

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.71

July 2023

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

岡本侃大・本多和彦・百海郁弥

Assessment of Aleatory Uncertainty of Storm Surges and High Waves
by Bootstrap Method

OKAMOTO Kanta, HONDA Kazuhiko, DOUKAI Fumiya

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

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

岡本侃大*・本多和彦**・百海郁弥***

要 旨

本研究は、リサンプリング手法の1つであるブートストラップ法を用いて、気象場のランダム性に伴う高潮及び高波の偶然的不確実性の評価手法を提案したものである。本提案手法を確率台風モデルから得られた高潮及び高波の極値データに適用し、確率潮位偏差及び確率波高の推定誤差の特徴を適切に評価できることを示した。また、数値実験によって、本提案手法の実用に当たっての課題を整理した。

本提案手法は、現在手元にあるデータを最大限に活用することで、確率潮位偏差及び確率波高の推定誤差を評価するための標本抽出に関する作業コストの軽減及び作業時間の短縮を図ることができる。さらに、本提案手法は、高潮及び高波の観測データ及び推算データのいずれにおいても適用可能であることから、非常に汎用性が高く今後の活用が期待できる。

キーワード：高潮，高波，再現期間，偶然的不確実性，ブートストラップ法

* 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）
** 港湾・沿岸海洋研究部 港湾・沿岸防災研究室 室長
*** 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）

Assessment of Aleatory Uncertainty of Storm Surges and High Waves by Bootstrap Method

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

Synopsis

This study proposes a method to assess the aleatory uncertainty of storm surges and high waves due to the randomness of meteorological disturbance such as tropical cyclones, low pressure, etc. The proposed method is based on the bootstrap method, which is a resampling method. In this study, we validate the proposed method by applying it to a dataset of storm surges and high waves. Results from the validation show that the proposed method can estimate the aleatory uncertainty of storm surges and high waves appropriately. Additionally, we show important notes on the use of the proposed method by a simple numerical experiment.

The proposed method enables the estimation of aleatory uncertainty of observed/hindcast storm surges and high waves efficiently.

Key words: Storm surges, high waves, return period, aleatory uncertainty, bootstrap method

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

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

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

目 次

1. まえがき	1
2. ブートストラップ法による高潮・高波の不確実性評価	2
2.1 ブートストラップ法	2
2.2 ブートストラップ法を用いた高潮・高波の不確実性の評価手法	3
3. 提案手法の適用性の検証	5
3.1 提案手法の実データへの適用	5
3.2 標本の統計的変動性に伴う提案手法による推定誤差への影響	14
4. まとめ	14
5. あとがき	15
参考文献	15
付録 A 提案手法の適用性の検証に当たって実施した高潮推算及び波浪推算の計算条件	17

1. まえがき

日本は四方を海に囲まれており、高潮・高波の評価及びそれに基づく対策は、沿岸域において安全・安心な暮らしを維持し持続的に発展させていくうえで、重要な課題である。現在、高潮及び高波に関するデータは、潮位計及び波浪計を用いた観測、若しくは、気象の観測及び予測データに基づく推算によって入手できる。それらのデータを用いて高潮及び高波の評価を行い、その発生頻度及び規模を推定することで、それらを考慮した港湾施設、海岸保全施設等の沿岸海洋構造物の整備及び沿岸域における防災計画の策定などが行われてきた。

また、高潮及び高波を評価するに当たって、その不確実性を考慮することが重要である。高潮及び高波は台風、熱帯低気圧等の気象擾乱によって発生するため、その頻度及び規模は気象擾乱の特性によって大きく影響される。気象擾乱は、その発生から消滅に至るまでその時々における周辺の気温、風況、地形等、様々な環境条件によって支配されるため、非常に偶然性の強い現象である。そのため、高潮及び高波は、このような気象擾乱の偶然的・確率的な特性に伴った不確実性（偶然的な不確実性）を有する。

高潮及び高波の偶然的な不確実性は、それらへの対策を講じるうえで、憂慮すべき問題である。なぜなら、高潮及び高波の発生頻度及び規模について、ある長さの期間における観測データ又は推算データに基づいて推定した結果は、次の同じ長さの期間において同様に推定した結果と必ずしも一致しないためである。この高潮及び高波の推定誤差は、場合によって、施設の過小又は過大設計、沿岸域における想定を超えた浸水被害の拡大等を引き起こす原因となる可能性がある。

しかしながら、現状において、高潮及び高波の偶然的な不確実性を評価する手法は示されていない。そのため、現在は、限られた期間の観測データ及び推算データを用いて推定された高潮及び高波の発生頻度及び規模が、そのままそれらへの対策に用いられることが多い。実際の港湾施設、海岸保全施設等の設計においては、高潮及び高波の推定に誤差が伴うことなどを考慮した安全側の設計となっているものの、より効率的・効果的な設計に向けて高潮及び高波の偶然的な不確実性の評価手法を提示することの重要性は高い。

その一方で、近年、気候モデルの開発及び計算機の発達によって、観測データからは得られないような長期間の気象予測データ及びそれに基づく海象データが得られるようになったことから、上記の高潮及び高波の偶然的

な不確実性を数値的に計算できる状況にある。つまり、気候モデルを用いて気象擾乱の偶然性を考慮した同気候条件下における多数の気象予測データセットを用意し、各データセットに対してそれぞれ高潮及び高波の発生頻度及び規模を推定することで、高潮及び高波の偶然的な不確実性を評価できる。

ただし、気候モデルを用いた気象予測データセットの作成及びそれらデータセットに基づいた高潮及び高波の計算には、多くの作業コスト及び作業時間を要する。d4PDFは現在気候及び将来気候下の気象場を予測したデータセットの1つであり（Mizutaら、2017）、現在、高潮及び高波の研究に広く用いられている（野村ら、2022；Moriら、2019）。d4PDFの作成は、気候変動リスクを評価することを目的に、様々な分野の研究者が参画するプログラムによって進められた。データセット自体は、現在気候及び将来気候のそれぞれについて、水平解像度約60kmの全球モデル及び水平解像度約20kmの領域モデルを用いた数千年規模の数値シミュレーションによって作成されている。以上から、信頼性のある気象予測データセットを作成するに当たっては、多くの作業コスト及び作業時間を要することが分かる。

また、高潮及び高波の計算は、計算機の発達に伴って計算時間の短縮が図られてきた一方で、計算で考慮する現象の増加及びそれに伴った計算プロセスの複雑化が生じている。そのため、現状においても、それらの計算には、1つの気象擾乱に対して数日程度の期間を要する。

それに加えて、高潮及び高波の偶然的な不確実性の評価に当たっては、多数の気象擾乱について計算する必要がある。例えば、500年程度の期間を対象としたランダムな100ケースの計算を実施するとすると、50,000年分の気象擾乱を対象とする必要があり、計算に必要な作業コスト及び作業時間は現実的ではない。

以上のように、沿岸域における高潮及び高波の対策に対して、それらの偶然的な不確実性の評価手法が求められる一方で、作業コスト等を踏まえた現実的な評価手法は提示されていない。

そこで、本研究では、限られた数の標本データから推定量の統計的誤差を評価可能なブートストラップ法を用いることで、高潮及び高波の計算対象の気象擾乱数を低減しつつ、その限られた数の高潮及び高波の標本データから高潮及び高波の偶然的な不確実性を評価する手法を提案する。

なお、ブートストラップ法は、標本データのリサンプリング手法の1つであり、水文統計の分野において、確率降水量の偶然的な不確実性の評価に対して有効であるこ

とが示されている(石原ら, 2008; 葛葉, 2015)。しかし, 高潮及び高波の偶然的不確実性の評価に対して検討した事例は見当たらない。

本研究では, このブートストラップ法を用いて高潮及び高波の偶然的不確実性を評価する新たな手法を提案するとともに, 実データを用いてその適用性を検証した。加えて, 数値実験によって, 本提案手法の使用上の留意点について整理した。以上の検討結果から, 本提案手法は, 高潮及び高波の偶然的不確実性を評価するための, 実務上において有効な方法であることが確認された。

本稿の構成は以下のとおりである。

第2章では, 本研究で用いるブートストラップ法の概要及び高潮及び高波の不確実性を評価するに当たっての適用方法を示す。

第3章では, 実データに本提案手法を適用した結果及び本提案手法を用いた数値実験の結果を示す。

なお, 本稿は, Okamotoら(2023)の内容のうち, 本検討内容に関する箇所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(2023)も参考文献に挙げられたい。

2. ブートストラップ法による高潮・高波の不確実性評価

2.1 ブートストラップ法

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のノンパラメトリックな統計手法の1つである。観測データに基づいて任意の統計量を推定するとき, その信頼性についての定量的な目安として, 推定誤差を評価する場合がある。このとき, 一般的なパラメトリックな統計においては, 母集団の確率的な変動をなんらかの分布で近似して, その推定誤差を理論的に評価する。これに対して, パラメトリックな統計における複雑な理論及び数式に基づく解析を, 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(Efron, 1979)。

ブートストラップ法では, 推定誤差を評価するために, 標本データのリサンプリングを行う。リサンプリングとは, 手元にある1組の標本データから, 部分的にデータを抽出したり, 重複を許して元の標本データと同じデータ個数だけ抽出したりする操作である。ブートストラップ法では, 後者のリサンプリングを行う。そのようなリサンプリングを繰り返すことで多数個の標本データを作成し, それら多数の標本データに基づいて, 統計量の推定誤差を求めるのが, ブートストラップ法の大まかな流

れである。

以下に, ブートストラップ法の概略を示す。ここで, 標本数 N 個の標本データ X が与えられたとする。

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\} \quad (2.1)$$

この標本データ X から重複を許して N 個取り出し, それを X^* とする。

$$X^* = \{x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_N^*\} \quad (2.2)$$

この標本データ X^* をブートストラップ標本という。次に, ブートストラップ標本を用いて統計量を求め, それを次のように記す。

$$\varphi^* = \varphi(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_N^*) \quad (2.3)$$

上記の操作を M 回繰り返すことで, M 個の統計量の組 Φ を得る。

$$\Phi = \{\varphi_1^*, \varphi_2^*, \varphi_3^*, \dots, \varphi_M^*\} \quad (2.4)$$

最終的に, Φ を用いて, 統計量 Φ の平均又は推定誤差を評価する。

様々な推定誤差の評価指標があるが, 最も一般的な指標は分散である。上記のブートストラップ法の例の場合, Φ の分散 s_M^2 は, 次式により求まる。

$$s_M^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (\varphi_m^* - \overline{\varphi^*})^2 \quad (2.5)$$

ここに, $\overline{\varphi^*}$ はデータ Φ の平均値である。

分散及び標準偏差は, 統計量の確率的変動が正規分布に従う又は近似できる場合, その推定誤差の幅を定量的に評価できる。しかしながら, 分散及び標準偏差は, 統計量の確率的変動が正規分布に従うか又は近似できるかが不明である場合, 誤差の程度を示す定性的な指標にとどまる。

このような場合に, 推定誤差の幅を定量的に評価する方法として, 推定量のパーセント点を求める方法が有効である。パーセント点を用いる場合, 信頼度を用いて推定量の誤差を評価することができ, かつ, 推定量の信頼区間の把握が可能となる。ブートストラップ法を用いる場合, Φ の分布は, 次式のように数値的に近似される。

$$F(x) = \frac{1}{M} \{\Phi \leq x\} \quad (2.6)$$

ここに、 $\{\Phi \leq x\}$ は x 以下の値をとる Φ の個数を表す。

そして、推定量 φ^* の 100α パーセント点は、式(2.6)を用いて、次式より求められる。

$$\Phi[\alpha] = \inf\{F(x) \geq \alpha\} \quad (2.7)$$

ここに、 $\inf\{F(x) \geq \alpha\}$ は、 $F(x) \geq \alpha$ を満たす x の下限値を示す。すなわち、 $\Phi[\alpha]$ は、 Φ の要素を大きさの順に並べた時の $M\alpha$ 番目の値にほぼ等しい。

以上で示したとおり、ブートストラップ法は、手元の標本データのみを用いた単純な繰り返し計算によって、標本データに基づく任意の統計量の推定誤差を評価できる。これは、ある統計量の推定誤差を評価するに当たって、同じ条件で標本データを繰り返し抽出することが困難な場合又は標本の抽出に多大な労力を要する場合に、非常に効果的な方法といえる。

2.2 ブートストラップ法を用いた高潮・高波の不確実性の評価手法

本研究における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手法の概念を、図-2.1に示す。

ブートストラップ法を用いるに当たって、リサンプリングのための標本データとして、高潮及び高波の極値データを得る必要がある。海岸工学の分野においては、高潮及び高波の極値データとして、潮位及び波浪に関する観測データ並びに気象観測データ及び気象予測データによる推算データから、低気圧及び台風といった気象擾乱毎の最大値を用いる場合が多い。以降の説明においても、上記の方法で得られたデータを高潮及び高波の極値データとして扱うこととする。

本研究では、高潮及び高波の極値データから確率潮位偏差及び確率波高を推定するに当たって、實(2006)によって提案されたノンパラメトリック手法(以下、實法)を用いる。港湾施設、海岸保全施設等の沿岸海洋構造物の設計及び気候条件の変化に伴う高潮及び高波の変化予測等においては、高潮及び高波の大きさを示す指標として、再現期間毎の潮位偏差及び波高(これを確率潮位偏差及び確率波高と呼ぶ)を良く用いる。一般的に、確率潮位偏差及び確率波高は、各極値データをそれぞれのデータに最も適合する確率分布に当てはめることによ

って推定される。この際、確率分布の当てはめに伴う確率潮位偏差及び確率波高の推定誤差が生じる。しかしながら、本研究で対象とする不確実性は、高潮及び高波の標本データの抽出に伴う推定誤差を対象としており、最終的に得られる確率潮位偏差及び確率波高の推定誤差に、分布の当てはめに伴う推定誤差が含まれないことが望ましい。そのため、本研究では、極値データを任意の確率分布に当てはめることなく、目的の再現期間の確率値を算出できる實法を用いる。

實法は、まずプロットングポジション公式を用いて、極値データそれぞれに非超過確率を割り当てる。プロットングポジション公式は、極値データの順位から非超過確率を推定する経験式であり、次式で表される。

$$\hat{F}_i = 1 - \frac{i - A}{N_T + B} \quad (2.8)$$

ここに、 i は極値データをその大きさの降順で並べた時の順位、 $\hat{F}_i$ は i 番目のデータの非超過確率、 N_T は極値データの個数、 A 及び B はモデル定数である。モデル定数については様々な定数が提案されているが、實(2006)は近年よく使われるカナン公式($A = 0.4$, $B = 0.2$)を採用している。

次に、非超過確率 $\hat{F}_i$ と再現期間 R の関係は、次式で表される。

$$R = \frac{1}{\lambda(1 - \hat{F}_i)} \quad (2.9)$$

ここに、 λ は極値データの平均発生率であり、統計期間を K とすると、次式で表される。

$$\lambda = \frac{N_T}{K} \quad (2.10)$$

目的の再現期間の確率値を算定する場合、まず式(2.9)を用いて対応する非超過確率を求める。次に、その値を式(2.8)に代入することで目的の再現期間に対応する順位及び極値データを求めることで、目的の再現期間の確率値を算定する。なお、順位に小数点以下の値を含む場合は、前後の順位(整数)の極値データから、線形内挿を用いて確率値を計算する。

最後に、上記の實法にブートストラップ法を適用することにより、高潮及び高波の不確実性、すなわち確率潮位偏差及び確率波高の推定誤差を評価する。極値データ

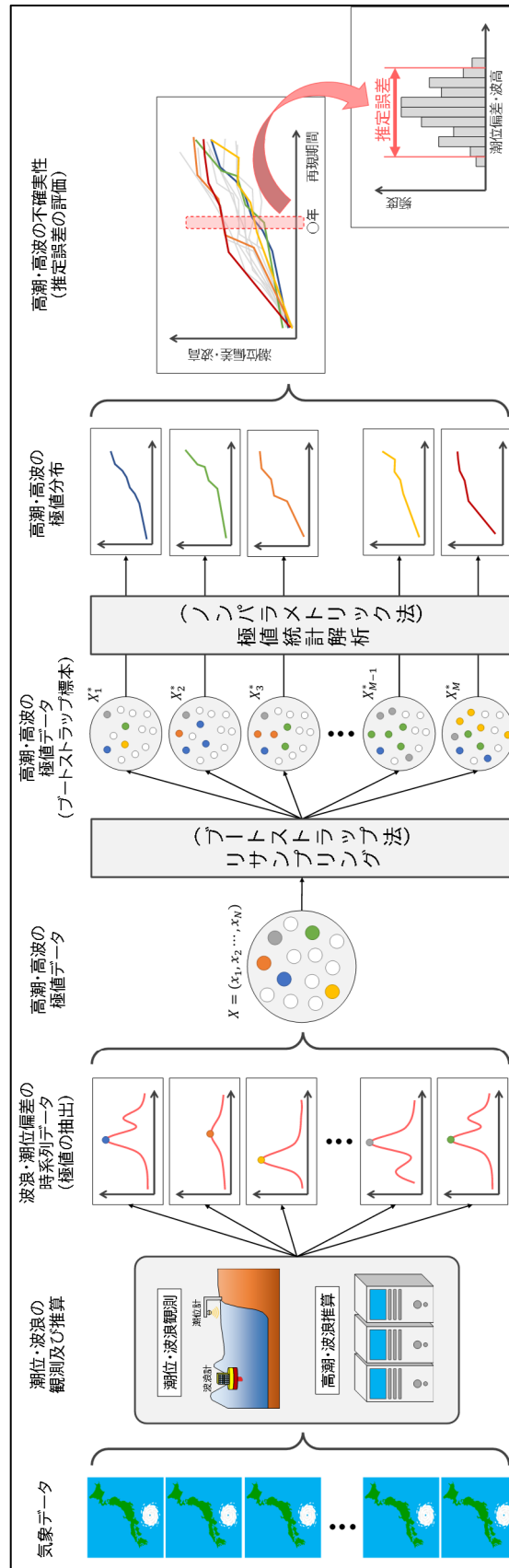


図-2.1 ブートストラップ法を用いた高潮・高波の不確実性の評価の概念

のブートストラップ標本を多数作成し、實法によって、それぞれのブートストラップ標本における確率潮位偏差及び確率波高を推定することで、それらの推定誤差を調べる。

3. 提案手法の適用性の検証

3.1 提案手法の実データへの適用

本研究で提案した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手法について、その適用可能性を評価するために、実データへの適用を行い、その結果について検討した。

(1) 使用データ

検討に使用したデータは、構築した1,000年分の確率台風モデルによって発生する高潮及び高波の極値データである。確率台風モデルとは、過去又は将来の台風の属性値（位置、中心気圧、最大旋衡風速半径等）及びその時間変化量を統計解析して得られた発生確率分布及び自己回帰式に基づいて、任意の期間中に発生する台風の属性値を、モンテカルロ・シミュレーションの手法を用いて模擬的に与えるモデルである（河合ら、2006）。確率台風モデルを用いることで、長期間の台風データ及びそれによって発生する高潮及び高波のデータを得られる。本検討では、気象庁のベストトラックデータを用いて構築された確率台風モデルを使用した（中條ら、2011）。

台風によって発生する高潮及び高波は、台風の気圧場及び風場を入力条件とした高潮推算及び波浪推算によって計算した。計算対象地点は三大湾（東京湾、伊勢湾及び大阪湾）沿いの港湾地域とし、計16地点を選定した。計算地点の位置図を図-3.1に示す。高潮推算及び波浪推算の詳細な計算条件については、付録Aを参照されたい。

(2) 検討条件

本検討では、確率潮位偏差及び確率波高の推定誤差の指標として、推定量のパーセント点を用いた。これは、検討結果から、一部の再現期間における確率値について、その推定値の分布形状が正規分布で近似できなかったためである。以降の検討結果では、推定誤差を5パーセント点と95パーセント点の幅で示している。

推定量のパーセント点を評価する場合、ブートストラップ法のリサンプリング回数は、1,000回～2,000回必要であるとされている（小西ら、2008）。しかしながら、確率値のパーセント点を求める場合の適切なリサンプリング回数について明示された例はない。そこで、本検討では、別途実施したリサンプリング回数の検討より、リ

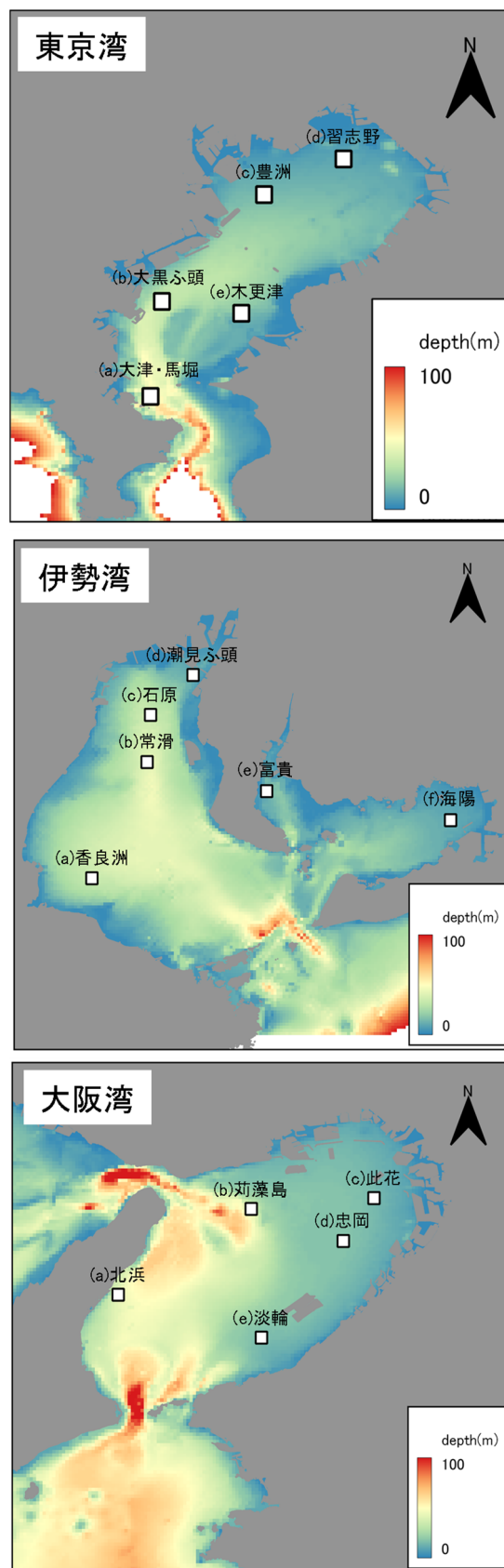


図-3.1 確率潮位偏差及び確率波高の推算地点
（上：東京湾，中：伊勢湾，下：大阪湾）

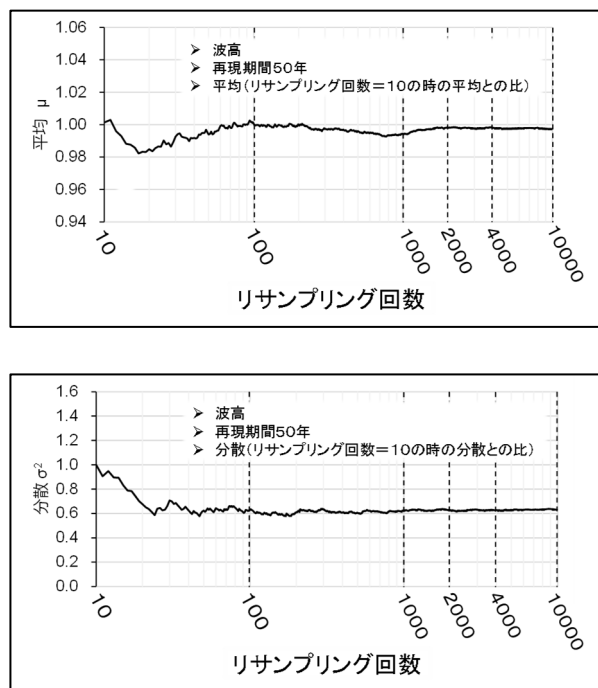


図-3.2 リサンプリング回数の検討結果

サンプリング回数を4,000回とした。リサンプリング回数の検討結果を図-3.2に示す。同図より、リサンプリング回数1,000回程度以上で、推定値の平均及びばらつきが安定する。ただし、1地点のみの検討であることを考慮し、余裕を持って上記のリサンプリング回数とした。

(3) 検討結果

以上の検討条件による確率潮位偏差及び確率波高の評価結果を、図-3.3～図-3.8に示す。本検討では、確率台風モデルを用いて作成した台風によって発生する高潮及び高波に対してリサンプリングを行っている。これは、高潮及び高波の発生源である台風をリサンプリングすることと同義である。よって、本検討の確率潮位偏差及び確率波高の推定誤差は、台風のランダム性に伴う高潮及び高波の不確実性の程度を示すものである。

a) 確率潮位偏差の推定誤差

確率潮位偏差の推定誤差の結果について、いずれに地点についても、再現期間が長くなるほど、その再現期間に対応する確率潮位偏差の推定誤差が増大することが分かる。いくつかの地点では、再現期間が100年程度以上になると、確率潮位偏差の推定誤差が急激に増大する。この再現期間と推定誤差の関係は、極値分布の一般的な特徴と合致する。本検討の場合、統計期間が1,000年であるため、再現期間1,000年の規模の潮位偏差をもたらす事

象（台風）は、統計期間において平均的に1回しか発生しない。すなわち、ある1つの極値データから、再現期間1,000年の確率潮位偏差が推定されることとなる。再現期間100年以上の確率潮位偏差についても、数個～十数個の極値データによって、その値が推定される。そのため、再現期間の長い確率潮位偏差は、限られたデータによって推定される分、必然的にその推定誤差が大きくなる。その一方で、再現期間の短い確率潮位偏差は、多数の極値データに基づいて推定されるため、その推定誤差は比較的小さくなる。本提案手法は、そのような極値分布の推定誤差の特徴を良好に再現しており、確率潮位偏差の推定誤差に対して妥当な結果を与えるといえる。

しかし、再現期間の長い確率潮位偏差の推定誤差について、上方向の誤差（ここでは推定値の95パーセント点）の評価に対して注意が必要である。ほとんどの地点について、再現期間が300年程度以上になると、確率潮位偏差の推定値の95パーセント点（図中網掛け部の右端）の値が一定となる。加えて、確率潮位偏差の再現期間と標準偏差の関係（図-3.9）からも、300年程度以上の再現期間における推定値のばらつき度合いの低下が確認できる。

長い再現期間において推定値の95パーセント点が一定となる特徴は、極値分布が本来持っている特徴ではなく、ブートストラップ法を用いることによって生じる固有の特徴であると考えられる。ブートストラップ法では、1組の標本データを用いてリサンプリングを行うため、ブートストラップ標本を含めて、標本データのとり得る最大値は、元の標本データにおける最大値に等しい。本検討において、再現期間300年以上の確率潮位偏差が元の標本データの最大値となる条件は、ブートストラップ標本の上位3位が元の標本データの最大値となる場合である。極値データの個数 N_T を用いると、その確率 P は次式で表される。

$$P = {}_{N_T}C_3 \left(\frac{1}{N_T} \right)^3 \left(\frac{N_T - 1}{N_T} \right)^{N_T - 3} \quad (3.1)$$

本検討の場合、東京湾を例にとると $N_T = 231$ であり、 $P = 0.06$ となる。よって、ブートストラップ標本の上位3位が元の標本データの最大値となる確率は5%を上回る。そのため、再現期間300年程度以上の場合に、確率潮位偏差の推定値の95パーセント点は元の標本データの最大値となる。

上記のような、再現期間がある期間よりも長くなると確率値の推定誤差が一定となる傾向は、一般的な極値分布の特徴と異なる。そのため、本提案手法を用いるに当

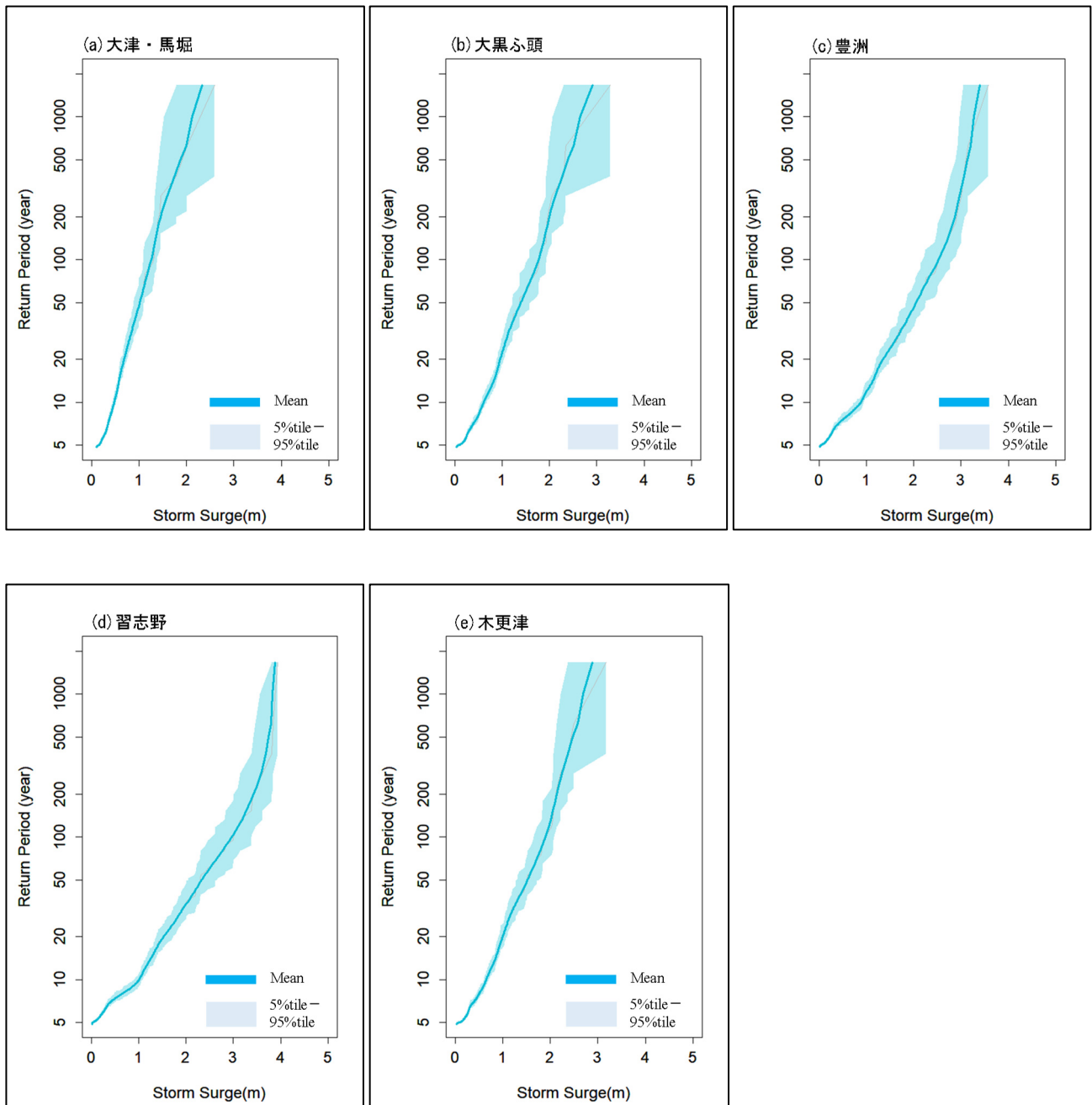


図-3.3 東京湾における確率潮位偏差の推定誤差

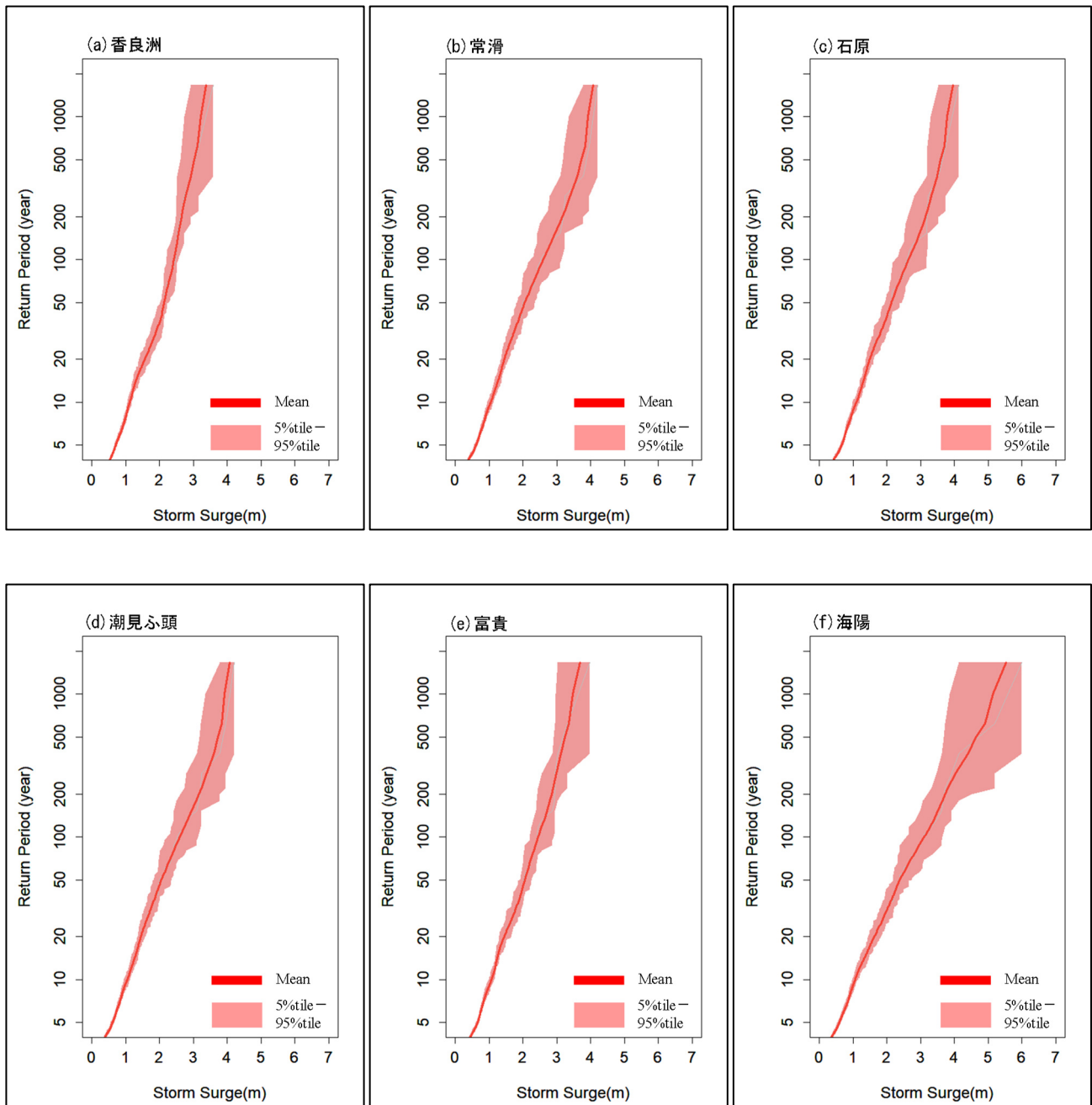


図-3.4 伊勢湾における確率潮位偏差の推定誤差

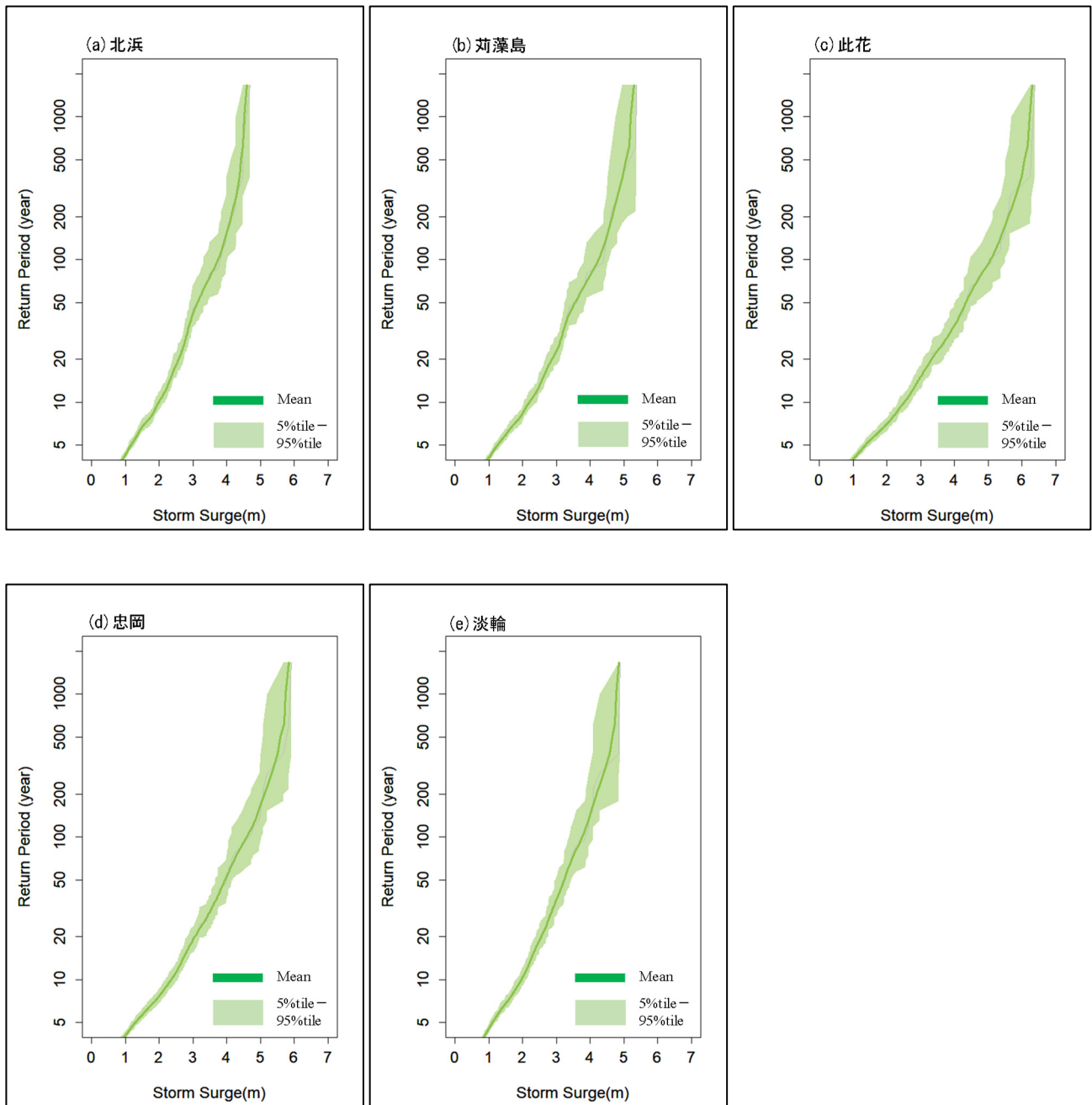


図-3.5 大阪湾における確率潮位偏差の推定誤差

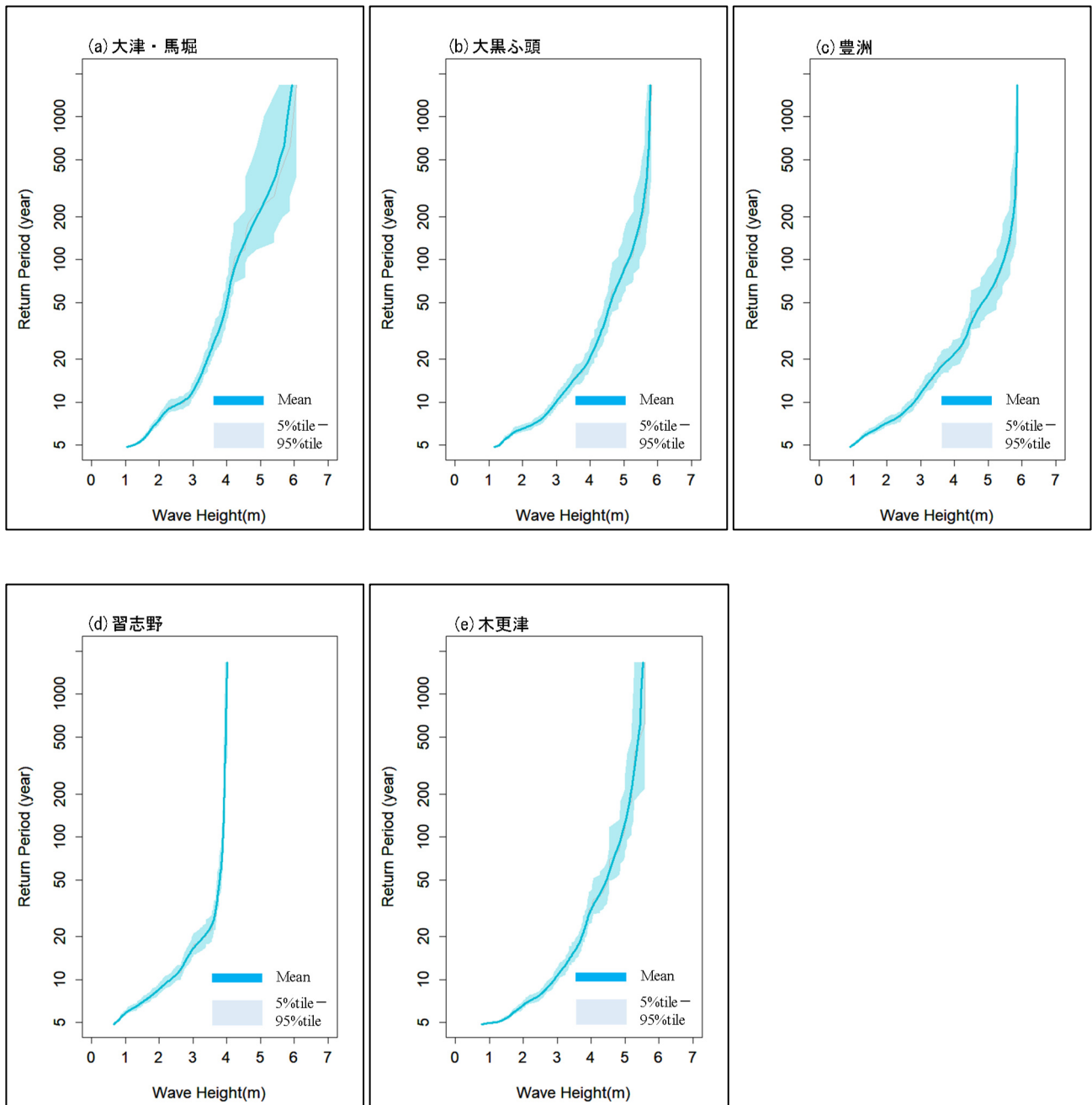


図-3.6 東京湾における確率波高の推定誤差

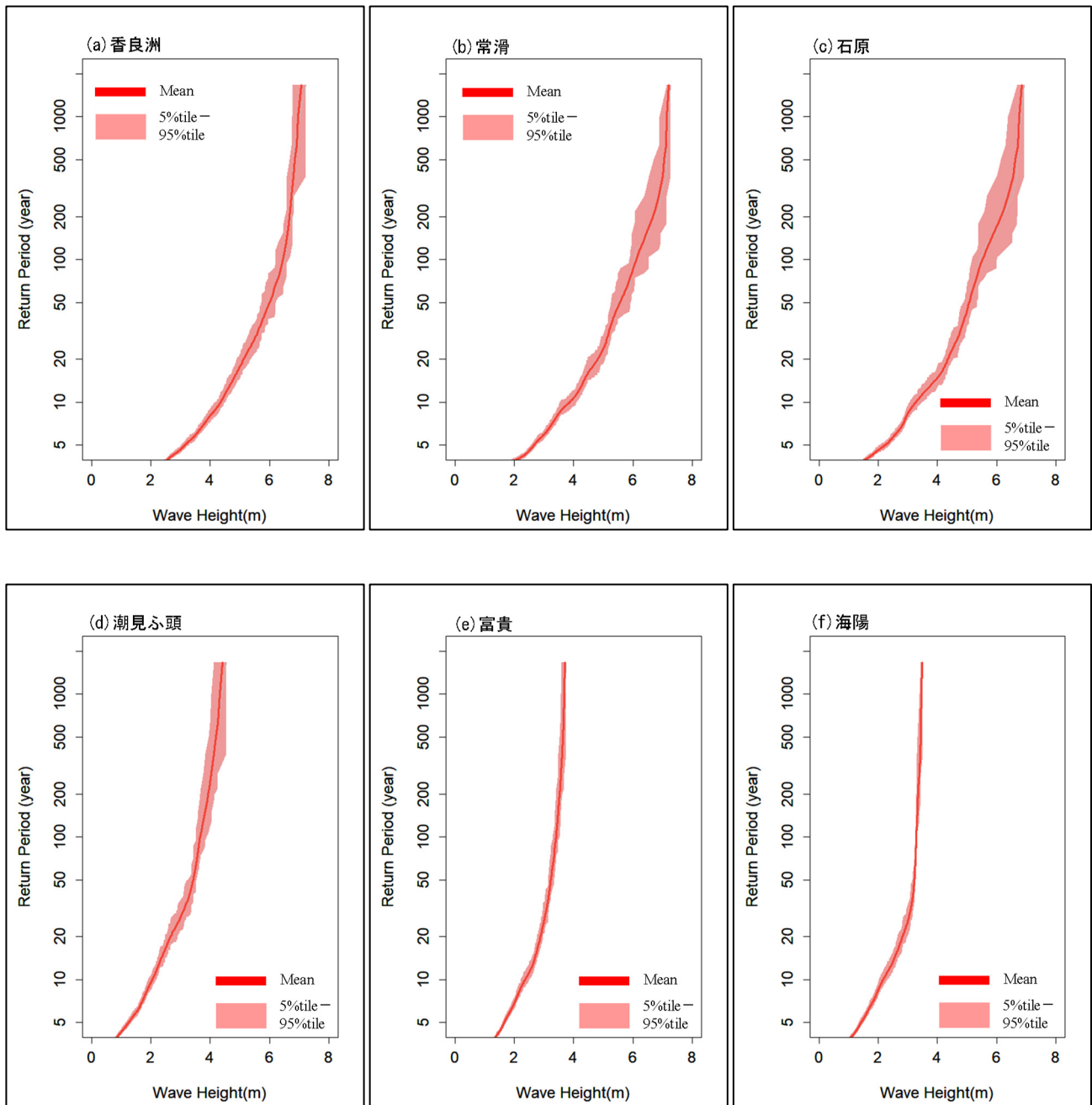


図-3.7 伊勢湾における確率波高の推定誤差

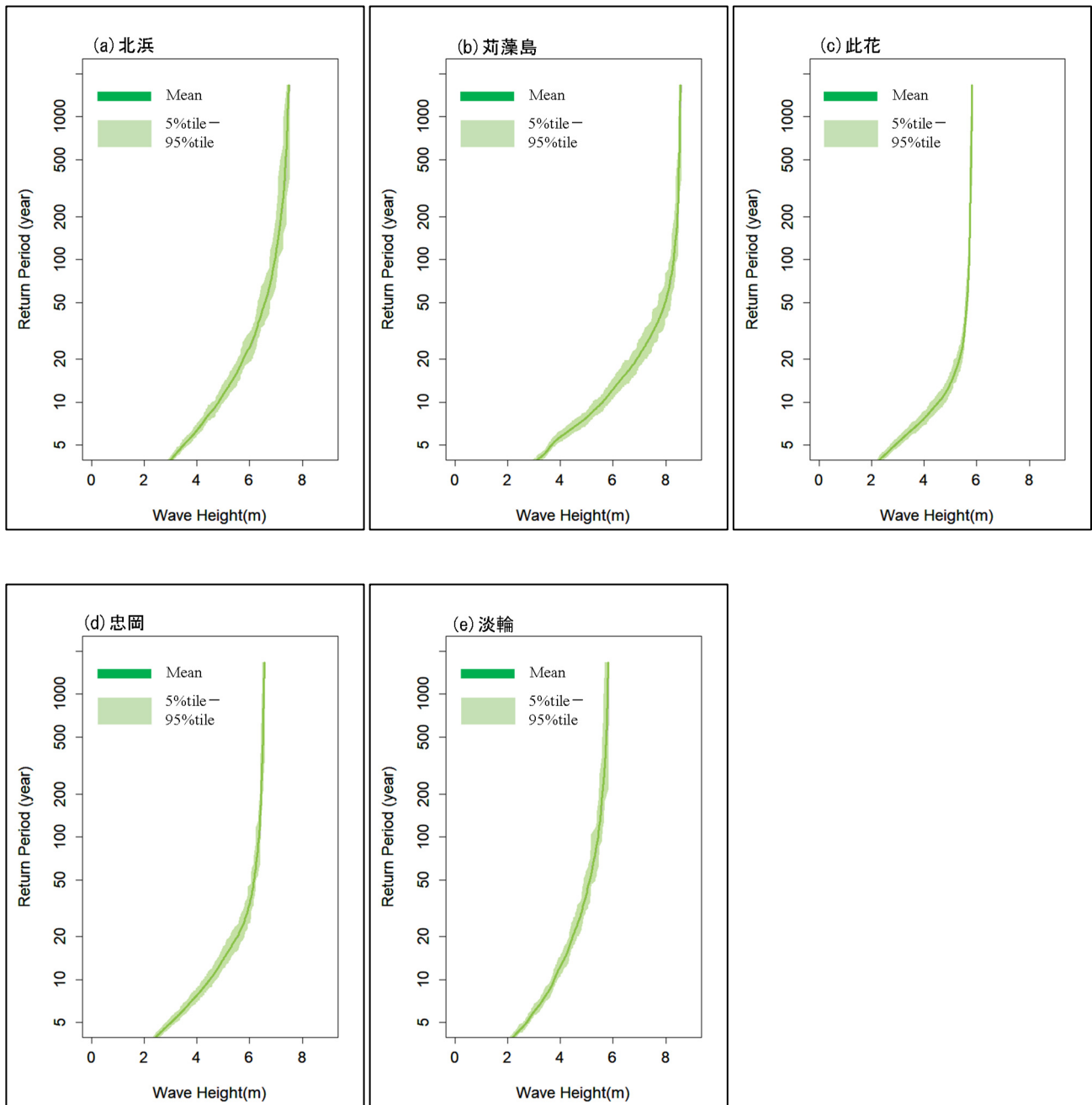


図-3.8 大阪湾における確率波高の推定誤差

たつては、比較的再現期間の長い確率潮位偏差の推定誤差、特に上方向の推定誤差の評価に注意する必要がある。

b) 確率波高の推定誤差

確率波高の推定誤差については、確率潮位偏差の推定誤差と異なる特徴を示す。前述のとおり、確率潮位偏差の推定誤差は、再現期間が長くなるほど増大する特徴を有することが確認された。それに対して、確率波高の推定誤差は、ある期間までは再現期間が長くなるにつれて増大するが、それ以上の再現期間になると誤差が減少する。確率波高の再現期間と標準偏差の関係（図-3.10）を見ると、標準偏差は、多少の変動があるものの、再現期間20年程度まで増加し、そこから再現期間100年まで減少していき、それ以降はほぼ一定で推移する。このような特徴は、一般的な極値分布の特徴と異なる。ただし、本検討で得られた確率波高の推定誤差の特徴は、ブートストラップ法ではなく、元の高波の極値データの特徴に由来するものであると推察される。

確率波高の推定誤差の特徴は、内湾に起因する波浪の発達限界の影響であると考えられる。本検討の対象地点は、比較的水深が浅く閉鎖的な内湾に位置している。そのような海域では、フェッチの短さ及び地形性の碎波によって、波浪の発達が制限される。そのため、台風の規模が大きくなっても、ある波高を限界として、それ以上に波は発達できないと考えられる。そのため、高波の極値データについては、ある波高付近で頭打ちとなる傾向を示す場合がある。そのような場合、頭打ちとなる波高が極値データの上位を多く占め、ブートストラップ法でリサンプリングを行う場合に、再現期間の長い確率波高を決める上位の極値データとしてサンプリングされる確率が高くなる。結果として、再現期間の長い確率波高の推定誤差は小さくなる。

上記の確率波高の推定誤差の特徴及びその影響要因を裏付ける根拠として、対象地点のうち、特に水深の小さい習志野（東京湾）、富貴・海洋（伊勢湾）及び此花（大阪湾）において、確率波高の推定誤差の特徴が顕著に現れている。

以上で示した確率波高の推定誤差の特徴について、少なくとも国内において検討した事例は見当たらない。この理由として、これまで、頭打ちとなるデータを含む極値データについて、任意の確率分布を当てはめ、それに基づいて確率値の推定誤差を評価する方法が示されてこなかったことが挙げられる。本検討結果から、上記の課題に対して、本研究で提案した確率分布を用いずに確率値を推定するノンパラメトリック手法に対してブー

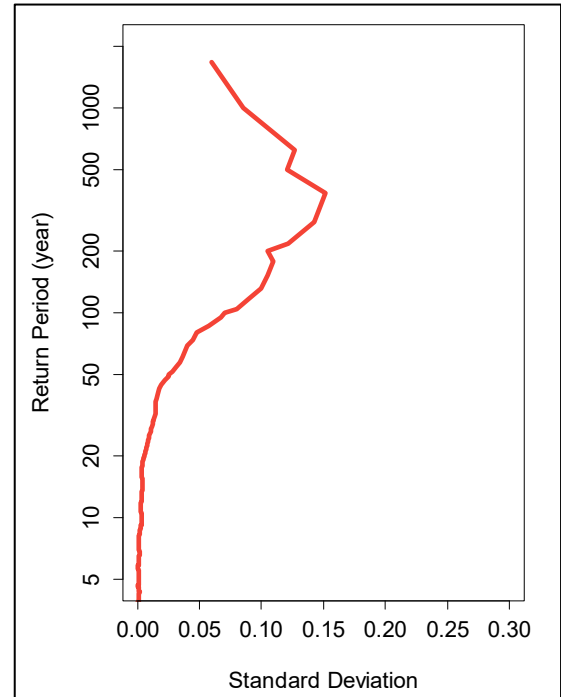


図-3.9 確率潮位偏差の再現期間と標準偏差の関係
（潮見ふ頭（伊勢湾）を1例として例示）

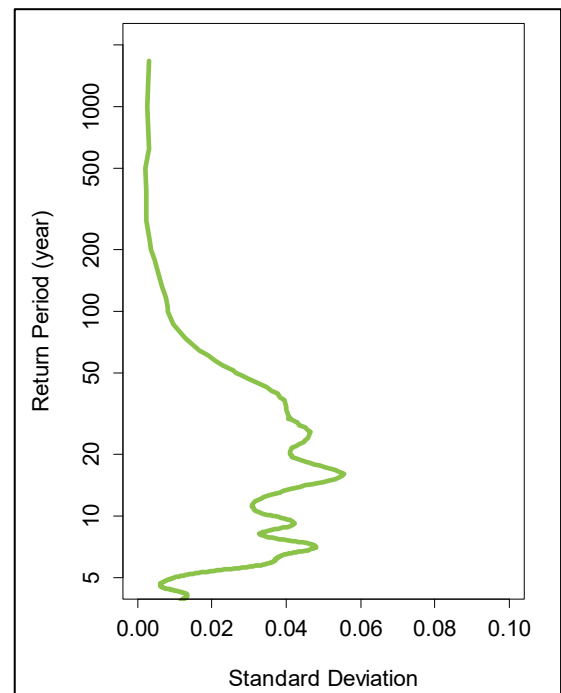


図-3.10 確率波高の再現期間と標準偏差の関係
（荻藻島（大阪湾）を1例として例示）

ストラップ法を適用し確率値の推定誤差を評価する手法は、1つの解決方法として有効であることが示された。

3.2 標本の統計的変動性に伴う提案手法による推定誤差への影響

ここでは、リサンプリングに用いる極値データの統計的変動性が提案手法による推定誤差の評価にどのような影響を与えるか、を検証する。前節の結果は、ある1組の標本データ（標本A）が与えられた時に、提案手法はその標本データに基づく推定誤差を適切に評価できることを示したものである。ただし、同じ母集団から異なる標本データ（標本A'）が与えられた時に、提案手法を用いて得られる推定誤差は、標本A から得られる推定誤差と異なる結果となると考えられる。このような、リサンプリングの元となる標本データの統計的誤差に伴う推定誤差の違いは、ブートストラップ法を用いる限り必ず生じるものである。しかし、本提案手法の実務への適用に当たっては、この推定誤差の違いがどれくらいであるかを事前に把握しておく必要がある。そのため、本検討では、簡単な数値実験によって、上記の推定誤差の違いについて検討した。

(1) 検討方法

本検討は、以下の流れで実施した。

- ① 母集団として、次式で表される分布関数を仮定する。
これは、尺度母数及び位置母数をそれぞれ 1, 0 とした時の Gumbel 分布である。

$$G(x) = 1 - e^{-x} \quad (3.2)$$

- ② この母集団に従うデータを N 個発生させる。
- ③ 発生させた N 個のデータに対して本提案手法を用いて各再現期間の確率値の推定誤差を算定する。この時、データの平均発生率は 1 とする。
- ④ ②, ③の手順を M 回繰り返し、再現期間毎に M 個の確率値の推定誤差の結果を得る。
- ⑤ この M 個の推定誤差のばらつきを、次式（以下、Gumbel の公式）で算定できる Gumbel 分布による推定誤差の理論値を参考にしながら比較する。

$$\sigma(x_T) = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \{1 + 0.8885(s_T - \gamma) + 0.6687(s_T - \gamma)^2\}^{1/2} \quad (3.3)$$

ここに、 $\sigma(x_T)$ は T 年確率値 x_T の標準偏差、 σ_x は Gumbel 分布の標本標準偏差、 s_T は T 年確率値に対応する標準変量、 γ はオイラーの定数である。

(2) 検討結果

上記の検討方法について、 $N = 1000$, $M = 2000$ とした時の結果を図-3.11に示す。全体的な傾向として、本提案手法から得られる推定誤差は、Gumbelの式によって与えられる推定誤差よりも大きめの値を示す。再現期間毎で見ると、再現期間50年以下の推定誤差は、Gumbelの式に近い値を示すことが分かる。さらに、推定誤差のばらつきも比較的小さい。その一方で、再現期間100年以上の推定誤差は、Gumbelの式より2倍以上大きい値を示す。また、推定誤差のばらつきも大きい。

以上の結果から、本提案手法を用いて確率値の推定誤差を評価する場合、再現期間が長くなるにつれてその信頼性が低くなると考えられる。ただし、推定誤差の信頼性は、リサンプリングに用いる極値データの分布形状及び個数によっても異なると考えられるため、その点については今後更なる検討が必要である。

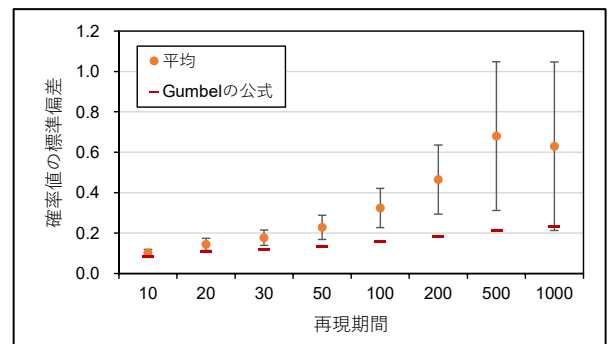


図-3.11 ブートストラップ法と Gumbel の公式による各再現期間の確率値の推定誤差の比較

4. まとめ

本研究では、リサンプリング手法の1つであるブートストラップ法を用いて、気象場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手法を提案した。

本手法は、現在手元にあるデータを最大限に活用することで標本抽出に関する作業コスト及び作業時間を大幅に縮減できる方法であり、実務においても有効な方法である。さらに、観測データ及び推算データのいずれにおいても適用可能であり、非常に汎用性が高い。

本研究の提案手法の適用性の結果から、本提案手法は、確率潮流偏差の推定誤差を、一部の再現期間において評価に注意を要するものの、概ね良好にその特徴を再現できることが確認された。確率波高については、これまで適切な評価手法が提示されていなかった頭打ちを有する極値データに対して、本提案手法がその推定誤差を評

価する1つの有効な手法であることが示された。

本提案手法を実務へ適用するうえでの基礎的な情報となるように、簡単な数値実験によって、標本の統計的変動性に伴う推定誤差の影響を評価した。本提案手法を用いて確率値の推定誤差を評価する場合、再現期間が長くなるにつれて信頼性が低下する可能性があるため、確率値の推定誤差を必要とする再現期間（例えば、港湾施設の設計では50年）に応じて、統計期間及び極値データの個数を検討することが望ましい。

5. あとがき

本研究は、高潮及び高波の偶然的不確実性を評価する手法として、ブートストラップ法を用いることを提案し、その提案手法の適用可能性を示した。

本検討では、高潮及び高波の推定誤差の指標として推定値のパーセント点を用いた。しかし、パーセント点を用いる場合、統計期間に近い再現期間に対しては推定誤差にばらつきが生じやすいため、再現期間による推定誤差の変化の関係を表すことができる評価指標の検討が必要である。具体的には、この推定値の標準偏差を再現期間の関数として仮定することが考えられる。この仮定する関数は、本検討では、Gumbel分布を用いたが、実務の現場においては、Gumbel分布以外にも、Fréchet分布及びWeibull分布が、波高の極値データの当てはめ関数として使用されているため、事前に適切な分布関数を確認し、当該分布関数の推定誤差の理論値が参考になる。

気象予測データを用いた高潮推算及び波浪推算は、観測では得られないような長期間の高潮及び高波の極値データを作成できる。しかしながら、その計算には多くの作業コスト及び作業時間を要するため、高潮及び高波の偶然的不確実性を評価するためにランダムな繰り返し計算を実行することは現実的ではない。また、現在まで、高潮及び高波の偶然的不確実性の評価について、作業コスト等を踏まえた現実的な評価手法は提示されていなかった。

本提案手法は、そのようなランダムな高潮推算及び波浪推算の繰り返し計算を代替するものであり、大幅な作業コストの軽減及び作業時間の短縮を実現するものであるとともに、高潮及び高波の偶然的不確実性の評価を実現する新たな手法である。今後、本提案手法が、港湾施設等のより効率的かつ効果的な設計に貢献できることを期待する。

(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.
- 井出喜彦・山上滯・山城賢・橋本典明 (2017) : 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.
- 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・橋本典明 (2006) : 確率台風モデルの構築とそれを用いた高潮の出現確率分布の推算, 港湾空港技術研究所資料, No.1122, 27p.
- 葛葉泰久 (2015) : 確率水文量の算定ーノンパラメトリック法と bootstrap 法ー, 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) : 計算統計学の方法ーブートストラップ・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ー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ー, 京都大学防災研究所年報, 第 49 号 B, pp.7-12.
- 中條壯大・森信人・安田誠宏・間瀬肇 (2011) : 全球確率モデルの開発と温暖化シナリオ下における台風特性変化の解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, I_1176-I_1180.
- 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ーション, 京都大学防災研究所年報, 第 29 号, B-1, pp.229-239.
- 本多忠夫・光易恒 (1980) : 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp.90-93.
- Efron, B (1979) : Bootstrap methods : Another look at the jackknife, The Annals of Statistics, 7, 1-26.
- 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.

Mori, N, and 7 co-authors (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 (2023) : 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, Ottawa, Canada, ISOPE, pp.2731-2736.

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.

付録A 提案手法の適用性の検証に当たって実施した高潮推算及び波浪推算の計算条件

(1) 台風の気圧場・風場の計算

確率台風モデルを用いて作成した台風について、高潮推算及び波浪推算を実施するに当たって、それらの入力条件となる台風の気圧場及び風場を、経験的台風モデルを用いて計算した。

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。

$$p = p_c + \Delta p \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right) \quad (\text{A.1})$$

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。

$$r_0 = 94.89 \exp\left(\frac{p_c - 967}{61.5}\right) \quad (\text{A.2})$$

海上における風場の計算に当たって、まず傾度風速を以下の式で求めた（藤井ら、1986）。

$$V_{gr} = -\frac{fr - V_T \sin \gamma}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr - V_T \sin \gamma}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p}{\rho_a}\right) \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right) \cdot \exp\left(-\frac{r_0}{r}\right)} \quad (\text{A.3})$$

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 $=7.29 \times 10^{-5}$ 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。

$$V_1 = C_1 V_{gr} \quad (\text{A.4})$$

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-A.1に示す。また、風向は、傾度風の風向から台風中心に向かって 30° 偏向するとした。

表-A.1 高潮推算・波浪推算における C_1 の設定値

対象湾	高潮推算	波浪推算
東京湾	0.70	0.60
伊勢湾	0.70	0.70
大阪湾	0.70	0.70

経験的台風モデルは、風速及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、井出ら（2017）の検討を参考に、海上風の補正を行った。補正方法は、まず既往台風を数十個ほど選定し、それぞれの台風について、経験的台風モデルによる風場の作成と、局地数値予報モデルGPV（LFM）の予報データの収集、もしくは予報データが得られない場合は、局地気象モデル（WRF）による風場の作成を行う。予報モデルGPV（LFM）の予報データ及び局地気象モデル（WRF）の計算データは、いずれも風場に対して地形の影響が考慮されたデータである。両者の風速及び風向を風向及び地点（風場推算の際の計算格子）ごとに比較することで、それぞれの風向別の平面的な補正值を算出する。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、風向の補正值として風向差の平均値を採用した。

また、別途実施した検証計算の結果から、地形の影響に基づく補正のみでは、やや風速を過小に評価することが確認された。そのため、本検討では、検証結果に基づいて補正後の風速を1.21倍し、以降の波浪推算及び高潮推算に用いた。ただし、上記と同様の検証計算の結果から、抽出範囲における最低中心気圧が960hPa以上となる台風の波浪推算に対しては、上記の風速の割り増しによる波高の再現性の低下が確認されたため、風速の割り増しを行わなかった。

(2) 高潮推算・波浪推算

作成した気圧場及び風場を入力条件として高潮推算及び波浪推算を実施した。なお、本研究では、計算コストの都合により、高潮推算と波浪推算を独立して実施した。そのため、波と流れの相互作用、碎波に伴うWave-Setup等の現象は考慮していない。

a) 高潮推算モデル

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。

$$\frac{d\eta}{dt} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} = fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_w} \\ + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} = -fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_w} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_w} \\ + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

ここに、 t は時刻、 M 及び N は、それぞれ x 及び 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} 及び τ_{sy} は、それぞれ、 x 及び y 方向の海面せん断応力、 τ_{bx} 及び τ_{by} は、それぞれ、 x 及び 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。

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (\text{A.8})$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (\text{A.9})$$

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (\text{A.10})$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (\text{A.11})$$

ここに、 W_x 及び W_y は、それぞれ、海上風速 W の x 及び 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。

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024W)/10^3 & : (W < 8) \\ (0.581 + 0.063W)/10^3 & : (W \geq 8) \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

b) 高潮推算での解析条件

高潮推算では、直交座標系を適用し、格子間隔比 $1/3$ もしくは $1/2$ で計算領域のネスティングを行った。各湾の計算領域を図-A.1に示す。その他、高潮推算における計算条件を表-A.2に示す。

表-A.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

c) 波浪推算モデル

波浪推算には、第3世代波浪モデル WAVEWATCH III ver.5.16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、発達及び散逸を計算する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_w}{\partial t} + \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \phi N_w \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \lambda N_w \\ + \frac{\partial}{\partial k} k N_w + \frac{\partial}{\partial \theta} \theta_g N_w = \frac{S}{\sigma} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

ここに、 N_w は波作用量、 k は波数、 θ は波向、 φ は傾度、 λ は緯度、 σ は相対角周波数、 S はソース項である。

d) 波浪推算の解析条件

波浪推算では、緯度経度座標系を適用し、格子間隔比 $1/8^\circ$ もしくは $1/4^\circ$ で計算領域のネスティングを行った。計算領域を図-A.2に示す。その他、波浪推算における計算条件を表-A.3に示す。

表-A.3 計算条件 (波浪推算)

項 目	設定値
計算格子幅	$1/2^\circ$, $1/8^\circ$, $1/64^\circ$ (東京湾, 伊勢湾) $1/2^\circ$, $1/8^\circ$, $1/64^\circ$, $1/128^\circ$ (大阪湾)
計算時間間隔	60~720 s
方向分割数	36 ($\Delta\theta = 10^\circ$)
周波数分割数	35 (0.042~1.11Hz)
エネルギー輸送と 消散項	ST3

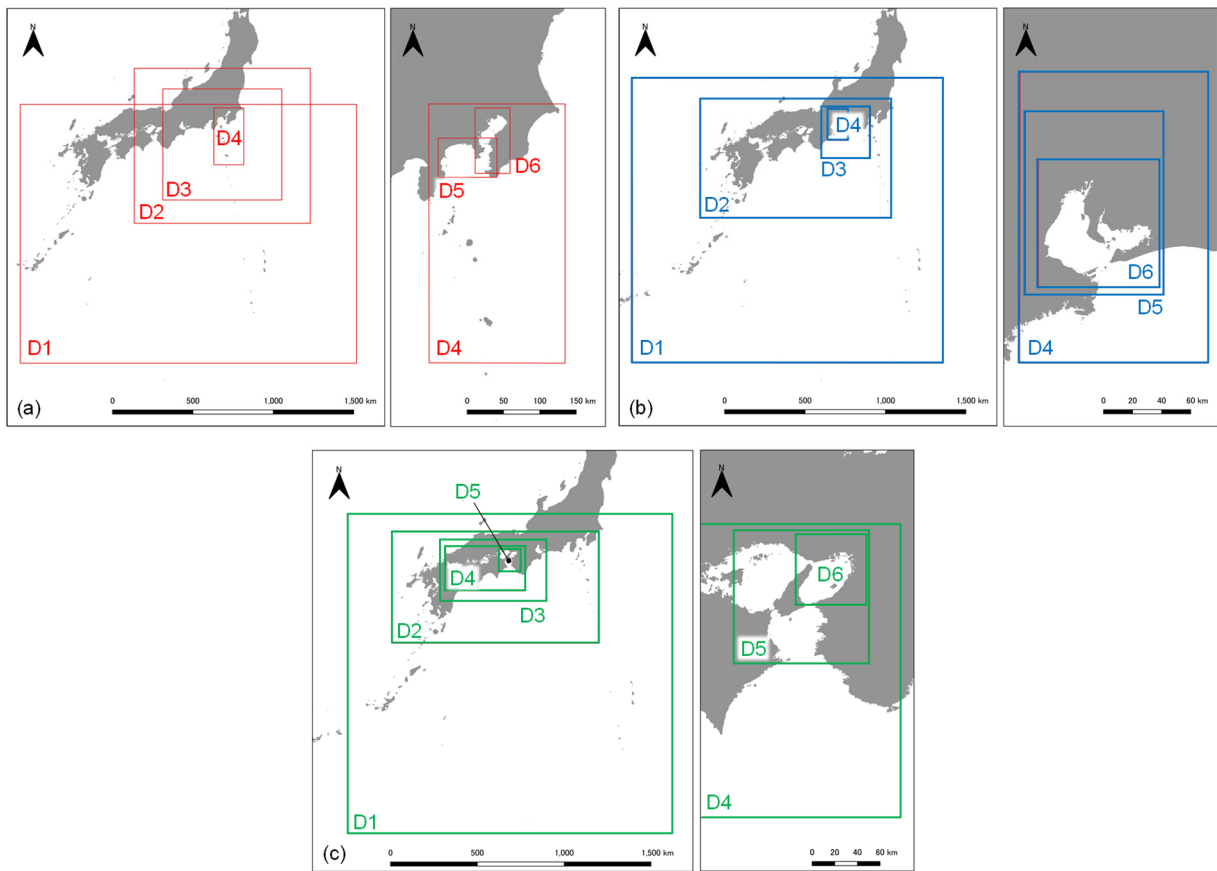


図-A.1 果高潮推算における計算領域 ((a) 東京湾, (b) 伊勢湾, (c) 大阪湾)

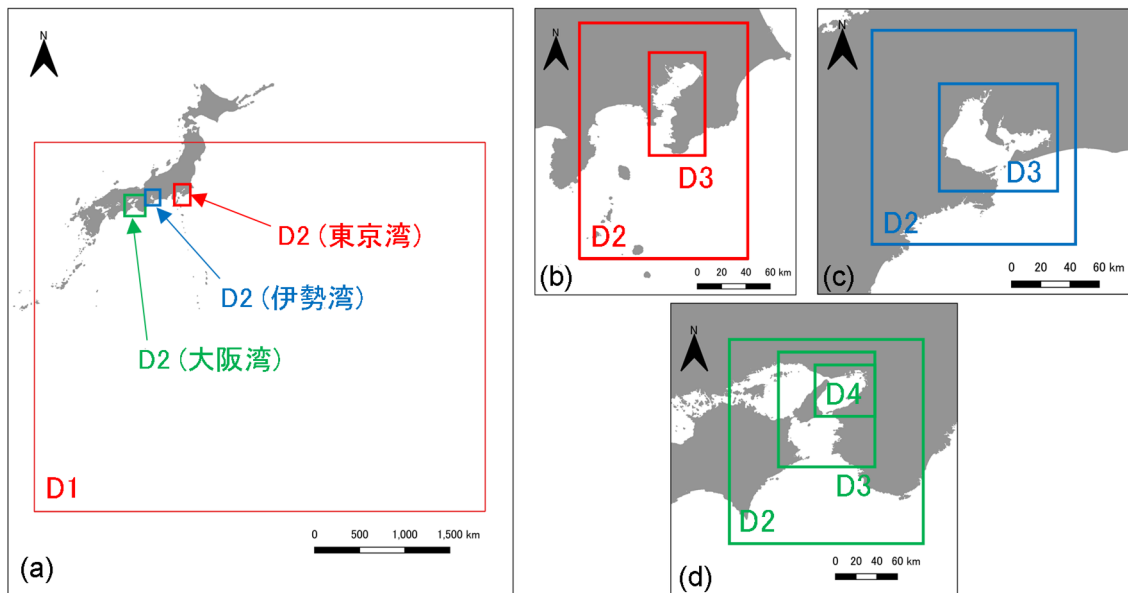


図-A.2 波浪推算における計算領域 ((a) 広領域, (b) 東京湾, (c) 伊勢湾, (d) 大阪湾)

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of NILIM

No. 71

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

