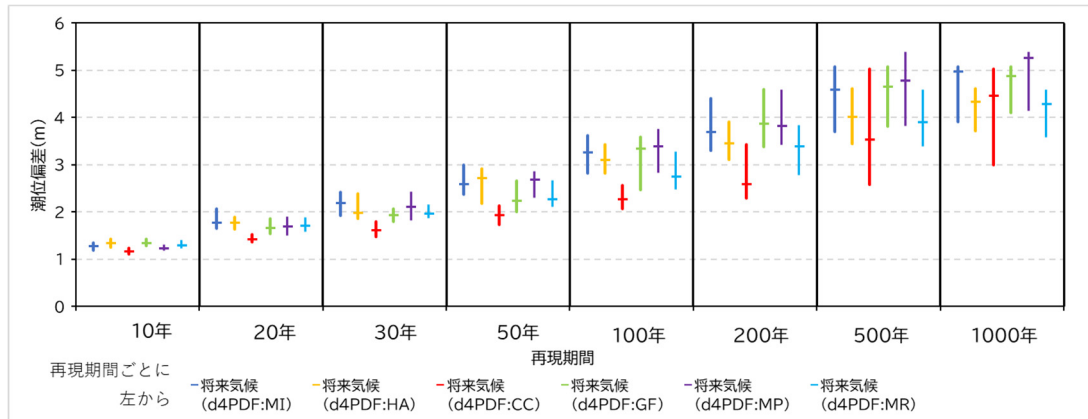


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

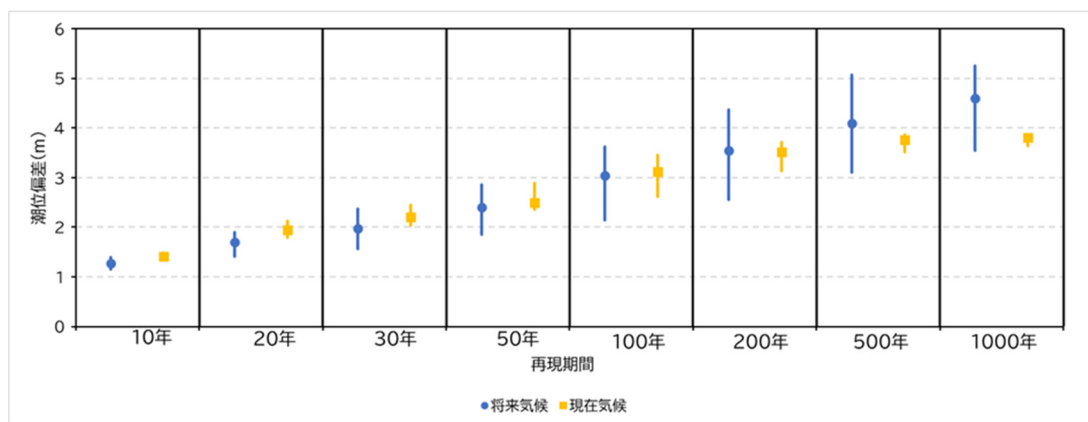


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

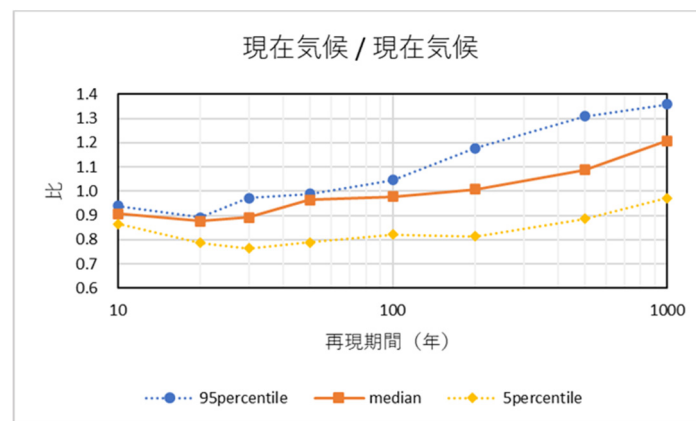
図-A.10 潮位偏差の結果（伊勢湾 常滑）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

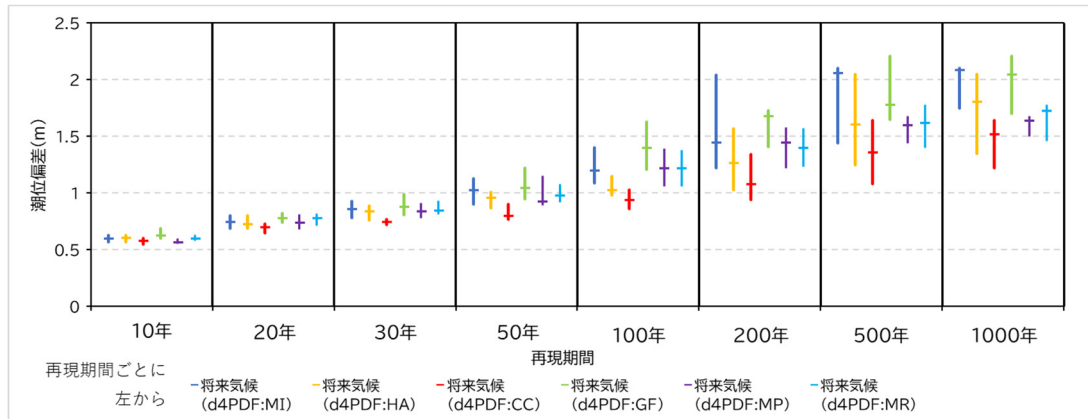


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

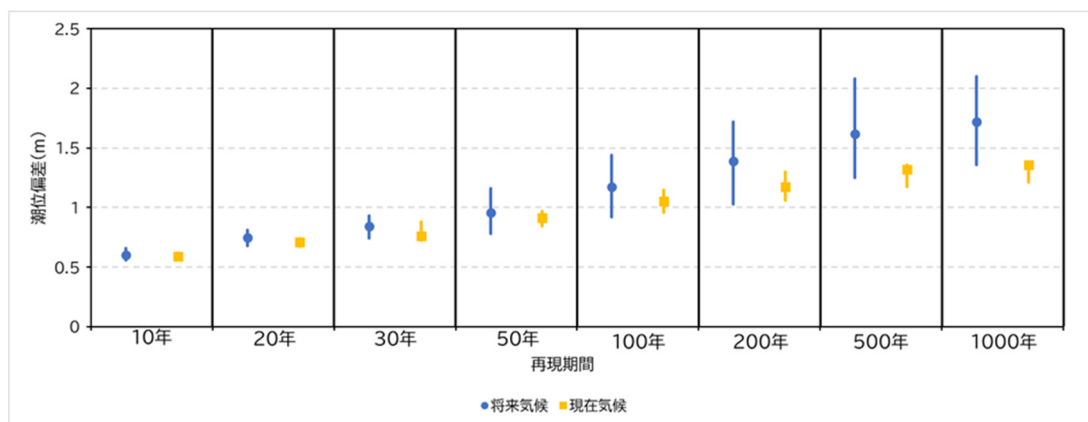


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

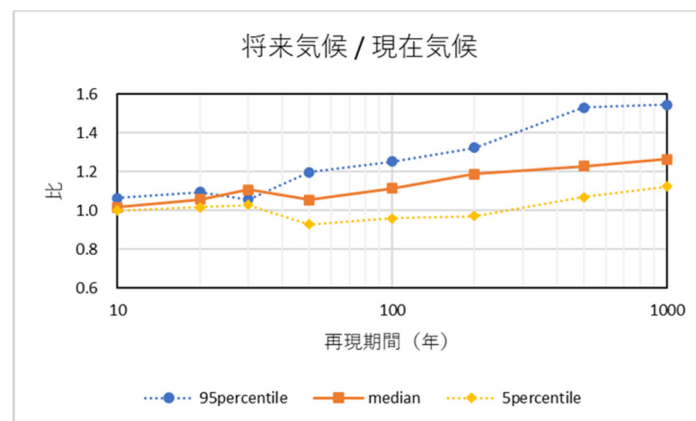
図-A.11 潮位偏差の結果（伊勢湾 石原）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

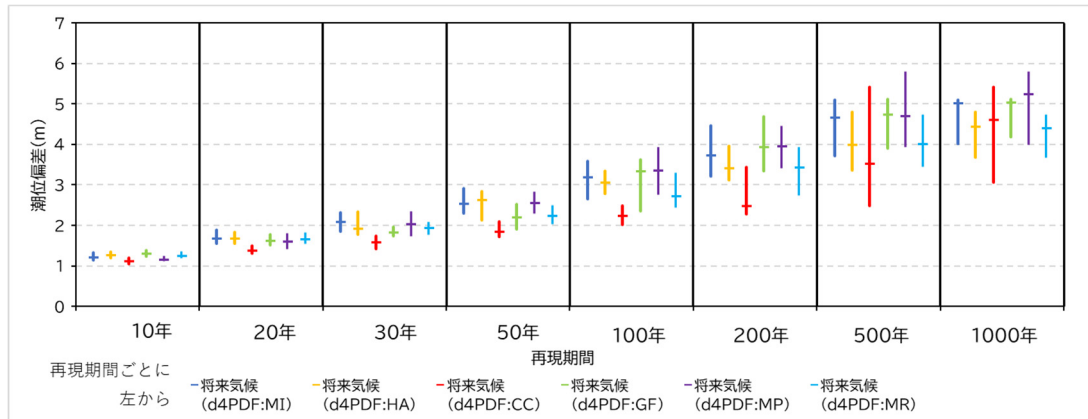


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

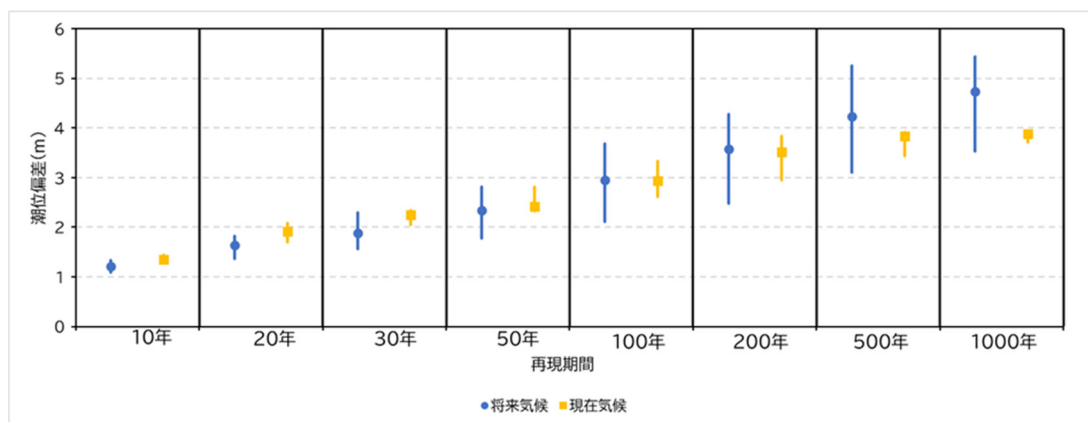


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

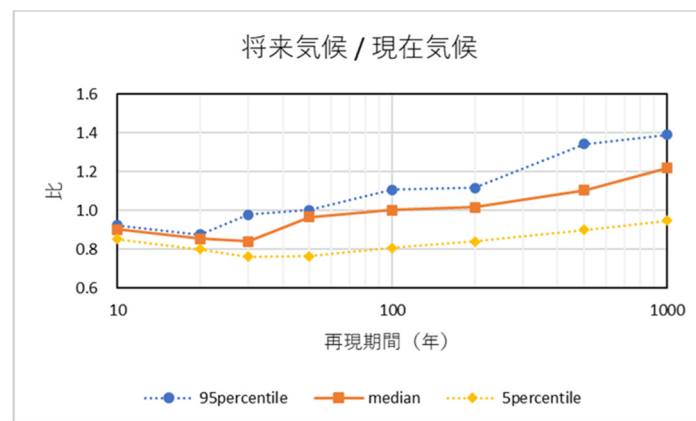
図-A.12 潮位偏差の結果（伊勢湾 赤羽根港沖）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

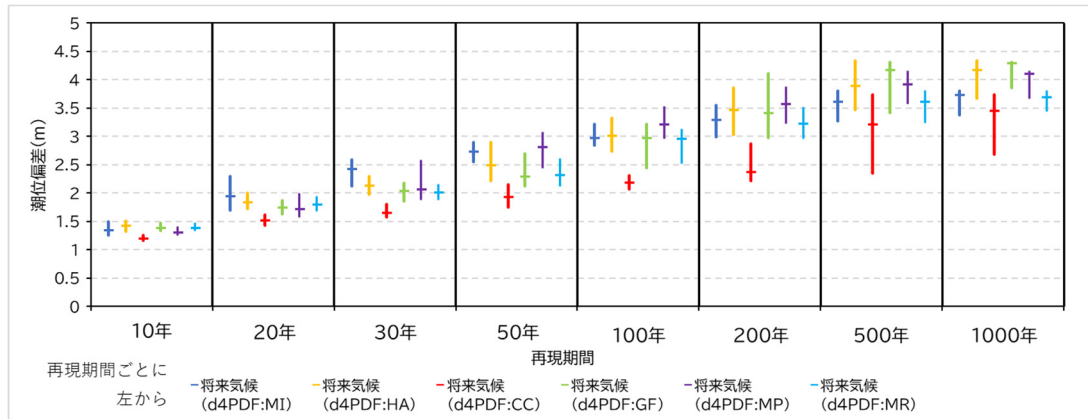


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

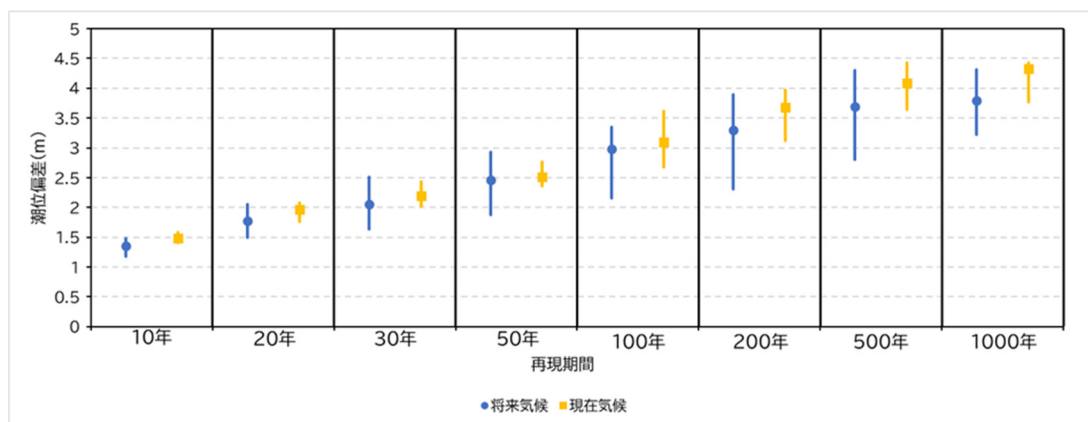


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

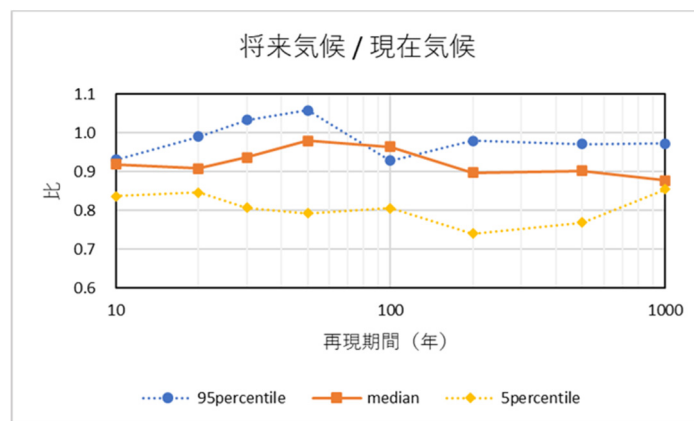
図-A.13 潮位偏差の結果（伊勢湾 潮見ふ頭）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

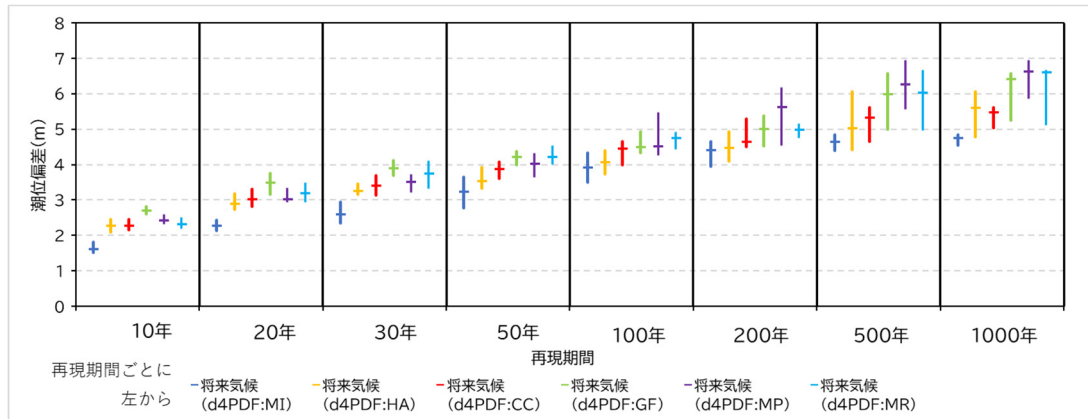


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

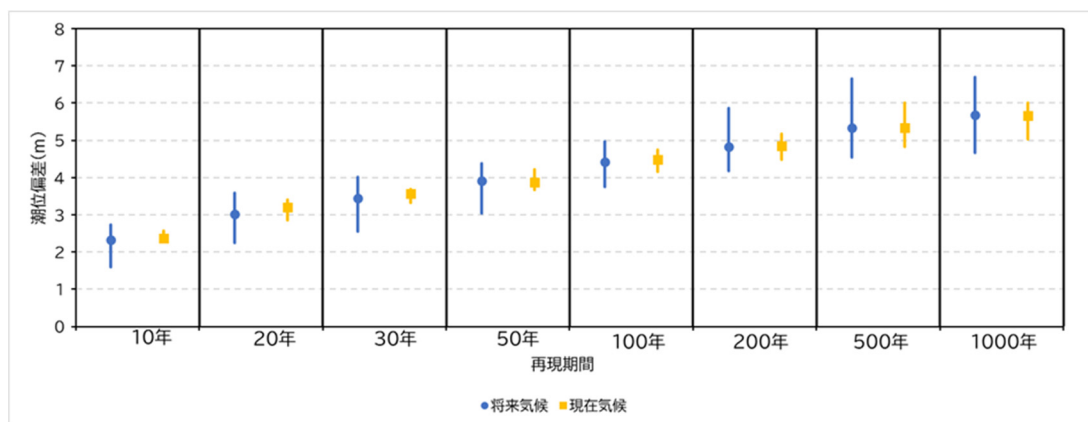


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

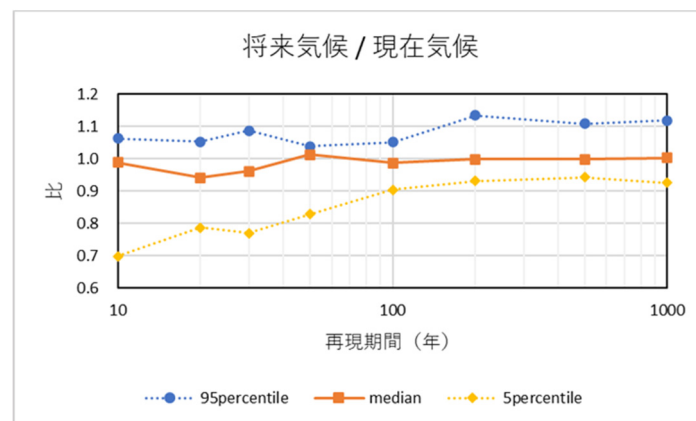
図-A.14 潮位偏差の結果（伊勢湾 富貴・武豊）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

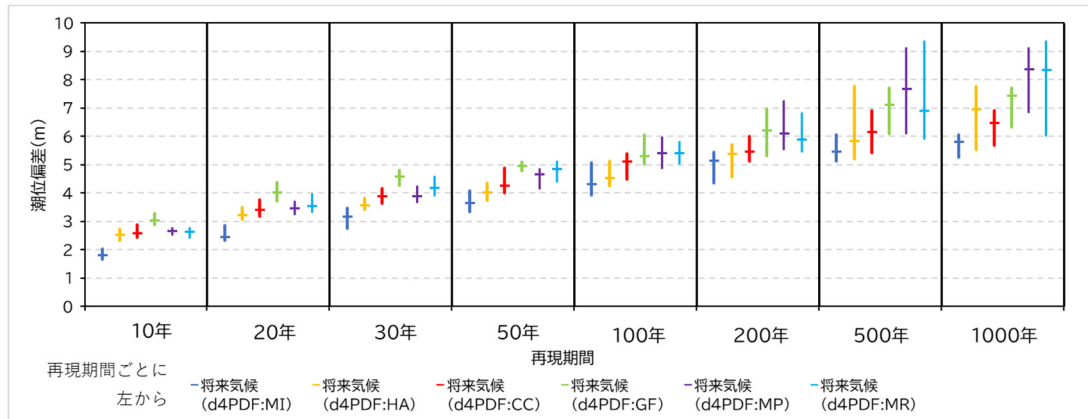


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

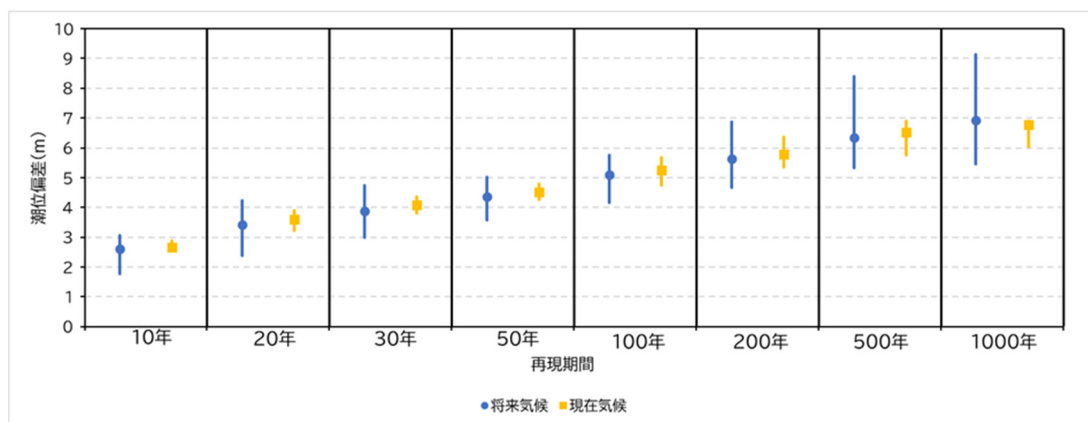


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

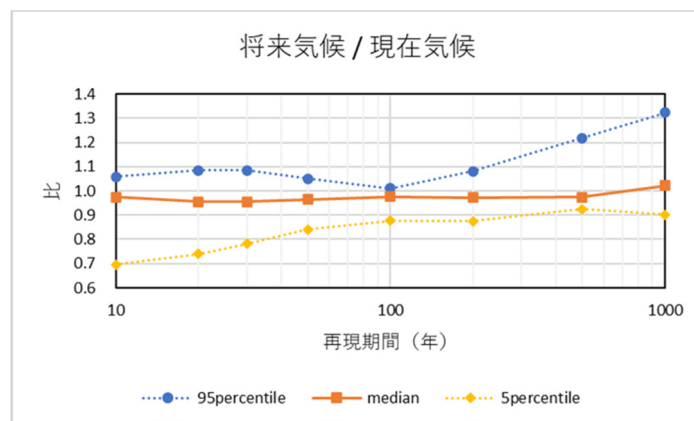
図-A.15 潮位偏差の結果（大阪湾 荻藻島）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

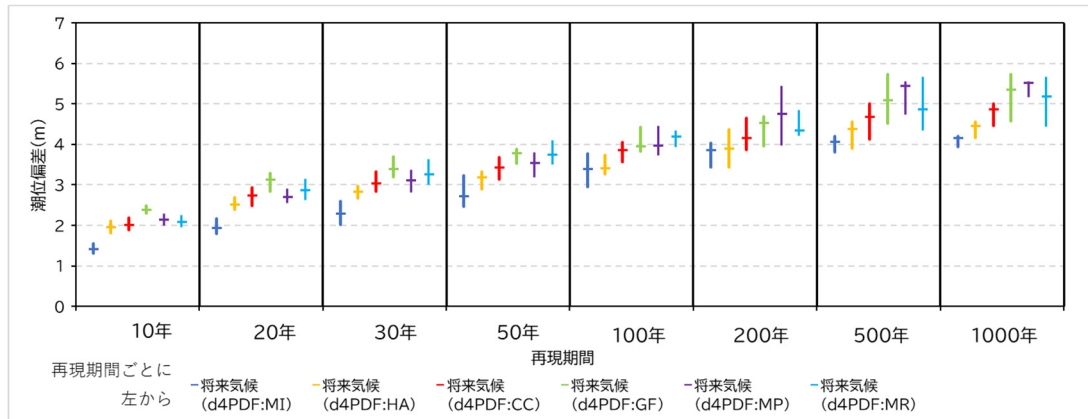


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

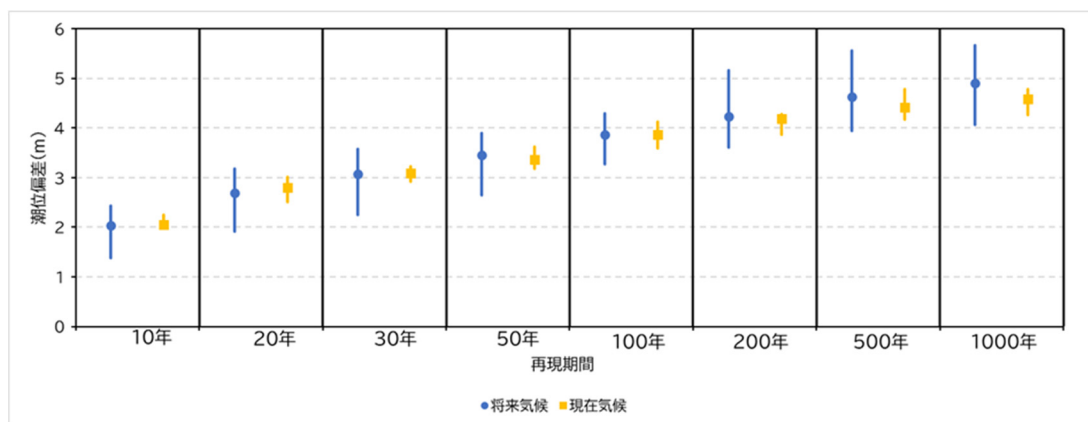


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

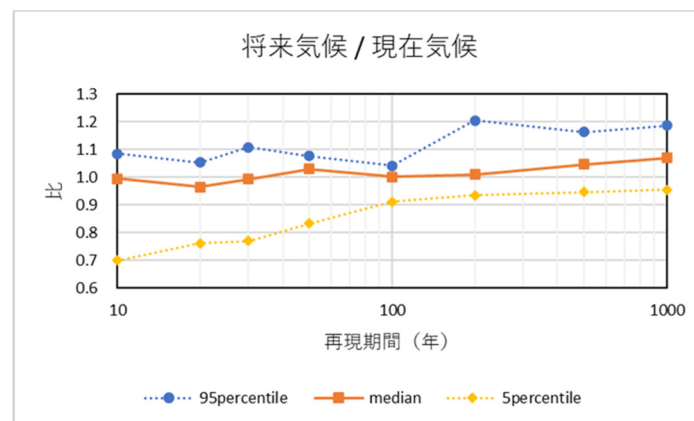
図-A.16 潮位偏差の結果（大阪湾 此花区本土）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

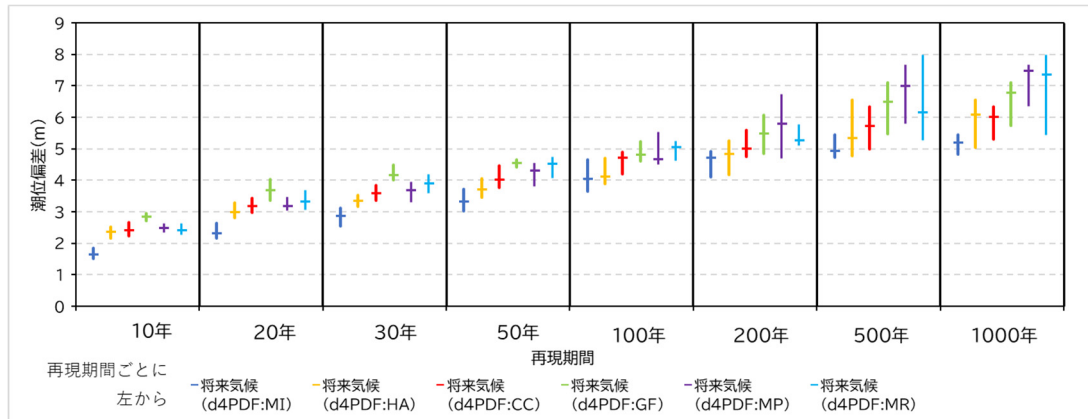


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

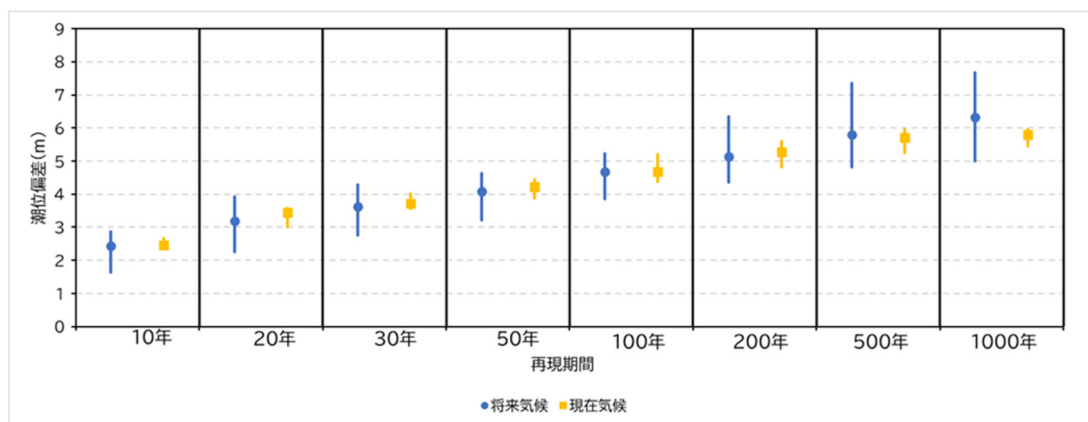


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

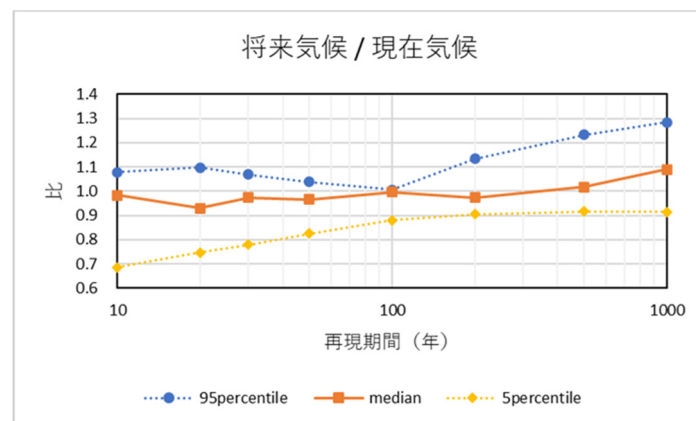
図-A.17 潮位偏差の結果（大阪湾 淡輪）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

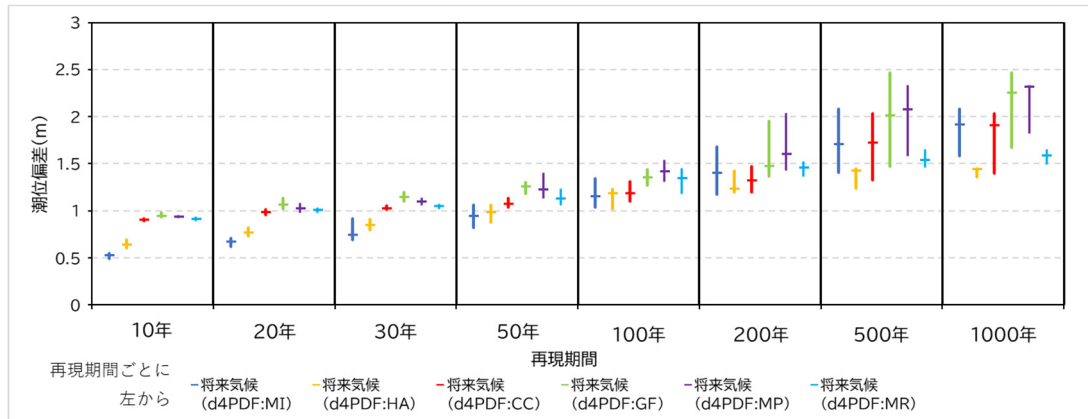


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

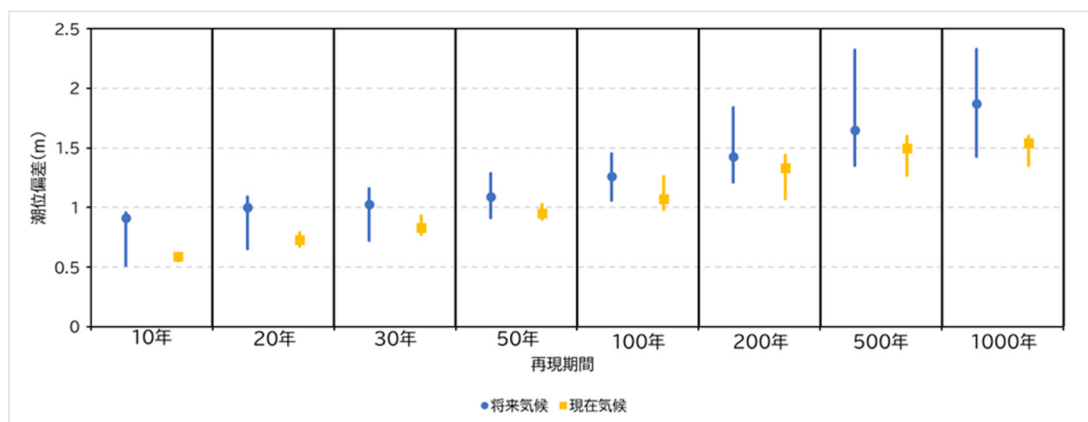


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

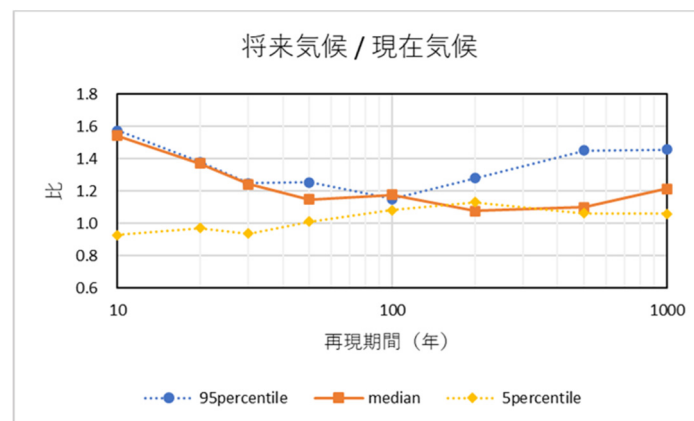
図-A.18 潮位偏差の結果（大阪湾 忠岡岸和田）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

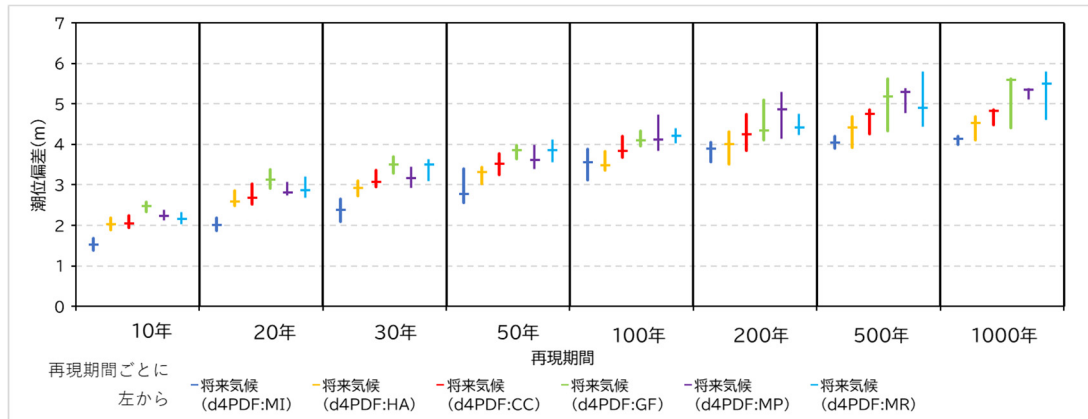


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

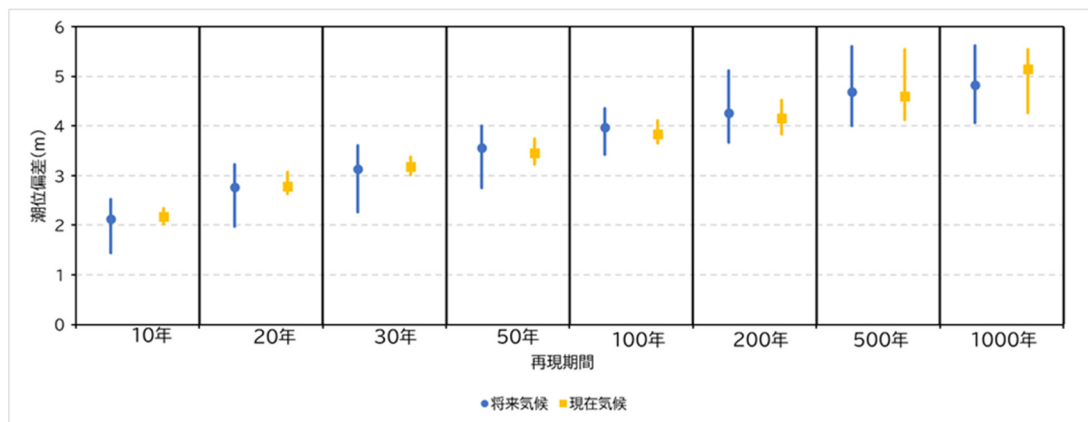


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

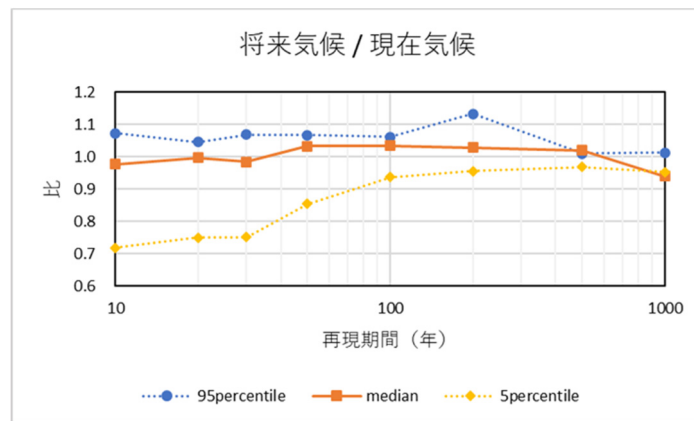
図-A.19 潮位偏差の結果（大阪湾 日高港沖）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき



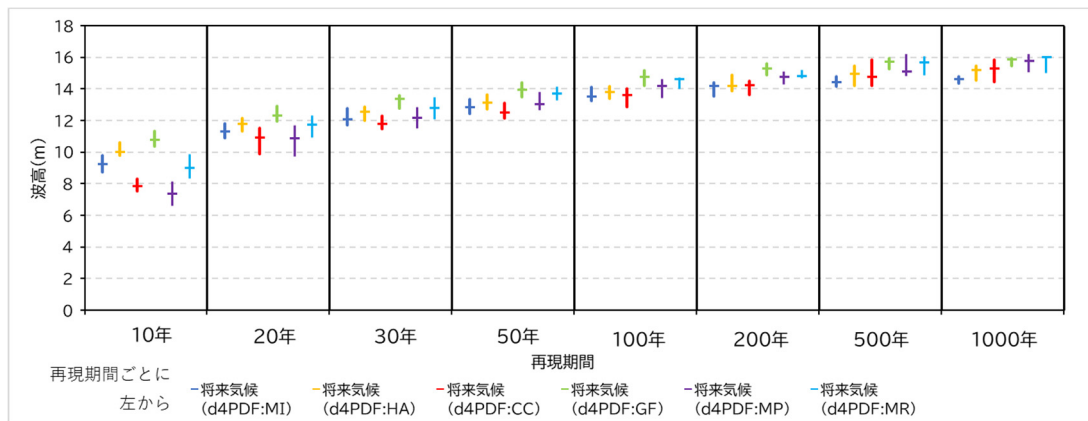
(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき



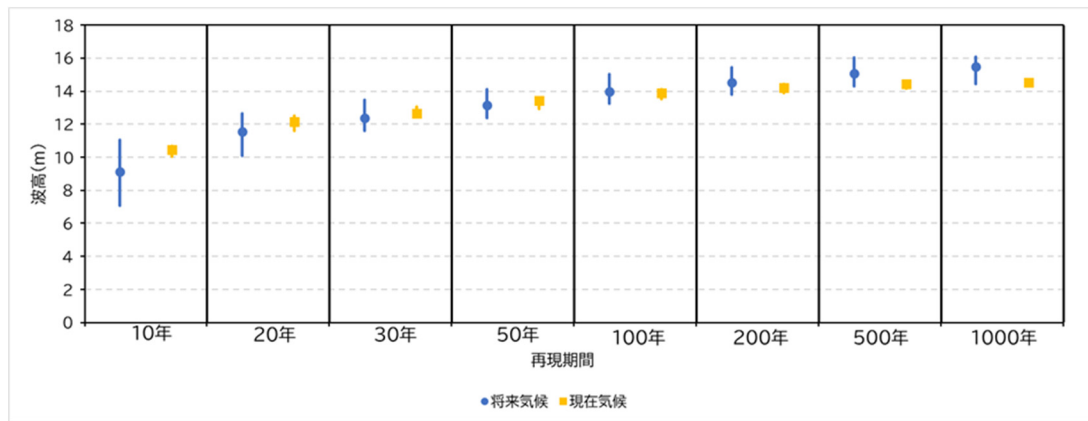
(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

図-A.20 潮位偏差の結果（大阪湾 北浜）

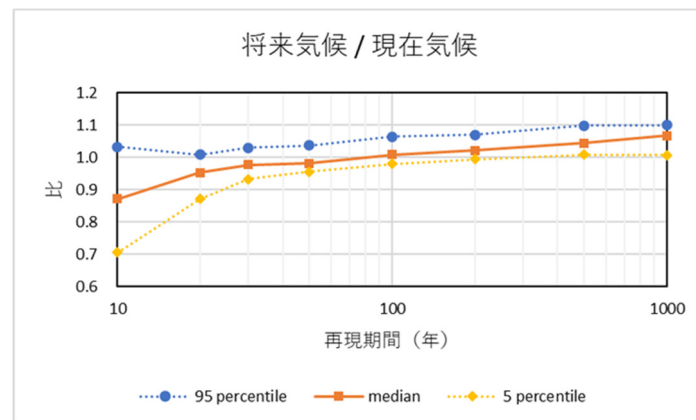
付録B 将来気候及び現在気候における波高の推定誤差及び波高比



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

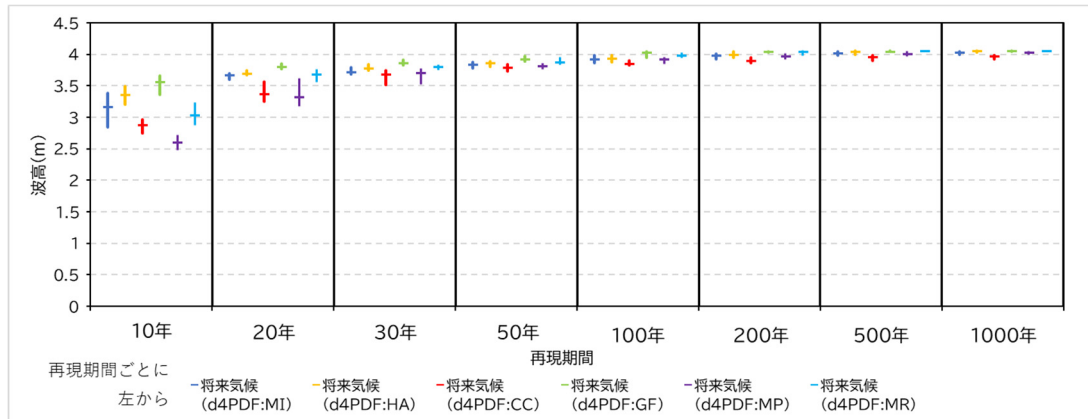


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

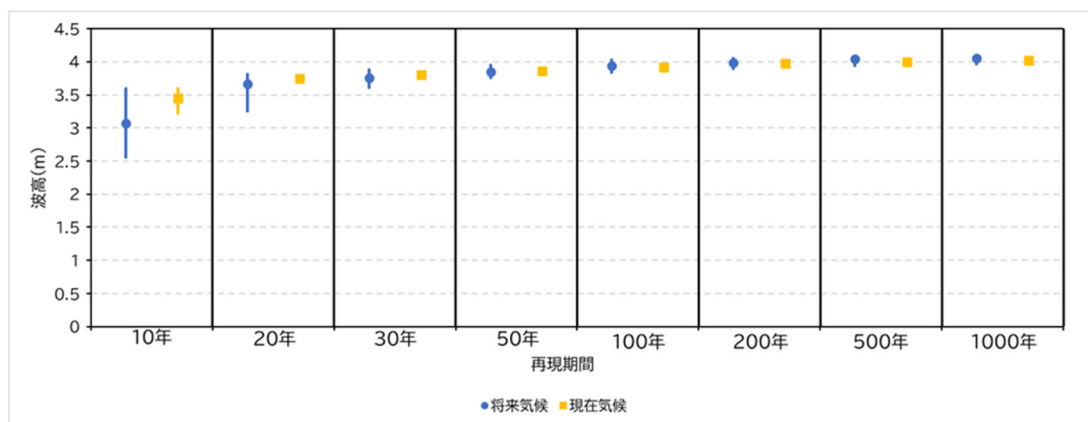


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

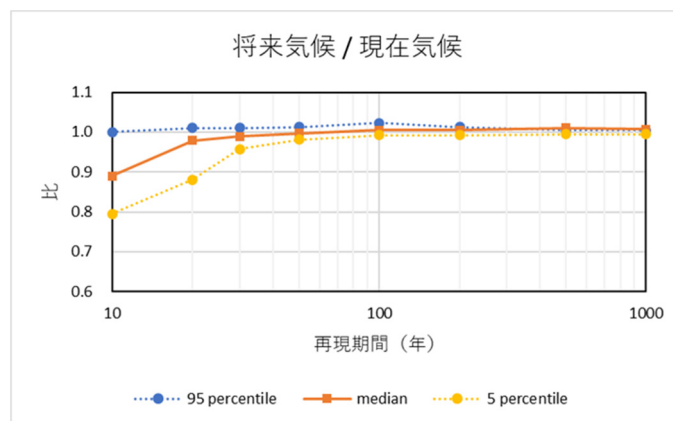
図-B.1 波高の結果（東京湾 乙浜港沖）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

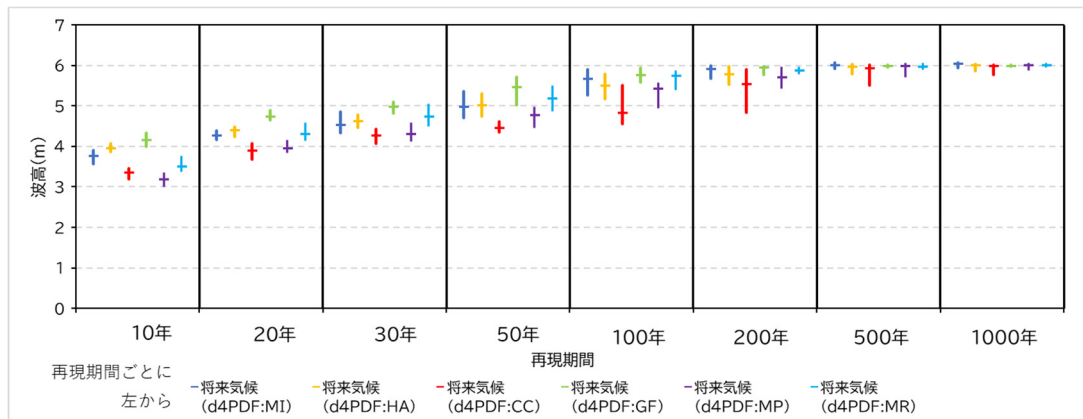


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

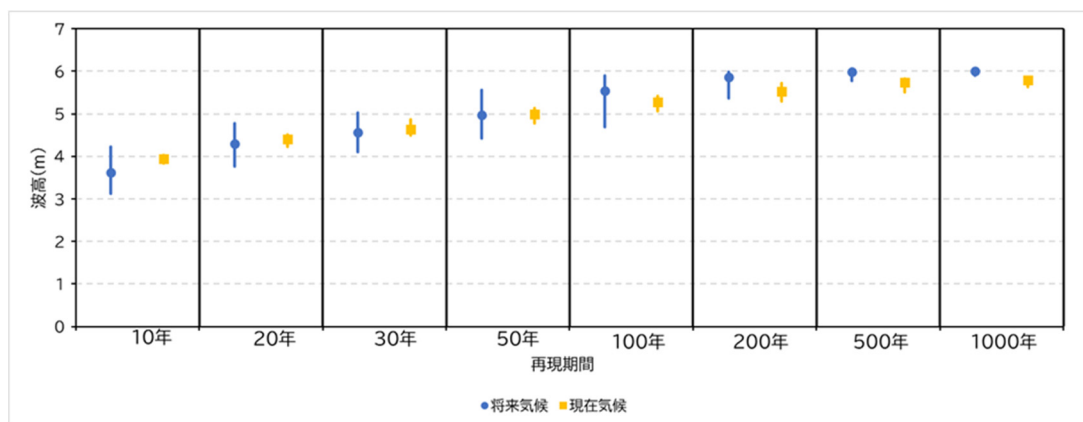


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

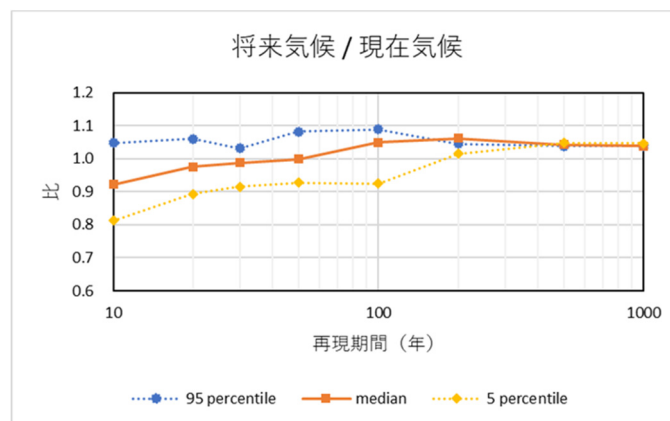
図-B.2 波高の結果（東京湾 習志野）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

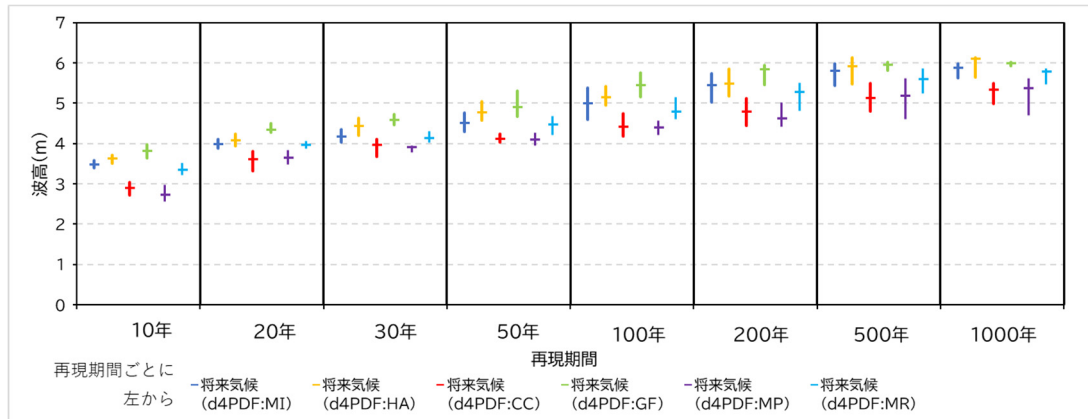


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

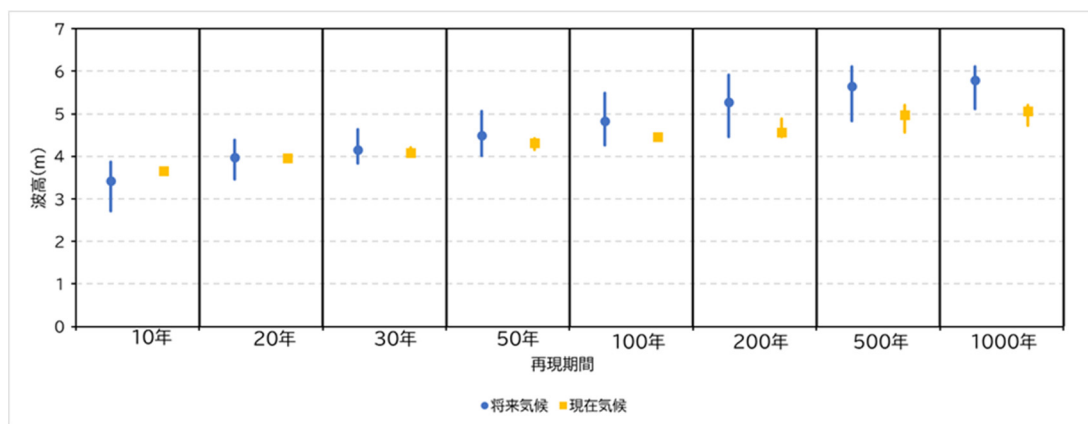


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

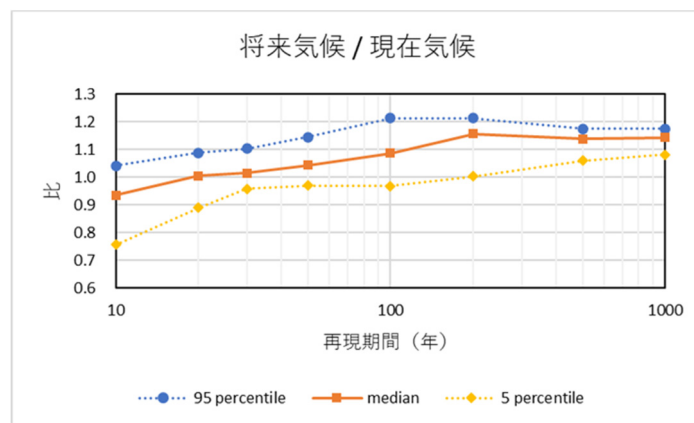
図-B.3 波高の結果（東京湾 大黒ふ頭）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

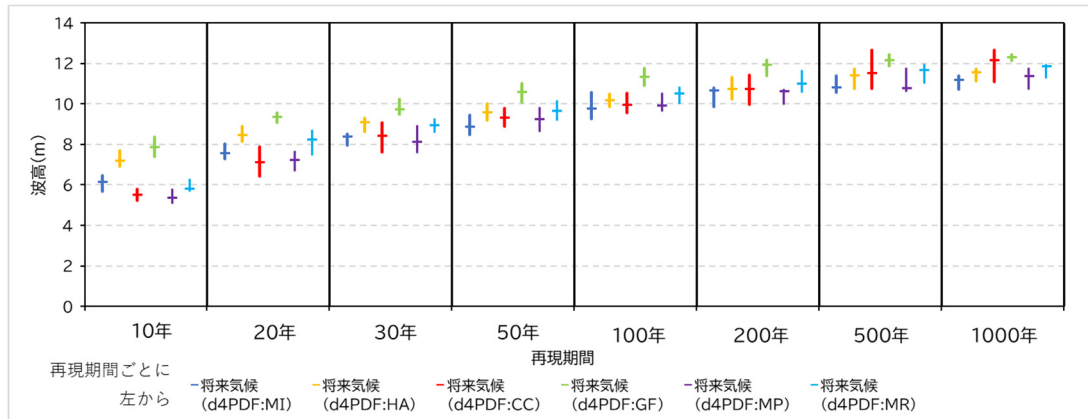


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

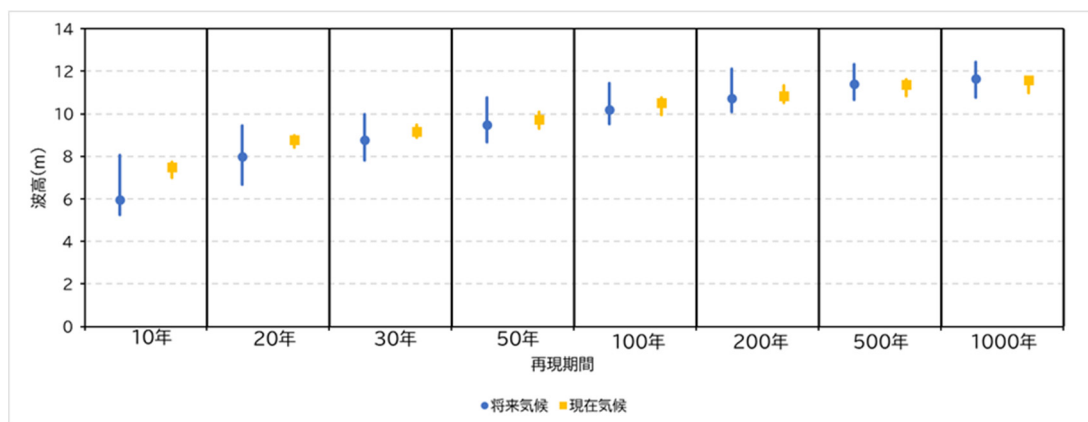


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

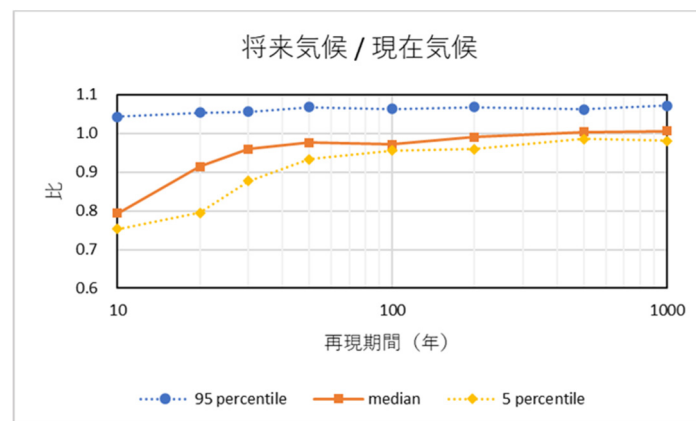
図-B.4 波高の結果（東京湾 大津・馬堀）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

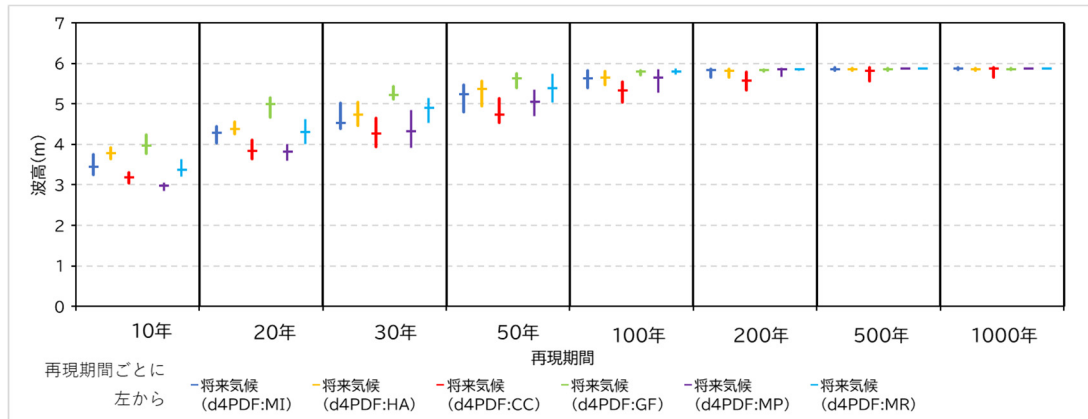


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

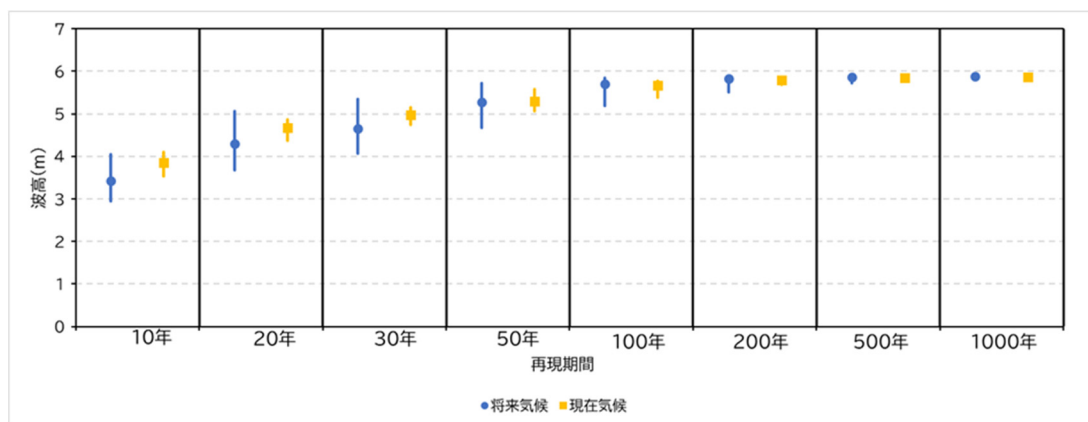


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

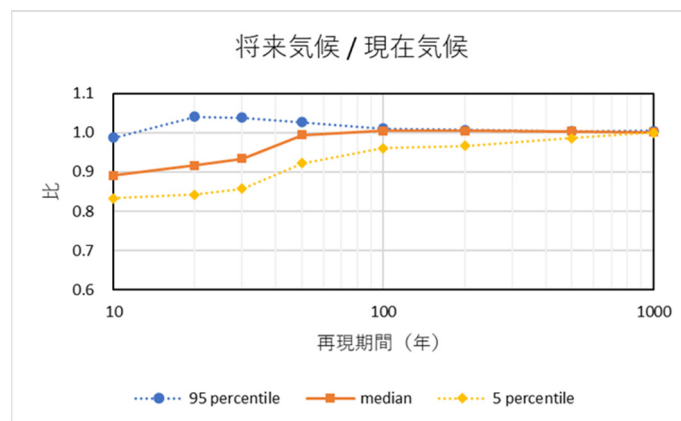
図-B.5 波高の結果（東京湾 東京湾沖）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

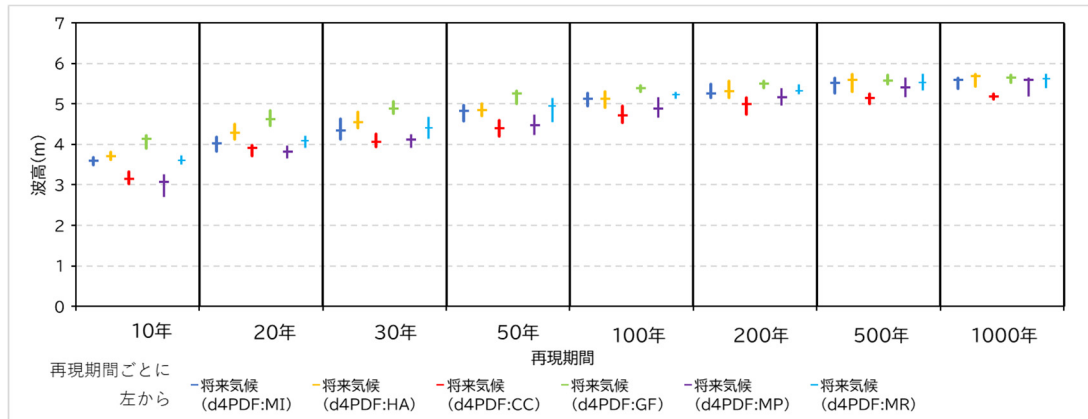


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

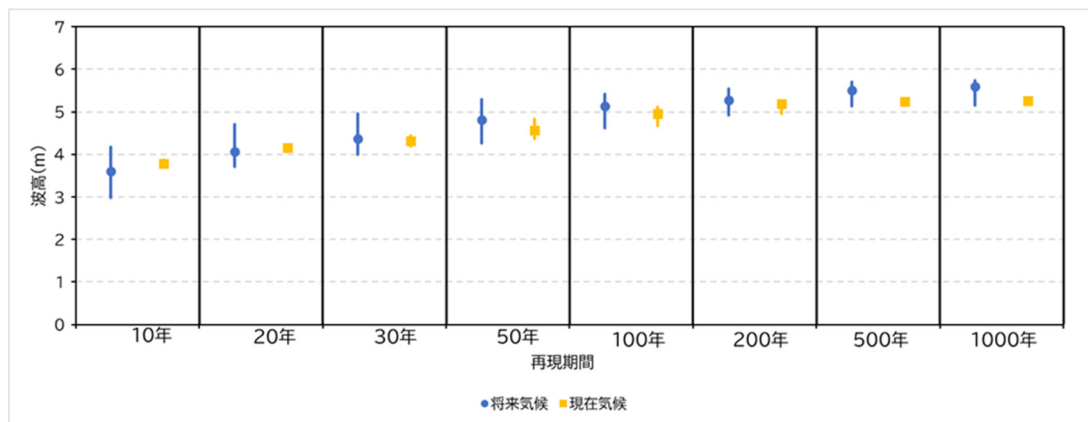


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

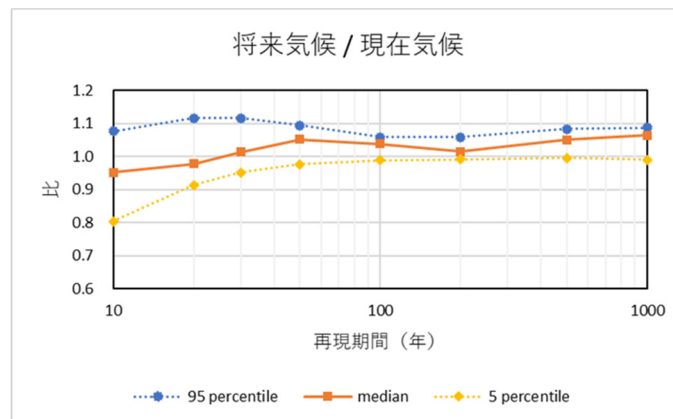
図-B.6 波高の結果（東京湾 豊洲・晴海・有明北）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

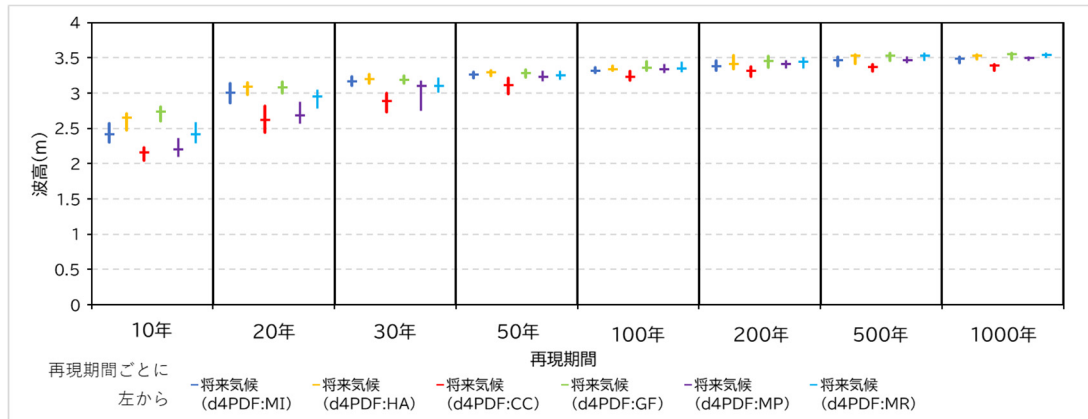


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

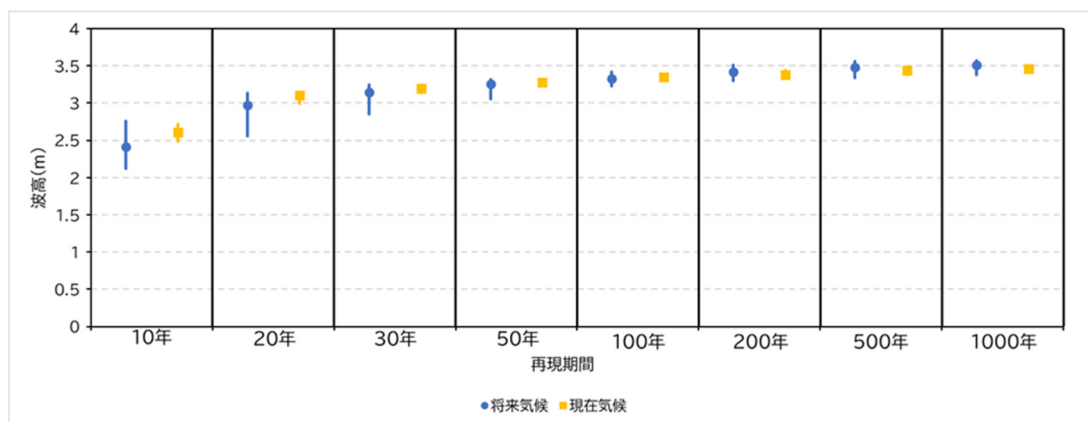


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

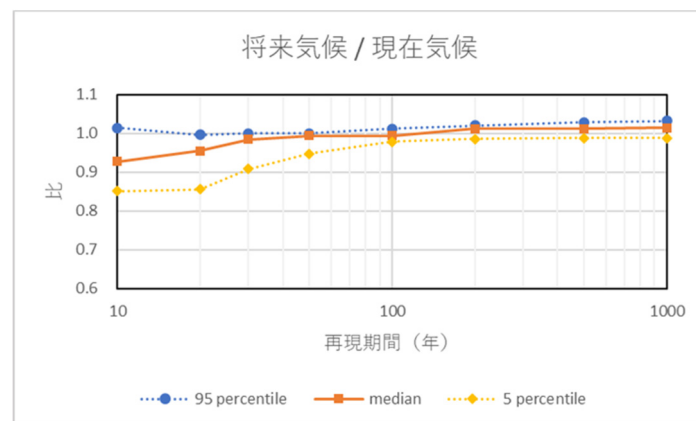
図-B.7 波高の結果（東京湾 木更津）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

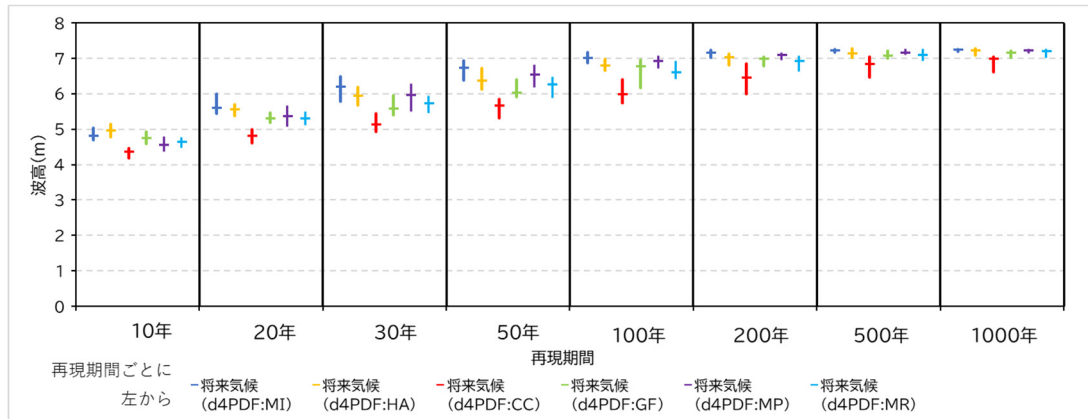


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

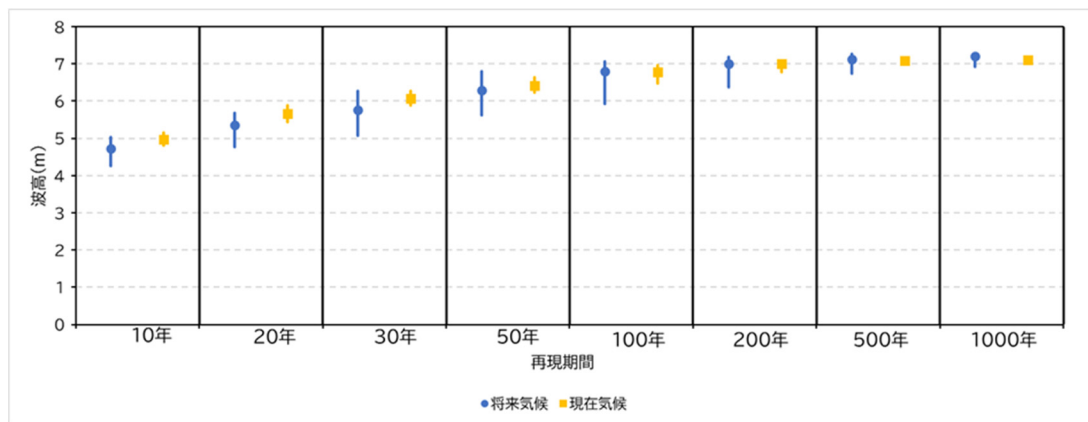


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

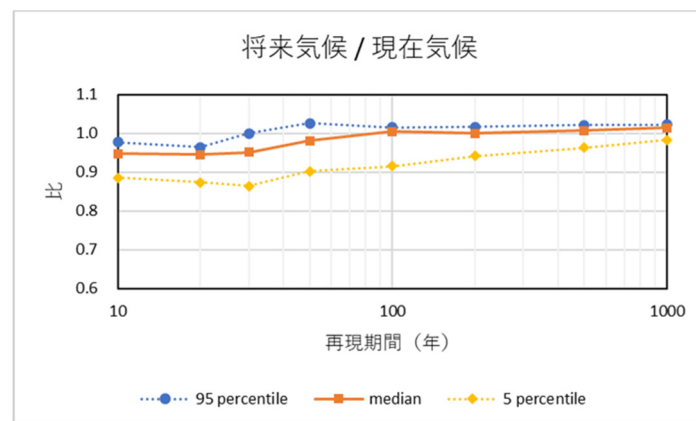
図-B.8 波高の結果（伊勢湾 海陽）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

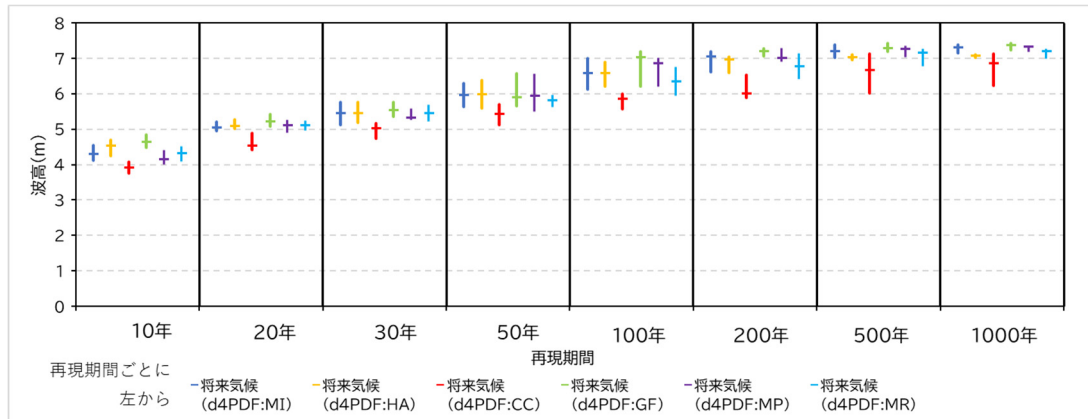


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

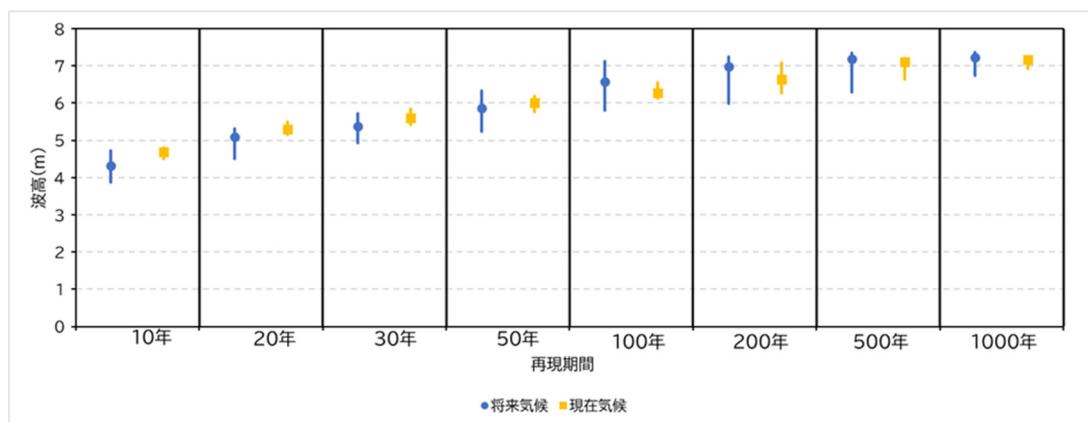


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

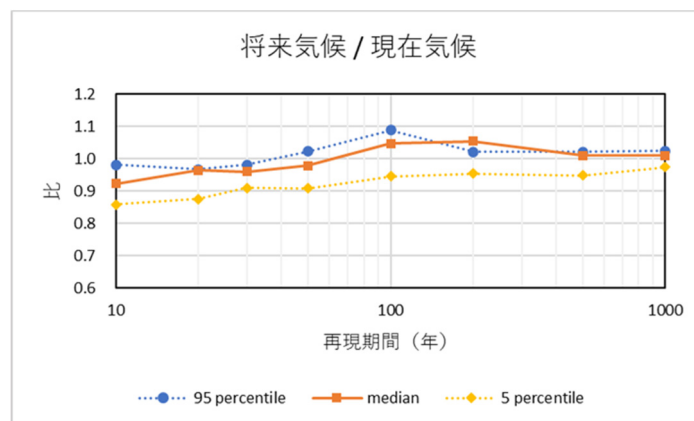
図-B.9 波高の結果（伊勢湾 香良洲）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

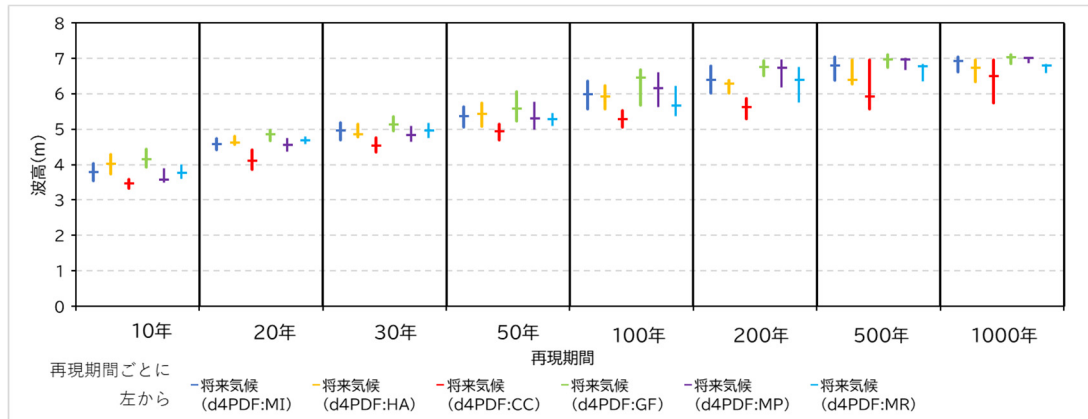


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

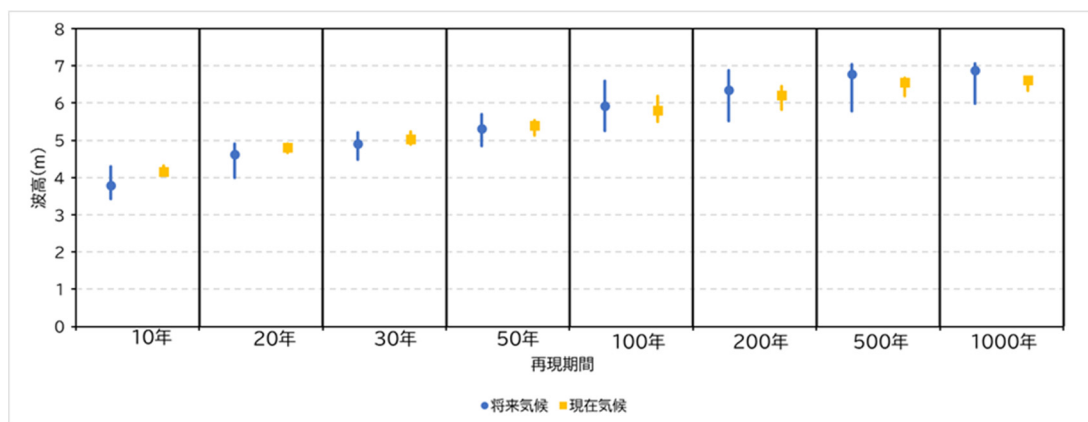


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

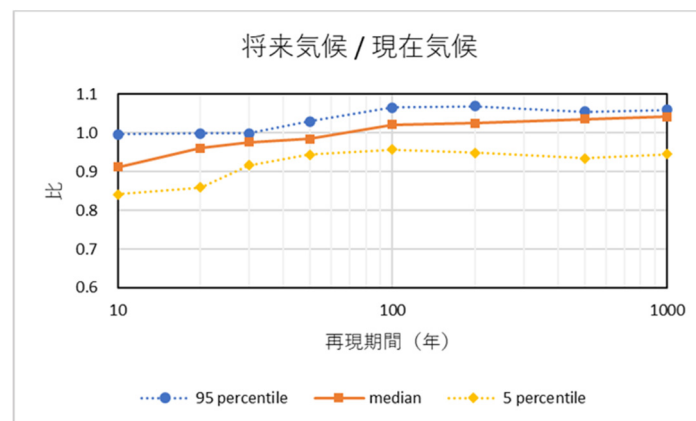
図-B.10 波高の結果（伊勢湾 常滑）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

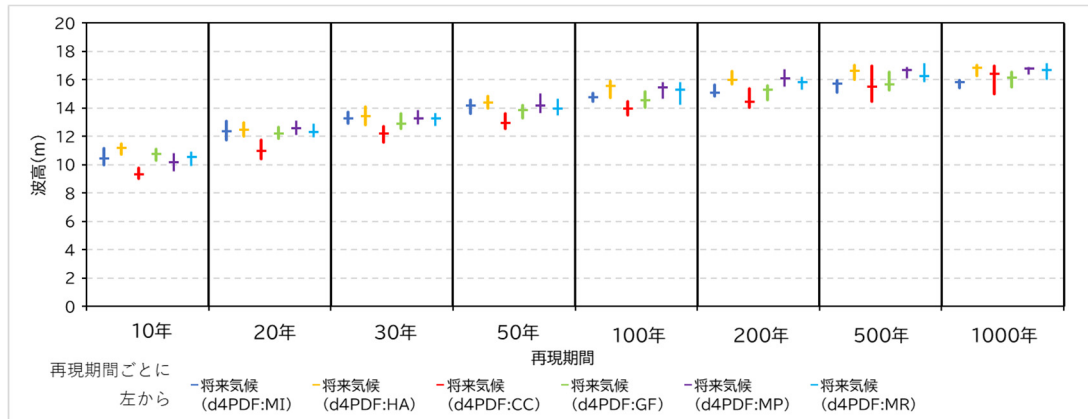


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

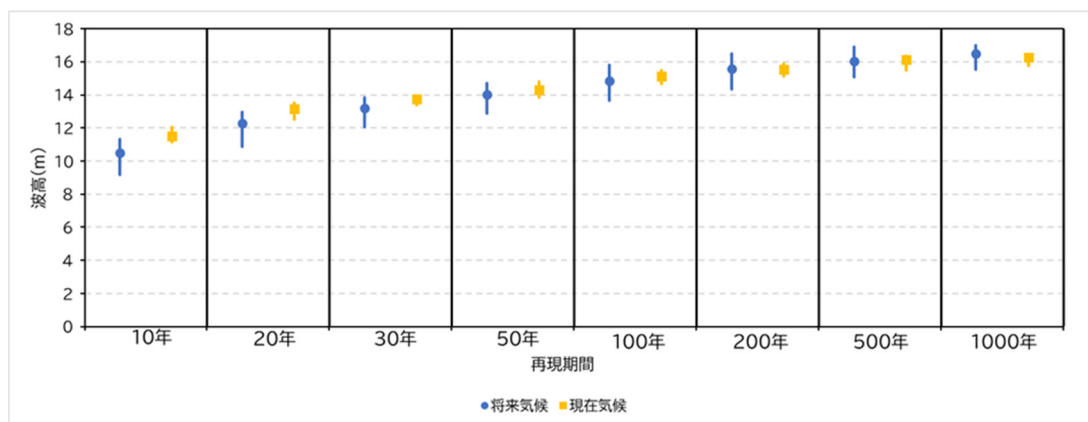


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

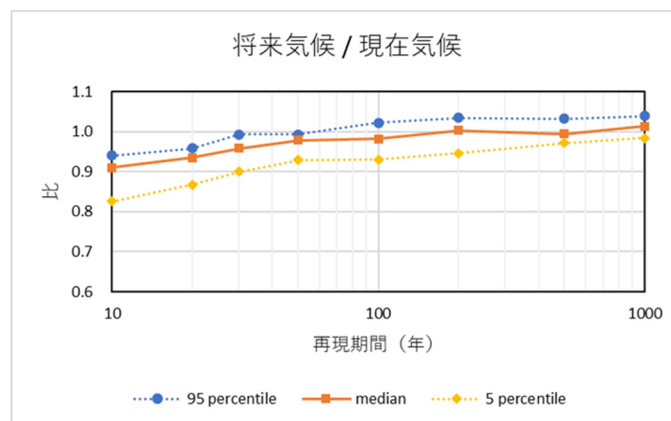
図-B.11 波高の結果（伊勢湾 石原）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

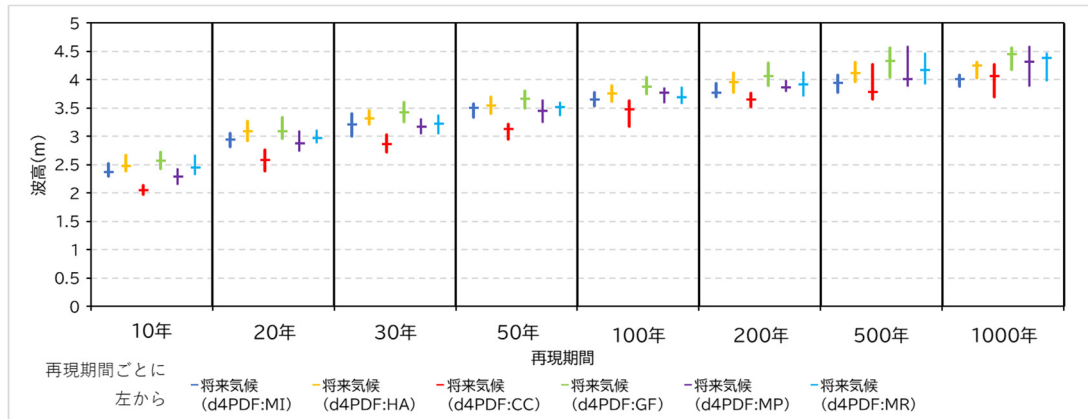


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

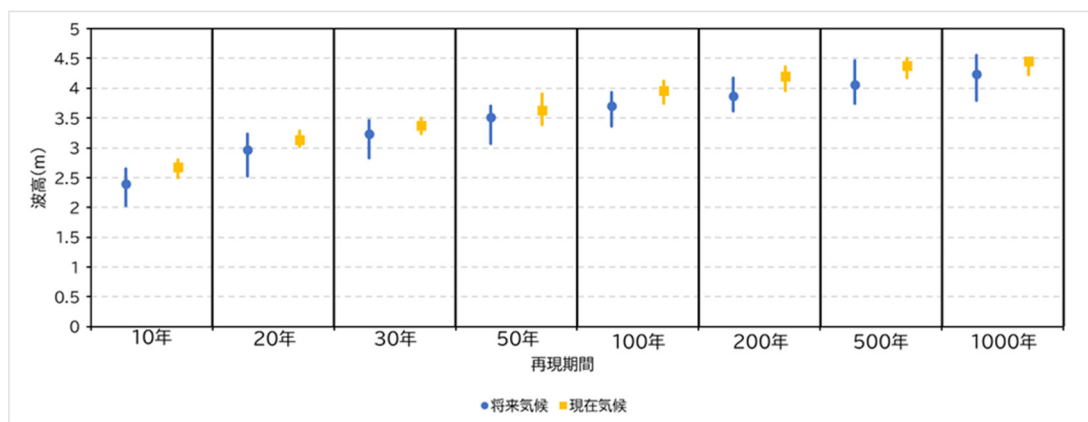


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

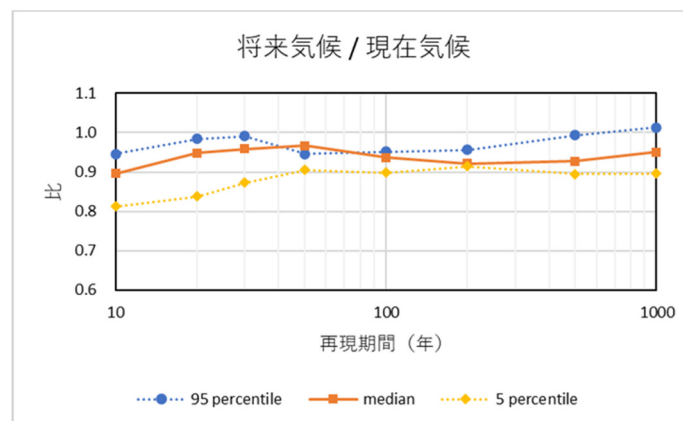
図-B.12 波高の結果（伊勢湾 赤羽根港沖）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

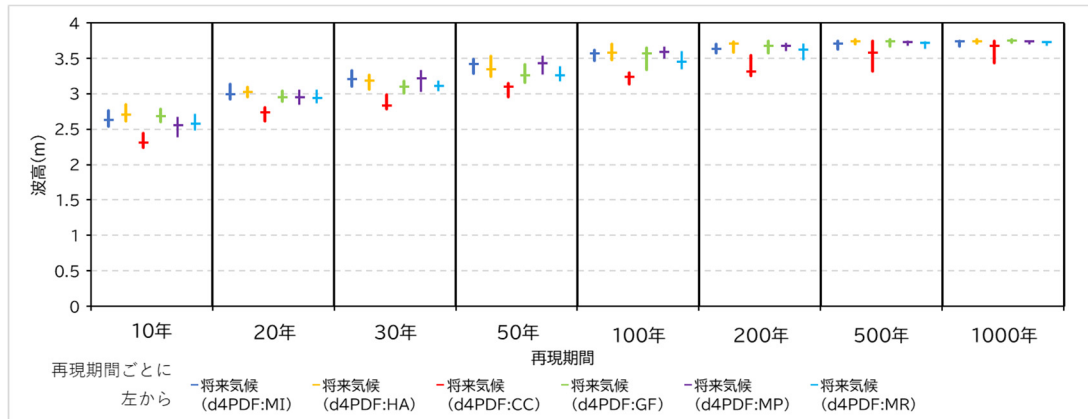


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

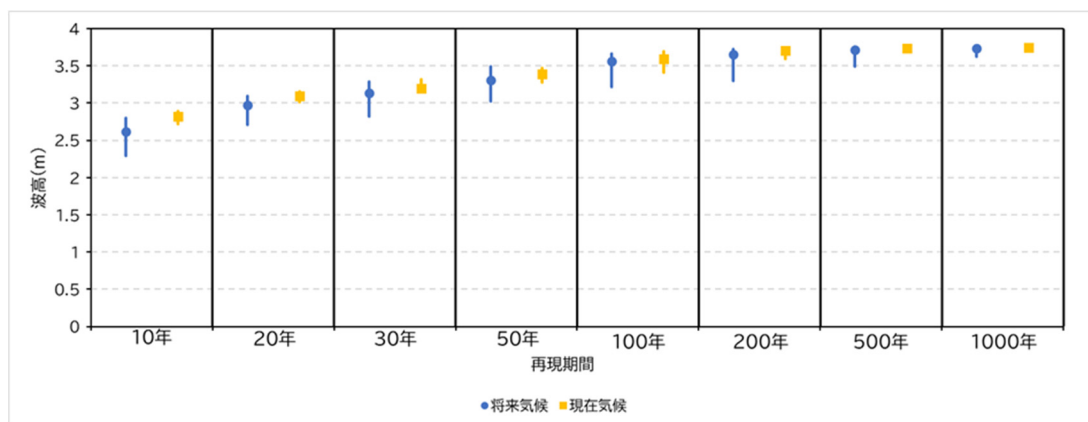


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

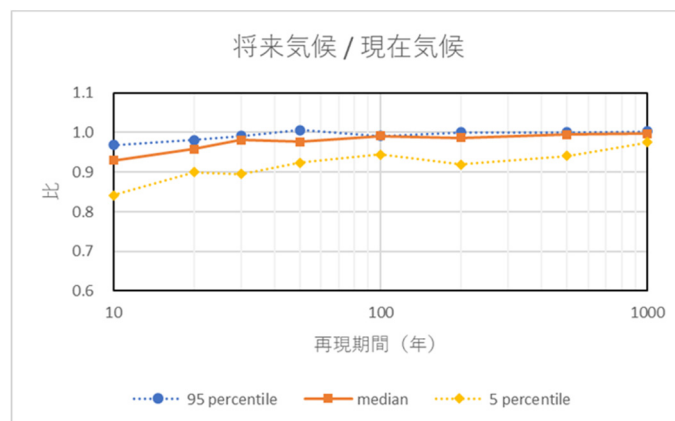
図-B.13 波高の結果（伊勢湾 潮見ふ頭）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

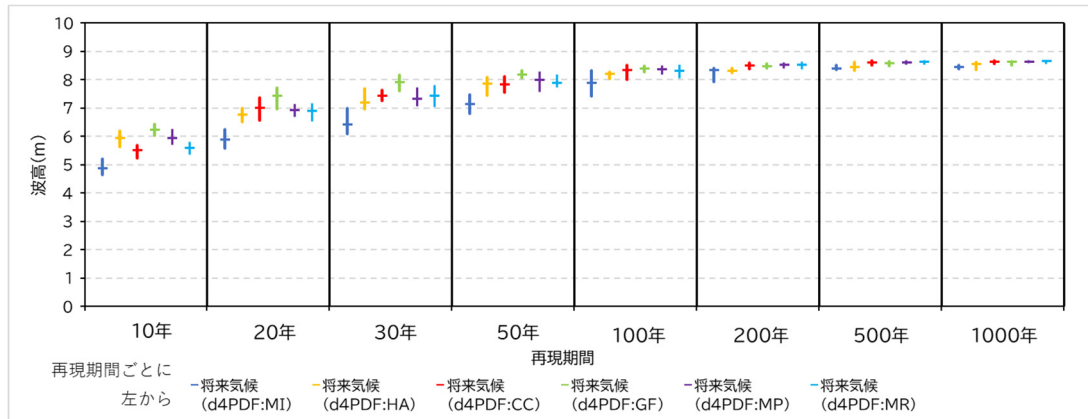


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

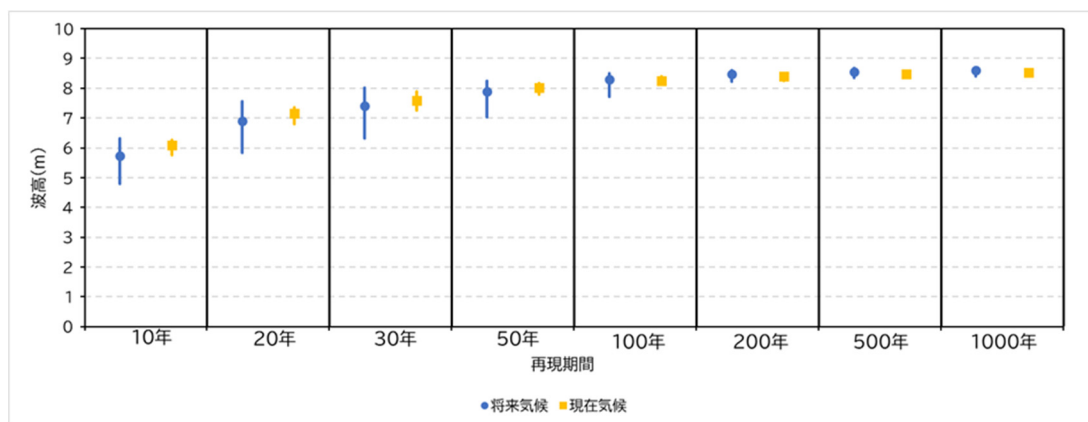


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

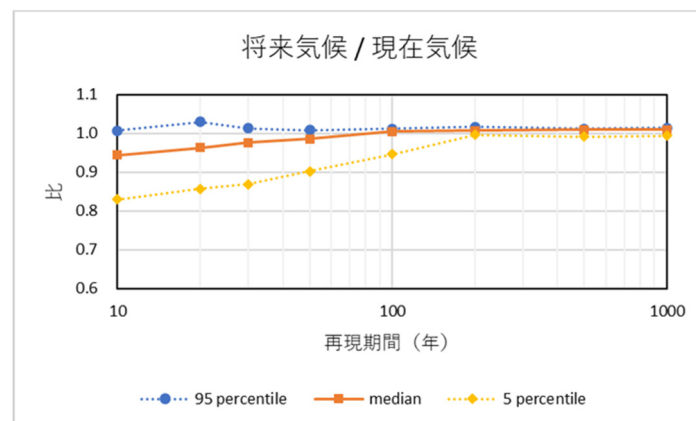
図-B.14 波高の結果（伊勢湾 富貴・武豊）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

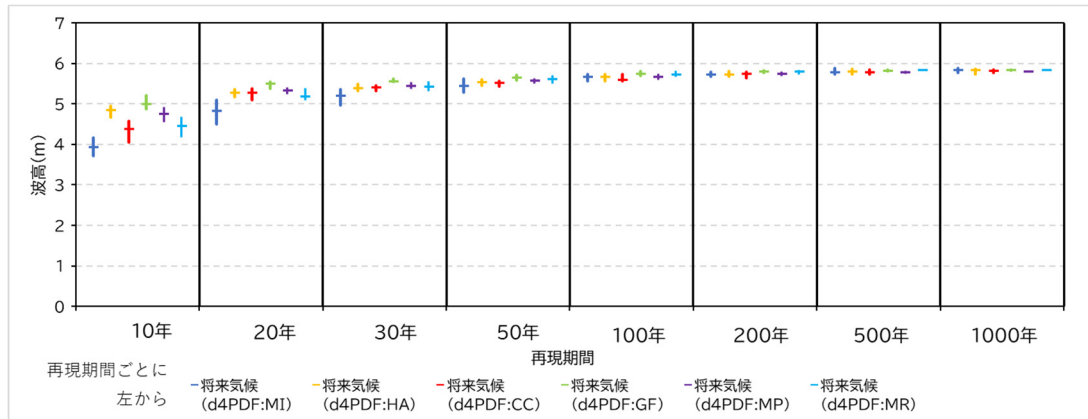


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

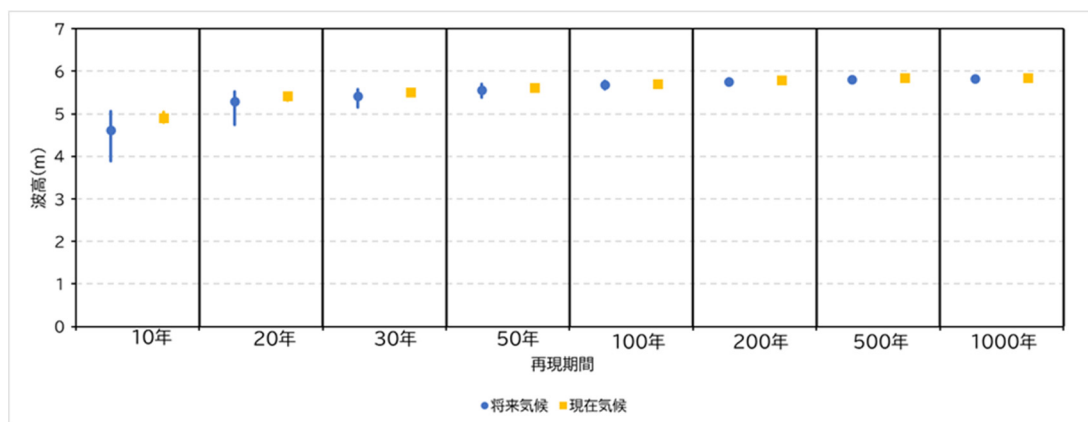


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

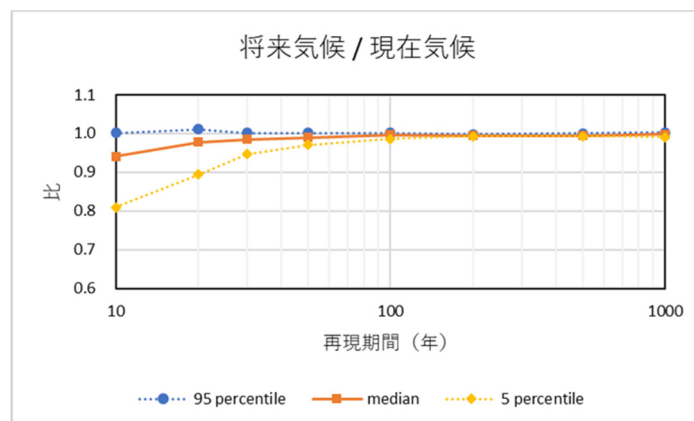
図-B.15 波高の結果（大阪湾 荻藻島）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

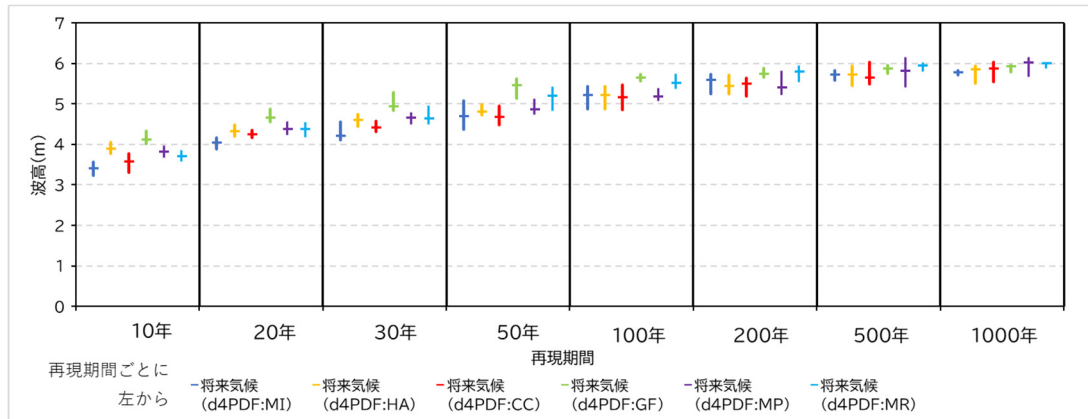


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

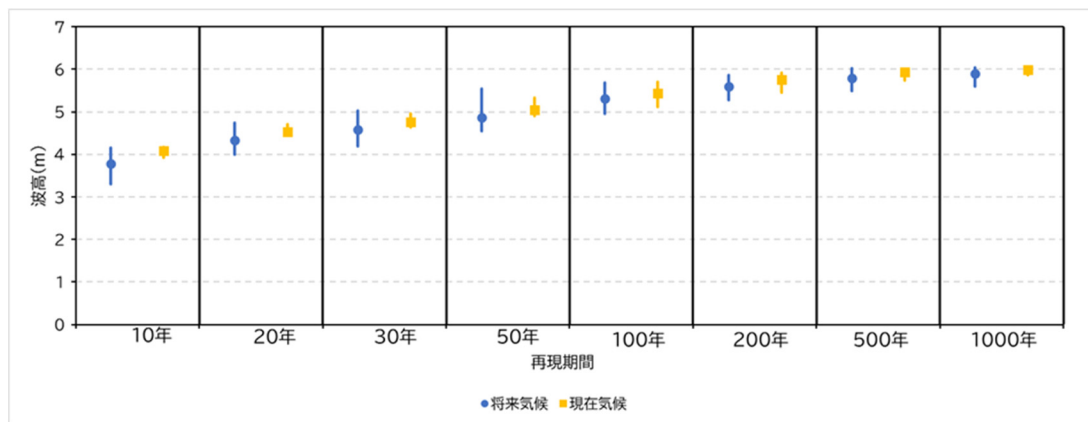


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

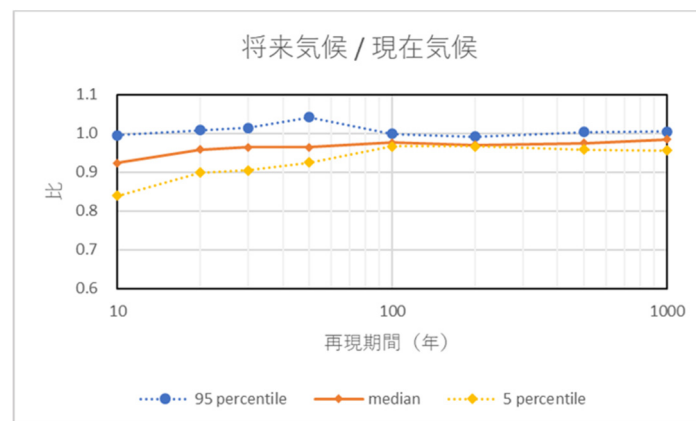
図-B. 16 波高の結果（大阪湾 此花区本土）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

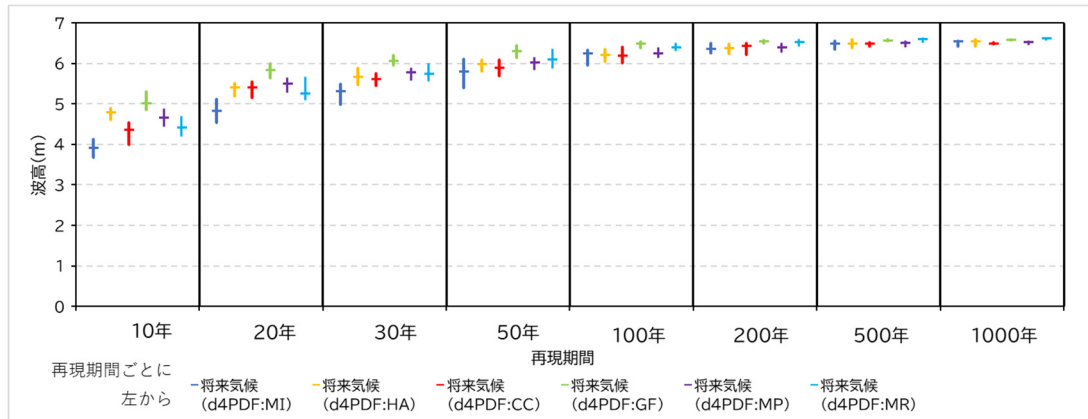


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

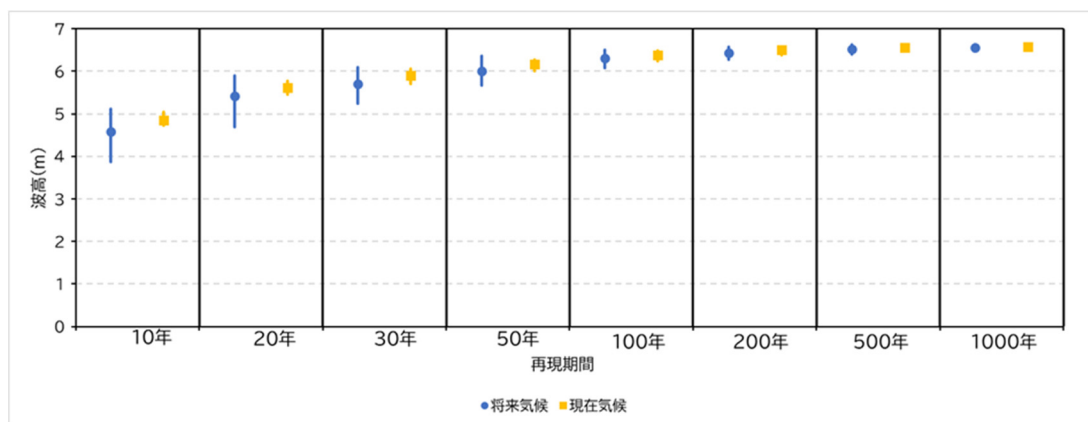


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

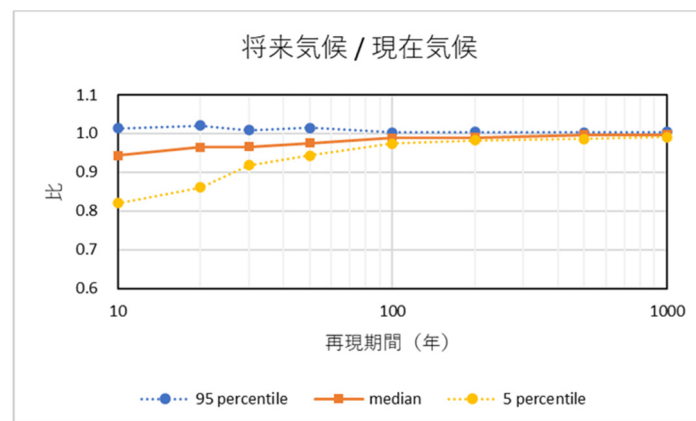
図-B.17 波高の結果（大阪湾 淡輪）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

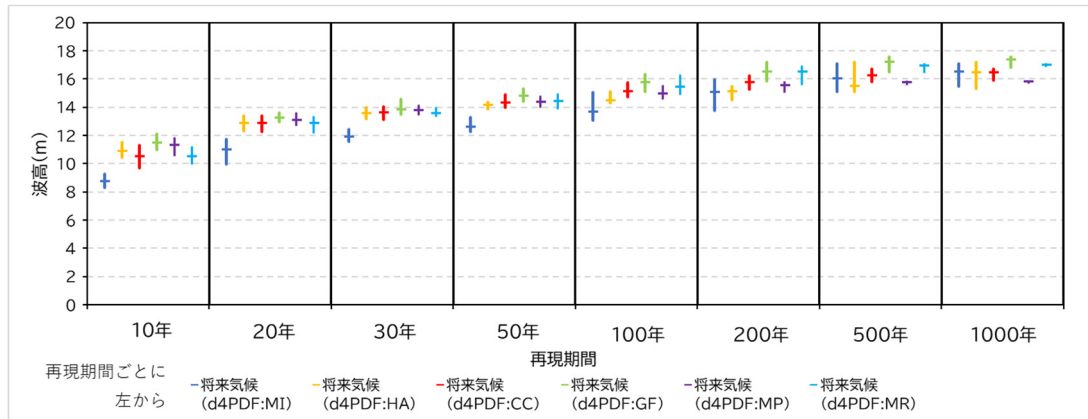


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

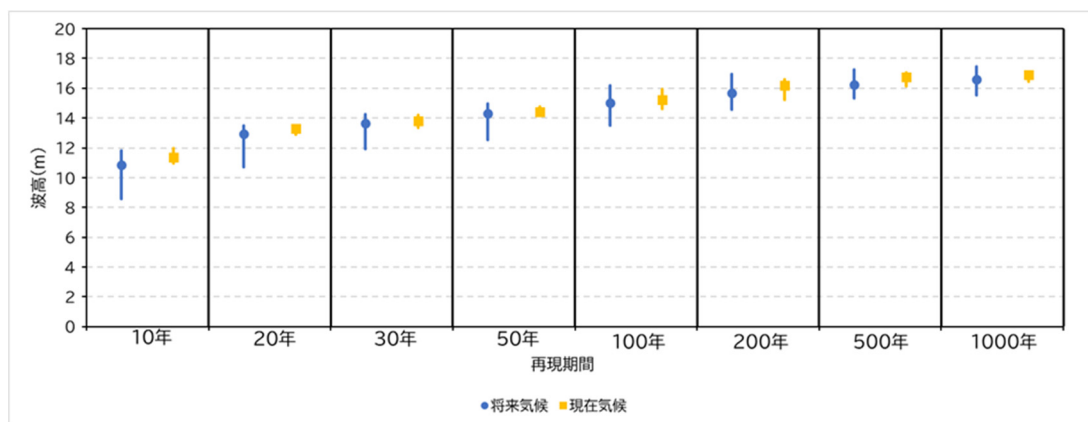


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

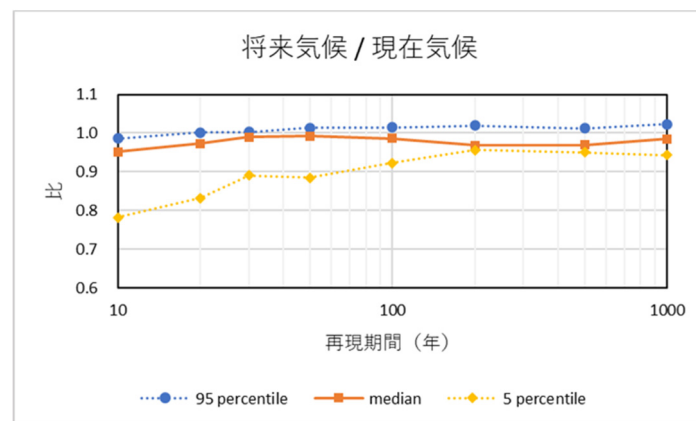
図-B. 18 波高の結果（大阪湾 忠岡岸和田）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき

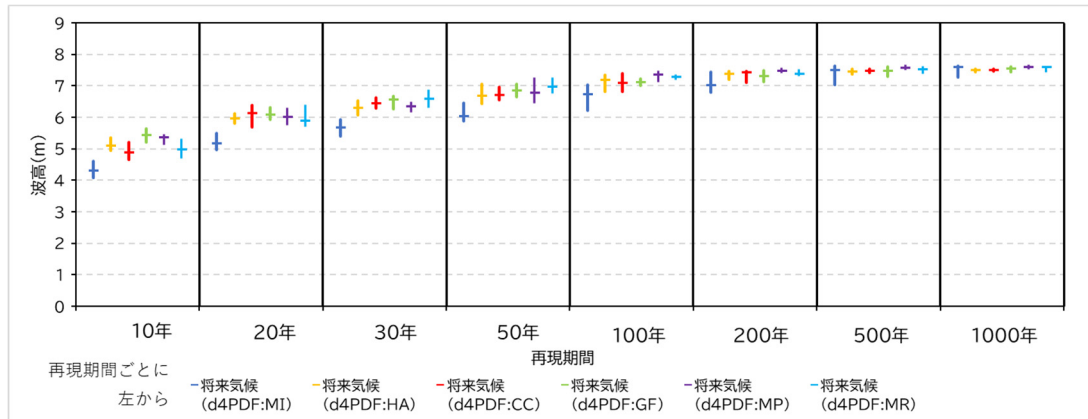


(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき

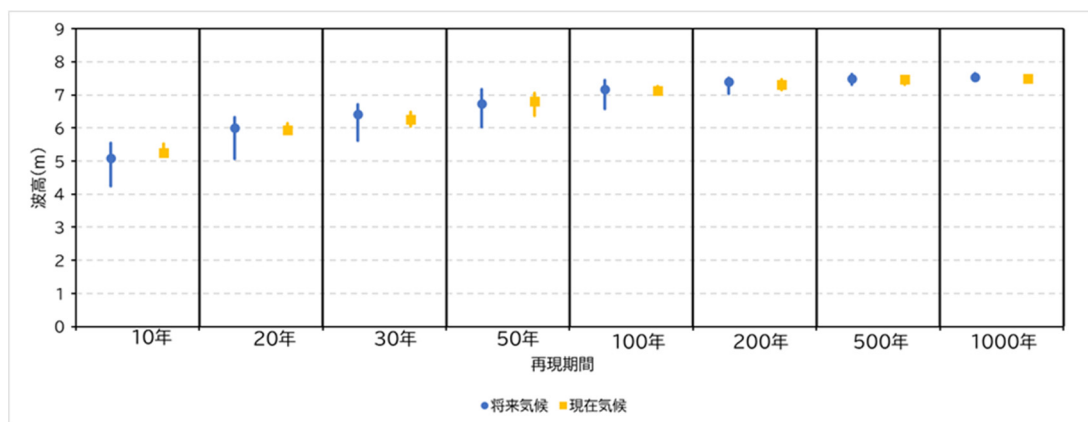


(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

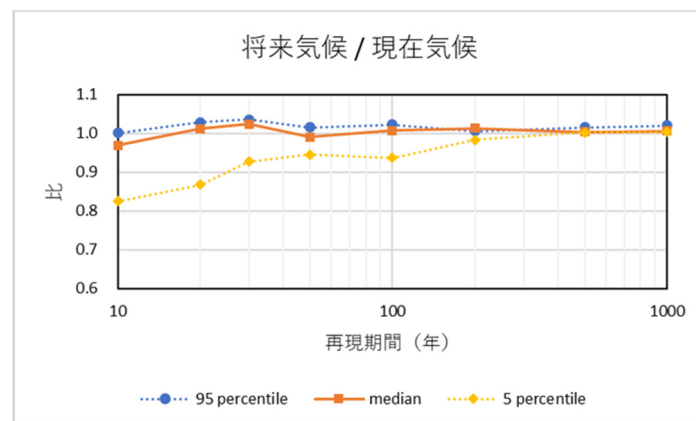
図-B.19 波高の結果（大阪湾 日高港沖）



(a) 将来気候（各 SST 昇温パターン）毎の結果のばらつき



(b) 将来気候及び現在気候における結果のばらつき



(c) 現在気候に対する将来気候における結果の比

図-B. 20 波高の結果（大阪湾 北浜）

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1248

July 2023

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

