



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	気候変動を踏まえた統合的水害リスク評価手法とその活用に関する研究
Author(s)	植村, 郁彦
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16619号
Issue Date	2025-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16619
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/98229
Type	doctoral thesis
File Information	Uemura_Fumihiko.pdf, 全文



A Study on Integrated Flood Risk Assessment Methods
and Their Application Considering Climate Change
気候変動を踏まえた統合的水害リスク評価手法と
その活用に関する研究

Fumihiko UEMURA

植村 郁彦

A Doctor Thesis

博士論文

北海道大学大学院工学院

on August 19, 2025

ABSTRACT

In recent years, the impacts of climate change have become increasingly evident in Japan, as demonstrated by the frequent occurrence of extreme rainfall events exceeding historical records. The 2016 Hokkaido flood disaster marked the first recorded instance of three consecutive typhoon landfalls, resulting in widespread and severe damage due to flooding. These events highlight the urgent need for flood damage mitigation measures based on comprehensive flood risk assessments. Risk, defined as the potential for future loss or damage, is a concept widely applied across various domains, including natural hazards and economic activities. In the context of natural disasters, risk is generally composed of three elements: (1) hazard, (2) exposure, and (3) vulnerability. Flood-related hazards encompass a range of phenomena such as river flooding, debris flows, storm surges, and wind damage. This study focuses specifically on inundation caused by “external flooding due to levee failure,” which can result in large-scale and catastrophic impacts. Flood hazard assessments typically involve setting rainfall as an external forcing factor, estimating river discharge and water levels through runoff modeling, and analyzing flood flows in inundation areas following levee failure to estimate inundation depth. However, this process inherently involves uncertainties stemming from the accuracy of hydrological and observational data, as well as the spatiotemporal representativeness of survey data. Currently, uncertainties related to rainfall-runoff processes and structural resilience are often treated deterministically under single-condition scenarios. Frank Knight distinguished between “uncertainty measurable by probability,” referred to as risk, and “unmeasurable uncertainty.” While the former can be addressed through statistical methods, the latter remains difficult to predict or control. Both types of uncertainty coexist in natural disaster risk assessments. Recent advancements in high-resolution observational technologies in meteorology, hydrology, and structural engineering have enabled the quantification of previously qualitative uncertainties as probabilistic information. This shift represents a transition from Knight’s “unmeasurable uncertainty” to “measurable uncertainty.” Despite these advancements, the incorporation of quantified uncertainties into flood risk assessments remains limited. The objective of this study is to propose an integrated flood risk assessment methodology that incorporates probabilistically measurable uncertainties throughout the sequence of meteorological phenomena, runoff, and inundation processes. This methodology aims to enhance flood risk information using high-precision data to support decision-making during both normal and emergency conditions.

Chapter 2 presents an integrated flood risk assessment utilizing massive ensemble climate prediction data, tailored to both normal and emergency scenarios. The proposed methodology incorporates exposure and vulnerability elements alongside conventional hazard information and enables information provision based on user type (residents, businesses, municipalities) and purpose (preparedness, emergency response). For normal-time assessments, a method was developed to quantitatively evaluate damage per household and the cost-effectiveness of mitigation measures. Flood analysis using massive ensemble climate prediction data visualized the relationship between inundation depth and damage as risk curves, facilitating analysis of average annual damage, expected damage reduction, and investment efficiency. This approach demonstrates the potential to provide individuals with actionable information to perceive flood risk as a personal concern and make informed decisions regarding disaster preparedness. For emergency-time assessments, a decision-support method was proposed for issuing evacuation information based on disaster scenarios derived from climate prediction data, targeting municipalities as primary users. Demonstration experiments using the IDR4M system indicated improved response capabilities to

unprecedented disasters and applicability to evacuation drills and disaster preparedness exercises.

Chapter 3 proposes a methodology for evaluating probabilistic rainfall in river planning by quantifying uncertainties in the spatiotemporal distribution of rainfall using massive ensemble climate prediction data. High-resolution downscaling to RCM5 improved the reproducibility of percentile values of observed rainfall events. Bias correction based on actual rainfall further enhanced model accuracy. Probabilistic rainfall was evaluated using a resampling method with 60-year samples and fitted to Gumbel and GEV distributions. Results indicated that under future climate conditions, the 1/150-year rainfall could increase by approximately 1.4 times. Additionally, runoff analysis using massive ensemble data and rainfall-dependent parameter settings improved the reproducibility of observed discharge and revealed that peak discharge could increase by approximately 1.7 times under future climate conditions.

Chapter 4 aims to construct a levee failure probability evaluation model that incorporates uncertainty into flood risk assessments. Focusing on overtopping and erosion—primary failure mechanisms in Japan—the study evaluates probabilistically measurable uncertainties in each failure process and proposes models to assess levee failure conditions as failure probabilities. For overtopping-induced failure, a Monte Carlo-based model was developed using probabilistic variables such as water level-discharge relationships, levee height, and slope erosion resistance. For erosion-induced failure, a model was constructed based on uncertainties in shear stress and critical shear stress due to levee soil properties. These models were applied to levees along the Tokachi and Satsunai Rivers, illustrating longitudinal distributions of failure probabilities by mechanisms. Application to actual rivers confirmed that differences in levee geometry and water level time series are reflected in failure probabilities and that the relationship between flow velocity and failure aligns with observed phenomena.

Chapter 5 proposes a practical method for integrating failure probabilities across levee segments, considering dependencies between failure points. Levee sections were divided into segments and subsections, with the maximum failure probability used as a representative value within subsections and upstream failures influencing downstream failure probabilities. This method was applied to the Tokachi River, revealing a failure probability of 1/40 due to overtopping and demonstrating that consideration of dependency significantly affects failure probability estimates. The calculated failure probabilities were then used to evaluate flood risk via risk curves.

In conclusion, this study developed a quantitative evaluation methodology for uncertainties in flood risk assessments, in response to the increasing frequency of extreme rainfall events and the impacts of climate change. By incorporating probabilistic information into traditionally deterministic elements such as rainfall and levee structures, the study enables the generation of integrated flood risk information to support decision-making during both normal and emergency conditions. Ultimately, this research proposes a new concept and methodology for integrated flood risk assessment that incorporates probabilistically measurable uncertainties.

論文要旨

近年、我が国では観測記録を上回る豪雨の頻発等、気候変動の影響が顕在化している。2016年の北海道豪雨災害では、観測史上初めて台風が連続して3個上陸し、各地で洪水氾濫による甚大な被害が発生した。このような状況を踏まえ、水害による被害軽減に向けて、水害リスク評価に基づいた対策の推進が強く求められている。リスクとは、将来における損失や被害の可能性を意味する概念であり、自然災害や経済活動等、さまざまな分野で広く用いられている。自然災害リスクは一般に、(1)ハザード、(2)暴露、(3)脆弱性の3要素から構成される。水害分野におけるハザードには、洪水氾濫、土石流、高潮、風害等多様な現象が含まれるが、本研究では、広域的かつ甚大な被害をもたらす堤防決壊による外水氾濫による浸水を対象としている。水害リスクのハザード評価では、降雨を外力として設定し、流出モデルにより河川流量・水位を算出し、さらに堤防決壊後の氾濫原における洪水流の解析を通じて浸水深を推定する手法が一般的である。しかし、この過程には、水文・観測データの精度や測量データの時空間代表性等に起因する不確実性が内在しており、降雨・流出現象や構造物の耐力といった不確実性が、単一の条件に押し込められて扱われているのが現状である。経済学者フランク・ナイトは、リスクを「確率として測定可能な不確実性」と定義し、これとは異なる「測定不可能な不確実性」と区別して提唱した。前者は統計的手法によって扱うことが可能である一方、後者は予測や制御が困難であり、自然災害リスクの評価においても両者が混在している。近年では、気象・水文分野や構造物に関する高精度な観測技術の発展により、これまで定性的に扱われてきた不確実性についても、確率分布を持つ情報として定量的に取り扱うことが可能となりつつある。これは、ナイトが定義する「測定不可能な不確実性」から「確率として測定可能な不確実性」への転換と位置づけることができる。しかしながら、こうした不確実性を定量化し、水害リスク評価に反映した事例は依然として限られている。本研究の目的は、上述の背景を踏まえ、気象現象から流出・氾濫に至る一連の過程に内在する不確実性のうち、確率として測定可能な要素を評価過程に導入することで、統合的な水害リスク評価手法を提案することである。本手法は、観測技術の発展及びデータの充実を踏まえた高精度な情報を活用し、水害リスク情報を平常時・緊急時の意思決定支援に資する形で高度化することを目指したものである。

第2章では、大規模アンサンブル気候予測データを活用し、平常時及び緊急時のそれぞれの活用場面に応じた統合的水害リスク評価を行った。評価手法の構築にあたっては、従来のハザード情報を基本としつつ、暴露・脆弱性の要素を加味した手法を提案するとともに、活用主体（住民、企業、自治体）及び活用目的（平常時の備え、緊急時の対応）に応じた情報提供を可能とする評価手法を構築した。平常時の評価では、住民を主な活用主体とし、家屋1戸あたりの被害額や被害軽減策の投資効果を定量的に評価する手法を構築した。大量アンサンブル気候予測データを用いた氾濫解析により、浸水深と被害額の関係をリスクカーブとして可視化し、年平均被害額や被害軽減期待額、対策費用との比較による投資効果の分析を行った。これにより、個人が自らのリスクを“ジブンゴト”として捉え、適切な防災行動や対策選択を行うための情報提供の可能性を示した。緊急時の評価では、自治体を主な活用主体とし、気候予測データに基づく災害シナリオを活用した避難情報の発令判断支援手法を提案した。IDR4Mシステムを用いた実証実験を通じて、未経験の災害に対する対応力の向上や、避難訓練・防災演習への応用可能性を示した。

第3章では、河川計画における確率雨量の評価に対して、大規模アンサンブル気候予測データを活用することで、降雨の時空間分布に内在する不確実性を確率的に評価し、観測データの標本規模に起因す

る確率雨量の不確実性を定量的に評価する手法を提案した。年最大降雨イベントの抽出に際しては、RCM5 への高解像度ダウンスケーリングを行うことで、実績降雨のパーセンタイル値の再現性が向上することを示した。また、実績降雨に基づくバイアス補正により、モデル値の再現性を高める手法についても検証を行った。確率雨量の評価にあたっては、60 年を 1 標本としたリサンプリング手法により多数の気象シナリオを構築し、Gumbel 分布及び GEV 分布を用いて不確実性を評価した。その結果、将来気候下においては、1/150 確率雨量が現在の約 1.4 倍に増加する可能性があることを示した。さらに、大規模アンサンブルデータを用いた流出解析においては、降雨量に応じたパラメータ設定手法を導入することで、実績流量の再現性を向上させるとともに、将来気候下ではピーク流量が約 1.66 倍に増加することを明らかにした。

第 4 章では、水害リスク評価における堤防決壊条件として、不確実性を考慮した破堤確率評価モデルを構築すること目的とし、日本における主要な破堤メカニズムである越水及び浸食について、各破堤プロセスに内在する不確実性のうち確率として測定可能なものを評価し、堤防決壊条件を破堤確率として評価するモデルを提案した。越水による破堤については、越流水による法面侵食をモデル化し、水位－流量関係、堤防高、法面の耐侵食性の不確実性を確率変数としたモンテカルロ法による破堤確率評価モデルを構築した。浸食による破堤については、洪水流による表法面の侵食をモデル化し、堤防の土質に起因する侵食に対するせん断応力や限界せん断応力の不確実性を確率変数としたモンテカルロ法による破堤確率評価モデルを構築した。構築したモデルを十勝川及び札内川の堤防に適用し、破堤要因別の破堤確率の縦断分布を示した。実河川への適用により、堤防形状の差異や水位の時系列変化が破堤確率に反映されることを確認し、流速と破堤の関係が実現象と整合することを示した。

第 5 章では、水害リスク評価における堤防決壊条件として破堤確率を導入するにあたり、破堤点間の従属関係を踏まえつつ、実務への適用にあたっての簡便性を考慮した方法を提案した。評価対象とする堤防区間をセグメントとセクションに分割し、セクション内では最大破堤確率を代表値とし、セクション間では上流の破堤が下流の破堤確率に影響を考慮することとし、堤防区間全体の破堤確率へと統合する手法を提案した。その結果、十勝川における越水による破堤確率は 1/40 となることを示すとともに、従属性の考慮の有無が破堤確率に大きく影響することがわかった。また、算定した破堤確率を水害リスクカーブによる評価に用いた場合の水害リスクを示した。

最後に、本研究は近年頻発する豪雨災害と気候変動の影響を背景に、水害リスク評価における不確実性の定量的な評価手法を構築した。従来、確定論的に扱われてきた降雨現象や堤防構造等の要素に内在する不確実性を、確率的情報として評価に取り入れることで、平常時・緊急時の意思決定支援に資する統合的な水害リスク情報の生成を可能とした。これを要するに、従来の水害リスク評価に対し、確率として測定可能な不確実性を導入した統合的な水害リスクの概念及び評価手法を提案したものである。

Acknowledgements

初めに、北海道大学の山田朋人教授には、4年間にわたりご指導いただき、心より感謝申し上げます。本論文にまとめた研究のみならず、土木工学全般に関して幅広く議論する機会をいただき、多くの知見を学ばせていただきました。

副査をご担当いただいた泉典洋教授、猿渡亜由未教授、西村聡教授、石塚宗司特任教授には、研究内容について貴重なご意見をいただき、深く感謝申し上げます。また、博士論文の審査をお引き受けくださった渡部要一教授、渡部靖憲教授、石川達也教授、内田賢悦教授、長井宏平教授、佐藤友徳教授、岩崎理樹准教授には、審査に際して多くのご助言とご議論をいただきましたこと、心より御礼申し上げます。

北海道大学工学部 河川・流域工学研究室の皆様との日々の議論や研究活動は、私自身の研究を深めるうえで非常に貴重な経験となりました。研究室の皆様には、心より感謝申し上げます。また、広聴会の発表練習や当日の準備等にもご協力いただき、大変助けられました。この場を借りて、改めて御礼申し上げます。

株式会社ドーコンの皆様には、博士課程在学中の業務や研究に関して多くのご支援をいただきました。研究論文に対するご助言をはじめ、さまざまな面でご協力いただいたことに、心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、北海道河川財団や HKV コンサルタントをはじめとする日蘭共同研究に関わる皆様には、多大なるご支援とご協力をいただきました。研究の議論や技術的な助言を通じて、研究の質を高める貴重な機会をいただいたことに、深く感謝申し上げます。また、多くの基礎情報や観測情報をご提供いただいた国土交通省北海道開発局の皆様にも、心より感謝申し上げます。

最後に、いついかなるときも傍で支えてくれた家族に心から感謝いたします。

Contents

1. 序論.....	1
1.1. 背景.....	1
1.1.1. 気候変動の顕在化	1
1.1.2. リスクについて	3
1.1.3. 観測技術の発展・データの充実	4
1.1.4. 水害リスクにおける不確実性の評価	5
1.2. 目的.....	6
1.2.1. 本研究の目的.....	6
1.2.2. 本論文の構成.....	6
2. 統合的水害リスク評価手法に関する研究	10
2.1. はじめに	10
2.1.1. 研究背景	10
2.1.2. 研究目的	11
2.2. 平常時の水害リスク評価.....	12
2.2.1. 方法	12
2.2.2. 結果	19
2.2.3. まとめ.....	25
2.3. 緊急時の水害リスク評価.....	26
2.3.1. 方法	26
2.3.2. 結果	31
2.3.3. まとめ.....	38
2.4. 第2章のまとめ	39
3. 降雨・流出現象の不確実性に関する研究	41
3.1. はじめに	41
3.1.1. 研究背景	41
3.1.2. 研究目的	42
3.2. 年最大降雨イベントの分析	43
3.2.1. 方法	43
3.2.2. 結果	48
3.2.3. まとめ.....	55
3.3. 確率雨量の不確実性の分析	56
3.3.1. 方法	56
3.3.2. 結果	60
3.3.3. まとめ.....	63
3.4. 流出量の不確実性の分析.....	64
3.4.1. 方法	64

3.4.2.	結果	68
3.4.3.	まとめ	69
3.5.	第3章のまとめ	70
4.	堤防決壊発生の不確実性に関する研究	72
4.1.	はじめに	72
4.1.1.	研究背景	72
4.1.2.	研究目的	75
4.2.	越水による破堤確率の評価	75
4.2.1.	方法	75
4.2.2.	結果	82
4.3.	侵食による破堤確率の評価	85
4.3.1.	方法	85
4.3.2.	結果	91
4.4.	第4章のまとめ	93
5.	水害リスク評価への破堤確率の導入	95
5.1.	はじめに	95
5.1.1.	研究背景	95
5.1.2.	研究目的	96
5.2.	方法	97
5.2.1.	各セクションの破堤確率の算定方法	98
5.2.2.	区間全体における破堤確率の算定方法	98
5.2.3.	破堤確率の水害リスク評価への導入	99
5.3.	結果	100
5.3.1.	各セクションの破堤確率	100
5.3.2.	堤防区間全体の破堤確率	101
5.3.3.	水害リスク評価への反映	103
5.4.	第5章のまとめ	105
6.	結論	107
研究業績		109

List of Figures

図 1.1	本研究の全体象と各章の位置づけ	7
図 2.1	各主体にとってのリスクの対象（暴露）のイメージ	11
図 2.2	水害リスク評価のフロー	12
図 2.3	解析の対象範囲	13
図 2.4	台風・降雨に起因するハザードの例	14
図 2.5	本研究における暴露の考え方	16

図 2.6 浸水深と家屋被害額の関係	17
図 2.7 リスクカーブに基づく被害額の算定イメージ	18
図 2.8 対策未実施の場合の家屋 1 戸あたりの被害額	20
図 2.9 高床化 2m 実施時の家屋 1 戸あたりの被害額	21
図 2.1 0 高床化 2m の投資効果	22
図 2.1 1 リスクカーブを活用した分析例（帯広市街地）	23
図 2.1 2 リスクカーブを活用した分析例（十勝川利別川合流点付近）	24
図 2.1 3 対象地域	26
図 2.1 4 水位データ作成地点	28
図 2.1 5 氾濫解析実施河川と統合イメージ	30
図 2.1 6 IDR4M における降雨量の表示例	31
図 2.1 7 IDR4M における河川水位の表示例	32
図 2.1 8 IDR4M における洪水波ハザード（浸水深・範囲）の表示例	34
図 2.1 9 IDR4M における地域の脆弱性の表示例	35
図 2.2 0 IDR4M におけるリスクの表示例	36
図 2.2 1 IDR4M における避難判断支援情報の表示例	37
図 3.1 対象流域	43
図 3.2 本研究におけるバイアス補正手法の概念図(1)	46
図 3.3 本研究におけるバイアス補正手法の概念図(2)	46
図 3.4 年最大流域平均雨量相対度数分布—RCM20 と RCM5 の比較—	49
図 3.5 バイアス補正係数の算出	51
図 3.6 年最大流域平均雨量相対度数分布—RCM5 バイアス補正前後の比較—	52
図 3.7 年最大流域平均雨量相対度数分布—過去実験と将来実験の比較（RCM5 補正データ）—	54
図 3.8 確率雨量の評価のイメージ	56
図 3.9 本研究におけるリサンプリング手法の概念図	58
図 3.1 0 リサンプリングの感度分析結果	59
図 3.1 1 確率雨量の評価結果	60
図 3.1 2 年超過確率 1/150 雨量の頻度分布	61
図 3.1 3 利根川水系八斗島観測所における 54 年間分の年最大日降水量[mm/day]及びこれら 個の観測値を当てはめた Gumbel 分布、観測値を当てはめた Gumbel 分布の 95%信頼区間を 記入した確率紙 ※n は観測値の総数である.	62
図 3.1 4 対象流域	64
図 3.1 5 実績降雨の流域平均雨量とピーク流量の関係	67
図 3.1 6 再現対象降雨イベントの流域平均雨量とモデル定数 X の関係	67
図 3.1 7 アンサンブル気候予測データを用いた流出解析によるピーク流量の頻度分布	68
図 3.1 8 アンサンブルデータ気候予測データの流域平均雨量と流出解析ピーク流量の関係	69
図 4.1 堤防決壊のメカニズム	73
図 4.2 台風 19 号による被災要因	74
図 4.3 評価対象区間	75
図 4.4 モデル化した破堤プロセス	77

図 4.5 越水による堤防決壊判定モデルの概要	77
図 4.6 越水による破堤の流れと不確実性	77
図 4.7 水位一流量関係が有する不確実性	78
図 4.8 堤防高が有する不確実性	79
図 4.9 越水による破堤確率算定の流れ	81
図 4.10 各評価地点における破堤確率算定結果	82
図 4.11 破堤確率に与える不確実性を有する要素の感度分析結果	83
図 4.12 十勝川観測所地点における水位一流量関係の不確実性	84
図 4.13 十勝川における堤防高の不確実性	84
図 4.14 モデル化した侵食破堤プロセス	85
図 4.15 侵食による堤防決壊判定の概念図	86
図 4.16 破堤確率の算定フロー	89
図 4.17 代表地点における破堤確率	91
図 4.18 破堤確率の縦断分布	92
図 5.1 対象河川位置と堤防評価地点	97
図 5.2 セグメントとセクションの関係	98
図 5.3 セグメントとセクションの関係	100
図 5.4 各セクションにおける従属性を考慮した破堤確率の算定結果	101
図 5.5 破堤確率を考慮した場合の水害リスクカーブの変化	104

List of Tables

表 3.1 実績降雨と RCM20 及び RCM5 のパーセンタイル値	50
表 3.2 実績降雨と RCM5 及び RCM20 の補正前後の累積相対度数	53
表 3.3 実績降雨と RCM5 及び RCM20 のパーセンタイル値	54
表 4.1 k 及び τ_c の設定条件	88
表 4.2 評価区間の堤防諸元	90
表 5.1 堤防区間全体の破堤確率	102

1. 序論

1.1. 背景

1.1.1. 気候変動の顕在化

近年、気候変動の影響により、極端な降雨や洪水の頻度・強度が増加している。IPCC 第 6 次評価報告書では、地球温暖化が進行する中で、豪雨や洪水のリスクが世界的に高まっていることが示されている[1]。日本においても、これまでに経験のない規模の降雨が各地で発生し、河川の流下能力を超える洪水による堤防決壊や氾濫が頻発している。以下に近年の豪雨による被害例を示す。

- ・ 平成 28 年北海道豪雨（2016 年）：8 月中旬から下旬にかけて、台風 7 号・9 号・11 号・10 号が相次いで北海道に上陸・接近し、十勝川水系や石狩川水系等で堤防決壊や河川氾濫が発生した。空知川では幾寅地区の堤防が決壊し、市街地が浸水した。被害は死者 4 名、住家被害は全壊 29 棟、床上浸水 273 件、被害総額は 2,800 億円を超え、北海道史上最大級の被害となった[2]。
- ・ 平成 30 年 7 月豪雨（2018 年）：西日本を中心に記録的な豪雨が発生し、広島県、岡山県、愛媛県等で大規模な浸水・土砂災害が発生した。被害は死者 200 名以上、住宅被害は 5 万棟を超え、平成以降最大級の被害となった[3]。
- ・ 令和元年東日本台風（台風 19 号、2019 年）：関東・東北地方を中心に広範囲で河川が氾濫した。多摩川、千曲川等で堤防が決壊し、住宅地が浸水した。被害は死者 90 名以上、被害額は 1 兆円を超えると推定されている[3]。
- ・ 令和 2 年 7 月豪雨（2020 年）：熊本県を中心に九州全域で豪雨が発生した。球磨川の氾濫により、特別養護老人ホームで多数の犠牲者が出る等、人的・物的被害が甚大となった[3]。

これらの事例に対して、国立環境研究所や大学等の研究機関では、気候モデルを用いたイベント・アトリビューションにより、地球温暖化が豪雨の発生確率を高めていることを定量的に示している。例えば、平成 30 年 7 月豪雨の発生確率は、温暖化がなかった場合と比較して約 3.3 倍に増加していたと推定されている[4]。

1.1.1.1. 水災害分野における国内の取り組み

気候変動の顕在化を踏まえ、将来の気候変動を前提とした確率論的なリスク評価と適応策の導入が急務となっている。特に北海道では、平成 28 年の豪雨災害を契機として、全国に先駆けた取り組みが進められている。北海道開発局と北海道は共同で「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」を設置し、気候予測アンサンブルデータを活用したリスク評価や、地域特性を踏まえた治水適応策の技術的検討を進めている[5],[6]。これを受けて、国土交通省は「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」を設置し、世界平均気温が 2℃上昇した場合を想定した降雨外力の見直しを進めている。具体的には、治水計画で想定する降雨量を現在の 1.1～1.15 倍に引き上げることが提言されており、従来の計画論に基づく治水設計の見直しが図られている[7]。さらに、令和 3 年からは「流域治水プロジ

ェクト」が全国で展開されており、河川管理者によるハード・ソフト対策に加え、自治体、事業者、住民等流域の多様な主体が協働して洪水被害の軽減に取り組む体制が構築されつつある。このプロジェクトでは、水害リスク情報の整備と共有の必要性が示されており、水害リスク情報の高度化が求められている。加えて、内閣府が推進する戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「スマート防災ネットワークの構築」では、5つのサブ課題の一つとして「リスク情報による防災行動の促進」が掲げられている。この課題では、災害を“ジブンゴト”として捉えるためのリスク情報の整備・可視化・社会実装に関する研究が進められている。このように、気候変動に伴う水害の激甚化・頻発化に対応するためには、科学的根拠に基づいたリスク評価と、それを支える情報の整備・活用が不可欠であり、政策・技術の両面からの統合的な対応が求められている。

1.1.1.2. 諸外国における取組

欧米諸国では、気候変動による極端気象の増加や洪水リスクの高まりを受けて、従来のハード中心の治水政策から、「適応策（adaptation）」を重視したリスクベースのアプローチへと転換が進んでいる。IPCCの報告書でも、温暖化の「緩和策」だけでは不十分であり、「適応策」の社会的実装が不可欠であるとされている。このような背景のもと、欧州連合（EU）をはじめとする欧米諸国では、「no regret（後悔しない）」や「win-win（双方に有益）」な適応策を基本コンセプトに、洪水リスクの最小化と社会的便益の両立を目指す政策が展開されている[8]。

- ・ 欧州連合（EU）：EUは2009年に「気候変化への適応に関する白書（White Paper）」を発表し、以下の4つの柱を中心に適応戦略を構築している。
 - 気候変化の影響に関する知識基盤の構築
 - 適応策の主要政策分野への統合
 - 市場メカニズムや官民連携を活用した政策手法の導入
 - 国際協力の推進また、EUは「洪水リスクの評価と管理に関する指令（Floods Directive, 2007/60/EC）」を制定し、流域単位での洪水リスク評価と管理の枠組みを加盟国に義務付けている。
- ・ イギリス：2008年に「気候変化法（Climate Change Act）」を制定し、世界で初めて炭素排出削減と適応策の両立を法的に規定した国となった。この法律に基づき、2009年には「洪水及び水の管理に関する法律（Flood and Water Management Act）」が制定され、以下のような特徴がある：流域単位での洪水リスク管理の強化、内水氾濫への対応責任の明確化、地方自治体の役割強化と市民参加の促進。
- ・ フランス：「環境グルネル法（Loi Grenelle）」を通じて、気候変動への適応と環境保全を統合した政策を推進している。この法律では、再生可能エネルギーの導入や生態系ネットワークの整備とともに、水系の保全と洪水対策が重要な柱とされている。
- ・ ドイツ：2009年に「改正連邦水管理法（WHG）」を制定し、洪水リスク管理と土地利用計画の統合を進めている。この法律では、洪水リスクの高い地域における建築制限や、自然調整機能を活用したグリーンインフラの導入が推奨されている。

特に、オランダは、国土の約3分の1が海面下に位置するという地理的条件から、古くから洪水対策に注力してきた国である。近年では、気候変動による海面上昇や極端降雨の増加に対応するため、リスクベース・アプローチに基づいた治水政策を国家戦略として展開している。その中核をなすのが「デル

タプログラム (Delta Programme)」[9],[10]であり、これは洪水防御、土地利用、危機管理の三層構造による重層的な洪水リスク管理を実現するための国家的取り組みである。このプログラムでは、まず堤防や防潮堤の強化、河川空間の拡張といったハード対策を通じて、洪水そのものの発生を防ぐことが重視されている。特に注目すべきは、洪水による死亡リスクを年間 10^{-5} (10 万人に 1 人) 以下に抑えることが法的に義務づけられている点である。この基準は、1953 年の北海高潮災害で 1,800 人以上が死亡したという歴史的教訓を踏まえ、国民の生命を守るための最低限の安全水準として設定されたものである。この死亡リスク基準は、単なるハザード（発生確率）ではなく、暴露（人口密度）や脆弱性（避難困難性）を考慮したリスクベースの指標であり、地域ごとに異なるリスクプロファイルに応じて堤防の設計基準が設定されている。例えば、人口密度が高く、避難が困難な都市部では、より高い安全度が求められる一方、農村部では相対的に低い基準が適用される。また、オランダでは独自の気候変動予測シナリオ (KNMI'14) を用いて、将来の降雨量や河川流量の変化を科学的に評価しており、これに基づいて洪水防御基準や土地利用方針が柔軟に見直されている。例えば、ライン川のピーク流量は、2050 年には最大 $18,000\text{m}^3/\text{s}$ に達する可能性があるとして予測されており、これに対応するための河川空間の確保や遊水地の整備が進められている[11],[12]。このように、オランダの治水政策は、科学的根拠に基づく外力設定と、リスクに応じた安全基準の導入により、気候変動下における持続可能な洪水リスク管理を実現している。

1.1.2. リスクについて

リスクとは、将来における損失や被害の可能性を意味する概念であり、自然災害や経済活動、社会政策等多様な分野において広く用いられている。リスクは単なる「危険」や「不確実性」とは異なり、ある出来事が発生する確率と、それによって生じる影響の大きさの組み合わせとして捉えられる。例えば、JIS Q 31000 (2019) [13]では、リスクを「目的に対する不確かさの影響」と定義しており、これはリスクが単なる悪影響に限らず、好影響を含む可能性もあることを示している。この概念は、さまざまな分野で重要な役割を果たしている。例えば、自然災害のリスクでは、地震や台風、洪水等の発生確率と、それによる人的・物的被害の規模が評価される。経済分野では、投資や市場の変動に伴う損失の可能性を分析し、リスク管理の手法（リスクヘッジや分散投資等）が活用される。社会政策においては、医療制度や年金制度の持続可能性、感染症の拡大リスク等が検討され、政策決定の根拠となる。また、リスクの本質については、現象学的な視点から「人が未来に対して持つストーリーが、予期せぬ出来事によって損なわれる可能性」として捉える研究[14]もある。これは、リスクが単なる客観的な数値ではなく、主観的な認識や価値観とも深く関係していることを示している。現代社会では、テクノロジーの進展やグローバル化により、リスクは国境を越えて連鎖的に広がる傾向が強まっている。このような背景から、リスクを正確に評価し、適切に管理する能力は、個人・企業・政府にとってますます重要なものとなっている。

1.1.2.1. 自然災害分野におけるリスク

自然災害分野におけるリスク評価は、一般に「ハザード (hazard)」「暴露 (exposure)」「脆弱性 (vulnerability)」の 3 要素から構成されるとされている。この枠組みは、国際的にも広く受け入れられており、例えば国連防災機関 (UNDRR) [15]や IPCC[16]のリスク評価指針においても基本的な自然災害分野におけるリスクの捉え方として採用されている。ハザードとは、地震、津波、台風、洪水等の自然現象そのものを指し、その発生頻度や規模、空間的分布等が評価対象となる。暴露は、ハザードの影

響を受ける可能性のある人間活動や資産の存在を意味し、人口密度、土地利用、建築物の分布等が含まれる。脆弱性は、暴露された対象が被害を受けやすい性質を指し、建物の耐震性や耐水性、社会的弱者の存在、避難体制の整備状況等が評価される。特に水害リスクにおいては、これら 3 要素が時間的・空間的に複雑に相互作用するため、リスク評価には高度なモデル化と仮定が求められる。例えば、ハザードとしての降雨は、気象モデルや気候予測モデルに基づいて将来の極端降雨の発生確率を推定する必要がある。流出過程では、地形、土地利用、土壌浸透能等の条件を考慮した水文モデルが用いられ、さらに河川の氾濫解析には 2 次元の流体力学モデルが適用される。暴露の評価においては、浸水域に存在する住宅、商業施設、インフラ等の資産情報を把握する必要がある。近年ではリモートセンシングや GIS 技術の活用が進んでいる。脆弱性については、建物の構造や築年数、床上・床下浸水の被害関数 (damage function) 等を用いて、被害額や人的被害の推定が行われる。このように、水害リスク評価は、自然科学的なハザード評価と、社会科学的な暴露・脆弱性評価を統合したアプローチが必要である。さらに、これらの要素には多くの不確実性が内在しており、それをいかに定量的に扱うかが、現代のリスク評価の大きな課題となっている。

1.1.2.2. リスクと不確実性

リスク評価においては、「リスク」と「不確実性」の概念を明確に区別することが重要である。フランク・ナイト (Frank H. Knight) は、1921 年の著作『Risk, Uncertainty and Profit』[17]において、確率的に測定可能な事象を「リスク (risk)」, 確率的に測定できない未知の事象を「真の不確実性 (true uncertainty)」として定義し、両者を明確に区別した。この区別は、現代の災害リスク評価においても有効な視点を提供する。例えば、ある地域における過去の降雨データや洪水履歴に基づいて、将来の洪水発生確率を統計的に推定することは「リスク」として扱われる。一方で、気候変動によって将来どのような極端現象が発生するか、あるいは社会構造や土地利用の変化が災害リスクに与える影響等、既存のデータやモデルでは予測が困難な事象は「不確実性」として捉えられるべきである。ナイトの理論は、単なる分類にとどまらず、意思決定の枠組みにも深い影響を与えている。彼は、リスクのある状況では保険や統計的手法によって損失を管理できるが、不確実性のある状況では、企業家精神や判断力が求められると述べている。この考え方は、災害リスク管理においても同様に適用可能であり、確率的に扱える「リスク」については定量的な評価を行い、水害リスク評価に適切に導入する必要があることを示唆している。

1.1.3. 観測技術の発展・データの充実

近年、気象・水文分野における観測技術の著しい発展により、降雨量や流量といった気象・水文情報、堤防高や流路形状等の地形情報に関して、高精度かつ高頻度のデータが取得可能となっている。例えば、気象・水文情報に関しては X バンド MP レーダーによる高解像度降雨観測や流量観測における ADCP (音響ドップラー流速計) の導入が挙げられる。また、地形情報に関しては ALB (Airborne Laser Bathymetry) 測量による河川・沿岸域の詳細な地形把握が挙げられる。加えて、従来の観測データや堤防点検等、河道の維持管理に関する情報も継続的に蓄積されつつあり、空間的・時間的に網羅性の高いデータベースの構築が進んでいる。これらの技術革新とデータの充実により、従来は定性的にしか扱えなかった現象についても、定量的な評価が可能となりつつある。この変化は、経済学者フランク・ナイトが提唱した「測定不可能な不確実性 (true uncertainty)」から「確率として測定可能な不確実性 (risk)」への転換と位置づけることができる。このような観測技術の進展とデータの充実は、災害リスク評価に

において不確実性の定量的把握を可能にするものであり、今後の水害リスク情報の高度化にあたっては、これらの不確実性を定量評価した情報の導入が必要と考えられる。

1.1.4. 水害リスクにおける不確実性の評価

自然災害リスクの評価においては、各過程に内在する不確実性を定量的に把握することが重要である。特に水害リスクに関しては、降雨から河川流出、氾濫といった一連のプロセスにおいて多様な不確実性が存在する。降雨現象に関する不確実性については、清水ら[18]は確率限界法（森口, 1995）[19]を導入し、確率雨量が取り得る範囲を統計的に評価している。また、降雨流出過程に関しては、吉見ら[20], [21]は確率微分方程式を用いることで、降雨の不確実性が流出過程に与える影響を定量的に評価している。さらに、降雨の観測精度の限界がピーク流量に与える影響や、事前雨量による流域内の貯留が次の降雨イベントにおけるピーク流量に及ぼす影響を評価した研究も報告されている。降雨から流出、さらに破堤に至る一連の過程における不確実性については、Wang ら[22]は降雨の観測精度に起因する不確実性を考慮し、河川の水位・流量の不確実性を評価した上で、それに基づく堤防破堤リスクを示している。これらの研究は、いずれも統計的手法に基づいて水害リスクにおける不確実性の評価を行ったものであり、降雨、流出、破堤といった各過程に内在する不確実性を定量的に捉える上で重要な知見を提供している。しかしながら、これらの手法は主に既存の観測データや統計モデルに依拠しており、前述の観測技術の発展やデータの充実に着目し、それらを活用した不確実性の定量評価には至っていない。

以上のように、近年の高精度な観測技術や大規模な気象・水文データの整備によって、従来の統計的手法では捉えきれなかった不確実性の定量評価が可能となりつつあるにもかかわらず、これらの技術的進展を十分に反映した評価手法の構築は確立されていない状況にある。

1.2. 目的

1.2.1. 本研究の目的

本研究は、上述の背景を踏まえ、気象現象から流出・氾濫に至る一連の過程に内在する不確実性のうち、確率として測定可能な要素を評価過程に導入することで、統合的な水害リスク評価手法を提案することを目的とする。本手法は、観測技術の発展及びデータの充実を踏まえた高精度な情報を活用し、水害リスク情報を平常時・緊急時の意思決定支援に資する形で高度化することを目指すものである。

1.2.2. 本論文の構成

本研究は、以下の全6章で構成される（図 1.1）。

第1章では、本研究の背景、目的、及びその位置づけについて述べた。

第2章では、大規模アンサンブル気候予測データを活用し、平常時及び緊急時のそれぞれの活用場面に応じたリスク情報の生成を目的とした統合的水害リスク評価を行う。平常時の水害リスクについては、住民や事業者による対策検討に資する情報として、家屋一戸あたりの浸水リスクを評価する。緊急時の水害リスクについては、自治体による避難情報発令の判断支援に資する情報として、気候予測データに基づく洪水シナリオを作成し、自治体との模擬訓練を通じてその有効性を検証する。

第3章では、河川計画に用いられる水文統計量である確率雨量が取り得る不確実性を評価する。従来の河川計画で用いられてきた年最大降雨イベントの標本数と同規模の標本数による評価手法を提案し、確率雨量の不確実性を定量評価する。また、流出解析を通じて、河川計画で用いられる水文量であるピーク流量に関して、降雨の時空間分布に起因する不確実性を示す。

第4章及び第5章では、水害リスク評価における氾濫発生境界条件となる堤防決壊の発生条件について、破堤確率の導入手法を提案する。第4章では、我が国で事例の多い越水及び侵食による堤防決壊プロセスをモデル化する。また、各プロセスに内在する不確実性のうち、確率として測定可能な要素をモンテカルロ法における確率分布を持つ乱数として導入し、破堤確率評価モデルを構築する。

第5章では、第4章で得られた各破堤点の破堤確率を、区間全体の破堤確率へと統合する手法を構築する。特に、破堤の発生が上下流間で相互に影響し合う従属性に着目し、評価地点間の距離に応じて従属関係の強さを可変とする方法を提案する。

第6章では、本論文の成果を総括するとともに、今後の展望について述べる。

目的：確率として測定可能な不確実性を導入した
統合的水害リスクの評価手法を提案

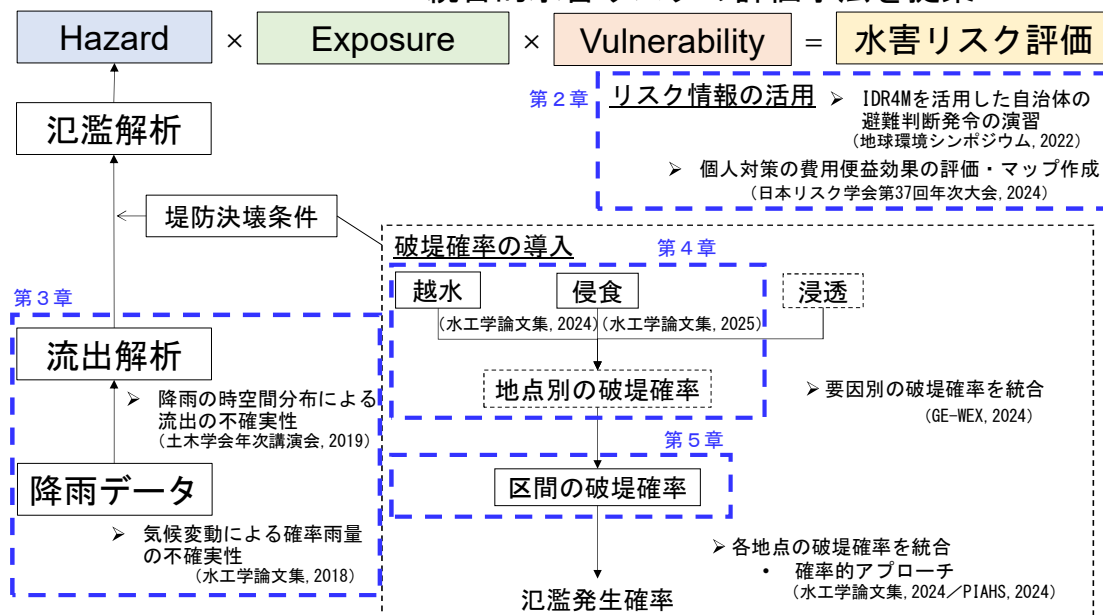


図 1.1 本研究の全体象と各章の位置づけ

References

- [1] 「IPCC Sixth Assessment Report (AR6)」. 2021 年.
- [2] 土木学会 2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団, 「2016 年 8 月北海道豪雨災害 調査団報告書」. 2017 年 4 月.
- [3] 国土交通省, 「国土交通白書 2022」.
- [4] 文部科学省 気象庁, 「日本の気候変動 2020—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—」. 2020 年 12 月.
- [5] 北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会, 「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会 中間とりまとめ」. 2022 年.
- [6] 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会, 「平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方」. 2017 年.
- [7] 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会, 「『気候変動を踏まえた治水計画のあり方』提言」. 2023 年 4 月.
- [8] 柳澤修と湧川勝己, 「欧米諸国における治水事業実施システム—気候変化を前提とした治水事業計画」, JICE report: Report of Japan Institute of Construction Engineering, no. 19, pp. 28–42, 2011.
- [9] The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs, 「Delta Programme 2014」. Work on the delta, 2013 年.
- [10] The Ministry of infrastructure and the Environment and The Ministry of Economic Affairs, 「Delta Programme 2015」. Working on the delta, 2014 年.
- [11] KNMI, 「KNMI'14:Climate Change scenarios for the 21st Century - A Netherlands perspective」. 2014 年.
- [12] KNMI, 「Deltares : Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?」. 2015 年.
- [13] 日本工業標準調査会 審議, JIS Q 31000, リスクマネジメント—指針. 2019.
- [14] 甘利康文, 「リスク概念の構造: 現象学の視座からリスクを理解する」, 社会情報学, vol. 12, no. 3, pp. 1–18, 2024.
- [15] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 「National disaster risk assessment: A guide for national practitioners」. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2025 年.
- [16] AR5 Climate Change, 「impacts, adaptation, and vulnerability—IPCC」. 2014 年.
- [17] F. H. Knight, Risk, Uncertainty and Profit. 1921.
- [18] 清水啓太, 山田正と山田朋人, 「確率限界法検定に基づく信頼区間を用いた確率洪水ピーク流量の不確実性評価」, 土木学会論文集 G (環境), vol. 74, no. 5, p. I_293-I_301, 2018.
- [19] 森口繁一, 「確率表現関数の検定について—Kolmogorov-Smirnov 検定を考え直す—」, 日本統計学会, vol. 25, pp. 233–244, 1995.
- [20] 吉見和紘, 山田正と山田朋人, 「確率過程論に基づいた降雨流出過程における不確実性評価の理論的枠組の提示」, 土木学会論文集 B1 (水工学), vol. 72, no. 4, p. I_1225-I_1230, 2016.
- [21] 吉見和紘, 山田正と山田朋人, 「確率微分方程式の導入による降雨流出過程における降雨の不確実性の評価」, 土木学会論文集 B1 (水工学), vol. 71, no. 4, p. I_259-I_264, 2015.

- [22] 吉見和紘, 辛島史嗣と山田正, 「降雨の不確実性に基づく確率過程論を導入した堤防の信頼性評価」, 土木学会論文集 G (環境), vol. 71, no. 5, p. I_1-I_6, 2015.

2. 統合的水害リスク評価手法に関する研究

第2章の概要 本章の目的は、大規模アンサンブル気候予測データを活用し、平常時及び緊急時のそれぞれの活用場面に応じた統合的水害リスクを評価することである。評価手法の構築にあたっては、従来のハザードを基本として情報に対し、暴露・脆弱性を含めた手法を提案するとともに、活用主体（住民、企業、自治体）及び活用目的（平常時の備え、緊急時の対応）に応じた情報提供を可能とする評価枠組みを提案した。平常時の評価では、家屋1戸あたりの被害額や被害軽減策の投資効果を定量的に評価する手法を構築し、大量アンサンブル気候データを用いた氾濫解析により、リスクカーブを作成した。これにより、住民が自らのリスクを“ジブンゴト”として捉え、適切な防災行動や対策選択を行うための情報提供の可能性を示した。次に、緊急時の評価では、気候予測データに基づく災害シナリオを活用し、自治体の避難情報発令判断を支援する手法を提案した。IDR4M システムを用いた自治体防災担当者を対象とした実証実験を通じて、未経験の災害に対する対応力の向上や、避難訓練・防災演習への有効性を明らかにした。

2.1. はじめに

2.1.1. 研究背景

水害リスクは、ハザード（降雨、流出、氾濫）、暴露（資産や人口の分布）、脆弱性（被害を受けやすさ）の3要素によって構成される。一方、従来の水害リスク評価は、行政的な治水計画への活用を主目的とした評価手法が用いられており、主にハザードの空間分布に焦点を当てた情報提供が中心であった。代表的な例として洪水ハザードマップが挙げられるが、これらは避難誘導や土地利用規制等、行政による判断を支援する目的で作成されている。そのため、個人や企業が水害対策を検討する際に必要となる、想定される被害額、対策に要する費用、対策の費用対効果といった情報は含まれていない。今後、流域治水の推進にあたっては、従来のハザード主体の情報に加え、暴露の設定や脆弱性を踏まえた水害リスクとしての情報が必要であると考えられる。

暴露や脆弱性を含めた水害リスク情報として、国土技術政策総合研究所では、内水・外水・高潮氾濫を対象とした25mメッシュ単位の統合的浸水リスク評価手法を開発している[1]。この研究では、建物用途別の資産鉛直分布や被害額の推定、立ち退き避難による人的被害の低減効果、さらには内外水氾濫の同時生起確率の評価等、多角的な視点からリスク評価が行われている。また、大規模アンサンブルデータを活用した水害リスク評価も実施されている[2]。これらの既往研究は、統合的リスク評価の高度化に向けた重要な知見を提供しているが、いずれも行政主導の計画策定や政策支援を主眼としている。そのため、個人や企業といった多様な活用主体に応じたリスク情報の評価、提示方法は確立されていない。

個人や企業による水害対策の推進にあたっては、活用主体や目的に応じたリスク情報の提供が求められる（図2.1）。平常時においては、住民や企業が自らの不動産や資産に対する浸水被害額を把握し、防災投資や保険加入等の意思決定を行うための情報が必要である。他方、緊急時には、自治体が避難指示や災害対応を判断するために、人命損失や避難困難性等を含むリスク情報が求められる。しかしながら、現行の評価手法では、これらの要素が統合的に扱われておらず、特に暴露や脆弱性に関する情報は限定的である。さらに、リスク情報の活用主体によって必要とされる情報の内容や精度が異なるにもか

かわらず，それらの違いが十分に考慮されていない．このような背景から，リスク情報の活用目的と主体に応じた評価手法の構築が必要である．

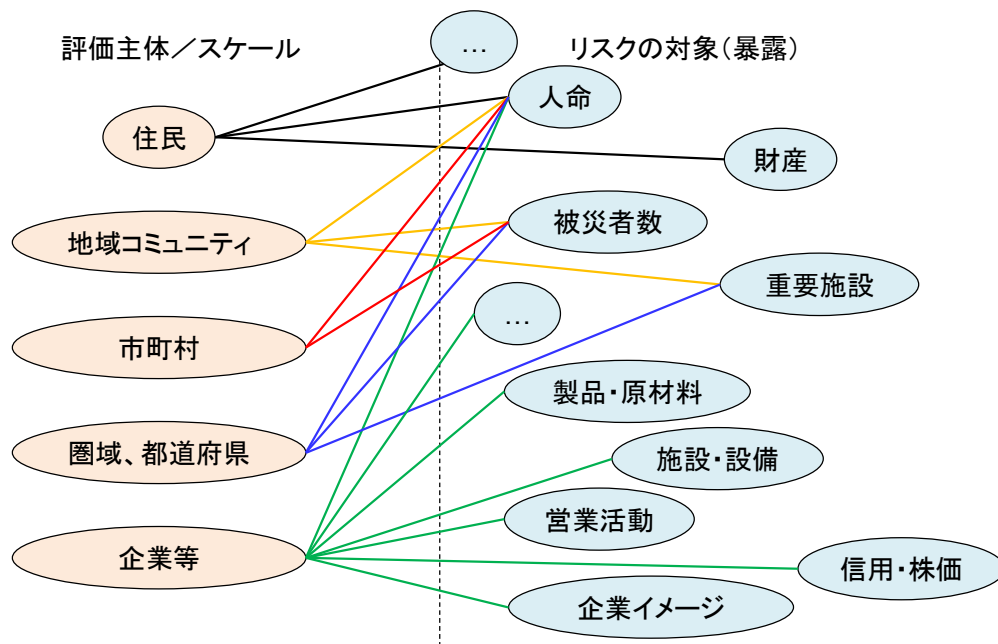


図 2.1 各主体にとってのリスクの対象（暴露）のイメージ

『北海道地方における流域治水のあり方』，北海道地方における流域治水のあり方検討会，令和 7 年 4 月より

2.1.2. 研究目的

本章における研究目的は，大規模アンサンブル気候予測データを活用し，平常時及び緊急時のそれぞれの活用場面に応じた統合的水害リスクを評価することである．評価手法の構築にあたっては，従来のハザードを基本として情報に対し，暴露・脆弱性を含めた手法を提案するとともに，活用主体（住民，企業，自治体）及び活用目的（平常時の備え，緊急時の対応）に応じた情報提供を可能とする評価手法を提案する．

2.2. 平常時の水害リスク評価

本節では、平常時の水害リスクとして、リスク情報の活用主体を住民や事業者とし、暴露を家屋一戸とした場合の水害リスク評価手法及び分析結果を示す。

2.2.1. 方法

本研究におけるリスク評価のフローを図 2.2 に示す。従来のハザード評価に基づいた洪水ハザードマップから得られる情報に対し、具体的な暴露の設定やその脆弱性の検討を組み込んでいる。さらに対策の検討、それらの効果や費用を踏まえた水害リスクを評価することで“ジブンゴト化”に資する情報の創出を図る。以下に、各手法の詳細を示す。

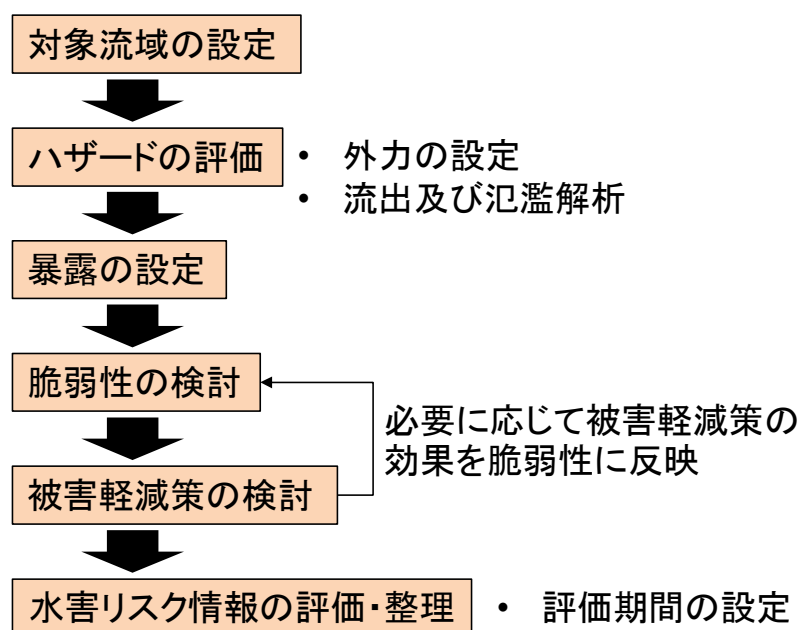
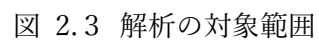


図 2.2 水害リスク評価のフロー

北海道東部に位置する十勝川水系を対象流域とした（図 2.3）。流域の中流部には帯広市や音更町、池田町といった市街地を分布しており、直轄河川からの氾濫が発生した場合には甚大な被害が想定される。平成 28 年北海道豪雨では、札内川で侵食による破堤が 2 箇所、音更川では堤防の侵食が 1 箇所発生した実績があり、十勝川の帯広観測所地点では計画高水位から -19cm となる既往最高水位を観測している。



2.2.1.2. ハザードの評価

降雨や台風に起因するハザードには、外水氾濫（直轄河川・中小河川）や内水氾濫、高潮や土砂災害等複数の現象がある（図 2.4）。本研究では、広域的かつ甚大な被害が想定される直轄河川からの外水氾濫を対象とするハザードとした。次に、暴露の被災形態に応じたハザードの指標を設定した。例えば、暴露の対象を家屋、被災形態を家屋倒壊とした場合には、流速等の流体力に関わる指標が必要となる。本研究では、後述の通り暴露の対象を家屋としている。過去の家屋の水害事例では浸水による人的及び資産の被害が多いことから、浸水深をハザードの指標として設定した。以下に、降雨の河川への流出、直轄河川からの洪水氾濫による浸水深の評価方法を示す。

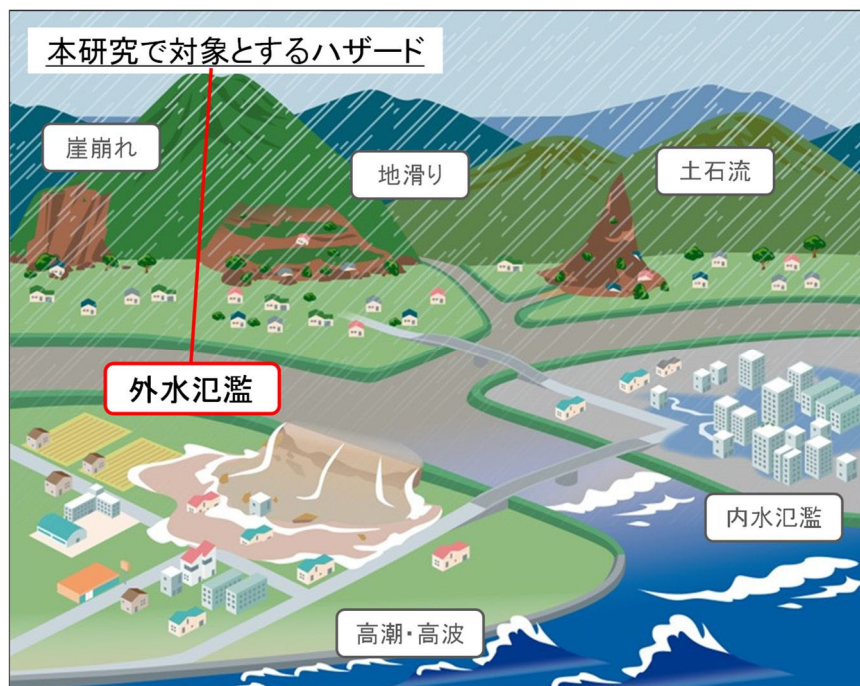


図 2.4 台風・降雨に起因するハザードの例

外力の設定

本研究では、物理モデルに基づいて作成された気象データを外力として用いた。具体的には、d4PDF（地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース）の水平解像度 20km のデータを、山田ら[3]が北海道領域を対象に水平解像度 5km までダウンスケーリングした気象データのうち、対象流域における降雨量データを用いている。また、解析対象とする降雨イベント数は、d4PDF が有する現在気候 60 年×50 アンサンブルのデータから抽出した、各年最大の降雨イベント 3000 ケースとした。

従来の洪水ハザードマップでは、ある特定の降雨外力・波形の条件を設定し、流出・氾濫解析により浸水深を評価している。外力規模は計画降雨規模（例えば 100 年に一度発生する規模）や想定最大規模とし、降雨波形は過去の実績降雨波形を用いる等の方法が用いられている。本研究では、d4PDF を用いることで、従来手法では対象としていない様々な降雨規模及び波形を想定したリスク評価が可能となる。また、年最大の降雨イベントを対象とした多数の流出・氾濫解析により、後述するリスク評価において年平均化した数値が整理可能となる。

流出及び氾濫解析

降雨から河川への流出は、木村の貯留関数法による流出解析結果[4]を用いた。モデルは、対象流域をいくつかの小流域に分割した流域モデルと河道モデルから構築されている。

河川からの氾濫は、洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）[5]に従って作成されたモデルにより評価した。氾濫解析モデルは、河川流量・水位を算定する河道モデル、河道内から堤内地の氾濫流量を算定する越水・決壊モデル、堤内地での氾濫流を計算する氾濫原モデルで構築されている。本研究における氾濫原モデルの水平解像度は 100m である。評価区間は対象流域における直轄管理区間（十勝川、利別川、札内川及び音更川）とし、氾濫発生条件は河川水位が計画高水位を達した場合とした。堤防決壊の評価地点は、各河川において約 200m 間隔で設定した。同一降雨イベントで複数の堤防決壊地点が生じる場合、各メッシュの浸水深は各降雨イベントの浸水深のうち最大値を当該メッシュの浸水深として採用した（洪水ハザードマップ作成時における最大包絡の考え方と同様）。流出・氾濫解析モデルは、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部より提供を受けたものである。

2.2.1.3. 暴露の設定

暴露の対象は、氾濫原に含まれる多様な施設や設備が想定される。例えば、市役所等の公共施設、病院や学校等の重要施設、スーパーや工場等の商業施設、農地や農機具等の農業関連施設・設備、道路・鉄道、水道、電気等のライフラインに関わる設備が挙げられる。本研究ではリスクの活用主体を住民とし、洪水時の被害として最も関心が高いと考えられる住宅を暴露の対象とした。資産額等については、北海道において一般的な2階建ての木造戸建ての家屋を仮定した。

従来の治水経済調査マニュアルはメッシュ内に含まれる全体資産に対する被害額の総計となっている。一方、水害リスクの“ジブンゴト化”に向けては、従来の被害額の総和よりも、個人単位の被害額を示した方が効果的な情報になると考えられる。そこで、本研究はメッシュ内に家屋があった場合に発生する1戸あたりの被害額を算定した（図 2.5）。

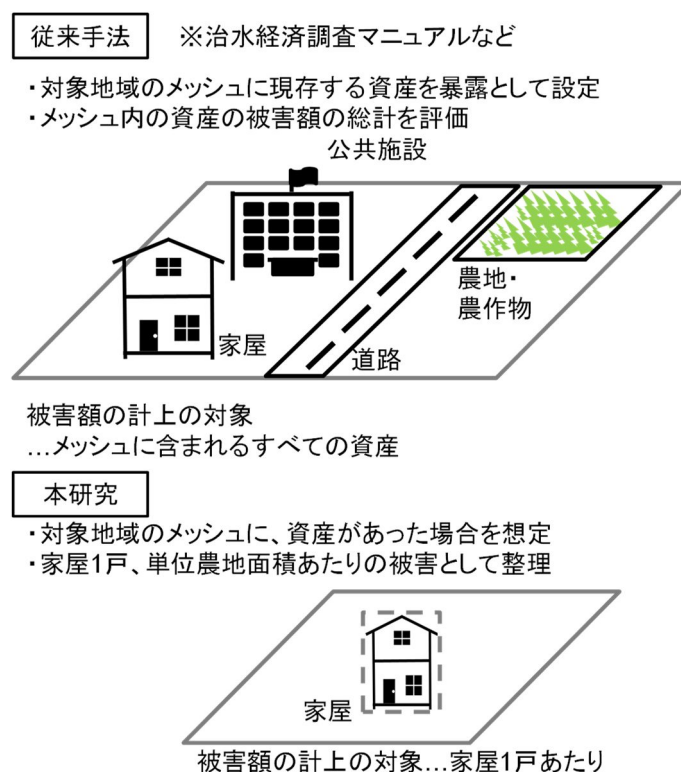


図 2.5 本研究における暴露の考え方

2.2.1.4. 脆弱性の検討

脆弱性は、家屋の浸水に対する被害の関係として整理した。図 2.6 に設定した浸水深と家屋被害額の関係を示す。既往研究[6]では、2 階建ての木造戸建ての家屋を対象に、家屋 1 戸あたりの建築費用に家屋の構造部位別の価格構成比を乗じ、浸水深に応じた家屋被害額を整理している。本研究においても、北海道の平均的な家屋 1 戸の建築費用 2,334 万円から、既往研究[6]の考え方に基づき、浸水深と家屋被害額の間関係を整理した。

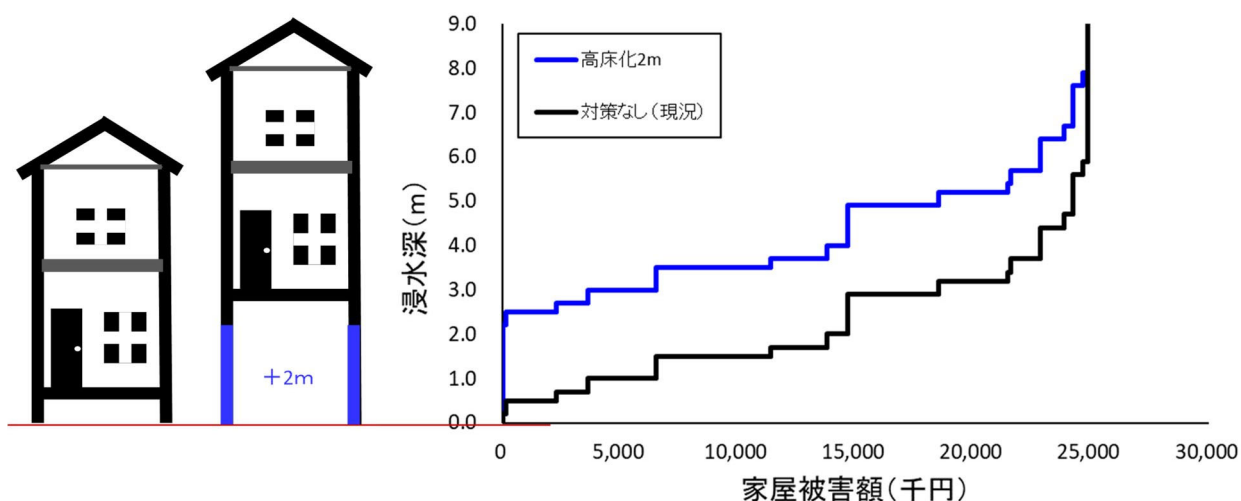


図 2.6 浸水深と家屋被害額の関係

2.2.1.5. 被害軽減策の検討

家屋の浸水による被害軽減策は、浸水を防ぐ対策として敷地の嵩上げや防水壁の設置、建物の防水化、被害を最小限にする対策として修復の容易化等、様々な対策が挙げられる。本研究では、浸水を防ぐ対策の一つである基礎の嵩上げ(高床化)を評価対象の被害軽減策とした。図 2.6 に高床化のイメージと、高床化実施後の脆弱性(浸水深と家屋被害額の間関係)を示す。高床化の高さは2mとした。対策実施による投資効果を算定するため、高床化に掛かる費用を設定した。具体的には、標準よりも90cm基礎を高くしたときに約210万円の費用を要する[6]とされていることから、高床化2mで約466万円(210万円/90cm)を対策費用として設定した。

2.2.1.6. 評価・整理

水害リスクは、各イベントの発生確率と被害額の関係（リスクカーブ）から算定した。具体的には、各メッシュにおいて以下①～④の整理を行った。

- ① 降雨イベント毎に浸水深に対応した家屋の被害額を算定。
- ② 降雨イベント 3000 ケースの浸水深を降順に並べ、順位統計を用いて発生確率に変換。ここでは対象とした降雨イベントを起こり得る事象の母集団と仮定している。（例えば、30 番目に浸水深が大きな事象は、 $30/3000$ =発生確率 1/100 の事象となる。）
- ③ 発生確率を縦軸、家屋被害額を横軸とし、各降雨イベントをプロット。
- ④ プロットで囲まれた範囲を積分し、年平均被害額を算定。

本研究では各メッシュにおける現況及び被害軽減策として高床化 2m を実施した場合の年平均被害額を算定し、両者の差分から対策効果にあたる被害軽減期待額を算出した。図 2.7 にリスクカーブを用いた各指標の算定イメージを示す。また、評価期間における家屋被害軽減期待額（B）と被害軽減策に掛かる費用（C）の関係から、対策への投資効果（B/C）を評価した。評価期間は、住民にとって関心の高い期間として、一般的な住宅ローンの返済期間に相当する 30 年間とした。

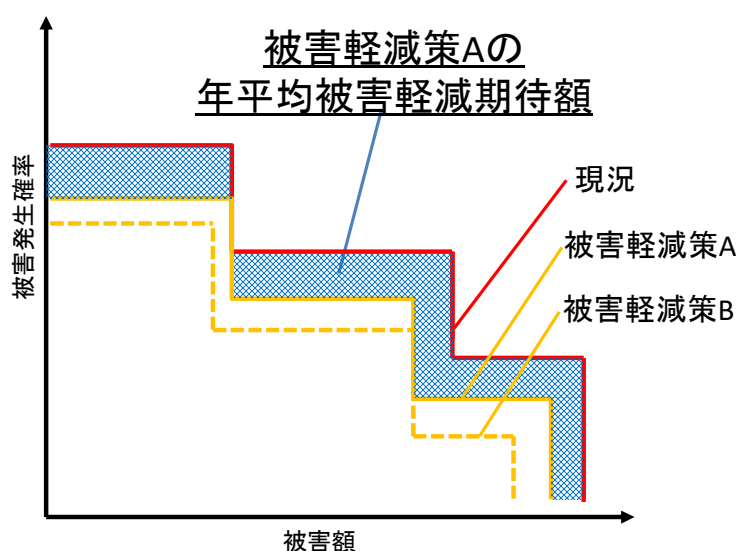


図 2.7 リスクカーブに基づく被害額の算定イメージ

2.2.2. 結果

本研究で提案したリスク評価手法を実河川流域に適用し、提案手法による水害リスク評価の結果から得られる情報について考察を行った。

2.2.2.1. 平面図による分析

対策なしの家屋1戸あたりの被害額を図2.8、高床化2mの家屋1戸あたりの被害額を図2.9に示す。図2.8、図2.9より、現在家屋を所持している住民にとっては居住地の水害リスク、引越しを考えている住民にとっては転居候補地の水害リスクが確認できる。また、図2.8、図2.9の比較により、高床化2mを実施した場合の被害軽減効果が把握可能となる。高床化2mの実施により家屋被害額が軽減する地域の住民にとっては、高床化が対策手段の1つとして有効となる。一方、高床化しても依然として家屋被害額が大きい地域の住民にとっては、水害保険への加入や家屋の耐水化等高床化以外の対策が有効となる。

高床化2mへの投資効果(B/C)を図2.10に示す。図2.10より、高床化2mが投資効果の観点から有効かどうか把握可能となる。また、図2.9との比較により、高床化により被害額が小さくなる一方で、投資効果も小さい地域が確認できる。これらの地域は、想定される浸水深が低いため、対策未実施の場合でも家屋被害額が小さく、対策による投資効果が得られない地域と解釈できる。住民にとっては、高床化以外の対策を選択肢にする等投資効果の観点で自分に適した対策検討が可能となる。

以上のように、家屋1戸あたりの被害額や被害軽減効果、対策への投資効果といった情報は、個人の対策検討に資する情報になると考えられる。

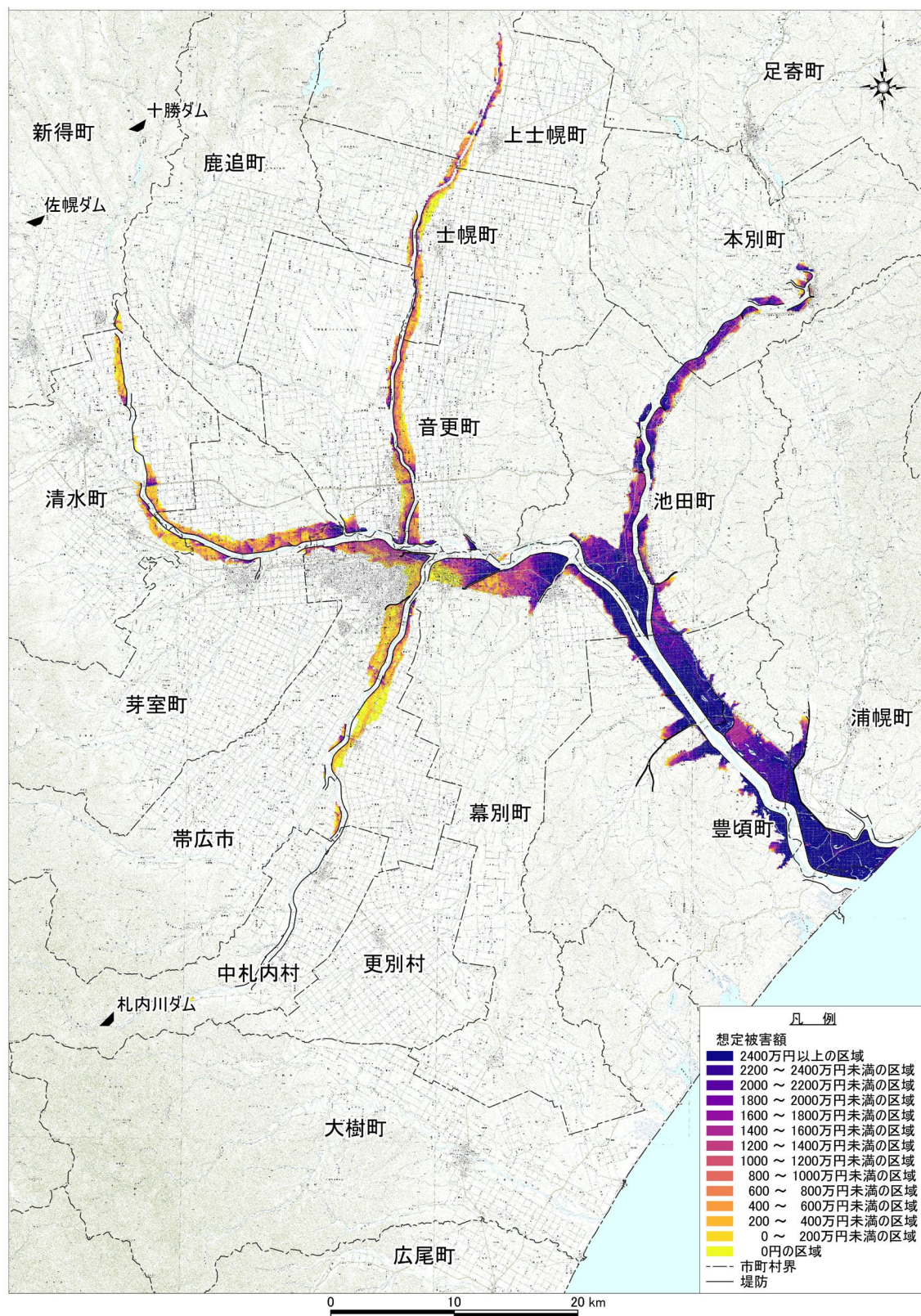
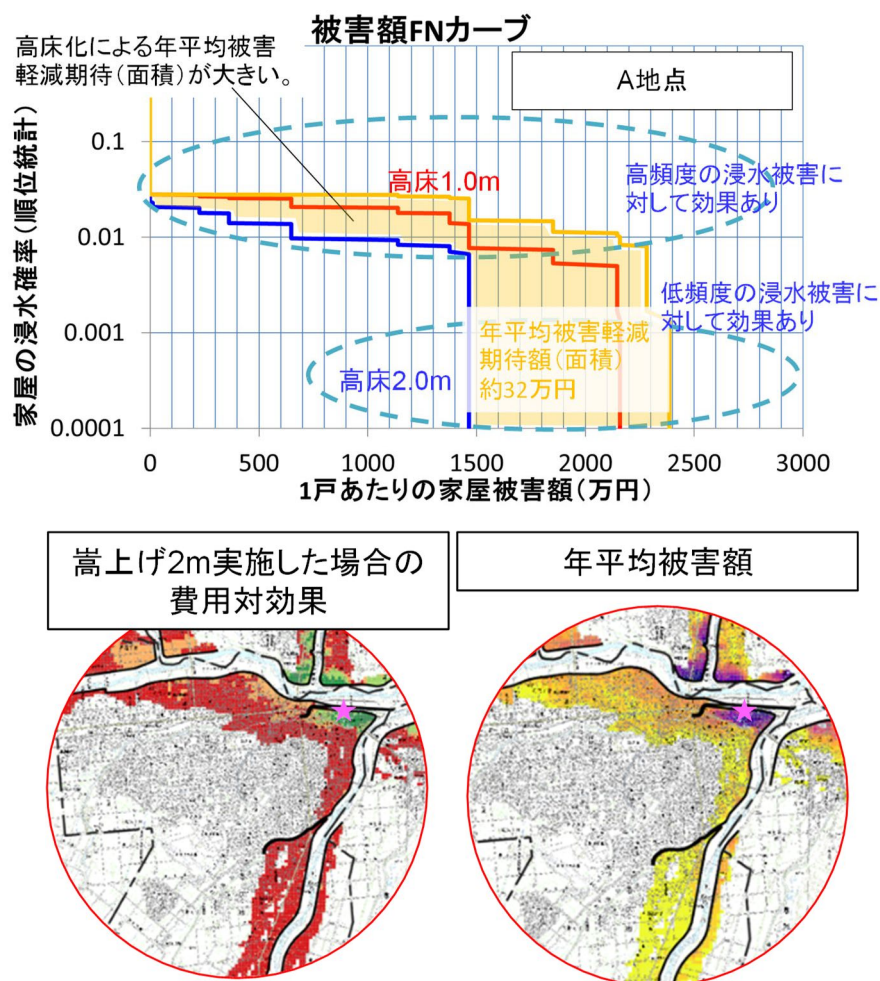


図 2.8 対策未実施の場合の家屋 1 戸あたりの被害額

2.2.2.2. リスクカーブを活用した分析

リスクカーブを活用した分析例として、投資効果が1を超えた2地点のリスクカーブを図2.11に示す。図2.11上図のリスクカーブより、A地点においては、高床化による被害額の低減効果を高・低頻度のどちらの浸水被害に対しても確認できる。一方、図2.11下図のリスクカーブより、B地点においては、高床化による被害額の低減効果は高頻度の浸水被害に対してのみ表れている。また、対策後の残被害額が大きく、高床化2mの対策を実施したとしても水害リスクが依然として高い状況となっている。このように、リスクカーブを用いた分析により被害軽減策の効果が得られる洪水規模を把握することが可能となる。また、適切な対策検討には、投資効果に加えて残被害も踏まえた分析が重要であることを示唆された。



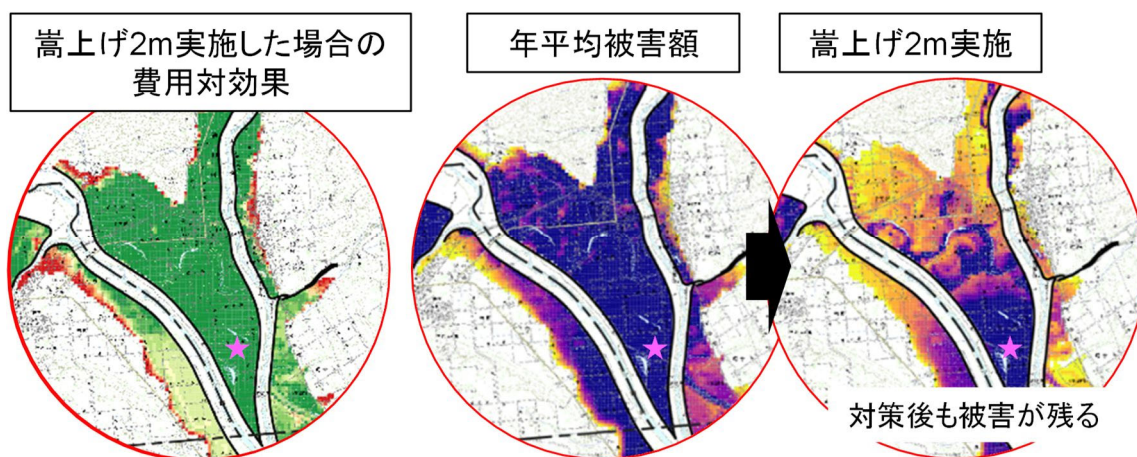
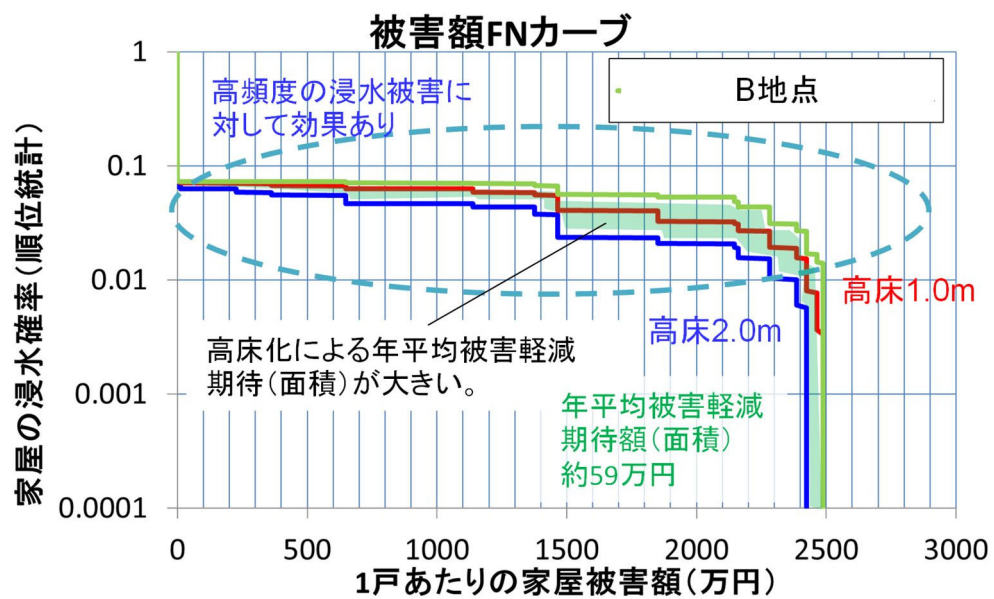


図 2.1 2 リスクカーブを活用した分析例 (十勝川利別川合流点付近)

2.2.3. まとめ

本節では、平常時の水害リスクとして、リスク情報の活用主体を住民や事業者とし、暴露を家屋一戸とした場合の水害リスク評価手法及び分析結果を示した。本研究では、計算メッシュに家屋があった場合に発生する1戸あたりの被害を評価した。これにより、現況資産分布に依存しない、流域内の水害リスクの分布が把握可能となった。また、大量アンサンブルデータを用いた氾濫解析により各メッシュにおける浸水深-被害額曲線（リスクカーブ）を作成した。これにより、年平均被害額の評価、各地点における浸水深と被害額関係の特徴が分析可能となった。加えて、被害軽減策を設定し、その対策費用と被害軽減期待額から投資効果を分析した。リスクカーブと組み合わせた分析により、投資効果が得られる適応策やその実施レベルの検討が可能となった。今後、提案手法によるリスク情報に基づいた住民や企業等とのリスクコミュニケーションを通じた“ジブンゴト化”と被害軽減の効果検証が望まれる。

2.3. 緊急時の水害リスク評価

本節では、緊急時の水害リスクとして、リスク情報の活用主体を自治体とし、暴露を住民とした場合の水害リスク評価手法及び分析結果を示す。

なお、本研究は内閣府総合科学技術・イノベーション会議が統括する第2期戦略的イノベーション創造プログラム国家レジリエンス(防災・減災)の強化(SIP 国家レジリエンス)のうち、市町村災害対応支援統合システム(IDR4M)の開発として、北海道大学を中心とした産官学の治水及び防災分野の研究・協力機関の協働による、IDR4M の社会実装に向けた実証実験の中で進められたものである。後述するIDR4M は九州大学を中心とした研究機関により開発された自治体の災害対応時の避難情報の発令判断を、システムが提供する情報により支援するもの[7]である。本システムの特徴は、気象庁から提供される降雨や気象警報、河川管理者からの河川水位や水防警報等の観測・警戒情報、これらの情報に基づいて予測された洪水ハザード及び氾濫リスク、判断支援といった情報がリアルタイムに提供される“通常モード”に加えて、システムの様々な調整を目的とした“学習モード”が存在する点である。学習モードは、既往の出水時の気象状況・河川水位等を予めシステムに格納することで、過去の災害時の災害対応の振り返りやそれらを想定した訓練が実施可能となる。

2.3.1. 方法

2.3.1.1. 対象地域

北海道東部に位置する帯広市街地を対象とした(図 2.1 3)。帯広市は、北海道における IDR4M の実証実験のモデル地域の一つである。人口は、約 16 万人である。帯広市街地は国直轄管理河川である十勝川と札内川の合流点付近に位置している。市街地内を帯広川や新帯広川といった中小河川が流下している。当該地域では、平成 28 年 8 月の前線と台風 10 号による降雨により、内水氾濫の発生、十勝川及び札内川での水位上昇に伴い、避難指示が発令された実績がある。

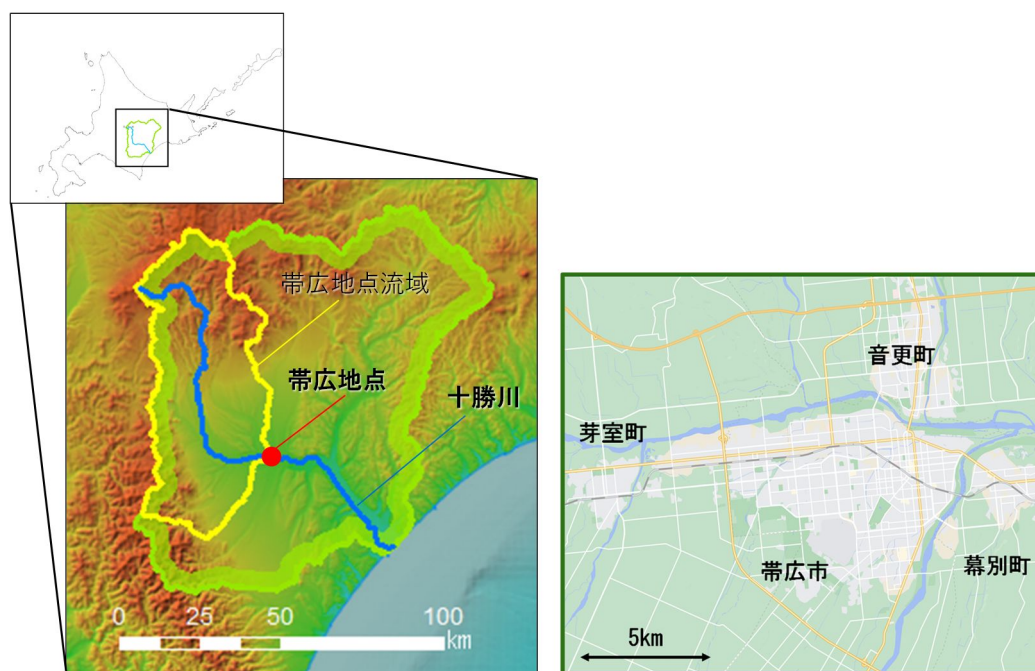


図 2.1 3 対象地域

2.3.1.2. 降雨シナリオの選定

降雨シナリオは、d4PDF が提供する領域 20km モデル（以下、RCM20）を用いて、領域 5km モデル（以下、RCM5）に力学的ダウンスケーリングされたモデル出力値から選定した。RCM5 は、平成 29 年度地球シミュレータ特別推進課題（成果創出加速）のうち、「北海道における気候変動による洪水リスク変化の評価」で作成されたモデル[3]である。RCM20 は、過去実験 60 年（1951～2010）×50 メンバの合計 3000 年、4℃昇温時を想定した将来実験 60 年（RCP8.5 シナリオ 2090 年相当）×海面水温 6 パターン×15 メンバの合計 5400 年分の実験データを有している。力学的ダウンスケーリングは、RCM20 における各年の最大降雨の発生期間を対象にダウンスケーリングが実施されており、RCM5 は過去実験で 3000 事例、4℃昇温を想定した将来実験で 5400 事例の年最大降雨のデータセットとなっている。このデータセットの中から、災害シナリオの作成対象とする降雨事例として、将来実験の海面水温パターンが MIROC5 (MI)、アンサンブルメンバーが m103、実験年が 2056 年の降雨（ケース名：HFB_MI_m103_2056）を選定した。当該ケースは、台風による降雨イベントであり、その経路が平成 28 年に北海道に上陸した台風 10 号と類似のケースである。

2.3.1.3. 河川水位及び氾濫データの作成

選定した降雨シナリオに基づき、河川水位データと氾濫（浸水深）データを作成した。各データの作成は、他河川での災害シナリオ作成や複数の災害シナリオの作成が容易となる手法の検証に重点を置き、河川計画の策定や浸水想定区域図作成にあたり構築された既存のモデルを活用する方法としている。以下に各データの作成方法を示す。

河川水位データ

河川水位データは、降雨シナリオが有する降雨量データを入力値とした流出解析に基づき作成した。流出解析は木村の貯留関数法を用いた。流出モデルは、対象流域をいくつかの小流域に分割した流域モデルと河道モデルから構築されている。流出モデルへの入力値は、選定した降雨シナリオ（HFB_MI_m103_2056）が有する降雨量データを流域モデルの小流域毎の流域平均値として整理したものとした。流出解析により算出された時系列流量データを H-Q 式により水位に換算し、時系列の河川水位データを作成した。河川水位データの整理地点は、十勝川及び札内川が帯広市街地と隣接して流下する区間のうち、水位流量観測所が設置されている十勝川帯広地点（KP56.70）及び芽室太地点（KP71.10）、札内川札内地点（KP4.00）とした。流出モデル及び H-Q 関係式は、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部より提供されたものを使用した。



図 2.1 4 水位データ作成地点

氾濫データ

氾濫データは、降雨シナリオが有する降雨及び前項で整理した河川流量データを入力値とした氾濫解析に基づき作成した。氾濫解析の対象とする河川は、十勝川及び札内川に加えて、市街地内部を流下する帯広川、新帯広川を対象とした。

十勝川及び札内川の氾濫解析モデルは、河川流量・水位を算定する河道モデル、河道内から堤内地の氾濫流量を算定する越水・決壊モデル、堤内地での氾濫流を計算する氾濫原モデルで構築されている。河道モデルでは区間上流端に前項で算出された時系列流量データを入力値とし、一次元不定流解析により約 200m 間隔での水位を算定した。水位が破堤条件に達した地点を対象に、越水・決壊モデルにより氾濫流量を算定した。横越流公式は、栗城等の式を用いている。氾濫原モデルは破堤点からの氾濫流量に基づき、平面二次元不定流解析により堤内地における浸水深を算出した。氾濫原モデルの水平解像度は 100m である。本モデルは、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部より提供を受けたものであり、洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）[5]に従って作成されたものである。

帯広川及び新帯広川の氾濫解析には、河川氾濫シミュレーションソフト iRIC (International River Interface Cooperative)の氾濫流の解析が可能なソルバーNays2DFlood を用いた。上流端の境界条件は、各河川における整備計画規模の降雨量における流量ハイドログラフとした。モデルの水平解像度は 10m である。本モデルは、北海道帯広建設管理部より提供を受けたものである。

氾濫解析により得られた時系列の浸水深データは、IDR4M の洪水ハザードのメッシュに GIS ソフト上で投影し、水平解像度 250m のデータとして整理した。IDR4M 上のメッシュの浸水深は、氾濫解析モデルのメッシュの占有面積による加重平均値とした。また、各河川、破堤地点別の氾濫解析結果の重ね合わせを行い、浸水深の最大値を氾濫データとして整理した。

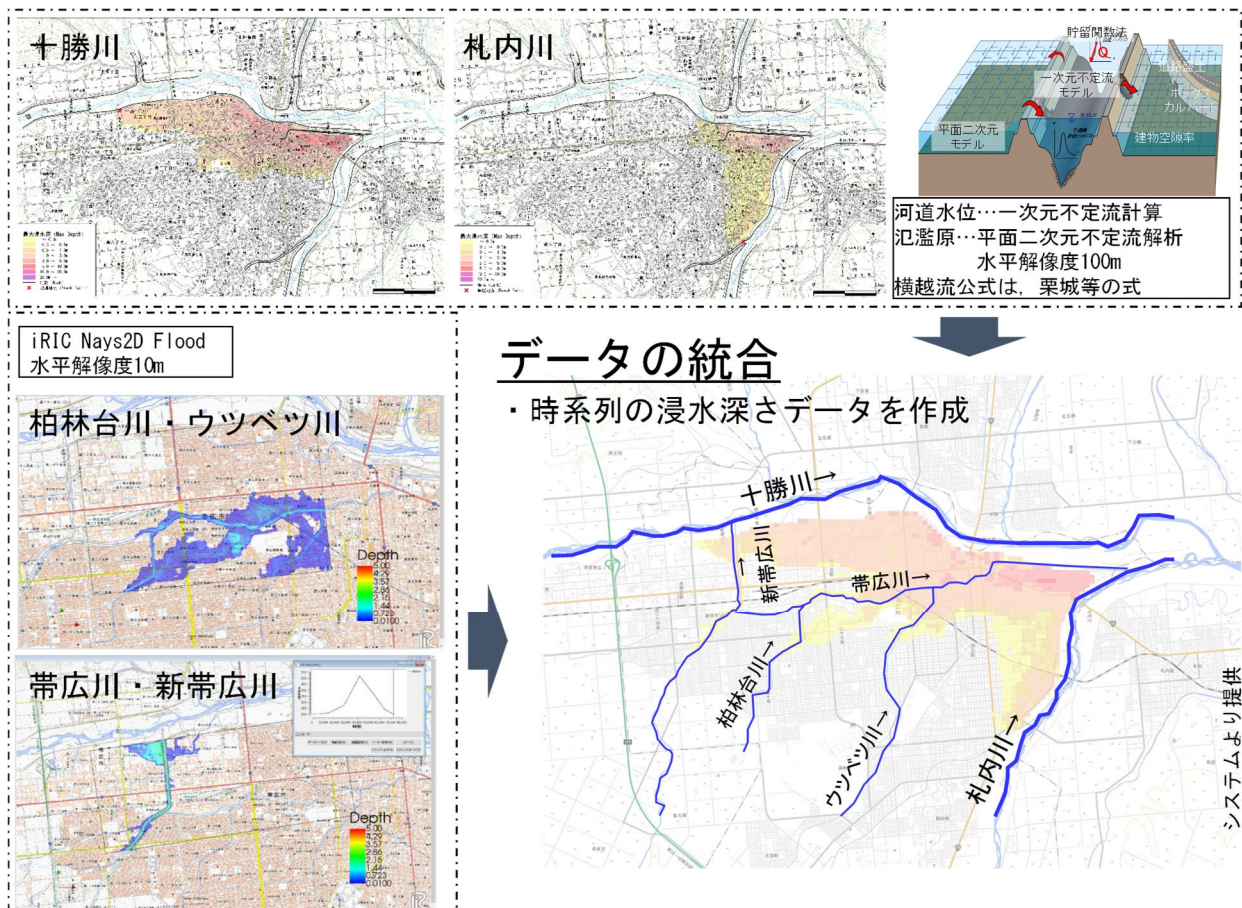


図 2.15 氾濫解析実施河川と統合イメージ

2.3.2. 結果

2.3.2.1. IDR4M での災害シナリオの表示結果

作成した災害シナリオは所定のデータ形式に変換し、IDR4M に格納した。IDR4M は WEB ブラウザで操作・閲覧ができる仕様となっている。以下に、災害シナリオとして整理した各種データを WEB ブラウザ(Google Chrome)で表示させた結果を示す。

降雨データ

降雨シナリオにおける 2056 年 8 月 17 日 9:00 時点の降雨分布を図 2.1 6 に示す。図 2.1 6 より、帯広市街地では 5～10mm/h 程度、日高山脈沿いでは 30～50mm/h の降雨となっている。IDR4M では現在時刻から 6 時間先までの情報が表示される仕様となっている。リアルタイムの情報を示す通常モードでは、1 時間先までは高解像度降水ナウキャスト（水平解像度 250m）、その後の 6 時間先までは降水短時間予報（水平解像度 1km）が表示される。

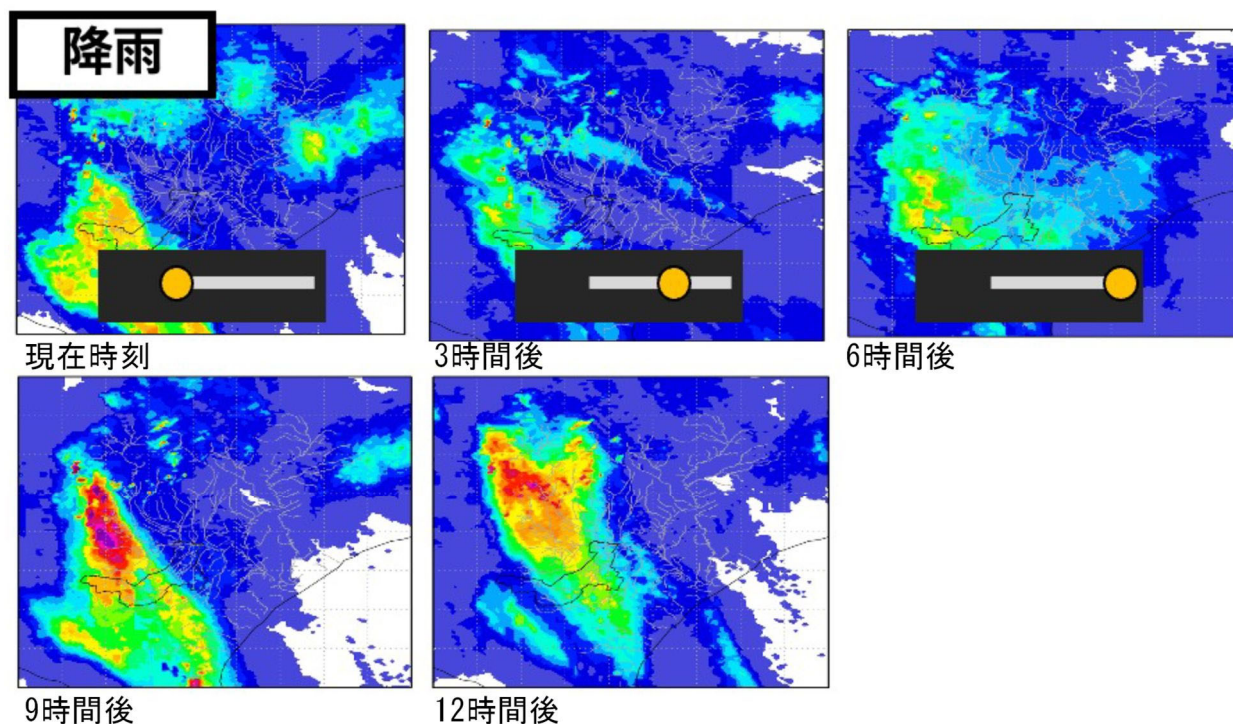


図 2.1 6 IDR4M における降雨量の表示例

河川水位データ

流出解析に基づき整理した十勝川帯広観測所地点における水位グラフを図 2.1 7 に示す。図 2.1 7 は縦軸が水位 (m)、横軸は時間 (h) であり、2056 年 8 月 17 日 9:00 時点までの水位の経過を示している。リアルタイムの情報を示す通常モードでは、国土交通省が管理する川の防災情報で公開されている河川水位の情報が表示される。

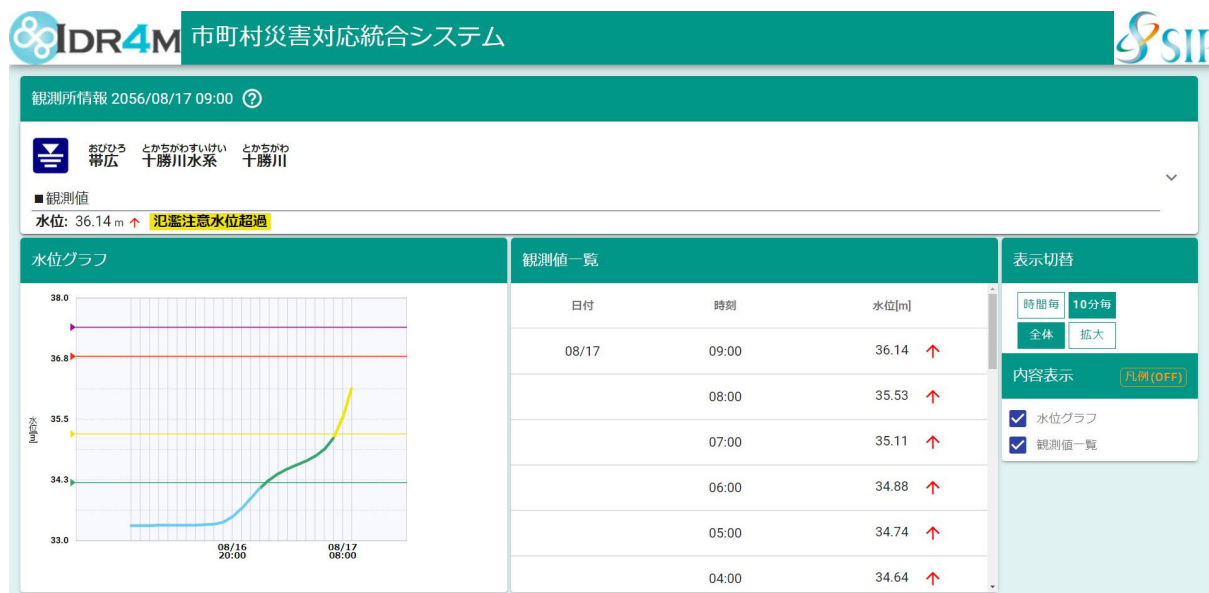


図 2.1 7 IDR4M における河川水位の表示例

氾濫データ

氾濫解析に基づき整理した帯広市街地周辺における洪水ハザードを図 2.18 に示す。図 2.18 は、2056 年 8 月 17 日 9:00 を現在時刻とし、その後の 3 時間先、6 時間先の洪水ハザードを表示したものである。現在時刻では、帯広川・新帯広川周辺での氾濫が発生しており、その 3 時間後では十勝川、札内川の一部地点で堤防決壊が発生している。その 6 時間後にはさらの多くの地点で破堤し、氾濫が広範囲に広がる状況が確認できる。リアルタイムの情報を示す通常モードでは、現状及び今後の河川水位予測から破堤のリスクが高い地点を破堤地点として選定し、既存の浸水想定区域図や地形等から AI 予測により浸水深や氾濫範囲が表示される。

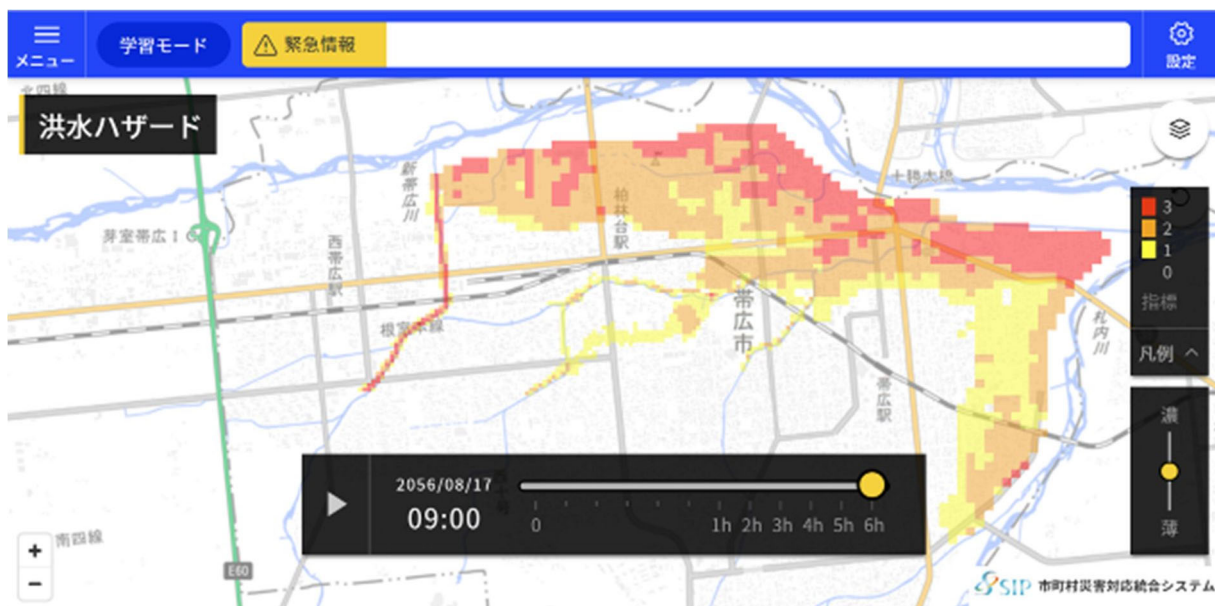
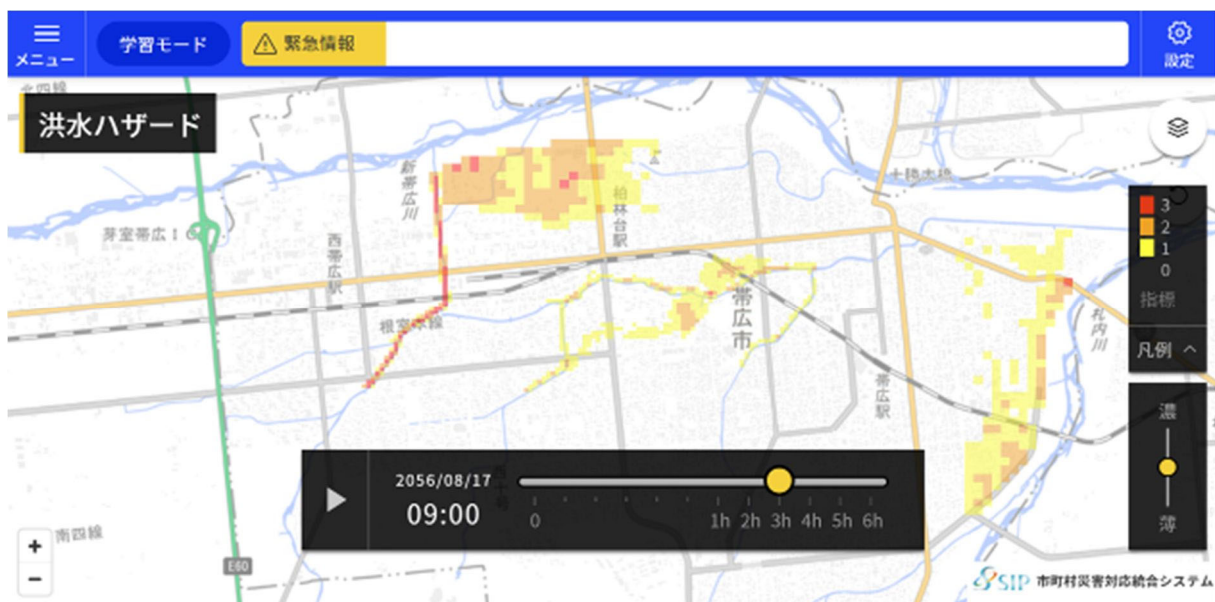
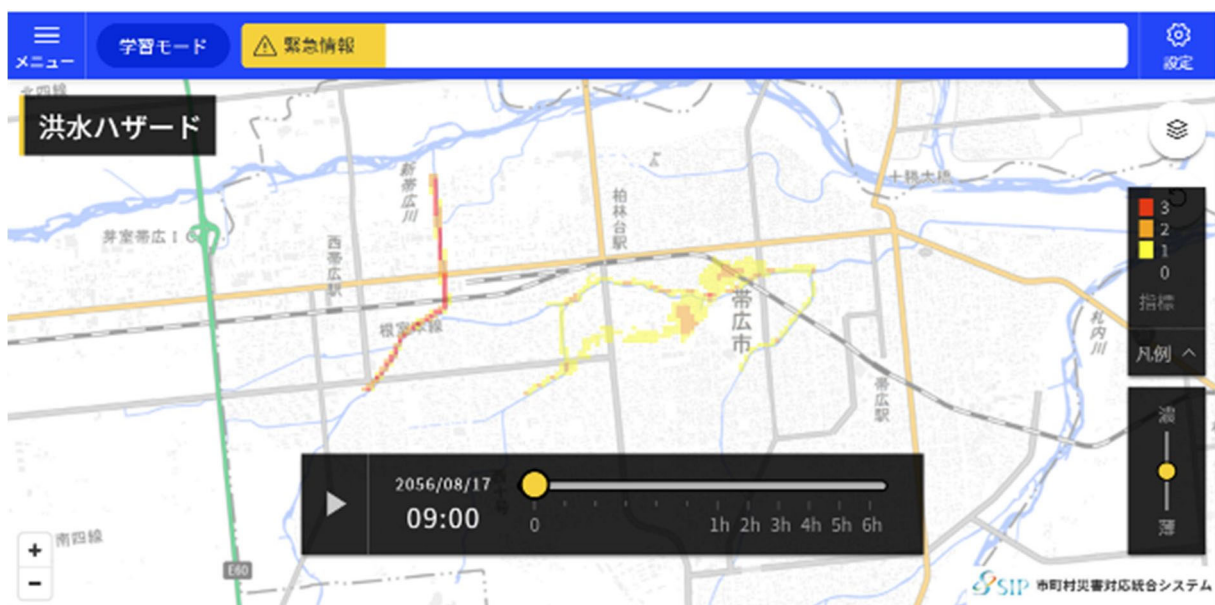


図 2.18 IDR4M における洪水波ハザード（浸水深・範囲）の表示例

地域の脆弱性

IDR4M では、対象地域のシステム構築時に予め地域の脆弱性が設定されている。図 2.1 9 は帯広市における地域の脆弱性を表示したものである。地域の脆弱性は各メッシュにおける高齢者人口や避難所からの距離に基づき算出されている。

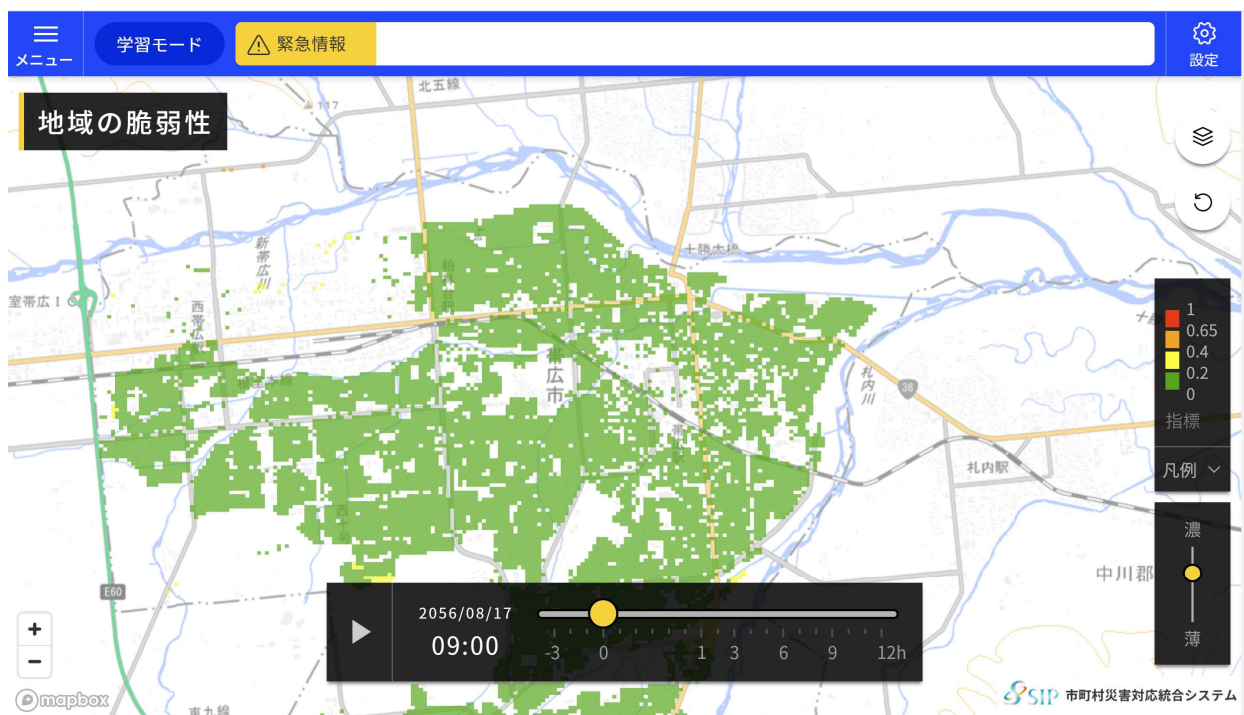


図 2.1 9 IDR4M における地域の脆弱性の表示例

リスク情報

IDR4M では、洪水ハザードと予め設定された地域の脆弱性に基づき災害の発生リスクが提供される。図 2.2 0 は、2056 年 8 月 17 日 9:00 を現在時刻とし、その後の 6 時間先の災害発生リスクを表示したものである。十勝川近傍や十勝川と札内川の合流点付近で災害発生リスクの高いメッシュが確認できる。

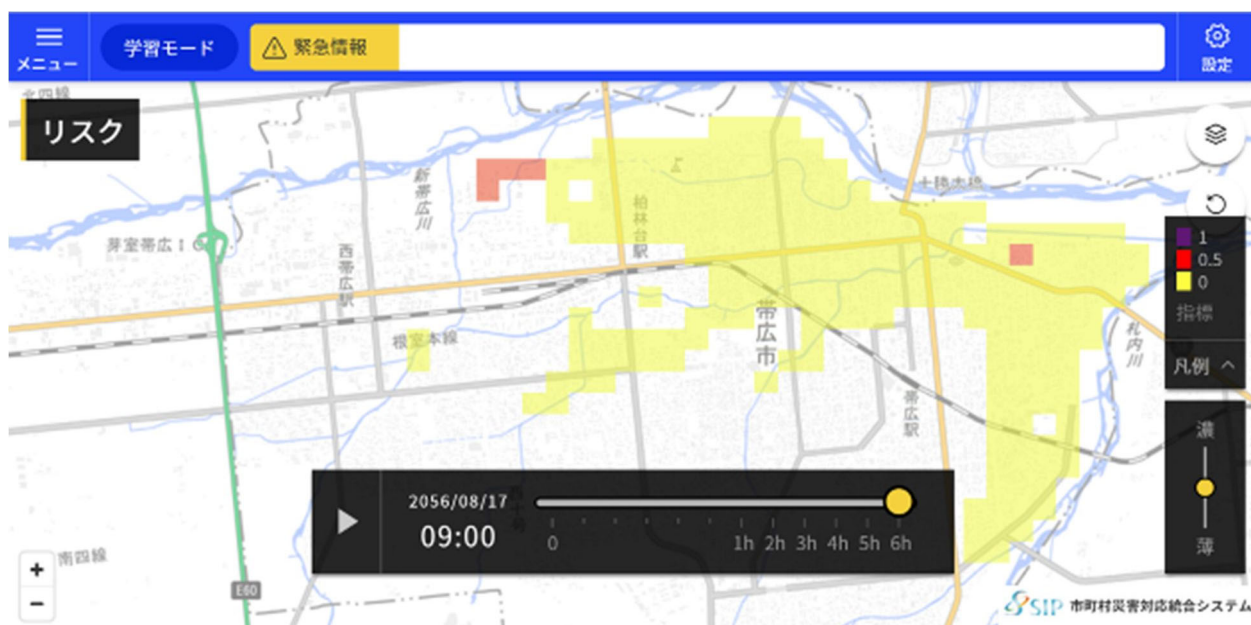


図 2.2 0 IDR4M におけるリスクの表示例

判断支援情報

IDR4M から提供される避難情報の発令に関する判断支援の情報を図 2.2 1 に示す。図 2.2 1 は、2056 年 8 月 17 日 9:00 を現在時刻とし、その後の 6 時間先の避難判断情報を表示したものである。判断支援の情報は、リスク情報に基づき算定され、“避難”、“準備”、“注意”の 3 段階の指標で提供される。また、情報は対象の自治体の避難情報の発令地区単位で提供される。図 2.2 1 では、一部の地区で避難の準備を促す、判断支援情報が表示されている。

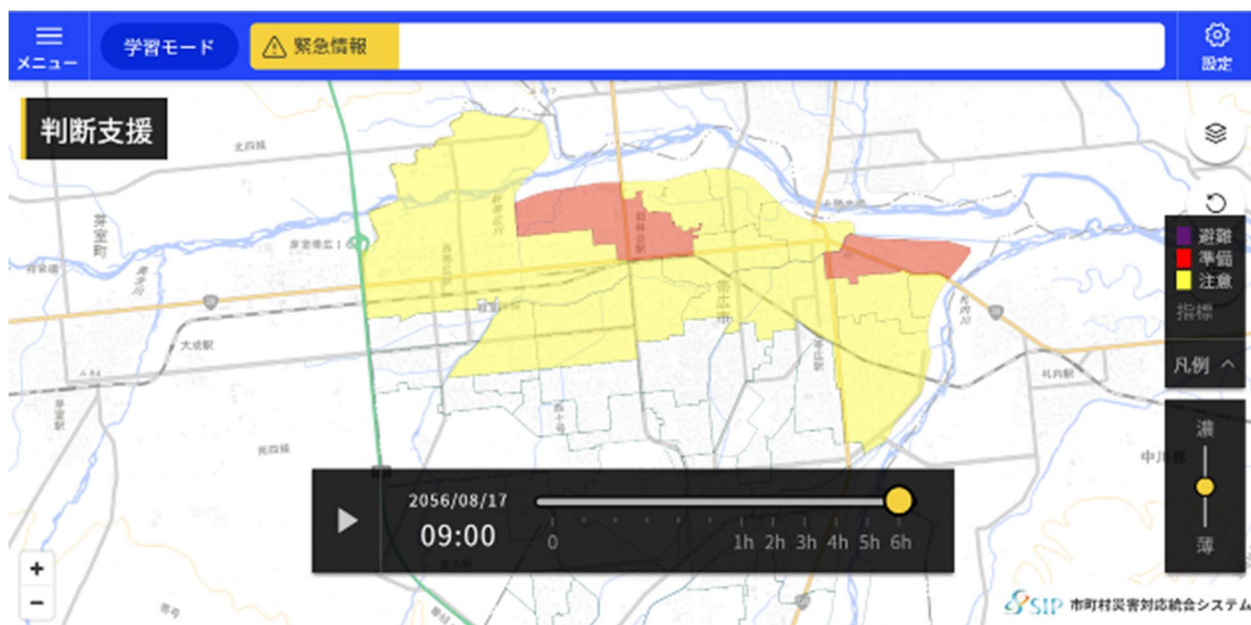


図 2.2 1 IDR4M における避難判断支援情報の表示例

2.3.2.2. 災害シナリオの活用に向けた実証実験

緊急時における水害リスク情報としては、人命に関わる人的な被害の発生有無が重要な情報となる。暴露及び脆弱性に関し、人的被害を効果的に低減させる方策として、災害時の的確な避難情報の発令、確実な避難の実施が挙げられる。気候変動が進行する状況下で、これらの方策を推進する上での問題として、これまで災害対応経験が乏しい地域においても避難情報の発令判断に迫られる状況が想定される。また、降雨の時空間分布パターンの変化等に起因する、これまで未経験の災害への対応が必要となる。これらの問題に対する解決策の一つとして、気候予測データに基づく災害シナリオを活用し、避難訓練や防災対応演習の実施することが有効と考えられる。以上を踏まえ、本研究では気候予測データに基づく災害シナリオを活用した避難訓練や避難情報の発令判断の模擬訓練を実施した。

模擬訓練は、2022 年 6 月に十勝管内の協力自治体の防災担当者の協力により実施した。作成した災害シナリオを IDR4M 上で提示し、災害シナリオを活用した避難情報の発令判断に関する演習や避難訓練についての意見交換を行った。ある自治体では、防災担当者が過去の大雨や地震の事例を参考に災害シナリオを作成し、避難訓練を実施しているとのことであった。一方、この場合未経験の降雨に対して対応可能か課題があるとの意見が聞かれた。これに対して、大量アンサンブル実験による気候変動予測データに基づく災害シナリオを訓練に活用することで、これまで経験したことのない災害への対応や様々な降雨シナリオを想定した避難情報の発令判断をシミュレーションが可能となる点が期待される。

2.3.3. まとめ

本節では、緊急時の水害リスクに関して、リスク情報の活用主体を自治体、暴露対象を住民とした場合の水害リスク評価手法と、自治体災害支援システム IDR4M における災害シナリオの表示結果について示した。大量のアンサンブル気候変動予測データを用いて、対象地域における降雨・流出・氾濫の各現象を物理計算に基づいて再現し、災害シナリオを作成した。災害シナリオの作成にあたっては、流出解析及び氾濫解析に既存のモデルや計算結果を活用可能な手法を採用し、他河川への展開や多数のシナリオ作成に対応できる柔軟性を確保した。今後は、気候予測データに基づく災害シナリオを活用した災害対応演習や避難訓練を協力自治体と連携して実施し、これらの訓練を通じて自治体の防災対応力向上に対する有効性を検証する必要がある。

2.4. 第2章のまとめ

本章では、大規模アンサンブル気候予測データを活用し、平常時及び緊急時のそれぞれの活用場面に応じた統合的水害リスク評価を行った。評価手法の構築にあたっては、従来のハザード情報を基本としつつ、暴露・脆弱性の要素を加味した手法を提案するとともに、活用主体（住民、企業、自治体）及び活用目的（平常時の備え、緊急時の対応）に応じた情報提供を可能とする評価手法を構築した。

平常時の評価では、住民を主な活用主体とし、家屋1戸あたりの被害額や被害軽減策の投資効果を定量的に評価する手法を構築した。大量アンサンブル気候予測データを用いた氾濫解析により、浸水深と被害額の間関係をリスクカーブとして可視化し、年平均被害額や被害軽減期待額、対策費用との比較による投資効果の分析を行った。これにより、個人が自らのリスクを“ジブンゴト”として捉え、適切な防災行動や対策選択を行うための情報提供の可能性を示した。

緊急時の評価では、自治体を主な活用主体とし、気候予測データに基づく災害シナリオを活用した避難情報の発令判断支援手法を提案した。IDR4M システムを用いた実証実験を通じて、未経験の災害に対する対応力の向上や、避難訓練・防災演習への応用可能性を示した。

これらの成果は、気候変動の顕在化に伴い多様化・複雑化する水害リスクに対して、活用主体や目的に応じた水害リスクの評価手法と情報提供のあり方を示すものであり、今後の自治体による防災・減災政策や、個人・事業者による取り組みによる地域防災力の向上に寄与することが期待される。

References

- [1] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 「気候変動下の都市における戦略的水害リスク低減手法の開発」. 2019 年 7 月.
- [2] 北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会, 「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会 中間とりまとめ」. 2022 年.
- [3] 山田朋人ほか, 「北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化」, 河川技術論文集, vol. 24, pp. 391–396, 2018.
- [4] 舩屋繁和ほか, 「実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく将来気候下での降雨の時空間分布について」, 河川技術論文集, vol. 25, pp. 55–60, 2019.
- [5] 「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第 4 版）」. 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室, 国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室, 2017 年.
- [6] 木内望ほか, 「木造戸建て住宅の耐水化建築計画案の検討及びその費用対効果からみた評価」, 日本建築学会技術報告集, vol. 27, no. 65, pp. 499–504, 2021, doi: 10.3130/aijt.27.499.
- [7] 塚原健一と伊藤和久, 「市町村災害対応統合システム(IDR4M)の開発と全国への普及に向けた取り組み」, 河川, vol. 79, no. 10, pp. 35–37, 10 月 2023.

3. 降雨・流出現象の不確実性に関する研究

第3章の概要 本章の目的は、水害リスク評価におけるハザード評価の外力である降雨及び流出量について、大規模アンサンブル気候予測データに基づき、不確実性を考慮した確率的評価手法を提案することである。現在の河川計画では、数十年から100年程度の限られた観測データに基づいて外力が設定されている。一方で、近年整備が進む大規模アンサンブル気候予測データにより、多数の極値降雨イベントの取得が可能となっている。本章では、これらのデータを活用し、60年を1標本としたリサンプリング手法により多数の気象シナリオを構築し、確率雨量の不確実性を定量的に評価する方法を提案した。さらに、大規模アンサンブルデータを用いた流出解析を通じて、将来気候下における流出量の変化を示すとともに、降雨の時空間分布に起因するピーク流量の不確実性についても明らかにした。

3.1. はじめに

3.1.1. 研究背景

水害リスクは一般に「ハザード」「曝露」「脆弱性」の三要素から構成されるが、このうちハザード評価においては、降雨及びそれに伴う流出過程の評価が外力の設定として極めて重要な要素となる。我が国の河川計画における外力設定の手法では、過去の実績降雨や代表的な降雨波形を基に、水文統計量である確率雨量を設定し、それに基づいて流出・氾濫解析を実施することで、河川整備の目標流量の設定や治水経済調査が行われている。しかしながら、これらの評価に用いられる気象・水文データは、数十年から百年程度の限られた観測記録に依存しており、気象現象の本質が多数の可能性あるシナリオの中から偶然発現した一事例であることを踏まえると、従来の決定論的アプローチでは、過去の事例に基づいた評価に留まり、将来的な気候変動により変化する可能性のある降雨特性を十分に反映できないという課題がある。

近年、気候予測モデルの研究の進展、計算機の発達により、アンサンブル計算による多数の極端気象の事例を得ることが可能となってきている。文部科学省が提供する大規模アンサンブル気候予測データ(d4PDF)[1]では、水平解像度20kmの気候モデルにより、過去実験で60年×50メンバの計3000年、4度昇温時を想定した将来実験では60年×海面水温6パターン×15メンバの計5400年の気象データが整備されている。このようなアンサンブル気候予測データの活用により、多数の年最大降雨イベントの取得が可能となり、従来は観測データの制約により決定論的に扱われていた降雨外力に対して、気象現象が有する時空間分布の不確実性を確率的に評価することが可能となる。

アンサンブル気候予測データを用いた降雨分析に関して、全国109水系の継続時間別の豪雨量の現在と将来の変化量を分析した事例が挙げられる[2]。一方で、前期・後期RCMが有する25年分データを用いた分析であり、アンサンブル数が限られた解析となっている。上述のd4PDFを用いた既往研究として、立川ら[3]は年最大ピーク流量の確率分布の将来変化を分析している。また、田中ら[4]は降水量の極値評価を実施しており、いずれもd4PDFが有する多数の降雨事例を一つの標本群として取り扱う手法を採用している。しかしながら、これらの手法では、d4PDFの大規模なデータセットを活用しているものの、従来の観測データにおける標本規模の限界がもたらす不確実性についての定量的な評価は十分に行われていない。本章では、これらの課題を踏まえ、河川計画で用いられる確率雨量の評価につい

て、大規模アンサンブルデータを用いることで降雨の時空間分布の不確実性を確率的に評価し、観測データの標本規模に起因する確率雨量の不確実性を定量評価する方法を提案するものである。

3.1.2. 研究目的

本章における研究目的は、水害リスク評価におけるハザード評価の外力について、大規模アンサンブル気候予測データに基づき不確実性を考慮した確率雨量及び流出量の評価手法を提案することである。評価手法の構築にあたっては、観測データの標本規模に起因する不確実性を定量化可能な方法を提案する。また、大規模アンサンブル気候予測データに基づき気候変動が確率雨量及び流出量に与える影響を明らかにする。

3.2. 年最大降雨イベントの分析

本節では、確率雨量の評価に必要な年最大降雨イベントについて、大規模アンサンブルデータからの抽出方法並びに気候モデルから抽出した年最大降雨イベントの観測データとの比較検証の結果について示す。

3.2.1. 方法

3.2.1.1. 対象流域

2016年8月北海道大雨激甚災害で大きな被害を受けた十勝川流域及び常呂川流域を対象河川とした。年最大流域平均雨量の算出は、十勝川流域のうち帯広市街地を下流端とする帯広地点流域（流域面積 $2,678\text{km}^2$ ）及び、常呂川流域のうち北見市街地を下流端とする北見地点流域（流域面積 $1,394\text{km}^2$ ）を対象とした（図 3.1）。降雨継続時間は、現行計画で洪水到達時間等を考慮し設定された、十勝川帯広地点流域で 72hr、常呂川北見地点流域で 24hr とした。

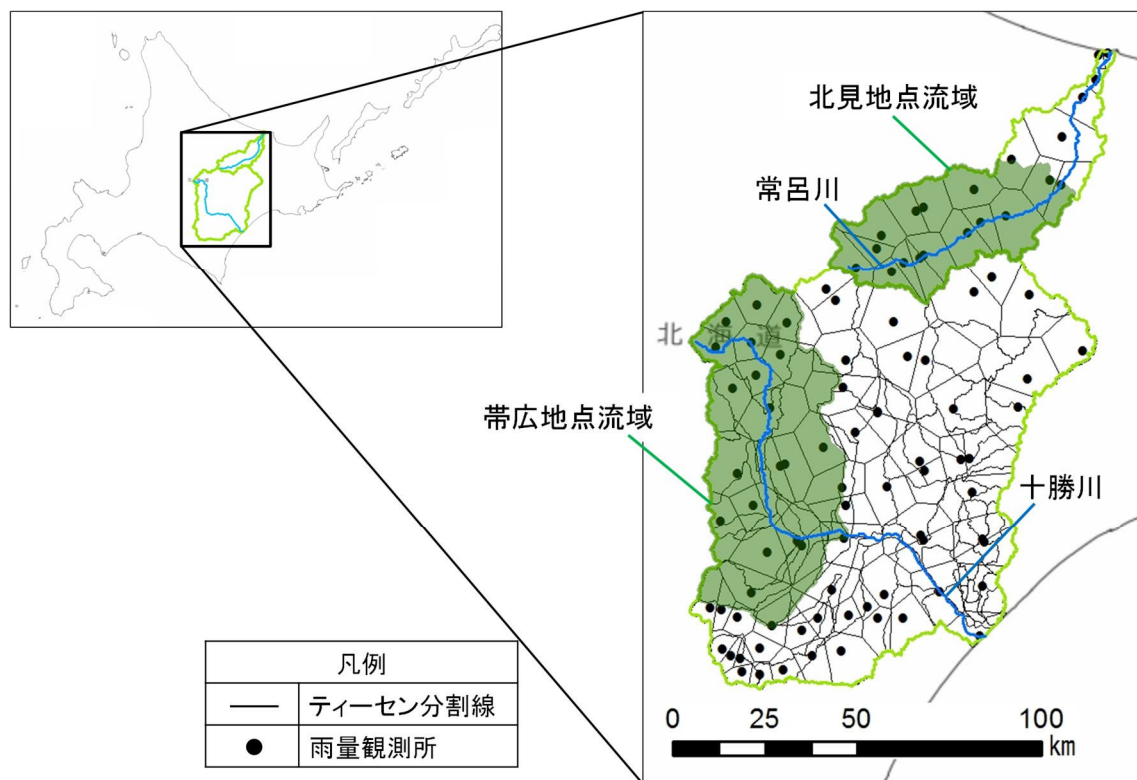


図 3.1 対象流域

3.2.1.2. 気候変動予測データの概要

本研究では、d4PDF が提供する領域 20km モデル（以下、RCM20）の出力値、及び RCM20 を用いて領域 5km モデル（以下、RCM5）に力学的ダウンスケールされたモデルの出力値を用いた。RCM5 は、平成 29 年度 地球シミュレータ特別推進課題（成果創出加速）のうち、「北海道における気候変動による洪水リスク変化の評価」で作成されたモデル[5]を使用した。両モデルともに、気象研究所が提供する最新の気候モデルである非静力学地域気候モデル（NHRCM）を用いており、特徴は長時間の積分を実施するため陸面モデルに MRI / JMA-SiB を用いている点である[6]。

d4PDF が提供する RCM20 は、過去実験 60 年（1951～2010）×50 メンバの合計 3000 年、4℃昇温時を想定した将来実験 60 年（RCP8.5 シナリオ 2090 年相当）×海面水温 6 パターン×15 メンバの合計 5400 年分のデータを有している。RCP8.5 シナリオは、IPCC 第 5 次評価報告書で示される 4 つの気候変動シナリオのうち、想定される最悪シナリオである。

RCM5 への力学的ダウンスケーリングは、d4PDF が有する大量アンサンブルデータを生かしながら、データを効率的に作成するため、以下のように計算領域及び期間を設定している。

1) 計算領域は、142.5E, 42.75N を中心とし、南北に 800km, 東西に 800km の範囲とした。太平洋上での台風の発達を考慮し、北海道より南側に計算領域を広く設定した。

2) 計算期間は、d4PDF の降雨量データから対象流域の年最大流域平均降雨の発生時期を抽出し、その発生日を基準に助走期間 5 日間+発生日前 5 日間+後 5 日間の計 15 日間とした。総計算ケース数は 15 日間×8400 ケース（将来 5400 年、過去 3000 年）×2 河川となる。なお、降雨発生時期が両河川で重複する場合は兼用しており、総計算時間は約 500 年分である。

3.2.1.3. 年最大流域平均雨量の算定

RCM20 及び RCM5 の降雨量データから流域平均時間雨量を算出し、降雨継続時間内の累積降雨量が最大となる降雨を年最大流域平均雨量とした。流域平均時間雨量は、対象流域に対する、気候モデルの各メッシュが占める面積割合により、重みづけしている。算出された RCM20 の年最大流域平均雨量の発生日は、ダウンスケーリングの計算期間の設定に使用した。

3.2.1.4. 実績降雨の整理方法

実績降雨は、対象流域内の地上観測所の時間雨量データを基に整理した。データの収集期間は、気候モデルの過去実験の期間（1951～2010）と合わせることを基本とした。収集・整理が可能であったのは、十勝川帯広地点流域で 60 年分（1951～2010）、常呂川北見地点流域は 49 年分（1962～2010）である。各観測所の時間雨量データから、ティーセン分割法によって流域平均時間雨量を算出し、降雨継続時間内の年最大流域平均雨量を算定した。使用した観測所地点数は、観測所の開設・閉鎖に伴い年毎に異なるが、2010 年では十勝川帯広地点流域 30 地点、常呂川北見基準地点 16 地点である（図 3.1）。

3.2.1.5. バイアス補正の実施

バイアス補正は、気象研究所技術報告第 73 号[6]で NHRCM の降水量データに適用されているピアニの手法[7]を採用した。本手法は関係式 $y = ax + b$ の一次式で補正され、数値の取り扱いが容易な手法である。係数はモデル値と実績値をそれぞれ昇順または降順に並び替え、同じランクのものを対応させ、モデル値を x 、実績値を y としてプロットし、最小二乗法により算出される。

本研究では、年最大流域平均雨量を補正対象とし、補正後のデータが負の値を含まないように、補正式は $y = ax (b = 0)$ とした。また、大量アンサンブルデータと標本数が限られている実績降雨を対応させるため、以下の手順で関係式を作成した（図 3.3）。

- 1) 過去実験の 50 メンバ毎に、実績降雨と対応させ、それぞれの関係式を作成。常呂川北見地点流域については、実績降雨が 49 年分（1962～2010）のため、過去実験も同一期間のデータを使用。
- 2) 作成された各メンバの関係式の係数 a を平均し、補正式の係数とした。

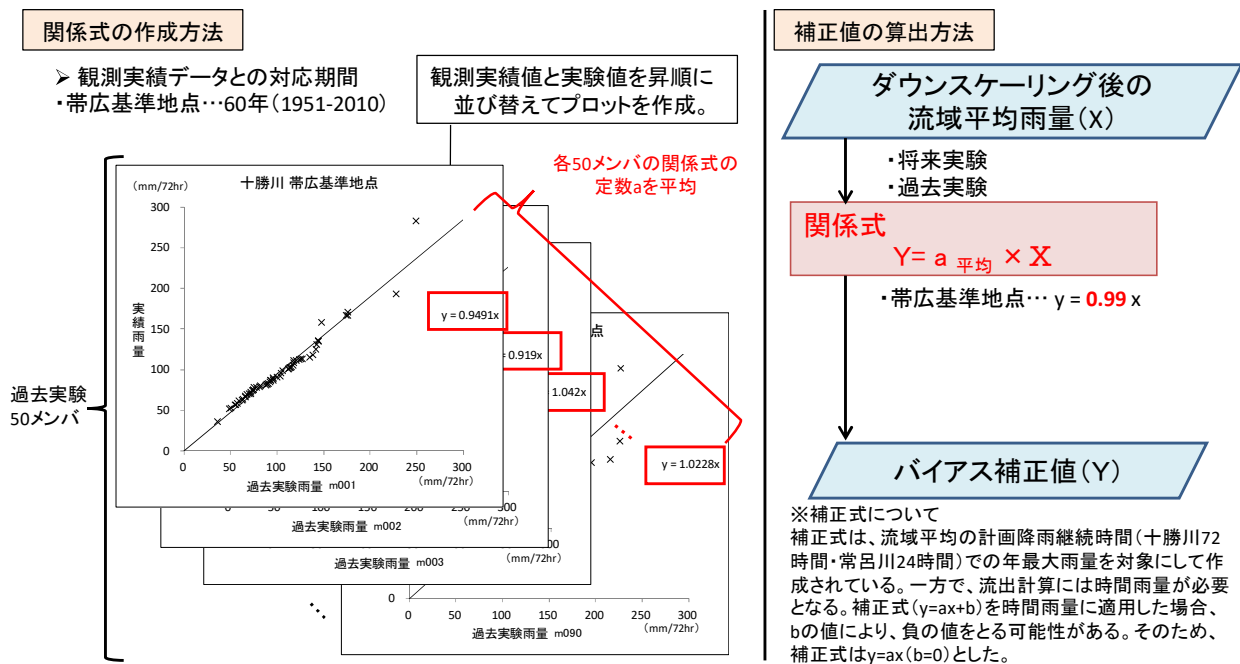


図 3.2 本研究におけるバイアス補正手法の概念図(1)

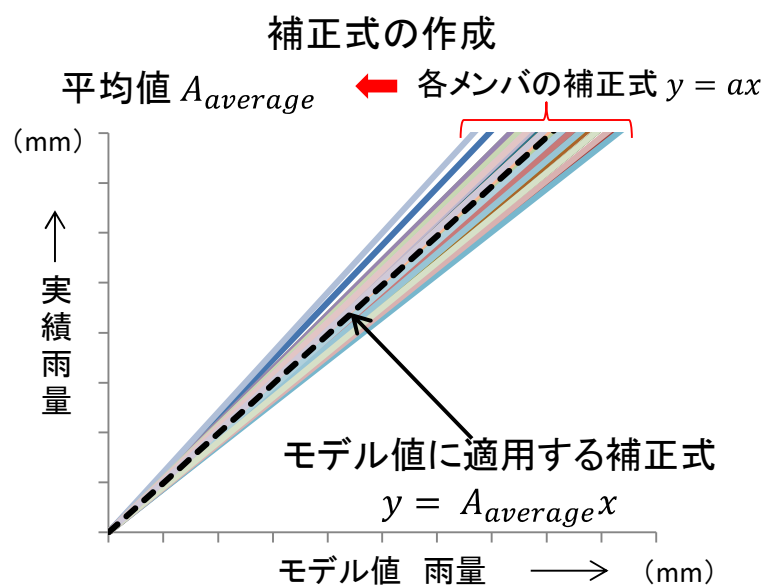


図 3.3 本研究におけるバイアス補正手法の概念図(2)

3.2.1.6. 降雨量の分析

実績降雨及び RCM20, RCM5 から算出した年最大流域平均雨量の頻度分布を確認するため、階級 10mm 毎に相対度数及び累積相対度数を算出した。モデル値の実績降雨の再現性は、累積相対度数を比較することで評価した。検証の対象とする雨量の階級は、極値の降雨を除いた、累積相対度数 10%～90%程度の範囲を対象とした。

気候モデルの水平解像度の違い、将来気候下における降雨量の変化の検証では、低頻度で発生する降雨を確認する必要がある。そこで本研究では、北野ら[8]による、大量アンサンブルデータを用いたノンパラメトリック法による確率雨量の推定を参考に、順位統計量としてパーセンタイル値を用いて評価を行った。実績降雨 60 年分（常呂川は 49 年分）、過去実験 3000 ケース、将来実験 5400 ケース、それぞれの中央値、95%タイル値（年超過確率 1/20 相当）、99%タイル値（同 1/100 相当）、99.3%タイル値（同 1/150 相当）を算出した。また、極値を確認するため、最小値及び最大値を算出した。

3.2.2. 結果

3.2.2.1. 気候モデルの水平解像度の違いによる再現性検証

RCM20 データと RCM5 データの年最大流域平均雨量の相対度数分布を図 3.4 に、実績降雨とのパーセンタイル値の差を表 3.1 に示す。図 3.4 及び表 3.1 より、両流域とも実績降雨との差の絶対値を各パーセンタイル値で比較すると、RCM5 データで減少し、ダウンスケーリングにより実績降雨のパーセンタイル値の再現性向上を確認した。十勝川帯広地点流域（表 3.1 左）では、99.3%タイル値（年超過確率 1/150 相当）の実績降雨との差は-34.0mm/72hr から 0.2mm/72hr となり、RCM5 データで実績降雨との差が大幅に解消され、気候モデルの水平解像度を高めた効果が、常呂川北見地点流域よりも強く表れている。常呂川北見地点流域（表 3.1 右）では、99%タイル値（年超過確率 1/100 相当）の実績降雨との差は、RCM20 データで-4.0mm/24hr であり、実績降雨を概ね再現していた。この結果は、対象流域により実績降雨のパーセンタイル値の再現が可能となる気候モデルの水平解像度に違いがあることを示唆している。

図 3.4 より、両流域の最大値は RCM5 データで増加し、ダウンスケーリング後の気候モデルには低頻度かつ高強度な降雨事例が含まれていることを確認した。一方で、RCM5 データで雨量が数 mm となるケースが含まれていた。これは、使用した RCM5 データは、RCM20 データでの年最大降雨の発生日を基準に 15 日間のダウンスケーリングを実施しているため、ダウンスケーリング前後での降雨の時空間的な変化により、対象流域において計算期間内に年最大規模の降雨が発生しないケースが含まれるためである。一方、RCM5 を用いた一部のアンサンブルメンバの通年ダウンスケーリング計算と、15 日間ダウンスケーリング結果の比較により、降雨量の上位約 20%は同一の降雨事例（全体では約 70%）であることが確認されている[9]。よって、本研究で対象とするパーセンタイル値の領域への影響は小さいと考えられる。

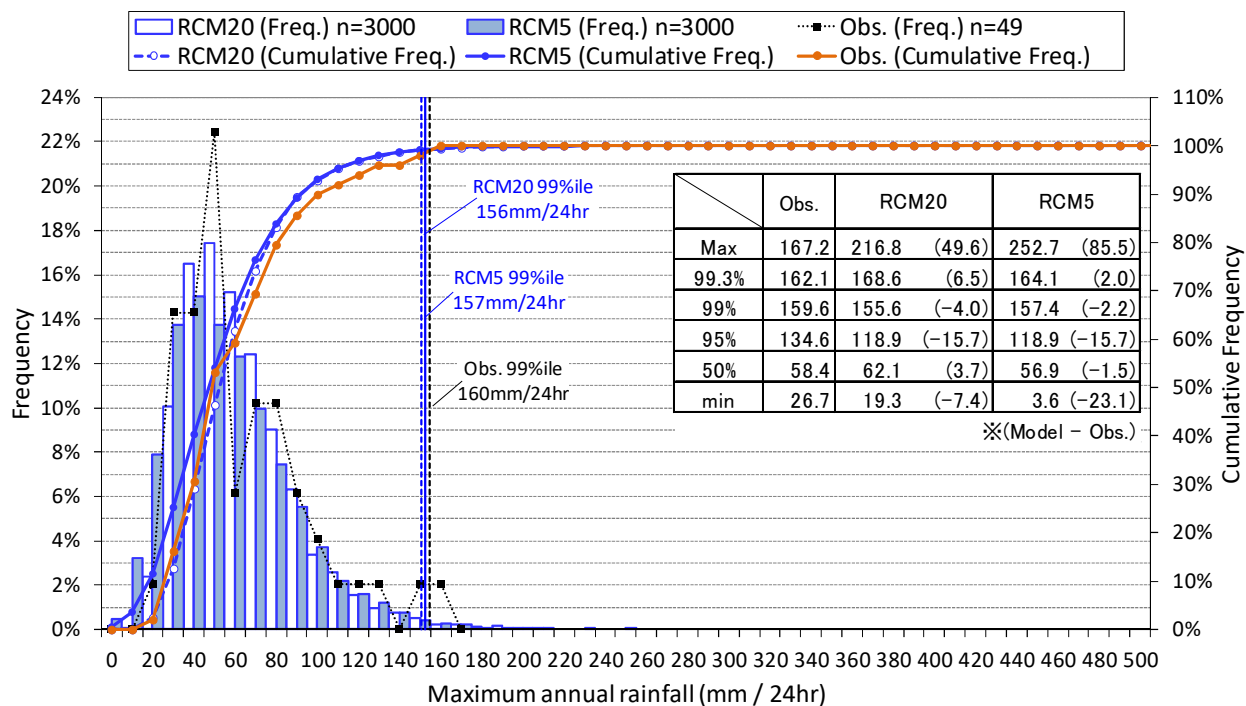
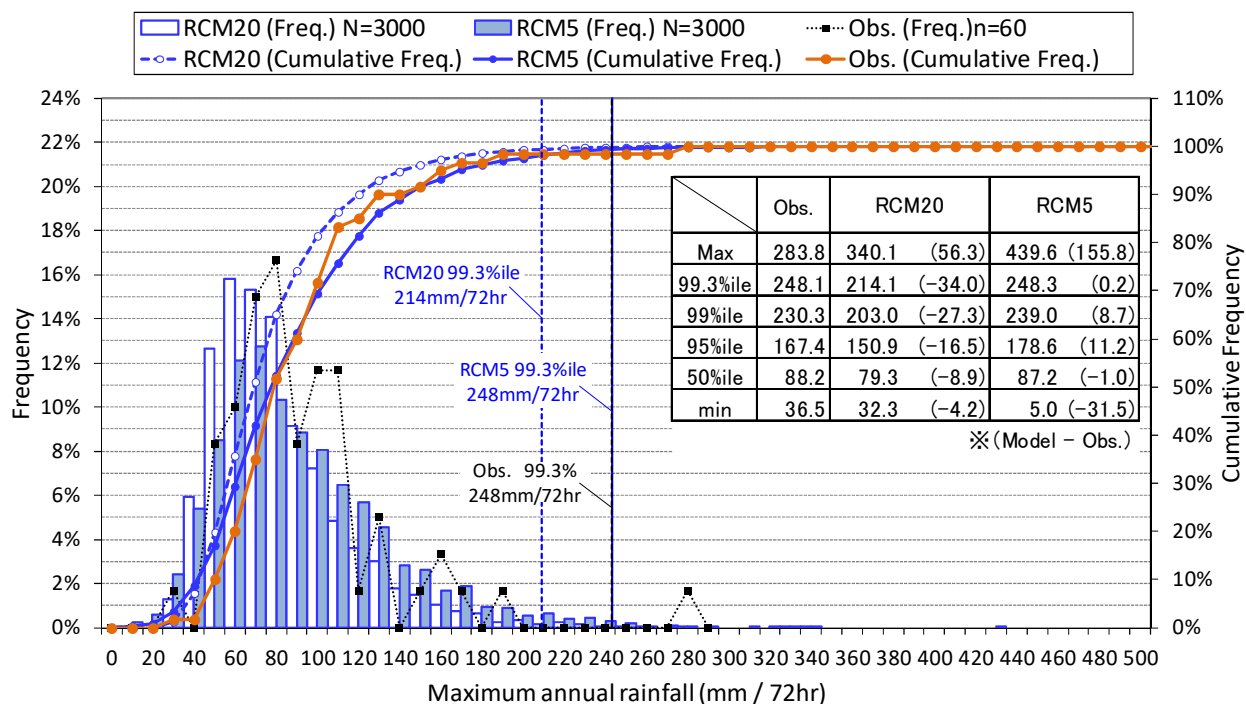


図 3.4 年最大流域平均雨量相対度数分布—RCM20 と RCM5 の比較—
(上) 十勝川帯広地点, (下) 常呂川北見地点

表 3.1 実績降雨と RCM20 及び RCM5 のパーセンタイル値
(左) 十勝川帯広地点, (右) 常呂川北見地点

	十勝川 帯広地点 (mm/72hr)			常呂川 北見地点 (mm/24hr)		
	実績 降雨	RCM20	RCM5	実績 降雨	RCM20	RCM5
最大値	283.8	340.1 (56.3)	439.6 (155.8)	167.2	216.8 (49.6)	252.7 (85.5)
99.3%	248.1	214.1 (-34.0)	248.3 (0.2)	162.1	168.6 (6.5)	164.1 (2.0)
99%	230.3	203.0 (-27.3)	239.0 (8.7)	159.6	155.6 (-4.0)	157.4 (-2.2)
95%	167.4	150.9 (-16.5)	178.6 (11.2)	134.6	118.9 (-15.7)	118.9 (-15.7)
50%	88.2	79.3 (-8.9)	87.2 (-1.0)	58.4	62.1 (3.7)	56.9 (-1.5)
最小値	36.5	32.3 (-4.2)	5.0 (-31.5)	26.7	19.3 (-7.4)	3.6 (-23.1)

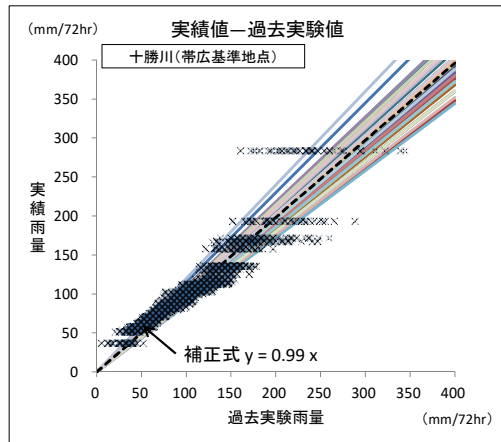
() 内は実績降雨との差

3.2.2.2. バイアス補正の実施

ピアニの手法による補正係数は、十勝川帯広地点流域では RCM5 データで $a = 0.99$, RCM20 データで $a = 1.14$, 常呂川北見地点流域では RCM5 データで $a = 1.10$, RCM20 データで $a = 1.05$ となった (図 3.5)。十勝川帯広地点流域では RCM5 の補正係数が 1.00 に近く、補正前データで実績降雨の累積相対度数の再現性が高いことを示している。RCM5 データとその補正データの年最大流域平均雨量の相対度数分布を図 3.6 に、RCM5 及び RCM20 の補正前後データと実績降雨との累積相対度数の差を 10mm 毎の階級別に表 3.2 に示した。図 3.6 及び表 3.2 より、補正を実施することで、各階級の実績降雨との累積相対度数の差は、両流域、各モデルで平均-3~2pt となった。常呂川北見地点流域では RCM5 データで、補正前平均 6pt から補正後平均 0pt となり、補正効果が顕著に確認された。

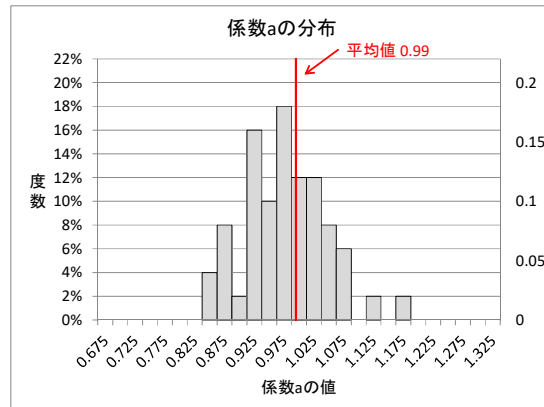
本研究で採用した関係式 $y=ax$ は、簡易的な手法ながら対象流域で補正の効果が確認された。一方で、係数 a をモデル値に一様に乗じる性質上、必ずしも実績降雨との差を解消する方向にモデル値が補正されないことが考えられる。本検証でも、個別の階級では実績降雨との累積相対度数の差が解消しない階級が確認された。また、実績降雨の頻度が一部の階級に著しく偏り、モデル値との累積相対度数の差が大きい場合、関係式 $y=ax$ の補正では限界があると考えられる。特に、実績降雨の標本数が少ない流域では、頻度の偏りが発生しやすいため、本手法の適用には注意が必要である。

- 50メンバー×60年分の過去実験及び実績雨量のプロット図

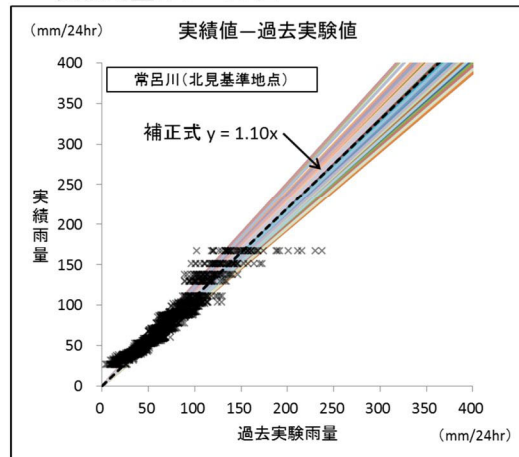


- 50メンバー毎に作成した補正式の係数aの分布

・係数aの最小値は0.86、最大値は1.20、中央値は0.99。



- 50メンバー×49年分の過去実験及び実績雨量のプロット図



- 50メンバー毎に作成した補正式の係数aの分布。

・係数aの最小値は0.97、最大値は1.26。中央値は1.10。

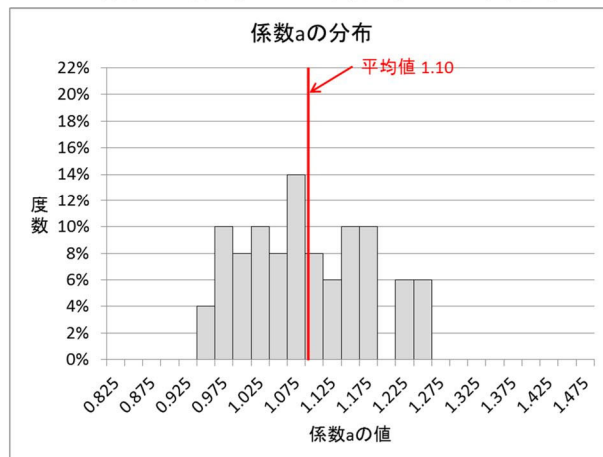


図 3.5 バイアス補正係数の算出
(上段) 十勝川帯広地点, (下段) 常呂川北見地点

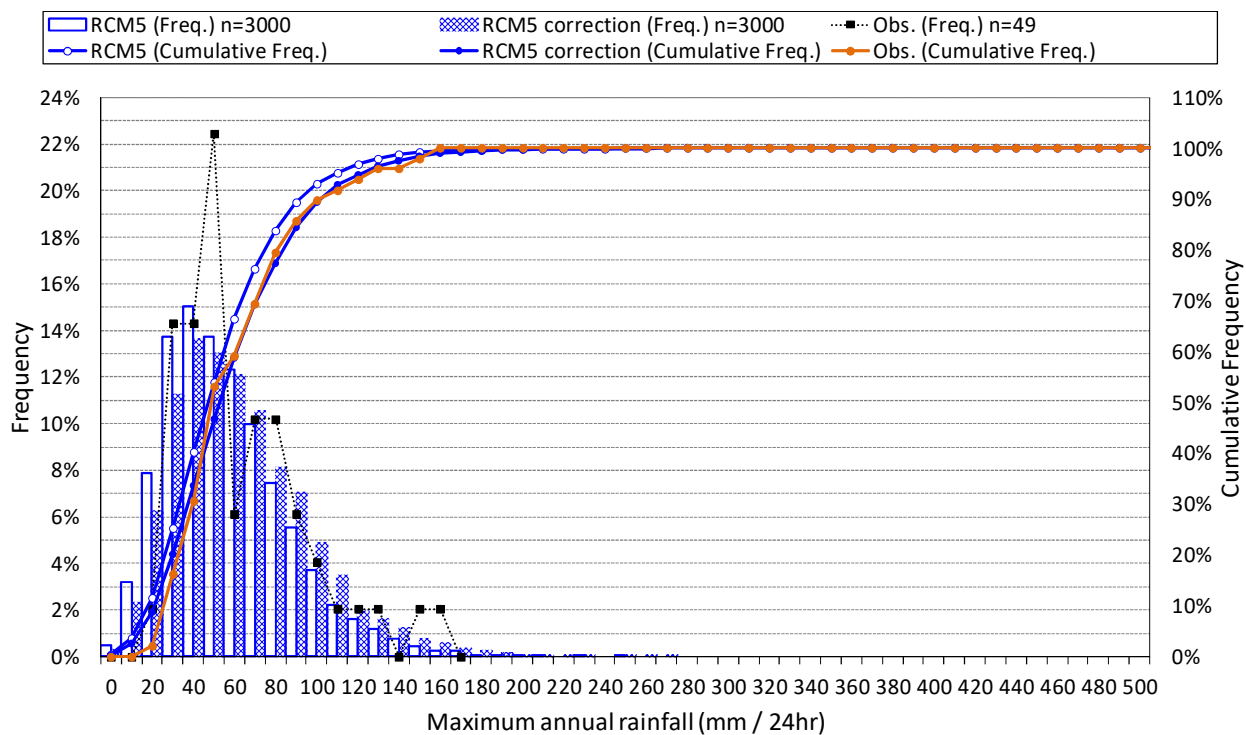
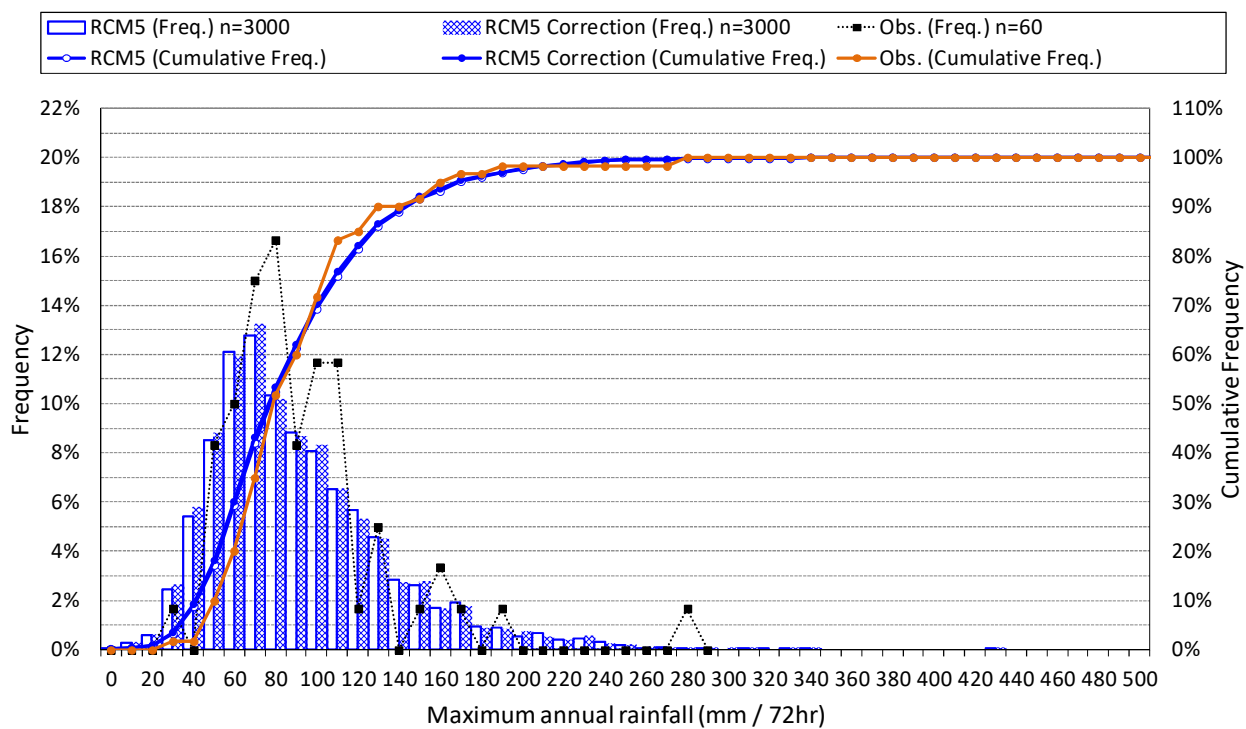


図 3.6 年最大流域平均雨量相対度数分布—RCM5 バイアス補正前後の比較—
(上) 十勝川帯広地点, (下) 常呂川北見地点

表 3.2 実績降雨と RCM5 及び RCM20 の補正前後の累積相対度数

(左) 十勝川帯広地点, (右) 常呂川北見地点

十勝川 帯広地点						常呂川 北見地点					
雨量 (mm)	累積相対度数					雨量 (mm)	累積相対度数				
	実績	RCM5	RCM5 補正	RCM20	RCM20 補正		実績	RCM5	RCM5 補正	RCM20	RCM20 補正
40	2%	3% (1)	4% (2)	1% (-1)	0% (-2)	40	2%	12% (10)	9% (7)	2% (0)	2% (0)
50	2%	9% (7)	9% (7)	7% (5)	3% (1)	50	16%	25% (9)	20% (4)	13% (-3)	10% (-6)
60	10%	17% (7)	18% (8)	20% (10)	10% (0)	60	31%	40% (9)	34% (3)	29% (-2)	25% (-6)
70	20%	29% (9)	30% (10)	36% (16)	22% (2)	70	53%	54% (1)	47% (-6)	46% (-7)	41% (-12)
80	35%	42% (7)	43% (8)	51% (16)	36% (1)	80	59%	66% (7)	59% (0)	62% (3)	57% (-2)
90	52%	52% (0)	53% (1)	65% (13)	49% (-3)	90	69%	76% (7)	69% (0)	74% (5)	69% (0)
100	60%	61% (1)	62% (2)	74% (14)	62% (2)	100	80%	84% (4)	77% (-3)	83% (3)	80% (0)
110	72%	69% (-3)	70% (-2)	81% (9)	71% (-1)	110	86%	89% (3)	84% (-2)	89% (3)	87% (1)
120	83%	76% (-7)	77% (-6)	86% (3)	78% (-5)	120	90%	93% (3)	89% (-1)	93% (3)	91% (1)
130	85%	82% (-3)	82% (-3)	90% (5)	84% (-1)	平均		(6)	(0)	(1)	(-3)
140	90%	86% (-4)	87% (-3)	93% (3)	88% (-2)	() 内は実績降雨との差					
平均		(1)	(2)	(8)	(-1)						

3.2.2.3. 将来気候における降雨量

RCM5 補正データの過去実験と将来実験の年最大流域平均雨量の相対度数分布を図 3.7 に、RCM5 及び RCM20 の補正データの将来実験の過去実験に対する変化率をパーセンタイル値毎に表 3.3 に示す。変化率は、十勝川帯広地点流域（図 3.7 及び表 3.3 左）の 99.3%タイル値（年超過確率 1/150 に相当）では、RCM5 データで 1.37 倍、RCM20 データで 1.30 倍となった。また、常呂川北見地点流域（図 3.7 及び表 3.3 右）の将来実験の 99%タイル値（年超過確率 1/100 に相当）では、RCM5 データで 1.39 倍、RCM20 データで 1.35 倍となった。

両流域で、RCM5 データと RCM20 データの変化率は同程度であり、対象流域では RCM20 データでも降雨の変化率の推定が可能であることが示唆された。一方で、将来気候では降雨の時空間的な集中化が指摘されており[6]、気候モデルの治水対策への活用に向けては異なる降雨継続時間、流域スケールでの検証が必要である。

国土交通省では 2013 年に、A1B シナリオ（21 世紀末時点 3.2℃上昇）における、RCM5 モデルでの将来降雨量の変化率を、十勝川流域、常呂川流域ともに 1.3 倍以上と算定している[9]。この時の倍率算出方法は、地域区分毎に算出した倍率を、対象河川の流域面積比で案分し算定していた。一方、本研究では大量アンサンブルデータを活用することで、流域平均雨量標本を多数かつ直接得ることが可能となり、順位統計に基づく年超過確率相当の降雨量の変化率を算定している。

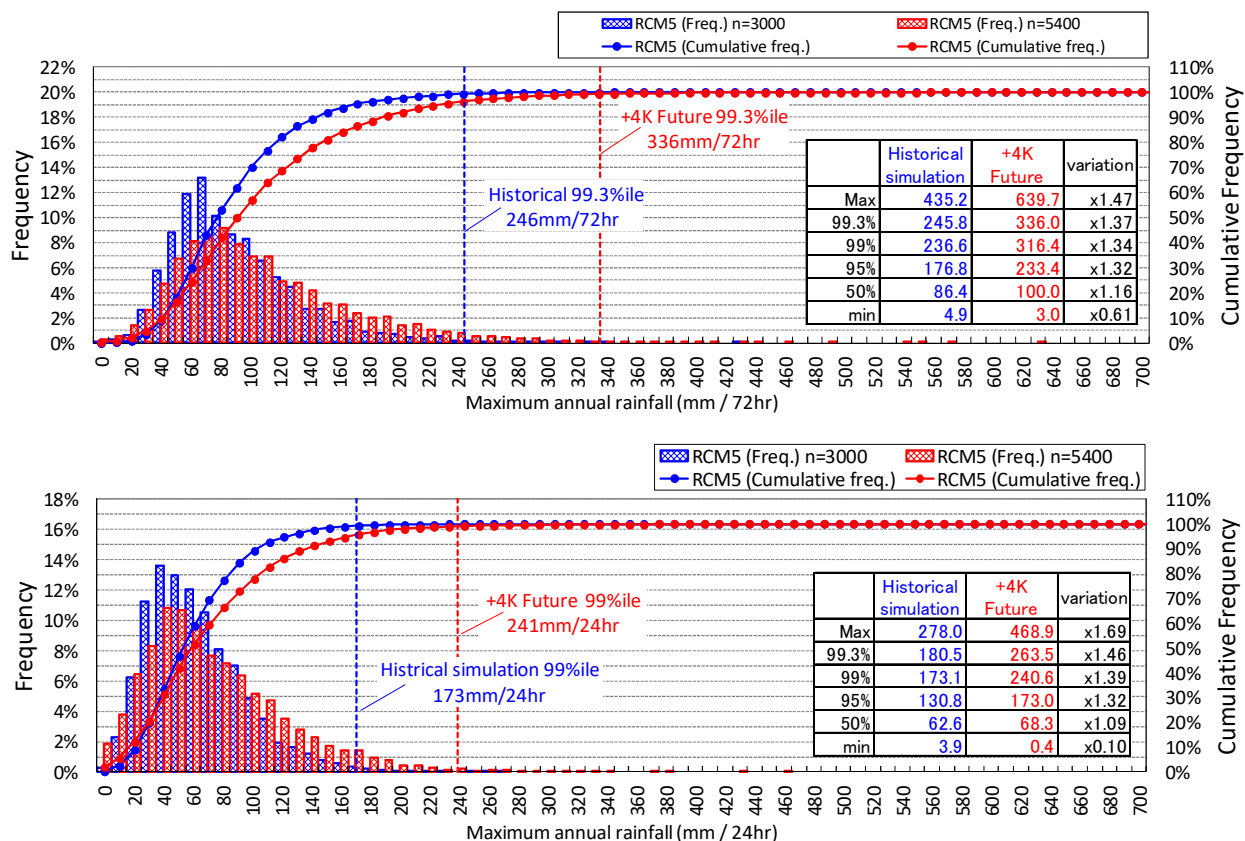


図 3.7 年最大流域平均雨量相対度数分布一過去実験と将来実験の比較（RCM5 補正データ） —
（上）十勝川帯広地点，（下）常呂川北見地点

表 3.3 実績降雨と RCM5 及び RCM20 のパーセンタイル値
（左）十勝帯広地点，（右）常呂北見地点

	十勝川 帯広地点						常呂川 北見地点					
	RCM5補正データ			RCM20補正データ			RCM5補正データ			RCM20補正データ		
	過去 実験	将来 実験	変化率	過去 実験	将来 実験	変化率	過去 実験	将来 実験	変化率	過去 実験	将来 実験	変化率
最大値	435.2	639.7	1.47	387.7	663.0	1.71	278.0	468.9	1.69	227.7	373.8	1.64
99.3%	245.8	336.0	1.37	244.1	317.6	1.30	180.5	263.5	1.46	177.1	237.6	1.34
99%	236.6	316.4	1.34	231.4	297.9	1.29	173.1	240.6	1.39	163.4	220.4	1.35
95%	176.8	233.4	1.32	172.1	225.6	1.31	130.8	173.0	1.32	124.9	164.0	1.31
50%	86.4	100.0	1.16	90.4	105.6	1.17	62.6	68.3	1.09	65.2	76.5	1.17
最小値	4.9	3.0	0.61	36.8	31.1	0.85	3.9	0.4	0.10	20.3	14.6	0.72

3.2.3. まとめ

本節では、確率雨量の評価に必要となる年最大降雨イベントについて、大規模アンサンブルデータからの抽出方法並びに気候モデルから抽出した年最大降雨イベントの観測データとの比較検証の結果を示した。今後、気候モデルの治水対策への活用に向けて、本研究での累積相対度数を用いた実績降雨の再現性の評価や将来気候下での降雨量の変化率の算出を、他流域で適用し検証する必要がある。本研究の結果から得られた、検証の際の留意事項を以下に示す。

気象モデルの水平解像度

本研究では、気象モデルの水平解像度により、実績降雨の再現性に違いが生じることが示唆された。実績降雨の再現に関わる要素として、対象とする流域の規模、地形の要素（山地、平地）や、降雨を発生させる要因（台風由来、前線由来）等の違いが考えられる。今後、他流域での適用事例を増やし、気象モデルの水平解像度による再現性の違いや要因を検証していく必要がある。水平解像度 20km 程度の領域モデルで再現性が確保できる流域の条件が示されれば、ダウンスケーリングを実施せずに、d4PDF が利用できる流域を抽出できる。この情報は、気候変動下における治水計画の立案を行う際の有益な情報になると考えられる。

実績降雨の不確実性

本研究では、実績降雨と適合するようにバイアス補正を実施している。これは、“実績降雨は過去の年最大降雨の傾向を代表した標本”と捉える考え方に基づいている。一方で、現在扱うことができる実績降雨は、過去に起こり得た多くの可能性の中で、偶然発生した数少ない例とも捉えられる。この考え方に基づく場合、“実績降雨は過去に起こり得た年最大降雨の一部を表した標本”であり、実績降雨は不確実性を有している。特に標本数が少なく、低頻度降雨を含まない実績降雨に適合するようにバイアス補正を実施すると、気候モデルに含まれる低頻度降雨を過小評価する方向に補正され、モデル値の取り得る値の幅が縮小し、大量アンサンブルデータの有する利点が失われる可能性がある。他流域で補正を実施する際には、実績降雨が有する不確実性に留意し、対象とする実績降雨の標本を十分確認した上で実施する必要がある。

3.3. 確率雨量の不確実性の分析

本節では、大規模アンサンブルデータに基づく確率雨量の不確実性の評価方法及び分析結果を示す。なお、本節の内容は、筆者が共著者として関与した論文（舩屋ら, 2018）[10]における手法並びに分析結果について、本章で目的とする観測データの標本規模に起因する確率雨量の不確実性について焦点をあてたものである。

3.3.1. 方法

これまでの治水計画における降雨の評価は、およそ 60 年分の実績降雨を用いた確率評価によって求めた確率雨量に基づいて行われてきた。大規模アンサンブルデータを用いた確率雨量評価にあたっては、観測データの標本規模に起因する確率雨量の不確実性を評価するため、60 年を必要の標本規模とする。また、気象現象が取り得る多数のシナリオを評価するため、大規模アンサンブルデータが有する多数の年最大降雨イベントから 60 年分の多数のシナリオの作成する方法により、降雨の時空間分布が有する不確実性を評価する。

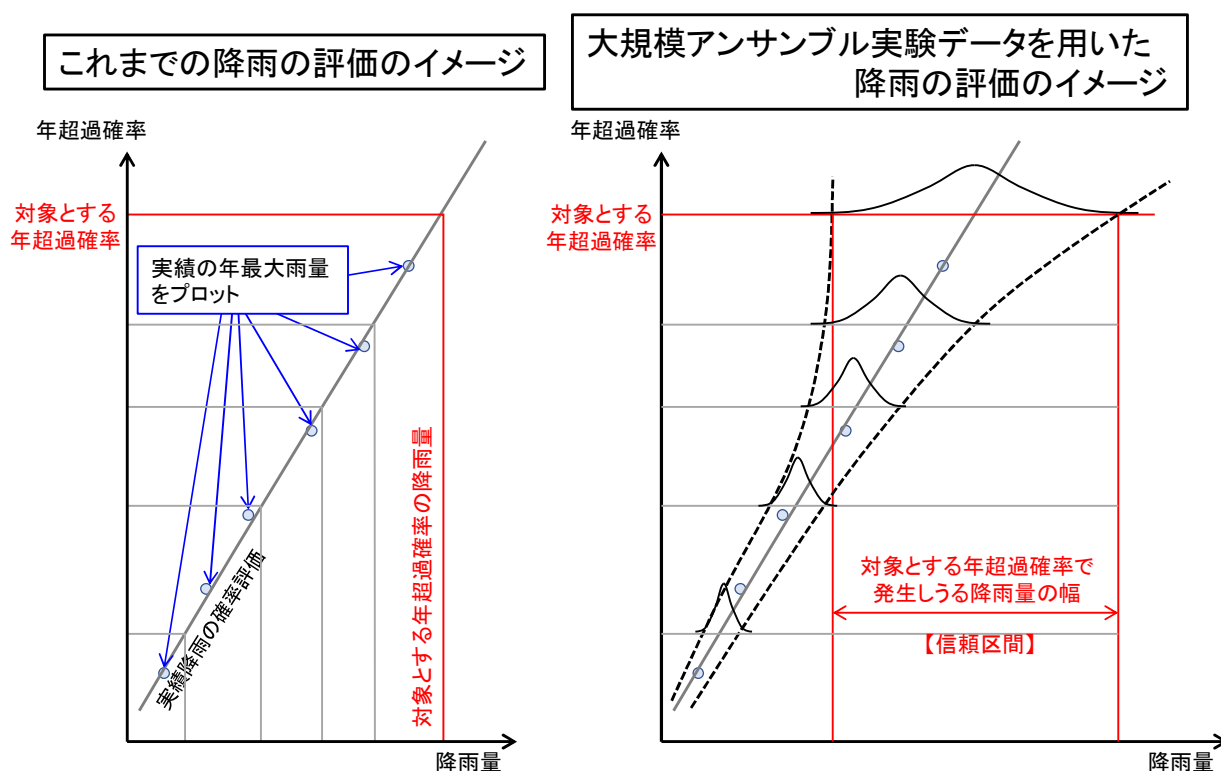


図 3.8 確率雨量の評価のイメージ

3.3.1.1. 確率評価手法

年最大降雨イベントの発生確率のような極端現象を取り扱う確率評価手法には、一般極値分布である Gumbel 分布（2 母数）、GEV 分布（3 母数）、平方根指数型分布である SQRT-ET 分布等がある。本研究では現在の降雨の規模を把握するために、母数の違いで表現される Gumbel 分布と GEV 分布を用いて、実績降雨及び過去実験の確率評価を各メンバで実施することとした。

Gumbel 分布

Gumbel 分布として知られている最大値分布の第 1 型式は年最大洪水流量の分布関数としての有用性が知られて以来、水分統計解析で数多く適用されている。Gumbel 分布の確率密度関数と分布関数は次式で与えられる。

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp \left[-\frac{x-a}{a} - \exp \left(-\frac{x-c}{a} \right) \right] \quad (-\infty < x < \infty) \quad (3.1)$$

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(\frac{x-c}{a} \right) \right] \quad (3.2)$$

c と a はそれぞれ、位置母数と尺度母数である。

GEV 分布（一般極値分布）

Jenkinson（ジェンキンソン）は 3 種の極値極限分布を 1 つの式形に統一して、一般化極値分布（GEV 分布）の導入を図った。英国の Natural Environment Research Council は、年最大日雨量の確率モデルにつき検討を行い、GEV 分布を基準法として推奨している。GEV 分布の分布関数は次式で定義される。

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k(x-c)}{a} \right]^{1/k} \right\} \quad (k \neq 0) \quad (3.3)$$

ここに、 $k > 0$ のとき、 $-\infty < x \leq c + (a/k)$ であり、 $k < 0$ のときは、 $c + (a/k) \leq x \leq \infty$ となる。c と a はそれぞれ、位置母数と形状母数である。とくに、 $k=0$ のとき、Gumbel 分布に一致する。なお、GEV 分布の確率密度関数は上式から、 $f(x)=dF(x)/dx$ で求められる。

3.3.1.2. 気象シナリオの作成

気象現象が取り得る多数のシナリオを評価するため、大規模アンサンブルデータが有する多数の年最大降雨イベントから 60 年分の標本を繰り返し抽出するリサンプリングにより多数の気象シナリオを作成する。

具体的には図 3.9 に示すように、過去実験については、d4PDF が有する実験特性のうち年々変動の影響を考慮し、各年の 50 メンバから 1 メンバを無作為抽出したものを一つの標本とする抽出を実施した。将来実験については、年々変動の影響を有していないため、5,400 ケースを独立として取り扱い、60 ケースを無作為抽出し、一つの標本とする抽出を実施した（図 3.9）。

なお、リサンプリングの標本数は、1/150 確率雨量 95%信頼区間の試行毎（10 回）の中央値との差の安定性を考慮し決定した。標本数は、 1.0×10^2 、 1.0×10^3 、 1.0×10^4 、 1.0×10^5 、 1.0×10^6 として感度分析（図 3.10）を実施した。最大から最小を引いた誤差が 1.0mm 以内となり、試行毎の変動が整数の範囲では生じないことを確認した上で、本研究ではリサンプリングの標本数を 1.0×10^5 個とした。

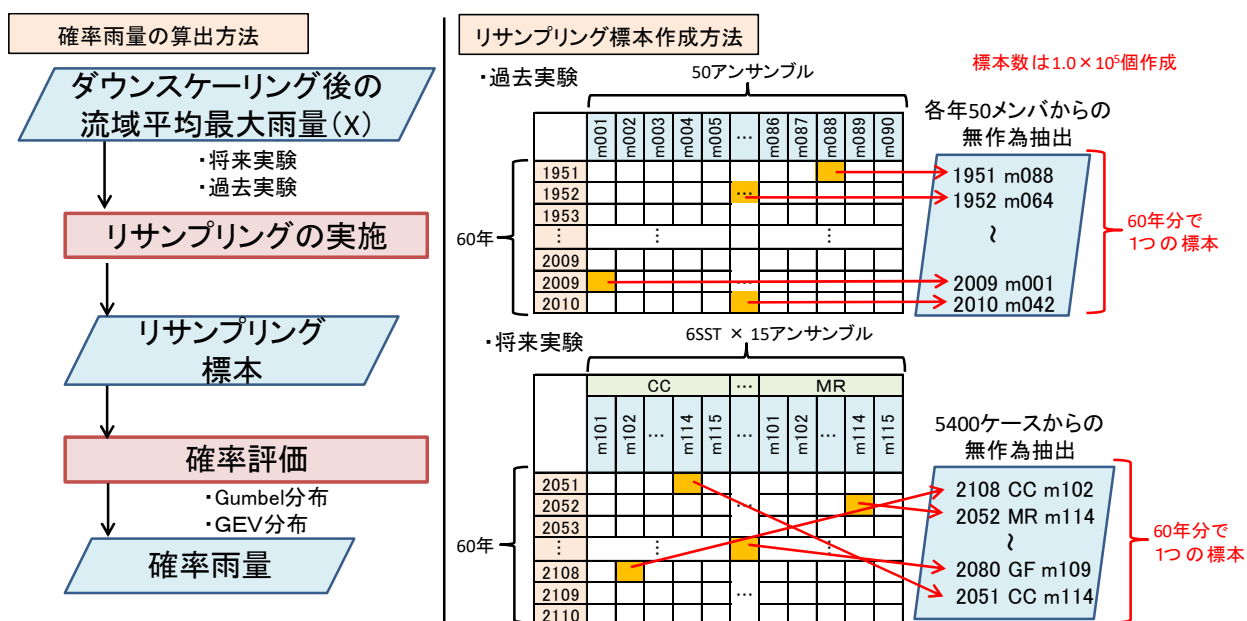


図 3.9 本研究におけるリサンプリング手法の概念図

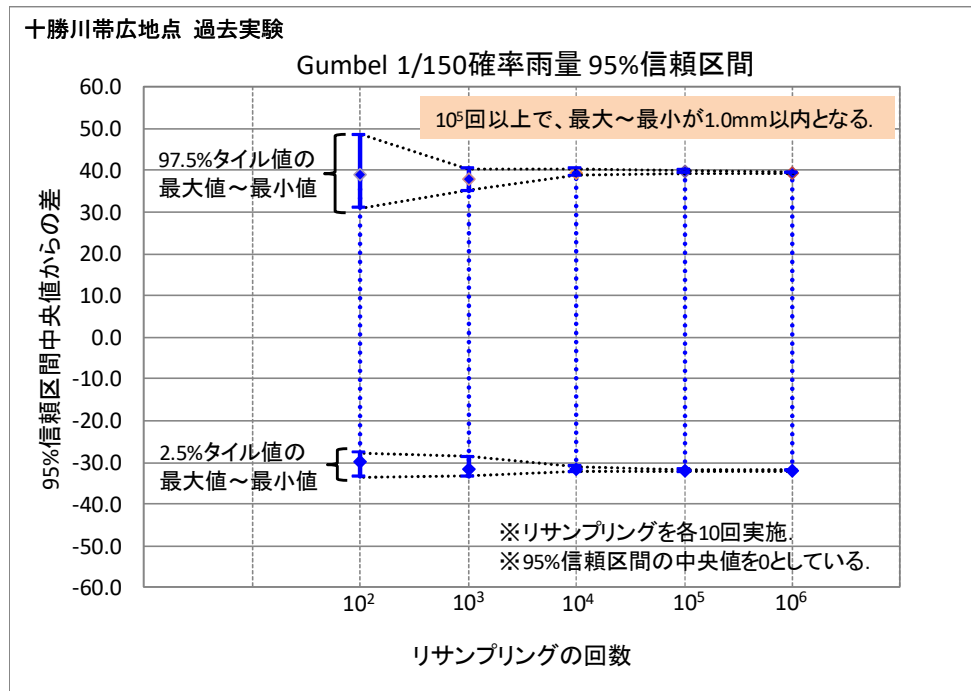


図 3.1 0 リサンプリングの感度分析結果

横軸にリサンプリングの標本数, 縦軸に各試行における Gumbel 分布の場合の 1/150 確率雨量の 95%信頼区間の中央値からの差を示している. リサンプリングの標本数 10⁵個以上で, 信頼区間の上下限の最大値～最小値が 1mm 以内となる.

3.3.2. 結果

3.3.2.1. 確率雨量評価

十勝川帯広基準地点での過去実験降雨及び将来実験降雨の確率評価結果を図 3.1 1 に示す。GEV 分布では、1/150 確率雨量の過去実験の 95%信頼区間は 188mm～360mm となった。一方、将来実験の 95%信頼区間は 252mm～517mm となり、将来気候では降雨が大きくなる傾向が見られた。度数分布で見ると、GEV 分布では、将来実験の中央値 353mm が過去実験の 95%信頼区間内に含まれる。中央値では、帯広基準地点の年最大 72 時間雨量は、256mm から 353mm へと約 1.4 倍増加した。

各分布の過去実験から将来実験への倍率を整理した図 3.1 2。GEV 分布での各確率規模の雨量（十勝川 1/150）の度数分布より、十勝川帯広基準地点での年最大 72 時間雨量の倍率は約 1.4 倍に増加することがわかった。

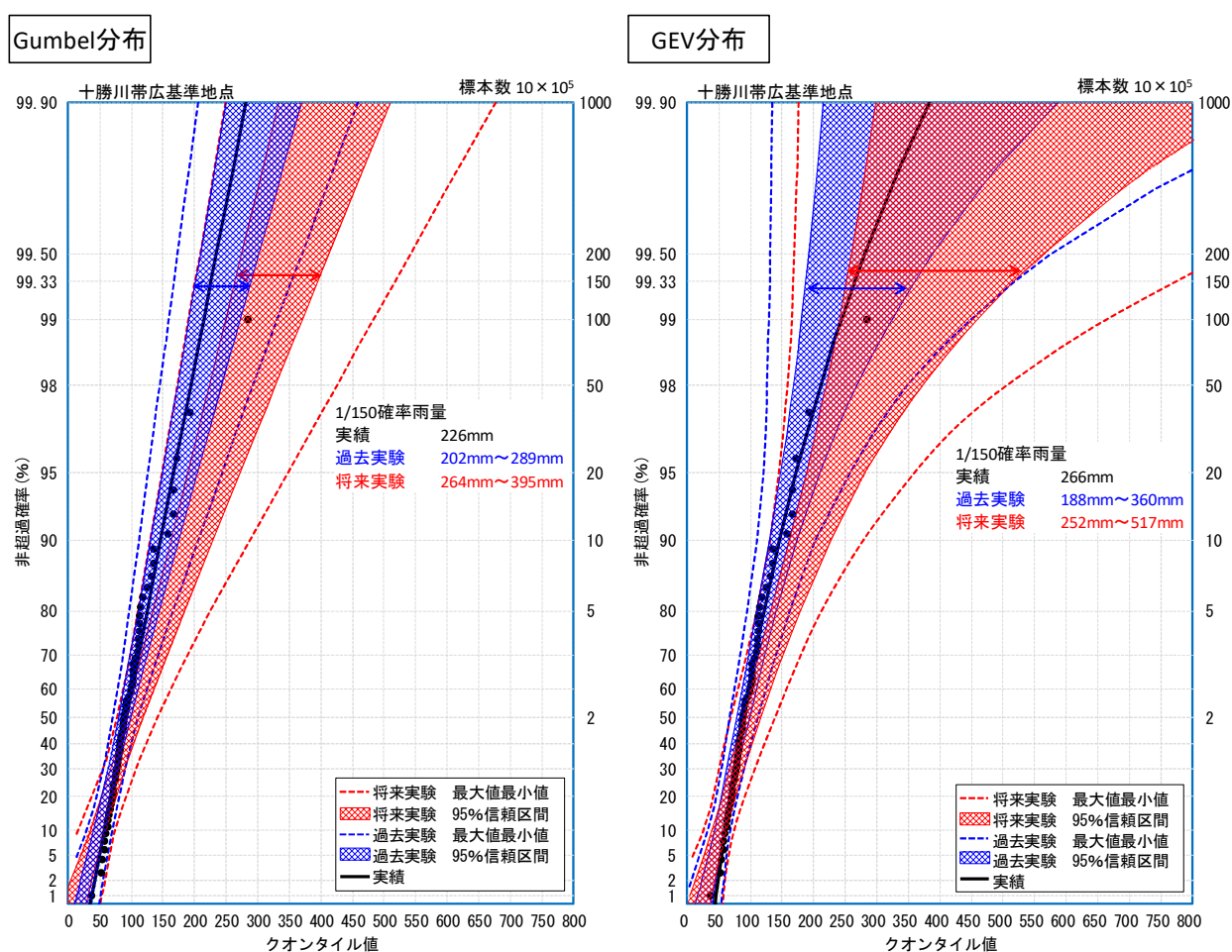


図 3.1 1 確率雨量の評価結果

(左) Gumbel 分布, (右) GEV 分布

※筆者が共著者として関与した論文（舩屋ら, 2018）[10]より転載したものであり、許諾を得て使用している。

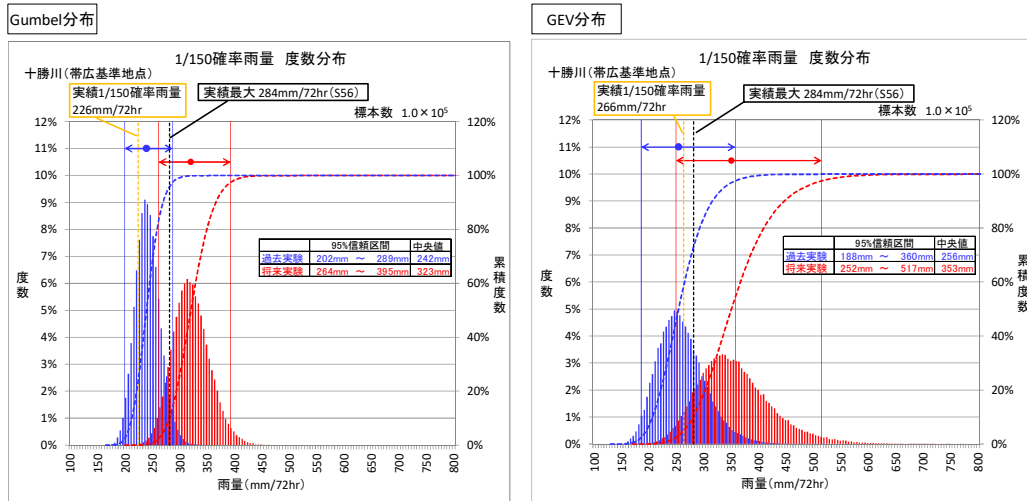


図 3.1 2 年超過確率 1/150 雨量の頻度分布

(左) Gumbel 分布, (右) GEV 分布

※筆者が共著者として関与した論文(舩屋ら, 2018) [10]より転載したものであり, 許諾を得て使用している.

3.3.2.2. 統計的評価手法との比較

本研究では、大規模アンサンブル気候予測データを用いて、確率雨量が取り得る不確実性を定量的に評価した。提案手法は、気候モデルに基づく降雨データを活用しており、物理的プロセスに基づくシミュレーション分析として位置づけられる。これに対し、清水ら[11]は確率限界法検定（森口, 1995）[12]に基づき、確率雨量の信頼区間を評価する統計的アプローチを採用している（図 3.1 3）。両者の検証を踏まえ、物理モデルに基づく極値分布の取り得る幅と、確率限界法による極値分布の取り得る幅との一致が確認[13]されており、確率雨量の不確実性に関する評価の妥当性が、物理的及び統計的両面から裏付けられている。これらの成果は、現在国土交通省が進めている気候変動を考慮した降雨量の変化倍率の設定等の検討において、気候予測モデルの活用を正当化する根拠として重要な意義を有する。

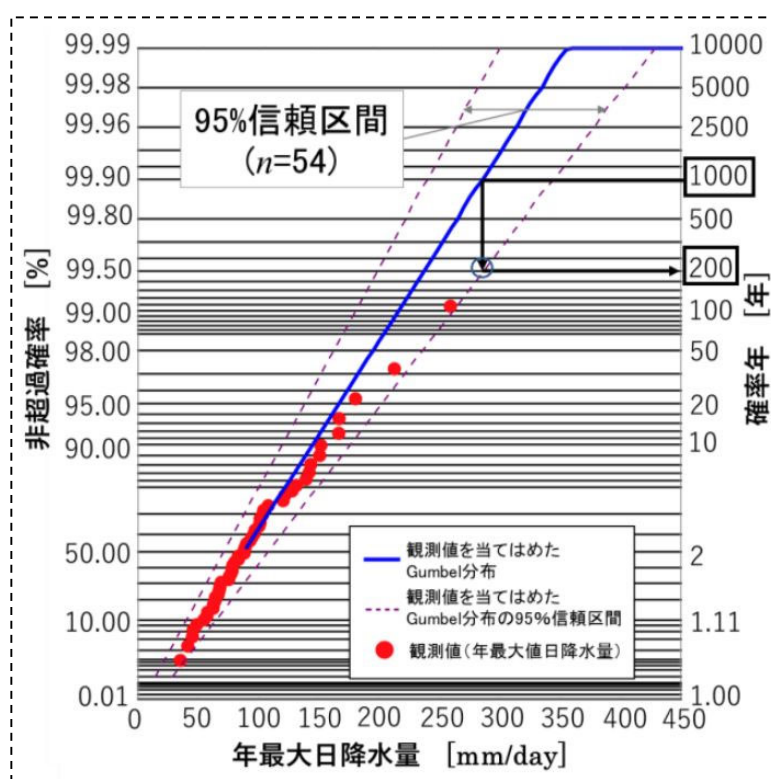


図 3.1 3 利根川水系八斗島観測所における 54 年間分の年最大日降水量[mm/day]及びこれら 54 個の観測値を当てはめた Gumbel 分布，観測値を当てはめた Gumbel 分布の 95%信頼区間を記入した確率紙 ※n は観測値の総数である。

※清水ら（2017）[10]より転載

3.3.3. まとめ

本項では、大規模アンサンブル気候予測データを活用し、不確実性を考慮した確率雨量の評価手法を提示するとともに、将来気候下における確率雨量の変化について分析を行った。本研究では、河川計画における評価期間である 60 年を 1 標本とし、リサンプリング手法により複数の気象シナリオを構築することで、確率雨量の不確実性を定量的に評価する手法を提案した。その結果、確率雨量の不確実性は、過去実験において約 160mm、将来実験において約 260mm の幅を持ち、中央値の比較では将来実験が過去実験の約 1.4 倍となることが示された。さらに、物理モデルに基づく極値分布の幅と、統計的手法（確率限界法）による評価結果との一致が確認され、物理・統計の両面から確率雨量の不確実性の妥当性が裏付けられた。

3.4. 流出量の不確実性の分析

本節では、大規模アンサンブルデータを用いた流出量の分析結果を示す。

3.4.1. 方法

3.4.1.1. 対象流域

北海道東部に位置する十勝川帯広地点流域（流域面積 2,678km²）を対象図 3.1 4 とし、下流端でのピーク流量を評価した。

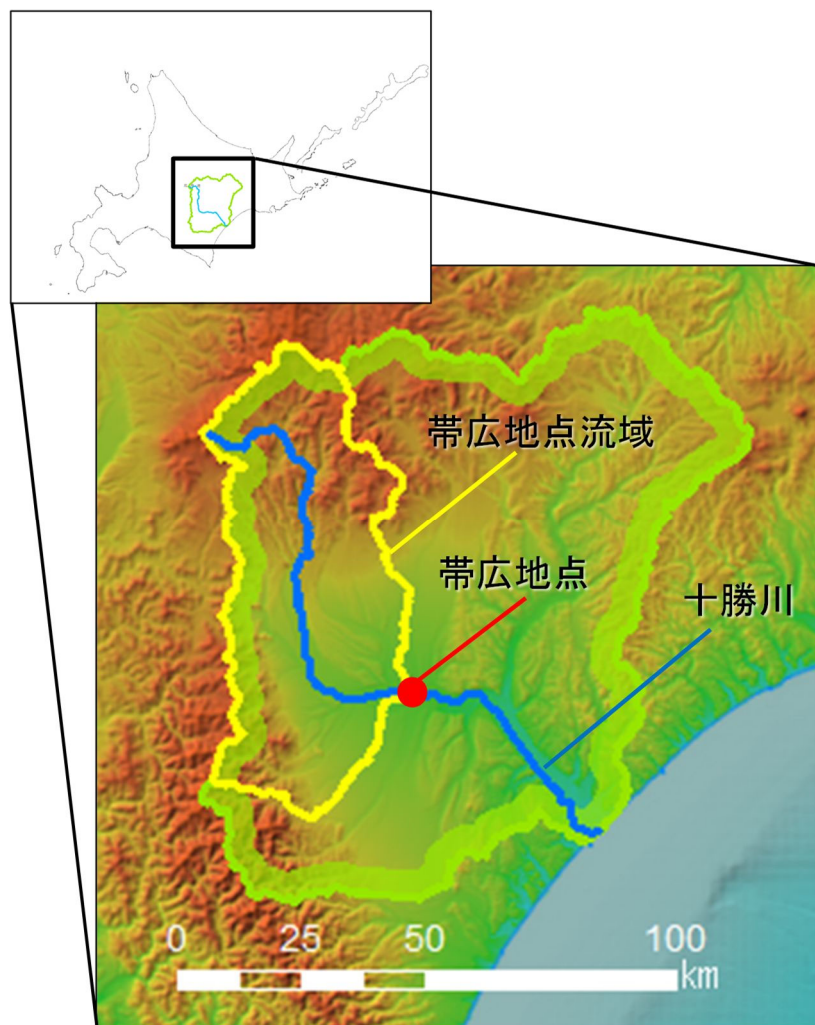


図 3.1 4 対象流域

青線が十勝川，緑線は十勝川流域，黄色線は国土交通省が管理する帯広観測所（赤丸印）を下流端とした場合の流域を示す。

3.4.1.2. 分布型流出計算モデルの概要

流出モデルは、北海道開発局において洪水予測に用いられている分布型2段タンクモデルを使用した[14]。モデルは、表面・中間流出成分を非線形貯留方程式で表す上段タンク、地下水流出成分を線形貯留方程式で表す下段タンクにより構成される((3.4)~(3.9)式)。格子サイズは、1km×1kmとした。

$$s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \quad (3.4)$$

$$\frac{ds_1}{dt} = r - q_1 - b \quad (3.5)$$

$$b = k_{13}q_1 \quad (3.6)$$

$$s_2 = K_{21}q_2 + k_{22} \frac{d}{dt}(q_2) \quad (3.7)$$

$$\frac{ds_2}{dt} = b - q_2 \quad (3.8)$$

$$q = q_1 + q_2 \quad (3.9)$$

s_1 : 1 段目タンク貯留高(mm), s_2 : 2 段目タンク貯留高(mm), r : 観測雨量(mm/h), q : 全流出高(mm/h), q_1 : 表面・中間流出高(mm/h), q_2 : 地下流出高(mm/h), b : 1 段目タンクから 2 段目タンクへの浸透供給量(mm/h), $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$: 貯留係数, k_{13} : 浸透係数, p_1, p_2 : 貯留指数, A : 流域面積(km²), $\bar{r}$: 平均雨量強度(mm/h), c_{11}, c_{12}, c_{13} : モデル定数(未知定数), f_c : 流域粗度, N : 等価粗度(s / m^{1/3}), i : 平均斜面勾配, $p_1 = 0.6, p_2 = 0.4648, \delta = 2.1$, X : 未知定数, h : 水深(m), B : 河道幅(m), n : 河道粗度, i : 河道勾配

流出域から河道内の流入後の流量 Q は、(3.10)~(3.12)式により算定した。

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = 0 \quad (3.10)$$

$$Q = hBv \quad (3.11)$$

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (3.12)$$

未知定数であるモデル定数 c_{11}, c_{12}, c_{13} と貯留係数 $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ の関係は(3.13)~(3.19)式となっている。

$$k_{11} = c_{11}A^{0.24} \quad (3.13)$$

$$k_{12} = c_{12}k_{11}^2 \bar{r}^{-0.2624} \quad (3.14)$$

$$k_{13} = c_{13} - 1 \quad (3.15)$$

$$k_{21} = \frac{c_1}{c_0} k_{13} [c_0 = (\delta/T_c)^2] \quad (3.16)$$

$$K_{22} = \frac{1}{c_0} k_{13} [c_1 = \delta^2/T_c] \quad (3.17)$$

$$C_{11} = X \times f_c \quad (3.18)$$

$$f_c = (n/\sqrt{i})^{0.6} \quad (3.19)$$

3.4.1.3. 使用データ

流出モデルへの入力降雨は、d4PDF（領域 20km モデル）で帯広地点の流域平均 72 時間雨量が年最大となる降雨事象を力学的ダウンスケーリングした領域 5km モデル[5]の出力値を用いた。ケース数は、過去実験 60 年(1951-2010)×50 メンバの計 3000 年、4°C昇温実験 60 年(RCP8.5 シナリオ 2090 年相当)×90 メンバの計 5400 年である。実績降雨は、地上観測所雨量及びレーダー・アメダス解析雨量の時間雨量データを使用した。

3.4.1.4. 流出パラメータ設定方法

流出パラメータは、以下の 2 通りの方法で設定し、流出計算を実施した。

i) 既往出水最適化ケース

実績降雨事例の再現計算により、再現対象降雨に対する最適パラメータを同定した。再現対象降雨は、H23.9 出水と既往最大降雨を観測した H28.8 出水の 2 事例を選定した。

ii) パラメータ関数化ケース

流出パラメータと降雨量の関係式を作成し、各気候モデル実験の降雨量に応じてパラメータを設定した。関係式の作成手順を以下に示す。

- ① 再現対象降雨事例の選定：観測データから既往出水における各観測地点のピーク流量と流域平均 72 時間雨量を整理し、再現対象降雨を 5 事例選定した（図 3.1 5）。
- ② 再現計算の実施：選定した降雨事例に対する最適パラメータを同定した。流出パラメータは、貯留係数 k_{11} 、 k_{12} に付随する未知定数 X を可変とし、それ以外のパラメータは同一値となるよう調整した。
- ③ 関係式の作成：各選定した降雨事例の流域平均 72 時間雨量とパラメータ X から、関係式を作成した（図 3.1 6）。

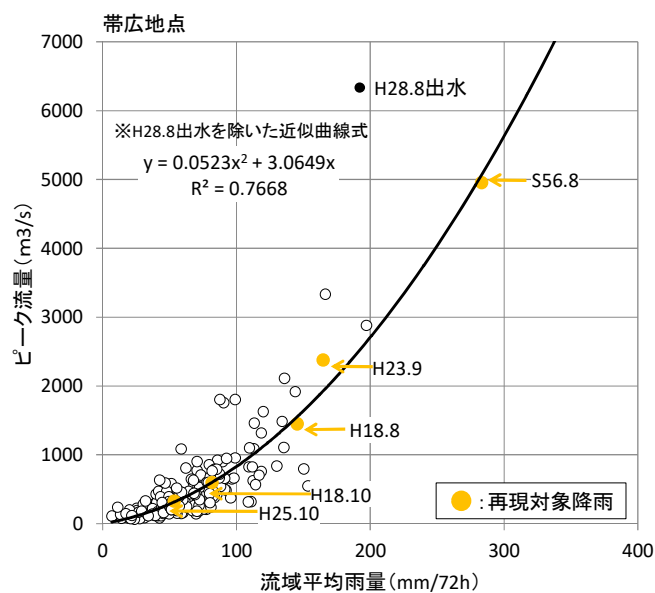


図 3.1 5 実績降雨の流域平均雨量とピーク流量の関係

十勝川帯広観測所における年最大流量とそのときの帯広観測所流域における 72 時間流域平均雨量の関係を示す。オレンジ色のプロットは、流出モデルによる再現計算の対象とした降雨イベントを示す。黒実線は、H28.8 出水を除いた近似曲線を示す。

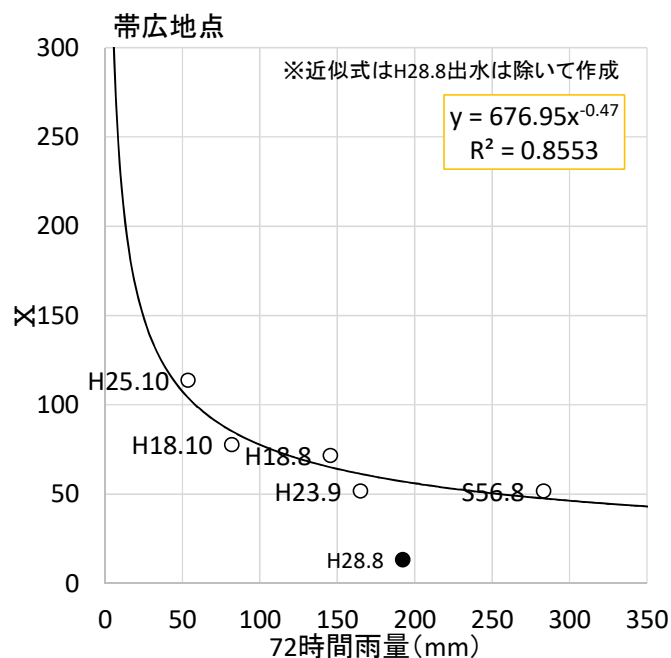


図 3.1 6 再現対象降雨イベントの流域平均雨量とモデル定数 X の関係

流出計算モデルによる再現計算の対象とした降雨イベントの流域平均 72 時間雨量と、モデル定数 X の関係を示す。●の H28.8 のプロットは参考。黒実線は、H28.8 出水を除いた近似曲線を示す。

3.4.2. 結果

3.4.2.1. パラメータ設定方法による観測実績再現性

観測実績の再現性は、実績年最大流量群に対する全過去実験ピーク流量の頻度及び累積度数の整合度合いにより評価した（図 3.17）。中央値に着目すると、既往出水最適化ケースでは、実績 $647 \text{ m}^3/\text{s}$ に対して、H23.9 出水で $1,294 \text{ m}^3/\text{s}$ 、H28.8 出水で $2,452 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、頻度分布は大きく乖離した。これは、降雨量の大きな降雨事象に対して最適化したパラメータを用いたため、降雨量の小さな実験ケースの流出量を過大に算出したためと考えられる。一方、パラメータ関数化ケースでは $746 \text{ m}^3/\text{s}$ と観測実績と近い値になり、頻度及び累積度数は整合し、再現性が大幅に向上した。

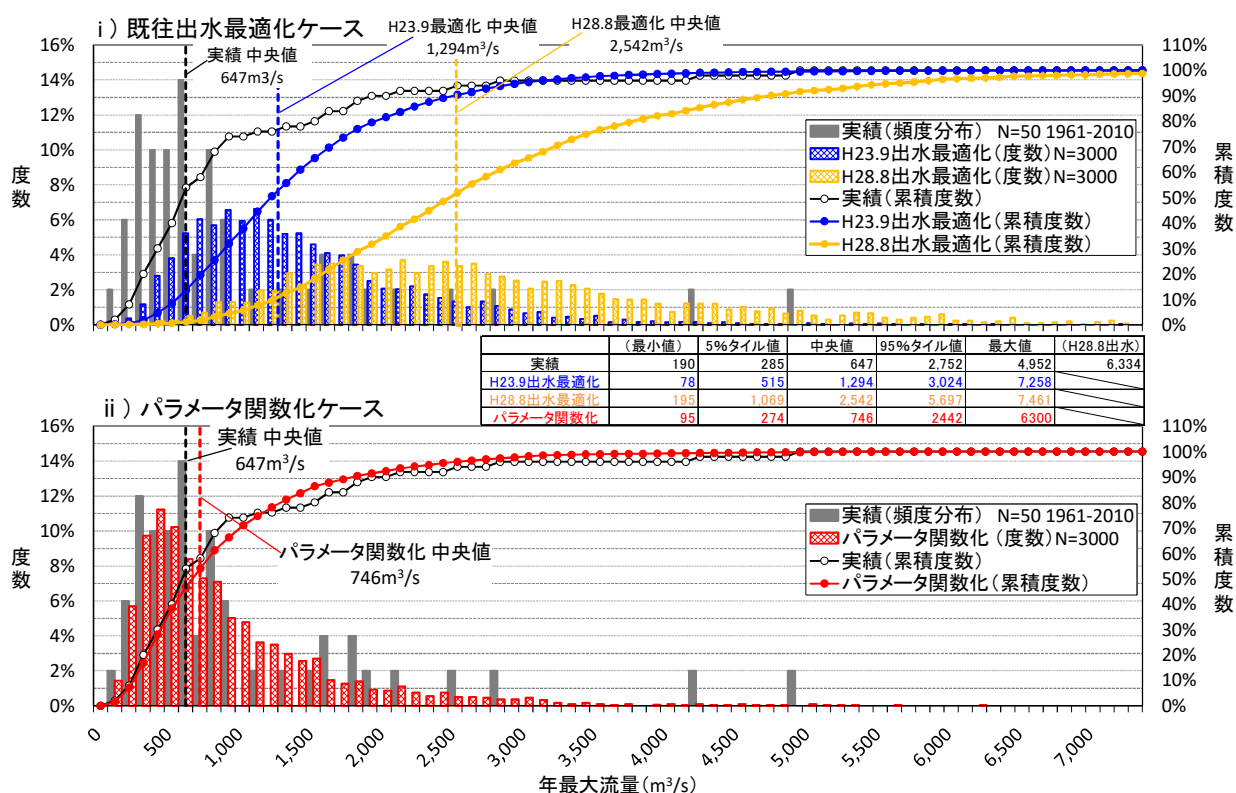


図 3.17 アンサンブル気候予測データを用いた流出解析によるピーク流量の頻度分布

アンサンブル気候予測データの過去実験 3000 ケースの流出解析結果より、帯広地点における各ケースのピーク流量の頻度分布を示す。棒グラフが $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 毎の度数、折れ線・プロットはその累積度数を示す。垂直の点線は、各ケースの中央値（50%ile 値）を示す。上段は i) 既往出水により最適化されたモデル、下段は ii) パラメータ関数化したモデルによる結果を示す。

3.4.2.2. 将来気候下における流出量

将来気候下における流出量は、前項で算出した領域 5km モデル出力降雨から別途算出された年超過確率 1/150 雨量の取り得る範囲のピーク流量で評価した（図 3.18）。ピーク流量は、 4°C 昇温実験で $2,278 \text{ m}^3/\text{s} \sim 9,485 \text{ m}^3/\text{s}$ の幅を有し、中央値は $4,852 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、過去実験 ($2,917 \text{ m}^3/\text{s}$) に対して 1.66 倍となった。また、年超過確率 1/150 雨量の中央値付近でピーク流量は、約 $3,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度の幅を有しており、降雨量が同一でも、降雨の時空間分布特性により、流出量が大きく変動することが示唆された。

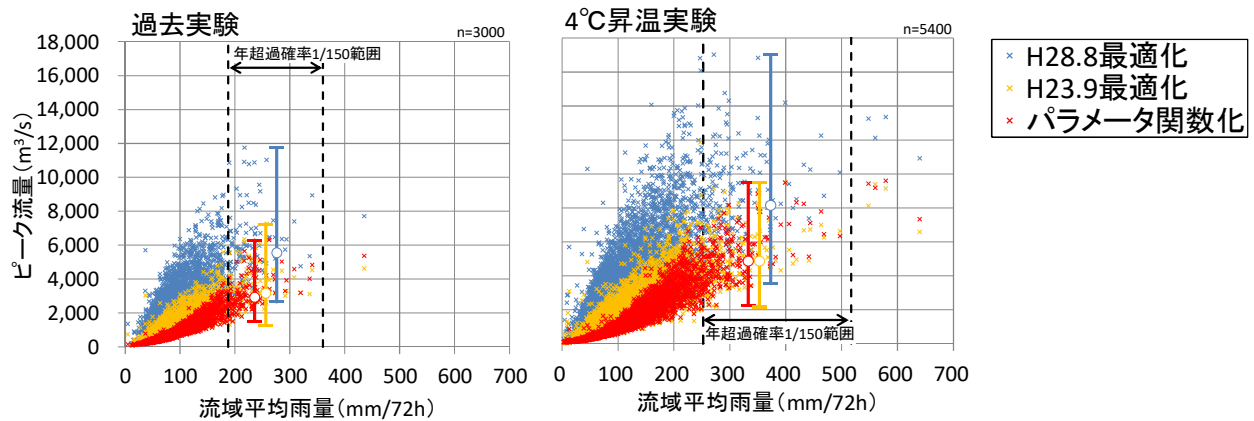


図 3.1 8 アンサンブルデータ気候予測データの流域平均雨量と流出解析ピーク流量の関係

プロットは、青色が H28.8 出水最適化定数、黄色が H23.9 出水最適化定数、赤色がパラメータを降雨量との関数とした流出解析結果であり、左図が過去実験 3000 ケース、右図が将来実験 5400 ケースのプロットを示す。黒点線の範囲は不確実性を考慮した場合の年超過確率 1/150 の範囲、青・黄・赤色の垂直線はその範囲に含まれるピーク流量の範囲を示す。

3.4.3. まとめ

本節では、大規模アンサンブル気候予測データを用いた流出量の分析方法及び結果を示した。多様な降雨外力に対する流出解析の精度向上を目的として、降雨量に応じたパラメータ設定手法を導入した結果、実績年最大流量の頻度分布に対する再現性が向上することが確認された。十勝川帯広地点において、年超過確率 1/150 の降雨条件下でのピーク流量は、将来気候下において約 1.66 倍に増加することが示された。また、同一の降雨量であっても、降雨の時空間分布の違いによりピーク流量に差が生じることが明らかとなった。これらの結果は、気候変動による流出量増加リスクを評価する際には、単なる降雨量の増加だけでなく、降雨の時間的・空間的集中といった降雨特性の変化にも十分に考慮する必要があることを示している。

3.5. 第3章のまとめ

本章では、河川計画における確率雨量の評価に対して、大規模アンサンブル気候予測データを活用することで、降雨の時空間分布に内在する不確実性を確率的に評価し、観測データの標本規模に起因する確率雨量の不確実性を定量的に評価する手法を提案した。年最大降雨イベントの抽出に際しては、RCM5 への高解像度ダウンスケーリングを行うことで、実績降雨のパーセンタイル値の再現性が向上することを示した。また、実績降雨に基づくバイアス補正により、モデル値の再現性を高める手法についても検証を行った。確率雨量の評価にあたっては、60 年を 1 標本としたリサンプリング手法により多数の気象シナリオを構築し、Gumbel 分布及び GEV 分布を用いて不確実性を評価した。その結果、将来気候下においては、1/150 確率雨量が現在の約 1.4 倍に増加する可能性があることが示された。さらに、大規模アンサンブルデータを用いた流出解析においては、降雨量に応じたパラメータ設定手法を導入することで、実績流量の再現性を向上させるとともに、将来気候下ではピーク流量が約 1.66 倍に増加することが明らかとなった。確率雨量の不確実性に関する評価の妥当性は、本研究における物理的手法及び既往研究に基づく統計的手法の双方から裏付けられており、これらの成果は、現在国土交通省が進めている気候変動を考慮した降雨量の変化倍率の設定等の検討において、気候予測モデルの活用の妥当性を示す重要な根拠となるものである。

References

- [1] 「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」．[Online]．入手先：
<http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html>
- [2] 国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部，「気候変動適応策に関する研究（中間報告）」，no. 749, 2013.
- [3] 立川康人，宮脇航平，田中智大，萬和明と市川温，「d4PDF を用いた年最大ピーク流量の確率分布の将来変化の分析」，*水文・水資源学会研究発表会要旨集 水文・水資源学会 2017 年度研究発表会*，水文・水資源学会，2017，p. 56. 参照：2025 年 8 月 18 日．[Online]．入手先：
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jshwr/30/0/30_56/_article/-char/ja/
- [4] 田中茂信，「d4PDF を用いた利根川流域降水量の極値評価」，*京都大学防災研究所年報. B*, vol. 60, no. B, pp. 757–764, 2017.
- [5] 山田朋人ほか，「北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化」，*河川技術論文集*, vol. 24, pp. 391–396, 2018.
- [6] 気象研究所，「気象研究所非静力学地域気候モデルによる日本付近の将来気候変化予測について，気象研究所技術報告，第 73 号」．気象研究所技術報告，2015 年．
- [7] C. Piani, J. O. Haerter と E. Coppola，「Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe」，*Theor Appl Climatol*, vol. 99, no. 1–2, pp. 187–192, 1 月 2010, doi: 10.1007/s00704-009-0134-9.
- [8] 北野利一，高橋倫也と田中茂信，「気候モデルから得られる多数のアンサンブルデータを用いた確率降水量の推定法」，*土木学会論文集 B1 (水工学)*, vol. 73, no. 4, p. I_1-I_6, 2017.
- [9] 北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会，「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会 中間とりまとめ」．2022 年．
- [10] 舩屋繁和ほか，「実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく不確実性を考慮した将来気候下での確率雨量」，*土木学会論文集 b1 (水工学)*，vol. 74, no. 5, p. I_121-I_126, 2018, doi: 10.2208/jscejhe.74.5_I_121.
- [11] 清水啓太，山田朋人と山田正，「確率限界法検定に基づく確率分布モデルの信頼区間を導入した新しい水文頻度解析手法」，*土木学会論文集 B1 (水工学)*, vol. 74, no. 4, p. I_331-I_336, 2018.
- [12] 森口繁一，「確率表現関数の検定について—Kolmogorov-Smirnov 検定を考え直す—」，*日本統計学会*, vol. 25, pp. 233–244, 1995.
- [13] T. J. Yamada，「Adaptation measures for extreme floods using huge ensemble of high-resolution climate model simulation in Japan」，*Summary report on the eleventh meeting of the research dialogue*, 2019，pp. 28–30. 参照：2025 年 8 月 18 日．[Online]．入手先：
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2.5Tomohito_Yamada_presentation_ver1.5plus.pdf
- [14] （財）北海道河川防災研究センター，「実時間洪水予測システム【解説書】」．2004.

4. 堤防決壊発生の不確実性に関する研究

第4章の概要 本章の目的は、水害リスク評価における堤防決壊条件として、堤防決壊プロセスに含まれる不確実性を考慮した破堤確率評価モデルを構築することである。洪水ハザードマップ作成等を目的とした氾濫解析では、堤防決壊条件は計画高水位（HWL）に達した時点とする決定論的な手法が採用されている。一方、実際の堤防決壊は越水や浸透、侵食等複数の要因が複雑に関連する現象であり、必ずしも HWL への到達によって破堤が生じるわけではない。また、堤防は縦断的な土質、構造の不均質性を有し、堤防に対する外力である水位も時空間的な変化を伴うものであるため、堤防決壊地点を事前に特定することは困難である。本章では、これらの不確実性のうち確率として測定可能なものを評価し、堤防決壊条件を破堤確率として評価するモデルを構築した。我が国で主要な破堤要因である越水及び浸透による破堤プロセスをモデル化し、それぞれのプロセスに含まれる不確実性のうち確率的に評価可能な要素を確率変数として扱ったモンテカルロ法により破堤確率を評価するモデルを構築した。構築したモデルを帯広市街地に隣接する十勝川及び札内川の堤防に適用し、破堤要因別の破堤確率の縦断分布を示した。

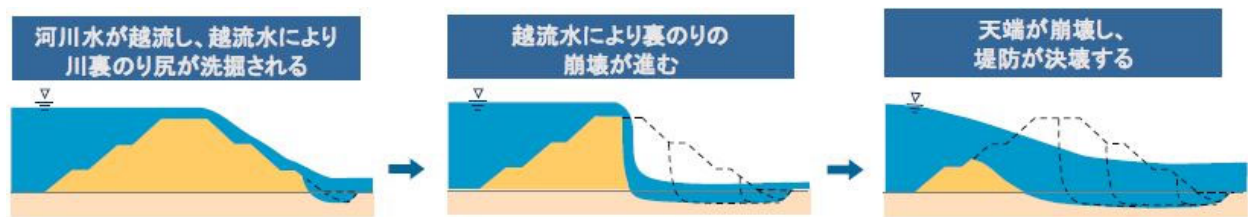
4.1. はじめに

4.1.1. 研究背景

水害リスクの3要素のうちハザードは、堤防決壊による河川からの氾濫及び氾濫原(住宅地や農地等)における氾濫流をモデル化した氾濫解析により評価するのが一般的である。洪水ハザードマップ作成等を目的とした氾濫解析では、河川水位が計画高水位（HWL）に達することが堤防決壊の条件となっている。一方、実際の堤防決壊は河川水位が HWL を超過し、堤防天端に達した時点で越水が発生し、越流水による堤防法面の侵食がある段階まで進行した時点で発生することが多い。このことから、洪水ハザードマップの浸水深は、堤防決壊の条件をより安全側に設定して評価したものといえる。一方、効率的な被害軽減対策の検討に向けた水害リスクの定量評価を目的とした場合、この堤防決壊の条件は被害額や人的被害が過大評価となっている可能性がある。水害リスクの定量評価に向け、実現象に近い堤防決壊の条件設定が必要である。

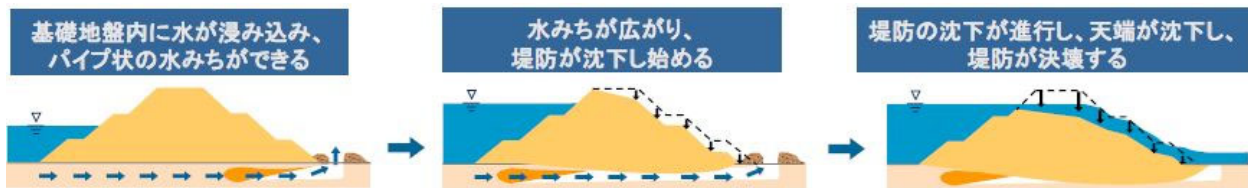
日本における堤防決壊のメカニズムは、(a)河川水の越水による堤防決壊、(b)河川水の浸透による堤防決壊、(c)河川水の侵食・洗堀による堤防決壊の3つのモードが主要因となっている。それぞれの破堤モードのイメージ図を図 4.1 に示す。(a)河川水の越水による堤防決壊は、河川水が堤防を越流した際に、越流水により裏法尻から洗堀が進行し、天端が崩壊することにより、堤防決壊に至る。(b)河川水の浸透による堤防決壊は、(1)パイピング破壊と(2)浸透破壊に分けられる。(1)パイピング破壊は、河川水位の上昇による水圧上昇により基礎地盤内にパイプ状の水みちが発生し、基盤構成材が流出することで堤防が沈下し、堤防決壊に至る。(2)浸透破壊は、降雨や河川水位の上昇により堤防内の水位が上昇し、堤防構成材の間隙水圧が上昇し、土粒子間の摩擦力が減少することで、すべり面が形成され、堤防が崩壊することで堤防決壊に至る。(c)河川水の侵食・洗堀による堤防決壊は、河川水により堤防の表側法面の侵食・洗堀が発生し、それが進行することによって堤防が崩壊し、堤防決壊に至る。

(a)河川水の越水による堤防決壊



(b) 河川水の浸透による堤防決壊

(1) パイピング破壊



(2) 浸透破壊



(c) 河川水の侵食・洗掘による堤防決壊

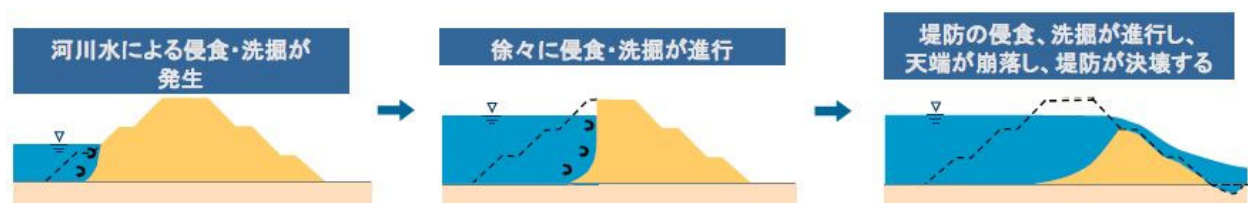


図 4.1 堤防決壊のメカニズム

※国土交通省資料より

(<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h24/hakusho/h25/html/n2721ca0.html>).

令和元年に東日本を中心に大きな被害が発生した台風 19 号による洪水では、越水による堤防決壊が 86%を占め、続いて浸食が 9%、浸透が 1%を占めることが報告されている（図 4.2）[1]。また、国管理河川を対象とした堤防調査から、越水が発生した箇所においても 81%が決壊に至っていないことが確認されている。このように、実際の堤防はHWLに対して余裕高を考慮した設計がなされており、特に国管理河川の多くの堤防は管理時の利便性やサイクリング等の利活用を目的とした天端舗装もなされている。そのため、HWLを超過し、さらに越水が発生した場合においても、決壊に至らないケースが多くあると考えられる。河川計画上はHWLが堤防の安全が保証される範囲となるが、氾濫原における浸水リスクの評価にあたっては、これら堤防の質的な強度を踏まえた評価が必要となる。

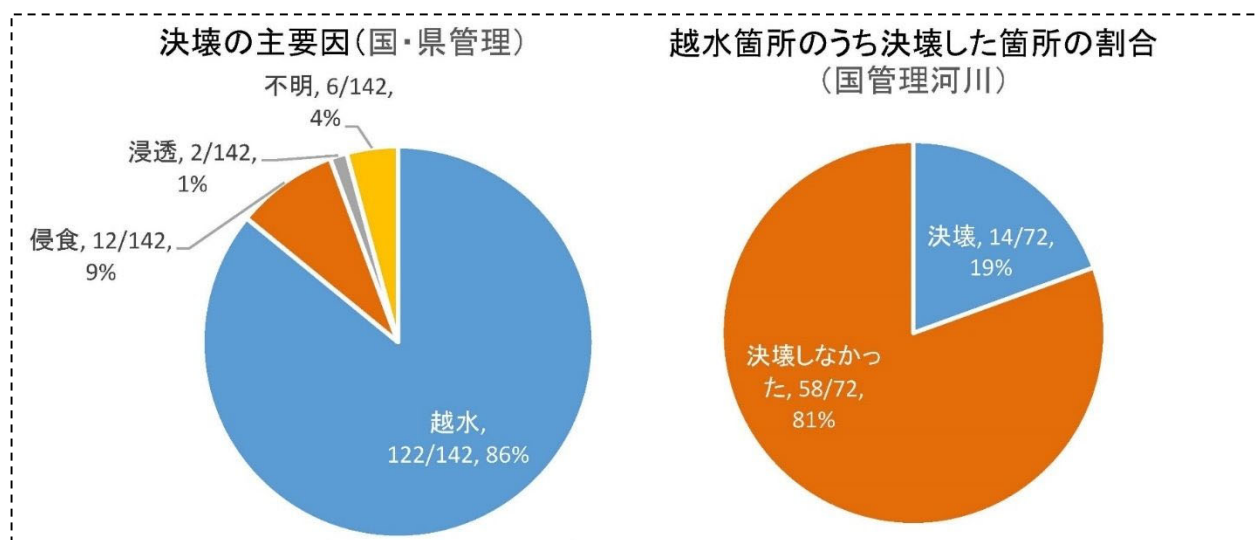


図 4.2 台風 19 号による被災要因

※令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会,第 3 回,資料 2 より。

堤防決壊条件の設定方法として、堤防決壊評価地点における堤防の土質や構造を調査し、堤防決壊に至る条件を決定論的に設定する手法が考えられる。一方、堤防は縦断方向に長大な構造物であり、土質構造は不均質性を有しており、水害リスク評価における対象地域の堤防区間すべての調査を実施することは現実的ではない。これに対し、オランダ、イギリス、アメリカ等では、堤防の力学的強度の変動性を考慮し、破堤現象を確率的に捉える方法が採用されている[2]。このように、水害リスクの定量評価においては破堤確率の導入が有効と考えられる。国内においても、田端ら[3]は浸透（堤体漏水）と裏法の滑りを対象に水理解析による破堤確率を算出し、実洪水時における被災箇所との再現検証を実施している。Wang ら[4]は、洪水時の堤防に作用する外力を降雨の不確実性から算出し、さらに堤防の土質材料について粘着力と内部摩擦角の不均質性を確率分布として考慮することによる、堤防の信頼性評価を提案している。一方で、破堤確率の評価においては、外力として作用する水位や降雨の不確実性と、堤防の力学的特性の空間的不均質性の双方を同時に考慮する必要があるが、これらを包括的に取り扱った研究は限られている。そのため、国内の水害リスク評価においては、確率論的な破堤発生条件の導入が進んでおらず、依然として決定論的な手法に依存しているのが現状である。本研究は、こうした課題を踏まえ、日本における主要な破堤メカニズムである越水及び浸食について、各破堤プロセスに内在する不確実性のうち確率として測定可能なものを評価し、堤防決壊条件を破堤確率として評価するモデルを提案するものである。

4.1.2. 研究目的

本章における研究目的は、水害リスク評価における堤防決壊条件として、不確実性を考慮した破堤確率評価モデルを構築することである。モデルの構築にあたっては、日本における主要な破堤メカニズムである越水及び浸食を対象とし、各プロセスによる破堤をモデル化するとともに、各過程に内在する不確実性のうち確率として測定可能な要素を反映可能な方法を提案する。

4.2. 越水による破堤確率の評価

本項では、はじめに越水による破堤発生の判定モデルを構築する。その上で、堤防決壊モデルに含まれる不確実性を分析し、モンテカルロ法による破堤確率の評価結果を示す。

4.2.1. 方法

4.2.1.1. 対象流域

北海道東部に位置する十勝川水系を対象流域とした。対象流域では平成 28 年北海道豪雨において、札内川で侵食による破堤が 2 箇所、音更川では堤防の侵食が 1 箇所発生した実績があり、十勝川の帯広観測所地点では HWL から 19cm となる既往最高水位を観測した。本研究では、破堤した場合に甚大な被害が想定される帯広市街地に隣接する十勝川右岸 KP53.8～KP62.8 区間、札内川左岸 KP3.2～KP16.6 区間を評価対象とした(図 4.3)。当該区間の河道のセグメント区分は、十勝川はセグメント 2-1、札内川はセグメント 1 に分類される。河川整備基本方針(令和 4 年 9 月変更)における計画高水流量は、十勝川で 7,600m³/s、札内川で 2,900m³/s である。

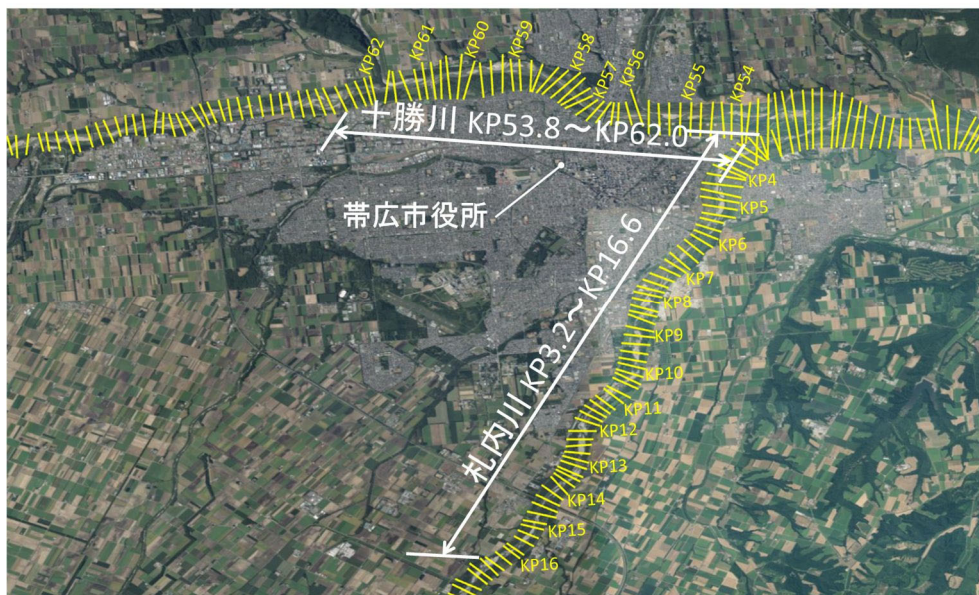


図 4.3 評価対象区間

4.2.1.2. 越水破堤判定モデルの構築

本研究では、河川水位が堤防高を超過し、洪水流が法面を流下、それにより法面が侵食され、堤防が決壊するプロセスを仮定し、このプロセスに基づいた越水破堤判定モデルを構築した（図 4.4）。構築したモデルの概要を図 4.5 に示す。①左図より、水位が天端高を超過し越水が発生している時間を算出する。②中央図より、越水時の天端流速に基づき法面流速を算出する。この図は、法面流速が法面侵食の限界流速を超過している時間に法面侵食が進行している状況を示している。③右図より、法面に作用する仕事量の累積が閾値に達した時点で堤防決壊に至る。

具体的には(4.1), (4.2)式より越水時の堤防の天端上の水位に基づき、天端における流速から越水流量を算出した。

$$u_t = \sqrt{gh_t} \quad (4.1)$$

$$q_t = u_t h_t \quad (4.2)$$

法尻末端における流速 $u_{slope,t}$ は、越水流量 q_t と法面勾配 α に基づき、(4.3)式により算出した。このとき、粗度係数 f は 0.08 とした。

$$u_{slope,t} = \left(\frac{8gq_t \sin \alpha}{f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.3)$$

次に Dean ら[5]が堤防侵食に影響を与える指標として提案した法面の作用する仕事量の累積値を用いて堤防決壊の発生有無を判定した。ある時点における堤防に作用する仕事量 E_W を(4.4)式で表す。

$$E_W(t) = K_W(W_t - W_c) = K_W \beta_W (u_{slope,t}^3 - u_{c,W}^3) \quad (4.4)$$

このとき、 K_W は侵食に作用する仕事量の係数、 β_W は水の質量密度とせん断応力を含む項をまとめた係数、 $u_{c,W}$ は法面に作用する仕事量が生じる限界流速であり、 $u_{slope,t} > u_{c,W}$ のとき法面に作用する仕事が発生する。良質の草に覆われた場合の侵食発生の限界値は実スケールの実験値を用いた解析結果として、

$$E_W(t) = K_W(W_t - W_c) = K_W \beta_W (u_{slope,t}^3 - u_{c,W}^3) \quad (4.5)$$

と示されており、本研究でもこの数値を用いた。なお、構築したモデルは堤体内部の土質特性や天端舗装、法面の樹木等の植栽の影響を見込んでいない。

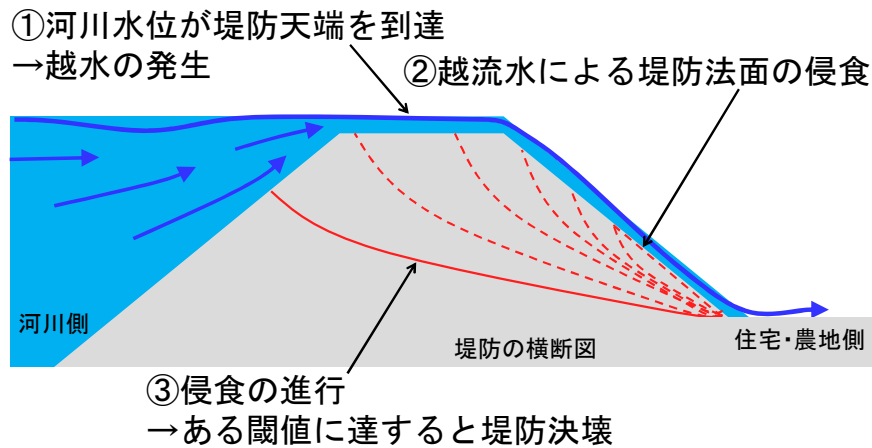


図 4.4 モデル化した破堤プロセス

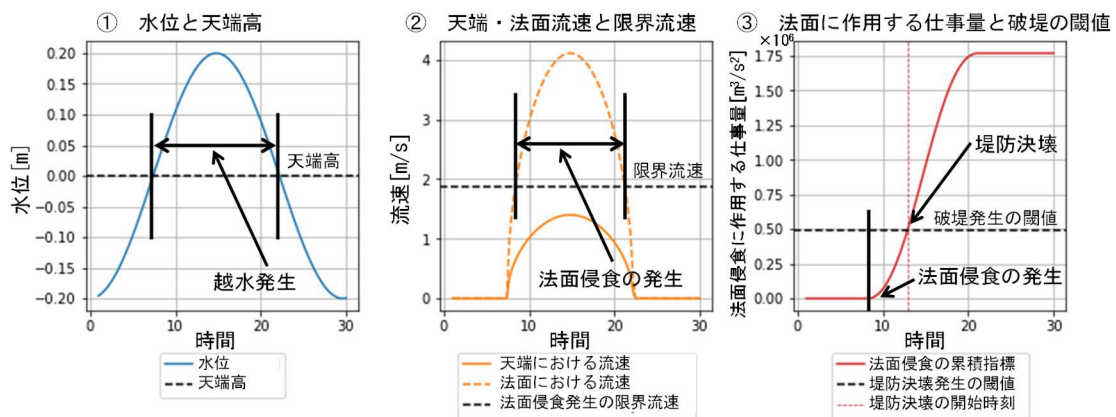


図 4.5 越水による堤防決壊判定モデルの概要

4.2.1.3. 堤防決壊モデルに含まれる不確実性の分析

構築した越水破堤判定モデルに含まれる要素のうち、河川水位 (a)、堤防高 (b)、法面の侵食 (c) に含まれる不確実性 (図 4.6) を評価した。a～c の各要素が有する不確実性とその評価方法を以下に示す。

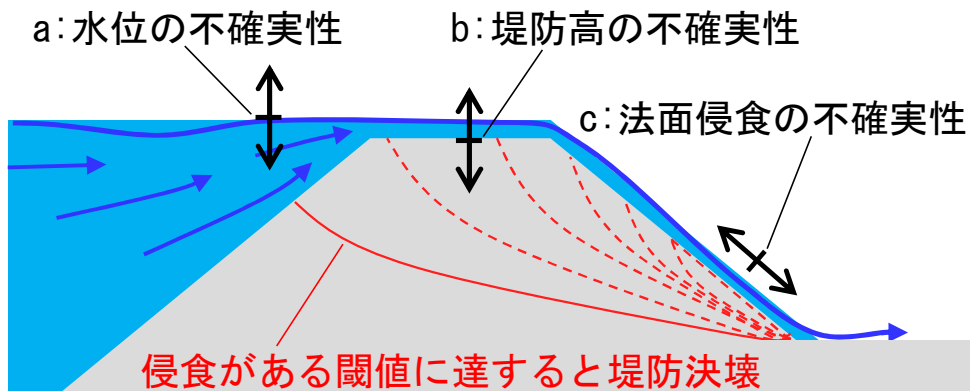


図 4.6 越水による破堤の流れと不確実性

水位—流量関係

氾濫解析では、流出解析に基づく河川流量を流量と水位の関係式（以下、H-Q 式）に基づき水位に換算する。一方、実洪水では湾曲外岸で水位上昇が生じる等、流量のみから正確に水位を求めることは難しい。そこで本研究では、流量と水位の関係をモンテカルロ法による確率評価において乱数として与える変動値の一つとした。図 4.7 は、水位の不確実性の評価の例であり、縦軸を水位、横軸を流量とし、H-Q 式と実際の観測水位をプロットしたものである。例えば、 $2,250\text{m}^3/\text{s}$ 付近の H-Q 式に基づく水位と観測水位との差は約 0.7m である（図 4.7 矢印）。この差を観測実績毎に整理し、その平均と分散を算出した。ここでの分散は流量規模に応じて変化するものであり、特に越水が生じる規模の出水では観測と H-Q 式に乖離が大きく、分散はより増大すると考えられる。詳細な評価を行うには流量等の関数とした分散の可変な設定方法が求められる。本研究では手法の提案に主眼を置き、分散はどの流量規模においても一定の値を設定している。

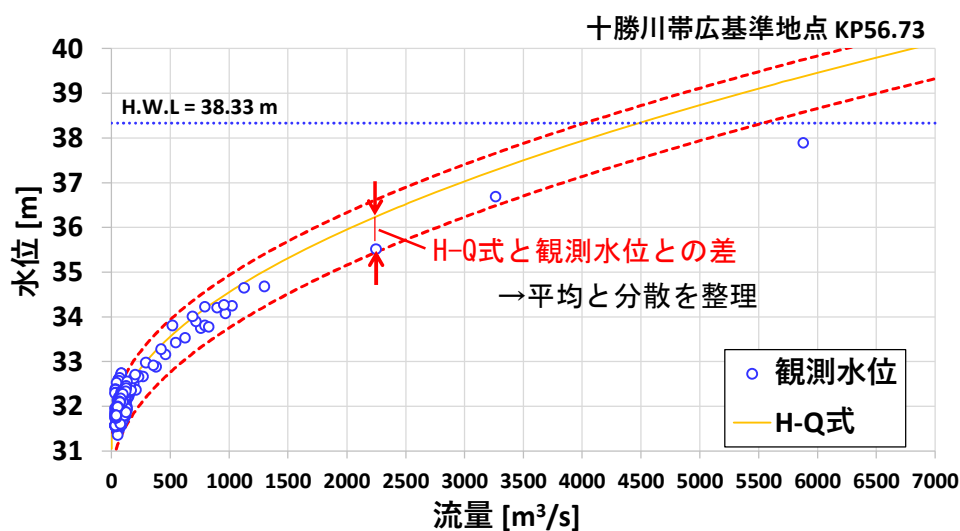


図 4.7 水位—流量関係が有する不確実性

堤防高

氾濫解析では、堤防決壊の評価地点を設定（直轄河川の場合は概ね約 200m 間隔）し、評価地点の堤防高と水位の関係から越水発生の有無を判定する。一方、堤防高は施工時の余盛や経年的な地盤沈下等により縦横断方向に不均質性を有しており、評価地点間で局所的な越水が発生する可能性がある。そこで本研究では、堤防決壊の評価地点間における堤防高を、モンテカルロ法による確率評価において乱数として与える変動値の一つとした。図 4.8 は、堤防高の不確実性の評価の例であり、縦軸を標高、横軸を河川の距離標とし、計画堤防高及び実際の堤防高を示したものである。実際の堤防高は LP 測量データを基に整理した。例えば、KP58 付近における計画堤防高と実際の堤防高の差は約 1.3m である（図 4.8 矢印）。この差を評価対象とする全堤防区間で整理し、その平均と分散を 200m 毎に算出した。

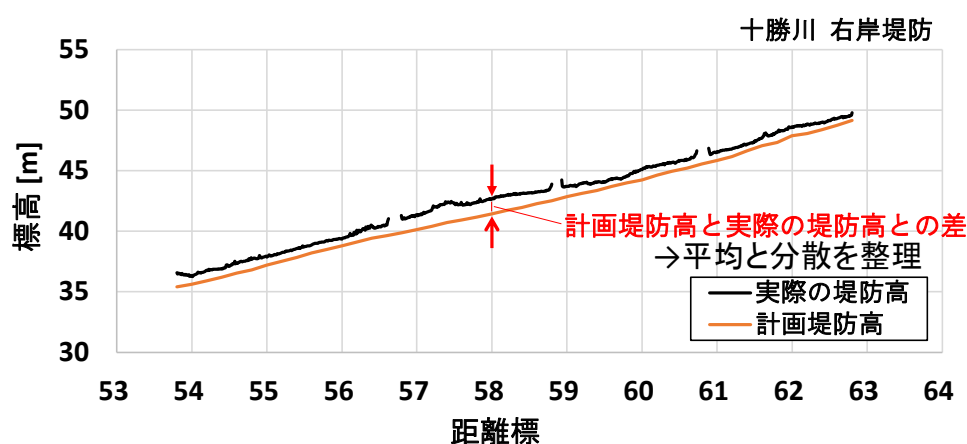


図 4.8 堤防高が有する不確実性

法面の侵食

越水の発生により、堤防天端を乗り越えた洪水流が堤防法面を流下し、法面の侵食が進行する。堤防法面は主に張芝となっており、その生育状況等により耐侵食性は変化する。本研究では、この堤防法面の張芝が有する耐侵食性の不確実性をモンテカルロ法による確率評価において乱数として与える変動値の一つとした。張芝の耐侵食性には、既往研究[5]に基づき芝の生育状況が良好な場合の侵食発生の限界流速 $u_{cW} = 1.8(m/s)$ とその分散 $\sigma = 0.38(m/s)$ を用いた。

4.2.1.4. モンテカルロ法による破堤確率の評価

各評価地点における破堤確率の算定にあたり、田端ら[3]で提案された手法を参考に、モンテカルロ法により破堤の発生判定モデルを繰り返し計算し、破堤確率を算定するモデルを構築した。本研究における破堤確率算定の流れを図 4.9 に示す。前節で不確実性として評価した水位、堤防高、堤防法面の状態は、平均と標準偏差を持つ正規分布に従う乱数として与えた。(4.6)式は、正規分布の確率密度関数を表している。ピーク水位については、ハイドログラフのピーク流量を(4.7)式により水位に変換し、水位には前節で整理した H-Q 式の標準偏差を用いて、(4.8)式の正規分布に従った乱数を発生させた。堤防高についても、計画堤防高と実際の堤防高の差の標準偏差を用いて、(4.9)式の正規分布に従った乱数を発生させた。

$$f(x) = (2\pi\sigma^2)^{-1/2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}(x - \mu)^2\right) \quad (4.6)$$

$$h_t = \sqrt{\frac{Q_t}{a}} - b \quad (4.7)$$

$$h_{peak} \sim N(h_t, \sigma_{H-Q}) \quad (4.8)$$

$$h_{bank} \sim N(h_t, \sigma_{bank}) \quad (4.9)$$

ここで、 h_{peak} は対象とするハイドログラフのピーク値に対する確率変数、 h_{bank} は各評価地点における堤防高に対応する確率変数である。 $h_t > h_{bank}$ のとき、(4.1)及び(4.2)式から越流水の流速。(4.3)式より堤防法面での流速を算出する。最後に、(4.4)式により仕事量の累積が破堤の閾値を超過するかどうかを判定する。(4.4)式における侵食発生の限界流速 $u_{c,W}$ も、乱数により決定している。

堤防決壊確率 $P_{failure}$ は(4.10)式により算定した。

$$P_{failure} = n_{failure}/N \quad (4.10)$$

ここで、N はモンテカルロ法による総計算回数、 $n_{failure}$ はそのうち堤防決壊と判定される回数を表す。本研究では、総計算回数を 10,000 回とした。境界条件としたハイドログラフの形状はサインカーブを仮定し、周期を $T = 30(hr)$ とし、(4.11)式より作成した。 h_{peak} を $500\text{m}^3/\text{s}$ 刻みで変化させ、破堤確率を評価した。

$$h_t = \left(\sin \frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \times h_{peak}, \left(0 - \frac{1}{4}T \leq t \leq T + \frac{1}{4}T\right) \quad (4.11)$$

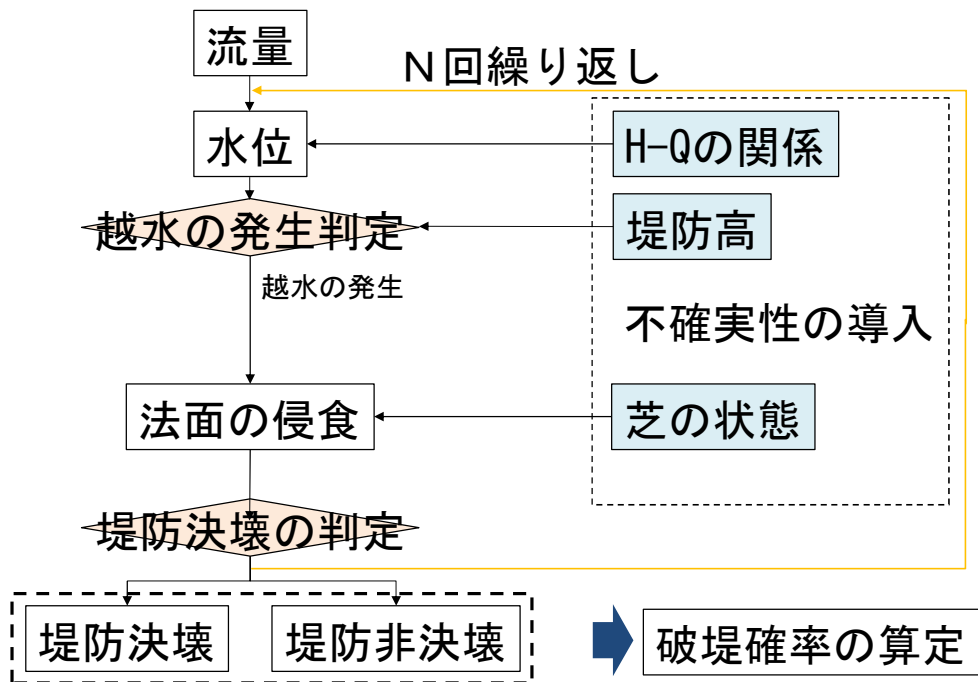


図 4.9 越水による破堤確率算定の流れ

4.2.2. 結果

各評価地点における流量 $7,000\text{m}^3/\text{s}$ (なお,平成28年8月出水における十勝川帯広地点での $6,334\text{m}^3/\text{s}$, 札内川南帯橋地点での $2,458\text{m}^3/\text{s}$ が既往最大)の場合の破堤確率を図4.10に示す。破堤確率は,十勝川において $10^{-6}\sim 10^{-2}$ 程度,札内川において $10^{-5}\sim 10^{-3}$ 程度となった。札内川 KP6.5 付近では水位が堤防高を超過しており,破堤確率は 10^{-3} 程度となっている。このように,本手法により越水が発生しても堤防決壊に至らない場合があるという実現象を反映した堤防決壊の条件が設定可能となった。十勝川 KP60.8 付近では橋梁の取り付け区間を含んでおり堤防高が他区間より高くなっている。破堤確率は前後区間に比べて小さく, 10^{-6} 程度となっている。このような評価地点間の破堤確率の違いが生じる要因に着目し,破堤判定プロセスに組み込んだ条件や不確実性の要素の感度分析等を進めることで,本手法は堤防決壊の防止に効果的な対策の抽出に活用できると考えられる。また,構築したモデルは堤体内部の土質特性や天端舗装,法面の樹木等の植栽の影響を見込んでいないが,図4.9に示すフローに評価モデルや係数として組み込むことでこれらの要素を考慮した破堤確率の評価が可能である。

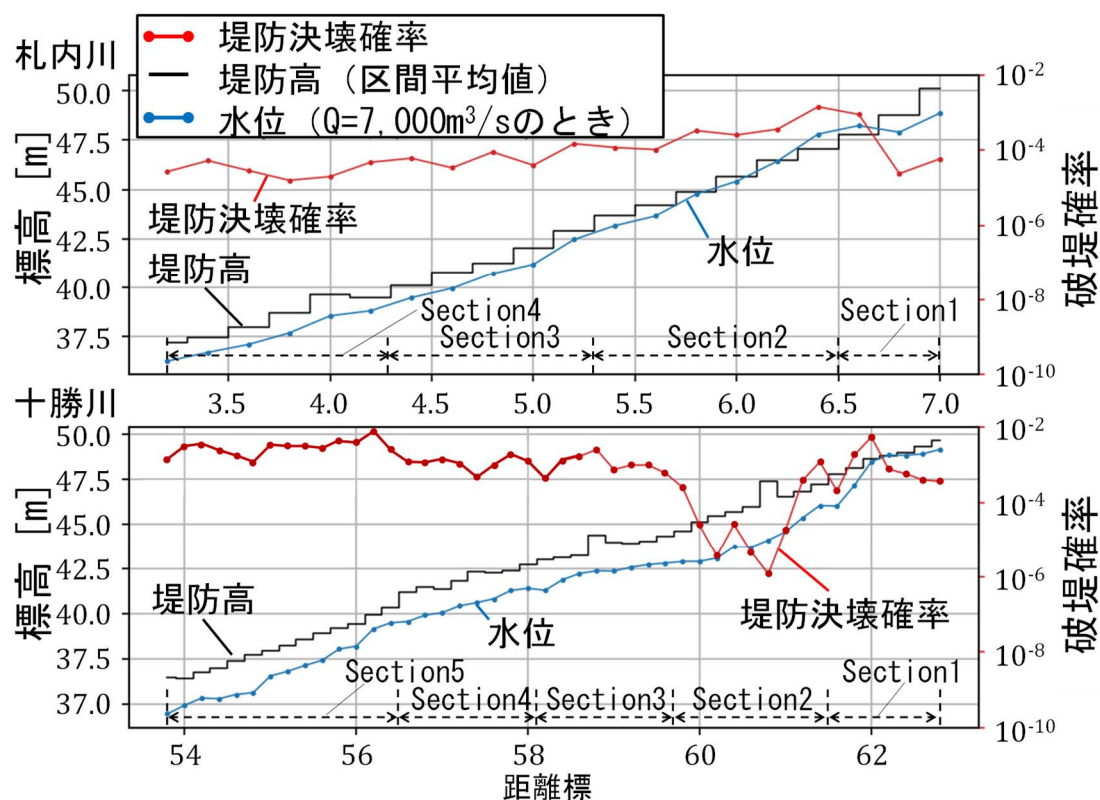


図 4.10 各評価地点における破堤確率算定結果

不確実性として導入した要素が有する破堤確率への影響について感度分析を実施した。十勝川 KP56.4 地点における結果を図 4.1 1 に示す。感度分析の結果、不確実性として3要素（水位－流量関係，堤防高，法面の耐侵食性）を考慮したケースと水位－流量関係のみを考慮したケースがほぼ一致している結果となった。また，不確実性として堤防高のみ，法面の耐侵食性のみを考慮したケースと不確実性を考慮しないケースが近接する結果となった。これより当該地点における破堤確率は水位－流量関係の不確実性が支配的な要素と捉えることができる。このように，本手法で提案した不確実性を考慮した破堤確率評価手法は，堤防決壊に影響する要因の特定を可能とし，堤防決壊発生の不確実性の低減に効果的な対策の検討への活用が考えられる。

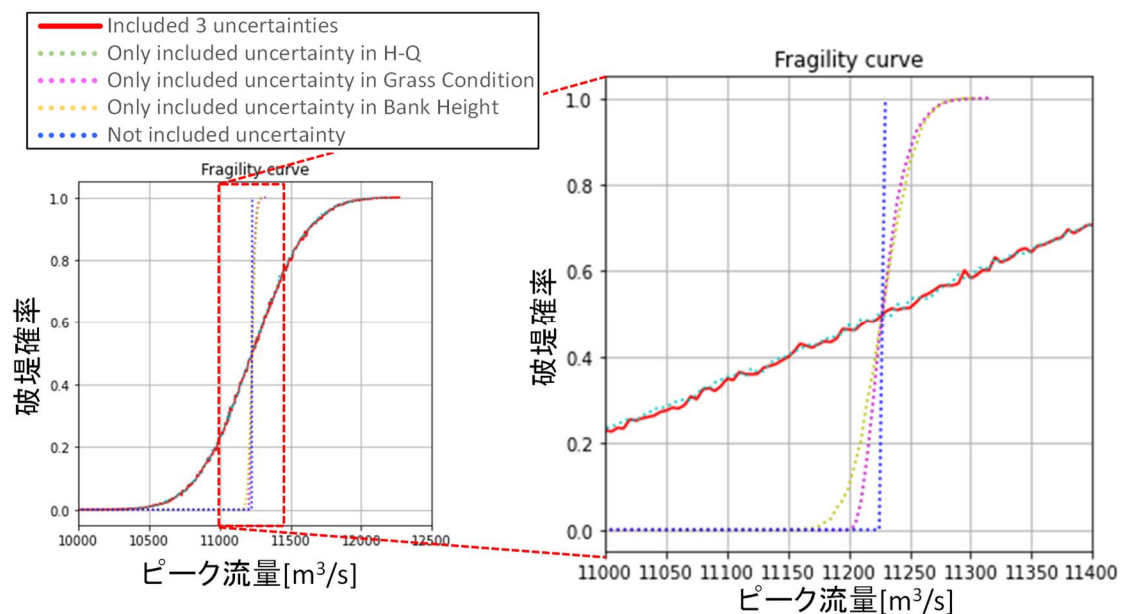


図 4.1 1 破堤確率に与える不確実性を有する要素の感度分析結果

十勝川 KP56.4 地点における破堤確率を示す。右図は横軸のピーク流量 10,000m³/s から 12,500m³/s の範囲の結果を示し，左図はその一部を拡大したものである。赤実線が不確実性として考慮した3要素（水位－流量関係，堤防高，法面の耐侵食性）を考慮した場合の破堤確率を示す。点線はそれぞれ，緑色が水位－流量関係のみ，ピンク色が法面の耐侵食性のみ，黄色が堤防高のみを考慮した場合の破堤確率を示す。青点線は，どの不確実性も考慮していない場合を示す。

不確実性として導入した要素のうち、水位－流量及び堤防高について、各要素の縦断的な分布を図 4.1 2 及び図 4.1 3 に示す。それぞれの要素内で、評価地点によって不確実性には差が生じている。これらの不確実性の相対的な差の分析は、評価地点や区間毎の破堤確率に影響する要因の特定、今後の観測技術開発の方向性やデータの蓄積、河川管理で重視すべき要素の検討への活用が考えられる。

なお、近年、堤防高については ALB 測量等の高精度なデータ取得が可能となっており、評価地点の空間解像度を詳細化した分析が可能である。一方、ハザード評価過程で必要となる水位－流量関係は、河川管理者による定期横断測量が蓄積されている地点以外では何らかの補完を伴うため、不確実性が大きくなると考えられる。このように、本研究で対象とした堤防高と水位－流量関係の不確実性は、堤防高の不確実性を低減させると、水位－流量関係の不確実性が増大するというようなトレードオフの関係となっている。

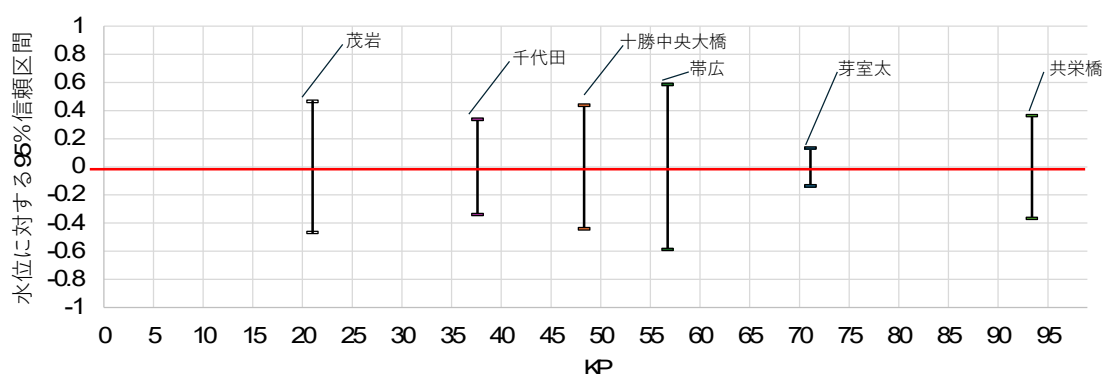


図 4.1 2 十勝川観測所地点における水位－流量関係の不確実性

横軸は十勝川の KP を示しており、観測所地点にデータがプロットされている。縦軸は各観測所における HQ 基準の水位に対する、実洪水時の水位の 95%信頼区間を示す。

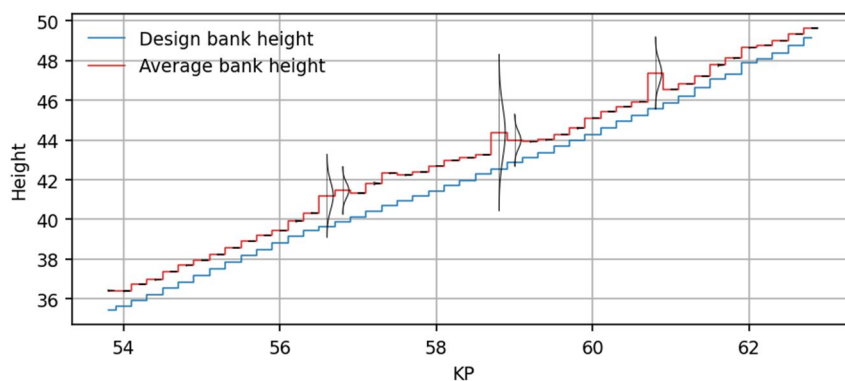


図 4.1 3 十勝川における堤防高の不確実性

横軸は十勝川の KP、縦軸は標高を示す。赤線が評価地点の前後 100m の計 200m 区間の実堤防高の平均値を示す。赤線上には、各評価区間に含まれる堤防高データの平均と分散を正規分布と仮定した場合の分布曲線を示す。青線は、参考として河川計画上の計画堤防高を示す。

4.3. 侵食による破堤確率の評価

本項では、はじめに侵食による破堤発生の判定モデルを構築する。その上で、そのプロセスに含まれる不確実性を考慮したモンテカルロ法による破堤確率の評価結果を示す。

4.3.1. 方法

4.3.1.1. 対象流域

本研究の対象流域は、越水による破堤確率の評価と同様に北海道東部に位置する十勝川水系を対象流域とした（図 4.3）。

4.3.1.2. 侵食による破堤判定モデルの構築

侵食破堤のプロセスは河道内における砂州や植生による偏流の発生、護岸等の構造物周辺の侵食、高水敷の流出等の相互作用を経て、堤防侵食に至るという複雑なプロセスを有しており[6]、これらの基礎現象の知見の不足、相互メカニズムも未解明な部分が多いことから、本研究では侵食による破堤確率の評価手法の確立に向け、侵食破堤のプロセスを単純化した基礎的な評価手法を提案し、実河川に適用し破堤確率を試算することとした。侵食による破堤判定モデルは、アメリカ陸軍工兵隊による河川構造物の安全性評価マニュアル[7]を参考に構築した。当該資料での侵食破堤の発生プロセスは、河道満杯での洪水流下時に、堤防に作用する流体力により堤防が侵食され、破堤に至る状況を想定しており、土砂移動等の河道内や高水敷における現象、構造物の被災・流失は考慮せず、堤防侵食も法面に沿って一様に進行するという、複雑な実現象を単純化したものとなっている（図 4.14）。なお、平成 28 年豪雨時に対象河川で発生した堤防侵食は、構築した破堤発生判定モデルのプロセスとは異なる。具体的には、減水期における河床変動による偏流や支川からの氾濫流による侵食であった[8]。これらの現象は豪雨発生時の流路位置や土砂堆積状況等の局所的な条件への依存性が強く、現象再現には個別箇所を対象とした河床変動解析等が必要となる。本研究は侵食による破堤確率の基礎的な評価手法の構築を目的とし、区間全体の破堤確率の評価、他区間・河川への汎用性を重視し、上記のように単純化したプロセスを想定した。

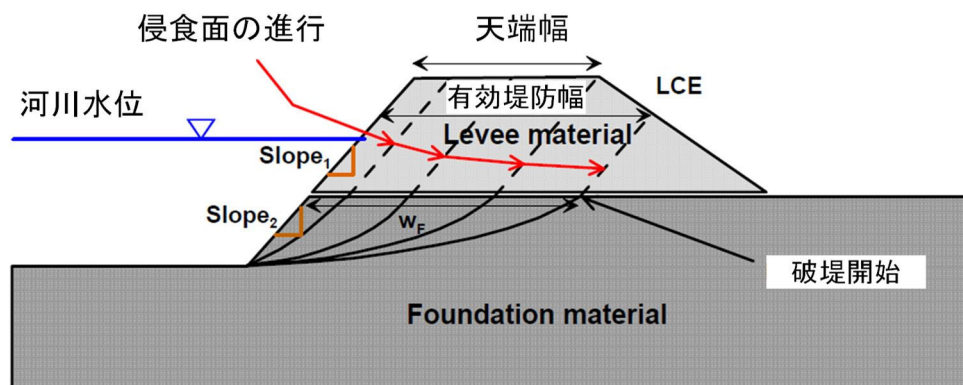


図 4.14 モデル化した侵食破堤プロセス

※参考文献[7]掲載図を改変

本研究では，マニュアルで示された評価手法を基にしつつ，水位の時系列変化が大きい対象河川の流出特性を踏まえ，時系列的な水位変動が考慮可能な破堤判定モデルを構築した．構築したモデルによる堤防決壊の判定フローを図 4.1 5 に示す．

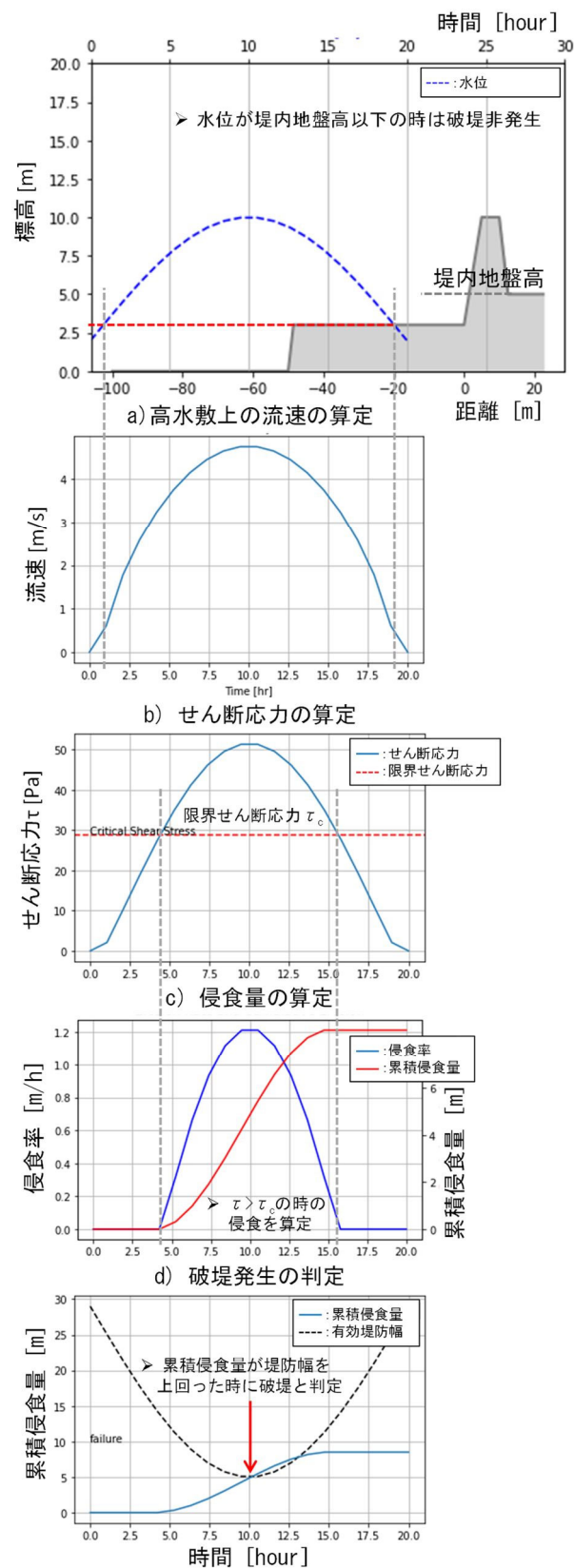


図 4.1 5 侵食による堤防決壊判定の概念図

図 4.1 5 最上段に示すハイドログラフを外力条件としたとき、高水敷を有する堤防の破堤発生は以下のように判定される。

- (a) 高水敷上における流速を算出する。
- (b) 堤防法面で生じるせん断応力を算出する。
- (c) 堤防法面の侵食が発生する限界せん断応力を超過している期間の侵食量を算出する。
- (d) 侵食量の累積値が堤防幅を超過する場合に破堤発生と判定される。

ここで高水敷上における流速は、予め作成した各評価地点における流量と高水敷上の流速の関係に基づき、ハイドログラフの各時刻流量を流速に変換した。流量と流速の関係は、準二次元不等流計算により作成した。このとき、河道断面形状は十勝川で 2020 年及び 2021 年、札内川で 2022 年に取得された定期横断測量データを用いた。航空写真から樹木群を判読し、死水域を設定した。境界混合係数 f は、複断面境界で $f=0.04$ 、樹木群境界で $f=0.03$ とした。低水路及び高水敷における粗度係数は、近年の主要洪水を対象とした再現計算に基づき設定した。

堤防法面で生じるせん断応力は、(4.12)式から算出した

$$\tau_{st} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot f_c \cdot v_t^2 \quad (4.12)$$

ここで、 τ_{st} はある時刻における堤防法面で生じるせん断応力であり、 ρ は水の質量密度 [kg/m^3]、 f_c は摩擦係数を示している。本研究では、水の一般的な質量密度として $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ を与えた。また、摩擦係数 f_c は(4.13)式[7]から算出した。

$$f_c = 2(2.5 \ln(30h/k_b) - 1)^2 \quad (4.13)$$

ここで、 h は水深、 k_b は河床粗度を示している。河床粗度 k_b は礫河床における一般値として 0.0479 を与えた[7]。 τ_{st} は、実際には堤防の法尻と水面付近では異なる値となるが、流速は等流を仮定していることから、法面に一様な応力が生じる状況を表している。

堤防の侵食率 ε は(4.14)式により算出した。

$$\varepsilon_t = (k(\tau_{st} - \tau_c)) \quad (4.14)$$

ここで、 ε_t は単位時間あたりの侵食量 [m/h] であり、 k は堤防の侵食されやすさに応じて設定する係数、 τ_c は堤防法面の侵食が開始する限界せん断応力を示している。 k 及び τ_c は、対象区間での堤防のボーリング調査による堤体内部の粒径組成を踏まえ、参考文献[7]に示されている条件の設定方法から“適度な耐性”を有するときの条件を設定した (表 4.1)。

表 4.1 k 及び τ_c の設定条件

条件	平均値	標準偏差
k : 堤防の侵食されやすさに 応じて設定する係数 [ft ³ /lb-hr]	0.021	1.101
τ_c : 限界せん断応力 [psf]	1.058	0.560

※参考文献[7]に掲載されている数値.

4.3.1.3. モンテカルロ法による破堤確率の評価

破堤判定モデルに含まれるパラメータが有する不確実性を確率変数としたモンテカルロ法により破堤確率を評価した. モンテカルロ法による破堤確率の評価は, 田端ら[3]で提案された手法を参考としている. 本研究における破堤確率算定の流れを図 4.16 破堤確率の算定フローに示す. 前節で構築した破堤判定モデルに含まれる条件のうち, k 及び τ_c を対数正規分布に従う乱数として与えた. (4.15)式は, 対数正規分布の確率密度関数を表している. k は(4.16)式, τ_c は(4.17)式の対数正規分布に従った乱数を発生させた.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.15)$$

$$k_n \sim \text{Lognormal}(\mu_k, \sigma_k^2) \quad (4.16)$$

$$\tau_{c_n} \sim \text{Lognormal}(\mu_{\tau_c}, \sigma_{\tau_c}^2) \quad (4.17)$$

モンテカルロ法の各試行 n において, 確率変数 k_n 及び τ_{c_n} が計算に用いられる.

堤防決壊確率 $P_{failure}$ は(4.18)式により算定した.

$$P_{failure} = n_{failure}/N \quad (4.18)$$

ここで, N はモンテカルロ法による総計算回数, $n_{failure}$ はそのうち堤防決壊と判定される回数を表す. 本研究では, 総計算回数を 10,000 回とした.

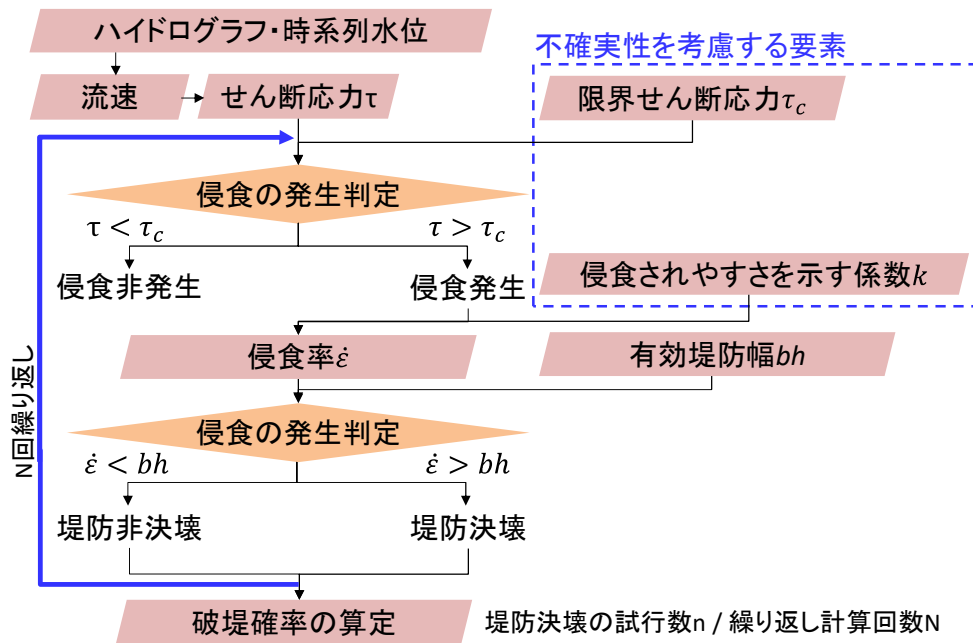


図 4.1 6 破堤確率の算定フロー

4.3.1.4. 実河川への適用

堤防に関するデータの整理

対象とした十勝川及び札内川の評価区間において、0.2km 間隔で破堤確率の評価を行った。国土交通省が提供する定期横断測量データに基づき、各評価地点における堤防天端の標高、高水敷の敷高を抽出した。堤防の法勾配及び天端幅については、各河川における堤防整備の標準断面の諸元に基づいて設定した（表 4.2）。破堤判定モデルのうち、堤防材料から設定される条件 k 及び τ_c は、堤体材料が細粒分 5% 未満の礫から構成され、比較的安定性が高い条件を想定した数値（表 4.1）を設定した。

表 4.2 評価区間の堤防諸元

手法	十勝川 KP54.8～KP61.8	十勝川 KP62.0～KP62.8	札内川 KP3.2～KP16.6
堤防法勾配	1:3.0	1:3.0	1:3.0
天端幅 [m]	8.0	7.0	8.0

ハイドログラフの設定

破堤判定モデルへ入力する河川水位は、大量アンサンブル気候予測データに基づいて算出されたハイドログラフを用いた。ハイドログラフを各評価地点における H-Q 関係を示す(4.19)式により時系列の水位データに変換した。

$$h_t = \sqrt{\frac{Q_t}{a_{kp}}} - b_{kp} \quad (4.19)$$

ここで、 h_t 及び Q_t は各時刻における水位、流量を示している。また、 a_{kp} 及び b_{kp} は水位と流量の関係を表す係数であり、対象区間において異なる流量規模による流出解析に基づいて設定された係数である。大量アンサンブル気候予測データは、d4PDF（地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース）[9]の水平解像度 20km のデータを、山田ら[10]が北海道領域を対象に水平解像度 5km までダウンスケーリングした気象データから、十勝川流域における降雨量データを用いている。ハイドログラフは、貯留関数法による算出されたもの[11]を用いた。本研究では、d4PDF が有するアンサンブルケースのうち、①十勝川及び札内川の河川計画上の整備規模に相当するピーク流量となるケース及び②4℃昇温実験のうちピーク流量が最大となるケースを抽出し、それぞれの破堤確率を評価した。なお、本研究では侵食による破堤のみを評価することとし、水位が天端を超過する場合は水位を堤防高に置き換え、越水による裏法面の侵食等他の破堤プロセスとの相互影響は考慮していない。

4.3.2. 結果

4.3.2.1. ハイドログラフ、堤防形状が異なる場合の破堤確率

十勝川の帯広観測所地点（KP56.4）を評価地点とし、ハイドログラフ及び堤防形状を変化させた場合の破堤確率の算定結果を図 4.17 に示す。図 4.17 上段は評価地点における堤防形状と評価に用いた時系列の水位を示しており、下段はモンテカルロ法の試行毎の侵食量の時系列の累積値と有効堤防幅を示している。侵食量の累積値が有効堤防幅を超過する試行では破堤発生と判定される。

図 4.17 a) b) は異なるハイドログラフでの破堤確率の比較である。a) は①河川計画の整備規模相当のピーク流量ケース、b) は②4℃昇温実験のうちピーク流量が最大となるケースの破堤確率を示しており、①で 1.0×10^{-2} 、②で 19.1×10^{-2} となった。この結果から、高水位の継続時間が長く、堤防に作用する流体力の累積時間が長いケースで破堤確率が大きくなることを確認した。

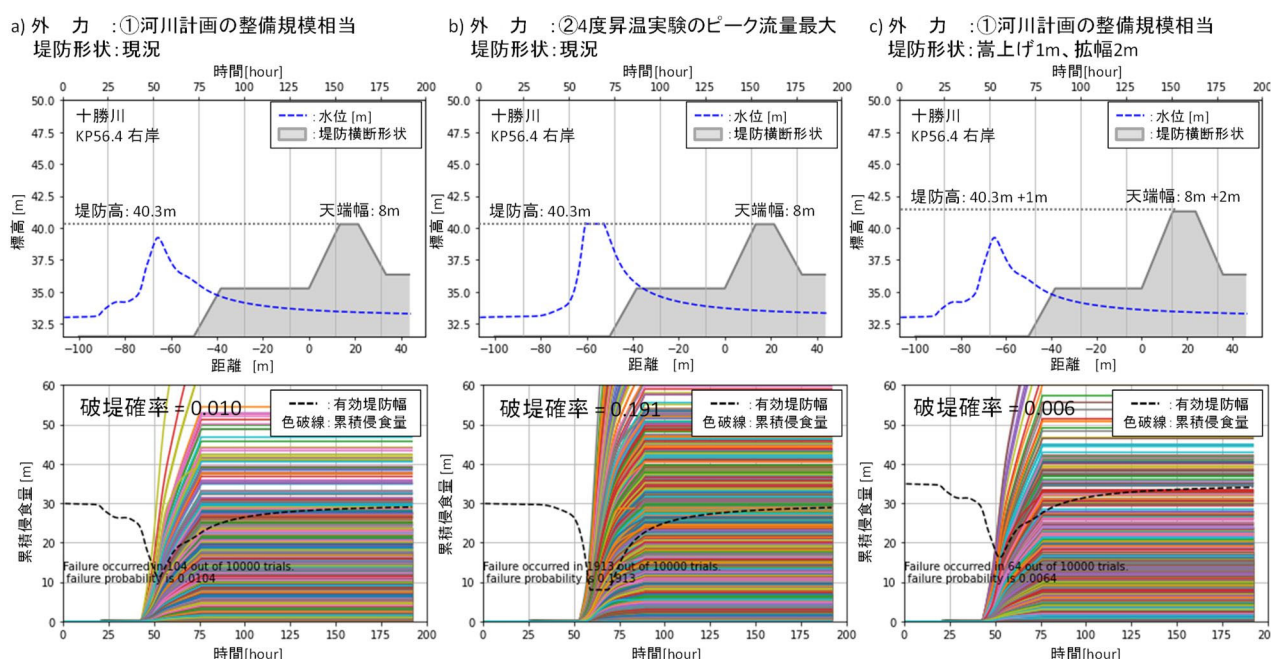


図 4.17 代表地点における破堤確率

4.3.2.2. 破堤確率の縦断的分布

破堤確率の縦断分布を図 4.18 に示す。想定した外力は、①河川計画の整備規模相当のピーク流量ケース、②4℃昇温実験のうちピーク流量が最大となるケースとした。図中プロットが空欄の区間は破堤確率が 10^{-4} 以下となる箇所(モンテカルロ法での試行回数 10,000 回のうち破堤に至るケースが非発生)である。また、流量と流速の関係に基づき算定した HWL での流速を参考として示す。

個別地点に着目すると、十勝川 KP60.8 は橋梁前後の取り付け区間のため堤防高が前後区間よりも高く、有効堤防幅が大きくなるため、破堤確率が小さくなっている。また、堤内地盤高が高くなっている十勝川 KP55.6~KP56.0、札内川 KP7.0、KP12.8 及び KP16.4 では破堤確率は 10^{-4} 以下となった。以上のように、個別地点の条件が破堤確率に反映されていることを確認した。

縦断的な分布に着目すると、評価地点間の破堤確率の高低と流速の大小関係の対応が確認できる。一方、堤防天端幅が変化する十勝川 KP62.0 前後で、破堤確率の顕著な変化は確認されなかった。本研究で設定した侵食プロセス及び構築したモデルでは、破堤確率に対して流速の影響が大きいことが示唆さ

れる．ケース②で破堤確率が 10^{-2} 以上となる地点における HWL での流速は，十勝川で 3.0 m/s，札内川で 4.0 m/s 以上となっており，これら高流速の継続により破堤に至ったと考えられる．十勝川での堤防の侵食実験では湾曲外岸の流速は 2.5～3.0m/s[12]，平成 28 年北海道豪雨時の音更川及び戸蔭別川の侵食破堤の再現解析では侵食箇所の流速は 4.0～5.0m/s 程度であった[13]，[14]．本研究で堤防侵食に作用した流速は，実現象の流速と同程度であり，流速と堤防侵食の関係は整合している．一方，本研究で算定した流速は，高水敷上が樹木群で占められている箇所等では流速が極端に小さくなる等，その精度には計算手法上の課題が残る．今後，平面二次元での解析等により高水敷上の縦横断的な流速分布の検証が必要である．

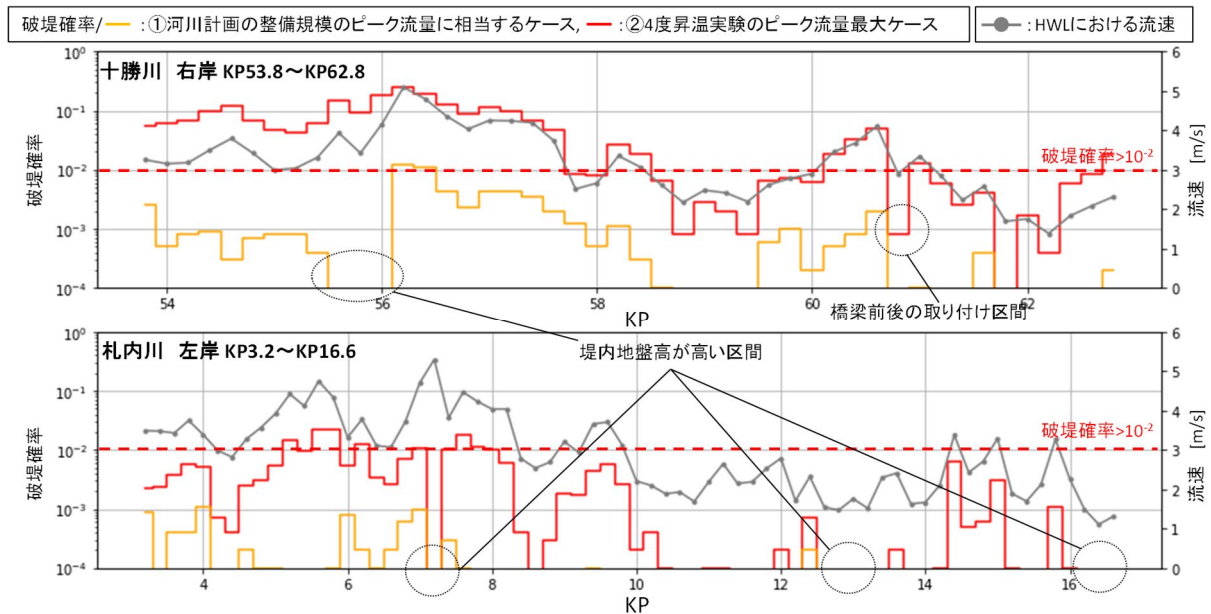


図 4.18 破堤確率の縦断分布

4.4. 第4章のまとめ

本章では、水害リスク評価における堤防決壊条件として、不確実性を考慮した破堤確率評価モデルを構築すること目的とし、日本における主要な破堤メカニズムである越水及び浸食について、各破堤プロセスに内在する不確実性のうち確率として測定可能なものを評価し、堤防決壊条件を破堤確率として評価するモデルを提案した。越水による破堤については、越流水による法面侵食をモデル化し、水位－流量関係、堤防高、法面の耐侵食性の不確実性を確率変数としたモンテカルロ法による破堤確率評価モデルを構築した。侵食による破堤については、洪水流による表法面の侵食をモデル化し、堤防の土質に起因する侵食に対するせん断応力や限界せん断応力の不確実性を確率変数としたモンテカルロ法による破堤確率評価モデルを構築した。構築したモデルを十勝川及び札内川の堤防に適用し、破堤要因別の破堤確率の縦断分布を示した。実河川への適用により、堤防形状の差異や水位の時系列変化が破堤確率に反映されることを確認し、流速と破堤の関係が実現象と整合することを示した。本研究で提案した、堤防決壊のプロセスのうち確率として測定可能な不確実性を破堤確率評価に導入する手法は、堤防決壊に影響する要因の特定や、堤防決壊発生の不確実性の低減に効果的な対策検討への活用が考えられる。一方で、樹木群等による流速の過小評価や、他の破堤メカニズムとの相互作用の未考慮といった課題も残されており、今後は平面二次元解析の導入やモデルの拡張による精度向上が求められる。

References

- [1] 令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会,第3回,資料2,「河川堤防の被災状況の調査・分析について」. 2020年6月. [Online]. Available at: https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/gijutsu_kentoukai/dai03kai/pdf/doc2.pdf
- [2] 板垣修と吉谷純一,「米英蘭の水災害・水資源管理に係る 気候変動適応策に関する事例調査」. 国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部, 2012年6月.
- [3] 田端幸輔, 福岡捷二と瀬崎智之,「超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究」, *土木学会論文集 b1 (水工学)*, vol. 71, no. 4, p. I_1273-I_1278, 2015, doi: 10.2208/jscejhe.71.I_1273.
- [4] 吉見和紘, 辛島史嗣と山田正,「降雨の不確実性に基づく確率過程論を導入した堤防の信頼性評価」, *土木学会論文集 G 環境*, vol. 71, no. 5, p. I_1-I_6, 2015.
- [5] R. G. Dean, J. D. Rosati, T. L. Walton と B. L. Edge, 「Erosional equivalences of levees: Steady and intermittent wave overtopping」, *Ocean Eng.*, vol. 37, no. 1, pp. 104–113, 2010.
- [6] 河道管理研究小委員会 堤防侵食ワーキンググループ,「堤防侵食に対する維持管理・対策技術向上に向けた研究・技術開発の課題整理」, *河川技術論文集*, vol. 27, pp. 397–402, 2021.
- [7] The United States Army Corps of Engineers Nationwide Levee Risk Assessment, 「USER'S MANUAL, EROSION TOOLBOX: LEVEE RISK ASSESSMENT METHODOLOGY」. 2007年.
- [8] 十勝川堤防調査委員会,「十勝川堤防調査委員会報告書」. 2017年4月. [Online]. Available at: <https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/tisui/ctl1r000000057u-att/fns6al0000006eu2.pdf>
- [9] 「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」. [Online]. Available at: <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/index.html>
- [10] 山田朋人ほか,「北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化」, *河川技術論文集*, vol. 24, pp. 391–396, 2018.
- [11] 舩屋繁和ほか,「実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく将来気候下での降雨の時空間分布について」, *河川技術論文集*, vol. 25, pp. 55–60, 2019.
- [12] 十勝川千代田実験水路等実験水路アドバイザー委員会,「第16回委員会資料」. 2022年. [Online]. Available at: <https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/tisui/kds/chiyodashinsuiro/ctl1r00000005727-att/inr9av00000058aq.pdf>
- [13] 山口里実, 久加朋子, 清水康行, 泉典洋, 渡邊康玄と岩崎理樹,「河道内の土砂動態と流路変動の関係」, *土木学会論文集 B1 水工学*, vol. 74, no. 4, p. I_1153-I_1158, 2018.
- [14] 石田義明ほか,「札内川・戸蔭別川合流地点における堤防決壊と氾濫原からの還流による被害特性の検証」, *河川技術論文集*, vol. 23, pp. 1–6, 2017.

5. 水害リスク評価への破堤確率の導入

第5章の概要 本章の目的は、水害リスク評価における破堤確率の導入手法を構築することである。従来の水害リスク評価では、堤防決壊を単一地点の独立事象として扱うことが一般的であったが、実際の洪水現象では、破堤の発生が上下流間で相互に影響し合う従属事象としての性質を有している。本章では、こうした従属性を踏まえた破堤確率の統合手法を提案し、堤防区間を複数の評価単位に分割した上で、氾濫特性が類似する区間をセクションとして定義し、セクション内外の関係性を考慮した破堤確率の評価を行った。さらに、提案した手法を第2章で構築した水害リスク評価モデルに導入し、破堤確率を反映したリスクカーブの作成を通じて、破堤確率導入による水害リスクの変化を定量的に示した。

5.1. はじめに

5.1.1. 研究背景

本章では、第4章で提案した評価モデルにより算出された破堤確率を、水害リスク評価に反映させる手法の提案を目的とする。具体的には、第2章で用いたハザードの発生確率と被害の関係を示すリスクカーブを活用し、これに破堤確率を導入することで、水害リスク評価手法の高度化を図る。治水経済調査マニュアル[1]では、特定の外力ケースに対して、計画高水位を堤防決壊条件とした各破堤点において氾濫解析を実施し、氾濫原内の各メッシュにおける浸水深を算定する。あるメッシュに着目した場合、各氾濫解析から得られた浸水深のうち最大値を、そのメッシュの代表的な浸水深として採用する。この手法により、外力の発生確率と浸水深との間に一対一の対応関係が成立し、浸水深に応じた被害額との関係からリスクカーブを構築することが可能となる。この整理方法は、各破堤点における堤防決壊条件が計画高水位で統一されており、発生確率を等価とみなすことができるため成立している。一方で、堤防決壊条件に破堤確率を導入する場合、各破堤点における氾濫解析結果は確率的に等価とはならない。そのため、各評価地点の破堤確率をどのように統合するか、あるいはどの地点の破堤確率を代表値として採用するかが、実務上の課題となる。

水害リスク評価に破堤確率を導入する方法として、代表地点を選定する手法が挙げられる。例えば、低平地河川が多くを占めるオランダでは、氾濫形態が貯留型であるため、堤防がどの地点で決壊しても、堤内地ではほぼ均一な浸水が生じる。この特性により、破堤確率が最も高い地点の値を代表値として用いることで、水害リスクの評価が行われている[2]。一方、急流河川が多い日本では、氾濫形態は主に流下型であり、破堤地点によって氾濫範囲や浸水深が大きく異なる。また、上流での破堤による流量の減少や、氾濫水の戻りによる流量の回復等、下流における流量条件には地点間の従属関係が存在する。このような背景を踏まえると、日本における水害リスク評価に破堤確率を導入する際には、破堤地点間の従属関係を考慮した評価手法の構築が不可欠である。

既往研究においても、破堤確率を水害リスク評価に反映させる手法の検討が進められている。田端ら[3]は、浸透破壊を対象とした破堤確率の算定において、各評価地点の破堤確率を個別に評価した上で、氾濫解析においては代表的な破堤点を選定し、その地点での破堤を前提とした浸水シミュレーションを実施している。また、Wangら[4]は、降雨の不確実性に起因する外力の変動と、堤防材料の力学的特性の空間的不均質性を確率分布として取り扱い、複数の破堤点における信頼性評価を行っているが、氾濫

解析においては破堤点間の従属関係は考慮していない。破堤点間の従属関係を考慮した研究として、Alex ら[5]は上流区間での堤防決壊による下流区間の河川流量の低減が生じる洪水シナリオを考慮した水害リスクを評価する方法を提案している。本手法は、流出・氾濫の一体的な解析を多数ケースで実施する必要がある。そのため、堤防整備の進捗等に応じて各破堤点の破堤確率が変化した場合には、水害リスクの再解析に高い計算負荷が伴うため、実務への適用には課題があると考えられる。本研究は、こうした課題を踏まえ、水害リスク評価における堤防決壊条件として破堤確率を導入するにあたり、破堤点間の従属関係を踏まえつつ、実務への適用にあたっての簡便性を考慮した方法を提案するものである。

5.1.2. 研究目的

本章における研究目的は、水害リスク評価における堤防決壊条件として破堤確率を導入する手法を構築することである。手法の構築にあたっては、堤防の破堤を単一地点での独立事象としてではなく、上下流間で相互に影響し合う従属事象として捉えるとともに、実務への適用性を踏まえ既存の水害リスク評価の再解析を伴わずに反映可能な方法を提案する。

5.2. 方法

本研究では、各評価地点の破堤確率を統合し、堤防区間全体の破堤確率を評価する。堤防区間全体の破堤確率の算定により、

$$\text{降雨・流量の発生確率} \times \text{堤防区間全体の破堤確率} = \text{氾濫発生確率} \quad (5.1)$$

として、氾濫発生確率が算定可能となる。この氾濫発生確率を、水害リスク評価におけるリスクカーブの外力の発生確率とすることで、再解析を伴わずに水害リスク評価への破堤確率の導入が可能となる。

評価地点間の破堤を独立事象として取り扱う場合、堤防区間全体の破堤確率は各評価地点における破堤確率の和として評価できる。一方、実洪水時は上流側で破堤が発生した場合、氾濫流による河川流量の低減により下流側の破堤の危険性が低下することがある。本研究では、評価地点間の破堤は従属事象として取り扱うこととし、堤防区間全体の破堤確率の評価にあたっては上流の評価地点における破堤確率を見込み、下流の破堤確率を評価する。図 5.1 の●印が各評価地点を示している。破堤確率の統合の際、各評価地点をセグメント、氾濫原における氾濫形態が類似する区間をセクション（図 5.1 中、堤防を色分けで表示）として定義し、それぞれの従属関係を仮定して破堤確率を評価する。

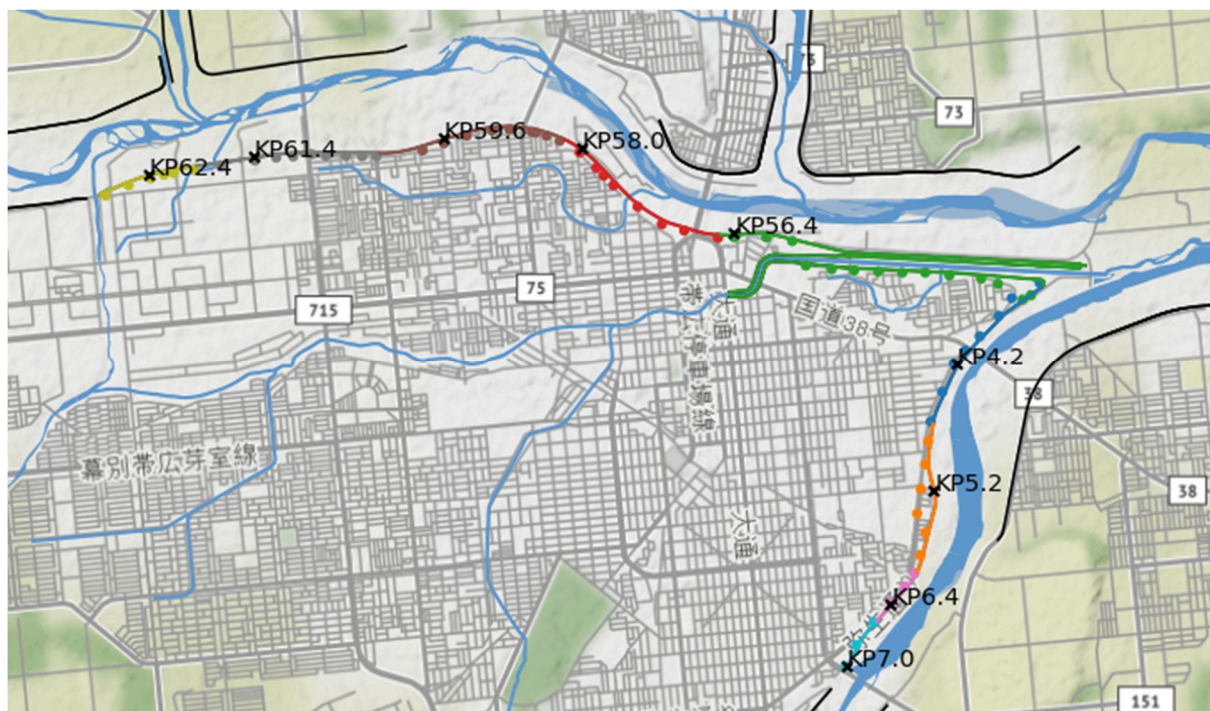


図 5.1 対象河川位置と堤防評価地点

本研究では、評価地点間の破堤現象の依存関係を独立事象及び従属事象として扱う場合に加え、両者を組み合わせて評価することとした。具体的には、各評価地点をセグメント、氾濫域が類似するセグメントをまとめたセクションを設定（図 5.2）し、各セクション内のセグメントの破堤確率を統合した破堤確率を算定した上で、各セクションの破堤確率を統合し、区間全体の破堤確率を算出する。なお、本章における各破堤点の破堤確率は、第 4 章第 2 節で算定した越水による破堤確率を用いる。

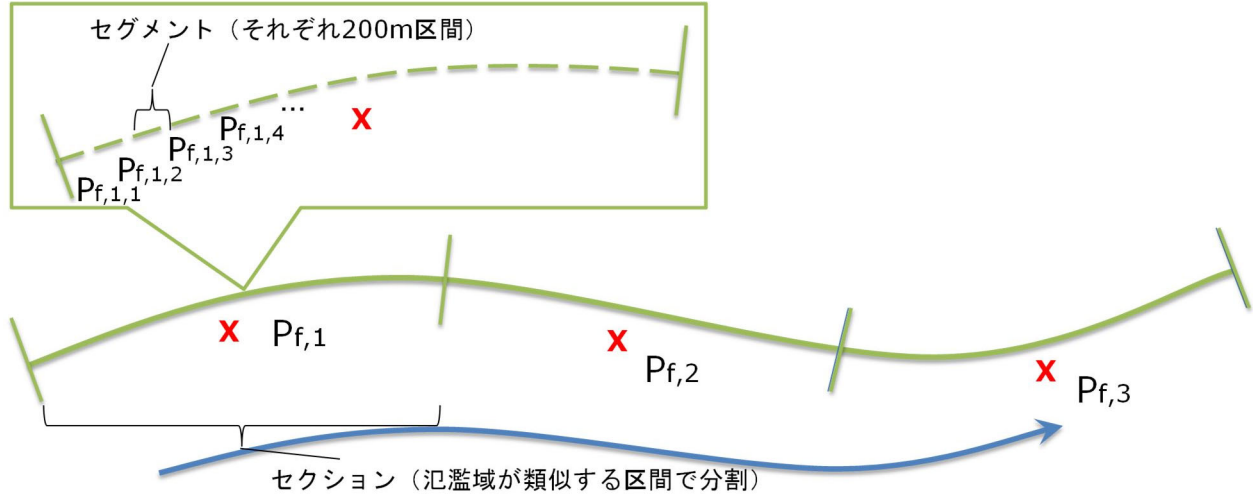


図 5.2 セグメントとセクションの関係

5.2.1. 各セクションの破堤確率の算定方法

本項では、各セグメントの破堤確率を統合し、セクションの破堤確率を評価する方法について述べる。本研究ではセクション内では破堤確率が最大の地点で破堤が発生し、他地点では破堤は発生しないと仮定した。セクション内の各セグメントの破堤発生は従属事象として取り扱い、破堤した場合は他セグメントの破堤確率が 0 となることを意味している。このとき、(5.2)式より各流量条件でのセクション内のセグメントの破堤確率の最大値が、セクションの破堤確率となる。

$$P_{f,section}|q = \max_{i=1}^n (P_{f,segment,i}|q) \quad (5.2)$$

ここでの $P_{f,section}$ はあるセクションにおける破堤確率、 $|q$ は流量 q における条件付き確率であることを示している。 $P_{f,segment,i}$ はセグメント i における破堤確率である。 n はセクション内に含まれるセグメント数を示している。

5.2.2. 区間全体における破堤確率の算定方法

次に各セクションの破堤確率を統合し、堤防区間全体の破堤確率を評価する方法について述べる。本研究では同一流量条件下では、上流側のセクションで破堤が発生した場合、下流のセクションでは破堤は発生しないと仮定した。このとき、(5.3)式より最上流のセクションでは、他の破堤点の影響を受けないのでセクションの破堤確率がそのまま維持される。(5.4)～(5.6)式より下流側のセクションにおいては、当該セクションの破堤確率に上流側のセクションで破堤しない確率を乗じたものが、当該セクションにおける従属性を考慮した破堤確率となる。

$$P_{f,dep,1}|q = P_{f,section,1}|q \quad (5.3)$$

$$P_{f,dep,2}|q = P_{f,section,2}|q \cdot [1 - (P_{f,dep,1}|q)] \quad (5.4)$$

$$P_{f,dep,3}|q = P_{f,section,3}|q \cdot [1 - (P_{f,dep,1}|q + P_{f,dep,2}|q)] \quad (5.5)$$

⋮

$$P_{f,dep,n}|q = P_{f,section,n}|q \cdot [1 - \sum_i^{n-1} (P_{f,dep,i}|q)] \quad (5.6)$$

ここでの $P_{f,dep,n}$ は、従属性を考慮した破堤確率を示している。 $|q$ は流量 q における条件付き確率、 n はセクション数を示している。

ある流量条件下における堤防区間全体の破堤確率 $P_{f,dep,all}|q$ は、各セクションの従属性を考慮した破堤確率の和として(5.7)式により計算される。

$$P_{f,dep,all} = \sum_i^n (P_{f,dep,i}|q) \quad (5.7)$$

なお、実際の洪水時には上流の破堤による流量低減や氾濫戻り、支川の合流等、流量条件は区間内で一律とはならない。各地点の破堤確率をより詳細に評価するには、これら上下流の流量変化の影響を見込む必要がある。本研究では、提案手法の結果の解釈の複雑さを回避するため、流量条件は時間変化を伴わない定常条件とした解析を実施した。

5.2.3. 破堤確率の水害リスク評価への導入

最後に、本章では水害リスク評価への破堤確率の反映を試み、堤防決壊条件の違いによって水害リスクがどのように変化するかを示す。水害リスク評価には、第2章2.2節で算定した平常時の水害リスク評価結果を用いる。これらの結果は、d4PDFが有する大量アンサンブル気候予測データのうち、過去実験3000年分のデータから抽出した年最大降雨イベントを外力とした氾濫解析に基づいており、各ケースの発生確率と被害額の間をプロットしたリスクカーブを作成することで評価を行っている。

リスクカーブの作成にあたっては、各ケースの発生確率をd4PDFのアンサンブルデータを母集団とした順位統計により算定しており、各ケースは独立かつ等確率の事象として取り扱っている。本研究では、この前提を踏まえた上で、破堤確率を考慮した洪水の発生確率 P_{flood} を以下の式により算定した。

$$P_{flood} = P_{rain} \times P_{f,dep,all} \quad (5.8)$$

ここでの P_{rain} は降雨の発生確率、 $P_{f,dep,all}$ は区間全体の破堤確率を示す。算定された各ケースの洪水発生確率と被害額の間を、破堤確率を反映した新たなリスクカーブを作成し、年平均被害額や対策による被害軽減期待額の変化について考察を行った。

5.3. 結果

5.3.1. 各セクションの破堤確率

セクションの破堤確率の統合結果を図 5.3 に示す。各セクションの破堤確率を統合した結果、破堤確率が最大となるセグメントは十勝川のセクション 3 のみ流量条件によって変化した。具体的には、流量が 6,000m³/s 付近で最大となるセグメントが赤実線から緑実線へと変化した。一方、その他のセクションにおいては流量条件によって変化せず、セクションの破堤確率は一つのセグメントの破堤確率で評価された。このようにセクション内で最大となる破堤確率がどの流量条件においても特定のセグメントとなる場合、当該セグメントを重要監視箇所や対策優先箇所に設定することで、効率的にセクション全体の安全管理や破堤確率の低減が可能になると考えられる。

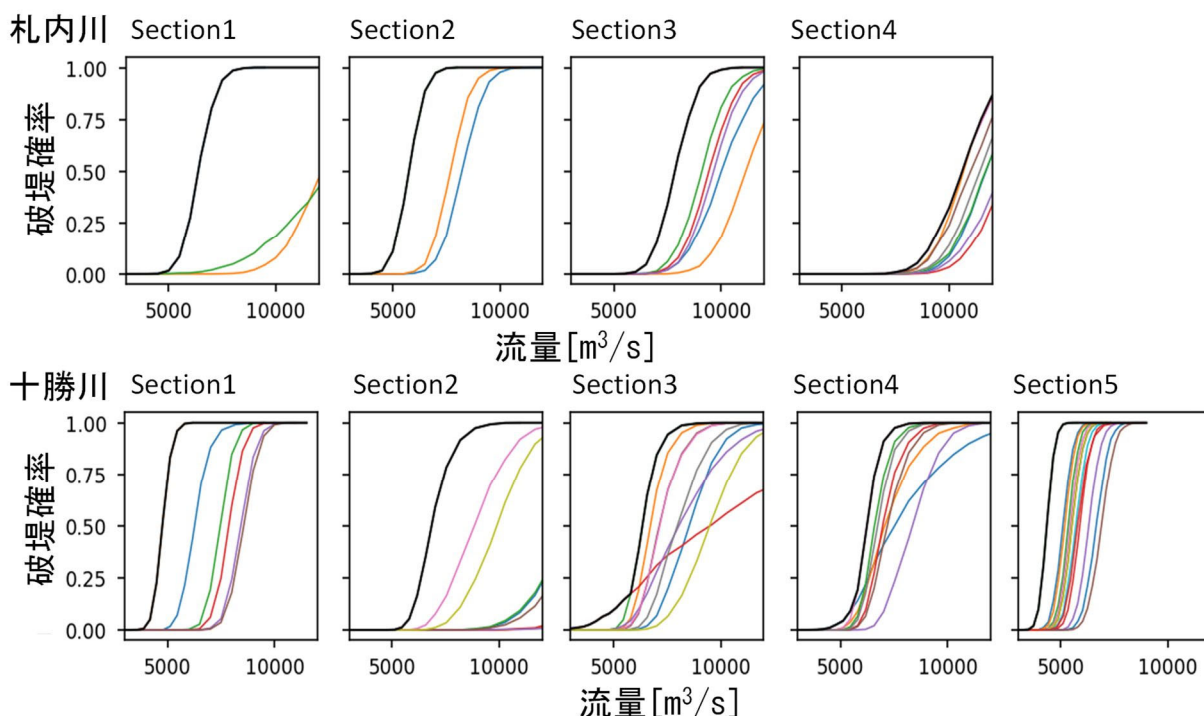


図 5.3 セグメントとセクションの関係

上段が札幌川、下段に十勝川の評価結果を示しており、セクション番号は下流側のセクションに向かって昇順に番号付けしている。黒以外の実線はセクション内に含まれる各セグメントの破堤確率であり、黒実線がセクション内で最大となるセグメントの破堤確率を包絡したものである。

5.3.2. 堤防区間全体の破堤確率

上流側のセクションの破堤確率の従属性を見込んだ場合の下流の破堤確率を、図 5.4 に示す。最上流にあたるセクション 1 においては、従属性を考慮した破堤確率（黒実線）がそのままセクション 1 の破堤確率となる。下流側のセクションでは上流側のセクションで破堤する場合はその確率が差し引かれるため、より流量条件が大きな破堤確率ほど、既に上流で破堤が発生するため破堤確率が減少している（赤点線）。札内川においては最下流にあたるセクション 4 においてはどの流量条件においても上流側ですでに高い破堤確率を有しているため、どの流量条件においても破堤確率は 0 に近くなった。

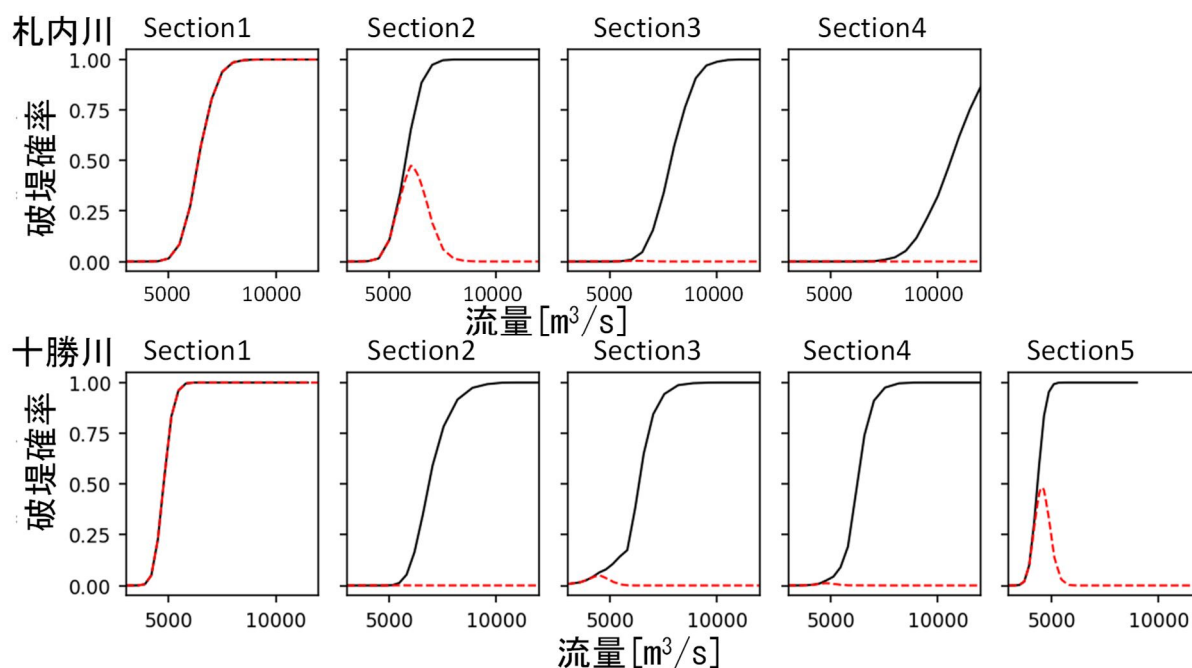


図 5.4 各セクションにおける従属性を考慮した破堤確率の算定結果

上段が札内川、下段に十勝川の評価結果を示しており、セクション番号は下流側のセクションに向かって昇順に番号付けしている。黒実線が各セクションの破堤確率、赤点線が上流側のセクションとの従属性を見込んだ場合の破堤確率を示している。

次に本研究で設定した各破堤点の関係に対して、全てを独立事象、従属事象とみなした場合の十勝川における破堤確率の比較を表 5.1 に示す。全て従属事象とみなした場合は各セクションの破堤確率を乗じ、全て独立事象とみなした場合には各セクションの破堤確率の和を算定している。その結果、本研究で設定した従属関係である、セクション内で最大となるセグメントの破堤確率を採用、セクション間では上流の非破堤確率を考慮する条件は中間的な確率となった。このように従属関係の考慮の有無や条件設定によって、堤防区間全体の破堤確率は大きく変化することがわかった。本手法ではいくつかの仮定に基づいて従属性の条件を設定している。今後、より実態に即した破堤確率を算定するため、実際の河川の流出、氾濫特性に対応した条件設定の手法が必要である。

表 5.1 堤防区間全体の破堤確率

手法	破堤確率
完全依存	0.00883(1/110)
本研究で設置した条件	0.02564(1/40)
完全独立	0.07476(1/10)

5.3.3. 水害リスク評価への反映

水害リスク評価への破堤確率の導入による被害額リスクカーブの変化を図 5.5 に示す。各ケースに発生確率が降雨の発生確率から、破堤確率を考慮した洪水発生確率へと変換されるため、両図で縦軸のプロット位置が変化している。各ケースの被害額には変化はない。破堤確率を考慮することで、水害リスクカーブは縦軸方向に減少し、その年平均被害額は、a)破堤確率未考慮の場合の約 50 万円/年から b)破堤確率考慮の場合の約 1.3 万円/年と大きく減少した。

ここで得られた結果は、破堤確率を導入することで、より現実的な水害リスクの見積もりが可能となり、過度な被害想定による不安の軽減や、対策の費用対効果の再評価につながるという点で有益である。特に、年平均被害額が大幅に低下することで、高床化や大規模な堤防改修といった高コストな対策の必要性が見直され、止水板の設置や家具の防水化等、住民が自ら取り組みやすい安価で現実的な対策の推進につながる可能性がある。一方で、リスクが低く見積もられることにより、「自分の地域は安全である」と誤認され、住民の防災意識や避難行動が低下する懸念もある。特に、確率的な情報は直感的に理解しづらく、低確率であっても一度発生すれば甚大な被害をもたらす可能性があることを、適切に伝えるリスクコミュニケーションが求められる。

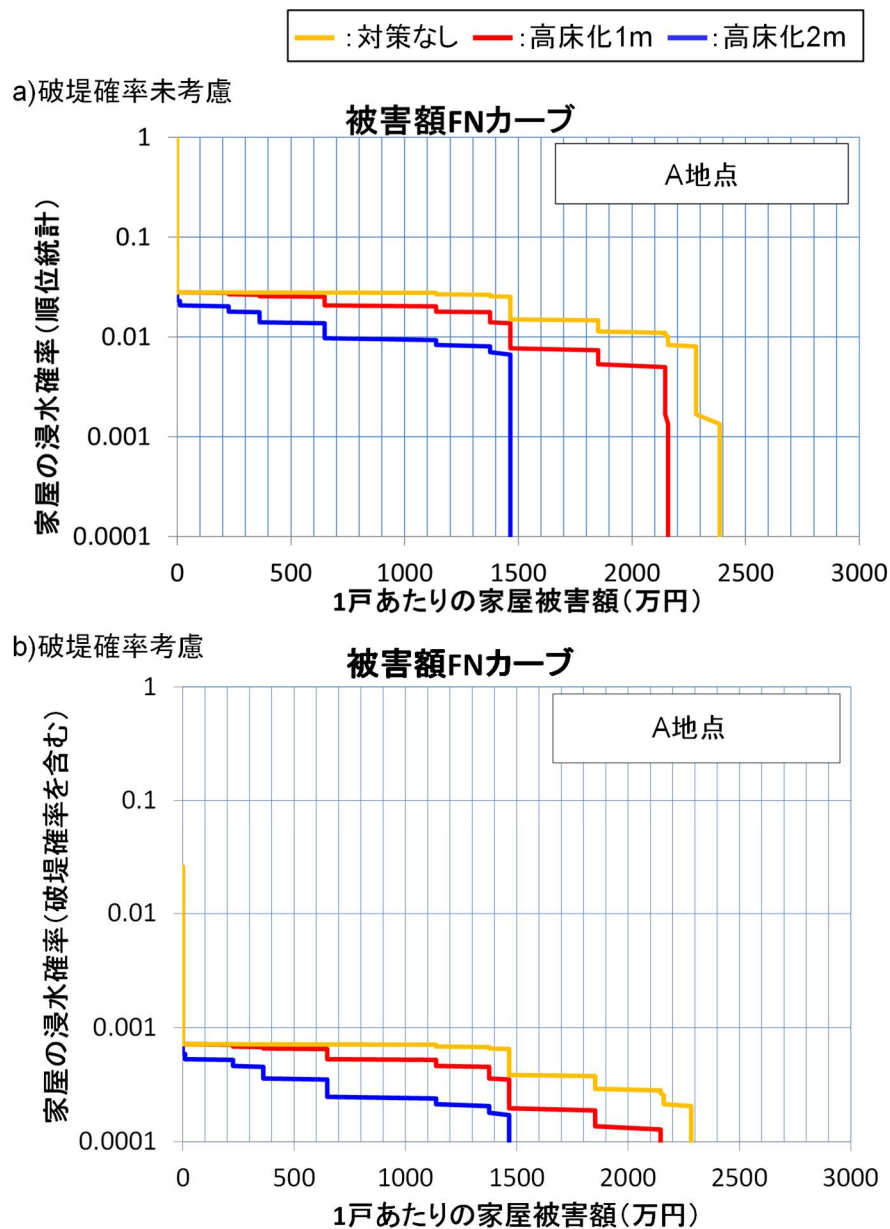


図 5.5 破堤確率を考慮した場合の水害リスクカーブの変化

(a) 破堤確率未考慮, (b) 破堤確率考慮

(a)は第2章2.2 平常時の水害リスク評価の結果. (b)は破堤確率を考慮し浸水発生確率を再整理したもの.

5.4. 第5章のまとめ

本章では、水害リスク評価における堤防決壊条件として破堤確率を導入するにあたり、破堤点間の従属関係を踏まえつつ、実務への適用にあたっての簡便性を考慮した方法を提案した。評価対象とする堤防区間をセグメントとセクションに分割し、セクション内では最大破堤確率を代表値とし、セクション間では上流の破堤が下流の破堤確率に影響を考慮することとし、堤防区間全体の破堤確率へと統合する手法を提案した。その結果、十勝川における越水による破堤確率は $1/40$ となることを示すとともに、従属性の考慮の有無が破堤確率に大きく影響することがわかった。また、算定した破堤確率を水害リスクカーブによる評価に用いた場合の水害リスクを示した。本章で示した水害リスクは、堤防決壊をより実現に即した条件で評価したという点で、住民個人にとってより現実的なリスク情報の提供を可能とするものである。今後、実河川の流出・氾濫特性に対応した従属性の設定手法の高度化や、流出・氾濫の一体的な解析による氾濫発生確率との相互検証が必要である。

References

- [1] 「洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）」．国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室，国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室，2017 年．
- [2] R. Vergouwe, *The national flood risk analysis for the Netherlands: final report*. Nederland: Rijkswaterstaat VNK Project Office, 2016.
- [3] 田端幸輔，福岡捷二と瀬崎智之，「超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究」，*土木学会論文集 b1 (水工学)*，vol. 71, no. 4, p. I_1273-I_1278, 2015, doi: 10.2208/jscejhe.71.I_1273.
- [4] 吉見和紘，辛島史嗣と山田正，「降雨の不確実性に基づく確率過程論を導入した堤防の信頼性評価」，*土木学会論文集 G (環境)*, vol. 71, no. 5, p. I_1-I_6, 2015.
- [5] A. Curran, K. M. De Bruijn と M. Kok, 「Influence of water level duration on dike breach triggering, focusing on system behaviour hazard analyses in lowland rivers」，*Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, vol. 14, no. 1, pp. 26–40, 1 月 2020, doi: 10.1080/17499518.2018.1542498.

6. 結論

近年、我が国では観測記録を超える豪雨の頻発等の気候変動の影響が顕在化しており、水害による被害軽減に向けて、水害リスク評価に基づいた対策推進が求められている。自然災害分野のリスク評価はハザード・暴露・脆弱性の三要素から構成され、その評価過程には様々な不確実性が内包される。例えば、ハザード評価は、降雨を外力とした流出解析による河川流量・水位の算出、さらに堤防決壊後の氾濫解析により浸水深を推定する方法が一般的であるが、これらの過程には水文・観測データの精度や測量データの時空間代表性等に起因する不確実性が含まれている。近年では、気象・水文、構造物の高精度な観測技術の開発により、これまで定性的に扱われてきた不確実性について確率分布を持つ情報として定量的に取り扱うことが可能となりつつある。これは、経済学者フランク・ナイトの定義する「測定不可能な不確実性」から「確率として測定可能な不確実性」への転換と位置づけられる。しかしながら、こうした不確実性を定量化し、水害リスク評価に反映した事例は限られている。本研究は、上述の背景を踏まえ、気象現象から流出・氾濫に至る一連の過程に内在する不確実性のうち、確率として測定可能な要素を評価過程に導入することで、統合的な水害リスク評価手法を提案することを目的としたものである。

第2章では、大規模アンサンブル気候予測データ(d4PDF)を極端降雨イベントの発生期間を対象としたダウンスケーリングにより空間解像度を高めた気候予測モデルを活用し、平常時及び緊急時のそれぞれの活用場面に応じたリスク情報生成を目的とした統合的な水害リスクを評価した。平常時の評価では、住民を主な活用主体とし、家屋1戸あたりの被害額や被害軽減策の投資効果を定量的に評価する手法を構築した。大量アンサンブル気候予測データを用いた氾濫解析により、浸水深と被害額の間関係をリスクカーブとして可視化し、年平均被害額や被害軽減期待額、対策費用との比較による投資効果の分析を行った。これにより、個人が自らのリスクを“ジブンゴト”として捉え、適切な防災行動や対策選択を行うための情報提供の可能性を示した。緊急時の評価では、自治体を主な活用主体とし、気候予測データに基づく災害シナリオを活用した避難情報の発令判断支援手法を提案した。IDR4M システムを用いた実証実験を通じて、未経験の災害に対する対応力の向上や、避難訓練・防災演習への応用可能性を示した。

第3章では、河川計画における確率雨量の評価に対して、大規模アンサンブル気候予測データを活用することで、降雨の時空間分布に内在する不確実性を確率的に評価し、観測データの標本規模に起因する確率雨量の不確実性を定量的に評価する手法を提案した。年最大降雨イベントの抽出に際しては、RCM5 への高解像度ダウンスケーリングを行うことで、実績降雨のパーセンタイル値の再現性が向上することを示した。また、実績降雨に基づくバイアス補正により、モデル値の再現性を高める手法についても検証を行った。確率雨量の評価にあたっては、60 年を1 標本としたリサンプリング手法により多数の気象シナリオを構築し、Gumbel 分布及び GEV 分布を用いて不確実性を評価した。その結果、将来気候下においては、1/150 確率雨量が現在の約 1.4 倍に増加する可能性があることがわかった。さらに、大規模アンサンブルデータを用いた流出解析においては、降雨量に応じたパラメータ設定手法を導入することで、実績流量の再現性を向上させるとともに、将来気候下ではピーク流量が約 1.7 倍に増加することが明らかにした。

第4章では、水害リスク評価における堤防決壊条件として、不確実性を考慮した破堤確率評価モデルを構築すること目的とし、日本における主要な破堤メカニズムである越水及び浸食について、各破堤プ

ロセスに内在する不確実性のうち確率として測定可能なものを評価し、堤防決壊条件を破堤確率として評価するモデルを提案した。越水による破堤については、越流水による法面侵食をモデル化し、水位－流量関係、堤防高、法面の耐侵食性の不確実性を確率変数としたモンテカルロ法による破堤確率評価モデルを構築した。侵食による破堤については、洪水流による表法面の侵食をモデル化し、堤防の土質に起因する侵食に対するせん断応力や限界せん断応力の不確実性を確率変数としたモンテカルロ法による破堤確率評価モデルを構築した。構築したモデルを十勝川及び札内川の堤防に適用し、破堤要因別の破堤確率の縦断分布を示した。実河川への適用により、堤防形状の差異や水位の時系列変化が破堤確率に反映されることを確認し、流速と破堤の関係が実現象と整合することを示した。

第5章では、水害リスク評価における堤防決壊条件として破堤確率を導入するにあたり、破堤点間の従属関係を踏まえつつ、実務への適用にあたっての簡便性を考慮した方法を提案した。評価対象とする堤防区間をセグメントとセクションに分割し、セクション内では最大破堤確率を代表値とし、セクション間では上流の破堤が下流の破堤確率に影響を考慮することとし、堤防区間全体の破堤確率へと統合する手法を提案した。その結果、十勝川における越水による破堤確率は $1/40$ となることを示すとともに、従属性の考慮の有無が破堤確率に大きく影響することがわかった。また、算定した破堤確率を水害リスクカーブによる評価に用いた場合の水害リスクを示した。

本研究は、気象現象から流出・氾濫に至る一連の過程に内在する不確実性のうち、確率として測定可能な要素を評価過程に導入することで、統合的な水害リスク評価手法を提案することを目的としたものである。第2章及び第4章では、従来の標本数が限られた観測データに対して、大規模アンサンブル気候予測データを活用することで、気象シナリオや降雨の時空間分布に内在する不確実性を定量的に評価した。また、第4章及び第5章では、堤防決壊条件に着目し、堤防決壊プロセスに含まれる水位－流量関係、堤防高、堤防の耐侵食性等の不確実性を定量的に評価した。これらの成果を踏まえ、従来は確定的に取り扱われてきた降雨外力や堤防構造等の要素に内在する不確実性を、確率的情報としてリスク評価プロセスに導入する手法を構築した。すなわち、従来の水害リスク評価に対して、確率として測定可能な不確実性を導入した統合的な水害リスクの概念及び評価手法を提案したことが、本研究の主要な成果である。今後の展望としては、科学的知見や観測技術のさらなる発展により、新たに確率として測定可能となった情報を水害リスク評価に反映させることで、より高度で柔軟なリスク評価の実現が期待される。

研究業績

国際論文（査読付き）

1. Uemura, Fumihiko, Rongen, Guus, Masuya, Shigekazu, Yoshida, Takatoshi, Yamada, Tomohito J. Calculating flood probability in Obihiro using a probabilistic method: incorporating the probability of dike failure with uncertainty. Proceedings of IAHS. 2024, vol. 386, p. 69–74.

国内論文（査読付き）

1. 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 大村宣明, 千葉学, 戸村翔, 山本太郎, 時岡真治, 佐々木博文, 濱田悠貴. 実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく年最大流域平均雨量の算定. 土木学会論文集 B1 (水工学). 2018, vol. 74, no. 5, p. I_115-I_120.
2. 山田朋人, 星野剛, 舩屋繁和, 植村郁彦, 吉田隆年, 大村宣明, 山本太郎, 千葉学, 戸村翔, 時岡真治. 北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化. 河川技術論文集. 2018, vol. 24, p. 391–396.
3. 千葉学, 戸村翔, 山本太郎, 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 大村宣明, 時岡真治, 佐々木博文, 濱田悠貴, 星野剛, 山田朋人, 中津川誠. オランダの治水分野における気候変動適応策の検討・実施状況に関する調査報告. 河川技術論文集. 2018, vol. 24, p. 463–468.
4. 千葉学, 戸村翔, 山本太郎, 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 大村宣明, 岡部博一, 佐々木博文, 小林彩佳, 星野剛, 山田朋人, 中津川誠. オランダの治水分野における気候変動適応策の検討・実施状況に関する調査報告（第2報）. 河川技術論文集. 2019, vol. 25, p. 49–54.
5. 舩屋繁和, 植村郁彦, 吉田隆年, 大村宣明, 千葉学, 戸村翔, 山本太郎, 岡部博一, 佐々木博文, 小林彩佳. 実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく将来気候下での降雨の時空間分布について. 河川技術論文集. 2019, vol. 25, p. 55–60.
6. 戸村翔, 舩屋繁和, 植村郁彦, 吉田隆年, 大村宣明, 千葉学, 山本太郎, 岡部博一, 佐々木博文, 小林彩佳. Floris モデルを用いた将来気候下における大規模水害時の死者数推定. 土木学会論文集 B1 (水工学). 2019, vol. 75, no. 2, p. I_1357-I_1362.
7. 戸村翔, 千葉学, 山本太郎, 武田淳史, 岩井真央, 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 大村宣明, 星野剛, 山田朋人, 中津川誠. オランダの治水分野における気候変動適応策の検討・実施状況に関する調査報告（第3報）. 河川技術論文集. 2020, vol. 26, p. 43–48.
8. 戸村翔, 千葉学, 山本太郎, 武田淳史, 植村郁彦, 舩屋繁和, 大村宣明, 吉田隆年, 星野剛, 山田朋人. 流域治水の検討に資するオランダの遊水地化事業に関する調査報告. 河川技術論文集. 2021, vol. 27, p. 591–596.
9. 鈴木章弘, 植村郁彦, 星野剛, 石原道秀, 米田駿星, 山本太郎, 橋本慎一, 山田朋人. 気候変動進行時に起こりうる大雨による洪水リスクを考慮した避難情報発令の事前検討. 土木学会論文集. 2023, vol. 79, no. 27, p. 23–27045.
10. 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 山田朋人. 水害リスクの定量評価に向けた破堤確率評価手法に関する研究. 土木学会論文集. 2024, vol. 80, no. 16, p. 23–16154.

11. 鈴木章弘, 植村郁彦, 山田朋人. 大量アンサンブル気候データを活用した基準水位に基づくリードタイムの評価手法. 河川技術論文集. 2024, vol. 30, p. 423-428.
12. 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 山田朋人. 侵食による破堤確率の評価手法の確立に向けた基礎的な手法の提案. 土木学会論文集. 2025, vol. 81, no. 16, p. 24-16101.

国内論文（要旨含む）

1. 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 大村宣明, 山本太郎, 千葉学, 戸村翔, 岡部博一, 佐々木博文, 小林彩佳, 星野剛, 山田朋人, 中津川誠. 大量アンサンブル気候予測実験データを用いた分布型流出モデルによるピーク流出量の算出について. 土木学会第 74 回年次学術講演会要旨集. 2019.
2. 植村郁彦, 鈴木彰弘, 石原道秀, 米田駿星, 星野剛, 山本太郎, 山田朋人. 気候予測データに基づく災害シナリオ作成 ～自治体災害支援システム IDR4M を活用した避難情報の発令判断支援に向けて～. 第 30 回地球環境シンポジウム講演集. 2022.
3. 植村郁彦, 田口真矢, 舩屋繁和, 大村宣明, 吉田隆年, 千葉学, 秩父宏太郎. 水害リスクの我が事化に向けたリスク評価・提示手法に関する研究 ～住宅の浸水を例として～. 日本リスク学会第 37 回年次大会講演論文集. 2024, Vol.37.

国内発表

1. 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 大村宣明, 千葉学, 戸村翔, 山本太郎, 時岡真治, 佐々木博文, 濱田悠貴. 実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく年最大流域平均雨量の算定. 第 63 回水工学講演会, 20, 札幌. 2018 年 11 月 27 日.
2. 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 大村宣明, 山本太郎, 千葉学, 戸村翔, 岡部博一, 佐々木博文, 小林彩佳, 星野剛, 山田朋人, 中津川誠. 大量アンサンブル気候予測実験データを用いた分布型流出モデルによるピーク流出量の算出について. 土木学会 2019 年度第 74 回年次学術講演会, II -42, 香川, 2019 年 9 月 3 日-5 日.
3. 植村郁彦, 鈴木彰弘, 石原道秀, 米田駿星, 星野剛, 山本太郎, 山田朋人. 気候予測データに基づく災害シナリオ作成 ～自治体災害支援システム IDR4M を活用した避難情報の発令判断支援に向けて～. 第 30 回地球環境シンポジウム, BO10, 札幌, 2022 年 8 月 31 日-9 月 2 日.
4. 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 山田朋人. 水害リスクの定量評価に向けた破堤確率評価手法に関する研究. 第 68 回水工学講演会. 大阪, 2023 年 12 月 2 日.
5. 植村郁彦, 田口真矢, 舩屋繁和, 大村宣明, 吉田隆年, 千葉学, 秩父宏太郎. 水害リスクの我が事化に向けたリスク評価・提示手法に関する研究 ～住宅の浸水を例として～. 日本リスク学会第 37 回年次大会, D1-17, 静岡, 2024 年 11 月 15 日-17 日.
6. 植村郁彦, 舩屋繁和, 吉田隆年, 山田朋人. 侵食による破堤確率の評価手法の確立に向けた基礎的な手法の提案. 第 69 回水工学講演会. 富山, 2024 年 12 月 3 日.

国際発表

1. Uemura, Fumihiko, Masuya, Shigekazu, Yoshida, Takatoshi, Omura, Noriaki, Tomura, Sho, Chiba, Manabu, Yamamoto, Taro, Takeda, Atsushi, Hoshino, Tsuyoshi, Yamada, Tomohito J.: Estimation of probable rainfall considering uncertainty based on massive ensemble climate projections in the Tokachi River basin, the 22nd

IAHR-APD Congress 2020.

2. Uemura, Fumihiko, Curran Alex, Masuya, Shigekazu, Yoshida, Takatoshi, Yamada, Tomohito J.: Evaluation Method for Dike Failure Probability Due to Erosion Toward Quantitative Assessment of Flood Risk in Floodplains. 9th GEWEX-OSC, Sapporo, Japan, 8-12, July, 2024.

受賞

1. 2023 年地球環境優秀講演賞受賞・土木学会地球環境委員会, 植村郁彦, 鈴木彰弘, 石原道秀, 米田駿星, 星野剛, 山本太郎, 山田朋人. 気候予測データに基づく災害シナリオ作成 ～自治体災害支援システム IDR4M を活用した避難情報の発令判断支援に向けて～, 2023 年 9 月 21 日受賞.
2. 2024 年度日本リスク学会大会優秀発表賞・日本リスク学会, 植村郁彦, 田口真矢, 舩屋繁和, 大村宣明, 吉田隆年, 千葉学, 秩父宏太郎. 水害リスクの我が事化に向けたリスク評価・提示手法に関する研究 ～住宅の浸水を例として～, 2024 年 12 月 26 日受賞.

その他

1. 山本太郎, 千葉学, 戸村翔, 吉田隆年, 大村宣明, 舩屋繁和, 植村郁彦, 山田朋人, 星野剛, 時岡真治, 岡部博一. 『気候変動を踏まえた新しい洪水リスク解析 [降雨・流量編]』, 一般財団法人北海道河川財団, 2019.