

博士論文

損害保険を対象とした
高潮リスク評価手続きに関する研究

久松 力人

目次

1	序論	3
1.1	研究の背景	3
1.2	高潮リスク評価に関する先行研究等	6
1.3	本研究の目的	12
1.4	本研究で提案する評価手続き	12
1.5	本論文の構成	14
2	高潮ハザードの評価	16
2.1	ハザード評価の手順	16
2.2	確率台風モデル	17
2.3	経験式による高潮偏差の推算	21
2.4	天文潮位の推算	22
2.5	高潮数値モデル	24
2.6	ハザード推定	30
2.7	本章のまとめ	48
3	高潮損失額の評価	50
3.1	損失額推定の手順	50
3.2	資産額データセットの構築	50
3.3	高潮被害関数	53
3.4	建物階数の考慮	53
3.5	EP カーブの構築	55
3.6	損失額推定におけるイベントの十分性に関する考察	58
3.7	年間期待損失額の評価	59
3.8	破堤の影響	62
3.9	本章のまとめ	64
4	評価手続きの不確実性評価	65
4.1	不確実性の検討対象	65
4.2	台風モデルの不確実性	66
4.3	最大風速半径設定の不確実性	67
4.4	標本抽出の不確実性	68
4.5	天文潮位設定の不確実性	70
4.6	本章のまとめ	83

5	被害関数の高度化.....	84
5.1	保険損害情報を基にした被害関数の構築.....	84
5.2	本章のまとめ.....	95
6	結論.....	97
6.1	得られた知見.....	97
6.2	今後の課題.....	98
	参考文献.....	100
	付録.....	107
	謝辞.....	119

1 序論

1.1 研究の背景

平成 28 年に中央防災会議により防災基本計画が修正され、将来的な水害リスク増加をかんがみ、水害保険・共済への加入を促進する旨が追記された [1]。世界的に自然災害による経済損失額や保険損失額は増加傾向にあり、また保険損失を直接的にもたらず風水害の発生件数は顕著に増加している [2]。日本では、風水害に対し、1991 年以降、平均して毎年 1,400 億円を超える保険金支払いが発生している (図 1) [3]。こうした政府の動向、風水害リスク増加を背景に、損害保険へのリスク移転の重要性が増してきている。

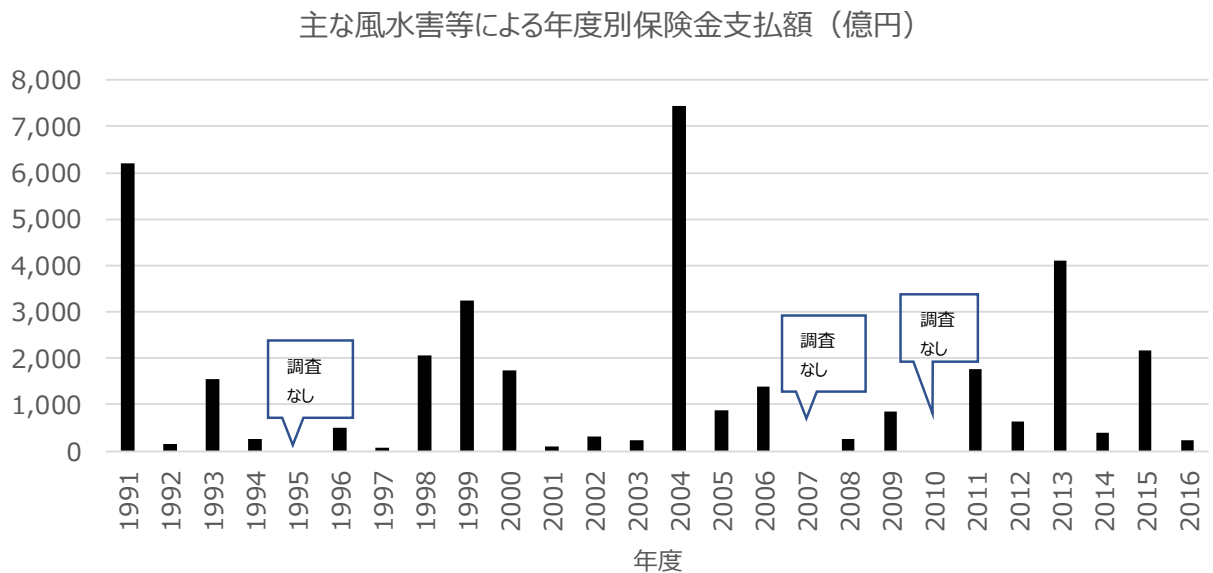


図 1 主な風水害等による年度別保険金支払額
(一般社団法人日本損害保険協会(2017) [3]を参考に作成)

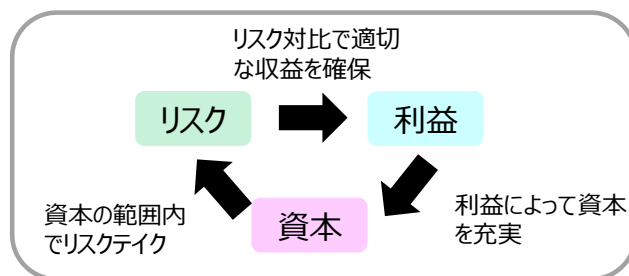


図 2 保険会社の経営コンセプト (ERM 経営研究会(2015) [4]を参考に作成)

損害保険会社は自社のリスク管理のために、自然災害のリスク量を計測している。保険会社の経営においてはリスクを適切に計測し、リスク対比で適切な利益を上げ、それにより資本を充実させ、資本の範囲内でリスクテイクするという流れを循環させている（図 2）。そのため、リスク量を適切に評価することが重要である。台風に伴う強風被害と高潮被害は、気圧が低くなると巨大化する可能性が高く、被害が同時に発生した場合には損害保険会社にとってピークリスクになりうるため、高潮リスクの精緻な評価手法の構築が求められている。国交省港湾局は、平成 30 年 3 月に「港湾の堤外地等における高潮リスク低減方策ガイドライン」を策定・公表した [5]。わが国の三大湾（東京湾・伊勢湾・大阪湾）において臨港地区の 8 割以上が堤外地となっており、本ガイドラインの策定により港湾の堤外地等における高潮対策が推進されている。人口や資産が特に集中する三大湾沿岸においても、規模の小さい高潮で堤外地が浸水する可能性があり、すなわち多くの資産に被害が出るおそれがある。

国内の大手損害保険会社グループでは、経営の意思決定に直接使用しうる最大のリスク量として、非超過確率 99.5%を採用している [4]。非超過確率の高いリスク量を計測する自然災害モデルでは、モデルベンダーの開発する自然災害モデルを用い、確率論的手法に基づき、ハザードおよび経済被害が評価されている [6]。

保険業界における自然災害モデルの導入の経緯について図 3 に示す [7]。1960 年代頃、それまでリスク管理には手作業によるマッピングが用いられてきたが、次第に情報技術や地理情報システム（GIS: Geographic Information System）が進歩し、技術基盤が整った。データや理論については、20 世紀前半から自然災害の科学的測定が急速に進歩し、1970 年代までにイベントの発生源と頻度を理論化する研究が発表されてきた。これらの技術基盤とデータ・理論を融合させ、潜在的な巨大災害を計量するためのコンピュータベースのモデル（自然災害モデル）が開発された。1992 年のハリケーンアンドリューでは、保険会社 9 社が支払い不能になったこともあり、多くの保険会社・再保険会社で意思決定根拠としての自然災害モデルの活用ニーズが高まった。その保険業界のニーズの高まりに伴い、自然災害モデル専門会社が成長・発展した。

保険業界で用いられる自然災害モデルはハザードモジュール・脆弱性モジュール・ファイナンシャルモジュールの 3 つで構成されている（図 4） [8]。自然災害モデルでは、まずハザードモジュールで風速や浸水深等の計算を行い、次に脆弱性モジュールでそれらの情報を家屋等の対象物の損害率に変換し、最後にファイナンシャルモジュールで保険契約条件を考慮した保険損失額を求めることが一般的である。自然災害モデルは現在においても保険業界の意思決定において重要視されている [9]。

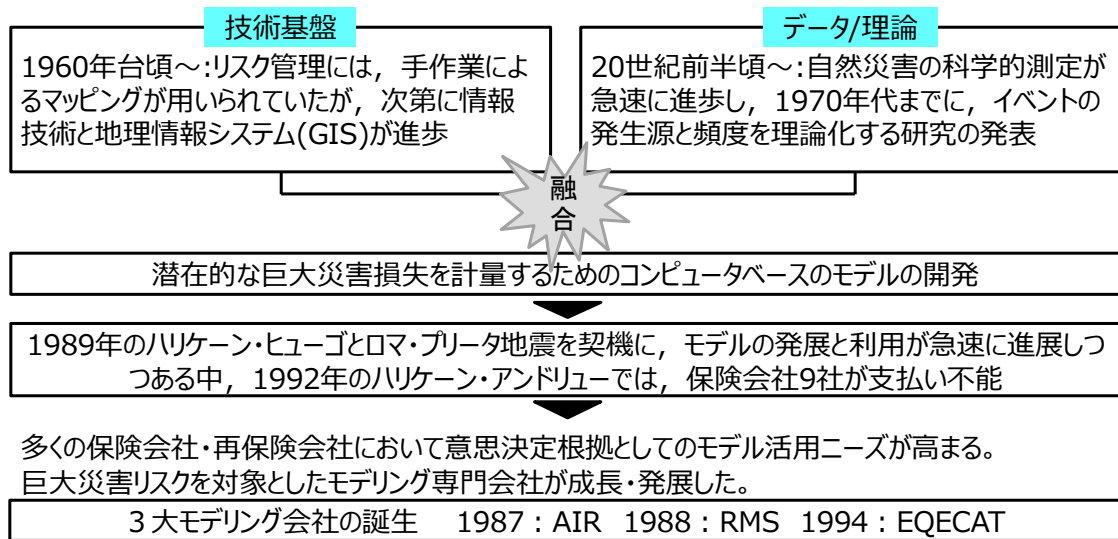


図 3 保険業界の自然災害モデル導入の経緯（損害保険料率算出機構(2006) [7]を参考に作成）

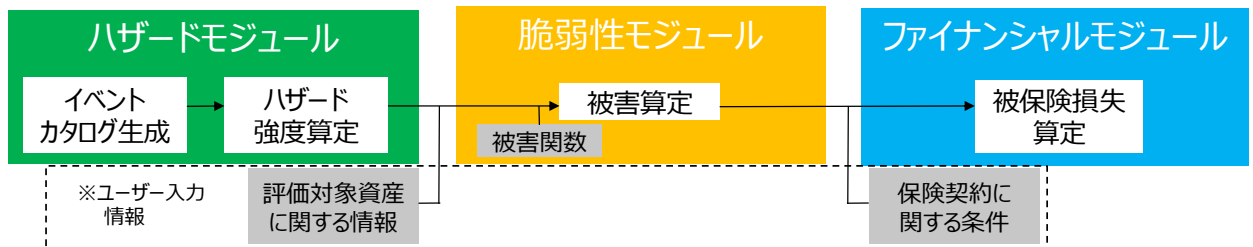


図 4 自然災害モデルのコンポーネント（株式会社インターリスク総研(2013) [8]を参考に作成）

保険リスクの審査等を行うアンダーライティングでは、再現期間毎の浸水深分布が活用されることがある [10]。これはメッシュ毎に、再現期間別の浸水深を算出することで求められる、任意の再現期間に対する浸水深分布のことである。しかし、我が国の政府が公表するハザードマップは想定シナリオに基づく結果であり、アンダーライティングを目的として活用するには十分でなく、再現期間毎の浸水深分布の計算も実施する必要がある。また自然災害モデルにより計算された年間期待損失は純保険料とも呼ばれ、保険のプライシングの際の参考とされる [11]。

以上より損害保険の観点から自然災害モデルに満たされるべき基本的要件は以下の通りとなる。

- ① 低頻度（年超過確率 0.5%等）の損失額を予想できること
- ② 保険や再保険のプライシングの参考にされる年間期待損失（純保険料）を計算できること
- ③ 保険引き受け時等に使用される低頻度の浸水深マップを作成できること

1.2 高潮リスク評価に関する先行研究等

ここでは高潮リスク評価に関する先行研究や取り組みをレビューする。

国内の高潮ハザード研究として、鈴木 [12]は日本全国を対象として、複数の水位による氾濫シミュレーションを実施し、その結果から沿岸域の損失額を推定し、代表地点の水位と沿岸部の損失額との関係式を構築した。この研究では対象範囲が広域であることと、気候変動による大規模な高潮も想定していることが特徴である。しかし、対象領域が広域であり氾濫計算は簡易的なレベル湛水モデルにより計算を実施しているため、氾濫解析の精度に課題があり、またこの研究において確率論的な議論はなされていない。確率論的な高潮被害額に関する研究としては、辻田ら [13]および Jiang ら [14]が挙げられる。辻田ら [13]は、確率台風モデルを援用し、日本国内の三大湾において今後1年間に発生しうる高潮を1,000パターン計算することで、確率論的な損失額の予測を行い、年超過確率と損失額との関係を示した。この研究で用いられた確率台風モデルは過去の台風情報を統計処理し、1年間に発生する想定台風を1,000年間分計算したものであるため、将来気候を考慮したものではない。すなわち確率変数は、台風パラメータ（中心気圧、位置、移動速度）となる。このアプローチは、今後一年間の自然災害リスクを多くのパターンで解析し、リスク管理や保険料設定に活用する保険目的の計算と共通する。損害保険会社のリスク管理に用いる超過確率は低く、計算期間を長くすると、評価台風数も多くなり計算結果が安定し不確実性が減少すると考えられるが、この研究では対象とする超過確率に対して実施した計算期間について議論されていないことが課題である。また高潮シミュレーションに堤防を明示的に考慮しておらず、また天文潮位設定に関する議論がないといった課題がある。Jiang ら [14]も同様に、伊勢湾の湾奥における現状気候および将来気候の高潮損失額を確率論的に評価し、年超過確率と損害額との関係を示した。現状および将来気候について、損失額の評価には200年間分の仮想台風を25アンサンブル分用いており、辻田らの研究と比較すると対象台風数が多いことが特徴である。

上述した先行研究においては、高潮の氾濫計算を行い、その浸水深と資産額から、浸水深と損害率の関係式を用いて損失額を計算しているという点が共通している。一方で、不確実性の議論が十分ではない。高潮損失額の計算過程においては、天文潮位設定、風速・気圧分布式、最大風速半径、被害関数など、パラメータが多く存在し、それらの予想損失額に及ぼす影響について評価することが重要である。また、重要な再現期間に対して計算期間が十分かどうかの議論もなされていないことも課題である。

海外の高潮リスク評価の取り組みとしては、アメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁 (FEMA: Federal Emergency Management Agency) が開発した HUZUS-MH (Hazards U.S. Multi-Hazard) [15]

が代表的である。これはアメリカ国内の地震・ハリケーン・洪水による被害を推定するソフトであり、過去のハザードや建物・インフラの経済損失などを表示するものである。また、FEMAはアメリカ国内の洪水保険プログラムのために、アメリカ国内を対象として、年超過確率が10, 2, 1, 0.2%の高潮リスクマップを作成しており、さまざまな手法でリスクを評価してきた [16]。その手法として、観測潮位データの極値解析（例えば Kim ら [17], Bulter ら [18], Caires [19], Gurumurthy ら [20], Bardet ら [21], Arns ら [22], Jonathan ら [23]), EST (Empirical Simulation Technique) [24], JPM (Joint Probability Method) [25]が検討されてきた。ESTはある地点の観測潮位を基に、観測潮位の発生確率をポアソン分布により推定し、ブートストラップ法により人工的なイベントセットを構築する手法である。JPMは、ハリケーンなどの特徴を観測情報から捉え、中心気圧や進行速度等の確率分布から、発生しうる台風を構築し、その全てに対し高潮数値計算を行うものである。極値解析や EST は限定的な観測データに大きく依存する一方、JPMでは発生する可能性のあるハリケーンなどを網羅的に考慮できるため、近年では JPM のアプローチが熱帯低気圧に適していると認識されている [16]。

保険業界の自然災害モデルや学術研究における確率論的な高潮リスク評価も同様に、過去の台風データを参考にして、それらの特徴を捉えた台風を1年間×10,000パターンなどの長期間分生成し、高潮数値計算を行う手法が近年では一般的である（例えば AIRWORLDWIDE [26] [27], Risk Management Solutions [28], 辻田ら [13], 安田ら [29]）。すなわち、例えば日本を対象に台風を分析する場合は、1年で平均3個程度の台風が上陸するため、合計3万程度の台風が上陸することを想定する。しかし、JPMは想定しうる台風全てに対し、高潮数値計算を行うことから計算コストが高くなることが課題であることが指摘されている [16]。

前述の Jiang ら [14]は高潮計算の負荷を減少させるため、以下の3つの条件で高潮計算を行う台風を絞り込んでいる。

- ・ 伊勢湾沿岸 100 km 以内を通る台風
- ・ 中心気圧の最小値が 950 hPa 以下の台風
- ・ 上陸時の台風の進行速度が 20 km/h 以上の台風

このプロセスにより、氾濫する可能性のある大規模な高潮偏差をもたらす台風を抽出している。しかし例えば天文潮位のばらつきを考慮した場合、高潮偏差のみから高潮リスクを評価することはできず、天文潮位と高潮偏差が合算されたトータルの水位を用いて評価する必要がある。したがって、この論文で行われている台風抽出プロセスは天文潮位の不確実性を考慮した高潮リスク評価に適用するには不十分である。また、この論文では中小規模の高潮被害をどれだけ抽出できているかの議論は不十分であるため、高潮被害の年間期待損失額まで評価できるだけの議論はされておらず、

保険を目的とした必要要件を満たしているとはいえない。

米国の FEMA では、上述の JPM の計算負荷を削減すべく、計算負荷を削減した手法である JPM-OS (Joint Probability Method – Optimal Sampling)を開発し、現在採用している (Johnson ら [30])。JPM と JPM-OS の計算手法の比較を図 5 に示す。JPM-OS は、まず確率台風モデルの台風イベントから選択された代表イベントのみに対し、高潮氾濫解析を行う。次に、その結果を補間して、氾濫解析をしていないイベントの浸水深を推定する手法である。計算負荷を JPM と比較して 1 桁分の計算負荷削減を実現できるものの [16]、補間の際に不確実性が発生することが課題となる。その不確実性を減少させるため、JPM-OS の補間方法について研究が進められている (例えば Yang ら [31])。Yang らは、米国フロリダを対象として、再現期間別に JPM-OS の補間方法ごとの浸水深の計算結果を示した。比較した手法は、JPM-OS-AK [31], JPM-OS-QK [31], JPM-OS-PCA [32], JPM-OS-MARS [33]と呼ばれる、JPM-OS に基づく代表台風の計算結果から、それぞれ別の補間方法を用いた推定手法である。再現期間 50, 100, 500 年を対象に各地点の浸水深を、補間方法ごとに JPM による計算結果と比較したところ、RMSE は 0.16~0.82 m となった。再現期間が長い場合も短い場合も補間結果と数値計算による結果に誤差が生じていることが示された。

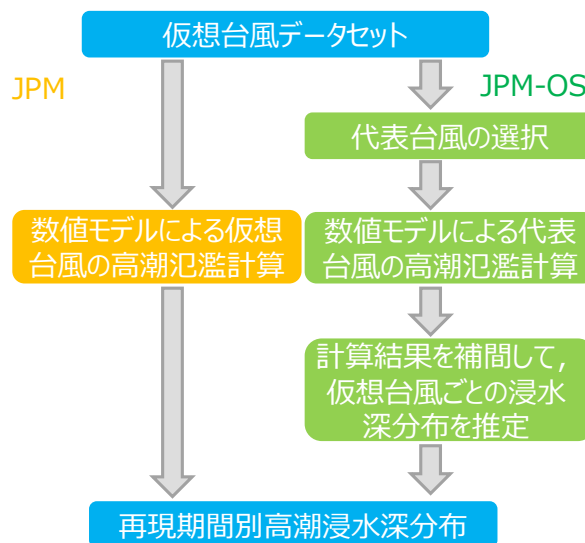


図 5 JPM と JPM-OS の計算手法の比較 (Yang ら(2019) [31]を参考に作成)

高潮は吸い上げ効果、吹き寄せ効果、波浪効果 (Wave set-up) による潮位上昇により発生する [34]。吸い上げ効果は、台風や低気圧周辺では気圧が低いため、海面が持ち上がる効果である。一般的に気圧が 1 hPa 下がると、吸い上げ効果により約 1 cm 海面が上昇することが知られている。吹き寄せ効果は風が沖から海岸に向かって吹くと、海水が運ばれて海面が上昇する効果である。吹き寄せ効果による海面上昇は風速の 2 乗に比例する。Wave set-up は波浪が沿岸に到達して碎波し

た際に、砕波が生じた場所から岸側の平均水位が上昇する効果である。波浪による平均水位の変化は次のように説明できる。「沖合から進入してきた波が浅海域に到達すると、水深が浅くなるにしたがって浅水変形で波高が増大する。波高が大きくなると、運動量の輸送が大きくなって、平均水位は低下し始める (wave set down)。波がさらに浅くなった地点に侵入すると、海底勾配及び水深に対応した波高で砕波して、急激に波高が減衰し、この波高の急激な低下は運動量の輸送を急激に減少させ、平均水位は上昇する。汀線近傍における平均水位の上昇はこのようなラディエーションストレスによって引き起こされる現象の典型的な例とみなされている」 [35]。合田ら [36]は海底勾配ごとに水位 η の平均値の変化量の関係を示した。換算沖波波高 H_0' に対する平均水位の変化量 (η/H_0') は、換算沖波波高に対する水深 h が浅いほど (h/H_0' が小さいほど)、波形勾配 (H_0'/L_0) が小さいほど、大きい。また海底勾配が大きいほど η/H_0' は大きい。つまり、波の状態としては波高が高く波長が長い場合に、場所としては海底勾配が急で水深が浅い場所で平均水位上昇に対して wave set up の影響が強くみられるということになる。

高潮ハザードの数値解析手法としては、高潮メカニズムのうち吸い上げ効果と吹き寄せ効果を明示的にモデル化しているものが一般的であった [37]。しかし山下・別宮 [38]、柴木ら [39]により、解析の再現性の向上のために、Wave set-up を考慮することが重要であることが示された。これらの既往研究において Wave set-up を考慮したモデルは、従来は波の推算により radiation stress を求めておき、高潮解析時に高潮の運動方程式に radiation stress による応力項を導入するものであった。Kim ら [40]は、それまで別々に行われていた波浪モデルと高潮モデルとを結合し、それぞれの相互干渉を考慮したモデルである SuWAT (Surge-Wave-Tide coupled model)を開発した。SuWAT は潮汐・高潮・波浪の相互作用を考慮した双方向結合モデルである。高潮の運動方程式に radiation stress 項を導入し、任意の時間間隔で高潮計算モジュールと波浪計算モジュール間のデータを交換することで、高潮と波浪を同時に計算することが可能である。両モジュールは同じ計算領域を共有することで、波浪計算モジュールで求めた時空間的な radiation stress および海面抵抗係数を高潮計算モジュールに渡して水位と流れを求める。また求められた水位と流れを波浪計算モジュールに渡して波浪推算を行う。SuWAT では、ネスティング手法を用いて計算領域毎に上記の結合過程を通じて波浪と高潮推算を行う。間瀬ら [41]は SuWAT を用い伊勢湾台風の再現計算を実施し、高潮のみの計算に比べ波浪を同時計算した場合に最大高潮偏差の再現性が大きく向上することを示している。SuWAT は特に日本をはじめとしたアジア地域で多数の研究実績があるため (例えば Yang ら [42], Kim ら [43] [44], Yasuda ら [45]), 保険業界の自然災害モデル内でも高潮数値モデルとして採用されている [46] [47]。なお、前述した辻田ら [13]および Jiang ら [14]も、ハザード評価時に SuWAT により高潮の数値解析を実施している。

次に、浸水深から資産の被害を推定する水害の被害関数に関する既往研究についてレビューした内容を示す。

津波の浸水深と被害との関係については、東日本太平洋沖地震による津波被害を代表として、浸水深と現地調査等から得られた被害の程度を結び付け、被害の程度毎の発生確率を表現した脆弱性カーブが蓄積されている（例えば Suppasri ら [48], Aránguiz ら [49]）。これらの脆弱性カーブは、それぞれの被害の程度 i (minor, moderate, major, complete) の発生確率 P_i を、浸水深 η を説明変数として下式のように算出する関数である。

$$P_i = f_i(\eta) \quad (1)$$

ただし、この脆弱性カーブは、資産に対する損害率を示すものではないため、津波のハザード強度から直接的に損失額を算出することができず、保険を目的としたリスク評価ができないことが課題であった。そこで Dias ら [50] は、Reese ら [51] による脆弱性カーブを活用し、被害の程度毎に被害率を設定することで、浸水深から資産の被害率に変換する手法を示した。すなわち、これまで蓄積されてきた津波の脆弱性カーブから、下式のように浸水深を説明変数として資産の被害率 R を直接算出可能な津波被害関数への変換が可能となった。

$$R = f(\eta) \quad (2)$$

高潮の浸水深から資産の被害率に変換する高潮被害関数は、アメリカ国内の HAZUS の高潮被害関数が高潮被害額推定で頻繁に使用されている（例えば Johnson ら [30], Lin ら [52]）。HAZUS に搭載されている被害関数は、US Army Corps of Engineers が洪水後の調査と専門家へのヒアリングを行い開発したものである [53] [54]。そのほか、Kar and Hodgson [55] は、簡易的に理論ベースで高潮被害関数を構築した。この被害関数は、1 階の床高を地上 2 フィートと仮定し、その高さまでは浸水しても無被害であると設定されている。また地上 2~4 フィートでは、床が損傷し建物全体の 25% が被害を受けると想定されており、水位が地上 4 フィートに達すると、コンセント・電気配線・スイッチを損傷し 40% の被害となる。10 フィートに達すると、さらに電化製品・窓・ドア・1 階の壁を損傷し、被害は 80% となる。最後に、水位が 12 フィートに達すると、1 階の天井まで水が届き、全損するとした仮定のもと被害関数が構築されている。

また日本国内においては、図 6 に示す国交省によるもの [56] が広く使われている（辻田ら [13], 安田ら [57], Jiang ら [14]）。この理由として、わが国の資産を対象とした高潮被害関数が他に存在しないためである。この被害関数はわが国の資産を対象として構築された洪水被害関数にイギリスの海水による被害係数を乗じたものである。これは平成 5~8 年に実施された調査に基づき構築されたものであり、20 年程度経過した現在においては家屋の材料や設備等で当時の仮定とは乖離があることが課題である [58]。そのため国交省では被害関数の更新に向けて取り組みを進めている [59]。洪水被害に基づく浸水深と被害率を調査した研究として鈴木ら [60] によるヒアリングベースの研究

が挙げられるが、被害関数構築に関する研究が少ないことが課題であり、特に実損害情報を活用した事例の蓄積がないことが課題である。

これらの被害関数は、浸水深に対して被害率が不連続になるステップ関数となっているものと、連続となる関数とが存在する。Kar and Hodgson [55]や国交省 [56]は前者であり、US Army Corps of Engineers [54]や鈴木ら [60]は後者である。その他、辻田ら [13]のように国交省 [56]のステップ関数を回帰して連続の関数に変換した上で損害推定に使用している事例もある。ステップ関数の場合は、モデル建物を想定した上で浸水深別の被害を設定して被害関数が構築されているため、モデル建物の床や天井などに水位が達した際に被害率が増加する関数の形状となる。ただし実際に被害を受ける建物の構造は多様であり、被害率が変わる浸水深は建物により異なる。そのため災害調査をベースとして構築された US Army Corps of Engineers [54]や鈴木ら [60]の被害関数は、さまざまな構造の建物を対象としているため、連続的な被害関数となる。

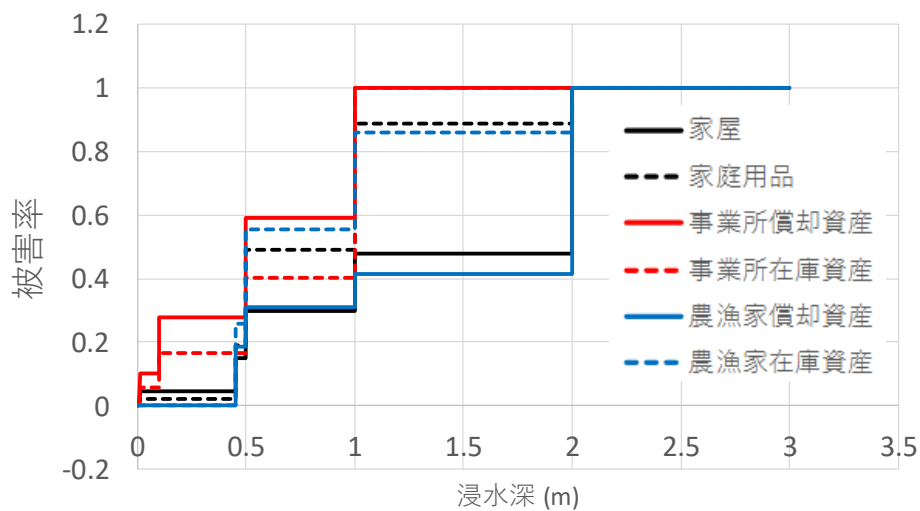


図 6 国交省の被害関数 (国交省(2005) [56]を参考に作成)

ここまで既往研究をレビューして明らかとなった高潮リスク評価の課題についてまとめると以下のとおりとなる。

- ① 確率論的な高潮ハザード評価に、高潮数値モデルによる氾濫計算の計算コストが高いこと
- ② ハザード評価の計算コストを下げる手続きをとると、結果の不確実性が大きくなること
- ③ 計算期間や天文潮位設定、その他のパラメータによる結果の不確実性に関する議論がないこと
- ④ 近年の災害による浸水深と被害率の関係に関するデータの蓄積がないこと

1.3 本研究の目的

本研究では、前述した研究背景や既往研究における課題を踏まえ、1) 天文潮位の不確実性を考慮可能でかつ計算負荷を低減させる高潮リスク評価手続きを提案し、2) その手続きを資産が特に集積する東京湾沿岸に適用してその有用性を確かめ、3) 代表的なパラメータが予想損失額にもたらす不確実性を確認するとともに、4) データが蓄積される保険金支払情報を用いた被害関数の構築方法について考察することを目的とする。

本論文が目指すところは高潮リスク評価におけるコストを下げ、評価に関わる不確実性を認識・減少させることで、より適正なリスク管理と保険料設定を実現し、人々の安心な暮らしに貢献することである。

1.4 本研究で提案する評価手続き

本研究で提案する、天文潮位の不確実性を考慮可能でかつ計算負荷を低減させる高潮リスク評価手続きを図 7 に示す。確率台風モデル等から算出された想定台風イベントセットを用い、まず高潮経験式により代表地点の高潮偏差を算出する。第二に、分潮の調和定数を用いて計算した天文潮位ヒストグラムからランダムに選択された潮位を、それぞれの想定イベントにおける経験式で計算された高潮偏差に加算し、合計水位を算出する。第三に、合計水位が上位の台風のみに対して高潮数値モデルにより、浸水深の平面分布を計算する。この手続きを JPM および JPM-OS と比較する (図 8)。前述した通り、JPM-OS は JPM の計算負荷を削減するため、代表台風のみを対象に高潮数値解析を実施し、数値計算対象外のイベントの浸水深を補間により推算する手法であるが、補間の際に不確実性が大きくなることが課題である。提案する手続きは、氾濫しうるイベントをまず経験式により簡易的に選定し、そのイベントを全て数値解析対象とすることで、計算負荷の削減と計算精度

の維持の両立を目指したものである。

保険を目的とした場合、高潮ハザードだけでなく損失額まで予想することが求められる。本論文における損失額は図 7 に示すとおり、次式のように推定する。

$$\text{損失額} = \text{資産額} \times \text{損害率}$$

$$\text{損害率} = \text{被害関数} (\text{浸水深} (\text{台風パラメータ}, \text{天文潮位}))$$

損失額は対象とする資産額に損害率を乗じることで求める。また損害率は、浸水深を引数とした被害関数の戻り値となる。ここでの浸水深は、確率変数となる。浸水深は、確率台風モデルにより推定された想定台風パラメータと、天文潮位ヒストグラムにより選択された天文潮位を用いて推定する。本論文では、浸水深は確率変数、資産額は定数、被害関数は関数として取り扱う。

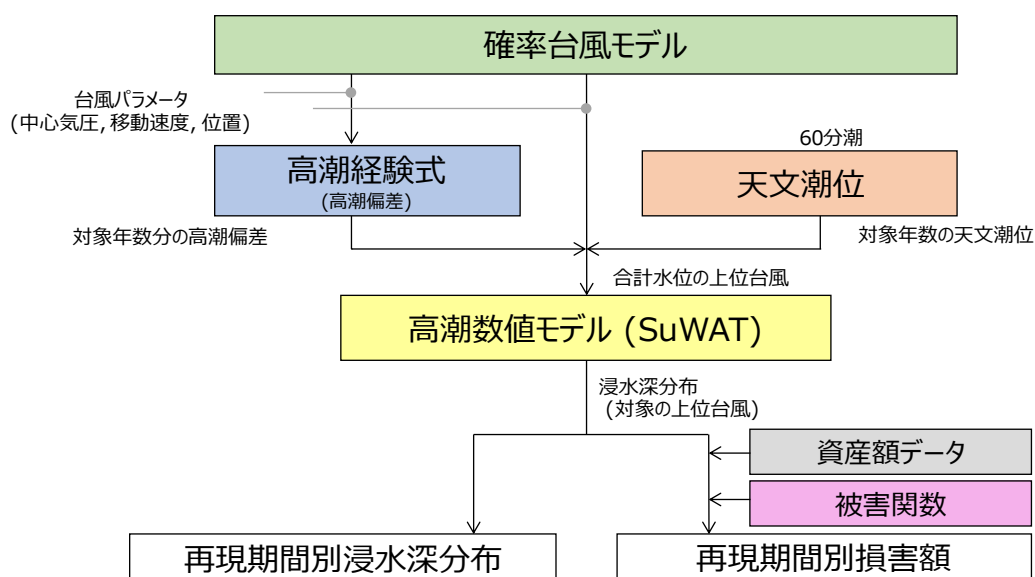


図 7 本研究で提案する高潮リスク評価手続き

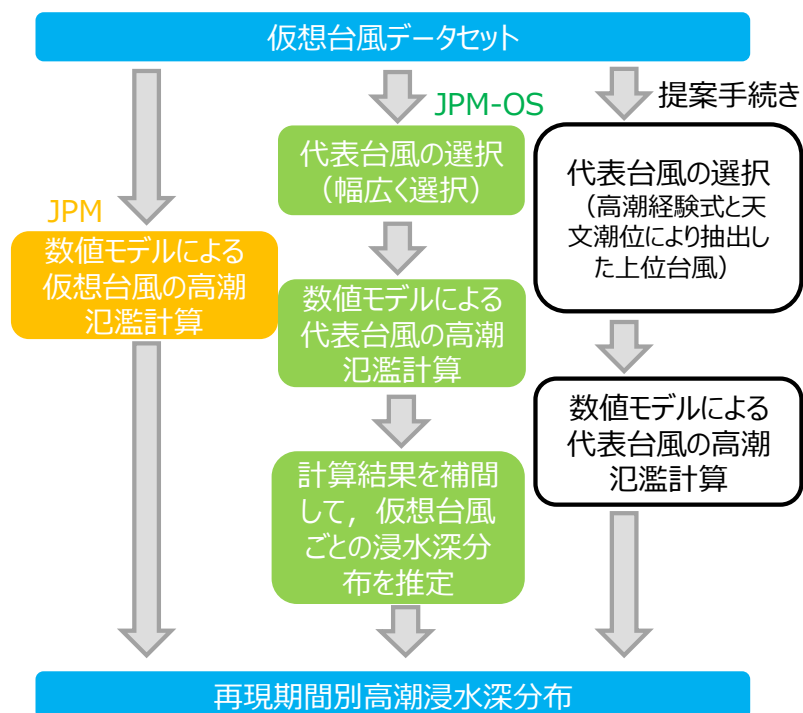


図 8 提案する手続きと既往研究との比較

1.5 本論文の構成

本論文の構成を図 9 に示す。

1 章の「序論」では、まず政府や保険業界における高潮リスク評価の現状や先行研究レビューに基づく研究課題を示し、本研究の意義を明確にして目的を示す。次に本論文で提案する保険を目的とした高潮リスク評価手続きを示し、既往研究との違いを明確にする。

2 章の「高潮ハザードの評価」では、まず提案した評価手続きを、資産が特に集積する東京湾に適用することで、想定イベント毎に浸水深分布を評価する。次に、それらの計算結果から再現期間毎の浸水マップを作成する。

3 章の「高潮損失額の評価」では、まず統計情報から資産額分布を作成し、2 章の結果と高潮被害関数から、再現期間毎の損失額を算出する。次に、1 章で提案した手続きにより年間期待損失額まで計算できているか考察する。

4 章の「モデルの不確実性評価」では、まず本研究における計算期間が適切かどうか確かめるため標本抽出の不確実性を評価する。次に、機械学習の手法であるニューラルネットワークを構築し天文潮位設定の不確実性を評価する。またその他の代表的なパラメータが予想損失額にどのような影響をもたらすか感度分析により確認する。

5 章の「被害関数の高度化」では、まず損害保険業界が所有する保険金支払情報を活用した被害関数の構築事例を示し、その構築方法について考察する。次に近年における 2 つの高潮イベントに対

し、数値モデルによる再現計算を実施することで、高潮被害関数構築に必要な浸水深分布を作成する。

6章の「結論」では、本論文にて得られた知見および課題をまとめる。

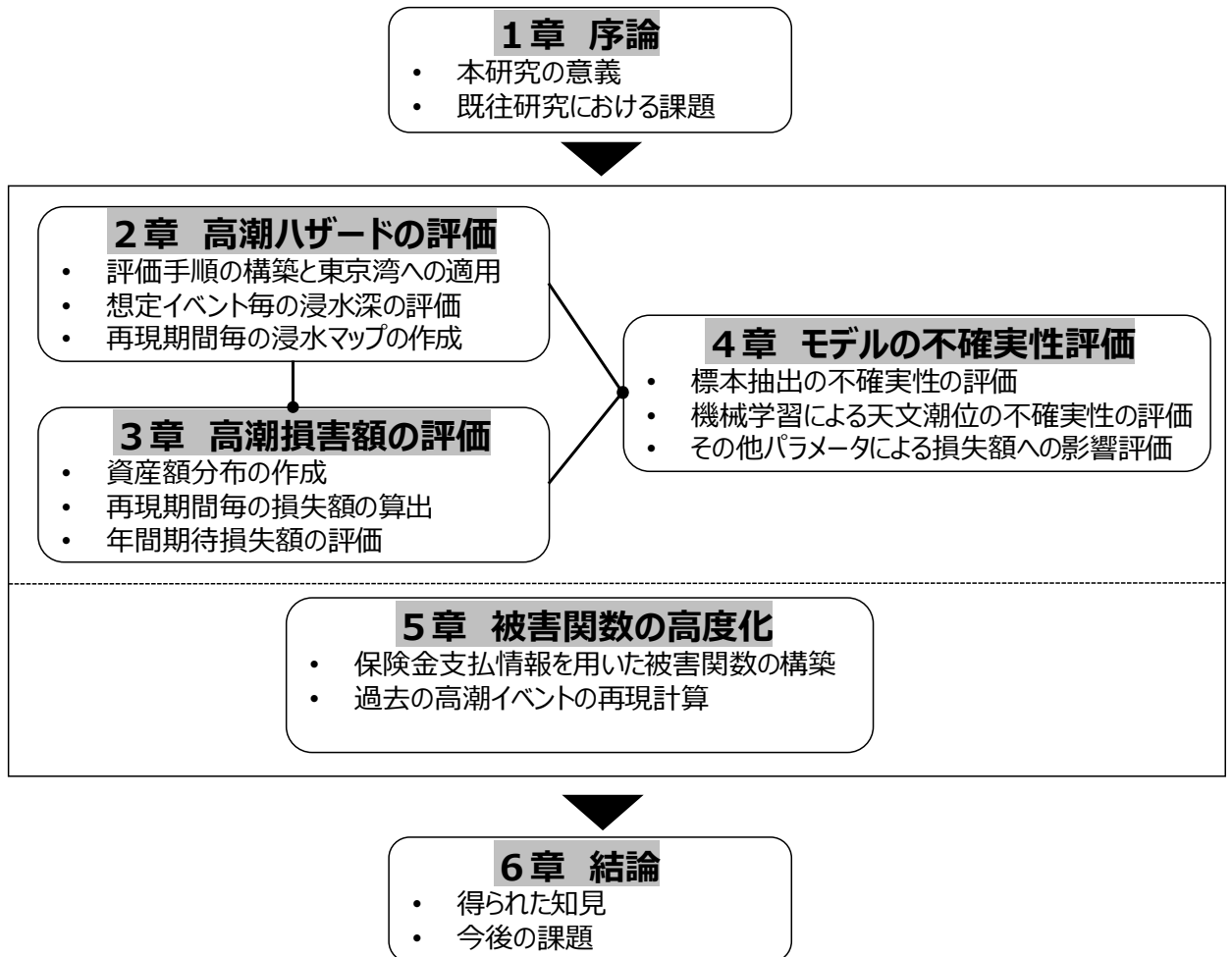


図 9 本論文の構成

2 高潮ハザードの評価

2.1 ハザード評価の手順

本章では、1章の図7で提案した高潮リスク評価手続きに従い、資産が集積する東京湾を対象に10,000年分の高潮ハザードを評価する。本論文における高潮ハザードとは、台風が発生し、台風の移動に伴う風速・気圧の変動、また海面変動や流動の変化、最終的には堤防を越流した水の氾濫までのそれぞれを示す。ハザード評価の最終的なアウトプットは台風毎の最大浸水深の平面分布である。本章では、台風毎の最大浸水深分布が得られた後、保険業界のアンダーライティングに必要な、再現期間別浸水深分布も作成する。

第一に、Nakajoら [61]の確率台風モデルによる想定台風10,000年分(1年分×10,000パターン)を用い、高潮経験式 [35]により東京(晴海、以下「東京」と表記)における最大高潮偏差を計算する。事前実験により、東京において高潮経験式による高潮偏差に天文潮位を加えた合計水位を対象に、計算期間毎に保険目的として重要な再現期間200年の値を確認したところ、5,000年程度で安定した(図10)。そのため本論文では計算期間を10,000年とする。第二に、東京において、経験式で求めた最大高潮偏差とヒストグラムからランダムに抽出した天文潮位の合計値が上位1,000個となる台風を対象に、Kimら [40]による高潮数値モデルSuWATにより、高潮浸水深を計算する。計算対象域には、9万超の台風データが存在し、その全てに対し数値解析を実施することは非現実的である。数値モデルによる計算対象台風を絞るため、提案した手続きに基づき、東京における水位が大きい台風のみを対象に数値解析を行うこととする。最後に、数値計算結果を用い、メッシュ毎に浸水深を並び替え、再現期間別の浸水深分布図を作成する。本論文では、1章で提案した高潮リスク評価手続きの有用性や、パラメータの不確実性の確認を目的としている。そのため、後述する確率台風モデルや高潮数値モデルは、代表的なモデルの一つとして取り扱い、本論文における各種検討に用いている。したがって、本論文ではこれらのモデルを構築、加工していない。

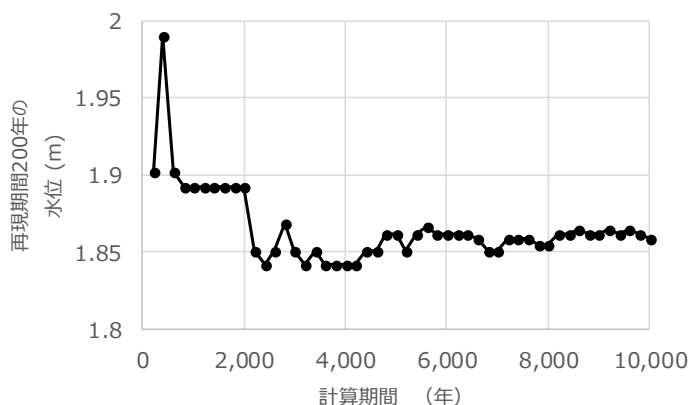


図10 経験式による計算期間毎の再現期間200年水位

2.2 確率台風モデル

経験式により東京の最大高潮偏差を推算するために、Nakajo ら [61]の確率台風モデルを利用する。本論文においては、提供を受けた Nakajo らの確率台風モデルによる想定台風をそのまま加工せず使い、高潮の評価を行った。なお、ここでの「台風」とは、全球の熱帯低気圧を指しており、また過去の観測情報を基にモンテカルロシミュレーションにより、1年間分の想定台風を10,000年分生成したものであり、将来気候を考慮したものではない。提供を受けた想定台風データの内容は、10,000年間分の全球における台風の発生年および時系列の中心位置・中心気圧・進行速度・進行方向である。

本節における説明は、Nakajo らの確率台風モデルの中身に関するものである。本研究では、東京湾を対象とするため図 11 の計算対象内（東経 130-145 度，北緯 28-38 度）の 9 万超の台風データを抽出した。確率台風モデルの解析フローを図 12 に示す。モデルは初期設定部と時間変化算定部より構成されている。まず初期設定部においては、過去の台風情報を用い、台風の年間総発生数・発生地点・発生時の台風特性（進行方向・進行速度・中心気圧）について、1 度グリッドごとにそれぞれの確率分布を求める。過去の情報は、IBTrACS (International Best Track Archive for Climate Stewardship, NOAA) [62]の 1950-2008 年における 6 時間毎の台風中心の座標および中心気圧の情報を用いている。年間総発生数の確率密度関数は、対数正規分布で近似する。発生地点は過去の台風発生確率の平面分布からモンテカルロシミュレーションにより決定する。発生時の進行速度と中心深度も同様に、対数正規分布で近似し、進行方向は正規分布で近似する。例として、Nakajo ら [61]による 10,000 年分の計算結果から作成した、台風の年間総発生数および台風発生時の中心気圧の深度の確率分布を示す（図 13, 図 14）。モデルは IBTrACS の台風の年間総発生数および台風発生時の中心気圧の深度を対数正規分布でよく近似できている [61]。また図 13 の曲線が階段状なのは、台風数が整数であるためである。次に、時間変化算定部においては、現在の特性値に対応した特性値の時間変化率に関する同時確率密度関数を 3 度グリッド毎に求め、進行方向・進行速度・中心気圧の時系列変化を計算する。図 15 に示すような同時確率密度関数で、現在の特性値 X_t に対し、次の時刻の特性値の変化率の確率分布からモンテカルロシミュレーションにより dX/dt を求め、刻み時間 dt を乗じて次の時刻の特性値 X_{t+1} を決定することを繰り返す。また確率台風モデルの計算結果には時系列の台風位置、中心気圧、進行速度が含まれているが、台風半径に関する情報は含まれていない。そのため本研究では、加藤ら [63]による平均半径と中心気圧との関係式を用い、台風半径データを補完する（図 16）。本研究で抽出した台風の中心気圧の最小値および平均値の頻度分布を図 17 に、進行速度の頻度分布を図 18 に示す。発生地点の分布や各特性値の検証結果は Nakajo ら [61]に詳しい。

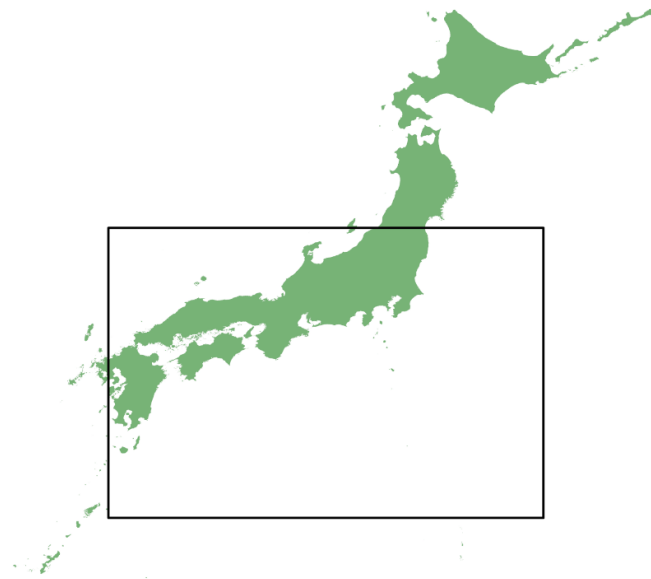


図 11 台風を抽出したエリア（東経 130-145 度，北緯 28-38 度）

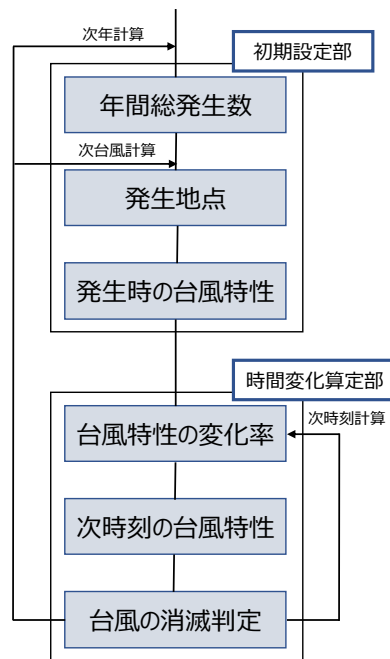


図 12 確率台風モデルの解析フロー（中條ら(2011) [64]を参考に作成）

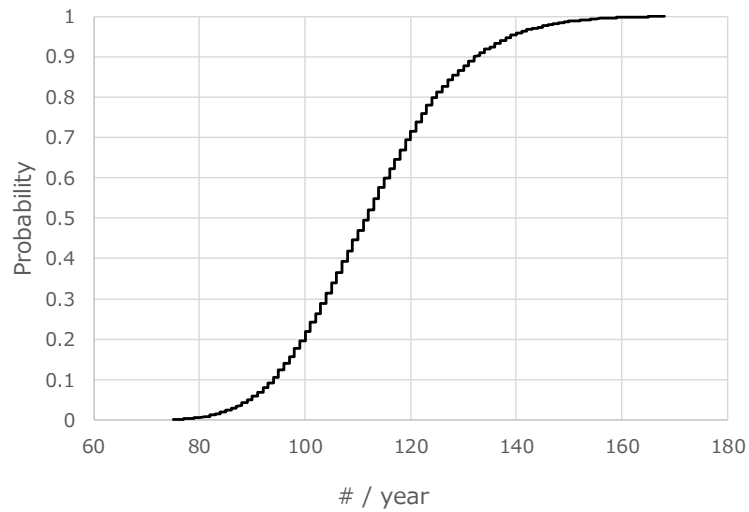


図 13 台風総発生数の確率分布 (Nakajo ら(2014) [61]より作成)

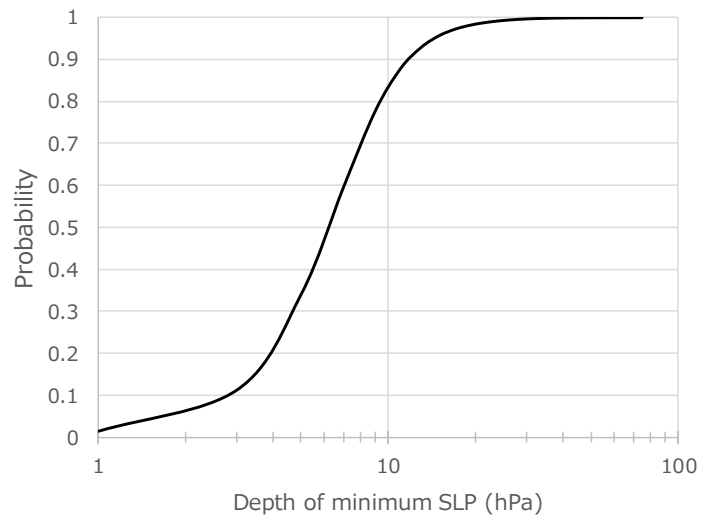


図 14 台風発生時における中心気圧の深度の確率分布 (Nakajo ら(2014) [61]より作成)

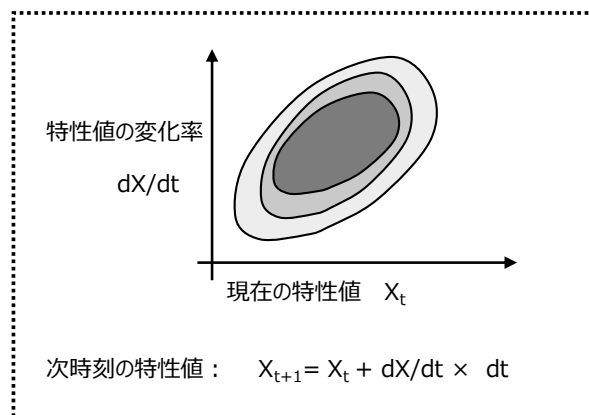


図 15 台風の特性値 (進行方向・進行速度・中心気圧) の時系列変化の計算方法 (中條ら(2011) [64]を参考に作成)

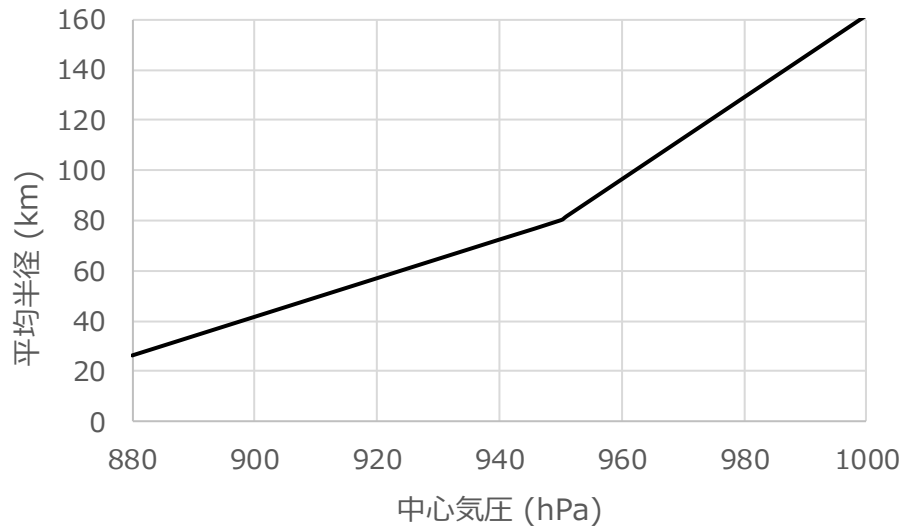


図 16 平均半径と中心気圧との関係 (加藤ら(2005) [63]を参考に作成)

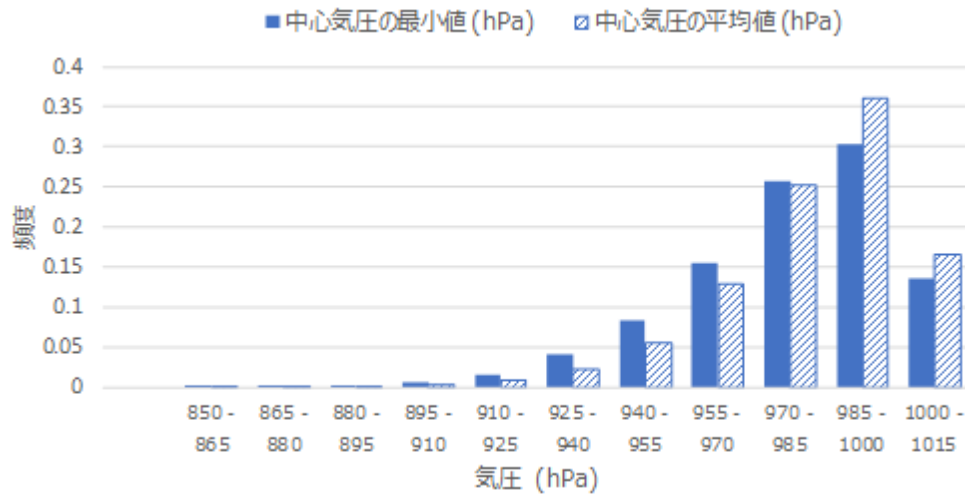


図 17 抽出台風の中心気圧の頻度分布

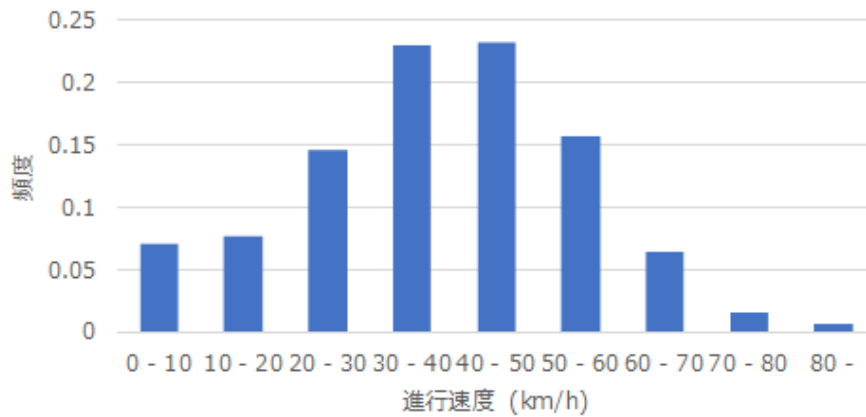


図 18 抽出台風の進行速度の頻度分布

2.3 経験式による高潮偏差の推算

高潮偏差を簡易的に求めるため、高潮経験式 [35]を使用する。この経験式は台風時の高潮偏差を簡易的に求める実験式であり、気象庁が主に 1950～1960 年代の観測値から全国 44 地点における係数を求めている。この高潮経験式は、過去の台風による観測値や数値モデルによる計算結果と比較することで検証されている。河合ら [37]は、東京における台風 0221 号および 0115 号について推定結果と観測結果とを比較した。経験式による最大高潮偏差は、台風 0221 号では 5 割程度過大評価したものの、0115 号では概ねよく合っていた。また安田ら [57]は、伊勢湾を対象に、本論文と同じモデルである Nakajo らの確率台風モデルによる 1 年×1,000 パターンの台風データセットを高潮経験式および SuWAT により解析し、比較した。その結果、高潮経験式は SuWAT と比較し、全体的に過小評価傾向があり、特に中心気圧が 960hPa 以下の規模の大きな台風については、計算精度が落ちることを示している。高潮経験式以外に既存の簡易なモデルが存在しなく、また高潮による水位の順位を決めることが本論文における高潮経験式の使用目的であるため、既存の高潮経験式を用いることとする。また、この高潮経験式を用いることで計算結果にどのような影響が表れるかについての考察は後述することとする。高潮経験式を下式に示す。右辺第一項が気圧寄与分、第二項が風寄与分に相当する。

$$H = a(1010 - P) + bW^2 \cos \theta + c \quad (3)$$

ここで、 H は高潮偏差(m)、 P は気圧(hPa)、 W は風速の最大値(m/s)、 θ は主方向(概ね湾軸の方向)と最大風速 W のなす角である。また a, b, c は各地点で既往の観測結果から求めた定数であり、本研究で計算する東京においては、主方向は南から 29° 西寄りの方向、 a は 2.332、 b は 0.112、 c は 0 と設定する [35]。

気圧および風速の平面分布は河合ら [37]に倣い、下式の通り計算する。気圧は Myers 分布 [65]で推定する。

$$P = P_0 + (\Delta P) \exp\left(-\frac{r_{\max}}{r}\right) \quad (4)$$

ここに、 P は台風を中心から距離 r (m)だけ離れた点の気圧 (hPa)、 P_0 は台風を中心気圧 (hPa)、 ΔP は気圧深度 (hPa)、 r_{\max} は台風半径(m)である。

地上風は、傾度風 U_l (m/s)に海面摩擦による減衰係数 C_l (一般的には 0.6～0.7 が使われており、

本研究では 0.65) を乗じる。傾度風は台風中心に対して反時計周りに回転し、風向は同心円状から 30 度内向きであるとする。

$$U_1 = C_1 \left(-\frac{fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{fr}{2}\right)^2 + \frac{\Delta P}{\rho_a} \times \frac{r_{\max}}{r} \exp\left(-\frac{r_{\max}}{r}\right)} \right) \quad (5)$$

ここで、 f はコリオリ係数 ($=2\omega \sin \phi$, ω : 地球の自転の角速度= 7.29×10^{-5} rad/s, ϕ : 緯度), ρ_a は大気の密度 ($=1.22 \text{kg/m}^3$) である。

台風の進行に伴う風 U_2 (m/s) は次式で与える。

$$\vec{U}_2 = C_2 \frac{U_1(r)}{U_1(r_{\max})} \vec{V}_r \quad (6)$$

ここに、 C_2 は低減係数 (本研究では 0.65), V_r は台風の進行速度 (m/s) であり、この成分の向きは台風の進行方向と同じとする。これらを用い、地上風速ベクトルを次式とする。

$$\vec{U} = \vec{U}_1 + \vec{U}_2 \quad (7)$$

2.4 天文潮位の推算

台風毎に設定する天文潮位を設定する。天文潮位は気象庁が公表する 60 分潮の調和定数 [66] を用い、海上保安庁 [67] を基に、2000 年 1 月～2099 年 12 月までの 100 年間の東京における時系列潮位を推算した。潮位の基礎式は次式である。

$$\eta = Z_0 + \sum_{i=1}^k f_i \cdot H_i \cdot \cos(V_i + u_i - \kappa_i) \quad (8)$$

ここで、 η は潮位、 Z_0 は平均潮位、 f_i は分潮 i の振幅に対する補正係数、 H_i は振幅、 V_i は分潮引数、 u_i は位相の補正係数、 κ_i は位相遅れである。

推算した潮位の検証のため、気象庁の観測潮位 [68] と比較した例 (2000 年 1 月) を示す。推算した時系列天文潮位は、観測による結果とよく一致している (図 19)。また 100 年間分の推算潮位と、JODC (Japan Oceanographic Data Center) [69] の 1961 年 1 月から 2017 年 12 月の観測潮位のヒ

ストグラムを作成した (図 20)。推算潮位によるヒストグラムは観測潮位のそれとよく一致している。頻度が最も高い潮位は平均潮位よりも大きくなり、ヒストグラムは正負非対称な形状となるが、これは図 19 に示されるような日潮不等の影響である [70]。台風毎に設定する天文潮位は、この天文潮位のヒストグラムからランダムに抽出することにより設定した。ランダムに設定したのは、本研究では確率論的な高潮推算を目的としており、目標となる日時を設定していないためである。

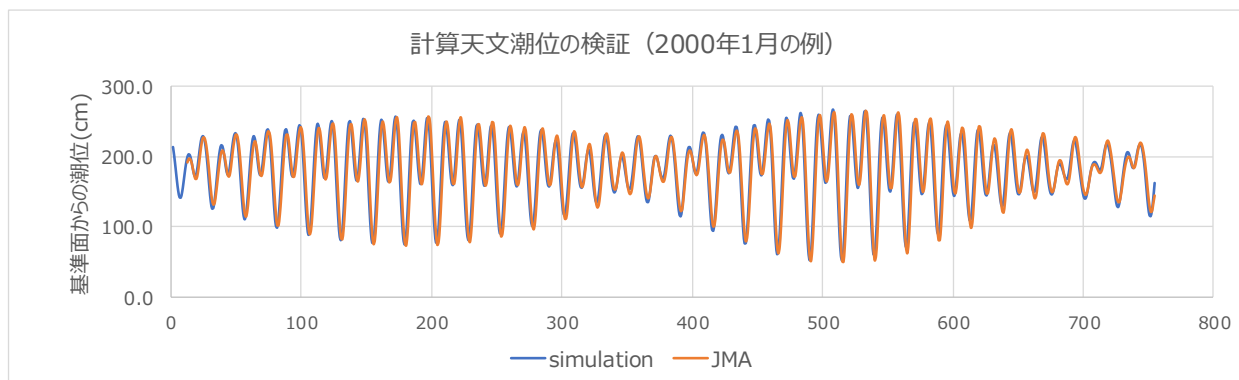


図 19 推算した天文潮位の検証結果例

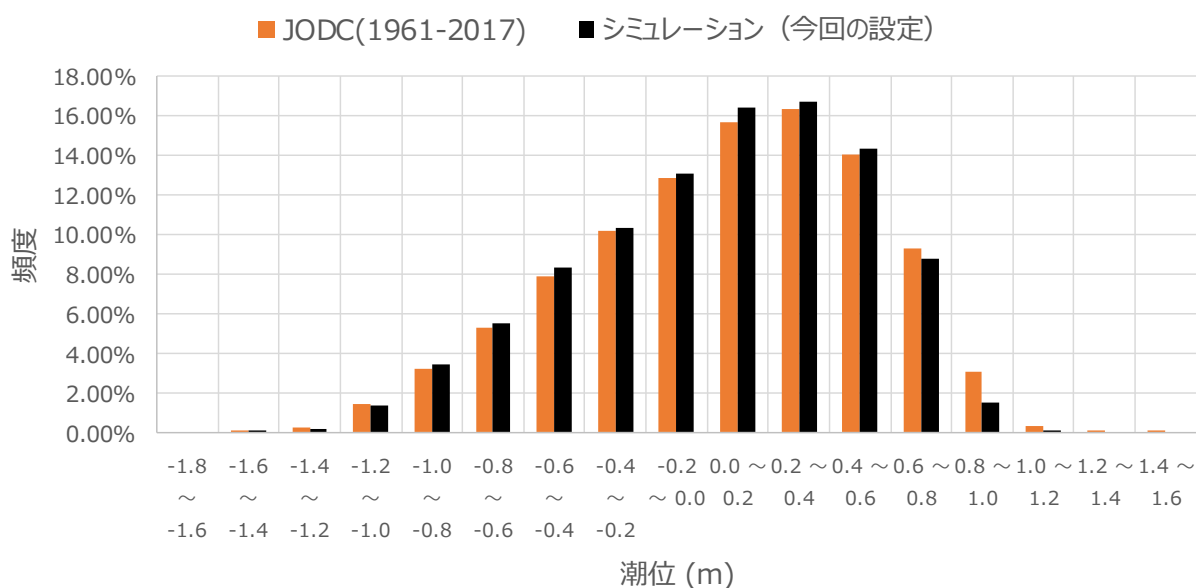


図 20 天文潮位のヒストグラム

2.5 高潮数値モデル

1) 数値モデルの概要

経験式により計算された東京における高潮と推算された天文潮を足し合わせた水位のうち、上位の水位をもたらす台風については、1章に示した高潮数値モデル SuWAT [40]を用いて浸水深までを解析する。間瀬ら [41]は、高潮のみの計算に比べ波浪を同時計算した場合に最大高潮偏差の再現性が大きく向上することを明らかにした。また合田ら [36]が示すように、wave set-up は波高・海底勾配・波形勾配で変化する。本研究では、東京湾沿岸全域を解析対象としており、さまざまな地理条件を対象としていることから、wave set-up を考慮可能な、高潮と波浪を同時計算する手法を採用する。気圧場および風速場は経験式の場合と同様で、高潮モジュールには気圧場と風場を与えて、波浪モジュールには風場を与える。SuWAT の基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial x} = fN - \frac{1}{\rho_w} d \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_s^x - \tau_b^x + F_x) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{NM}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial y} = -fM - \frac{1}{\rho_w} d \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_s^y - \tau_b^y + F_y) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

ここで η は高潮による基準面からの水位変化（上向きを正）、 M および N はそれぞれ x, y 方向における深さ方向の平均流速である。 P は大気圧、 f はコリオリパラメータ、 g は重力加速度、 d は全水深、 A_h は水平渦拡散係数、 ρ_w は海水密度、 τ_s および τ_b は海面せん断応力と底面せん断応力（ x, y の添字は方向を示す）、 F_x および F_y は x および y 方向の radiation stress である。radiation stress は、第三代波浪推算モデル SWAN (Simulating WAve Nearshore) [71]により計算する。SuWAT の方程式は、空間的には staggered Arakawa C grid, 時間的には leapfrog 法を用いて離散化する。

本研究では、計算領域を 3 つのドメインに分けてモデル化する (図 21)。図 21 の標高は、東京湾平均海面を 0 m とし、鉛直方向上向きを正とする。まず 1 番外側のドメイン (D1) では、グリッドサイズが $2,430 \times 2,430$ m となっており、九州地方から東北地方を含む海域をモデル化する。次に 2 番目のドメイン (D2) は、 810×810 m の解像度で東京湾・駿河湾を含む海域をモデル化する。最

後に1番内側のドメイン (D3) は、東京湾沿岸全域を覆う範囲を、90×90 m グリッドでモデル化する。

境界条件として、一番外側の領域 (D1) の開境界には、下式により水位 η を与える。

$$\eta = \eta_{tide} + \eta_{storm\ surge} = \eta_{tide} + (P_{\infty} - P)/g\rho_w \quad (12)$$

ここで、 η_{tide} は前節で設定された天文潮位であり、 P_{∞} は台風の影響がない場所の気圧 (=1013hPa)、 P は各地点の気圧である。 η_{tide} は前述の通り目標となる到達日時を設定していないため、時間的に変動させず一定とする。気圧 P は Myers 分布 [65] で計算される。2番目の計算領域 (D2) の開境界の水位は、D1 で計算された水位が入力され、3番目の計算領域 (D3) の開境界の水位は、D2 で計算された水位が入力される (1way-nesting)。

初期条件として、全計算領域 (D1,D2,D3) における海面水位は前節で設定された天文潮位とし、流速は 0 とする。天文潮位の平面分布は、氾濫計算にとって重要である。東京湾内の4験潮所の主要4分潮の振幅および遅角が、表1の通りそれぞれ大きく変わらないため、本論文では初期水位は平面的に一律とした。

表 1 東京湾内4験潮所の主要4分潮の振幅および遅角 [66]

Tide Stations	Amplitude (cm)				Phase lag (°)			
	M ₂	S ₂	O ₁	K ₁	M ₂	S ₂	O ₁	K ₁
Chiba	47.92	23.76	25.33	19.76	152.44	180.75	178.69	160.09
Tokyo	47.85	23.71	25.27	19.67	153.77	182.13	179.17	160.48
Yokohama	44.16	21.77	24.69	19.33	152.41	180.90	178.77	160.10
Yokosuka	40.78	19.98	24.18	18.98	151.78	180.54	178.67	160.13

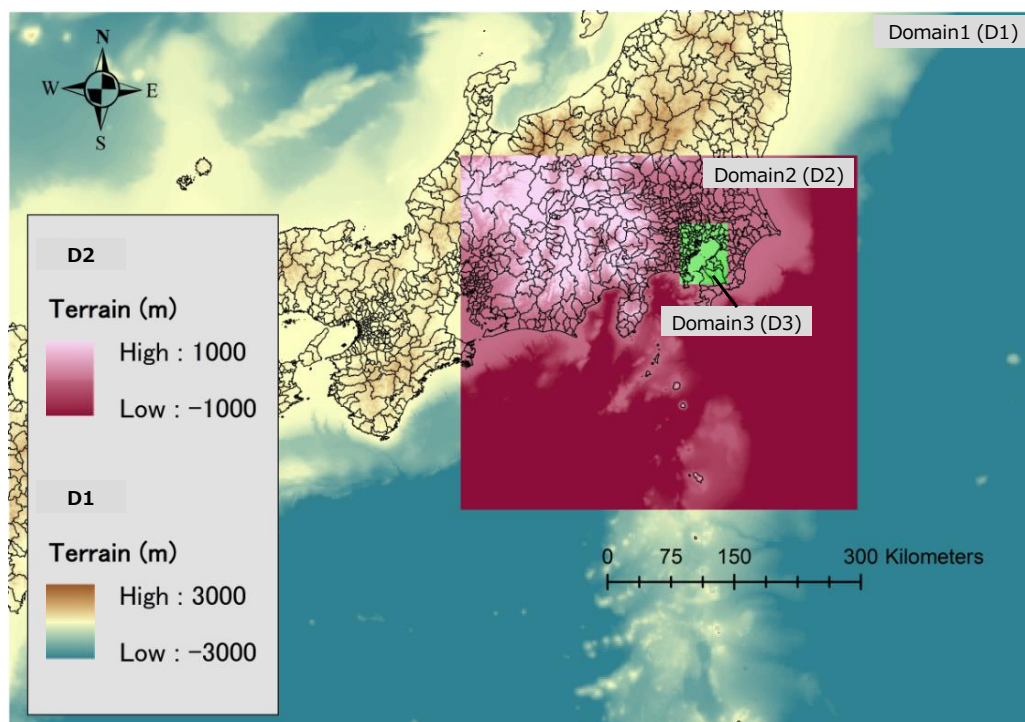


図 21 高潮数値モデルの各ドメイン

(グリッドサイズは D1 が 2,430m 四方, D2 は 810m 四方, D3 は 90m 四方)

2) 水深・標高・堤防・粗度係数

D3 の堤防・粗度係数データは内閣府 [72]を用い、90m メッシュでモデル化し、高潮数値モデルに用いる。全てのドメインの水深・標高も同様に内閣府のメッシュデータ [72]から構築したが、特に堤外地において朔望平均満潮位より低い標高を示すエリアが見られ、実態と乖離していた。浸水域および浸水深を過大評価する可能性があるため、D3 における標高モデルは国土地理院の 5m メッシュの数値標高モデル [73]により、内閣府の陸上データを補正し、高潮数値モデルに入力する (図 22)。図 22 の標高は、東京湾平均海面を 0m とし、鉛直上向きを正として図示しており、同図には東京湾内の 4 験潮所 (東京, 千葉, 横浜, 横須賀) も併せて示している。

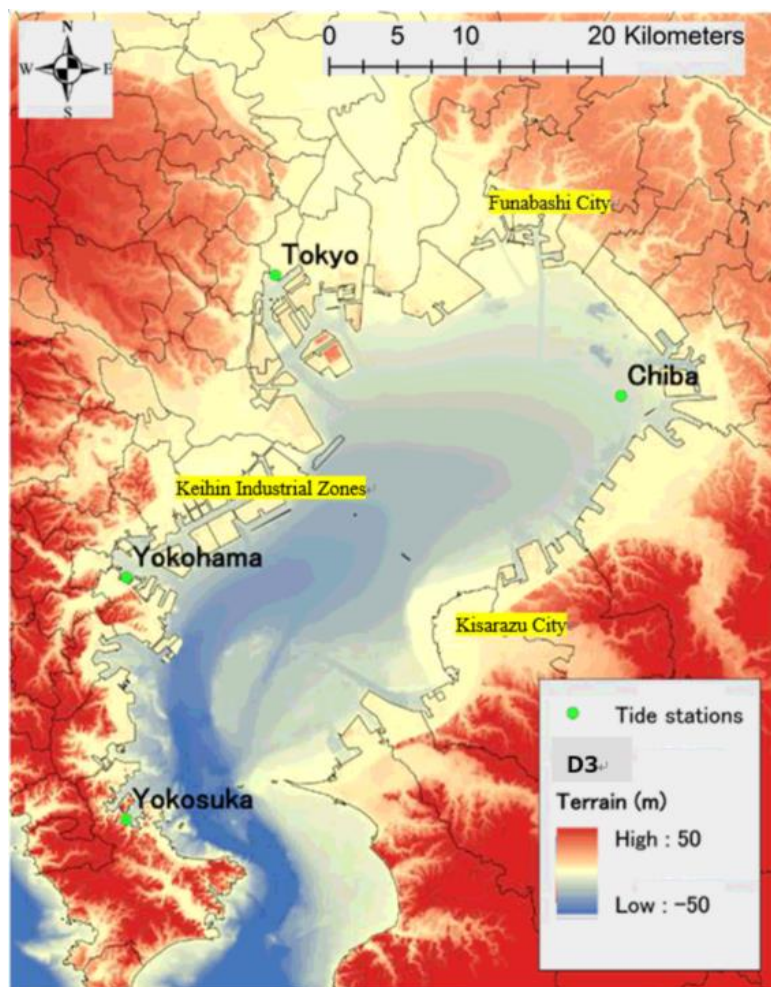


図 22 東京湾沿岸の地形モデルと験潮所位置

3) 数値モデルの検証

高潮数値モデルによる解析に先立ち、モデルの精度を検証する。1949年のキティ台風以降、東京湾では大規模な高潮氾濫が発生していない。しかし、1985年6号台風はキティ台風に匹敵する高潮を引き起こした [74]。そこで本研究では、構築したモデルで当該台風の再現計算を実施し、その計算結果と観測された2地点（東京・千葉）の時系列高潮偏差 [75]および4地点（東京・千葉・横浜・横須賀）の最大高潮偏差 [76]とを比較した。1985年6号台風の経路を図23に示す。

1985年6号台風を高潮数値モデルにより再現した結果を図24～図26に示す。図24は計算した最大高潮偏差分布を示す。図25には1985年7月1日の東京および千葉における時系列高潮偏差、図26には東京・千葉・横浜・横須賀の4地点における最大高潮偏差を示す。各地点の高潮偏差の解析結果は概ね観測値と一致しており、モデルの再現性は確保できていると考えられる。千葉では高潮偏差のピークは1度しか発生しないが、東京では第1のピークからおよそ1時間遅れて第2のピークが現れる。これは高潮の強制波が湾奥で反射した自由波で、東京湾の固有振動のひとつであると考えられており [76]、数値モデルでもこの現象を再現することができた。また、4地点における最大高潮偏差は、どの地点も約10cm以内の精度で再現できている。以降の数値計算では、本モデルを用いた解析を行う。

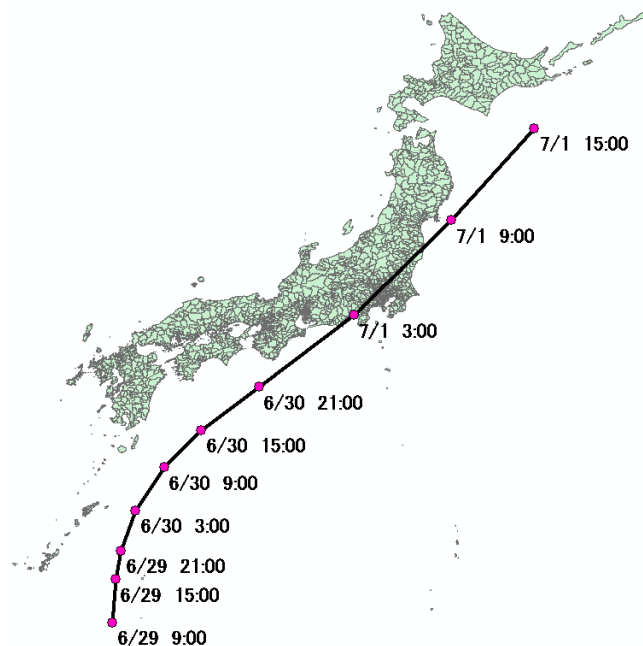


図 23 1985年6号台風の経路

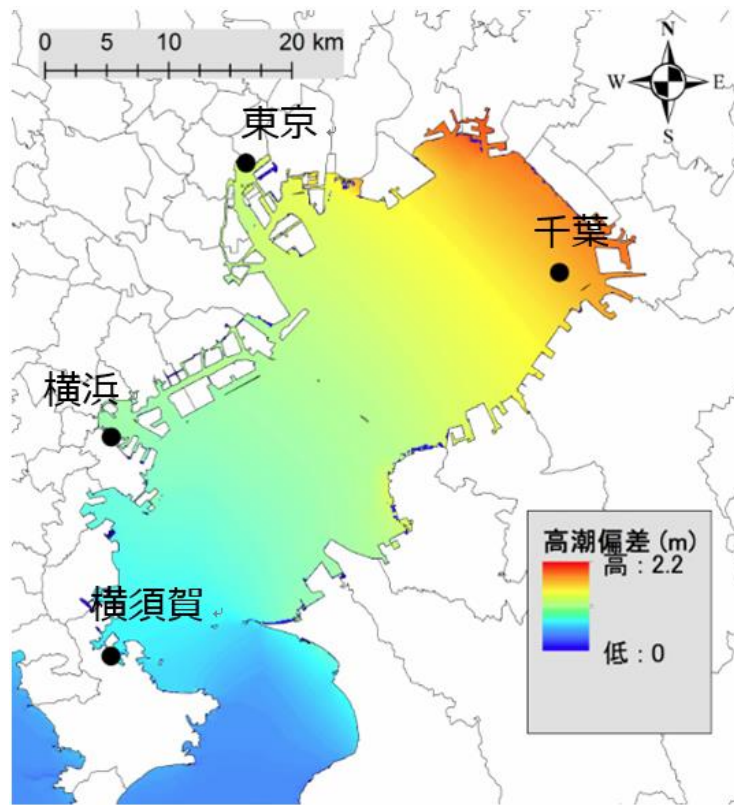


図 24 最大高潮偏差分布の再現結果

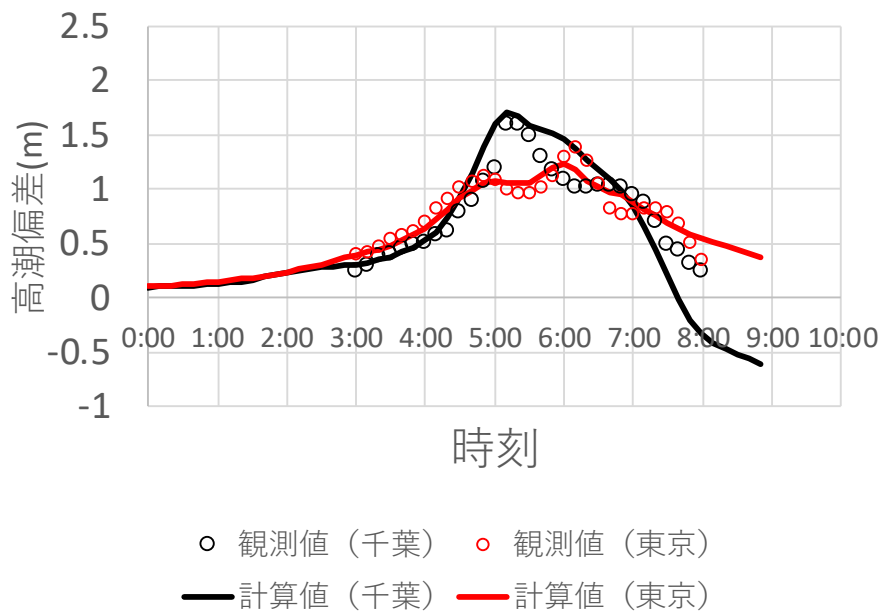


図 25 時系列高潮偏差の検証結果 (1985年7月1日)

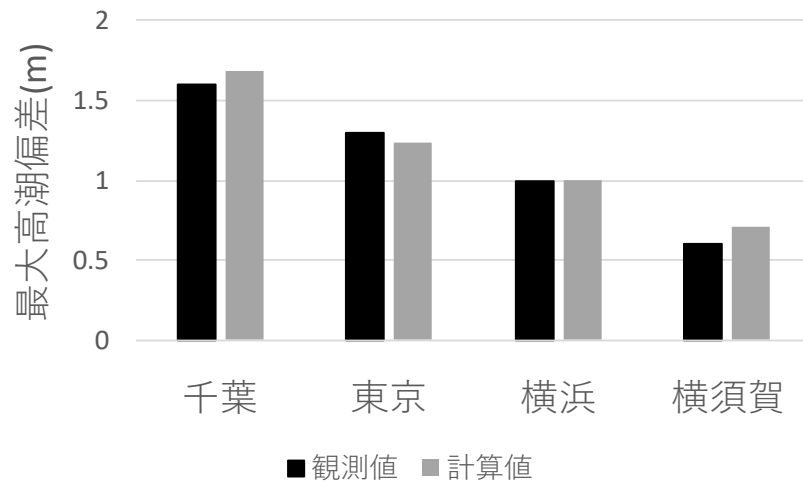


図 26 東京湾内の 4 験潮所における最大高潮偏差の検証結果

2.6 ハザード推定

1) 抽出した台風経路

経験式による最大高潮偏差に設定した天文潮位を加算した合計水位が、東京験潮所において上位 1,000 位以内に入った台風の経路を図 27 に示す。抽出した台風は、特に東京湾の西側を通る経路が多い。これは台風の進行方向右側は危険半円と呼ばれ、台風がもたらす風の風向と、台風自身の進行方向とが重なり、台風が東京湾の西側を通過した際に東京湾における風速が比較的大きくなるためである。

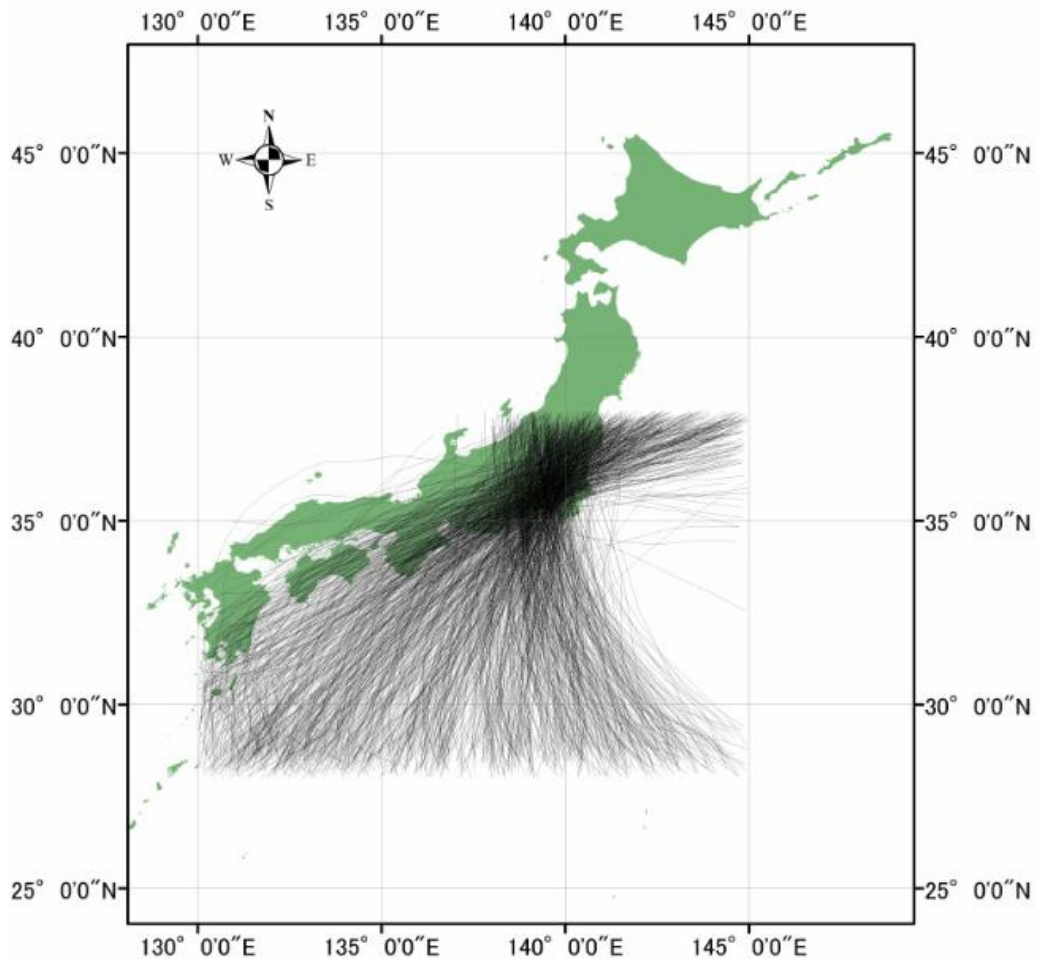


図 27 水位が上位 1,000 位以内の台風経路

2) 高潮偏差と水位

抽出した 1,000 台風について、数値モデルと経験式の東京における最大水位の比較を図 28 に示す。経験式による最大水位から上位 1,000 台風を抽出しているため、縦軸の 1.3 m 付近以下は経験式による水位は 1,000 位以下となり、点が存在しない図となっている。一方で横軸の数値モデルによる結果は、経験式と設定された天文潮位が同一であるにもかかわらず、ある経験式による水位に対して結果にばらつきがある。これは経験式と数値モデルによる高潮偏差に差があるためである。東京において抽出された 1,000 台風に対するモデル別の推算最大高潮偏差の頻度分布を図 29 に示す。黒いバーは数値モデル SuWAT, 灰色のバーは経験式による最大高潮偏差である。この結果から、最大高潮偏差が 1 m 以下では経験式のほうが SuWAT よりも台風数が多く、1 m 以上ではその逆となる。数値モデルと経験式との最大高潮偏差の計算結果を比較すると、1,000 台風のうち 763 台風について、数値モデルが経験式を上回った (図 30)。すなわち、数値モデルによる結果が経験式に

よる結果を上回る場合が多いため、推算最大高潮偏差の頻度分布が推移するといえる。安田ら [57] は伊勢湾において、数値モデルと比較して経験式の結果は過小評価であることを示しており、本研究による東京湾における比較でも、先行研究と整合した結果になった。

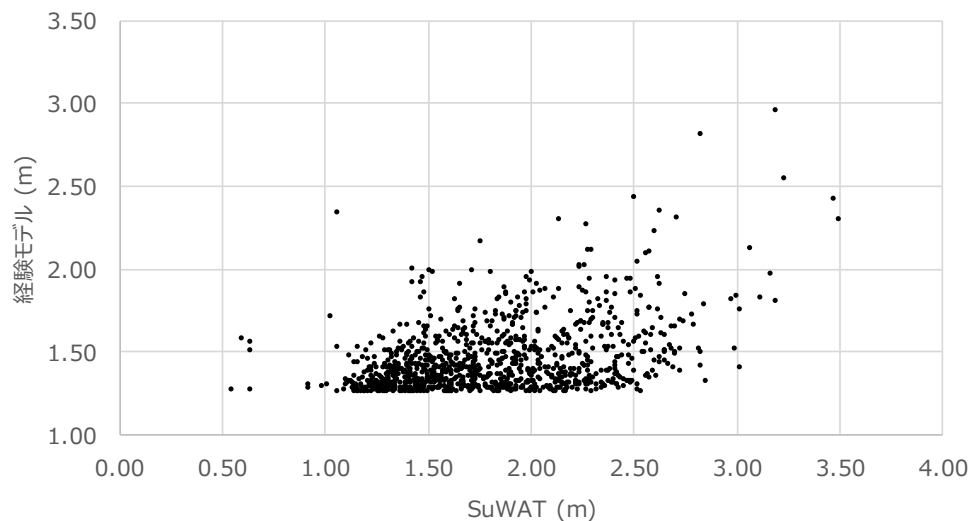


図 28 数値モデルと経験式による最大水位

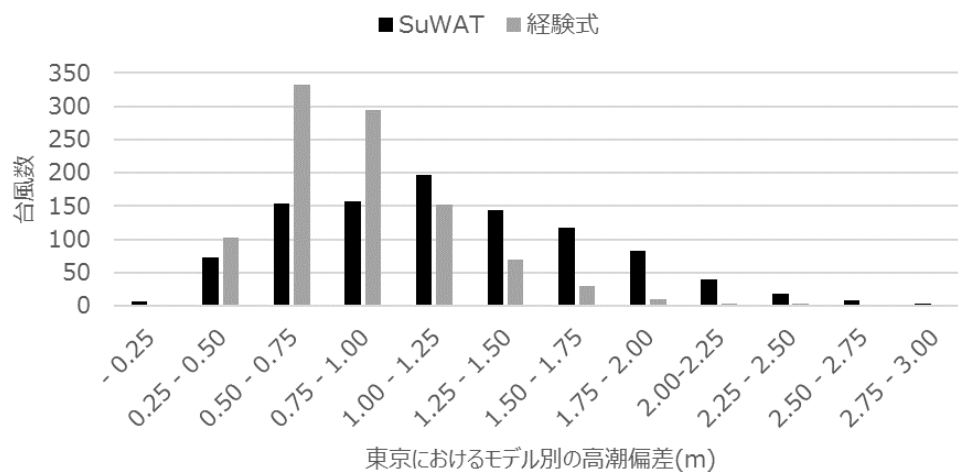


図 29 モデル別の最大高潮偏差の頻度分布 (東京)

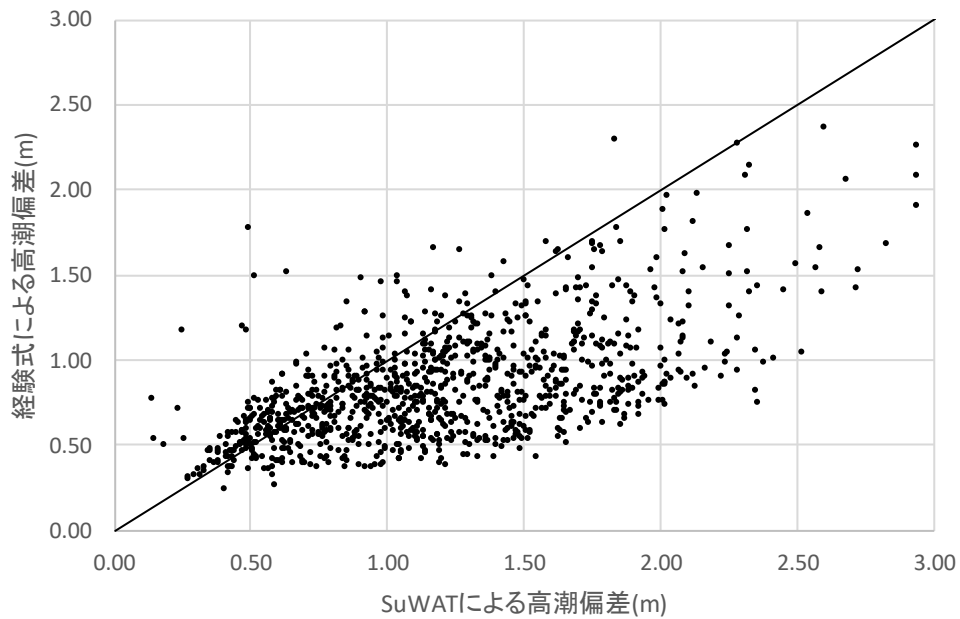


図 30 数値モデルと経験式による最大高潮偏差

各験潮所における最大高潮偏差および東京湾平均海面からの水位の頻度分布を図 31 に示す。特に高潮が卓越する湾奥に位置する東京と千葉においては、より大きな最大高潮偏差が計算される台風が他の 2 験潮所（横浜・横須賀）と比べて多かった。平均的な高潮偏差は千葉，東京，横浜，横須賀の順番に大きい結果となったが，推算した台風毎にみると必ずしもこの順番とは限らない。辻田ら [13]は，代表地点の高潮偏差から被害額を推定するロス関数を開発したが，代表地点の高潮偏差が増加すれば必ずしも被害額が増加するわけではないことも示されている。これは台風諸元によって高潮偏差の分布特性が変わるからだと考えられる。

水位については，東京および横浜は 1.25 から 1.50 m，千葉は 1.50 から 1.75m，横須賀は 1.00 から 1.25m となる台風数が最も多い結果となり，高潮偏差よりも全体的に大きくなる傾向となる。この理由は設定した天文潮位にある。数値計算を実施する台風は，経験式を用いた最大高潮偏差にランダムに設定された天文潮位を加え，東京における合計水位が上位 1,000 位となる台風を対象として選んでいる。そのため，最大高潮偏差だけでなく，天文潮位も相対的に大きな台風イベントを選択していることになる。数値計算を実施した 1,000 台風の天文潮位の平均値は 0.62 m となる。

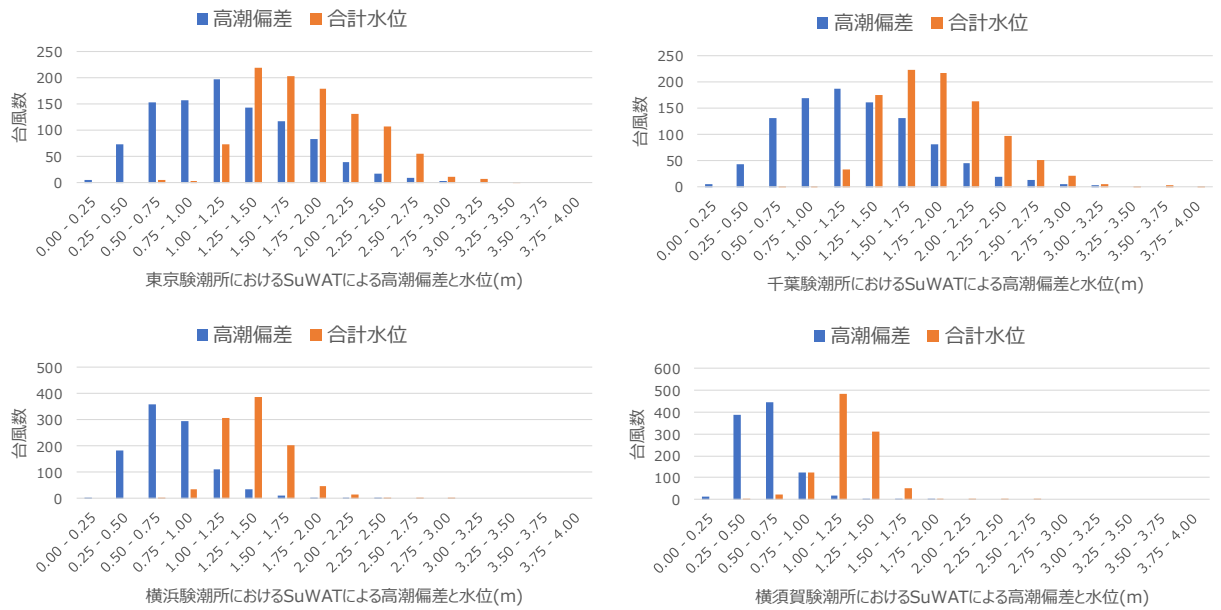


図 31 4 験潮所における数値モデルによる最大高潮偏差と水位のヒストグラム
(左上が東京, 右上が千葉, 左下が横浜, 右下が横須賀)

3) 浸水面積と浸水深分布

1,000 台風に対し高潮数値モデルで計算した最大浸水面積のヒストグラムを図 32 に示す。1,000 台風のうちほとんどは、最大浸水面積が 15 km²以下となった。また 3 割程度の台風に関しては、最大浸水面積が 5 km²以下となった。これは、モデル上で河川や海岸の堤外地が浸水するケースである。しかしこのような浸水域は、高潮リスクが高いため、住宅や工場等が存在しないケースが多く、建物などに対する経済的被害は少ないと考えられる。一方で、数値モデルにより推算された浸水面積が最大のものでは、およそ 45 km²となる。このような大規模の浸水が発生した場合、海岸の背後に位置する工場などが多く浸水する。特に湾奥に位置する千葉県船橋市や市川市の沿岸部では大規模な浸水が予想された。また、川崎港周辺は、京浜工業地帯の中核を成すが、大規模な高潮が発生すると、浸水する結果となった。

高潮浸水深分布の計算結果の一例を図 33 に示す。これは、湾奥の千葉港や木更津市周辺に浸水が発生しているイベントである。

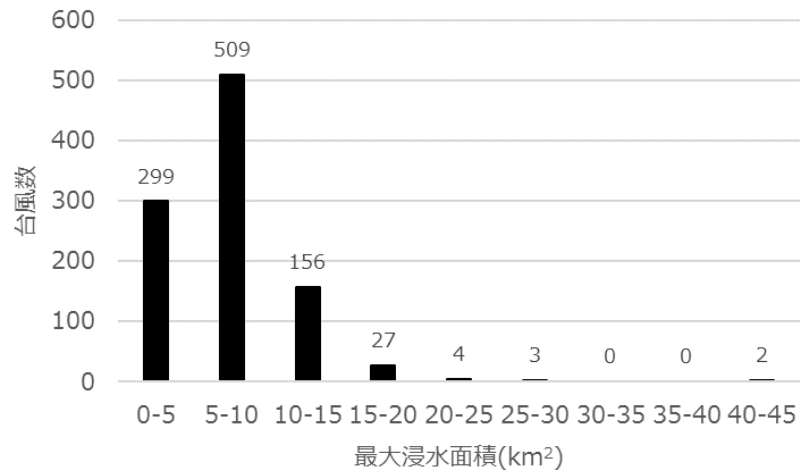


図 32 1,000 台風の最大浸水面積ヒストグラム

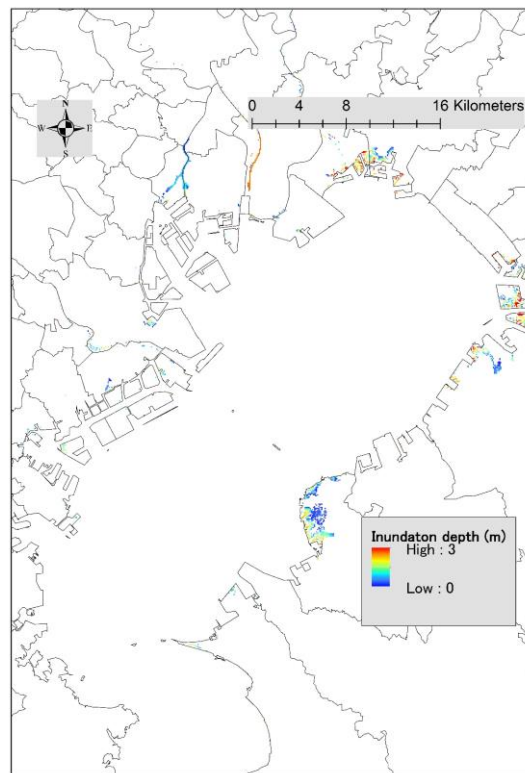


図 33 数値計算により求められた最大浸水深分布の一例
(湾奥の千葉港や木更津市周辺で浸水が発生したイベント)

4) 再現期間毎の高潮偏差の検証

ここでは、確率台風モデルの結果と高潮数値モデル・高潮経験式を用いて推算した、再現期間毎の高潮偏差を検証する。観測データから求めた東京における再現期間ごとの高潮偏差 [77]と、モデルにより推算された結果を比較する。

図 34 に東京における再現期間ごとの年最大高潮偏差の計算結果を示す。本研究では確率台風モデルから抽出した 9 万超の台風を対象に高潮経験式および数値モデルにより解析を実施している。図中には、経験式のみによる結果と、経験式と SuWAT による結果を混合した結果を示している。後者は、9 万超の台風を対象に経験式にて求めた高潮偏差データセットを準備し、数値モデルにより計算された 1,000 台風の最大高潮偏差のみを数値モデルによる結果に置き換えたものである。この計算結果は、再現期間 10 年程度から曲線の勾配が緩くなることが特徴である。これは図 30 に示すように、経験式に過小評価傾向があるためであり、再現期間 10 年前後を境に数値モデルによる結果が支配するようになり、曲線の勾配に変化がみられる。また再現期間数百年を超えると、評価に用いるサンプル数が減るため、曲線の勾配にばらつきがみられる。また観測値を用いた既往研究 [77]による結果との比較図を示す (図 35)。既往研究 [77]では、観測結果から Gumbel 分布、一般化極値分布、平方根指数型最大分布による推算結果も示している。ここでは既往研究 [77]の結果と合わせるため、計算結果は再現期間 100 年まで表示している。また、計算結果の不確実性を考慮し、10,000 年間の計算結果をブートストラップ法により、100 パターン分作成し、90%信頼区間も併記した。両者と比較すると、再現期間 10 年では、既往研究は年最大高潮偏差が概ね 85~100 cm であるが、計算結果では約 80 cm とやや過小評価している。一方、再現期間 100 年では、既往研究は年最大高潮偏差が概ね 125~160 cm であるが、計算結果では約 185 cm とやや過大評価傾向がみられる。これは、確率台風モデル [61]の特徴によるものであると考えられる。図 36 における観測値の中心気圧の深度のヒストグラムのフィッティングカーブは、観測と比較し裾が長い。すなわち、SuWAT による数値解析を実施した低頻度の台風の中心気圧は、観測値と比べて低く、また風速も大きくなることとなる。高潮は気圧と風速に依存して変化することから、本論文における低頻度の高潮偏差が観測と比較して大きくなると考えられる。観測による気圧の頻度分布は、確率台風モデルの平均値+標準偏差の範囲内にあるため、テール部分の気圧について、自動的に確率台風モデルの精度が低いことを意味するわけではない [61]。

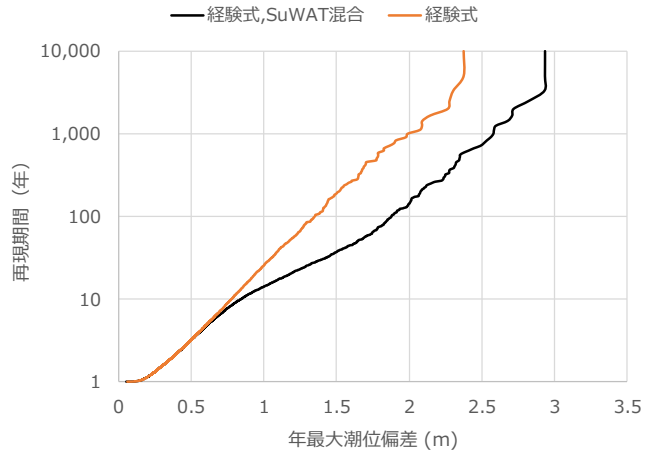


図 34 再現期間ごとの年最大高潮偏差

(オレンジ：経験式のみにより作成，黒：1,000 台風は数値モデルでその他は経験式により作成)

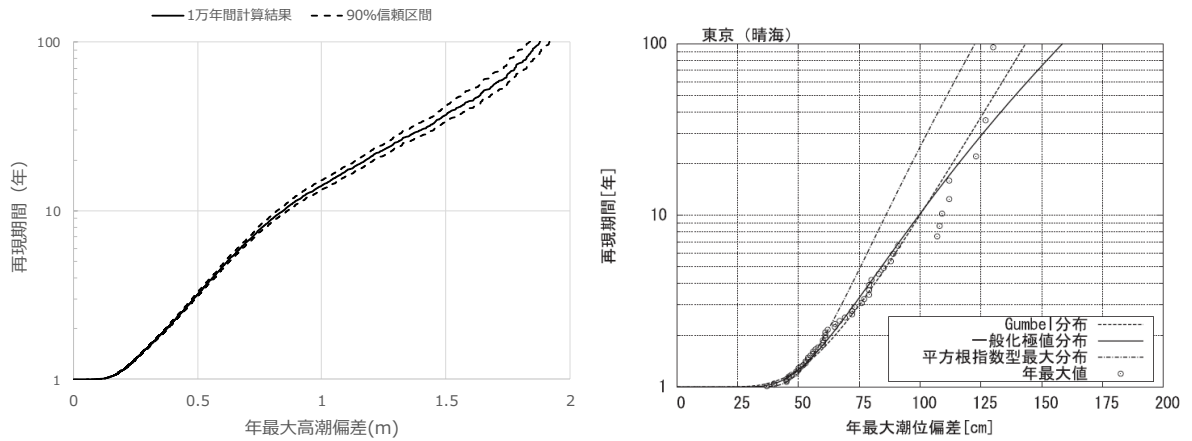


図 35 再現期間毎の年最大高潮偏差の比較 (左：本研究，右：既往研究 (比屋定ら(2011) [77]))

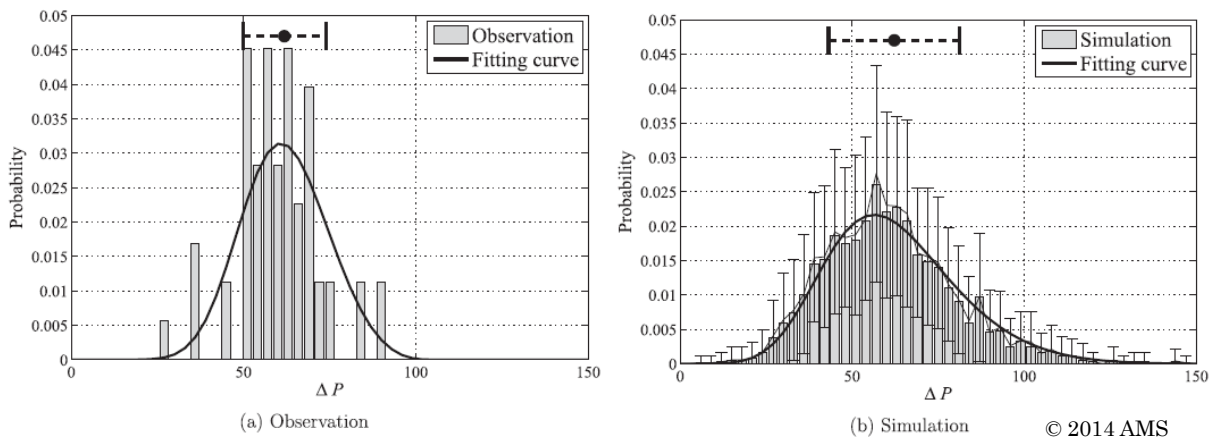


図 36 台風の中心気圧の深度の比較 (左：観測値，右：確率台風モデル，縦軸は頻度，棒グラフは観測およびシミュレーション結果，曲線は GEV 分布，水平方向のエラーバーとその間の点は信頼区間 (平均値±標準偏差) と平均値，鉛直方向のエラーバーは信頼区間 (平均値±標準偏差)) (Nakajo ら(2014) [61])

5) 再現期間別浸水深分布

高潮数値計算によりメッシュ毎に得られる 1,000 台風分の浸水深を大きい順番に並び替え、再現期間別の浸水深を決定する。例えば、あるメッシュにおいて一番大きい浸水深は 10,000 年間で最大の浸水深であるため再現期間は 10,000 年であり、2 番目に大きい浸水深は 10,000 年に 2 回発生するとして再現期間が 5,000 年であるとする。本研究では、数値計算による 1,000 台風を対象とした計算結果から各メッシュで同一の再現期間の浸水深の分布図を作成する。

図 37～図 42 に、再現期間 200、500、1,000、2,000、5,000、10,000 年の浸水深分布を示す。再現期間 200 年では、大河川の堤外地で浸水が見られるが、大規模な氾濫は計算されていない。再現期間 500 年では、湾奥の千葉県沿岸で一部浸水が見られるようになるが、湾全体として大きな浸水範囲は得られていない。再現期間 1,000 年では、木更津市沿岸でも浸水が広がる。再現期間 2,000 年では、木更津市沿岸や千葉市における浸水がさらに拡大する。再現期間が 5,000 年になると、船橋市周辺などで浸水範囲は広がり、千葉市沿岸や京浜工業地帯も浸水する。再現期間 10,000 年になると、各所の浸水はさらに拡大する。

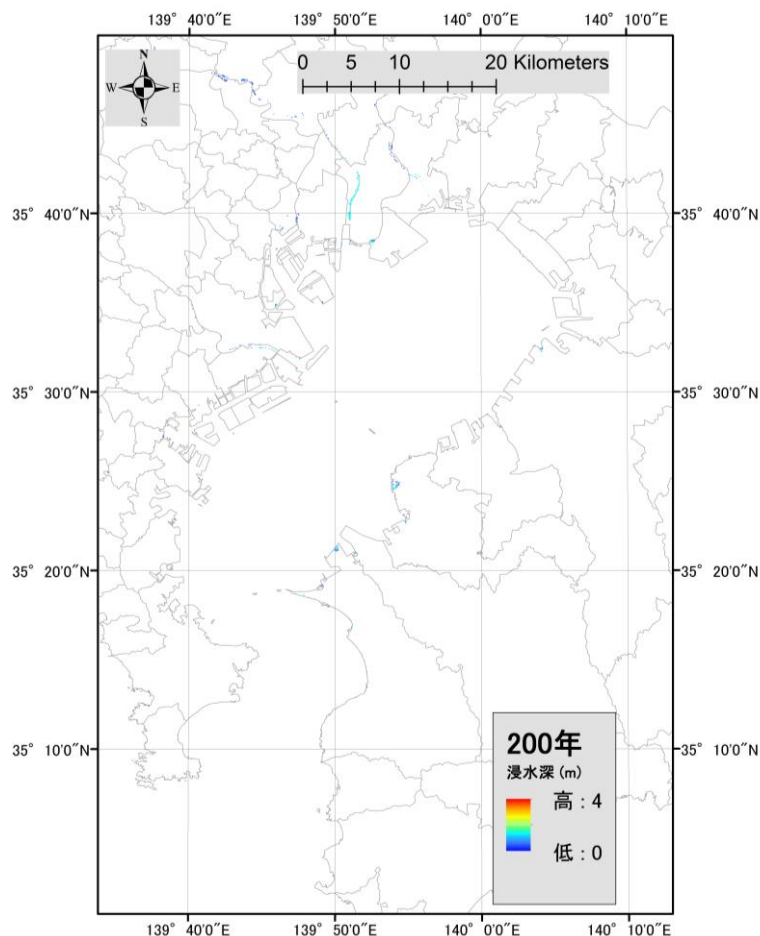


図 37 再現期間 200 年の高潮浸水深分布

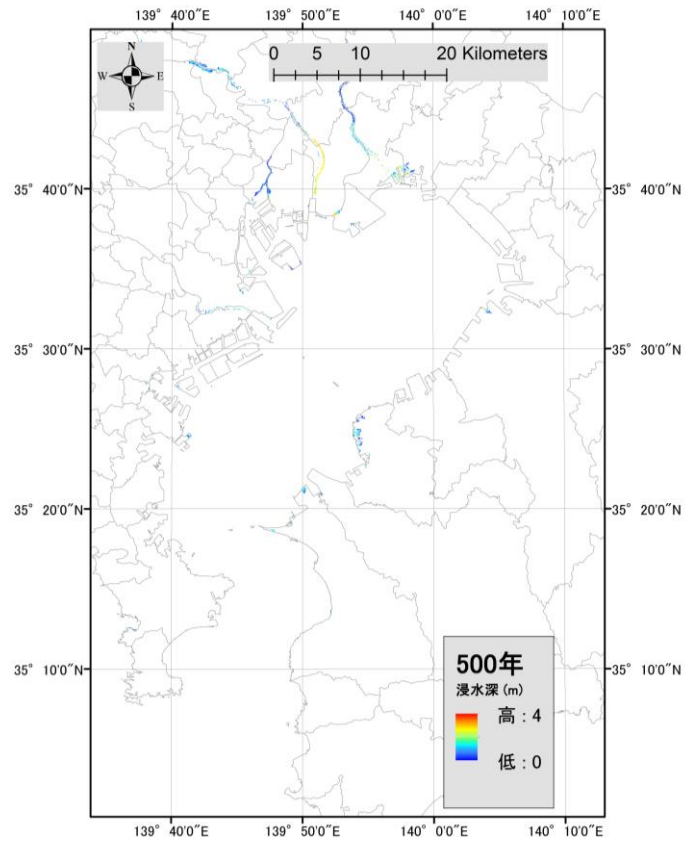


図 38 再現期間 500 年の高潮浸水深分布

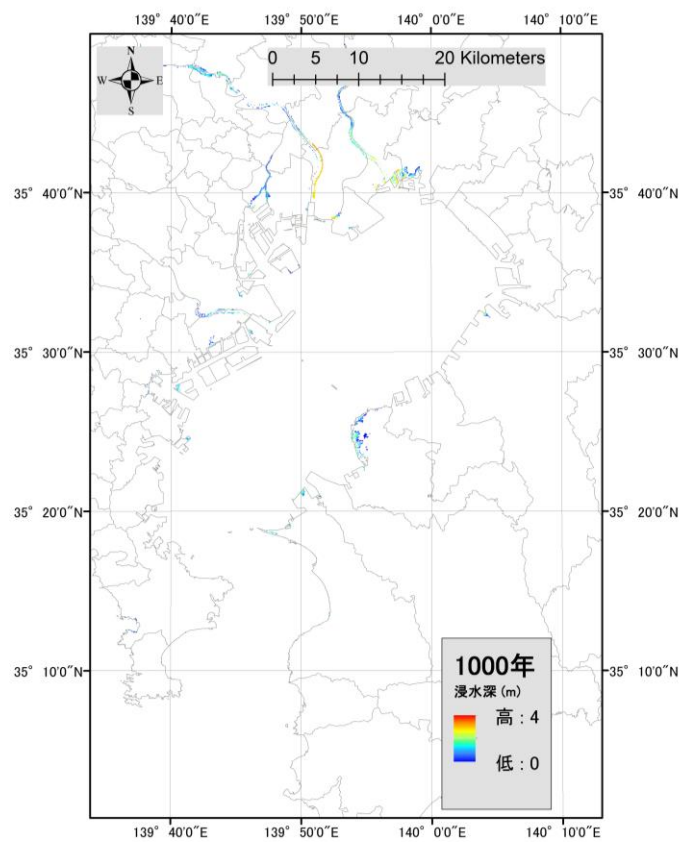


図 39 再現期間 1,000 年の高潮浸水深分布

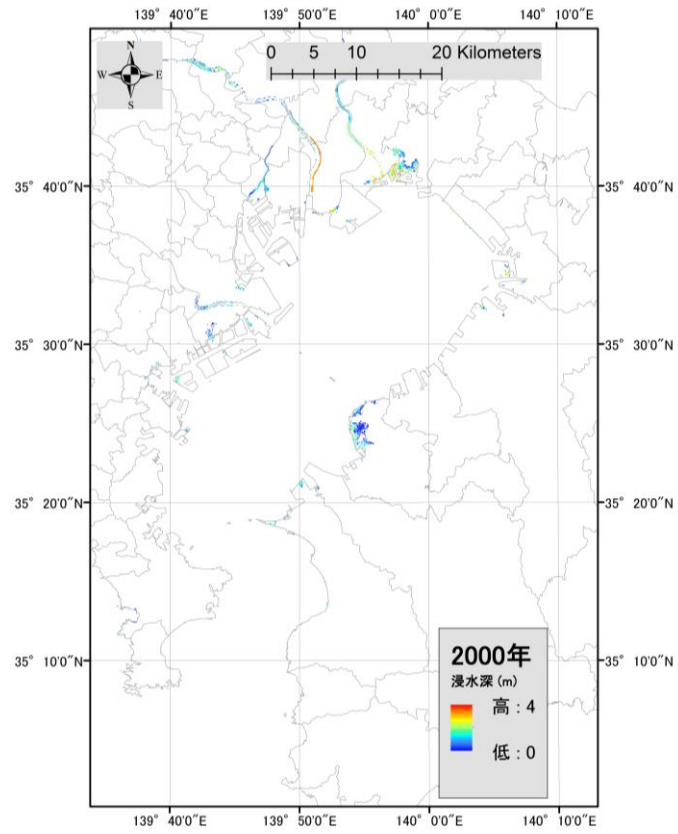


図 40 再現期間 2,000 年の高潮浸水深分布

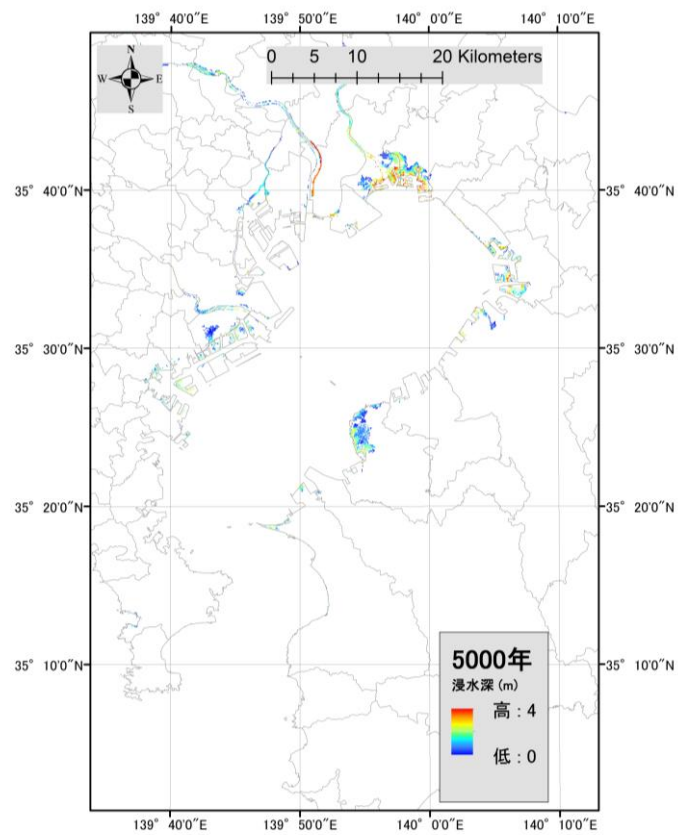


図 41 再現期間 5,000 年の高潮浸水深分布

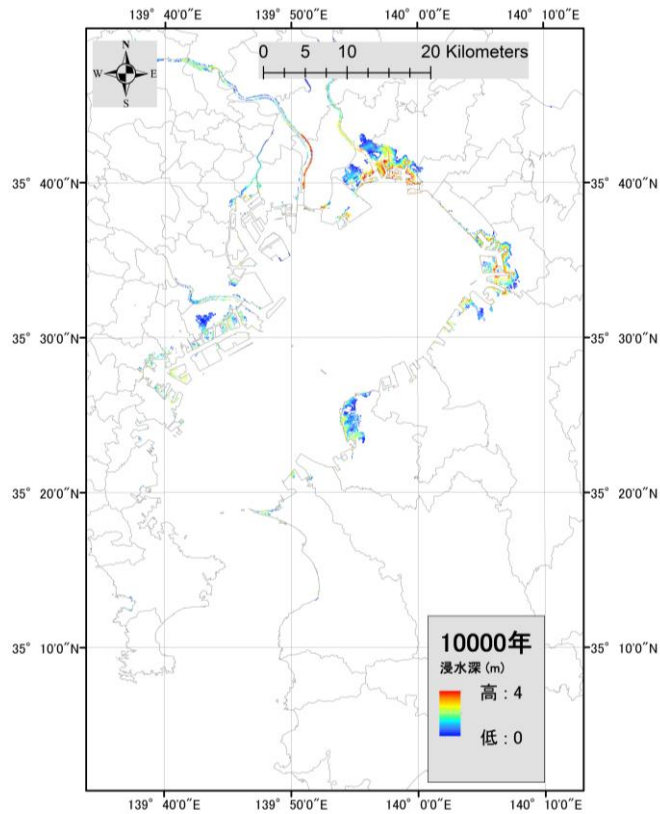


図 42 再現期間 10,000 年の高潮浸水深分布

6) ハザード推定におけるイベント数の十分性に関する考察

本章における確率論的な高潮ハザードは、提案した手続きに基づき、確率台風モデルから 1,000 の台風を抽出して推定した。抽出の過程において使用した高潮経験式による最大高潮偏差は、数値モデルの結果とは乖離がある。そのため東京における最大水位の順位は、数値モデルと経験式とで異なる（図 28）。したがって、経験式によるイベント数の抽出が保険目的として十分であったか検討することは、提案した手続きの有用性を確認する上でも重要である。そこで、東京における抽出台風数ごとの順位別水位を図 43 に示す。横軸が経験式による合計水位のうち上位から抽出する台風数、すなわち検討に用いる台風数を示し、調査対象順位の水位が何台風による検討で収束していくかを確認する。1,000 台風による解析では、上位 200 位以上の水位は、それぞれ概ね収束している。そのため抽出する台風の数を増やしても、代表再現期間の水位はほとんど変化がないと考えられる。経験式による水位推定は不確実性が大きいため、経験式による水位が上位 1,000 位以下であった台風が、数値モデルでは上位 200 位以内に入る可能性もある。しかし、たとえ上位 200 位以内に入り、水位の順位が入れ替わったとしても、代表順位の水位が大きく変わるようなことはないことが、本検討により示唆される。

また、千葉・横浜・横須賀の水位を東京のものと比較したところ、東京の水位と各地点の水位の順

番は入れ替わりが発生している（図 44）。これは、台風特性により、高潮偏差の平面分布が変わるためである。なお東京の水位と、千葉・横浜・横須賀の水位との相関係数は、それぞれ 0.83, 0.80, 0.47 となった。本論文では、東京の水位の順位に基づき、台風を選択しているが、評価対象は東京湾沿岸全域であるため、各地点の水位が解析対象の台風で十分安定するかも確認する必要がある。千葉・横浜・横須賀における抽出台風数ごとの順位別水位を図 45～図 47 に示す。これら 3 地点についても、東京同様に、1,000 台風による解析では、上位 200 位以上の水位は、それぞれ概ね収束している。経験式による東京の水位が 1,000 位以下であった台風が、数値モデルではその他の地点で上位 200 位以内に入る可能性はある。しかし、水位の順位が入れ替わったとしても、代表順位の水位が大きく変わるようなことはないことが、本検討により示唆される。したがって、再現期間 50 年程度以上の低頻度の再現期間別浸水深分布は、提案した手続きに基づき 1,000 台風で評価可能であると考えられる。また、保険目的で特に重要とされる再現期間 200 年のハザードについて調査する場合は、東京の水位が上位 700 位程度で各地点の水位が収束していることから、東京において経験式で 1.33 m（上位 700 位の水位）以上を捉えることができれば十分である。そのため、計算目的によっては、計算対象台風数を減らして、計算負荷をより軽減することが可能となる。

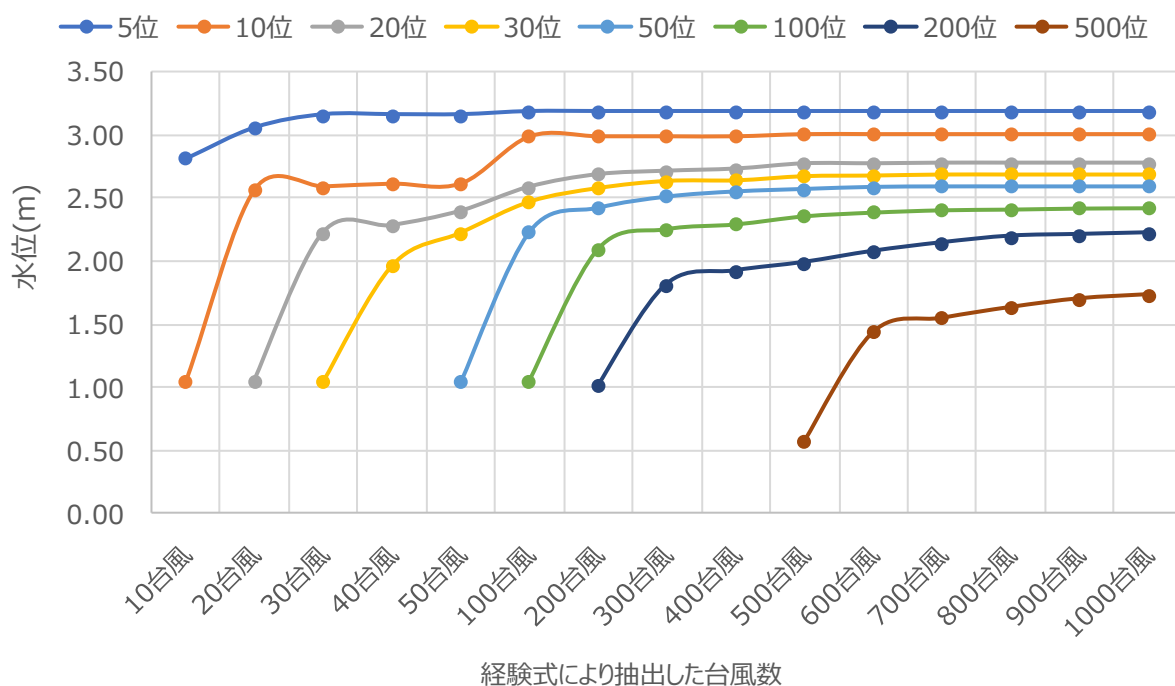


図 43 東京における抽出台風数ごとの順位別水位（横軸が経験式による東京の水位のうち上位から抽出する台風数（検討に用いる台風数）、縦軸が水位、各曲線は数値モデルによる水位の順位）

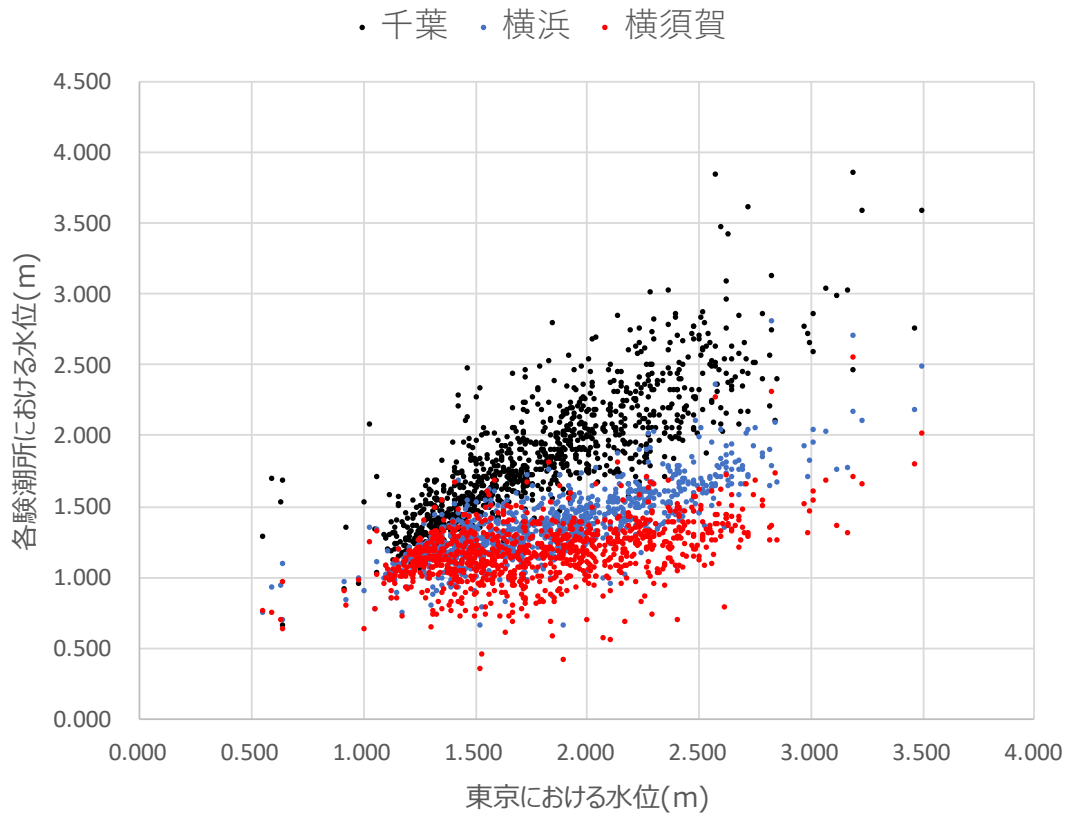


図 44 数値モデルによる東京とその他の地点の水位比較
(横軸が東京における水位, 縦軸がその他の3験潮所における水位)

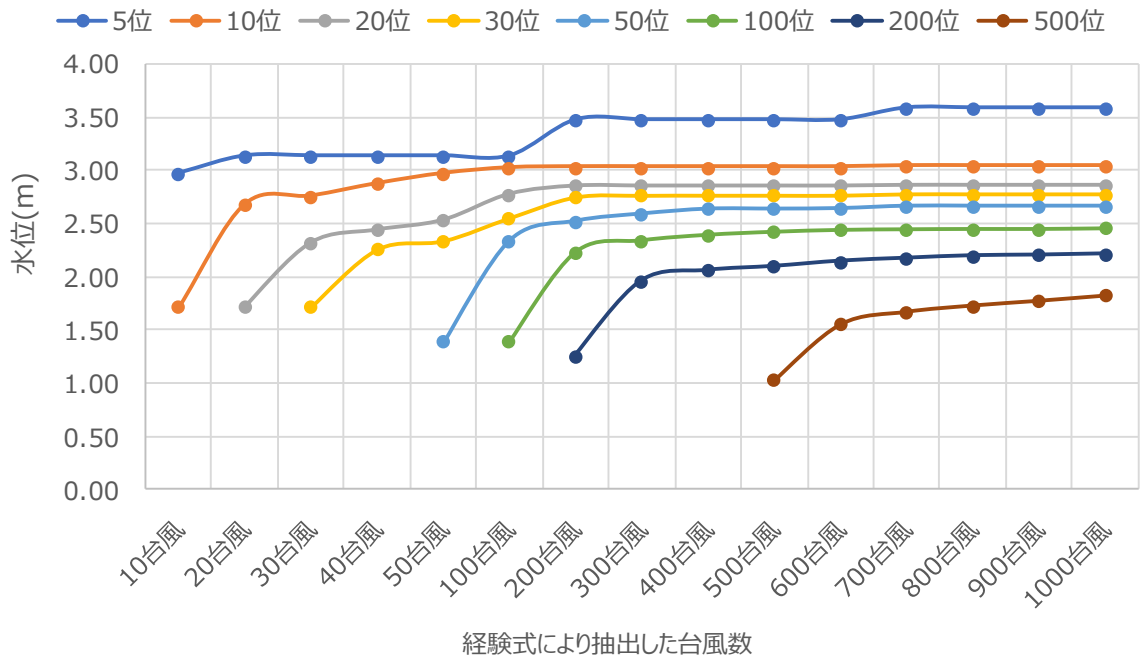


図 45 千葉における抽出台風数ごとの順位別水位 (横軸が経験式による東京の水位のうち上位から抽出する台風数 (検討に用いる台風数), 縦軸が水位, 各曲線は数値モデルによる水位の順位)

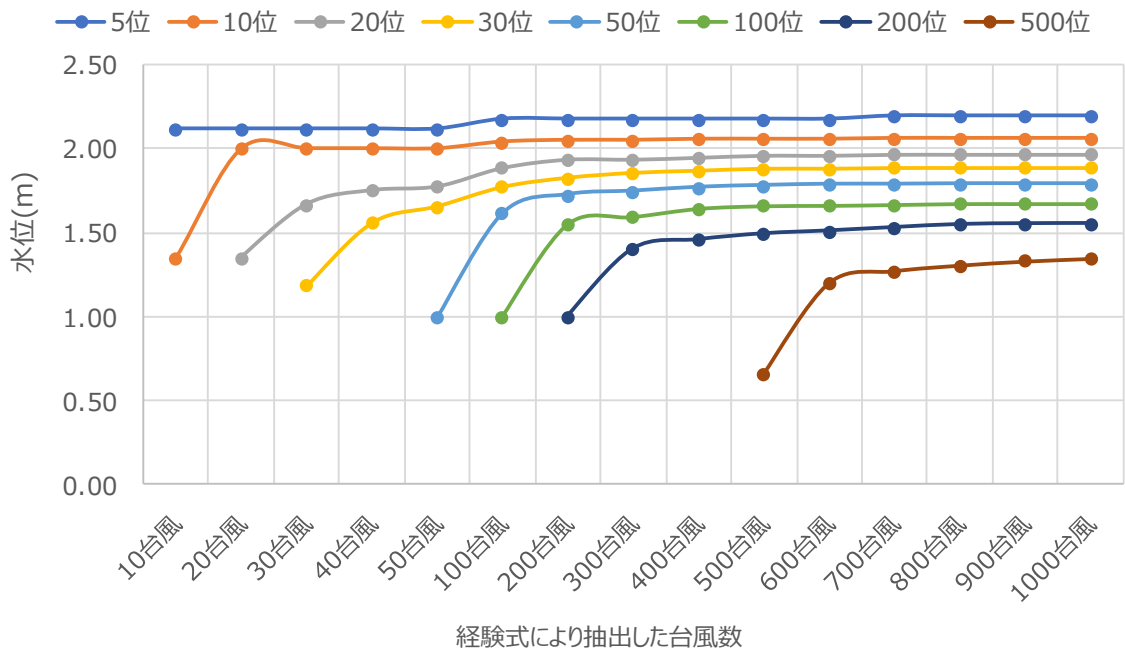


図 46 横浜における抽出台風数ごとの順位別水位（横軸が経験式による東京の水位のうち上位から抽出する台風数（検討に用いる台風数），縦軸が水位，各曲線は数値モデルによる水位の順位）

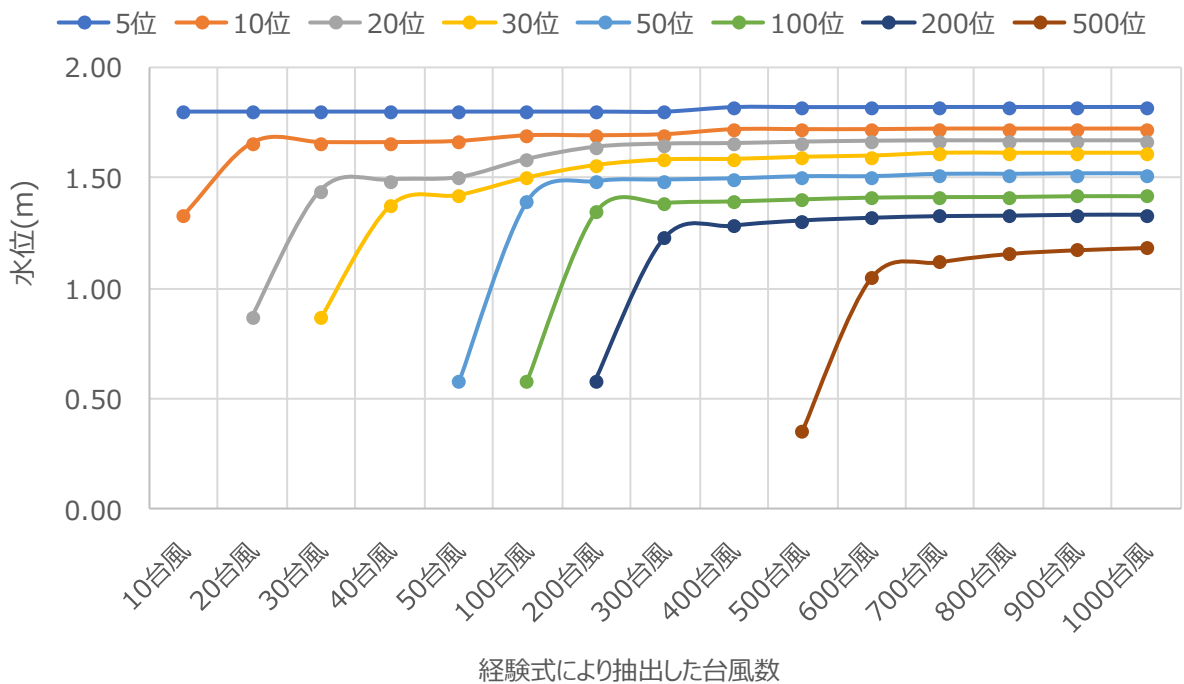


図 47 横須賀における抽出台風数ごとの順位別水位（横軸が経験式による東京の水位のうち上位から抽出する台風数（検討に用いる台風数），縦軸が水位，各曲線は数値モデルによる水位の順位）

ここまでの検討では、経験式により抽出された 1,000 台風の結果から、対象とする低頻度の水位が求められており、ハザード推定における計算数が十分であることを考察した。高潮経験式は計算精度が低く、経験式における東京の水位が 1,000 以下の台風を考慮した場合についても、対象とする水位に影響が出ないかを考察することで、上記の主張が強化できると考えられる。そこで補足検討として、東京における経験式によるイベント抽出の精度と、その影響についてニューラルネットワークを使った考察も行った。経験式は前述の通り、高潮偏差の推定精度が低く、また水位算出時には設定された天文潮位に高潮偏差を加えるため、非線形性が考慮できないという弱点がある。そこで、本研究では Lee [78] を参考に、ニューラルネットワークによる東京の水位推定モデルを構築し、イベントの順位について経験式によるものと比較する。Lee の提案したニューラルネットワークは、計算対象地点における天文潮位・風速・風向・気圧を用いて、当該地点の高潮による水位（天文潮位+潮位偏差）を算出するものである。前述の高潮経験式と比較した特徴は、説明変数に天文潮位を用いて、高潮の非線形性を考慮して水位を算出可能なことである。

ニューラルネットワークを用いた水位推定モデルは、既往研究を参考に、経験式による高潮偏差・台風の中心気圧・東京における気圧・風速・風向・天文潮位の計 6 項目を説明変数とした。教師データは 2 章で計算した 1,000 台風のうちランダムに選んだ 800 台風および 4 章に後述する 525 台風のうちランダムに選んだ 425 対台風とし、検証データは残りの 300 台風とした。中間層のユニット数を変えた感度分析を実施したところ、ユニット数 13 以上で RMSE が収束する結果となった（図 48）。また中間層のユニット数を 15 として、説明変数の入力パターンを 6 項目すべて（パターン A）と経験式による高潮偏差を除いた 5 項目（パターン B）で分析した。RMSE はパターン A で 0.196、パターン B で 0.190 となった。そのため、パターン B のニューラルネットワークを用いて水位を推定した。

東京における推定最大水位の検証結果を図 49 に示す。経験式による最大水位も併記しており、経験式とニューラルネットワークによる推定水位の RMSE は、それぞれ 0.304m、0.202m となり、ニューラルネットワークによるものが経験式より推定精度が向上する結果となった。

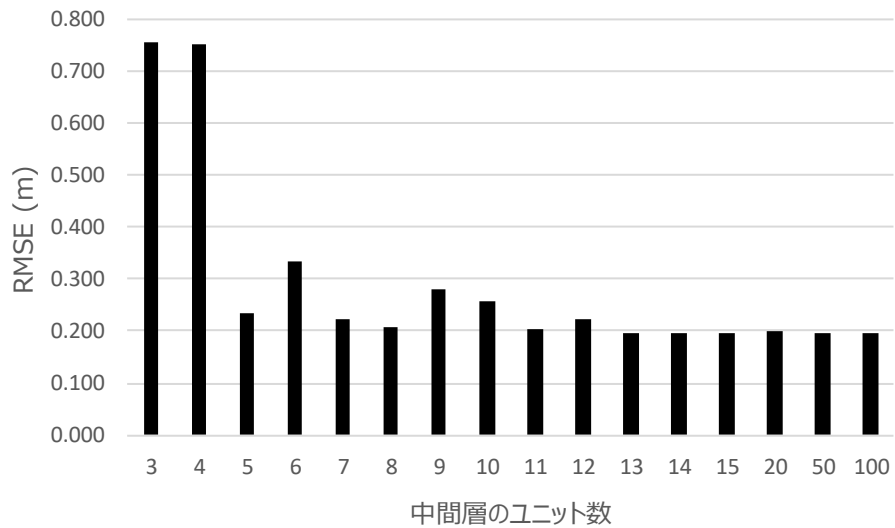


図 48 東京の水位推定モデルのユニット数ごとの最大水位推定結果の RMSE

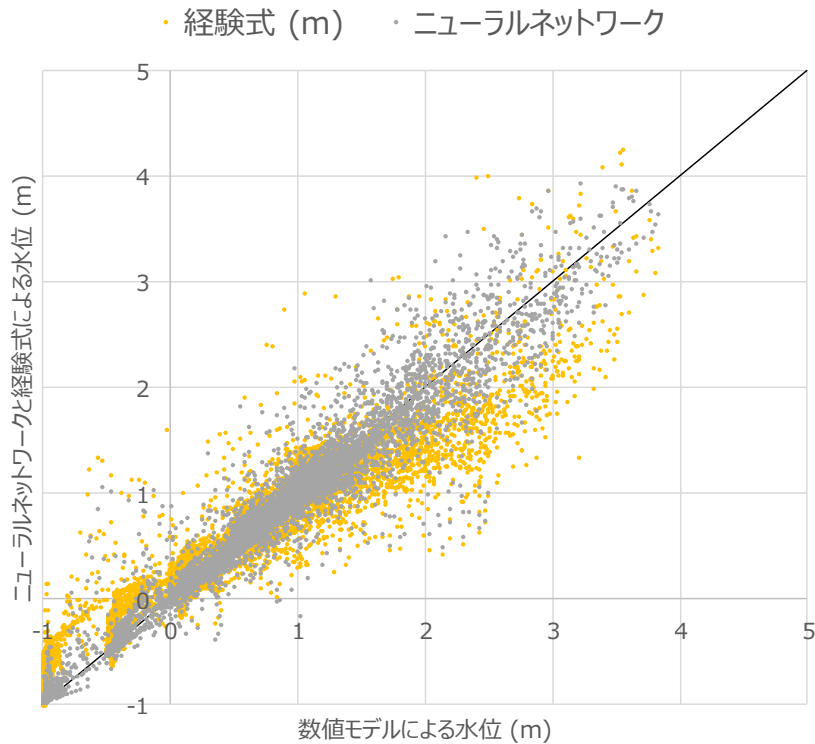


図 49 東京におけるニューラルネットワークによる推定最大水位の検証結果

構築したニューラルネットワークを用い、確率台風モデルによる約 9 万イベントについて、東京の最大水位を推定した。経験式による各台風の東京における最大水位の順位と、ニューラルネットワークによる順位を比較した (図 50)。この結果からも、経験式による最大水位とニューラルネットワークによる最大水位とで順位が大きく変動することが示される。最大水位の推定精度はニュー

ラルネットワークのほうが高いことから、ニューラルネットワークによる東京の最大水位の上位1,000位以内に、経験式により抽出された1,000台風がどの程度含まれているかを調査した（図51）。ニューラルネットワークによる順位が29位になると、経験式による1001位以上の台風が含まれ、順位が大きくなるにつれその割合が高まる。最終的にニューラルネットワークによる1,000位以内のイベントで、経験式による1,000位以内のイベント数は711しか含まれていないことが示された。すなわち、ニューラルネットワークによる結果が正であると仮定すると、経験式により数値計算を行うイベントを1,000台風に限定したが、そのうちの約3割の台風は、本来1,000位以下であったことが示唆される。言い換えれば、経験式に基づく台風抽出の過程で、上位1000位の台風のうち、約3割の台風を計算対象外としていることになる。

そこで、経験式による台風抽出の影響を確かめるため、ニューラルネットワークによる全台風から算出した再現期間別の水位と、711台風のみから算出した再現期間別の水位とを比較した（図52）。ここで示した水位はともにニューラルネットワークによる水位であり、誤差を含むため図43の結果とは若干数字は異なる。再現期間100年以上の水位までは、双方の結果は同一となり、再現期間50年であっても、その差は0.5cmとなった。そのため、経験式による台風の取りこぼしはあるものの、その影響は小さいことが示唆された。

経験式による台風抽出は、その精度の低さから大きな不確実性を伴う。本節では数値計算による1,000台風の並び替えと、ニューラルネットワークを使った2通りの方法で台風抽出の影響を考察した。その結果、1,000台風を抽出したことにより代表再現期間の水位に近い値が算出されていると考えられる。

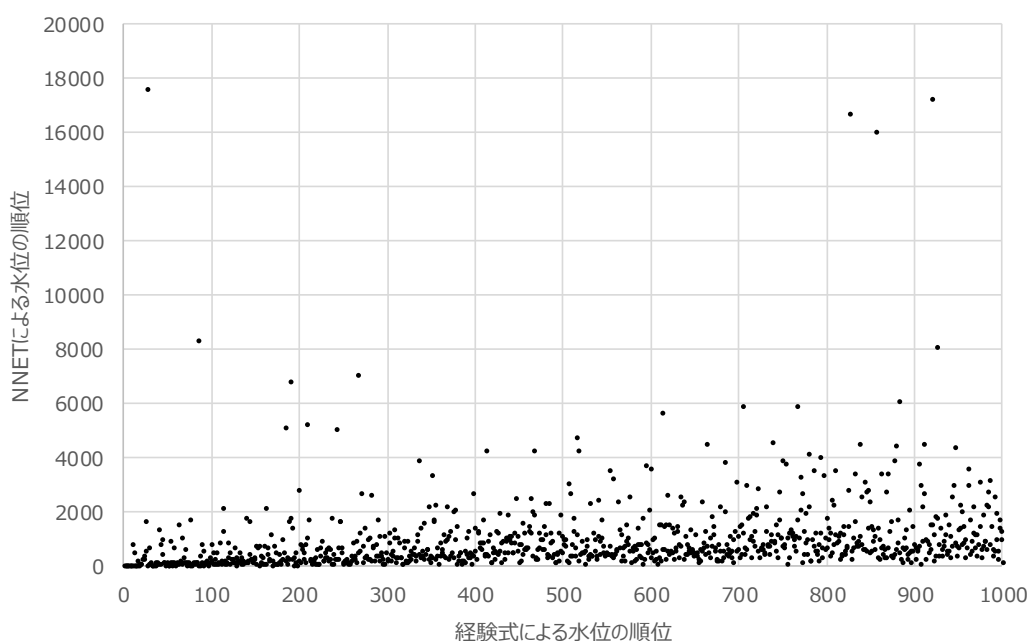


図 50 経験式とニューラルネットワークによる東京の最大水位の順位比較

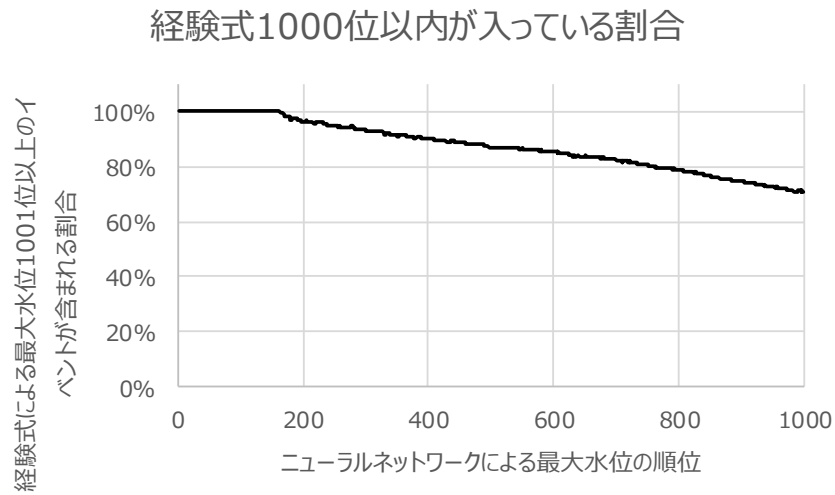


図 51 ニューラルネットワークによる東京の最大水位の上位 1,000 位以内に経験式による 1,000 位以内のイベントが含まれている割合

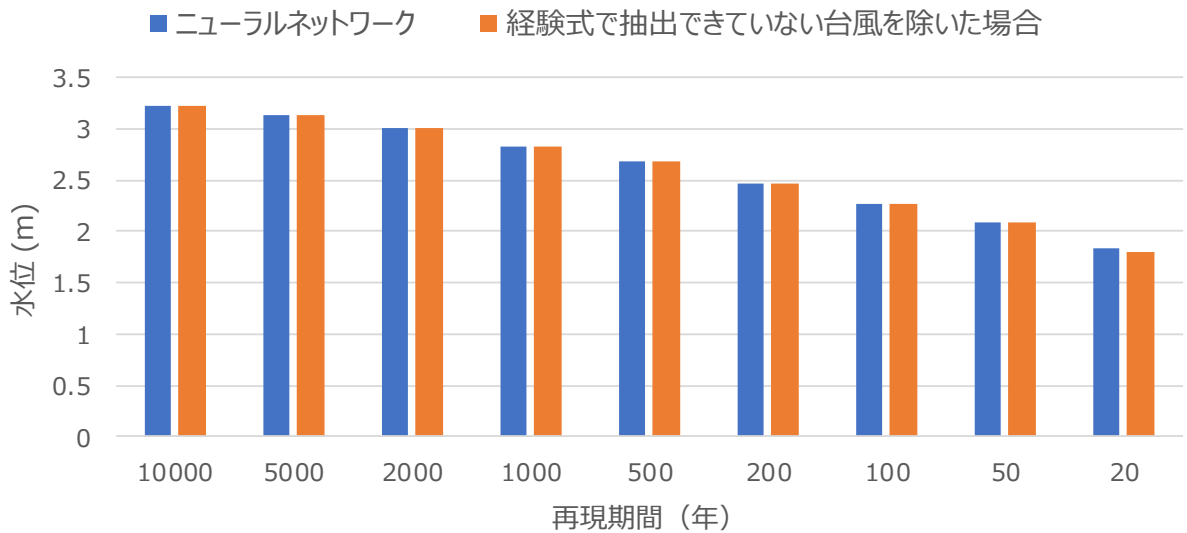


図 52 ニューラルネットワークによる全台風から算出した再現期間別の水位と経験式から抽出された 711 台風のみから算出した再現期間別の水位

2.7 本章のまとめ

本章では、まず 1 章で提案した評価手続きに基づき、東京湾を対象に確率台風モデルの結果と高潮経験式および天文潮位のヒストグラムから設定した天文潮位により、規模の大きな 1,000 台風を抽出し、それらによる高潮の数値解析を行った。次に、数値解析による浸水深分布から、再現期間毎の浸水深分布を作成した。

提案した評価手法に基づき、高潮数値解析の計算対象数を、9 万超から 1,000 台風にまで削減し、

また削減したことによる精度の低下も小さいことが示された。本研究では経験式により台風数を減少させたが、その経験式の精度が低いことが課題である。本研究で提示したような、ニューラルネットワークなどを用いた精度の高い簡易モデルが構築されれば、より精度の高い順位付けを行うことが可能となり、計算対象台風数をさらに削減することが可能であると考えられる。

本章では、台風毎の浸水深分布だけでなく、再現期間別の高潮浸水深分布を構築することができた。この成果は、保険リスク管理に必要な長い再現期間を対象として、従来の確定論的な手法に基づく浸水深分布では反映しきれていない、東京湾沿岸の全ての地点における高潮リスクを表現している。本成果は損害保険業界における保険リスク審査等にも活用が期待される。

課題として、本研究では高潮の計算に破堤は含まれていない。大規模な高潮が発生した際、波浪や越流等により破堤が発生し、氾濫がより広範囲に及ぶ可能性がある。また、特に再現期間の長い高潮リスクの評価時には不確実性が大きいことを認識する必要がある。再現期間 500 年では、上位 20 台風が評価対象となるが、再現期間 5,000 年では上位 2 台風が対象となる。例えば天文潮位はランダムに設定されているため、この上位 2 台風の天文潮位が、本研究での推定結果より大きく計算されれば、当該再現期間の浸水深マップは拡大する。これらの天文潮位を再度計算した場合には、本研究の結果より低くなる可能性が高いが、別の台風の天文潮位が高く計算され、順位が入れ替わる可能性もある。また図 37～図 42 には、本研究で推定された再現期間毎の浸水深分布を示したが、特に再現期間 2,000 年以上の結果においては、不確実性が大きいと考えられる。しかし保険業界においては、現在では再現期間が 500 年までのマップが用いられることが一般的であるため [79]、許容できると考えられる。これらの再現期間が特に長い台風に対しては、天文潮位の設定数を増やす、あるいは計算期間を大幅に増やすことで、不確実性を減少させることが期待できる。

本章で計算された台風毎の浸水深分布は 3 章「高潮損失額の評価」において、再現期間毎の損失額を評価する際に活用する。また、本章で課題とされた破堤の影響については 3 章に、天文潮位設定による不確実性に関しては、4 章で詳細に議論することとする。

3 高潮損失額の評価

3.1 損失額推定の手順

本章では、提案した手続きに基づき、2章で計算された台風毎の最大浸水深分布データセットおよび、本章で構築する資産額データと国交省による高潮被害関数とを組み合わせ、東京湾沿岸における資産の損失額を計算する。

3.2 資産額データセットの構築

本研究では、家屋・家庭用品・事業所・農漁家を対象に損失額を計算することとし、これらの資産額データセットを統計情報から構築した。

家屋の資産額は、日本建設情報総合センター [80]の 100 m メッシュ延床面積データ [81]に治水経済調査マニュアル(案) [82]の都道府県別家屋 1 m²あたり評価額を乗じ作成した。家庭用品の資産額は、平成 27 年国勢調査 [83]による 250 m メッシュ一般世帯数データに 1 世帯当たり家庭用品評価額 [82]を乗じ作成した。事業所の償却資産額および在庫資産額は、産業分類別事業所従業員 1 人当たり償却資産評価額および在庫資産評価額 [82]に平成 26 年経済センサス [84]の産業別事業所人数を乗じて計算した。農漁家の償却資産額および在庫資産額は、農漁家 1 戸当たり償却資産評価額および在庫資産評価額 [82]のそれぞれに平成 26 年経済センサス [84]の農漁家世帯数を乗じて計算した。資産額分布の例として、事業所の償却資産額分布を図 53 に示す。事業所の償却資産は沿岸部に集積している。

以上により作成された資産額データは、それぞれの解像度がハザードモジュールの解像度と整合していない。例えば、図 53 に示す、事業所の償却資産額は、町丁・大字レベルの解像度となり、ある一つの資産額が示されるエリアには、ハザードモジュールで計算された浸水深が複数存在する場合がほとんどである。そこで、ハザードモジュールの 90 m メッシュの中心点を資産額データに重ね、同じエリアの資産額を当該エリアの各点に等分配させることにより、資産額分布をハザードモジュールと整合させた。また事業所と農漁家の資産は、本来資産が存在しない河川内に配置されるのを極力防ぐため、荒川や江戸川の大河川については、当該地点の資産額を同じ町丁・大字の堤内地に分配した。

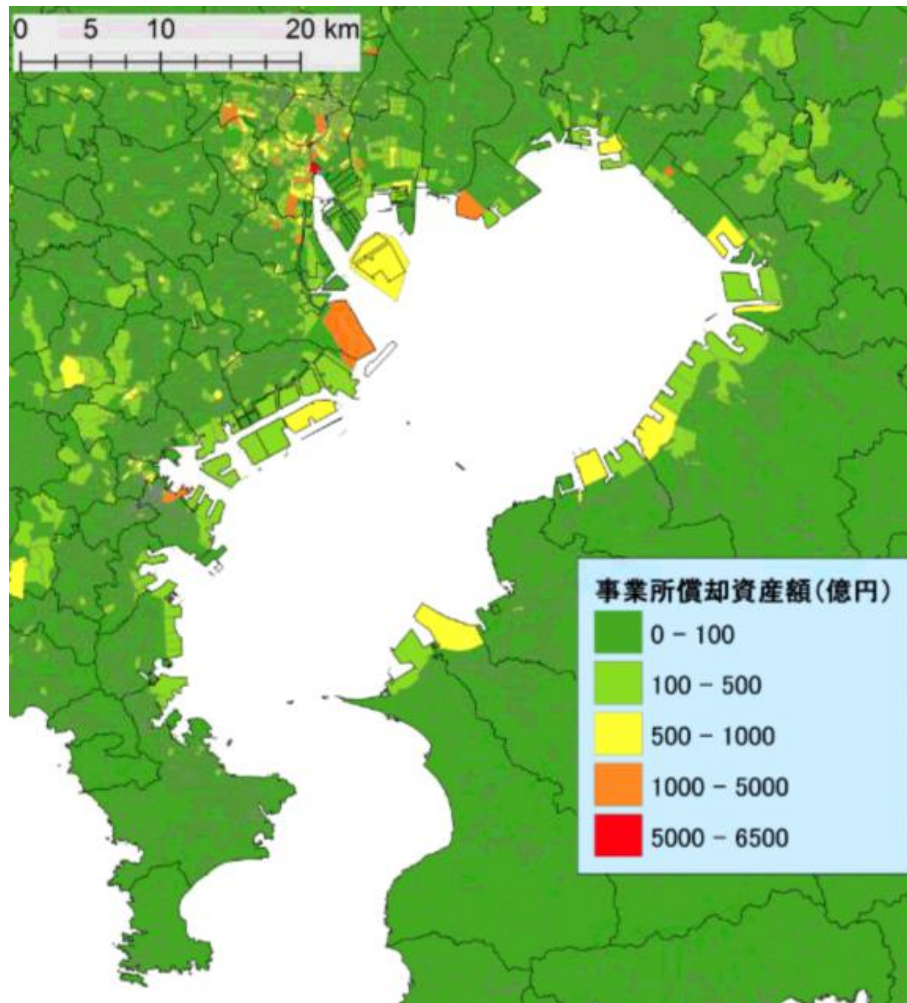


図 53 事業所の償却資産額分布

分配後の 90 m メッシュの各資産額分布を図 54 に示す。家屋および家庭用品は、都内の資産額が神奈川県や千葉県と比較すると大きい。また東京湾沿岸部、特に京浜工業地帯や千葉港周辺等の堤外地には、家屋や家庭用品が存在しない地域が広がっていることが特徴である。

計算領域内の資産額の内訳を図 55 に示す。資産額合計は約 390 兆円である。そのうち約 85%が家屋と家庭用品、約 15%が事業所資産であり、農漁家の資産額は全体からすると僅少である。

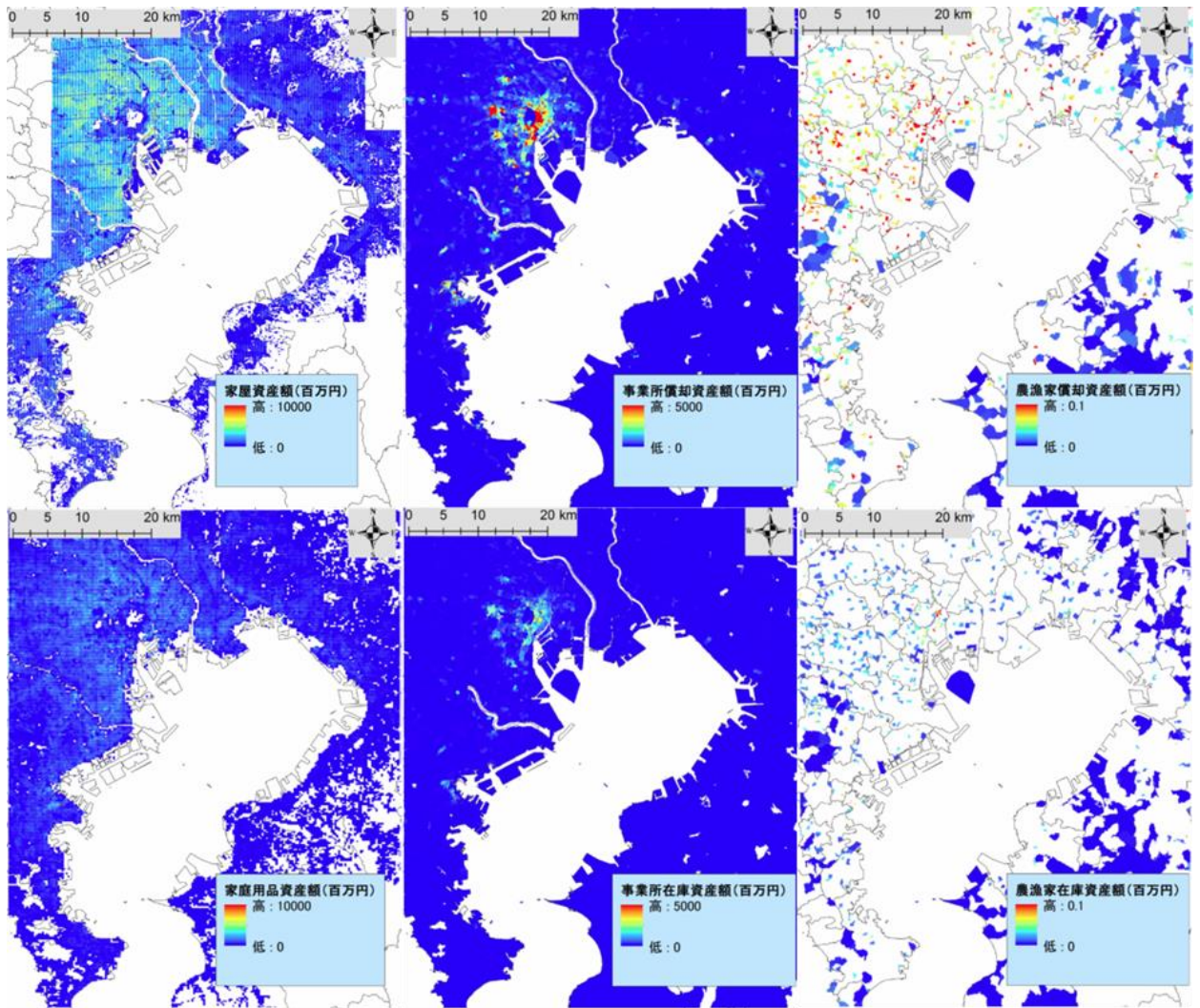


図 54 各資産額の平面分布

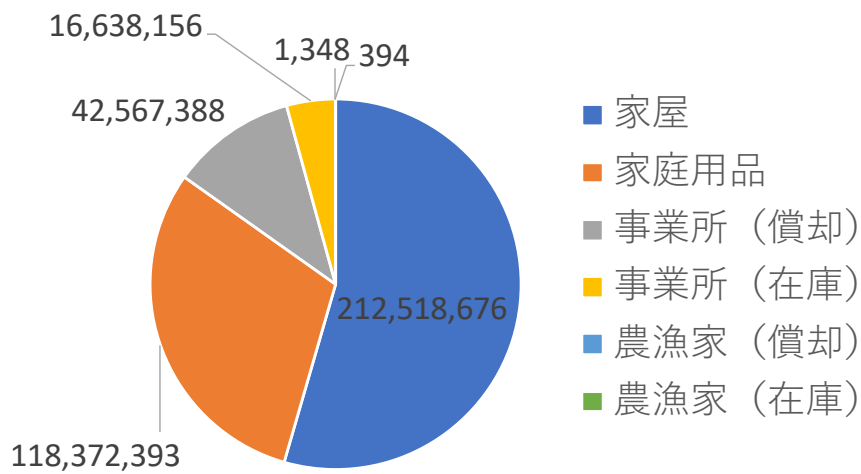


図 55 計算領域内の資産額の内訳 (百万円単位)

3.3 高潮被害関数

各資産の損失額は、メッシュ毎に計算された最大浸水深と各資産額、および治水経済調査マニュアル（案）[56]の高潮浸水被害の各資産被害率を用いて算定する。床高は、家屋・家庭用品・農漁家は45 cmとし、事業所は10 cmとした（図 6）。あるメッシュで計算された最大浸水深と被害関数により求められた被害率を、当該メッシュの資産額に乗じることにより、損失額が算定される。

3.4 建物階数の考慮

浸水が発生した場合、建物の階数により被害が変わる。例えば同じ2 mの浸水深であっても、1階建ての建物はほぼ浸水し、家財もほとんどが浸水被害を受ける一方で、2階建ての建物の2階までは浸水被害が及ばない。そのため、前述の高潮被害関数による被害率をそのまま適用すると損失額を過大評価してしまうおそれがある。

治水経済調査マニュアル（案）[82]には、建物の階数を考慮する際に、浸水被害を受ける家屋資産の補正の例として、階数補正後資産額について下式を挙げている。

$$P = P_0 \times \gamma \quad (13)$$

ここで、 P_0 はメッシュの家屋資産、 γ は補正係数で、メッシュの建物の平均階数を f とするとき、 $f < 3$ の場合は $\gamma=1.0$ 、 $f \geq 3$ の場合は $\gamma=2/f$ とされている。すなわち、資産が各階に等分配されているとき、2階までの資産額が被害を受ける対象となり、3階以上は無被害となる設定である。2章で計算した高潮浸水深は、最大で約4.5 mである。建築基準法による居室の天井高2.1 m以上をクリアする最低の階高は2.4 mとされており[85]、今回のシミュレーションの結果からも2階までの浸水しか発生しないこととなる。そのため、ここまでの手順で計算された損失額に「1・2階の資産額 / 合計資産額」を乗じることによって階数による影響を損失額に考慮する。しかし明確にそのような情報が公表されていないため、本論文では、以下の通りそれぞれ異なる指標から合計資産額に対する1・2階の資産割合を推定して、損失額に乗じることとした。

平成27年国勢調査[83]における「人口等基本集計 町丁・字等編」には、住宅の建て方別世帯数データが存在する。そこで、主世帯数に対する一戸建、長屋、共同住宅1・2階建の合計世帯数の割合を算出した（図 56）。都心部では、割合が小さくなり都心部の多くの住民が3階以上の高層に居住していることが示されている。この各地点の割合を位置が重なる家屋、家庭用品、農漁家償却資

産・農漁家在庫資産の損失額推定に活用することで階数の影響を考慮する。

一方，事業所の階数に関する情報は国勢調査や経済センサスにはなく，国交省の「2008年法人建物調査」の「建物所在地(55区分)，建物の構造(6区分)・建物の構造(3区分)，階数(9区分)別総延床面積<工場敷地以外の建物>」のデータ [86]を用いた。このデータには都道府県ごとの構造別の延床面積が含まれており，鉄骨鉄筋コンクリート造，鉄筋コンクリート造，鉄骨造の3構造については階数別の延床面積データが存在する。本論文で計算対象とする東京都・千葉県・埼玉県・神奈川県のごとの構造別延床面積の割合を示す(図57)。4都県では，鉄骨鉄筋コンクリート造，鉄筋コンクリート造，鉄骨造の3構造が延床面積のほとんどを占めている。そのため，この3構造について都道府県ごとに1・2階の延床面積の割合を算出した(図58)。これらの割合を各都県に位置する事業所償却資産および事業所在庫資産の損失額に乗じることにより階数の影響を考慮する。

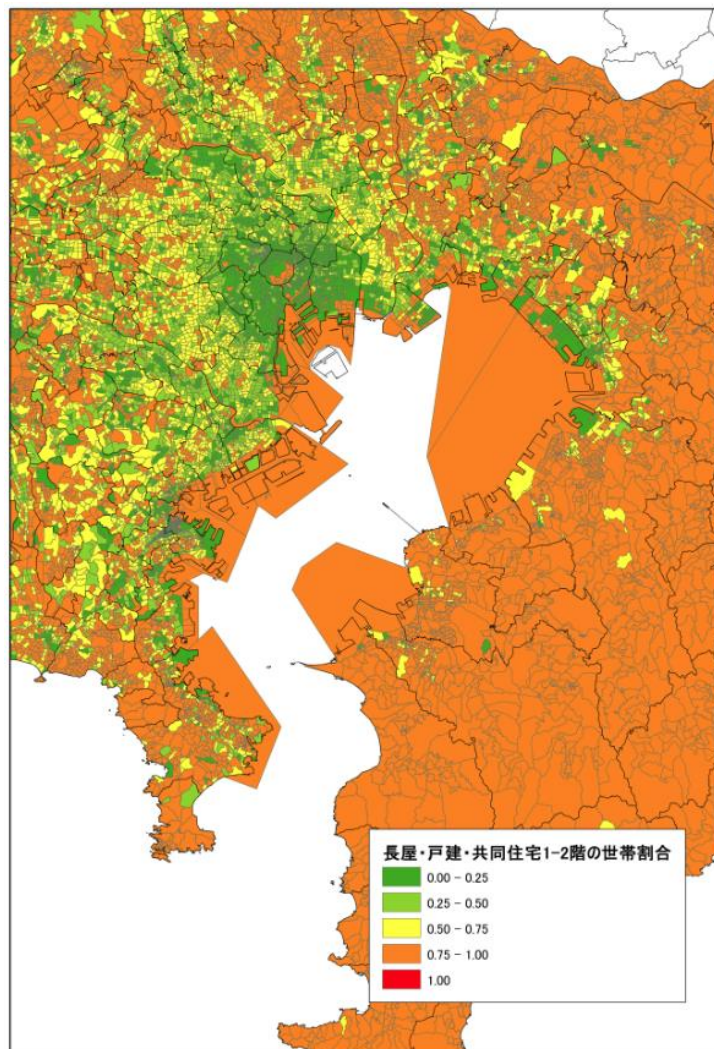


図 56 主世帯数に対する一戸建，長屋，共同住宅1・2階建の合計世帯数の割合

東京・神奈川・千葉・埼玉における構造別延床面積の割合

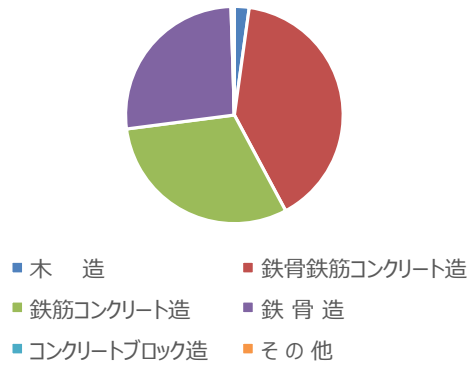


図 57 東京・神奈川・千葉・埼玉の構造別延床面積の割合

3構造の1・2階の延床面積の割合

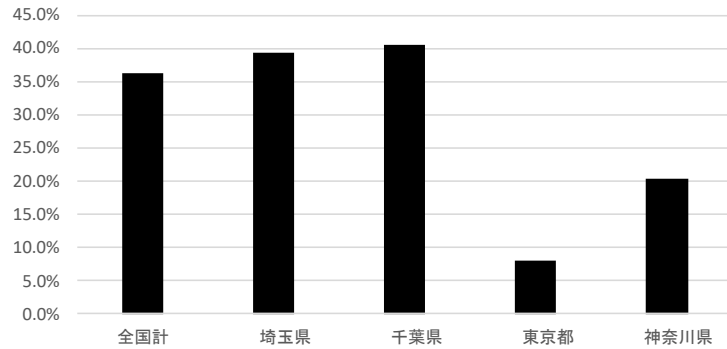


図 58 3構造の都県別の1・2階の延床面積の割合

3.5 EPカーブの構築

数値モデルにより計算された浸水深分布，構築された資産額分布，高潮被害関数を用いると損失額を計算することができる。それらの結果を並び替えると，資産毎の年超過確率と予想損失額の関係を示す EP (Exceedance Probability)カーブを構築することができる。EPカーブ構築に際し，1年間の予想最大損失額から求められるものを OEP (Occurrence Exceedance Probability)と呼び，1年間の予想合計損失額から求められるものを AEP (Aggregate Exceedance Probability)と呼ぶが，保険業界では主に後者を用いることが多い。本研究で用いた確率台風モデルでは，各台風イベントに発生年も付記されている。すなわち，それぞれの想定台風がどの年に発生するか識別できるため，OEP および AEP を作成することが可能である。本研究により求められた資産毎および全資産の EPカーブを，OEP と AEP に分けて図 59 に示す。なお家屋と家庭用品の合算値，事業所と農漁家に

については、償却資産と在庫資産の合算値を示している。数値モデルで計算する台風を選択するプロセスにおいて、東京湾に高潮被害をもたらす大規模な想定台風は、同一年に複数発生することは非常に稀となったため、AEP および OEP は近い値をとる結果となった。また年間期待損失額、再現期間 1,000 年の予想損失額、再現期間 200 年の予想損失額をそれぞれ図 60, 図 61, 図 62 に示す。ここでの年間期待損失額は、年毎の合計損失額を全て足し合わせた額を、今回の計算年数である 10,000 年で割った数字である。年間期待損失額は、家屋および家庭用品が約 36 億円、事業所が約 10 億円となった。AEP ベースだと、再現期間 1,000 年においては、家屋および家庭用品が約 1,687 億円、事業所が約 469 億円となり、再現期間 200 年では、それぞれ約 945 億円、約 230 億円となった。農漁家については資産額が相対的に極めて低いため、予想損失額も総じて小さくなった。

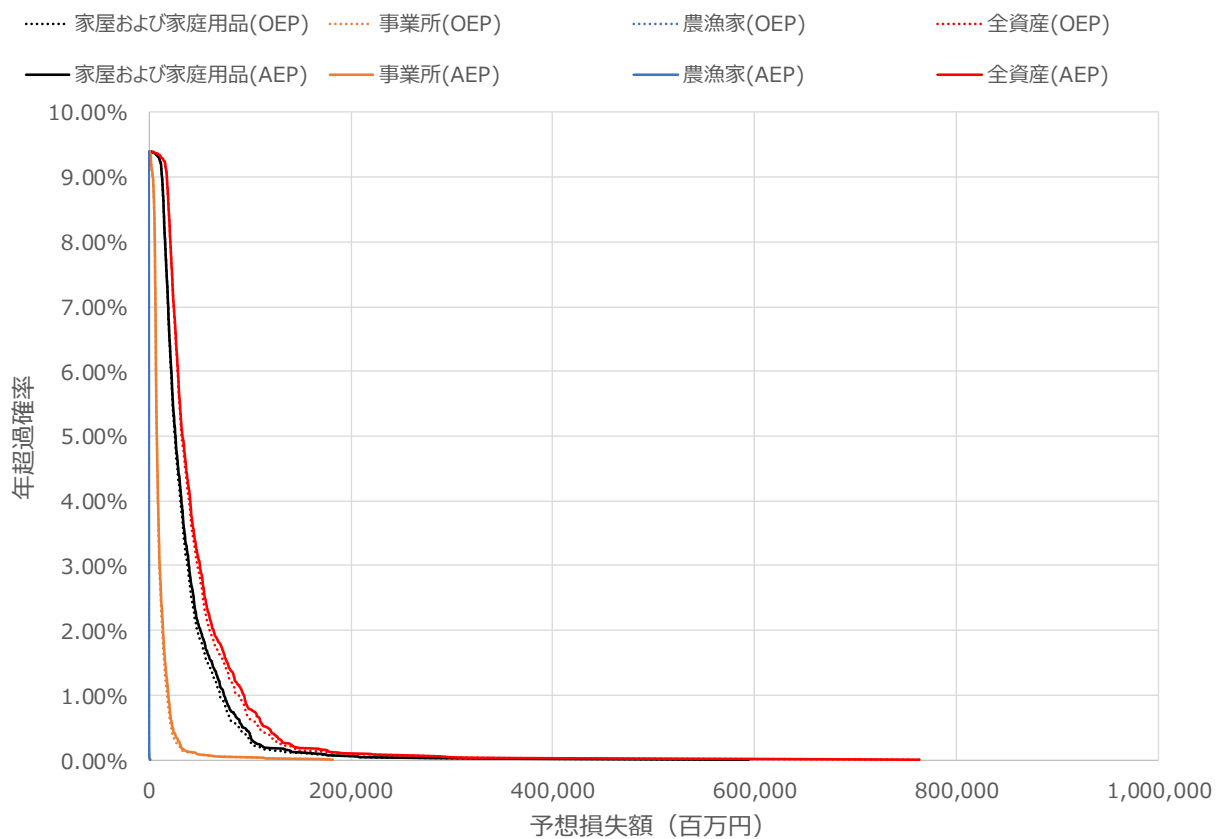


図 59 EP (Exceedance Probability) カーブ

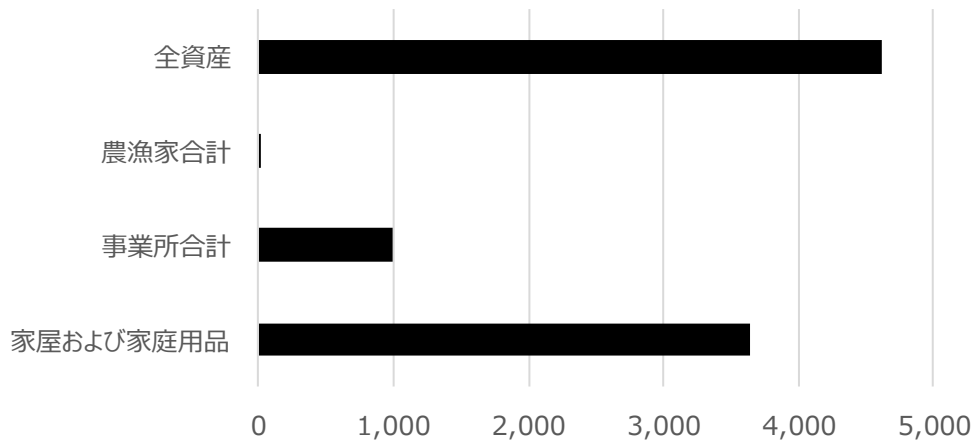


図 60 年間期待損失額 (単位：百万円)

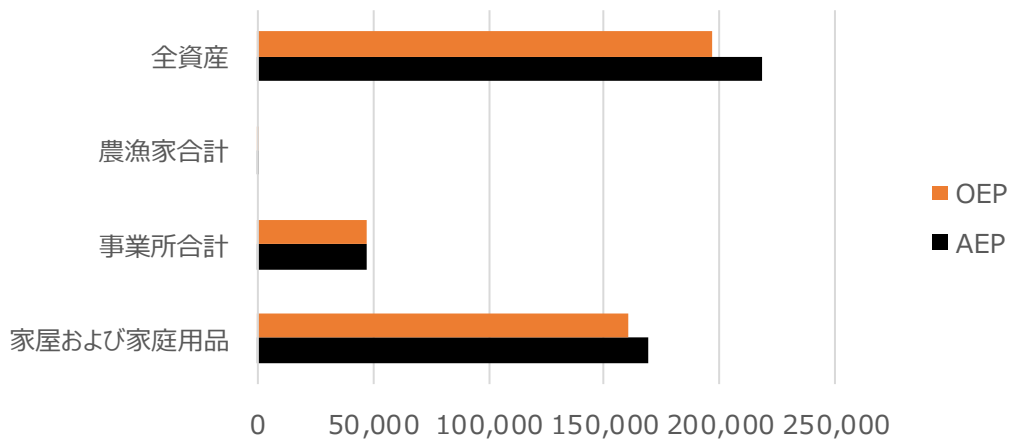


図 61 再現期間 1,000 年の予想損失額 (単位：百万円)

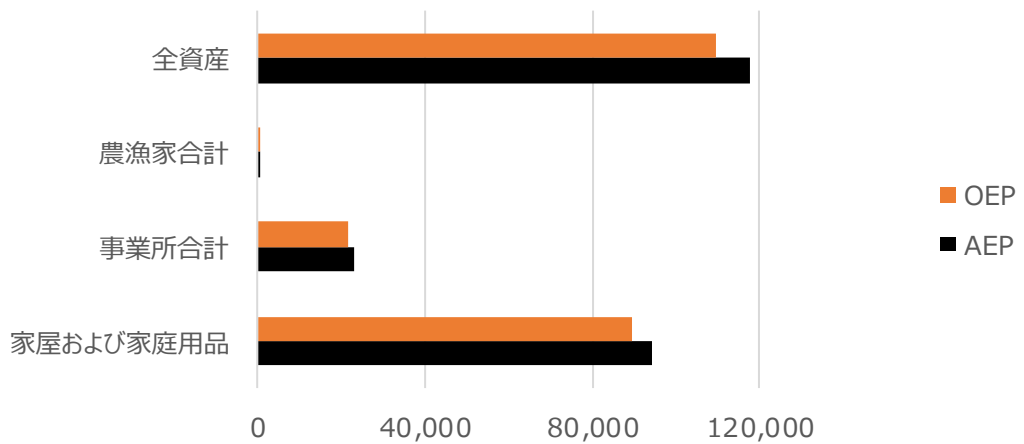


図 62 再現期間 200 年の予想損失額 (単位：百万円)

3.6 損失額推定におけるイベントの十分性に関する考察

本章における確率論的な高潮損失額は、確率台風モデルから上位 1,000 の水位に基づき台風を抽出して推定した。抽出の過程において使用した高潮経験式による最大高潮偏差は、数値モデルの結果とは乖離があるが、2章において、代表再現期間における各地点の水位は、1,000 台風による計算で概ね収束していることが示された。しかし水位が収束していても損失額が収束しているとは断定できず、ここでは損失額についても同様に考察する。抽出台風数ごとの順位別予想損失額を図 63 に示す。横軸が経験式による合計水位のうち上位から抽出する台風数、すなわち検討に用いる台風数を示し、調査対象順位の損失額が何台風による検討で収束していくかを確認する。1,000 台風による解析では、上位 50 位以上の損失額は、それぞれ概ね収束している。経験式による水位推定は不確実性が大きいいため、経験式による水位が 1,000 以下であった台風の損失額が、数値モデルでは損失額が上位 50 位以内に入る可能性もある。しかし、たとえ上位 50 位以内に入り、損失額の順位が入れ替わったとしても、代表順位の損失額が大きく変わるようなことはないことが、本検討により示唆される。ここでの上位 50 位の損失額は、再現期間 200 年の損害額に相当する。すなわち保険目的である低頻度の損害額を求めるには、提案した手続きに基づいた 1,000 台風で概ね十分であることが示唆された。しかし、より低い順位の損失額をみると、1,000 台風では収束しきれない可能性があることを意味する。この年間期待損失額の収束に関しては後述する。

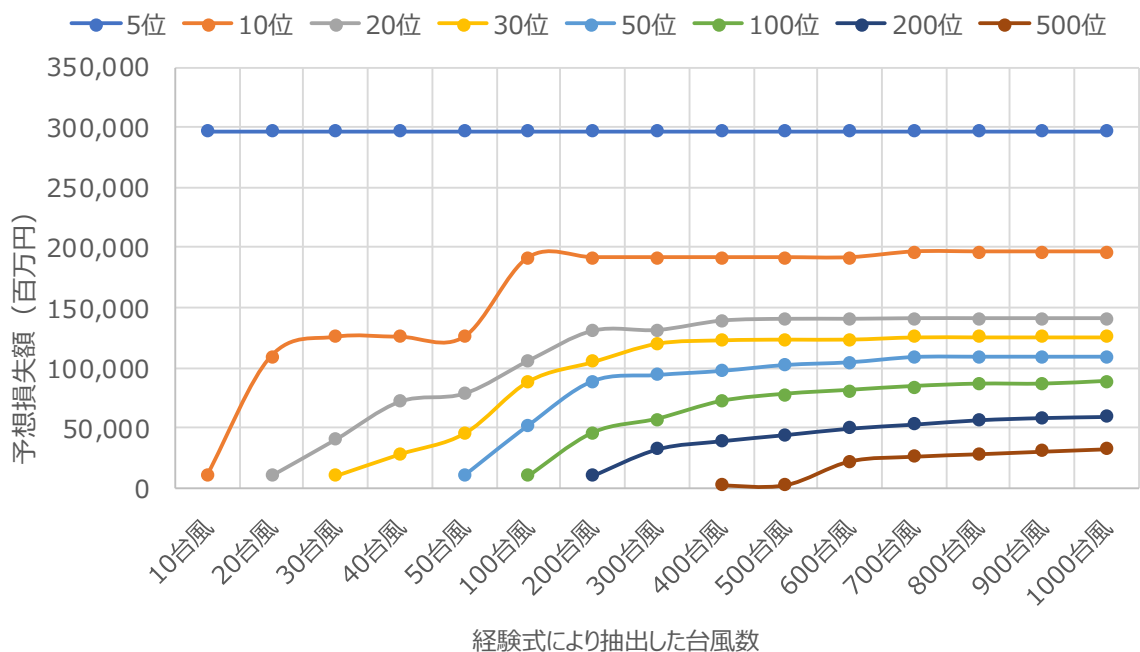


図 63 抽出台風数ごとの順位別損失額（横軸が経験式による東京の水位のうち上位から抽出する台風数（検討に用いる台風数）、縦軸が予想損失額、各曲線は予想損失額の順位）

3.7 年間期待損失額の評価

本研究では2章において、高潮被害をもたらす可能性の高い1,000台風を抽出して数値モデルで氾濫計算を実施した。しかしその台風数で年間期待損失額を評価するのに十分かどうか評価する必要がある。計算年数毎に年間期待損失額が収束しているか確認することで、年間期待損失額が適切に評価されており、本研究における台風数で年間期待損失額の計算が十分に行われているか判断する。

図64に計算期間毎の事業所償却資産の年間期待損失額を示す。これは全資産の予想損失額をイベント毎に大きい順番に並べ、計算期間の合計値を10,000年で割った値を計算期間毎に算出したものである。今回選定した台風数で年間期待損失額に収束傾向がみられるが、年間期待損失額は収束しきれていない。今回損失額を試算した際の課題が、資産額分布の作成にある。資産額は統計情報から作成されているため、解像度がハザードと比べて粗い。この統計情報はハザードの解像度に合うように分配しているため、本来資産が存在しない場所に分配され、損失額が算出されている。図65にメッシュごとに浸水が計算される回数を示す。1,000台風のうち、浸水が400回程度以上発生する都心部および、木更津市周辺の浸水回数と土地利用とを比較した(図66, 図67)。都心部では、隅田川・中川の河川内、および旧江戸川河口が、数値計算上、浸水深が出力されている。また各河川の堤外地が高頻度で浸水する結果となった。木更津市では、小櫃川河口およびその周辺に広がる盤州干潟で浸水深が出力されている。これらの場所は本来資産が存在せず、通常、損失額推定には影響がない。しかし、今回は、前述した通り、解像度の荒い統計情報を用いて資産額分布を作成している。そのため本来資産が存在しない河川内や堤外地・干潟等の場所に資産が配置され、損失額が計算されて、年間期待損失額が収束しきれていない。

上記の検討から数値計算上で400回程度以上浸水する場所では、本来資産が存在しないことが確認できた。そこで、数値計算上、高頻度で浸水が発生する地域では実際は被害が発生しないため、当該地点における損失額はゼロであるとし、簡易的に年間期待損失額が収束するかどうかを確認することとした。図64に浸水頻度が高い箇所の損害を削除した、事業所償却資産の予想損失額の計算年数別年間期待損失額を併記する。今回の検討では、本研究でモデル化した資産の代表として、事業所償却資産を選択し、1,000台風に対する高潮解析において高頻度(500回~900回以上の100回刻み)で浸水したメッシュにおける損失額を削除し、年間期待損失額が収束するかどうかを確認した。この結果、500回以上浸水したメッシュの損失額を無視したケースでは、年間期待損失額が完全に収束し、900回以上浸水したメッシュを除いたケースでも、ほぼ収束する結果となった。この検討結果から、年間期待損失額が収束しない大きな原因は資産額分布のモデル化であることが分かり、資産額を現実に即した箇所に配置した場合は、年間期待損失額がより収束する。言い換えれば、資産額

を適切に配置することがリスク評価にとって重要であるということがいえる。また、2章で計算した高潮ハザードの解析数で年間期待損失額まで評価できることが示唆された。損害保険会社における損失額の予測プロセスでは、保険契約情報を活用し現実に即した場所に資産額を配置することを目指しているため、本研究で発生した収束の問題は起こりにくいものと考えられる。

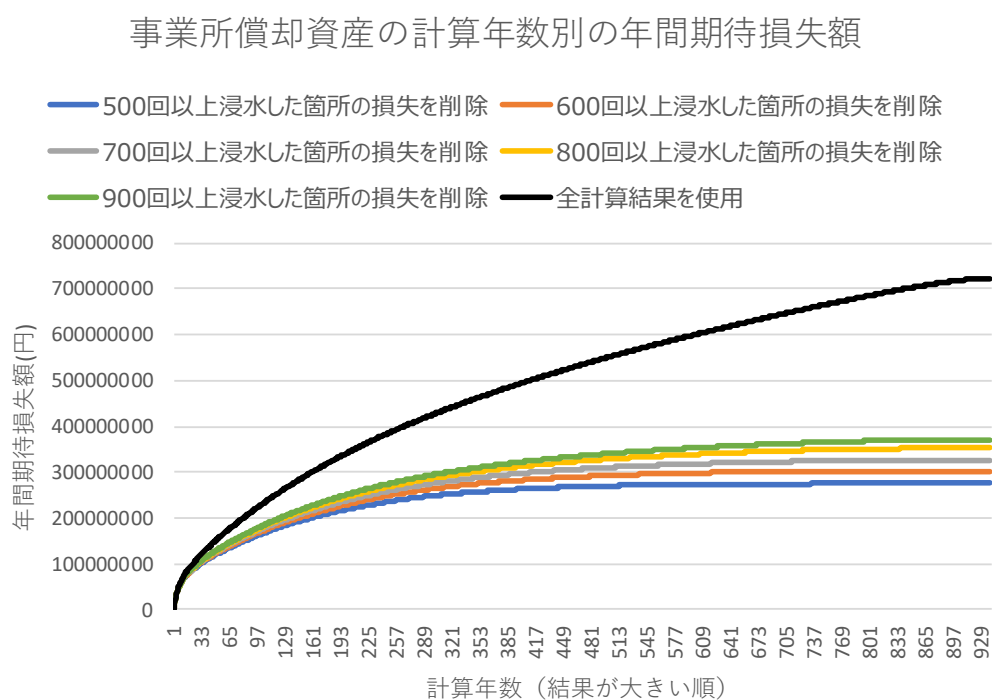


図 64 実際には資産がない箇所の損失額を削除した事業所償却資産の計算年数別年間期待損失額

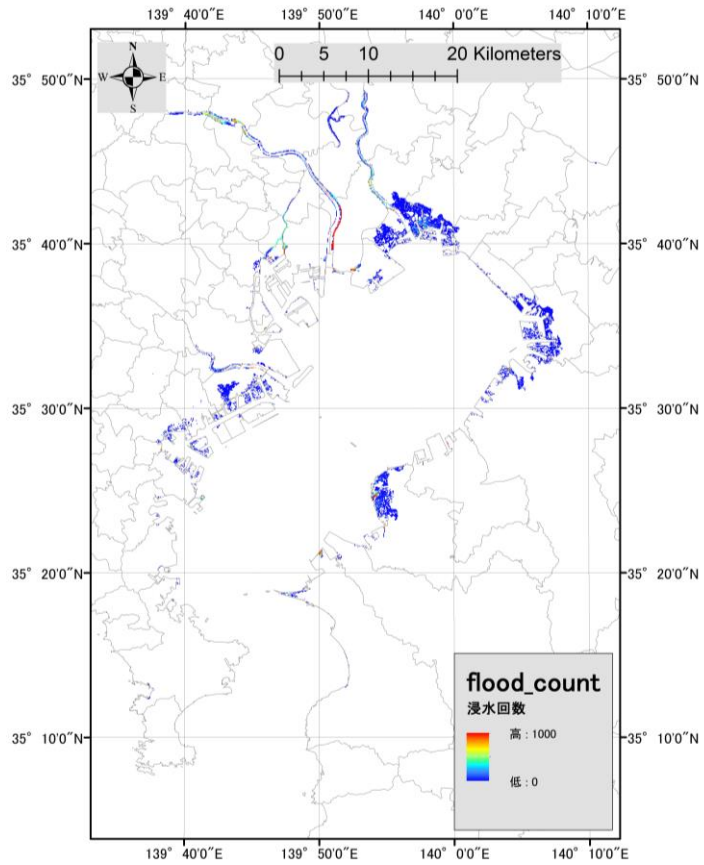
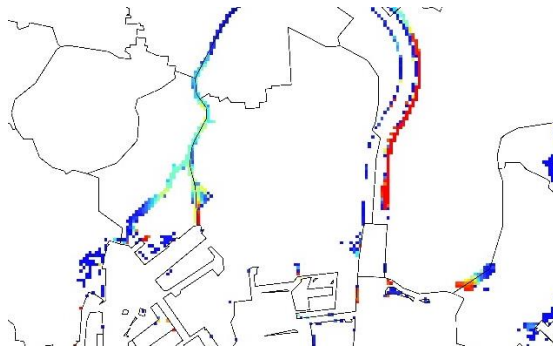


図 65 シミュレーションにおけるメッシュごとの浸水回数

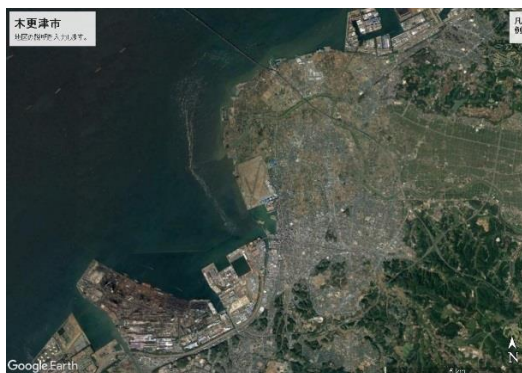


(a) 衛星画像 (Google Earth)

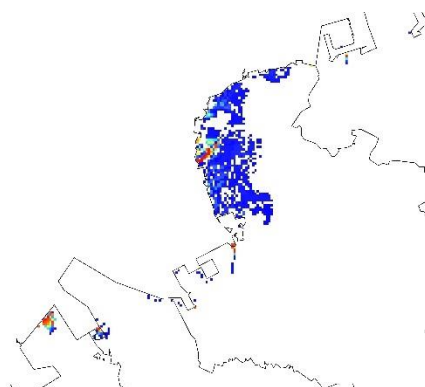


(b) シミュレーションにおけるメッシュごとの浸水回数 (図 65 の都心部を拡大)

図 66 都心部における衛星画像とシミュレーションにおける浸水回数



(a) 衛星画像 (Google Earth)



(b) シミュレーションにおけるメッシュごとの浸水回数 (図 65 の木更津市を拡大)

図 67 木更津市における衛星画像とシミュレーションにおける浸水回数

3.8 破堤の影響

これまでの損失額推定では、堤防を設定した氾濫計算をベースに行っており、破堤の影響は考慮していない。破堤の影響を明示的に考慮するためには、確率論的な破堤モデルを構築し、水位や波高等に応じて破堤を考慮した氾濫解析を行うことが理想であるが、破堤メカニズムやハザードに応じた破堤確率に関する研究成果が蓄積されておらず、現実的ではない。そこで本研究では、安田ら [57] を参考に、破堤を簡易的に考慮した損失額推定を行い、本研究における破堤の影響を考察する。

安田ら [57]は、事前に堤防なしの氾濫計算に基づく損失額推定を行い構築した、代表地点の水位と損失額との関係式を用い、確率論的な高潮推算で代表地点の水位が代表堤防高を超える場合に、前述の関係式を用いて EP カーブを構築した。すなわち水位が代表堤防高まで達するまでは被害がなく、堤防高に達した場合は破堤するという仮定に基づくものである。現実的には、堤防高を水位が超えなくても破堤する可能性もあり、また堤防を越えた場合でも破堤しない可能性もある。しかし本研究では、簡易的に破堤の影響を考察するため、このプロセスに基づき損失額への影響を調査する。

まず、破堤有無を判断する代表点は東京・千葉・横浜験潮所とする。これらの地点の水位が当該エリアの設計水位を越えた場合に当該エリアの位置する各都県全域で破堤すると仮定する。東京都 [87]・千葉県 [88]・神奈川県 [89]によると、当該エリアの設計水位は表 2 の通りとなる。また、2 章で実施した 10,000 年間の高潮シミュレーションにおいて、各地点で計算された最大水位を表 3 に示す。東京と千葉では、解析上の最大水位がそれぞれ T.P. +3.49 m, T.P. +3.88 m となり、10,000 年間分のシミュレーションの中で設計水位を上回るイベントは存在しなかった。一方、横浜については、解析による最大水位が T.P. +2.82 m となり、2 イベントが設計水位 T.P. +2.71 m を超える結果となった。そこで、この 2 イベントに関してのみ、神奈川県の堤防を未考慮の高潮解析を別途実施し、それらの結果を用いて全資産の損失額を推定した (図 68)。EP カーブ全体をみると、破堤考慮前後でほとんど違いがみられない。年超過確率が低い部分のみをみると、やや破堤考慮後の計算結果が大きくなる結果となった。しかし、保険業界にとって重要な年超過確率 0.5%には影響がなく、また期待値も 0.5%の上昇とほとんど変化がないことが分かった。本節における簡易的な検討から、本研究における破堤の影響は小さいと考えられる。

表 2 東京・千葉・横浜験潮所付近の設計水位

地点	設計水位
東京	T.P. +4 m
千葉	T.P. +4 m 前後
横浜	T.P. +2.71 m

表 3 東京・千葉・横浜験潮所における高潮数値解析による最大水位

地点	最大水位	備考
東京	T.P. +3.53 m	すべて設計水位以下
千葉	T.P. +3.88 m	すべて設計水位以下
横浜	T.P. +2.82 m	2 イベントが設計水位以上

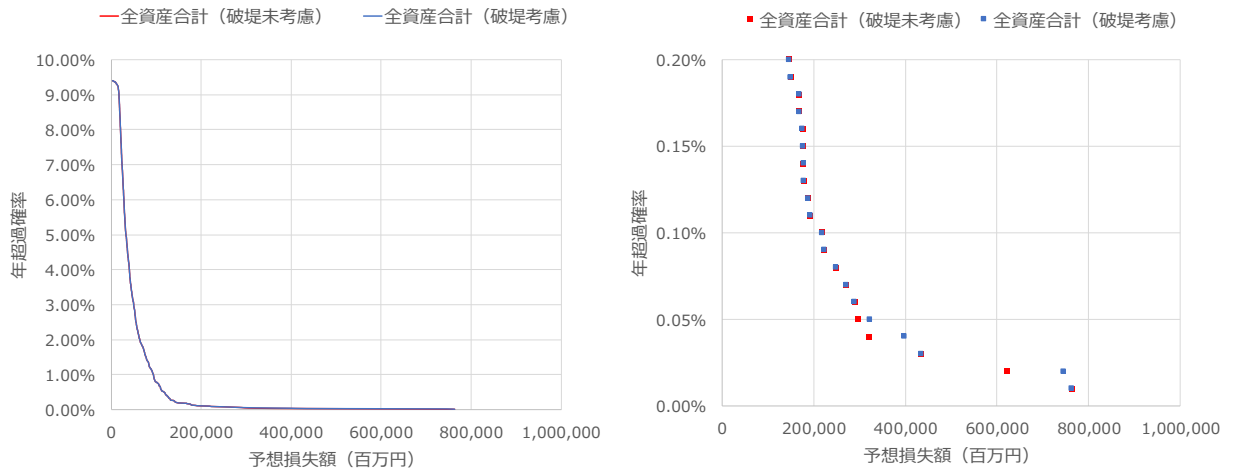


図 68 破堤考慮前後の全資産の EP カーブ

3.9 本章のまとめ

本章では、統計情報から代表的な資産額の平面分布を作成し、前章で計算された高潮浸水深および、国交省の高潮被害関数を用いて、階数を考慮した損失額を計算した。計算された資産ごとの損失額を並び替え、EPカーブを構築した。本研究における資産額は解像度が粗い統計情報を用いていることが大きな要因となり、1,000 台風で年間期待損失額は収束しない結果となったが、資産が存在しない箇所の損失額を除去した数値実験により、資産額分布をより現実に即したものに修正できれば、この課題は解決され、2 章の高潮数値計算数で年間期待損失額まで評価できることが示唆された。さらに簡易的に破堤による影響を考察し、本論文の検討においては、破堤の影響は小さいと考えられる結果となった。

4 評価手続きの不確実性評価

4.1 不確実性の検討対象

リスクは本来的に不確実性を伴うものであり、したがってリスク解析において、この不確実性をどのように合理的に取り扱うかという問題は、きわめて本質的なテーマである [90]。本研究における一連の手続きにおいても不確実性が内在している。この不確実性は「偶然的な不確実性」と「認識的不確実性」の2つのタイプに大きく分類できる [91] [92] [93] [94] [95]。

偶然的な不確実性は、時空間的な差異や変動によるばらつき等から生じる [90]。台風などの自然災害が固有にもつランダム性も偶然的な不確実性である。台風を例に挙げると、発生頻度の高いエリアや季節ごとの台風経路の傾向は判明していたとしても、実際の発生地点や進路を特定できないのは偶然的な不確実性が原因である。そのため、偶然的な不確実性による影響を軽減することは難しい。

認識的不確実性は、情報の欠如や知識の不足によって生じる不確実性のことで、単に不確実性という場合は、こちらを示す場合もある。認識的不確実性はより多くのデータを活用する、あるいは科学的知見の向上により軽減することが可能である [90]。認識的不確実性の主な原因はモデルやモデル中で使われるパラメータに関する知識や情報の不足である [93] [96]。

本章では、この認識的不確実性について評価を行う。不確実性を軽減することはリスク評価にとって重要であるが、保険実務においてはその不確実性の度合いを把握することも、リスクの引き受け方針の決定や保険料設定のために求められている [97] [98]。そのために、まず本論文で検討対象とする代表的な認識的不確実性の要因を示す (表 4)。不確実性として台風モデル、標本抽出、天文潮位の設定、最大風速半径の設定が挙げられる。本研究ではこれらの不確実性について議論する。

表 4 不確実性の検討対象

不確実性の要因
台風モデル
最大風速半径の設定
標本抽出
天文潮位の設定

4.2 台風モデルの不確実性

本研究において高潮数値モデル中の風速・気圧の平面分布は Myers 式を用いて推定している。この風速・気圧分布の推定式の違いで損失額にどの程度の違いが出るかを確かめるため、表 5 に示す 4 通りの分布式の組み合わせによる高潮損失額の感度分析を行い、結果のばらつきを評価する。理想的には、全ての台風について台風モデルを変更した数値解析を行い、EP カーブを再作成して比較すべきであるが、膨大な計算コストがかかるため、感度分析による検討とした。SuWAT ではこれまで使用した Myers ら [65] の台風モデルの他に、Fujita ら [99] のモデルも選択することが可能であるため、その二つのモデルの組み合わせを設定した。なお、感度分析を行う台風は AEP ベースの EP カーブにより、再現期間 100,00, 5,000, 2,000, 1,000, 500, 200, 100, 50, 20 年となった台風とする。図 69 に再現期間ごとの台風モデル別感度分析結果を示す。図中には、4 パターンの分布式の組み合わせから計算した予想損失額の平均値および最大・最小値を再現期間別に示した。保険のリスク管理にとって重要な再現期間 200 年をみると、より長い再現期間と比べると、相対的にモデルの違いによる予想損失額のばらつきが小さい結果となった。また、保険料率の設定に必要な年間期待損失額を算出したところ、最大値あるいは最小値のみから算出した年間期待損失額は、平均値のみから算出したものと比較し、ともに 20%以内の差となった。

表 5 風速・気圧分布式の組み合わせ

組み合わせ パターン	風速分布式	気圧分布式
1	Myers	Myers
2	Fujita	Fujita
3	Fujita	Myers
4	Myers	Fujita

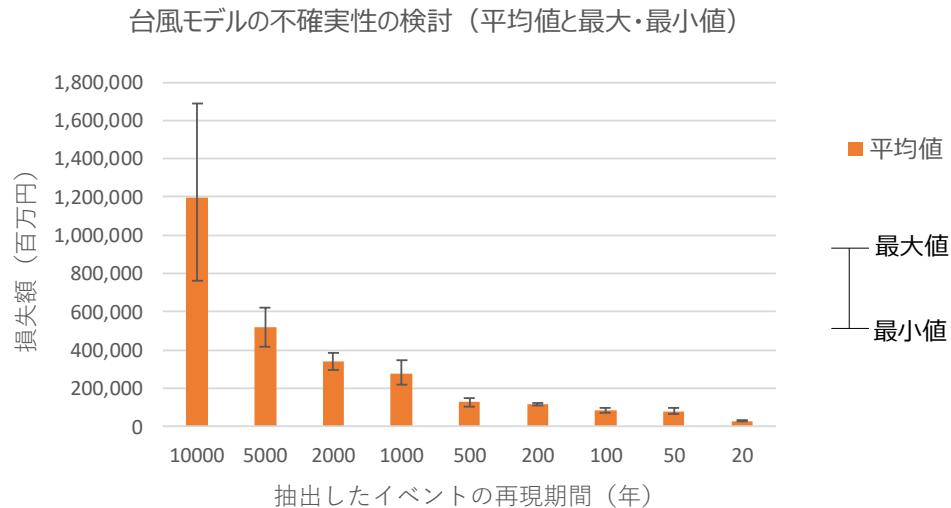


図 69 再現期間ごとの台風モデル別感度分析結果

4.3 最大風速半径設定の不確実性

本研究で使用した確率台風モデルのアウトプットには最大風速半径データが存在しないため、2章の風速・気圧分布の計算においては、加藤ら [63]による台風の中心気圧と最大風速半径の関係式を用いて求めた最大風速半径を使用している。しかし実際の台風は同じ気圧でも必ずしも同じ最大風速半径にはならず、加藤ら [63]は、最大風速半径の分散値も同時に示している。そのため本節では、最大風速半径が変化した場合の予想損失額への影響について、感度分析により評価する。本検討も、台風モデルと同様に、計算コスト削減のため、感度分析による簡易的な検討とした。

まず、加藤ら [63]から中心気圧と最大風速半径の標準偏差との関係をプロットし、それらの回帰式を導いた (図 70)。この回帰式を 4.2 節に示す、代表台風に適用し、最大風速半径を平均値から求めたもの、平均値に標準偏差分足し合わせたもの、平均値から標準偏差分減じた 3 通りの台風データを代表台風分用意し、それらを基に損失額を算出した。加藤らによる最大風速半径の標準偏差は、1010 hPa および 880 hPa では本研究で構築した回帰式から大きく外れている。しかし、本節での感度分析対象となる代表台風の東京湾周辺での中心気圧は 890 hPa から 970 hPa であるため、回帰式の適用範囲であると考えられる。3 通りの最大風速半径の設定から計算した予想損失額の平均値および最大・最小値を再現期間別に示した (図 71)。台風モデルと同様に、再現期間 200 年をみると、より長い再現期間と比べると相対的にモデルの違いによる予想損失額のばらつきが小さくなった。また、最大値あるいは最小値のみから算出した年間期待損失額は、平均値のみから算出したものと比較し、ともに約 10%の差となった。

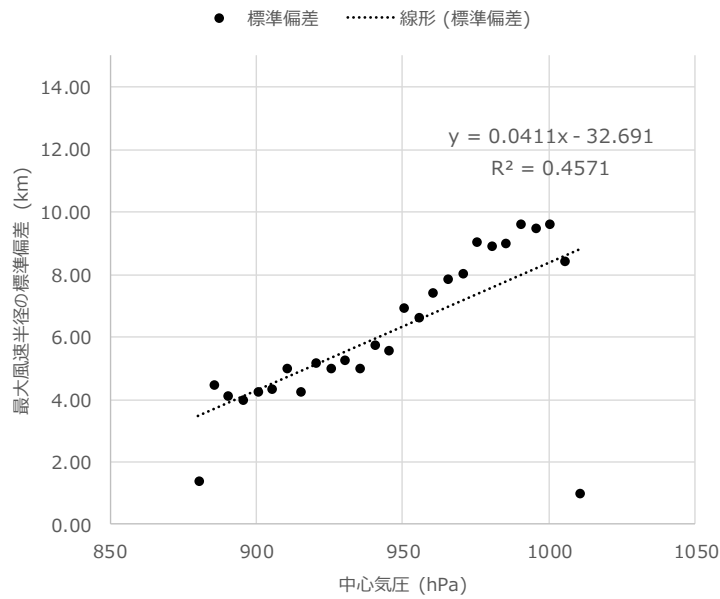


図 70 中心気圧と最大風速半径の標準偏差との回帰式

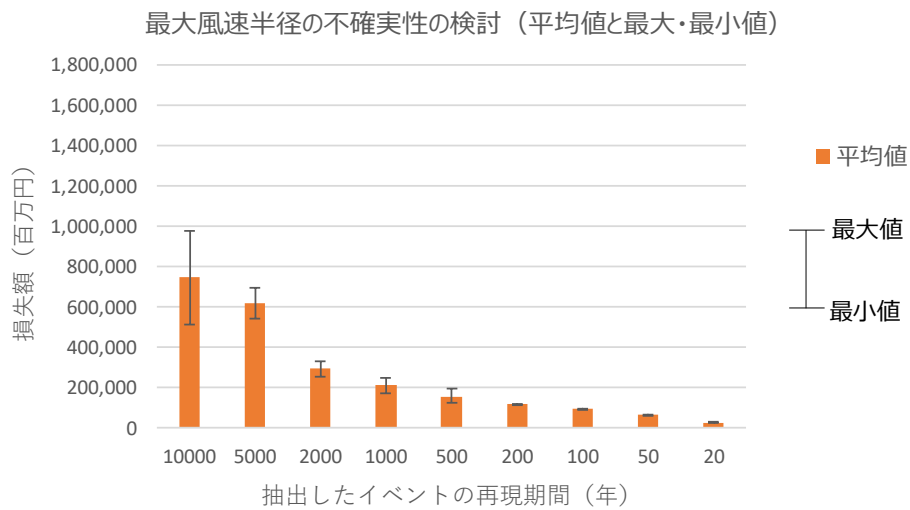


図 71 再現期間毎の最大風速半径別予想損失額

4.4 標本抽出の不確実性

本研究では、2章に示すように確率台風モデルから10,000年間の台風を対象に解析している。ここで、この10,000年間の台風データは、母集団からたまたま取り出された1パターンの10,000年分のデータセットであるといえる。そのため、本節ではこの標本抽出の不確実性について評価する。

理想的には、確率台風モデルから 10,000 年分の台風データセットを大量に用意し、これまでのプロセス通り計算を行い、作成された EP カーブから不確実性を算出したい。しかし、特に高潮数値計算において膨大な時間を必要とするため、現実的でない。そのため、本節ではこれまでの計算に用いた 10,000 年間分の台風データセットを擬似的な母集団と想定し、そこからサブサンプルを幾度も取り出し、EP カーブを多数作成し不確実性を評価することとした。リサンプリングには重複を許し無作為に標本を抽出するブートストラップ法を用い、10,000 年間分のデータを 1,000 パターン分作成し、全資産の EP カーブを作成した。作成された 1,000 の EP カーブから、再現期間毎の 95%信頼区間を作成した (図 72)。また図 73 に再現期間毎の予想損失額の不確実性の指標として変動係数を示す。本論文で実施した 10,000 年間分のシミュレーションにより、保険目的として重要な再現期間 200 年までは変動係数が 0.05 に収まり、再現期間がより長くなると変動係数が増加する結果となった。また年間期待損失額の平均値は 46 億円となり、95%信頼区間は平均値から大小 6%程度となった。

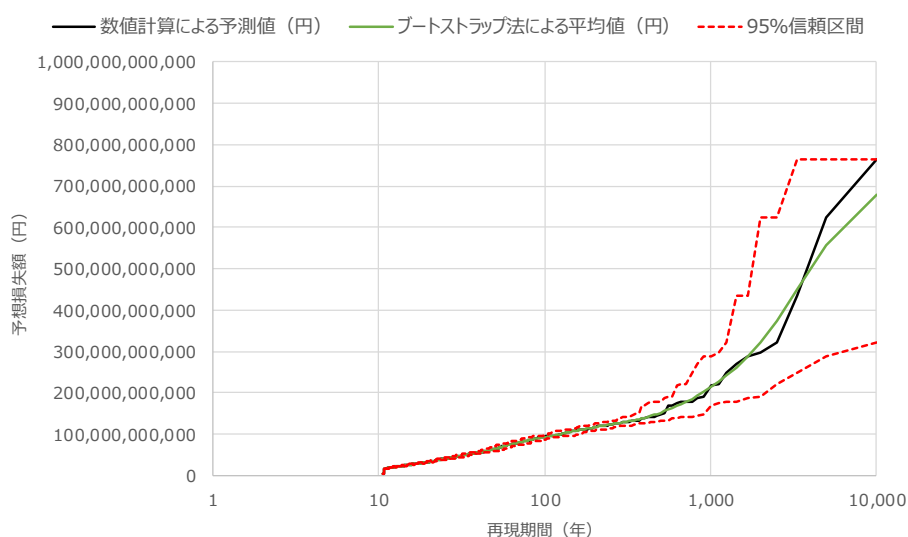


図 72 リサンプリングによる全資産の EP カーブの信頼区間

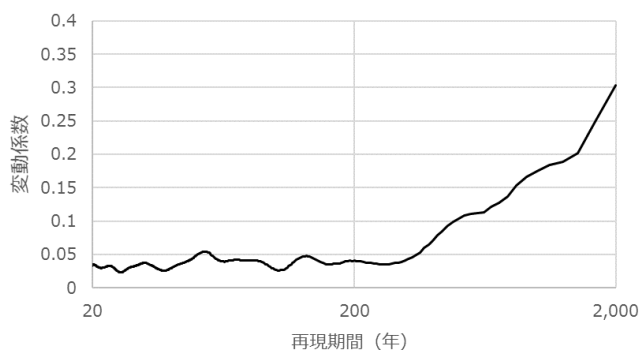


図 73 再現期間毎の予想損失額の変動係数

4.5 天文潮位設定の不確実性

本研究におけるハザード解析では図 20 に示すとおり、ランダムに計算された天文潮位を各台風に与えて計算している。この手法の場合、1つの台風に対して1つの天文潮位を与えることとなり、その妥当性についての考察が必要である。1つの台風に対し複数の天文潮位を与えた場合は、最終的な結果である損失額にもばらつきが発生することとなり、本研究で実施した再現期間別の損失額の信頼性を確かめるには天文潮位設定がどの程度損失額へのばらつきをもたらすかを評価する必要がある。しかし、数値モデルを用いて、一つの台風に対しいくつもの天文潮位を与えて計算を実施することは、計算負荷が大幅に増え非現実である。

そこで本節では、東京湾沿岸に対する計算負荷を抑えた早期損害推定手法を構築し、それを用いて一つの台風に対し複数の天文潮位を与えて損失額を求める感度分析を行い、天文潮位による損失の不確実性を評価することとする。既往研究では、数値計算により高潮損失額を推定し、それらを活用した早期損害推定手法を提案している。鈴木 [12]や辻田ら [13]は、代表1地点の水位から高潮損失額を導くロス関数を示した。しかし Hisamatsu ら [100]は、ロス関数による推定精度が、代表地点における水位が高い場合に落ちることが課題であることを示した。特に強い台風に対して、代表1地点の水位から湾全体の被害を把握することが難しく、複数地点の水位を活用した被害推定が重要であることが示唆された。本論文では、まず入力情報の増加と推定手法の変化による推定精度向上を確かめるため、従来手法であるロス関数に加え、新しくニューラルネットワークを用いた、東京湾における高潮損失額の早期推定手法を構築し、高潮強度毎に2手法の推定精度を検証する。その後、推定精度の良い早期損害推定手法を用いて、1つの台風に対して複数の天文潮位を与えた場合の損害額を推定する。

ロス関数およびニューラルネットワークの構築フローを図 74 に示す。第一に、高潮数値モデル SuWAT により、東京湾において 525 パターンの条件による氾濫計算を実施し、高潮浸水深分布を計算する。第二に、統計情報から東京湾沿岸の資産額分布を作成し、高潮被害関数と推定浸水深から、高潮損失額を求める。第三に、525 の台風毎に計算された、東京湾内の4観潮所（東京・千葉・横浜・横須賀、図 24）の水位から高潮損失額を推定するニューラルネットワークを構築する。また、東京における計算水位と推定高潮損失額とを回帰したロス関数を構築する。最後に、2手法による損失額の推定精度を比較する。高潮数値計算、資産額分布、被害関数のモデルは、2章および3章を活用した。なお、本節における水位とは、高潮偏差に天文潮位を加えた値であり、東京湾平均海面からの高さを示す。

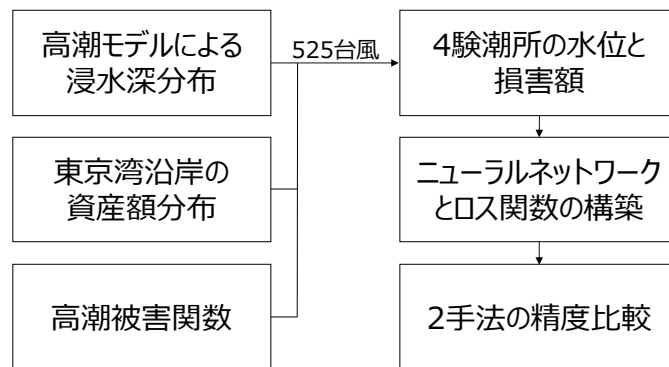


図 74 ロス関数およびニューラルネットワークの構築フロー

1) 仮想台風に基づく高潮損失額の推定

本研究では、さまざまな台風経路と天文潮位、中心気圧を想定した計算条件を設定することとした。まず台風経路は、東京都が公開した高潮浸水想定区域図 [101]の作成に使用した 9 本の経路を含む 15 本の経路を用いた (図 75)。経路 a~e は大正 6 年台風, 経路 f~j は伊勢湾台風, 経路 k~o はキティ台風を参考に設定された台風経路である。次に天文潮位は、東京湾の朔望平均満潮位が概ね T.P.+1.0 m であるため、T.P.+1.0 m, T.P.+0.5 m, T.P.+0 m, T.P.-0.5 m, T.P.-1.0 m の 5 通り設定した。また台風の中心気圧は、時間によらず一定とし、880 hPa から 1,000 hPa の間で 20 hPa 刻みの 7 通りとした。台風の最大風速半径と進行速度は東京都 [101]に倣い、それぞれ 75 km, 73 km/h で一定とした。これらの条件を組み合わせ、合計 525 パターンの条件で高潮解析を実施した。

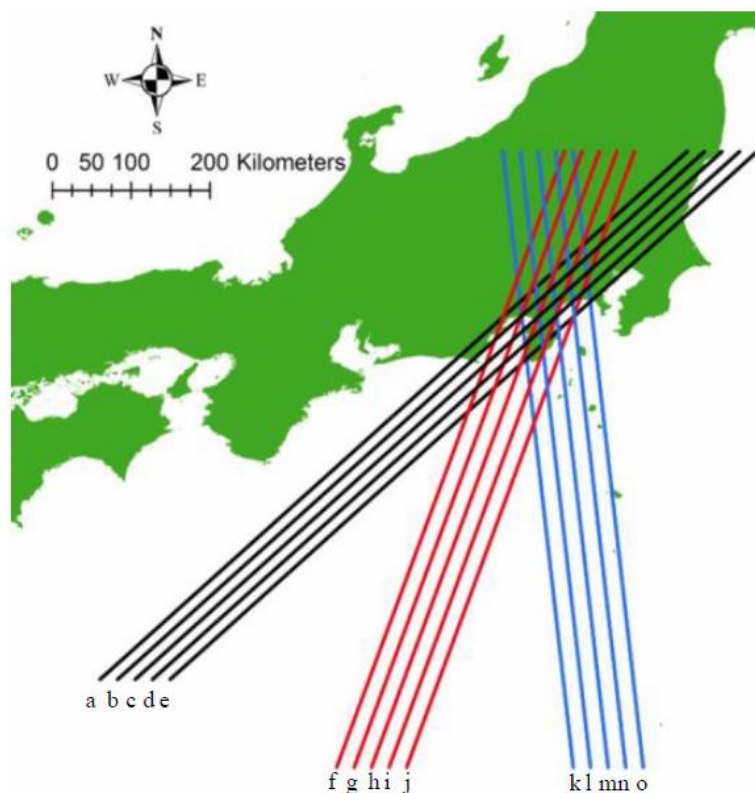


図 75 検討に用いた台風経路

2) 高潮数値解析の結果

高潮数値計算結果の例として、検討した 525 パターンの解析の中で最も浸水が拡大したイベント（潮位は T.P.+1.0 m、経路は図 75 の a、中心気圧は 880 hPa）の浸水深分布を図 76 に示す。525 パターンの高潮数値計算による 4 験潮所（東京・千葉・横浜・横須賀）における水位のヒストグラムを図 77 に示す。横軸の水位は東京湾平均海面からの高さである。東京・千葉験潮所は湾奥に位置しており、高潮が卓越しやすいため、最も頻度が高い水位は 2.0~2.5 m となった。一方で、横浜・横須賀験潮所では水位が 1.0~1.5 m が最も多く計算された。既往研究 [102]では、気候変動を考慮した場合の東京湾奥の最大高潮偏差が 2 m 弱となっており、本研究で計算されたイベントは気候変動による強い台風による高潮も網羅しているといえる。

525 パターンの高潮数値計算による最大浸水面積のヒストグラムを図 78 に示す。5 km²までの浸水面積を示すイベントが最も多い結果となり、最大では約 180.1 km²となった。同じく予想損失額については、2 千億円までを示すイベントが最も多い結果となった（図 79）。図 80 に 525 パターンの高潮数値計算に基づく 4 験潮所（東京・千葉・横浜・横須賀）の水位と東京湾沿岸の推定損失額との関係を示す。各験潮所における水位と東京湾沿岸の予想損失額の相関係数は 0.55~0.59 とな

り相関がある結果となった。また水位が上昇すると、予想損失額のばらつきが大きくなる傾向にある。例として、東京で水位が 3 m 以下と 3 m 以上の予想損失額の標準偏差はそれぞれ 686 億円、9,502 億円となった。

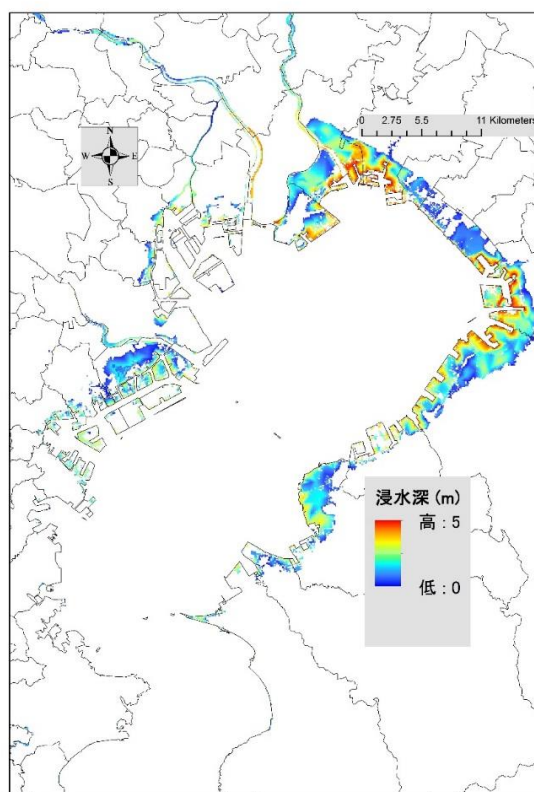


図 76 高潮浸水面積が最大となったイベントにおける浸水深分布
(潮位：T.P.+1.0 m，台風経路：図 75 の a，台風の中心気圧：880 hPa)

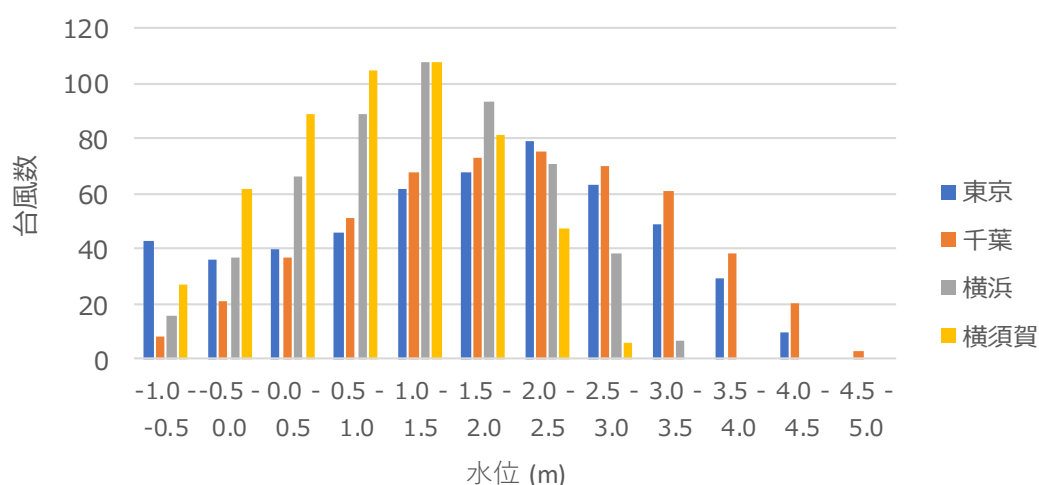


図 77 525 パターンの高潮数値計算による 4 験潮所（東京・千葉・横浜・横須賀）における水位のヒストグラム

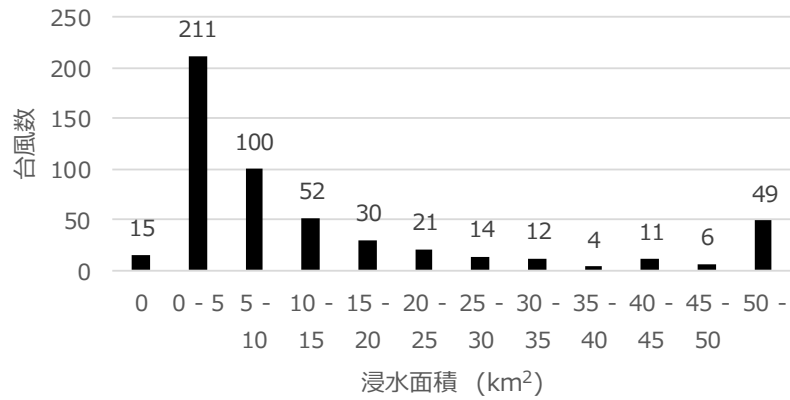


図 78 525 パターンの高潮数値計算による最大浸水面積のヒストグラム

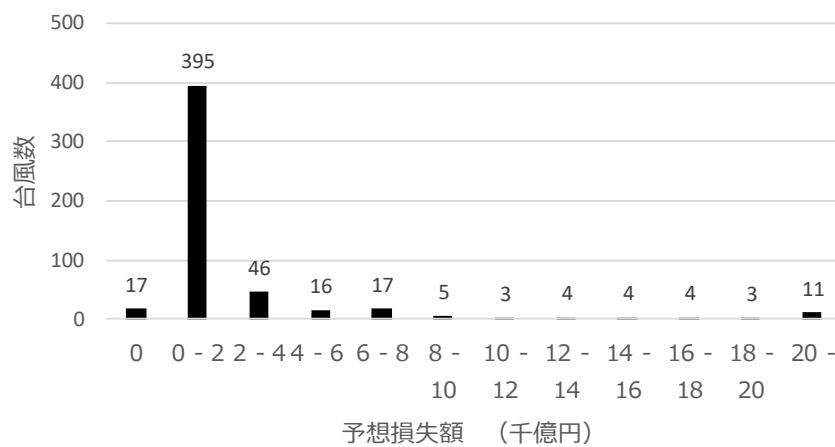


図 79 525 パターンの高潮数値計算に基づく予想損失額のヒストグラム

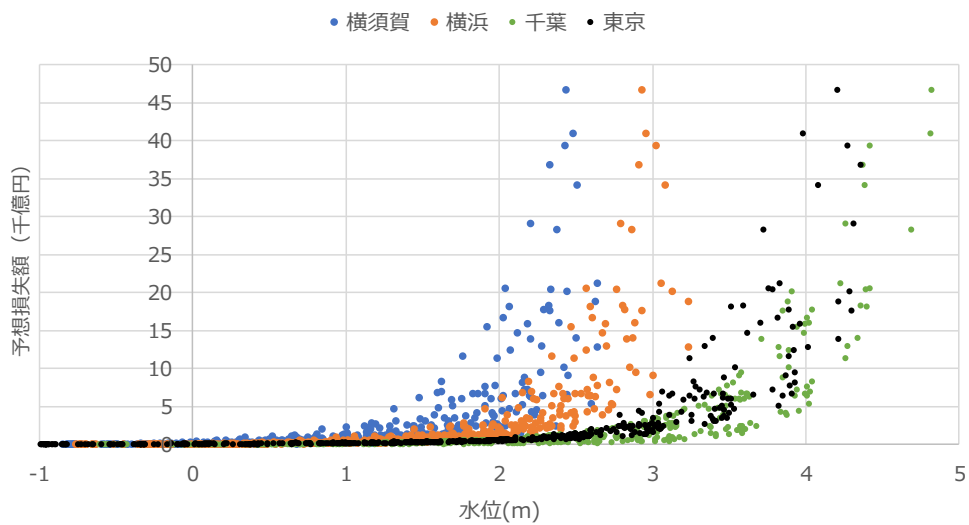


図 80 525 パターンの高潮数値計算に基づく 4 験潮所 (東京・千葉・横浜・横須賀) の水位と東京湾沿岸の推定損失額との関係

3) ニューラルネットワークと高潮ロス関数の構築

ニューラルネットワークは図 81 に示すとおり、入力層、中間層、出力層の 3 層の単一中間層の階層型とする。入力層の説明変数は 4 験潮所における水位で、その数は 4 つとし、目的変数は東京湾沿岸の高潮損失額のみとする。事前に分析した 525 パターンの高潮損失額のうち、ランダムに抽出された 100 パターン分を検証用のデータとし、残りの 425 パターン分を教師データとした。すなわち、ニューラルネットワークで、教師データをパターン毎に 4 験潮所における水位と予想損失額を学習させ、検証用データのパターン毎に、4 験潮所における水位から損失額を予想させることでモデルを検証する。本研究では、重みの更新値を 0.001、学習回数の制限を 1,000 とした。中間層のユニット数は、1~10 まで変動させて分析を行い、検証用データにおいて平均平方二乗誤差 (RMSE) が最も低い中間層のユニット数を確認した。

ロス関数は、525 パターンの予想高潮損失額から、東京の水位と推定損失額を 6 次の多項式で回帰して構築した (図 82)。同図には、3 章までで求めた確率台風モデルに基づく東京の水位と損失額も併記している。東京の高潮偏差は、気圧と風速により推定できる経験式 [35] が既に存在し、当該地点のロス関数をもっとも有用性が高いため、東京における水位をロス関数の説明変数とした。

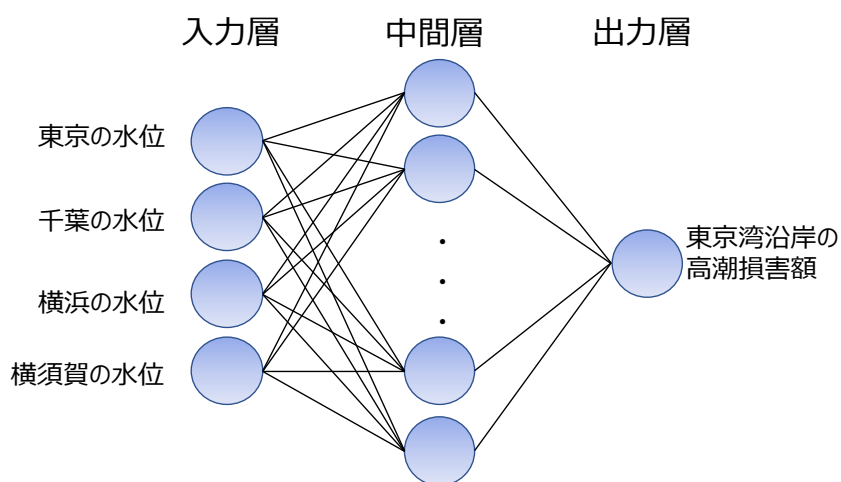


図 81 ニューラルネットワークの構成

図 80 に示す通り、水位がマイナスの場合でも計算では損失額が算出されたが、その損失額は極めて小さく、また実際は東京湾平均海面で浸水する場所に資産は存在しないため、図 82 は水位が 0 m 以上の関数を示している。また、3 章において、確率台風モデルで再現された 10,000 年分の台風により東京湾に被害をもたらす 1,000 台風の水位と損失額も一緒に示している。既往研究による水位

と損失額との結果は、本研究によるものと概ね傾向が一致していることが確認された。

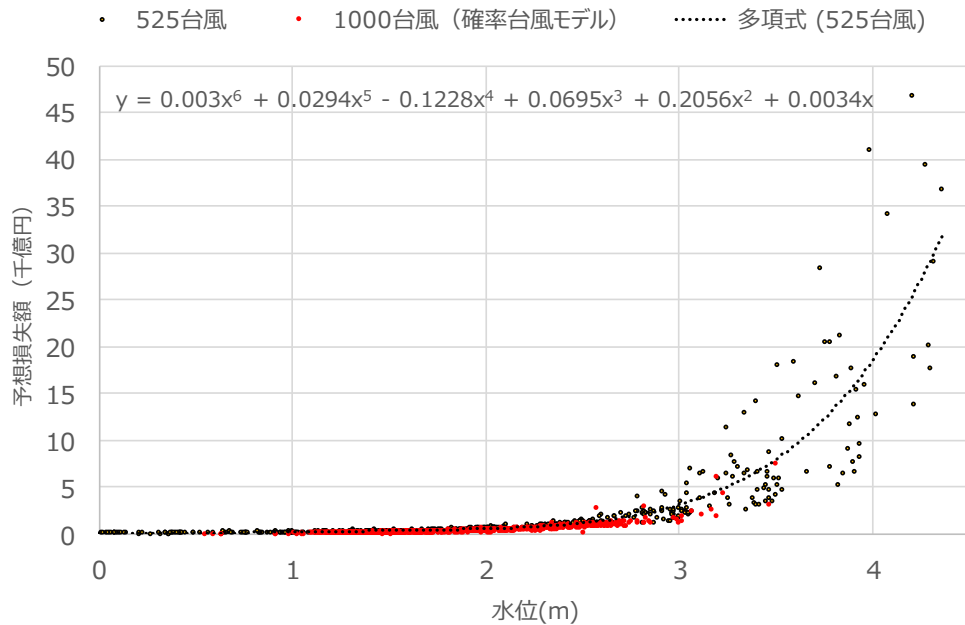


図 82 ロス関数

4) 各手法の精度比較

中間層のユニット数を変えた複数のニューラルネットワークおよびロス関数により、100 パターンの台風の高潮損失額を計算し、数値解析による結果と比較した RMSE を図 83 に示す。RMSE は、ロス関数で 1,877 億円に対し、ニューラルネットワークは中間層のユニット数 8 が最小で 279 億円となり、ニューラルネットワークによる計算が、ロス関数よりも推定精度が大きく向上する結果となった。検証用の 100 台風に対し、数値計算と 2 つの推定手法による推定結果とを比較した(図 84)。ロス関数による結果は、損失額が大きい範囲では特に推定精度が悪くなるが、中間層のユニット数を 8 に設定したニューラルネットワークでは、損失額が大きくなっても高い推定精度を保つ結果となった。より多様な台風条件への適用性を確認するため、構築したニューラルネットワークとロス関数を用い、3 章までで確率台風モデルにより計算された結果を用いて精度を確認したところ、RMSE は前者が約 130 億円、後者が約 280 億円となり、こちらもニューラルネットワークの精度が高くなった。ニューラルネットワーク構築時の教師データは、15 パターンの台風経路から作成したが、さまざまなパターンの台風にも適用可能であることが示された。

高潮の強度毎に推定精度を確認するため、東京における水位を 0m から 1 m 程度毎に区切り、それぞれの手法ごと、対象とするデータセットごとに平均平方二乗誤差率 (RMSPE) を算出した (表 6)。評価対象とするデータセットは、本章でニューラルネットワーク構築の際の検証用に使用した 100 台風および 3 章までで計算した確率台風モデルによる 1,000 台風である。まず全ての検討において、ニューラルネットワークによる推定精度がロス関数によるものより上回った。100 台風に関しては、両方の手法とも水位が上がれば RMSPE も小さくなる結果となった。しかし 1,000 台風に関しては、ニューラルネットワークは水位が上がれば RMSPE が小さくなるが、ロス関数は水位が 3m 以上の際に精度が落ちる結果となった。高潮被害が出ない、あるいは極めて少ない、東京の水位が 2 m 以下の場合、どちらの手法も相対的に精度が落ちるが、損害が増え始める、東京における水位が 2 m を越える高潮損失額に対してはニューラルネットワークにより高い精度で予測が可能であることが示された。これは、水位が高くなると、東京湾沿岸のさまざまな箇所でも浸水被害が発生するため、各地点の水位を考慮したニューラルネットワークがロス関数に比較して優位になるからであると考えられる。

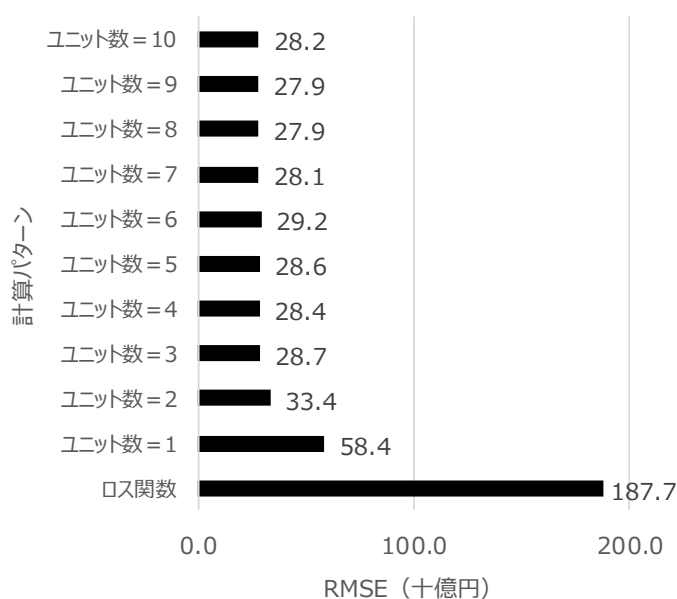


図 83 手法毎の損失額推定精度
(ユニット数 1~10 とした時のニューラルネットワークおよびロス関数)

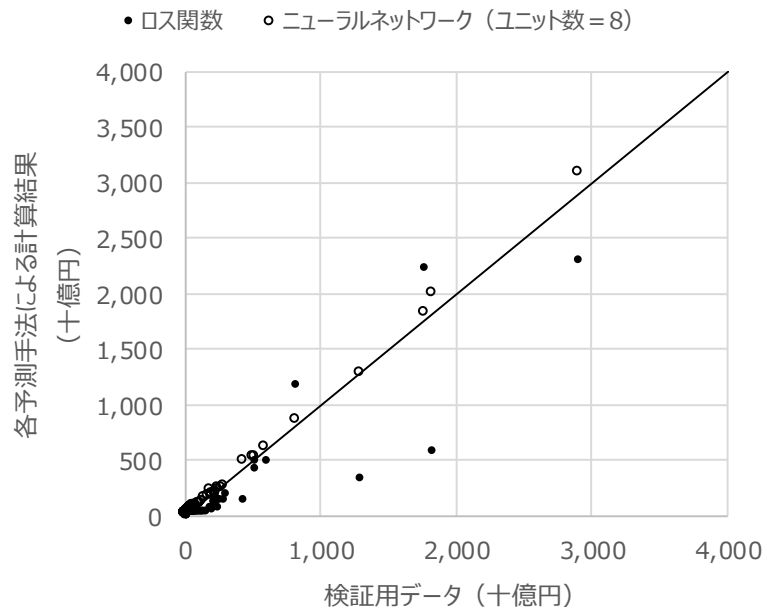


図 84 本研究による検証用データを用いた検証結果

表 6 ロス関数とニューラルネットワークによる RMSPE

東京の水位(m)	100 台風		1,000 台風	
	ニューラルネットワーク	ロス関数	ニューラルネットワーク	ロス関数
0~1	0.99	3.55	3.65	0.56
1~2	0.05	0.53	0.14	0.16
2~3	0.02	0.35	0.11	0.18
3~	0.01	0.19	0.02	0.64

5) 天文潮位設定の感度分析

構築したニューラルネットワークによる天文潮位設定の感度分析を実施する。2 章で計算した 1,000 台風の最大高潮偏差に様々なパターンの天文潮位をランダムに設定して加えて求めた水位をニューラルネットワークの入力層に用いる方法が簡単ではあるが、高潮は非線形現象であり、天文潮位に応じて同じ台風でも高潮偏差は異なる [103]。そこで、非線形性を考慮したニューラルネットワークによる 4 験潮所における水位を推定するモデルを構築し、求められた水位を用いて損失額を推定する。

東京のニューラルネットワークは 2.6 節で構築したものを、千葉・横浜・横須賀は東京と同じ

構造のニューラルネットワークで経験式による結果を説明変数から外し構築した。東京と同様に1,225 台風を教師データとし、残りの 200 台風で検証した。千葉・横浜・横須賀におけるニューラルネットワークと数値計算による推定水位を示す (図 85)。千葉・横浜・横須賀の RMSE は、それぞれ 0.174 m, 0.168 m, 0.123 m となった。

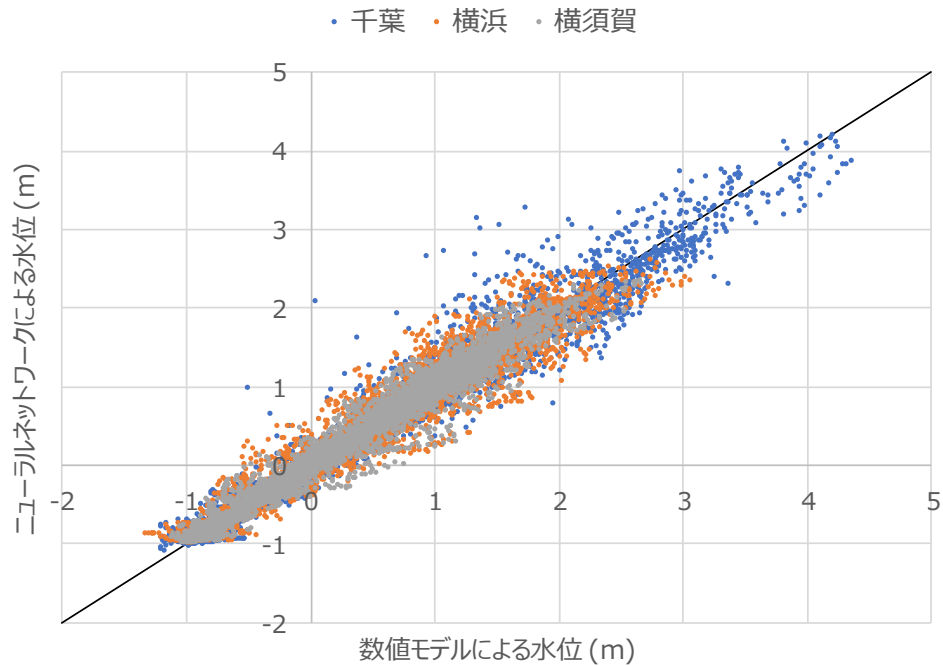


図 85 千葉・横浜・横須賀におけるニューラルネットワークと数値計算による推定水位

次に、これら 4 地点の水位推定モデルを用い、確率台風モデルによる約 9 万台風について水位を推定した。その際、各台風に設定される天文潮位は、図 20 のヒストグラムからランダムに 10 パターンを設定した。10 パターンの天文潮位設定 (約 9 万台風×10 パターン) により、約 90 万台風の損害額を予測し、損害額の上位 1,000 台風を対象として、10 本の EP カーブを作成し、代表再現期間における変動係数を算出した。作成された EP カーブを図 86 に、代表再現期間の変動係数を図 87 に示す。再現期間が長くなるにつれ、予想損失額のばらつきは大きくなり、変動係数は再現期間 200 年で 0.03, 500 年で 0.05, 1,000 年で 0.10 程度となった (図 87)。どの再現期間とも、標本抽出の不確実性で検討した際の変動係数をやや下回るが、再現期間 200 年の変動係数が、再現期間 1,000 年では数倍になることは共通している。

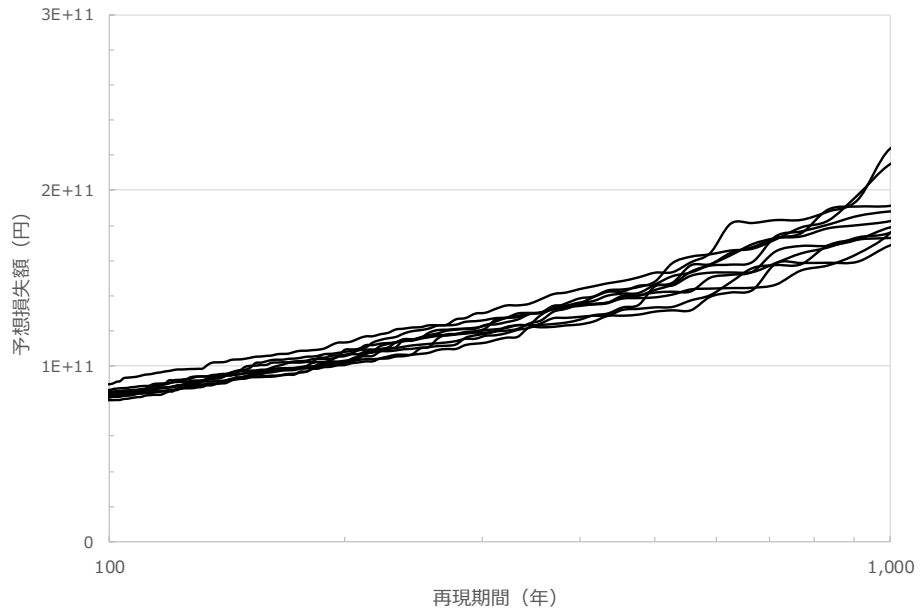


図 86 10 パターンの天文潮位による EP カーブ

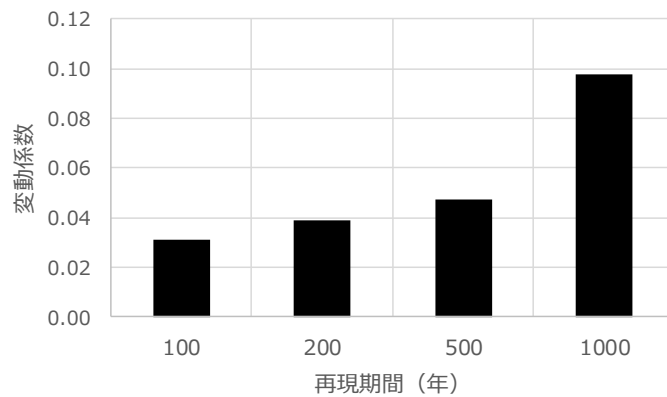


図 87 代表再現期間の変動係数 (損失額)

今回作成した水位から損害額を推定するニューラルネットワークは、シンプルにするため、入力データを験潮所の最大水位としている。説明変数として、水位の閾値を決め、それを超える時間を加える、あるいは教師データの作成パターンを増やせば、推定精度の更なる向上が期待できる。

6) 早期損害推定への展望

本章で構築した 2 種類のニューラルネットワークによる早期損害推定手法は、本論文においては天文潮位による高潮損失額への影響を議論するために活用したが、その他の活用可能性として、実

際に災害が発生した場合においても、迅速な被害の把握に活用できると考えられる。

保険による災害への備えは我が国も推進しており、水害発生後の迅速な損害査定は、被災者の生活再建にとって極めて重要である。そのために災害発生時には被害全体を迅速に把握することが求められる。被害規模を把握することは、損害保険査定員の人員確保計画に役立ち、迅速な保険金支払いに貢献することが期待される。建物等の被害は浸水深から推定され、現在では浸水深の平面分布は、現地調査 [104]・数値解析による再現 [104]・衛星写真による推定 [105]が一般的である。しかし迅速性が優位な衛星写真の場合でも、被害把握に数日以上かかることが課題である。

本研究で検討した、水位から損害額を算出するニューラルネットワークによる推定手法を用いれば、大規模な高潮被害が発生した場合においても、随時公開される潮位情報の最大水位を入力し、即座に沿岸部の損失額を推算することが可能である。また教師データ作成の過程において、保険会社等の契約情報を用いて損失額を計算してニューラルネットワークを構築しておけば、災害時に当該ポートフォリオに基づく損失額が計算でき、企業においても迅速な災害対応が可能となる。大手自然災害モデルベンダーでは、近年高潮被害をもたらした平成30年台風第21号が上陸して数日後に、当該台風による工業物件の被保険損失額を予測した [106]。予測結果は2,570億円から5,020億円であり、倍半分の予測精度のばらつきがある。本研究によるニューラルネットワークの予測精度は、図84から、モデルベンダーの予測精度のばらつきの同程度以下となることから、実務への活用が期待できる。また、水位の観測データがなくても、気象予測情報を用いれば、気象場から水位を算出するニューラルネットワークを介して損失額も推定することができる。

7) ハザードマップ作成や既往研究の天文潮位設定に対する考察

過去に政府や自治体で作成されている高潮ハザードマップ [101] [107]における計算条件として、天文潮位は朔望平均満潮位をベースとして設定されている。これは、ハザードマップはワーストケースを想定して作成されているためであり、それを基に作成された浸水深分布は住民への危険の周知には大変有効である。また、確率論的な高潮リスク評価を行った既往研究では、天文潮位は言及されていないもの [57] [13] [14]と朔望平均満潮位を用いているもの [29]とがあるが、天文潮位のばらつきは考慮せず損失額を計算している。確率論的なリスク評価において、全てを朔望平均満潮位にした場合、予想損失額は過大評価となることが考えられ、また平均潮位とした場合では再現期間が長い損失額は天文潮位が大きい場合を想定できず過小評価になる可能性がある。

そこで、ここでは本論文で作成した2種類のニューラルネットワークを用い、3章で計算した天文潮位をランダムに設定した場合の再現期間別合計損失額と、全イベントで天文潮位が朔望平均満潮位の場合と平均潮位の場合の3パターンで比較を行い、政府や既往研究の天文潮位設定について

議論する。

図 88 にパターン毎の再現期間別合計損失額を示す。前述した通り、天文潮位を朔望平均満潮位とした場合にはランダムに設定した場合に比べて過大評価となり、平均潮位とした場合には過小評価となることが分かった。再現期間別にみると、再現期間 200 年における朔望平均満潮位および平均潮位による予想損失額は、天文潮位をランダムに設定した場合のそれぞれ 2.39 倍、0.61 倍となる。再現期間 1,000 年における朔望平均満潮位および平均潮位による予想損失額は、天文潮位をランダムに設定した場合のそれぞれ 2.53 倍、0.49 倍となる。

朔望平均満潮位は数値計算で実施した計算において、天文潮位が全ての台風で最大相当の数値で固定されているため、天文潮位をランダムに設定した数値計算による損失額よりも大きくなる。また天文潮位の不確実性を考慮した場合、損失額の確率分布の裾は平均潮位で固定されている場合と比べて長くなる。高潮被害は沿岸部がある程度の水位には対応した防護をしているため、他の災害と比べて再現期間が長い際に卓越する災害であり、再現期間が短い場合には被害は発生しにくい。天文潮位のばらつきを考慮すると、考慮前と比べて損失額の確率分布が末広がりになる。高潮被害の発生は頻度が低いため、この確率分布の裾の形状で、再現期間毎の損失額だけでなく年間期待損失額まで変化する。したがって、高潮リスク評価時に平均潮位で固定すると、過小評価となってしまふことが分かった。なお、年間期待損失額は、朔望平均満潮位で固定したものと平均潮位で固定したものが、天文潮位の不確実性を考慮したものと比べて、それぞれ 2.86 倍と 0.79 倍となった。

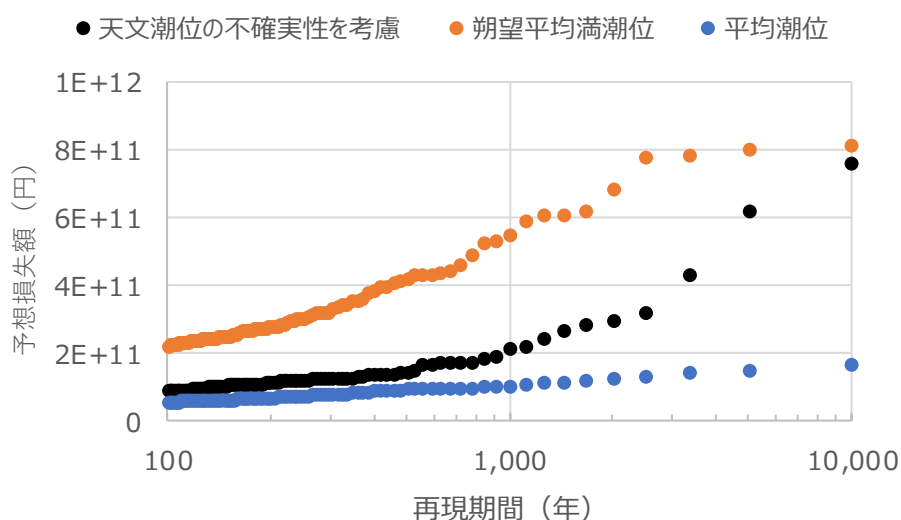


図 88 天文潮位毎の再現期間別合計損失額

4.6 本章のまとめ

本章では、本研究における高潮リスク評価手続きにおける4つの不確実性の主要因について、それらがもたらす予想損失額への影響について考察した。第一に、台風モデルの違いによる損失額の感度分析を行い、再現期間毎の不確実性を示した。第二に、最大風速半径の不確実性を感度分析により評価し、再現期間毎の不確実性を示した。第三に、標本抽出の不確実性について、ブートストラップ法により検討した。最後に、天文潮位の不確実性について、機械学習の手法を用いて評価した。

結果として、それぞれの不確実性の保険にとって重要な再現期間200年における影響は、再現期間500年以上の不確実性と比べて相対的に小さく、保険のリスク管理目的としての影響は限定的である。また10,000年間という計算期間も保険目的であれば大きな不確実性の要因とはならないと考えられる。

ニューラルネットワークを用いた数値実験により、天文潮位のばらつきを考慮せず固定した場合は、代表的な再現期間だけでなく年間期待損失額にも不確実性が生じることが分かった。全台風について天文潮位を一定とする場合は、朔望平均満潮位に設定すると過大評価、平均潮位に設定すると過小評価となる。したがって、保険目的とした高潮リスク評価においては、従来手法のような天文潮位を一定とする手法では不十分であると考えられ、天文潮位のばらつきを考慮することでより適正なリスク評価が可能となる。さらに、この機械学習の手法が今後起こりうる高潮災害時の早期損害推定に対しても有効な手段であることを示した。

5 被害関数の高度化

本章では、高潮損失額推定の際に活用する高潮被害関数の高度化について示す。これまでの計算で使用した高潮被害関数としては国交省の治水経済調査マニュアル（案） [56]の洪水被害率表にイギリスの海水による被害係数を乗じたものを使用している。海外の情報を用いる理由としては、辻田ら [13]が指摘するように、日本における海水による被害データが存在しないためである。また、治水経済調査マニュアル（案）の被害率表は平成 8 年までの水害被害実態調査をもとに設定されており、近年の水害被害実態を踏まえて情報を更新すべく、国交省も検討を進めている [59]。

損害保険会社では過去の災害について多くの保険損失情報を有しており、この情報から水害を受けた保険対象物の位置、損害率情報等が得られる。このデータは従来の経験やヒアリングベースの被害関数より客観的であり、かつ保険目的として適切であると考えられる。そこで本章では、高潮と同様に浸水深から被害が発生する洪水を例に、保険損失情報から被害関数を構築する方法を検討した。第一に、近年発生した代表的かつ大規模な洪水被害である平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の際の保険損失情報を入手し、その情報に基づいた洪水被害関数の構築手法を示す。

高潮は台風や低気圧に起因するため、洪水が同時に発生する場合がある。保険会社の保険損失情報は、台風被害の原因が洪水・高潮と区分できなく、また浸水深情報が存在しないデータも存在するため、これらの情報だけで高潮被害関数を構築するには不十分である。そこで本章では、保険損失情報を活用した国内の高潮被害関数の蓄積を目的とした参考情報として、近年発生した代表的な高潮被害をもたらした平成 16 年台風第 16 号台風および平成 30 年台風第 21 号による高潮浸水深分布の再現計算を行う。平成 30 年台風第 21 号に関しては、再現計算結果の検証に用いるため、神戸市・芦屋市・西宮市・尼崎市の一部の高潮浸水深の測定も実施した。また、この災害では芦屋市の南芦屋浜でも越波・打上げによる浸水被害が発生し、その他の場所でも越波・打上げにより浸水被害が拡大した可能性があることが指摘されている [108]。そのため最後に、高潮・波浪結合モデル [40]により推定された有義波高を用いて、越波・打上げによる浸水被害について定性的に考察する。これらの再現計算に関する内容は付録に記す。

将来的に高潮被害関数を構築する場合は、これらの再現計算結果を用いて、まずは高潮の被害を抽出し、洪水被害関数構築と同様の手法により高潮被害関数を構築することが可能である。

5.1 保険損害情報を基にした被害関数の構築

- 1) 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の水害の特性

平成 27 年 9 月 9 日から 10 日にかけて、台風 17, 18 号により、南からの暖かい湿った空気が流れ込み、幅 100~200km の南北に伸びた線状降水帯が、関東地方と東北地方に形成され [109]、栃木県を中心に大雨をもたらした。特に日光市今市では日降水量が 9 日、10 日とそれぞれ 366.5 mm, 233.0 mm に達し [110]、観測史上 1 位と 4 位を記録した。この大雨は特に鬼怒川流域で顕著となり、鬼怒川下流の水位観測所の平方、水海道で共に既往最高水位、計画高水位を上回った。流下能力を超えた洪水は鬼怒川下流部の 7 カ所で溢水・越水し、そのうち茨城県常総市の若宮戸では大規模な外水氾濫を伴う溢水となり、また同市三坂町では幅 200m 以上にわたって破堤が生じた。今回の洪水により常総市内での住家被害は全壊 53 棟、大規模半壊 1,578 棟、半壊 3,476 棟、その他床上・床下浸水が合わせて 3,220 棟 [111]にのぼった。また破堤が起こったことで洪水流による家屋流失、漂流物の衝突などの被害が発生したことが特徴的であった。

2) 保険金支払い情報の収集

損害保険会社の支払報告書には、住所情報、柱、屋根、用途、階数、浸水深等の詳細な属性情報の他に、保険対象の金銭的評価額である保険価額、および認定損害額の情報が含まれている。一方で浸水深は床上あるいは地盤から測定した浸水深のどちらか一方のみが記載されているものが大半を占めている。本章では、特に被害の大きかった茨城県常総市、つくばみらい市、下妻市について、本支払報告書から建物および内容物の住所情報と損害率を抽出した。なお、本章での損害率とは認定損害額を保険価額で除したものを示す。

抽出した支払情報の件数は、建物が 136 件、内容物が 166 件であった。抽出情報の属性内訳を図 89 に示す。柱は、建物と内容物ともに木骨のものが大半を占めており、内容物は構造不明の物件が 3 割程度存在した。階数は建物と内容物ともに、1 階建あるいは 2 階建が大半である。建物は、小さい損害率の件数が多く、損害率が大きくなるにつれて件数が減少する傾向にあるが、内容物は、損害率が 0.9 を越える件数が 29 件と突出している (図 90)。これは内容物が家具等、床上に配置され使用される物が多く、建物と比べ低い浸水深でも被害を受けやすいためだと考えられる。

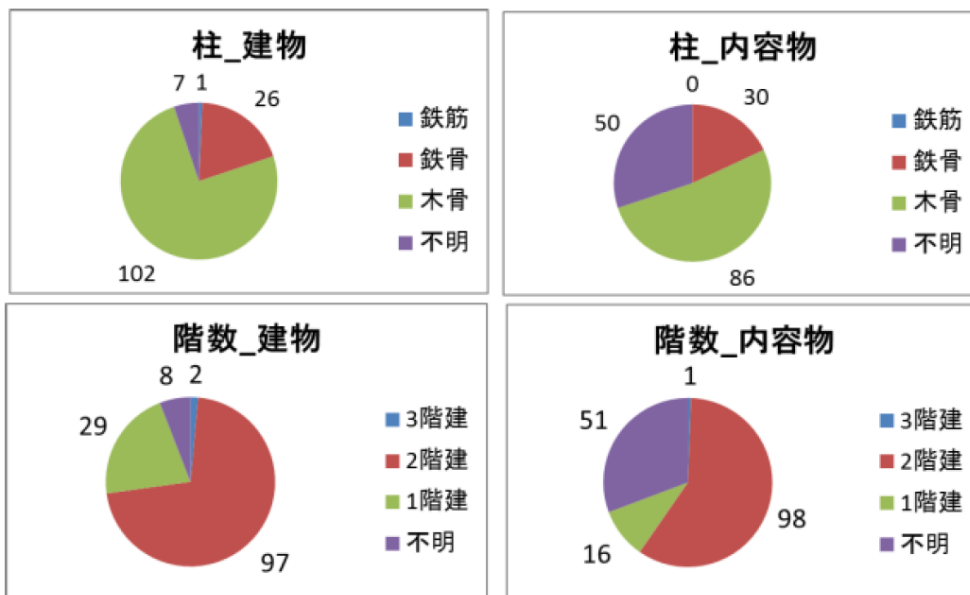


図 89 抽出情報の属性内訳

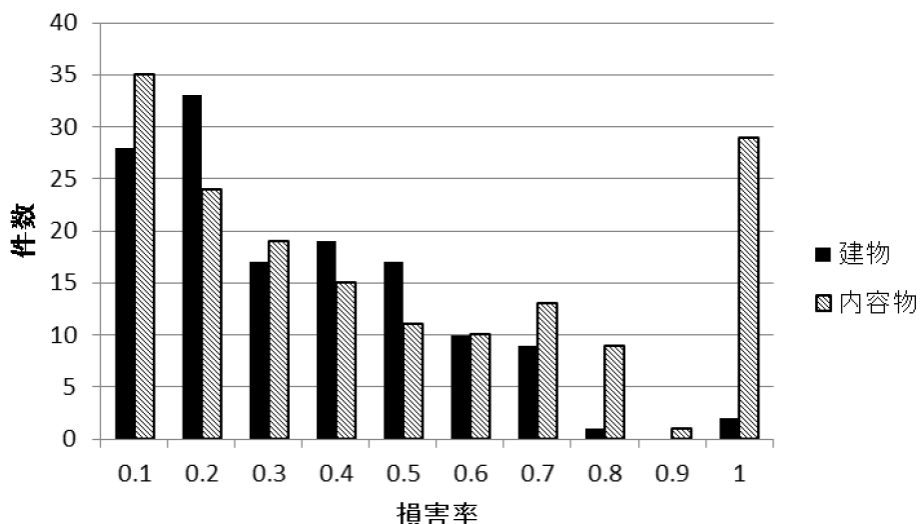


図 90 抽出情報の損害率度数分布

3) 浸水深分布の推定

・ 現地調査

調査対象域は主に茨城県常総市とその周辺区域のうち、鬼怒川の破堤と溢水により、約 40km² の範囲が浸水 [112]した、浸水被害の顕著な鬼怒川左岸側の地域とした。現地調査は 2015 年 9 月 14 日、10 月 5 日の計 2 回実施した。1 回目は破堤地点、溢水地点の概況調査と対象域北部の浸水深調査、2 回目は対象域の網羅的な浸水深調査を行った。概況調査では破堤地点、溢水地点での外水氾濫による大まかな地形変化を写真で記録し、浸水深調査では浸水した痕跡の残る地点を地図上に記録すると共に、その地点での地面から浸水痕までの高さを 31 地点記録した。

・ 洪水解析に用いる数値モデル

洪水解析には、MIKE by DHI（デンマーク水理環境研究所製）を用い、1次元不定流解析を行う MIKE11 モジュール [113]と、2次元解析を行う MIKE21 モジュール [114]とを結合して同時解析した。1次元不定流解析の連続式を式(14)、運動方程式を式(15)に示す。

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (15)$$

ここで Q は流量、 q は側方流入流量、 α は流速分布による補正係数、 A は流下断面積、 h は水平基準面からの水位、 C は Chezy 抵抗係数、 R は径深である。2次元不定流解析の連続式を式(16)、運動方程式を式(17)および式(18)に示す。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \\ & \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \\ & \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega_p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

ここで ξ は水位、 p, q は x, y 方向の流量フラックス、 d は水深、 h は水位差 ($\xi - d$)、 C は Chezy 抵抗係数、 f は風摩擦効果、 V, V_x, V_y は風速、 Ω はコリオリパラメータ、 ρ_w は水の密度、 p_a は大気圧、 τ は有効摩擦応力である。また、相互のモデルの流量のやり取りを計算する越流公式は式(19)(20)(21)の通りである。

$$Q = wC_f h_1 \quad (h_2/h_1 \leq 2/3) \quad (19)$$

$$Q = w \frac{3}{2} \sqrt{3} C_f h_2 \quad (h_2/h_1 > 2/3) \quad (20)$$

$$C_f = \sqrt{\frac{2g}{2g/C^2 + 2gLn^2 / h_1^{4/3}}} \quad (21)$$

ここで w は破堤幅， C_f は補正された流量係数， h_1 は上流側越流水深， h_2 は下流側越流水深， C は補正前流量係数， L は堤頂幅， n はマニング粗度係数である。

1次元不定流解析には，国交省が管理する河川横断面図を用い河川断面データを入力し，鬼怒川下流の鬼怒川水海道水位観測所から平方水位観測所までの区間を河道としてモデル化した。河道内の粗度は区間内に一律で 0.03 とし，境界条件は鎌庭水位観測所の時系列水位に整合するよう，上流端および下流端の観測水位に基づいて設定した。計算期間は定常計算を含めて 2015 年 9 月 7 日 0:00～9 月 12 日 0:00 とした。2次元不定流解析には国土地理院の 5 m メッシュ標高データおよび JAXA の 7.5 m メッシュ土地被覆データを用い，それらを 10 m×12.33 m メッシュに補正して使用した (図 91)。1次元不定流解析 (図 91 の青線部分) と 2次元不定流解析 (図 91 の着色部分) の境界条件として，双方モデルの水位，河道兩岸の天端高を用いた，本間の越流公式に従い流出入の計算を行う。若宮戸の溢水による河川断面の変化および三坂町の破堤は，国土交通省が報告した情報 [112]に基づき，図 92 に示すようにそれぞれ時系列でモデル化した。解析対象域の浸水被害は主に外水氾濫による影響であり，内水氾濫はモデルに考慮していない。



図 91 解析対象領域

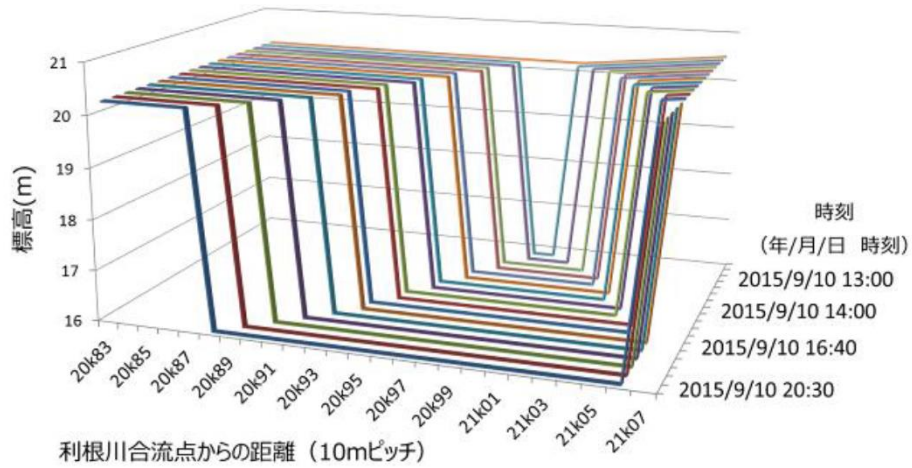


図 92 破堤のモデル化 (三坂町の例)

- ・ 浸水深分布の推定結果

1次元不定流解析の鎌庭水位観測所における時系列水位は観測値を良く再現できている (図 93)．図 94 に浸水深の観測結果および推定結果を示す．本解析による浸水面積は 41.707 km^2 となり，公表されている 40 km^2 とよく整合した．推定したメッシュ毎の最大浸水深とメッシュ面積の積を浸水メッシュ数分足し合わせると， $6,120 \text{ 万 m}^3$ となり，佐山ら [115]による $6,380 \text{ 万 m}^3$ と良く整合した．

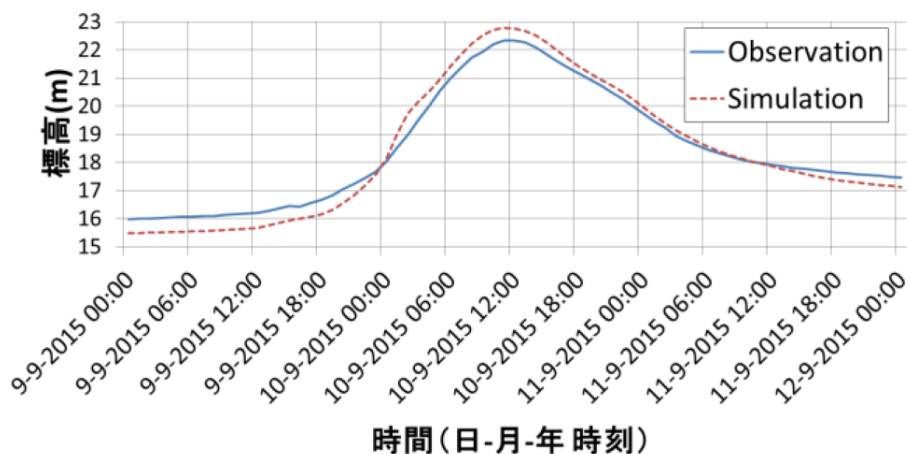


図 93 時系列水位の計算結果

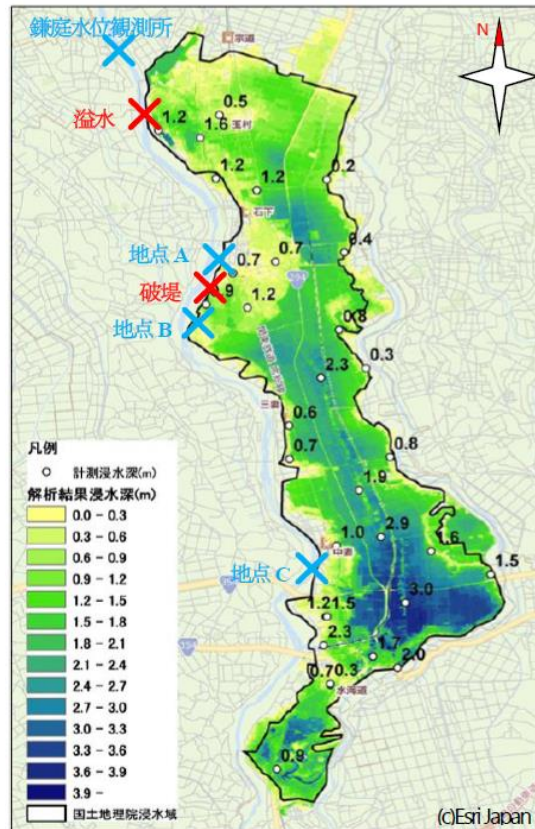


図 94 観測浸水深および解析最大浸水深分布

浸水深の推定結果は、本研究による観測結果と比較することで検証する（図 95）。観測浸水深と解析結果の浸水深との差の RMS 値は 0.465m となり、やや過小評価性が認められるものの、概ね良い再現性を示している。今回の災害では、破堤地点から 500m 上流地点と 800m 下流地点、更に 8km 下流地点（順に図 94 の地点 A,B,C）において、大規模な噴砂が確認されており [112]、漏水による外水氾濫が一部地域で発生していたと考えられる。本研究による浸水深分布の推定結果と国土地理院が公表した浸水範囲 [116]とを比較したところ、図 94 の地点 A, C 付近において、推定結果は過小評価となった。また、今回の解析期間中には約 780 万 m^3 の水が水海道地区周辺で排水されており、当該地域では推定浸水深が過大傾向にある。そのため、より詳細な解析においては、漏水および排水現象を考慮する必要があると考えられる。

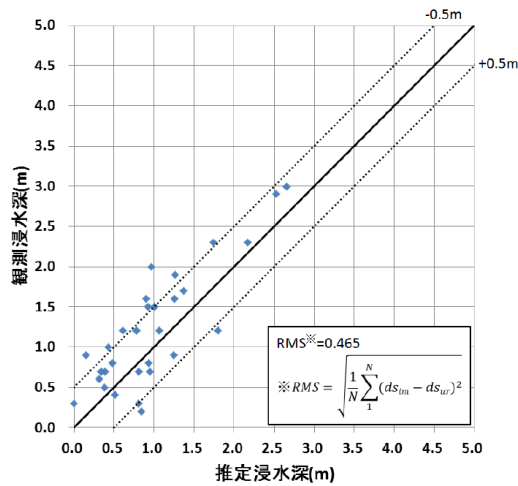


図 95 浸水深の検証結果

4) 被害関数の構築

本項では、前項で求めた浸水深分布を用い、保険金支払情報に基づく被害関数を求める。

・ 被害関数構築の方法と回帰係数

まず保険金支払情報から被害関数構築に用いる損害率データを抽出した。具体的には前項で推定した浸水深分布内にあり、1、2階建てのものを抽出した。

次に表 7 に示すように、対応する浸水深の大きさで損害率データを並び替えた上で、各棟の情報が平滑化されるよう浸水深をクラス分けし、クラス毎の平均損害率を計算した。区分棟数と分類は表 8 に示す通りである。ここで、浸水深はクラス内のデータの平均値を用いた。ここで求めたクラス毎の浸水深と損害率の関係から、被害関数を求める。鈴木ら [60] を参考として、損害率 $P_D(x)$ は、浸水深 x の自然対数を用いて、標準正規分布の累積分布関数で表せると仮定した。すなわち

$$P_D(x) = \Phi((\ln x - \lambda) / \zeta) \quad (22)$$

となる。ここで係数 λ 、 ζ は、 $\ln x$ の平均値および標準偏差であり、図 96 に示すような確率紙を用いた最小二乗法により求めた。その結果クラス毎の平均値に基づく回帰係数を得た (表 9)。なお、この分布型は鈴木ら [60] が洪水被害関数に、田中ら [117] は津波被害関数構築時に使用しており、水災の被害関数構築時においては一般的である。決定係数 R^2 をみると、内容物は 0.541 とやや低い、建物については全て 0.9 前後の高い値となっている。保険金支払情報にある被災建物は

さまざまな構造であり、床高などはばらつきがある。そのため、連続的な被害関数としている。

表 7 クラス毎の損害率データの例 (2 階建て建物)

クラス毎の平均浸水深(m)	浸水深 (m)	損害率	クラス毎の平均損害率	棟数
0.338	0.154	0.120	0.188	16
	0.170	0.044		
	⋮	⋮		
	0.473	0.029		
0.597	0.474	0.169	0.218	16
0.914	⋮	⋮	0.317	16
1.345	⋮	⋮	0.283	16
2.043	⋮	⋮	0.364	16

表 8 被害関数構築のための階数・構造の分類

		データ数	区分数	区分棟数	
建物	(階数分類なし)	(構造分類なし)	105	5	21
	1階建て	(構造分類なし)	24	5	4
	2階建て	(構造分類なし)	81	5	16
		木造	66	5	13
		鉄骨造	15	5	3
内容物	(階数分類なし)	(構造分類なし)	89	5	17

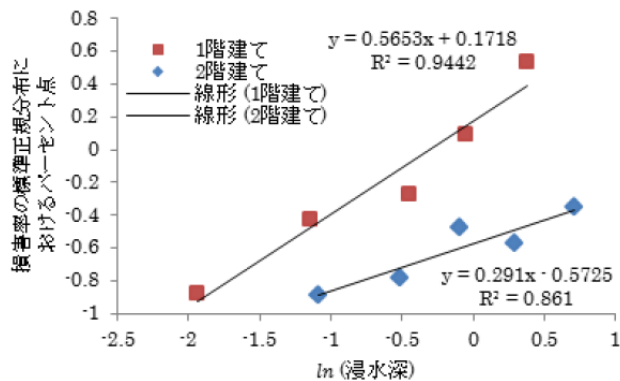


図 96 浸水深と階数別建物損害率の関係の確率紙表示

表 9 被害関数の回帰係数と決定係数

		λ	ζ	R^2	
建物	(階数分類なし)	(構造分類なし)	1.740	3.836	0.943
	1階建て	(構造分類なし)	-0.304	1.769	0.944
	2階建て	(構造分類なし)	1.967	3.436	0.861
		鉄骨造(2階建て)	1.826	2.355	0.889
		木造(2階建て)	2.046	3.865	0.945
内容物	(階数分類なし)	(構造分類なし)	0.188	2.449	0.541

・ 建物被害関数

図 97 に前項で求めた建物被害関数を示す。1 階建ての損害率が 2 階建てよりも高くなっている。これは、1 階の浸水による損失額の建物全体の価格に対して占める割合が、1 階建てのほうが 2 階建てよりも大きくなる傾向が反映されたものと考えられる。また階数分類なしの損害率は 2 階建てに近くなっているが、これは損害率データに 2 階建てが 1 階建てより多く含まれているためである。さらに、治水対策の経済評価に用いられる治水経済調査マニュアル [56] の浸水深と家屋被害率の関係も同図上に示してある。グループ A は地盤勾配が 1/1,000 未満、C は 1/500 以上、B はその中間である。どのグループも浸水深が 1m 以上では本研究の損害率と概ね良い対応を示しているが、1m 未満では本研究より低い値となっている。治水経済調査の損害率には、内壁材や断熱材等が一部のみの浸水においても全面交換となる場合や、床下浸水時でも汚泥除去費用が発生する場合などが考慮されていないことが指摘されている [118]。本研究はこうした現実に応じた損失額を含むため、相対的に損害率が高いものと考えられる。また、浸水深が小さい場合、一般的に浸水しても無被害となる件数が相対的に多くなる傾向がある。本研究では、保険金支払情報を基に被害関数を構築しており、無被害の物件を考慮していないことが浸水深 1m 未満におけるそれぞれの被害関数の乖離の原因の一つと考えられる。なお下記に示す被害関数の浸水深は、損害率データに対応する浸水深分布を踏まえ、2.5m を上限としている。また推定最大流速と損害率に明確な相関が確認できなかったため、本研究では流速は考慮しないこととする。

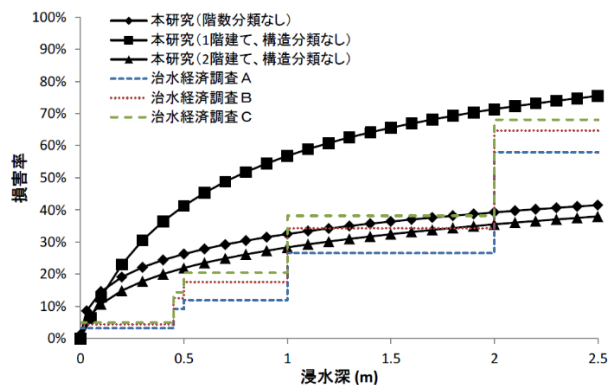


図 97 本研究と治水経済調査マニュアルの建物被害関数

図 98 は前節で求めた 2 階建ての構造別の建物被害関数である。構造は保険金支払情報の柱の属性から推定した。なお鉄筋についてはデータ数が少ないため除外した。木造の損害率が鉄骨造よりも高い結果となったが、この原因として材料の耐水性の影響などが考えられる。

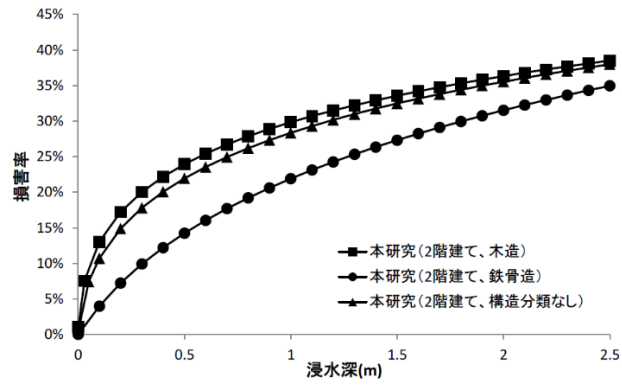


図 98 構造別建物被害関数 (2 階建て)

・ 内容物被害関数

図 99 に内容物被害関数を示す。また、前節と同様に治水経済調査マニュアルの浸水深と家庭用品被害率の関係も同図上に示してある。浸水深 0.5m 以上 2m 以下の範囲では本研究の損害率と概ね良い対応を示しているが、0.5m 未満では本研究より低い値となっている。内容物については図 90 に示す通り、100%程度の損害率を有するデータが多く存在し、これらに対応する浸水深には 0.5m 未満のものも含まれるため、本研究での損害率は高い傾向となっている。

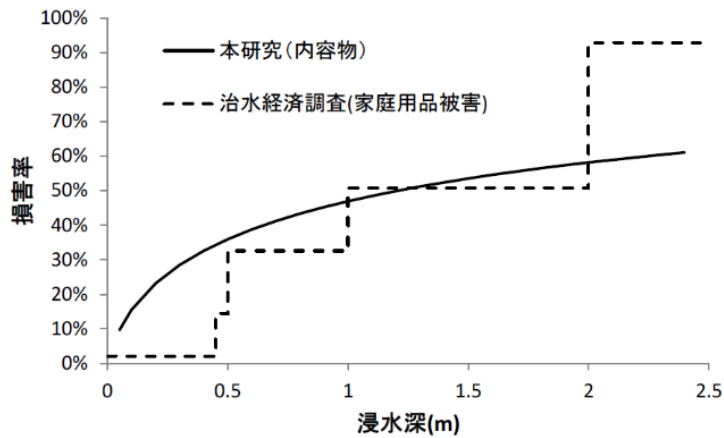


図 99 本研究と治水経済調査マニュアルの内容物被害関数

5.2 本章のまとめ

本章では、まず 2015 年 9 月関東・東北豪雨により、大規模な外水氾濫が発生した茨城県常総市周辺を対象に、保険金支払情報に結びつく最大浸水深を推定し、洪水被害関数を構築した。既往研究のようなヒアリングや数値解析による方法だけでなく、保険金支払情報が被害関数構築に活用できることが示された。この手法は高潮被害関数構築にも応用できるものである。

洪水の数値解析では、保険金支払情報に結びつける統一的で精度の高い浸水深を推定した。氾濫域の南部および河道周辺の浸水域の再現性は、漏水および排水のモデル化により向上が見込まれる。被害関数は、保険金支払情報を収集・分析し、建物被害関数および内容物被害関数を構築した。国交省の被害関数と研究成果とを比較し、特に浸水深が浅い部分の損害率には乖離があることが明らかになった。また建物の損害率は階数と構造に大きく影響を受ける結果となり、建物の属性に応じた被害関数を用いることによって、損害推定が精緻化されることが示唆される。本章で構築した被害関数は、浸水深に応じた平均被害率を示す曲線である。しかし、同じ浸水深であっても被害を受ける建物の構造が異なること等の理由により、被害率にはばらつきが生じる。保険金支払情報を用いると、このばらつきも把握できるため、平均被害率曲線周りの確率分布を表現可能になることがメリットであると考えられる。

本論文で開発した被害関数は、あくまで 2015 年 9 月関東・東北豪雨による茨城県常総市周辺の被害関数であり、一般化された関数ではないことに留意すべきである。当該イベントで得られた保険損失情報における最大浸水深は 2.5m 程度であり、限定的である。平成 30 年の西日本豪雨災害では、観測された最大浸水深は 5.38m とされており [119]、こうした浸水深の大きなイベントにおいては、本論文で開発した洪水被害関数の適用範囲外となる。また常総市周辺の被害を受けたエリアは、建築されてから一定年数が経っていると思われる木造家屋が多かった。同じハザードであっても、建物の築年数や構造が異なる家屋に対しては損害率が変わってくる可能性があり、さまざまなイベントの被害関数を蓄積する必要がある。本章では、多くの被害データが蓄積されている保険会社の保険金支払情報を活用した被害関数構築事例を示した。一般化された被害関数構築のために、本章で構築した被害関数と同様に、他の洪水イベントの保険金支払情報を活用することで、様々な地域で発生した、様々なタイプの建物に対する被害関数を蓄積することが必要である。

本論文では洪水を例に、保険金支払情報から被害関数の構築事例を示したが、この手法は高潮にも適用が可能である。本論文で使用した国交省の高潮被害関数は、洪水の被害関数に海水による被害関数を乗じたものである。洪水と比較し、高潮の場合は海水密度が淡水より大きいため流体力も大きく、また塩分による錆が発生しやすいという性質等から、被害は淡水より大きくなる。保険金支払情報には、実損害情報であるため、海水と淡水による被害の差も暗に含まれており、この情報を用

いた高潮被害関数を構築すれば、洪水よりも損害率の高い被害関数が構築できるものと考えられる。

今後の高潮被害関数構築に向けて、高潮による保険損害情報が存在することが確認できた、近年の過去2イベント（平成16年台風第16号および平成30年台風第21号）における浸水深分布を数値計算により再現した（付録に記載）。洪水被害関数と同じ構築プロセスをこれら2つのイベントに適用すれば、推定高潮浸水深と保険金支払情報が結びつき、2つのイベントに関する高潮被害関数構築が期待される。

6 結論

6.1 得られた知見

本節では、本論文において得られた知見やそれに基づく提言を記述する。

本論文では、新しい高潮リスク評価手続きを提案した。この手続きは二つの観点で有用である。一つ目の観点は、計算コストの大幅な削減である。提案した手続きは、JPM の課題である計算負荷削減と JPM-OS の計算誤差の低減の両立を目指したものである。本論文では東京湾を対象に、計算対象の台風数を約 9 万から 1,000 に削減し、かつ保険目的として許容できる計算精度を維持できることが分かった。国内外の他の沿岸域にこの手続きを適用する場合は、経験的なモデルによりまず簡易的に代表地点の水位を計算し、次に推算水位が上位の台風から順番に高潮数値モデルで解析を行い、目的とする沿岸域の水位および損失額が収束した時点で解析を中断すれば良い。この手続きを活用することによって、高潮リスク評価におけるコストを下げることができ、保険料率の低下が実現されることで、より多くの人々が保険加入し、リスクを移転することにより人々の安心な生活に貢献できることが期待される。また確率台風モデルのアップデートがなされた場合にも、迅速に最新の知見に基づいたリスクを評価でき、保険会社のリスク管理に反映されることで、健全な経営にもつながる。二つ目の観点は、天文潮位のばらつきを考慮することにより、損失額をより適正に評価できることである。本論文により、既往研究のように天文潮位を固定せずばらつかせることで、保険目的としたリスク評価に関わる不確実性を認識・減少させることができることが分かった。提案手法は天文潮位のばらつきを考慮できるため、より適正なリスク管理と保険料設定が実現可能となる。

保険業界においては、本論文で提案した手法と JPM-OS とを使い分けて使用するべきであると考ええる。まず評価対象箇所の特性を考えるべきである。提案手法は、氾濫する可能性のある台風すべてを対象に高潮解析をするため、東京湾のような氾濫が起こりにくいエリアでは、計算負荷の削減効果が大きい。しかし、東南アジアのような氾濫頻度が高いエリアを対象にすると、氾濫しうる台風数が膨大となり、計算負荷の削減効果があまり期待できないと考えられる。そのため、そうした氾濫頻度の高いエリアは、計算精度を許容して、JPM-OS によるリスク評価を行うといった判断も必要となる。JPM-OS は JPM と比べ 1 桁分計算負荷を削減できるため、来襲する台風数の 10 分の 1 以上の頻度で氾濫が発生する地域に対しては、JPM-OS の適用を検討するべきであると考えられる。来襲する台風数の 10 分の 1 以下の頻度で氾濫する地域に対しては、計算精度・計算負荷ともに優れた本論文で提案した手続きにより評価するべきである。次に評価する要件を考える。膨大な台風を解析する必要があるのは、特に年間期待損失額を求める場合である。保険引き受けに用いる再現期間

別の浸水深分布や、リスク管理に必要な代表再現期間の損失額は低頻度のリスクが対象となるため、氾濫しうるすべての台風について分析する必要はない。その場合、JPM-OS では、低頻度の浸水深の計算誤差も大きいため、提案手法で代表再現期間のハザードや損失額が収束するまで計算すれば、計算負荷を削減しつつ高精度で評価が可能になると考えられる。

また、本論文では保険損害情報を用いた被害関数構築事例を示した。この手法は高潮にも応用可能なものである。保険業界の所有する膨大な情報を活用することにより、平均的な被害関数だけでなく、平均被害率周りの被害関数の不確実性まで評価することができることが示唆された。また保険会社がデータを公開すれば、世界中の研究者や実務家がハザード情報を重ねて、本研究に基づく手法により、それぞれのイベントの被害関数の蓄積が加速されていくと考えられる。被害関数が蓄積されていけば、イベントや地域によらないより一般化された被害関数が構築されることが期待できる。精緻なリスク評価を行い、人々の生活にさらに貢献するためには、情報のオープン化が必要である。

6.2 今後の課題

高潮ハザードの精度向上の観点では、本論文では越波を考慮していない。平成 30 年台風第 21 号で顕著だったように、越波による浸水被害も考慮した被害推定を行うことで、浸水に関する計算精度がより向上するものと考えられる。また、本論文で提案した評価手続きでは、計算対象台風を減らすことで計算負荷を削減した。本論文で構築した水位を推定するニューラルネットワークのような経験的モデルの高度化によって、精度の高い台風抽出が可能になれば、より少ない台風で十分な計算を行うことができる。Ramirez ら [120]や Vousdoukas ら [121]は、氾濫計算に動的で計算負荷が小さい LISFLOOD-FP [122]を用いている。限られた台風に対し、高潮モデルの結果を境界条件として、このような氾濫モデルを氾濫計算に活用することで、更なる計算負荷の削減が実現できると考えられる。

損失額推定では、高潮被害関数の精緻化が大きな課題である。今後、実被害データを活用した高潮被害関数を蓄積することで、より現実に即した被害推定が可能となる。本論文では、その一例として保険損失データの活用について検討した。このようなデータを用いることで平均被害率周りの不確実性も考慮した被害関数構築が期待できる。またその際には、被害が実際に起こった物件だけでなく、無被害を考慮した被害関数を構築することが重要である。損失額推定には、資産額分布も非常に重要であることが示された。本論文では統計データから資産データを構築したが、高潮のような局所的に被害が発生する災害では、資産の位置の解像度が極めて重要である。損失額推定には、この資産を物件毎に緯度経度レベルで配置することが理想的である。

本論文では、4 要因につき不確実性の評価を行ったが、モデルによる結果には不確実性が含まれていることは確実であり、実際に推定結果を活用する際には、この不確実性を考慮した運営が必要である。保険会社は、こうした自然災害を計測するモデルによる損失額を計算するだけでは適切な評価を行ったことにはならず、モデルに伴う不確実性や前提条件にも留意すべきであると注意喚起を行っている。この緩和手段として、複数のモデルを使用する方法などが挙げられている [6]。そのため、確率台風モデル・高潮数値モデルを変更したモデルによる結果を活用するといった運営も求められている。本研究で提案した評価手続きは、モデルを変更した際の分析にも適用できるため、別モデルによる結果の蓄積も課題となる。

参考文献

- [1] 内閣府, “防災基本計画,” 2017. [オンライン]. Available: <http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/kihon.html>. [アクセス日: 8 2 2018].
- [2] MunichRe, “TOPICS GEO 2017,” p. 53, 2018.
- [3] 一般社団法人日本損害保険協会, “ファクトブック 2017,” p. 79, 2017.
- [4] ERM 経営研究会, 保険 ERM 経営の理論と実践, 一般社団法人金融財政事情研究会, 2015.
- [5] 国交省港湾局, “港湾の堤外地等における高潮リスク低減方策ガイドライン,” 2018. [オンライン]. Available: <http://www.mlit.go.jp/common/001228806.pdf>. [アクセス日: 28 5 2018].
- [6] エーオンベンフィールドジャパン株式会社, “自然災害リスクに係る外部調達モデルの構造等に関する調査報告書,” 2012.
- [7] 損害保険料率算出機構, 巨大災害モデリングーリスクマネジメントの新しいアプローチ, 地震保険調査研究報告書, 2006.
- [8] 株式会社インターリスク総研, “確率論的津波リスク計量モデルの開発,” 2013. [オンライン]. Available: https://www.cybernet.co.jp/avs/documents/pdf/seminar_event/conf/19/3-3.pdf. [アクセス日: 4 9 2019].
- [9] E. Karaca, H. Aslani, “Review of two Japan Typhoon catastrophe models,” Nat Hazards 83,19-40, 2016.
- [10] AIRWORLDWIDE, “AIR probabilistic Flood Hazard Map in Touchstone,” 2018. [オンライン]. Available: <https://www.air-worldwide.com/publications/brochures/documents/air-probabilistic-flood-hazard-maps-in-touchstone>. [アクセス日: 8 2 2018].
- [11] 損害保険料率算出機構, “自然災害リスクに関する研究,” [オンライン]. Available: https://www.giroj.or.jp/databank/natural_disaster.html. [アクセス日: 13 2 2020].
- [12] 鈴木武, “地球温暖化を考慮した高潮浸水被害リスクマップと沿岸浸水被害関数の作成,” 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, I_870-I_875, 2012.
- [13] 辻田大輝, 安田誠宏, 篠原瑞生, 森信人, 間瀬肇, “複数地域での同時被災を考慮した高潮災害の集積リスク評価手法に関する研究,” 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, I_1639-I_1644, 2016.
- [14] X. Jiang, N. Mori, H. Tatano, L. Yang, “Simulation-Based Exceedance Probability Curves to Assess the Economic Impact of Storm Surge Inundations due to Climate Change: A Case Study in Ise Bay, Japan,” sustainability, 11, 1090, 2019.
- [15] F. E. M. Agency, “Hazus,” [オンライン]. Available: <https://www.fema.gov/hazus>. [アクセス日: 2 12 2019].
- [16] F. E. M. Agency, “Operating Guidance No.8-12 For use by FEMA staff and Flood Hazard Mapping Partners,” 2012.
- [17] T.-J. Kim, K.-N. Hwang, H.-H. Kwon, “Stochastic analysis of typhoon-induced storm surge in the coastal area of the Korean peninsula: Inference from a Nonstationary, Bayesian, Poisson, Generalized Pareto distribution,” Journal of Coastal Research, 85, 896-900, 2018.
- [18] A. Bulter, J. E. Heffernan, J. A. Tawn, R. A. Flather, K. J. Horsburgh, “Extreme value analysis of decadal variations in storm surge elevations,” Journal of Marine Systems 67, 189-200, 2007.
- [19] S. Caires, “Extreme value analysis: Still water level,” JCOMM Technical Report No.58,

- 2011.
- [20] P. Gurumurthy, P. M. Orton, S. A. Talke, N. Georgas, J. F. Booth, “Mechanics and Historical Evolution of Sea Level,” *Journal of Marine Science and Engineering*, 7, 160, 2019.
 - [21] L. Bardet, C. -M. Duluc, V. Rebour, J. L’Her, “Regional frequency analysis of extreme storm surges along the French coast,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1627-1639, 2011.
 - [22] A. Arns, T. Wahl, I. Haigh, J. Jensen, C. Pattiaratchi, “Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practise,” *Coastal engineering*, 81, pp.51-66, 2013.
 - [23] P. Jonathan, D. Randell, Y. Wu, K. Ewans, “Return level estimation from non-stationary spatial data exhibiting multidimensional covariate effects,” *Ocean engineering*, 88(September), pp.520-532, 2014.
 - [24] D. Divoky, D. T. Resio, “Performance of the Jpm and Est Methods in Storm Surge Studies,” *Environmental Science*, 2007.
 - [25] V. A. Myers, “Joint probability method of tide frequency analysis applied to Atlantic City and Long Beach Island, N.J.,” *ESSA Technical Memorandum WBTM Hydro-11*. US Dept of Commerce, Washington, D.C., 1970.
 - [26] AIRWORLDWIDE, “AIR Typhoon Models for Southeast Asia,” 2018.
 - [27] AIRWORLDWIDE, “The new storm surge module in AIR's U.S. hurricane model,” 2015. [オンライン]. Available: https://www.air-worldwide.com/Publications/Brochures/documents/The-New-Storm-Surge-Module-In-AIR-s-U_S_-Hurricane-Model/. [アクセス日: 3 12 2019].
 - [28] R. M. Solutions, “RMS Philippines Typhoon and Inland Flood Model,” [オンライン]. Available: <https://forms2.rms.com/rs/729-DJX-565/images/rms-philippines-typhoon-model-datasheet.pdf>. [アクセス日: 30 10 2019].
 - [29] 安田誠宏, 岩原克仁, 平井翔太, 中條壮大, 金洙列, “確率台風モデルを援用した駿河湾における高潮の確率論的評価,” *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol. 73, No. 2, I_253-I_258, 2017.
 - [30] R. D. Johnson, R. J. Fischbach, S. D. Ortiz, “Estimating Surge-Based Flood Risk with the Coastal Louisiana Risk Assessment Model,” *Journal of Coastal Research*, 67, 109-126, 2013.
 - [31] K. Yang, V. Paramygin, P. Sheng, “An objective and efficient method for estimating probabilistic coastal inundation hazards,” *Natural Hazards*, 99, 1105-1130, 2019.
 - [32] G. Jia, A. A. Taflanidis, N. C. Nadal-Caraballo, J. A. Melby, A. B. Kennedy, M. J. Smith, “Surrogate modeling for peak or time-dependent storm surge prediction over an extended coastal region using an existing database of synthetic storms,” *Natural Hazards*, 81, 909-938, 2016.
 - [33] A. Condon, Y. Sheng, “Optimal storm generation for evaluation of the storm surge inundation threat.,” *Ocean Engineering*, 43, 13-22, 2012.
 - [34] NPO 法人 環境防災研究機構北海道, “高潮災害のしくみ,” [オンライン]. Available: http://www.cemihokkaido.com/disaster05_01.html. [アクセス日: 2 9 2019].
 - [35] 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), 社団法人日本港湾協会, 2004.
 - [36] 合田良実, “浅海域における波浪の破碎変形,” *港湾技術研究所報告*, Vol.14, No.3, 1975.
 - [37] 河合弘泰, 富田孝史, “台風による内湾の高潮のリアルタイム予測に関する基礎的検討,” *国土技術政策総合研究所資料*, 第 1085 号, pp. 6-17, 2004.
 - [38] 山下隆男, 別宮功, “台風 7010 号の土佐湾における高潮の推算 -推算誤差は波浪か成層か?”

- ,” 海岸工学論文集, 第 43 卷, pp.261-265, 1996.
- [39] 柴木秀之, 加藤史訓, 山田浩次, “密度成層と WaveSetup を考慮した土佐湾異常高潮の推算,” 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp.286-290, 2001.
- [40] S. Kim, T. Yasuda, H. Mase, “Numerical Analysis of Effects of Tidal Variations on Storm Surges and Waves,” *Applied Ocean Research*, Vol. 30, No. 4, 311-322, 2008.
- [41] 間瀬肇, 武藤遼太, 森信人, 金洙列, 安田誠宏, 林祐太, “詳細気象予測値を用いた伊勢湾台風高潮の再現実験,” 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, I_401-I_405, 2011.
- [42] J. A. Yang, S. Kim, N. Mori, H. Mase, “Assessment of long-term impact of storm surges around the Korean Peninsula based on a large ensemble of climate projections,” *Coastal Engineering*, Volume 142, 1-8, 2018.
- [43] S. Kim, N. Mori, H. Mase, T. Yasuda, “The role of sea surface drag in a coupled surge and wave model for Typhoon Haiyan 2013,” *Ocean Modelling*, Volume 96, Part1, 65-84, 2015.
- [44] S. Kim, T. Yasuda, H. Mase, “Wave set-up in the storm surge along open coasts during Typhoon Anita,” *Coastal Engineering*, Volume 57, Issue 7, 631-642, 2010.
- [45] T. Yasuda, S. Nakajo, S. Kim, H. Mase, N. Mori, K. Horsburgh, “Evaluation of future storm surge risk in East Asia based on state-of-the-art climate change projection,” *Coastal engineering*, volume 83, 65-71, 2014.
- [46] AIRWORLDWIDE, “A Preview of the AIR Typhoon Models for Southeast Asia,” 2016. [オンライン]. Available: file:///C:/Users/general/Downloads/A_Preview_of_the_AIR_Typhoon_Models_for_Southeast_Asia%20(1).pdf. [アクセス日: 3 12 2019].
- [47] A. Treviño, P. Sousounis, “Typhoon Vera's 60th Anniversary: Why Japan Re-evaluated Disaster Prevention,” AIRWORLDWIDE, 2019. [オンライン]. Available: <https://www.air-worldwide.com/Publications/AIR-Currents/2019/Typhoon-Vera-s-60th-Anniversary--Why-Japan-Re-evaluated-Disaster-Prevention/>. [アクセス日: 3 12 2019].
- [48] A. Suppasri, E. Mas, S. Koshimura, K. Imai, K. Harada, F. Imamura, “Developing Tsunami Fragility Curves from the Surveyed Data of the 2011 Great East Japan Tsunami in Sendai and Ishinomaki Plains,” *Coastal Engineering Journal*, 54, 1250008-1-1250008-16, 2012.
- [49] R. Aránguiz, L. Urrea, R. Okuwaki, Y. Yagi, “Development and application of a tsunami fragility curve of the 2015 tsunami in Coquimbo, Chile,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2143-2160, 2018.
- [50] W. Dias, U. Edirisooriya, “Derivation of tsunami damage curves from fragility functions,” *Natural Hazards*, 96, 1153-1166, 2019.
- [51] S. Reese, B. A. Bradley, J. Bind, G. Smart, W. Power, J. Sturman, “Empirical building fragilities from observed damage in the 2009 South Pacific tsunami,” *Earth-Science Reviews*, 107, Issues 1-2, 156-173, 2011.
- [52] N. Lin, E. Shullman, “Dealing with hurricane surge flooding in a changing environment: part I. Risk assessment considering storm climatology change, sea level rise, and coastal development,” *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Volume 31, Issue 9, 2379-2400, 2017.
- [53] F. E. M. Agency, “Hazard Flood Model Use Guidance,” 2018.
- [54] U. A. C. o. Engineers, “North Atlantic Coast Comprehensive Study: Resilient Adaptation to Increasing Risk,” 2015.
- [55] B. Kar, M. E. Hodgson, “Observational Scale and Modeled Potential Residential Loss

- from a Storm Surge,” *GIScience & Remote Sensing*, 49:2, 202-227, 2012.
- [56] 国交省河川局, “治水経済調査マニュアル (案),” 2005.
- [57] 安田誠宏, 平井翔太, 岩原克仁, 辻尾大樹, “伊勢湾と三河湾を対象とした高潮災害の集積リスク評価に関する研究,” *土木学会論文集 B2(海岸工学)*, Vol.73, No.2, I_241-I_246, 2017.
- [58] 国交省, “家屋の浸水深別被害率の更新について,” 2012. [オンライン]. Available: https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kasen_hyouka/dai03kai/dai03kai_siryous3.pdf. [アクセス日: 29 2019].
- [59] 国交省, “河川事業の評価手法に関する研究会,” [オンライン]. Available: http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/kasen_hyouka/. [アクセス日: 29 2019].
- [60] 鈴木進吾, 越村俊一, 原田賢治, 岡本学, 福留邦洋, 菅磨志保, 河田恵昭, “2004年7月新潟豪雨水害の災害調査による家屋被害関数の構築,” *水工学論文集*, Vol.49, 2005.
- [61] S. Nakajo, N. Mori, T. Yasuda, H. Mase, “Global Stochastic Tropical Cyclone Model Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis,” *Journal of Applied Meteorology And Climatology*, Vol. 53, 1547-1577, 2014.
- [62] K. Knapp, M. Kruk, D. Levinson, H. Diamond, C. Neumann, “The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS),” *Bull.Amer.Meteor. Soc.*, 91, pp.363-376, 2010.
- [63] 加藤史訓, “高潮危険度評価に関する研究,” *国土技術政策総合研究所資料*, 第 275 号, p. 10, 2005.
- [64] 中條壯大, 森信人, 安田誠宏, 間瀬肇, “全球確率台風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, 2011.
- [65] V. Myers, W. Malkin, “Some Properties of Hurricane Wind Fields as Deduced from Trajectories,” U.S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 49., 1961.
- [66] 気象庁, “分潮一覧表 東京,” [オンライン]. Available: <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tidt/suisan/harms60.php?stn=TK&year=2017&tyea=2017>. [アクセス日: 14 2 2018].
- [67] 海上保安庁水路部, 日本沿岸潮汐調和定数表, 東京: 海上保安庁, 書誌 742 号, 1992.
- [68] 気象庁, “潮汐観測資料 東京,” [オンライン]. Available: <https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/genbo/genbo.php?stn=TK>. [アクセス日: 1 10 2019].
- [69] Japan Oceanographic Data Center, “潮汐 (毎時潮高) データ,” [オンライン]. Available: https://jdoss1.jodc.go.jp/vpage/tide_j.html. [アクセス日: 1 10 2019].
- [70] 田中陽二, 永井紀彦, 鈴木高二郎, 清水勝義, “海象形による流況観測データを用いた東京湾第二海堡における残差流の変動特性に関する解析,” *港湾空港技術研究所資料*, 1168, 2007.
- [71] N. Booij, R. Ris, L. Holthuijsen, “A third-generation wave model for coastal regions Part 1, Model description and validation,” *J. Geophys. Res.* 104, 7649-7666, 1999.
- [72] 内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会, “計算入力データ,” 2012.
- [73] 国土地理院, “基盤地図情報 (数値標高モデル),” [オンライン]. Available: <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>. [アクセス日: 14 2 2018].
- [74] 水谷武司, “伊勢湾台風災害のインパクトと戦後台風災害の経年的変化,” *防災科学技術研究所研究報告*, 第 75 号, p. 19, 2009.
- [75] 小西達男, 上平悦朗, 瀬河孝博, “台風 8506 号による高潮と副振動,” *天気*, 第 33 卷, 第 6 号, pp. 263-270, 1986.

- [76] 宮崎正衛, 高潮の研究, 成山堂書店, 2003.
- [77] 比屋定弘康, 大久保沙貴, 高佐重夫, 小橋川豊, 遠峯勉, 西村文男, 大門秀志, 板垣真資, 福田美奈, 坂地忠, 田口幸輝, 江上浩樹, 鈴木博樹, 野崎太, “歴史的潮位データの作成及び高潮の再評価,” 測候時報, 第78巻, 特別号, 2011.
- [78] T.-L. Lee, “Neural network prediction of a storm surge,” *Ocean Engineering*, 33, 483-494, 2006.
- [79] AIRWORLDWIDE, “AIR Probabilistic Flood Hazard Maps in Touchstone,” 2018. [オンライン]. Available: <https://www.air-worldwide.com/siteassets/Publications/Brochures/documents/AIR-Probabilistic-Flood-Hazard-Maps-in-Touchstone>. [アクセス日: 5 3 2020].
- [80] 一般社団法人日本建設情報総合センター. [オンライン]. Available: <http://www.jacic.or.jp/jacic-hp/index.php>. [アクセス日: 5 5 2020].
- [81] 一般社団法人日本建設情報総合センター, “100m メッシュ延床面積データ,” [オンライン]. Available: <http://www.jacic.or.jp/books/images/TOP.htm>. [アクセス日: 5 5 2020].
- [82] 国交省水管理・国土保全局河川計画課, “治水経済調査マニュアル (案) 各種資産評価単価及びデフレーター,” 2018.
- [83] 総務省統計局, “平成 27 年度国勢調査,” 2015. [オンライン]. Available: <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/index.html>.
- [84] 総務省統計局, “平成 26 年経済センサス,” 2014. [オンライン]. Available: <http://www.stat.go.jp/data/e-census/2014/>.
- [85] P. M. NETwork, “ビル事業計画の手引き,” [オンライン]. Available: http://www.pmnet.jp/shushi/sh03/sh_0305.html. [アクセス日: 18 2 2020].
- [86] 国土交通省, “2008 年法人建物調査,” [オンライン]. Available: <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00600480&tstat=000001021052&cycle=0&class1=000001041854&tclass2=000001041857&tclass3=000001041858>. [アクセス日: 6 9 2019].
- [87] 東京都港湾局, “東京港海岸保全施設整備計画,” 2012. [オンライン]. Available: <https://www.kouwan.metro.tokyo.lg.jp/jigyokaigan-keikaku/keikaku.pdf>. [アクセス日: 7 9 2019].
- [88] 千葉県, “東京湾沿岸海岸保全基本計画 [千葉県区間],” 2016. [オンライン]. Available: <https://www.pref.chiba.lg.jp/kouwan/kikaku/tokyobaymaintenance-chiba.html>. [アクセス日: 7 9 2019].
- [89] 神奈川県, “東京湾沿岸海岸保全基本計画《神奈川県区間》,” 2016. [オンライン]. Available: <http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f530958/p891398.html>. [アクセス日: 7 9 2019].
- [90] 緒方裕光, “リスク解析における不確実性,” 日本リスク研究会誌 19(2), 2009.
- [91] M. Morgan, M. Henrion, “Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis,” Cambridge University Press, 1990.
- [92] D. Hattis, D. Burmaster, “Assessment of Variability and Uncertainty Distributions for Practical Risk Analysis,” *Risk Analysis*, Vol.14, pp.713-730, 1994.
- [93] Y. Haimes, *Risk Modeling, Assessment, and Management*, New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [94] L. Cos, *Risk Analysis: Foundations, Models, and Methods*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [95] T. Aven, *Foundations of Risk Analysis: A knowledge and Decision-Oriented Perspective*, Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

- [96] F. Hoffman , J. Hammonds, “Propagation of uncertainty in risk assessments: The need to distinguish between uncertainty due to lack of knowledge and uncertainty due to variability,” *Risk Analysis*, Vol.14,No.5,pp.707-712, 1994.
- [97] 後藤茂之, “不確実性とERM (その1),” *保険毎日新聞*, p. 4, 18 2 2016.
- [98] K. Clark, V. Manghnani , H.-M. Chang, “IAA リスクブック 第5章 大規模災害リスク,” 2016. [オンライン]. Available: http://www.actuaries.jp/lib/committee/hoken-kantoku/riskbook_05.pdf. [アクセス日: 25 4 2020].
- [99] T. Fujita, “Pressure distribution within Typhoon,” *Geophys Mag*,23,pp.437-451, 1952.
- [100] R. Hisamatsu, S. Kim , S. Tabeta, “Study on the storm surge loss estimation along the Tokyo Bay coast,” *Proceedings of OCEANS’ 19 MTS/IEEE*, DVD-ROM, 2019.
- [101] 東京都港湾局ホームページ, “高潮浸水想定区域図,” [オンライン]. Available: <http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/yakuwari/takashio/shinsuisoutei.html>. [アクセス日: 20 11 2018].
- [102] 澁谷容子, 森信人, 金洙列, 中條壮大, 間瀬肇, “狩野川台風のバリエーションに基づく東京湾の高潮と浸水範囲におよぼす気候変動の感度評価,” *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol.73, No.2, I_1399-I_1404, 2017.
- [103] 安田誠宏, “高潮モデルの高度化と気候変動予測への適用,” *混相流*, 29 巻, 2 号, 2015.
- [104] 久松力人, 河辺賢, 水野佑亮, 篠塚義庸 , 堀江啓, “平成 27 年 9 月関東・東北豪雨の保険損失に基づく洪水被害関数の構築,” *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol.73, No.4, I_1279-I_1284, 2017.
- [105] “日本経済新聞ホームページ,” 2018. [オンライン]. Available: https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP496275_R21C18A1000000/. [アクセス日: 24 3 2019].
- [106] “AIR WORLDWIDE ホームページ,” 2018. [オンライン]. Available: <https://www.air-worldwide.com/Press-Releases/AIR-Worldwide-Estimates-Industry-Insured-Losses-for-Typhoon-Jebi/>. [アクセス日: 3 6 2019].
- [107] 中央防災会議, “大規模水害対策に関する専門調査会報告,” 4 2010. [オンライン]. Available: http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/daikibosuigai/pdf/100402_shiryo_2.pdf. [アクセス日: 6 8 2019].
- [108] 土木学会関西支部ホームページ, “平成 30 年台風 21 号による高潮災害調査速報会,” [オンライン]. Available: <http://www.jsce-kansai.net/?p=2506>. [アクセス日: 10 12 2018].
- [109] 二瓶泰雄, “2015 年関東・東北豪雨による関東地方の災害報告,” *土木学会誌*, Vol.101, No.4, pp.4-5, 2016.
- [110] 気象庁, “過去の気象データ検索,” [オンライン]. Available: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>. [アクセス日: 9 2016].
- [111] 茨城県, “平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による本県の被害及び対応について (3 月 1 日 16 時現在),” 2016.
- [112] 国土交通省関東地方整備局, “『平成 27 年 9 月関東・東北』豪雨に係る鬼怒川の洪水被害及び復旧状況等について,” 2015.
- [113] D. H. I. (DHI), “MIKE11 reference manual,” [オンライン]. Available: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water_Resources/Mike_11_ref.pdf. [アクセス日: 5 5 2020].
- [114] D. H. I. (DHI), “MIKE21 Flow Model & MIKE21 Flood Screening Tool Scientific documentation,” [オンライン]. Available: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21HDFST_Scientific_Doc

- .pdf. [アクセス日: 5 5 2020].
- [115] 佐山敬洋, 寶馨, “平成 27 年関東・東北豪雨に伴う鬼怒川氾濫の浸水深分布推定,” 土木学会論文集, B1 (水工学), Vol.72, 2016.
- [116] 国土地理院, “平成 27 年関東・東北豪雨の情報,” [オンライン]. Available: <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27.taihuu18gou.html>. [アクセス日: 4 2016].
- [117] 田中規夫, 小内堯, 近藤康太, “津波流体力とそのモーメントによる破壊規模ごとの家屋被害関数,” 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.1, 1-11, 2015.
- [118] 国土交通省, “家屋の浸水深別被害率の更新について,” 2012.
- [119] 前野詩朗, “水工学委員会平成 30 年西日本豪雨災害調査報告速報,” 2018. [オンライン]. Available: <http://committees.jsce.or.jp/chugoku/system/files/maeno.pdf>. [アクセス日: 29 2 2020].
- [120] J. Ramirez, M. Lichter, T. Coulthard, C. Skinner, “Hyper-resolution mapping of regional storm surge and tide flooding: comparison of static and dynamic models.,” *Natural Hazards*, 571-590, 2016.
- [121] M. Voudoukas, E. Voukouvalas, L. Mentaschi, F. Dottori, A. Giardino, D. Bouziotas, et al., “Developments in large-scale coastal flood hazard mapping.,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8), 1841-1853., 2016.
- [122] G.-P. Schumann, J. Neal, N. Voisin, K. Andreadis, F. Pappenberger, N. Phanthuwangpakdee, A. Hall, P. Bates, “A first large scale flood inundation forecasting model.,” *Water resources Research*, 49, 6248-6257., 2013.
- [123] 消防庁, “平成 17 年度版防災白書,” 2005. [オンライン]. Available: <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h17/bousai2005/html/honmon/hm110306.htm>. [アクセス日: 15 1 2019].
- [124] 日本損害保険協会, FACT BOOK 2018, p.77, 2018.
- [125] 気象庁, “潮位観測情報,” [オンライン]. Available: <https://www.jma.go.jp/jp/choi/>. [アクセス日: 15 1 2019].
- [126] 高松市, “過去の台風による被害情報 (平成 16 年度以降),” [オンライン]. Available: http://www.city.takamatsu.kagawa.jp/kurashi/kurashi/shobo/sonae/typhoon_higai.html. [アクセス日: 15 1 2019].
- [127] デジタル台風ホームページ. [オンライン]. Available: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon>. [アクセス日: 16 1 2019].
- [128] 気象庁, “潮位観測資料,” [オンライン]. Available: <http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/db/tide/genbo/index.php>. [アクセス日: 17 1 2019].
- [129] 香川大学, “平成 16 年度台風災害調査報告書,” 2005.
- [130] 富田孝史, 本多和彦, 河合弘泰, 柿沼太郎, “2004 年台風 16 号による高松の高潮浸水被害,” 海岸工学論文集, 第 52 巻, 1326-1330, 2005.
- [131] 気象庁, “台風第 21 号による暴風・高潮等, p.18,” 2018.
- [132] 金洙列, 間瀬肇, 川崎浩司, 由比政年, 水谷英朗, 平石哲也, “打上げ・越波・越流の推移過程を導入した高波・高潮相互作用モデル,” 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, I_547-I_552, 2018.

付録

- 平成 16 年台風第 16 号による高潮の再現計算
- 平成 16 年台風第 16 号の高潮被害の概要

平成 16 年台風第 16 号は、記録的な高潮を伴い、瀬戸内海沿岸の広い範囲で浸水被害が発生した。この台風により日本全国では、床上浸水 14,565 棟、床下浸水 32,266 棟の被害が生じ [123]、損害保険の支払保険金額は、全国で 1,210 億円を計上した [124]。特に香川県高松市の被害が甚大であり、高松港ではこれまでの最高潮位を大きく上回る TP+2.46 m という観測史上最高潮位を記録した [125]。高松市内だけで 980 ha が浸水し、住宅の浸水被害は 15,000 棟以上にのぼった [126]。

- 高潮偏差・浸水深分布の推定方法

浸水深分布は、Kim ら [40] の高潮・波浪結合モデル SuWAT により計算した。台風の時系列の位置・気圧はデジタル台風 [127] を参照し、計算時の天文潮位は高松港で最高潮位が観測された時間の値である標高 1.22 m を与えた。天文潮位は計算中では変動させず、全計算領域の水域に対して一様に海面を上昇させて解析した。

数値モデルにおける計算領域は、3 つのドメインに分けてモデル化した。一番外側のドメイン (D1) では、2,430 m 四方のメッシュで、沖縄本島から中部地方を含む海域をモデル化している。次に 2 番目のドメイン (D2) は、270 m 四方の解像度で香川県の海岸線を網羅する範囲をモデル化する。最後に 1 番内側のドメイン (D3) は、香川県高松市沿岸を覆う範囲を 30 m 四方でモデル化する。図 100 に D1 および D2 の計算領域・モデル地形・計算に用いた台風経路を示し、図 101 に D3 の計算領域・モデル地形を示す。なお、標高は、東京湾平均海面を 0 m とし、鉛直方向下向きを正とする。

全てのドメインの地形は内閣府のメッシュデータ [72] の 30m メッシュのものを使用した。D3 は氾濫解析を行うため、堤防および粗度係数を同じく内閣府のデータを使用してモデル化した。

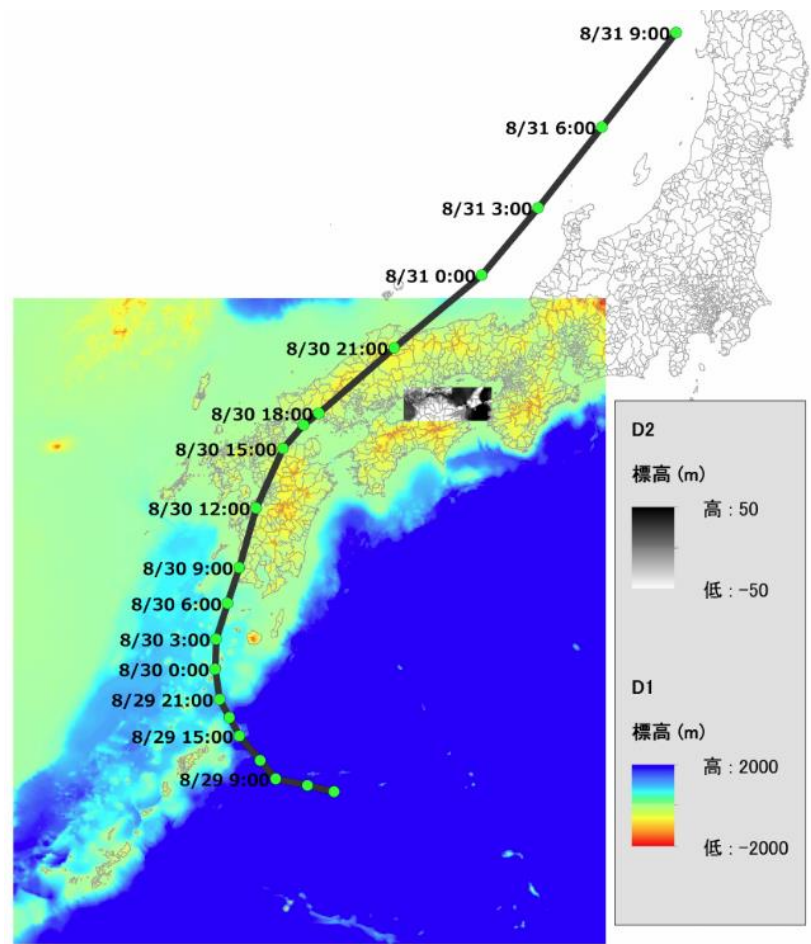


図 100 D1 および D2 の計算領域・地形・台風経路

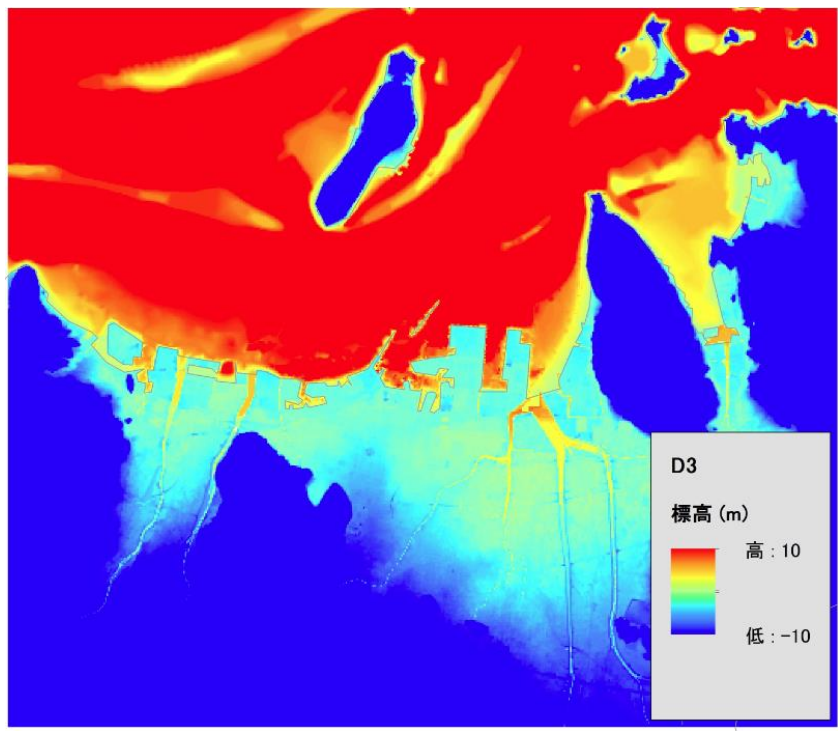


図 101 D3 の計算領域・地形

・ 高潮偏差・浸水深分布の推定結果

平成 16 年 16 号台風による高潮を数値モデルで再現した結果を図 102, 図 103 に示す。図 102 には, 最大高潮偏差分布と時系列高潮偏差の検証地点を, 図 103 には最大浸水深分布と最大浸水深の検証地点を示す。

最大高潮偏差は, 高松市沿岸の西側が比較的高いが, 女木島および高松港の防波堤を隔てて東側は相対的に高潮偏差が低くなる結果となった。モデルによる結果の精度検証のため, 高松験潮所における時系列高潮偏差を 1 時間毎の実測値 [128]と比較した(図 104)。高潮偏差の立ち上がりは計算が観測に比べてやや速く, 最大高潮偏差を示す時間には観測と比較して 2 時間程度早く到達する結果となった。しかし, 高潮偏差の最大値は概ね観測値と一致した。

高潮による浸水は, 高松港の背後の広い範囲で分布する結果となった。特に JR 高徳線木太町駅周辺で高い浸水深を示した。浸水範囲の検証として, 香川大学 [129]が公表した浸水経緯図の浸水範囲と比較し, モデルによる結果が前述の浸水経緯図を概ね再現していることを確認した。次に浸水深の検証には, 富田ら [130]による痕跡高の調査結果を用いた。この調査結果は, 高松市内で 7 箇所の浸水高を示している。そのうち, 3 地点では地盤上の高さを, その他の 4 地点では CDL 基準の痕跡高を示している。前者は数値モデルで計算された浸水深と比較し, 後者は TP 基準に変換した上で数値モデルにより計算された TP 基準の浸水高と比較することで, 計算結果の検証を行った(図 105)。浸水深は, 各地点の計算値が測定値とほぼ一致している。そのため, 浸水範囲・浸水深ともに実現象を良く再現していると考えられる。

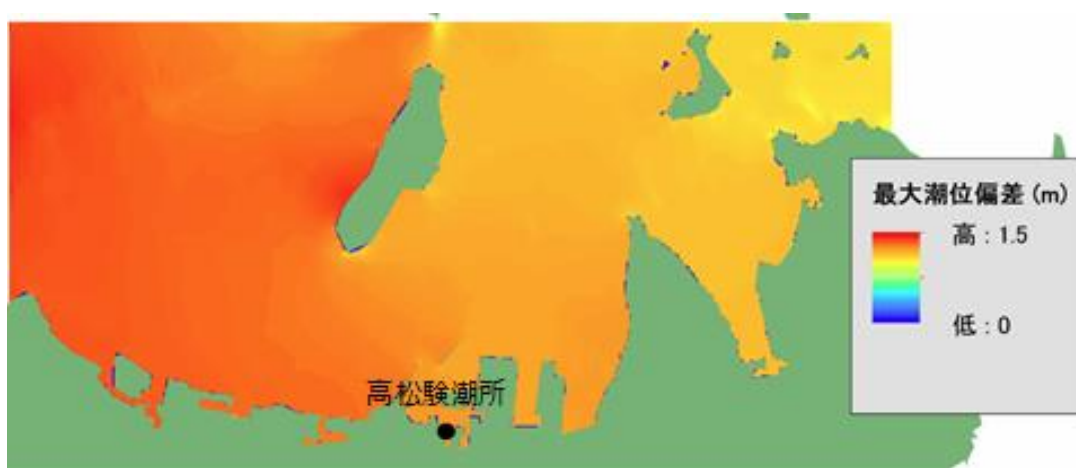


図 102 最大高潮偏差の計算結果と検証地点

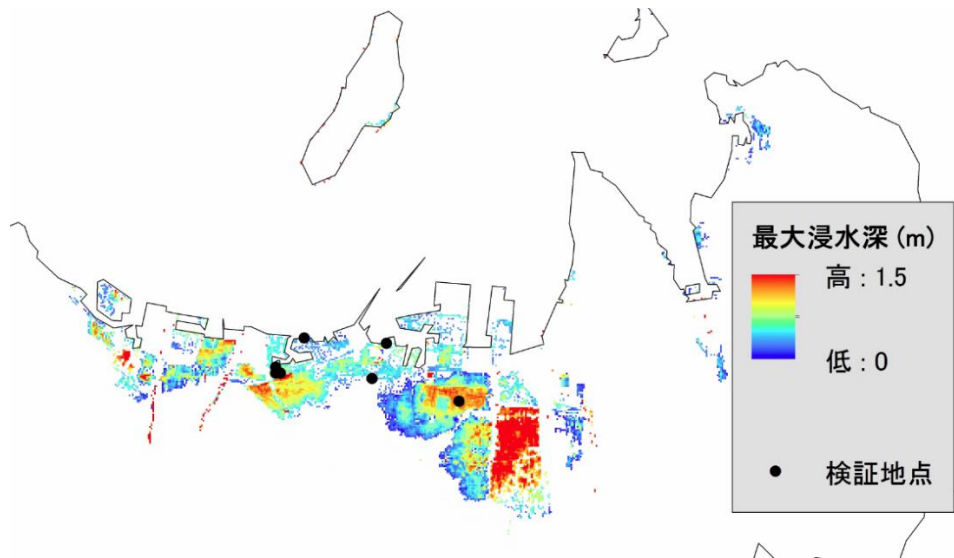


図 103 最大浸水深分布の計算結果と検証地点

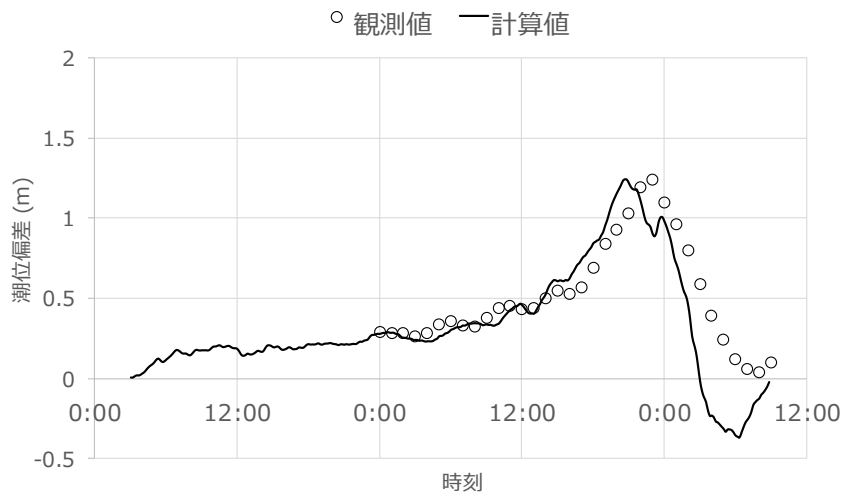


図 104 時系列高潮偏差の検証結果

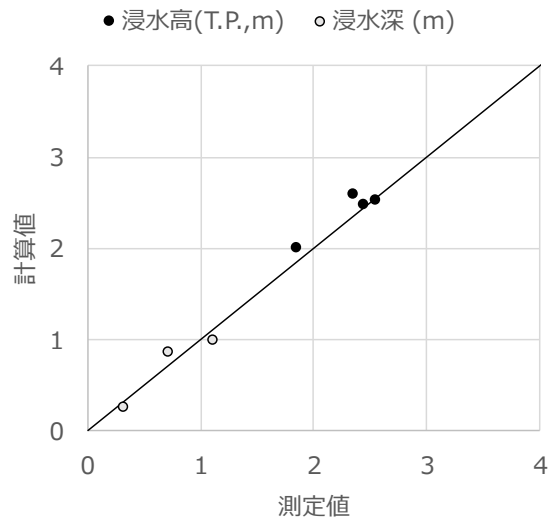


図 105 最大浸水深の検証結果

- 平成 30 年台風第 21 号による高潮の再現計算
- 平成 30 年台風第 21 号の高潮被害の概要

平成 30 年台風第 21 号は、2018 年 9 月 4 日 12 時頃に非常に強い勢力を保ったまま徳島県に上陸後、神戸に再上陸して近畿地方を縦断、日本海を北上した。台風に伴う高潮により、大阪湾の大阪・神戸の 2 つの験潮所では、過去最高の潮位を観測した。大阪の最大潮位は標高 329 cm、最大高潮偏差は 277 cm であり、神戸の最大潮位は標高 233 cm、最大高潮偏差は 181 cm を記録した [131]。

- 高潮浸水深の測定

測定調査対象域は、主に神戸市・芦屋市・西宮市の海岸沿いとその周辺地域とした。現地調査は 2018 年 9 月 10 日および 11 日の 2 日間にわたり実施した。調査では浸水した高さをヒアリングおよび痕跡により確認し、その地点を地図上に記録すると共に、その地点での地盤面からの浸水深が最大となったと推定される浸水痕等までの高さを 43 点記録した。

測定した浸水深を cm 単位で記述したものを図 106 に示す。青丸がヒアリングによる結果、赤丸がメディア等による動画等の情報から推定した結果、黄色の丸が痕跡を測定した結果である。特に六甲アイランドの東側では、コンテナや車両被害が顕著であったが、高潮浸水深も総じて高い結果となった。また、魚崎浜・深江駅周辺・深江浜といった東灘区では浸水深を多く測定することができ、広い範囲で浸水していたことを確認した。また、芦屋市・西宮市および尼崎市の一部についても

浸水深を測定することができた。図 106 で 0 cm と記載の点は、ヒアリング調査で浸水が無かったことを確認した結果である。また調査結果の一覧表を表 10 に示す。

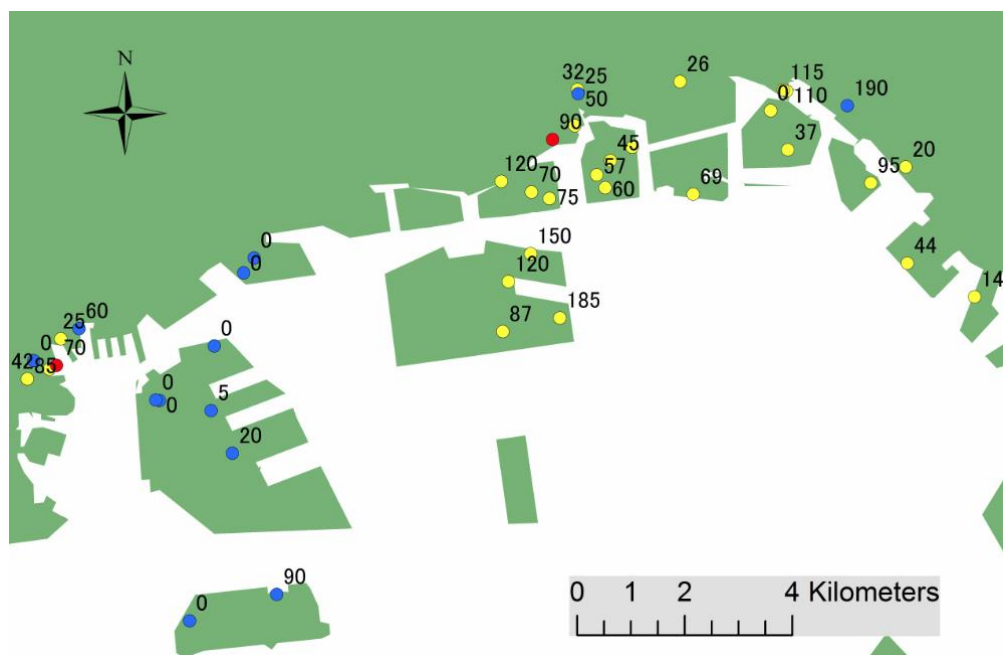


図 106 測定した浸水深分布 (cm 単位)

表 10 測定した浸水深とその位置

No.	緯度 (度)	経度 (度)	浸水深 (cm)	備考	No.	緯度 (度)	経度 (度)	浸水深 (cm)	備考
1	34.6829	135.1864	25	測定	23	34.7200	135.3309	0	測定
2	34.6965	135.2819	150	測定	24	34.7134	135.3343	37	測定
3	34.6919	135.2773	120	測定	25	34.7077	135.3511	95	測定
4	34.6857	135.2877	185	測定	26	34.7104	135.3581	20	測定
5	34.6835	135.2760	87	測定	27	34.6943	135.3583	44	測定
6	34.7086	135.2760	120	測定	28	34.6885	135.3718	140	測定
7	34.7056	135.2858	75	測定	29	34.6846	135.1901	60	ヒアリング
8	34.7068	135.2822	70	測定	30	34.6399	135.2297	90	ヒアリング
9	34.7178	135.2911	110	測定	31	34.6356	135.2120	0	ヒアリング
10	34.7234	135.2918	50	測定	32	34.6635	135.2210	20	ヒアリング
11	34.7238	135.2917	32	測定	33	34.6707	135.2168	5	ヒアリング
12	34.7141	135.3027	43	測定	34	34.6815	135.2175	0	ヒアリング
13	34.7074	135.2971	60	測定	35	34.6725	135.2063	0	ヒアリング
14	34.7095	135.2954	57	測定	36	34.6726	135.2055	0	ヒアリング
15	34.7119	135.2982	45	測定	37	34.6937	135.2236	0	ヒアリング
16	34.6779	135.1840	70	測定	38	34.6962	135.2257	0	ヒアリング
17	34.6763	135.1795	42	測定	39	34.7232	135.2918	25	ヒアリング
18	34.6763	135.1795	85	測定	40	34.6793	135.1808	0	ヒアリング
19	34.7250	135.3125	26	測定	41	34.7207	135.3464	190	ヒアリング
20	34.7061	135.3150	69	測定	42	34.6785	135.1855	70	メディア等から推定
21	34.7233	135.3341	110	測定	43	34.7155	135.2865	90	メディア等から推定
22	34.7234	135.3334	115	測定					

- ・ 高潮偏差・浸水深分布の推定方法

高潮偏差・浸水深・波高の計算には、Kim ら [40]の高潮・波浪結合モデル(SuWAT)を用いた。台風諸元はデジタル台風 [127]を参照し、計算時の天文潮位は神戸で最高潮位を示した時間の天文潮位である標高 0.52 m を一定値として与えた。計算領域は図 107 のように、3 つのドメインに分けてモデル化した。一番外側のドメイン (D1) では、グリッドサイズが 2,430×2,430 m となっており、九州地方から東海地方を含む海域をモデル化している。次に 2 番目のドメイン (D2) は、270×270 m の解像度で大阪湾全域を含む海域をモデル化する。最後に 1 番内側のドメイン (D3) は、神戸市沿岸を覆う範囲を 90×90 m グリッドでモデル化する。図 107 に各ドメインの領域・地形・計算に用いた台風経路を示す。

全てのドメインの地形は内閣府のメッシュデータ [72]から構築した。D3 は氾濫解析を行うため、粗度係数を同じく内閣府のデータから 90 m メッシュで構築した。また D3 の陸域は国土地理院の 5 m メッシュの数値標高モデル [73]により、内閣府の陸上データを補正した。図 108 に D3 の計算領域と地形および計算結果の出力点を示す。なお、図 107, 図 108 の標高は鉛直方向下向きを正とする。

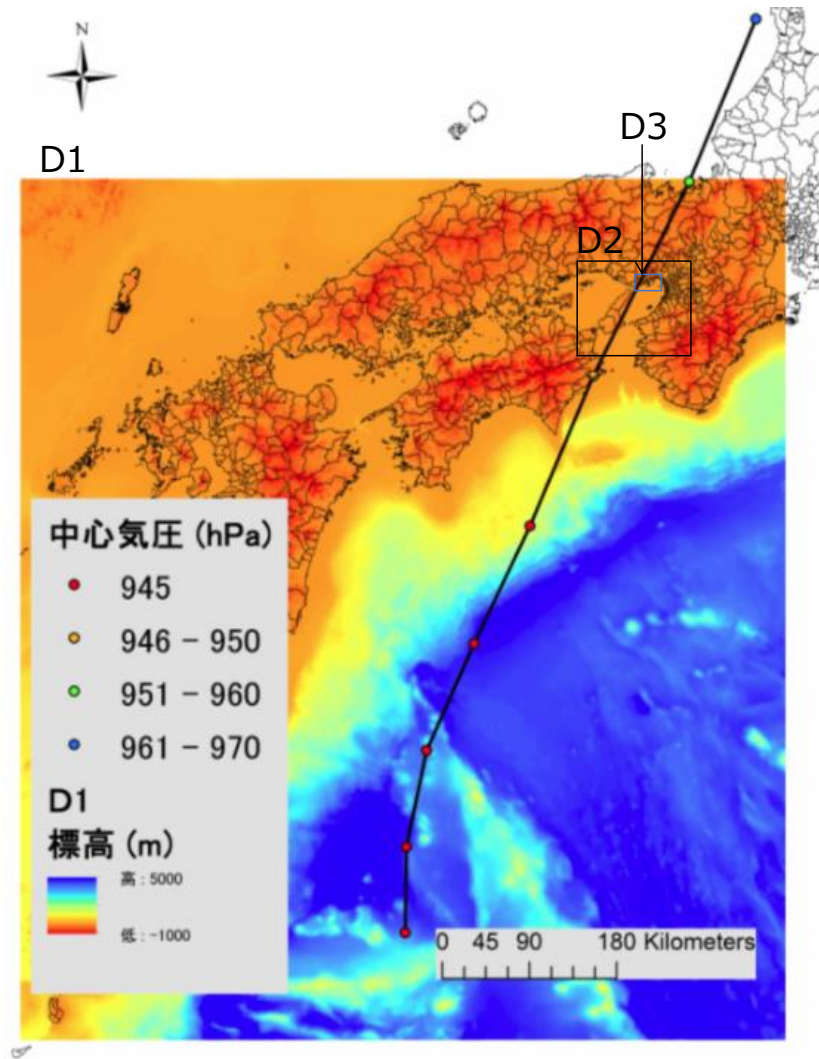


図 107 計算領域

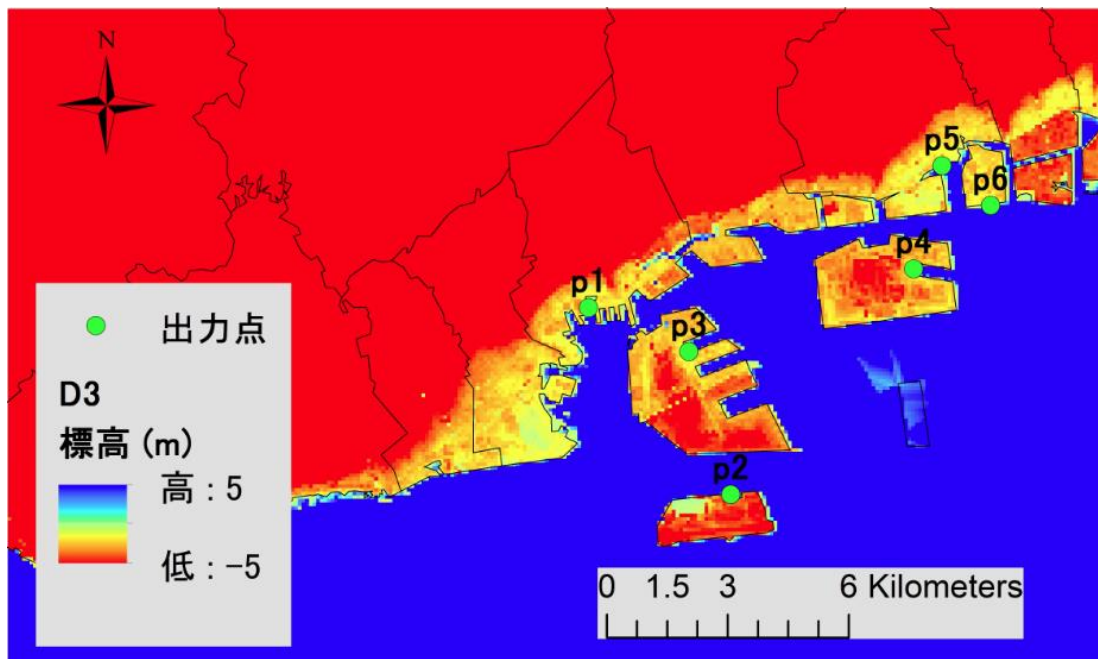


図 108 D3 の計算領域と地形および結果出力点

・ 高潮偏差・浸水深分布の推定結果

SuWAT により計算された時系列の高潮偏差は、気象庁 HP [125]によりリアルタイムで公表される神戸験潮所における観測値を目視で 1 時間毎の値を読み取り、比較した。また、高潮偏差のピーク値およびその時刻は、気象庁 [131]を用いた。

高潮浸水深の検証では、平常潮位を基準とした浸水深に換算し、測定値と計算値とを比較する。この理由は、計算では 90 m メッシュで地形をモデル化しており、測定地点の実際の地盤面高さとは必ずしも一致していないためである。そのため、観測および計算による浸水深を標高換算した後に、神戸験潮所の天文潮位を減じて浸水深に変換した。測定浸水深の標高換算では、測定値に国土地理院の 5 m メッシュの数値標高モデル [73]の地盤面の高さを加えた。計算浸水深の標高換算では、計算値に 90 m メッシュでモデル化した地盤面の高さを加えた。天文潮位は、先述したように、標高 52 cm とした。検証には、神戸市内のデータのみを使用した。

SuWAT により計算された神戸験潮所 (図 108 の p1 地点) における時系列高潮偏差と観測値を比較した結果を図 109 に示す。高潮偏差の立ち上がり、ピークを迎えた後の高潮偏差が減少していく様子が概ね再現されている。また高潮偏差のピークを迎える時刻は、観測では 9 月 4 日の 14 時 9 分であるが、計算では 14 時 20 分となった。観測では、高潮偏差がピークとなる直前に一度高潮偏差が減少しており、計算でもそのピーク直前の高潮偏差の減少と、ピークとなる時刻の高潮偏差は再現できた。しかし、計算ではピーク時刻後も高潮偏差が上昇し続け、観測とのピーク時刻に 11 分の乖離が生じた。最大高潮偏差は、観測値が 181 cm であるのに対し、計算では 202 cm と、若干過大に評価した。計算された最大高潮偏差分布を図 110 に、図 108 中の p1 から p6 における時系列高潮偏差を図 111 に示す。この結果から、西側にある p1~3 のグループと、東側にある p4~6 のグループとを比較すると東側の p4~6 方が大きく、東側にいくにつれて最大高潮偏差が大きくなる傾向となった。また時系列高潮偏差からは、各地点で高潮偏差がピークになる時間に大きな差が無いことが分かった。六甲アイランド (p3) では神戸験潮所より最大高潮偏差が約 50 cm 大きく、東灘区 (p4,5,6) ではさらに大きくなること示された。

六甲アイランド周辺の最大高潮偏差を図 110 から読み取ると、島の西部よりも東部で最大 30 cm 程度大きくなる。図 108 に示したように、島の海沿いは相対的に低い標高の地盤となっており、また低い地盤は島の西側よりも東側のほうがやや広大である。そのため、島の東部で特に被害が目立った理由として、東側の高潮偏差が大きくなったこと、および島の東側で低い標高の土地が広がっていることが原因であることが示唆される。同様に、東灘区では高潮偏差がさらに大きく、また低い標高の土地が要因となり、深江駅周辺や深江浜などで高潮による浸水被害が発生したと考えられる。

高潮浸水深分布の計算結果を図 112 に示す。図 112 中に測定による浸水ありと浸水なしの点を示す。高潮の浸水痕は、神戸市の東部で多数発見された。これは当該地点における高潮浸水被害が拡

大していたことが示唆され、この傾向は計算結果でも示された。

浸水高の測定値と計算値との比較を図 113 に示す。測定位置の不確実性を考慮し、記録した測定位置の周辺 9 メッシュから、測定値に最も近い計算値あるいは浸水しないメッシュの地盤高を比較対象とした。測定と計算ともに浸水ありの点に関して、計算値は概ね測定値を再現した。測定と計算の一方のみが浸水した結果では、一方の地盤高がもう一方の浸水高とほぼ同じ高さのため、浸水しない結果になったと考えられる。しかし、測定のみが浸水した結果において、特に浸水高が大きい場合に、測定値が計算値を上回る点が存在する。これは後述の波浪起因の浸水および堤防・防潮堤がモデルでは考慮されていないことにより計算が過小評価となった可能性がある。

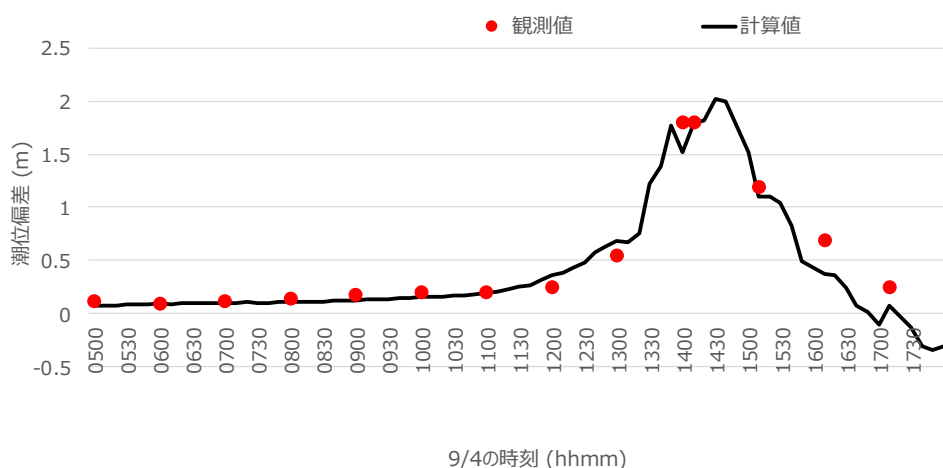


図 109 神戸験潮所における時系列高潮偏差検証結果

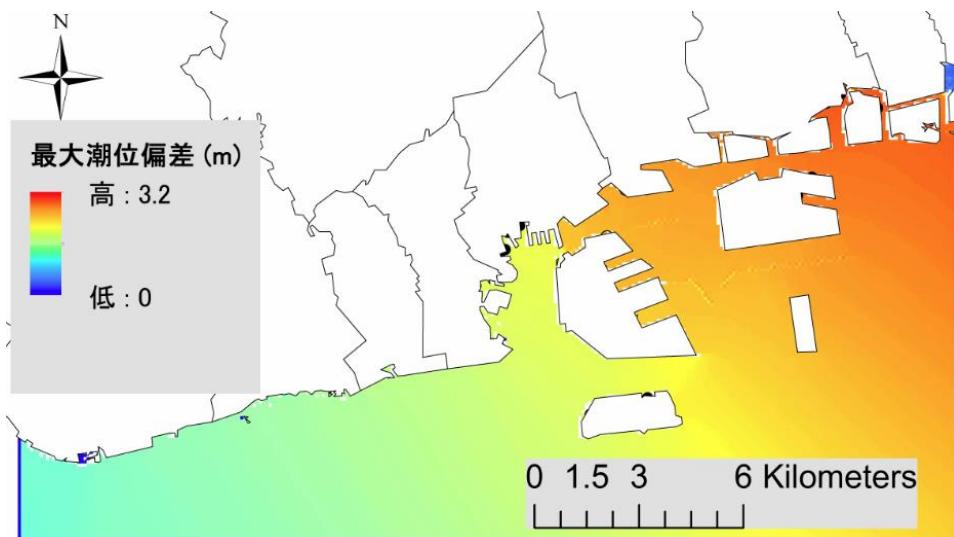


図 110 最大高潮偏差分布の計算結果

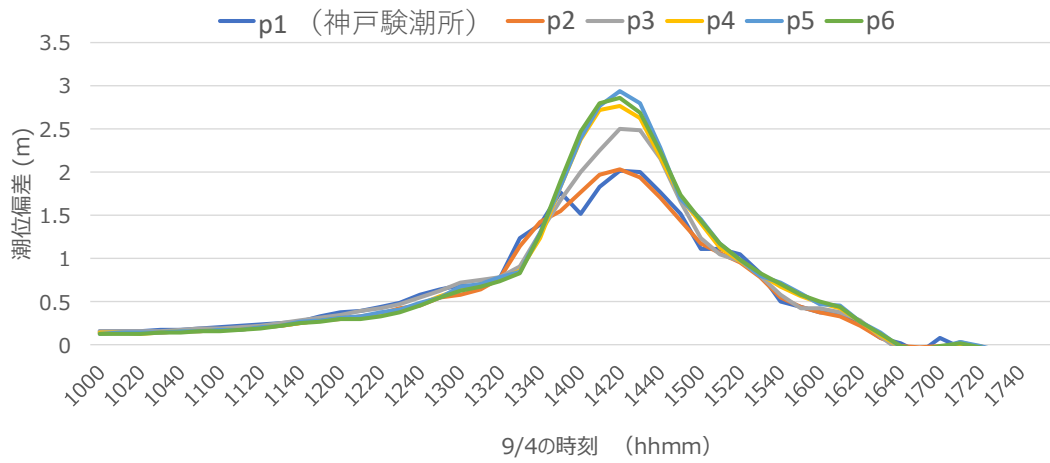


図 111 地点毎の時系列高潮偏差の計算結果

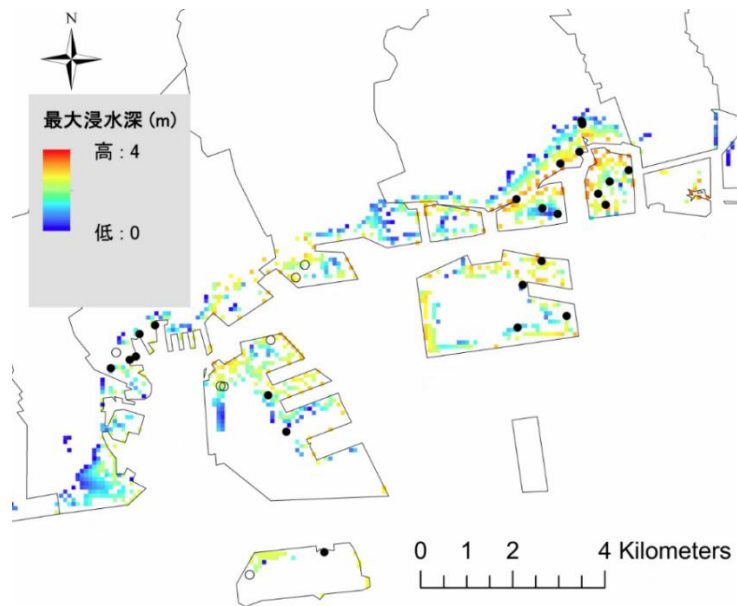


図 112 浸水深の計算結果と現地調査による浸水有無 (●：浸水あり，○：浸水なし)

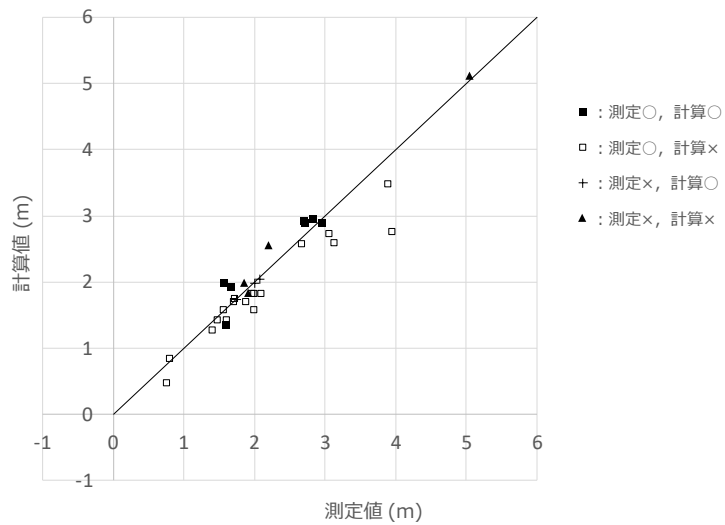


図 113 浸水高の測定値と計算値との比較

今次災害は高波による打上げおよび越波により浸水災害が拡大したことが指摘されているため、SuWAT で計算された最大有義波高の平面分布を図 114 に示す。神戸市沿岸には、神戸空港・ポートアイランド・六甲アイランドといった人工島が存在しており、これらが波を遮り、人工島の背後および人工島間における波高を減衰させる結果となった。一方で、芦屋市沿岸の波浪は減衰しないまま来襲しており、神戸市と比べると、相対的に高い波高の波が来襲していた可能性がある。さらに、潮位の上昇と同時に生じた越波・打上げは浸水被害を拡大させた可能性が考えられる。金ら [132] は、越波・打上げ、越流の遷移過程を考慮した高潮・浸水モデルの開発を進めている。今後、詳細に越波・打上げについて議論し、前述のようなモデルを活用した解析により、浸水深分布の再現性がより向上することが期待される。

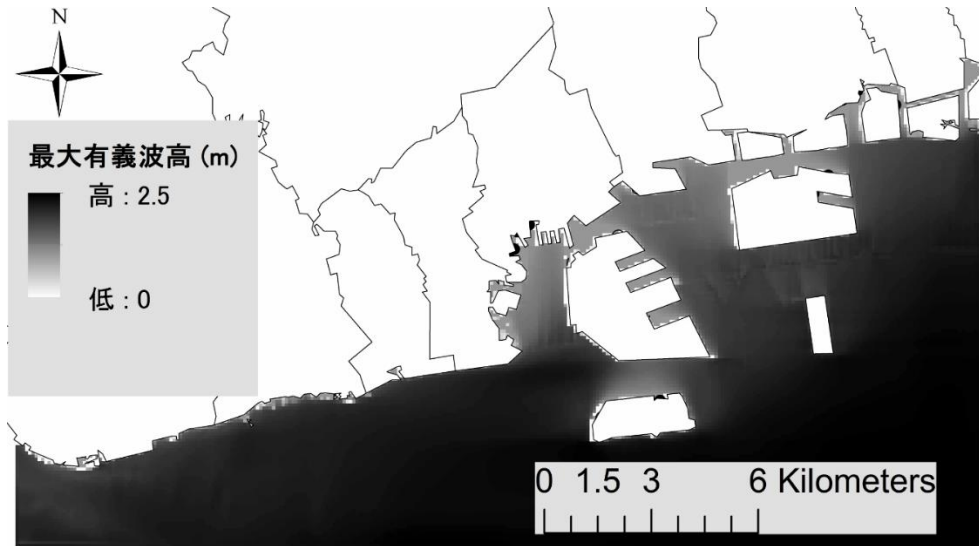


図 114 最大有義波高分布の計算結果

謝辞

本論文を執筆するにあたり、多部田茂先生（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）には、博士課程の3年間に渡りご指導を賜りました。保険業界における高潮リスク研究という、研究室の本流ではない研究テーマを受け入れていただき、また的確なご指導により随時研究内容を軌道修正していただきました。社会人という身分にも配慮していただき、研究環境を整備いただけたおかげで博士論文執筆まで至ることができました。ここに心より感謝申し上げます。

本田利器先生（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）、佐々木淳先生（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）、早稲田卓爾先生（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）、和田良太先生（東京大学大学院新領域創成科学研究科講師）には、大変お忙しい中、本論文の副査をご担当いただきました。論文作成にあたり、論文内容を向上させるために大変有益なご指摘を賜りました。ここに厚くお礼を申し上げます。

水野勝紀先生（東京大学大学院新領域創成科学研究科助教）には、研究だけでなく、社会人博士や研究者としての心構えをご指導いただきました。いつも気にかけていただき、精神面も支えていただきました。ここに深く感謝いたします。

金洙列先生（鳥取大学大学院工学研究科助教）には、高潮数値モデル SuWAT のオペレーションから論文執筆にいたるまで、研究活動を通してご指導を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

研究室の秘書である廣谷美保氏には、研究室の環境整備など、研究活動の補助をしていただきました。ここに心より感謝申し上げます。

吉田毅郎先生（東京大学生産技術研究所助教）、小平翼先生（東京大学大学院新領域創成科学研究科助教）は、同世代の海洋技術環境学専攻 OB として、親身に博士課程の過ごし方や研究内容について相談に乗っていただきました。心より感謝申し上げます。

本研究は、著者が在職中の MS&AD インターリスク総研株式会社（以下、インタ総研）における研究活動の一環として実施したものです。

中村光身氏（インタ総研社長）、村戸眞氏（インタ総研顧問）、緒方順一氏（インタ総研常務取締役）には、学位取得に向けた研究活動をご快諾いただき、最大限のご支援を賜りました。ここに心より感謝申し上げます。

堀江啓博士（インタ総研フェロー）には、直属の上司として、博士課程入学前から学位取得に向けて多大なお力添えをいただきました。3年間という長期間にわたり、学位取得を優先とした業務上のご配慮をいただいたおかげで本論文を執筆することができました。ここに厚くお礼を申し上げます。

インタ総研総合企画部リスク計量評価グループのメンバーをはじめとする社内の同僚の皆様には、研究活動に対して多くのご支援を賜りました。ここに深く感謝いたします。

研究室 OB で、修士時代の同級生である國料尚貴氏（株式会社商船三井）と阪本真士氏（日本製鉄株式会社）には、研究室にお越しいただき直接激励していただきました。ここに厚くお礼を申し上げます。

塩莉恵博士（海上技術安全研究所）には、同じ研究室の博士課程の先輩として、博士課程入学前から修了にいたるまで、様々なタイミングで博士号取得プロセスをご指導いただきました。ここに心より感謝いたします。

研究室の現役学生や OBOG の皆様、また同部屋のエネルギー環境学研究室および環境モデリング統合学研究室の学生の皆様には、研究室生活を通してお世話になりました。社会人博士を快く受け入れていただき、若い皆様と多くの時間を共有できたことが、著者の学生生活に彩りを与えてくれました。また武藤弘晃氏には、博士課程入学試験時においてアドバイスや必要資料のご提供をいただきました。ここに深く感謝いたします。

第 2 章の高潮数値計算では、中條壮大先生（大阪市立大学大学院工学研究科准教授）に確率台風モデルの計算結果をご提供いただきました。また長谷川厚子氏（インタ総研）には、高潮数値モデルのインプットデータ作成にご協力いただきました。ここに厚くお礼を申し上げます。

第 5 章の被害関数作成では、河辺賢氏（インタ総研）をはじめとした多くの社員の皆様のお力添えをいただきました。ここに心より感謝申し上げます。

社会人博士としての生活は、親族や社外のお付き合いのある方々にも気にかけていただきました。特に亡父 一仁には学位取得を強く応援していただきました。ここに深く感謝いたします。

最後に、研究活動を見守り応援してくれた妻 智美と娘 千晃に、心より感謝の意を表します。

2020 年 5 月

久松 力人