



# Flood Risk and Climate Change Hokkaido

Joined project of Japan and the Netherlands

クライアント



**Docon**





# Flood Risk and Climate Change Hokkaido

Joined project of Japan and the Netherlands

最終報告書

## 著者紹介

マースカント、ボブ (HKV)

コーレン、バス (HKV)

千葉学 (RIC)

ヘフナウア、マーク (デルタレス)

植村郁彦 (株式会社ドーコン)

山田朋人 (北海道大学)



Docon



Technische Universiteit Delft



PR3983.10

January 2022



## はじめに

十勝川流域の帯広市の氾濫リスク分析を推し進められた日本およびオランダの大学、研究機関、企業の専門家の皆様、おめでとうございます。新型コロナウイルスの制約があるにもかかわらず、すべての作業をよくぞこなされたものです。**2018年11月**の北海道訪問（今でもいい思い出として振り返っています）から帰宅したときには、この協力体制がここまで発展、成功するとは想像もつきませんでした！

日本の気候予測モデルとオランダの氾濫リスクアプローチを統合することにより、新しいリスクベースアプローチが誕生しました。日本とオランダの専門家は、(i) 極端降雨と河川流量、(ii) 堤防の破堤確率、(iii) 氾濫の影響（被害、死者数）、氾濫リスクなど異なるテーマに分かれ、密に協力しました。結果や方法を議論するだけでなく、その方法を組み合わせて適用し、実際に結果に結びつけるため詳細まで理解しようと努めたのです。このように相互理解を深め、信頼関係を築くことで、プロジェクト成果の付加価値を高める土台ができました。

オランダにとって、日本のレベルの高い専門家が我々の氾濫リスクアプローチを「審査」してくれたことは、非常に価値のあることでした。議論が深められ、さらなる改善のための有益な示唆を得ることができたのです。日本の方法やモデルだけでなく、緊急対応や氾濫対策についても、日本の膨大な経験から多くを学ぶことができます。

すでに、来年以降さらなる協力を継続する提案もなされています。公共事業局は、気候変動に伴う異常気象や特に鉄砲水にどう対処するかなど、新しい研究プロジェクトへの参加を期待しています。今年の夏は、ベルギー、ドイツ、オランダのとても広い地域において極端降雨が発生し、リンブルフ州のマース川支流で非常に稀なる出水を経験しました。その結果、ドイツやベルギーで壊滅的な鉄砲水が発生し、多くの死者が出ました。リンブルフは山が少なく、幸い大きな被害が発生したのみで死者は発生しませんでした。しかし、このような（限定的な）鉄砲水が発生した場合の備えが不十分だと分かったのです。さらに、私たちの **GRADE** による降雨ジェネレーター の現在版では、観測されたマース川のピーク流量を再現することができませんでした。

そのため、オランダは特に鉄砲水について日本の経験から多くを学ぶことができると思いますし、気候変動を踏まえた氾濫対策について、さらなる協力を進められるよう願っています。日本のパートナーとともに、新しい研究プロジェクトに参加できることを楽しみにしています。

最後に、この「水のパートナー」に資金提供してくださったオランダ企業庁に心より感謝申し上げます。

デュルク・リードストラ  
氾濫リスクマネジメント シニアアドバイザー  
公共事業局  
インフラ・水管理省



## 目次

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 1 はじめに                        | 1  |
| 1.2 共同研究の必要性                  | 5  |
| 1.3 研究の目的                     | 6  |
| 1.4 共同プロジェクトにおけるチームメンバー間の協力   | 7  |
| 2 日本（北海道）とオランダの氾濫リスク管理についての導入 | 9  |
| 2.1 日本の氾濫リスク政策                | 9  |
| 2.2 オランダ氾濫リスク政策               | 11 |
| 2.3 気候変動に伴う課題                 | 14 |
| 3 氾濫リスク分析の方法論                 | 17 |
| 3.1 全般的なアプローチ                 | 17 |
| 3.2 ケーススタディ対象エリア              | 19 |
| 3.3 第1部：極端降雨と河川流量             | 20 |
| 3.4 第2部：堤防の破堤確率               | 26 |
| 3.5 第3部：被害、避難、死者数、氾濫リスク       | 32 |
| 4 主な成果                        | 39 |
| 4.1 メソッドの適用                   | 39 |
| 4.2 不確実性の取り扱い                 | 44 |
| 4.3 共同プロジェクトにおける協力体制          | 44 |
| 5 考察                          | 47 |
| 5.1 極端な降雨と流量                  | 47 |
| 5.2 破堤確率                      | 48 |
| 5.3 被害算定                      | 48 |
| 5.4 避難と死者数                    | 48 |
| 6 おわりに                        | 49 |



# 1 はじめに

## 1.1 気候変動はすでに顕在化している

水分野におけるオランダと日本間の歴史は長い。前世紀、オランダの水管理・治水の取り組みは、日本の水分野にも取り入れられてきた。ヨハネス・デ＝レイケは、1890年以降の業績により、日本では非常に有名である。その後、両国はそれぞれの道を歩み、自国の状況に合わせて手法を開発し、調整してきた。ところが近年、北海道が何度も台風に見舞われ、大規模な氾濫が発生し、人々や農業に被害が及んだ。そのため日本側専門家グループは、オランダの公共事業局、HKV、Deltares、Delft 工科大学の水分野の専門家と、改めて関係を築き、知識の交換に再投資することにした。

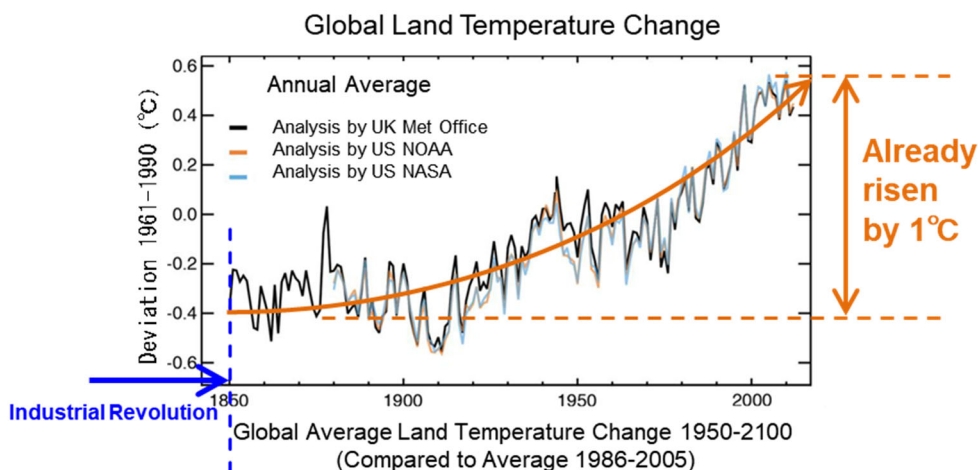
気候変動の影響はすでに世界中で顕在化しており、IPCC の予測で示されるように、気候変動の影響はさらに大きくなると考えられている。その結果氾濫リスクが増大するが、氾濫リスクは、予防や治水対策、優れた都市計画や災害管理によって緩和することができる。本章では、気候変動が氾濫に及ぼす影響について、日本とオランダでの事例を紹介する。

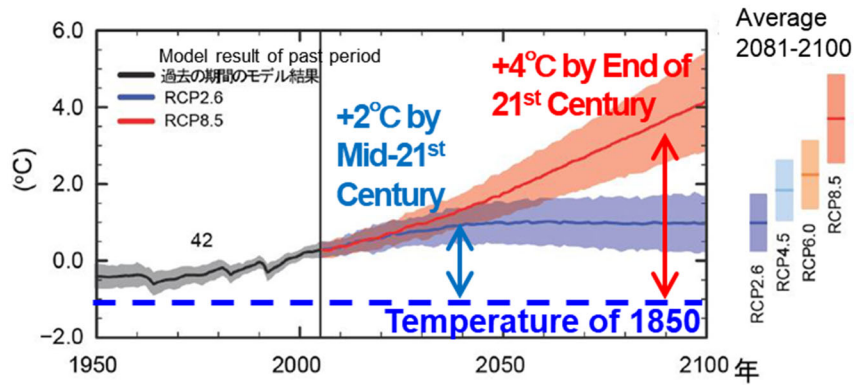
### 1.1.1 世界、日本、アジア

IPCC の第 5 次評価報告書によると、地球温暖化には疑う余地がなく、1850 年前の産業革命以降、世界の平均気温はすでに 0.85 度上昇している。その主な原因は、CO<sub>2</sub> を始めとする温室効果ガス濃度の増加など人為的な活動である。気温は今後さらに上昇することが予想されている。

地球温暖化の影響は、気温の上昇に限らず、海面上昇や大雨などの極端現象の頻度や強度の増加を招く可能性がある。今世紀末には、中緯度陸域の大部分と湿潤熱帯域で、極端な降雨がより激しく、より頻繁に起こる可能性が高いとされている。

図 1 気候変動





(Made by Water and Disaster Management Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, based on WG1 Report of IPCC's 5th Assessment Report)

過去数十年の観測データから、本プロジェクトの対象地域である日本では、短時間に激しく降る雨が増加することが裏付けられている。毎年のように、より激しい雨を伴う台風や季節性の前線の影響で、記録的な大雨による災害が発生している。気温の上昇は空気中の水蒸気量の上昇を招き、降雨の頻度や強度が今後も増加することが懸念される。

このような大雨の頻度と強度の増加は日本のみにとどまらず、近隣のアジア諸国でも大雨や深刻な水害に見舞われている。

図 2 近年の日本各地の水害状況

#### August 2016 Heavy Rain in Hokaido

Minami-Furano-town, Hokkaido



Hokkaido Regional Development Bureau HP  
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ab/tisui/v6dkjr000000021d-att/v6dkjr000000023w.pdf>

#### 2019 Typhoon No. 19

Nagano-city, Nagano



Cabinet Office HP  
[https://www.cao.go.jp/minister/1909\\_r\\_takeda/photo/2019\\_006.html](https://www.cao.go.jp/minister/1909_r_takeda/photo/2019_006.html)

#### July 2018 Heavy Rain in West Japan

Mabi-town, Kurashiki-city, Okayama



Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism HP  
<https://www.mlit.go.jp/common/001323940.pdf>

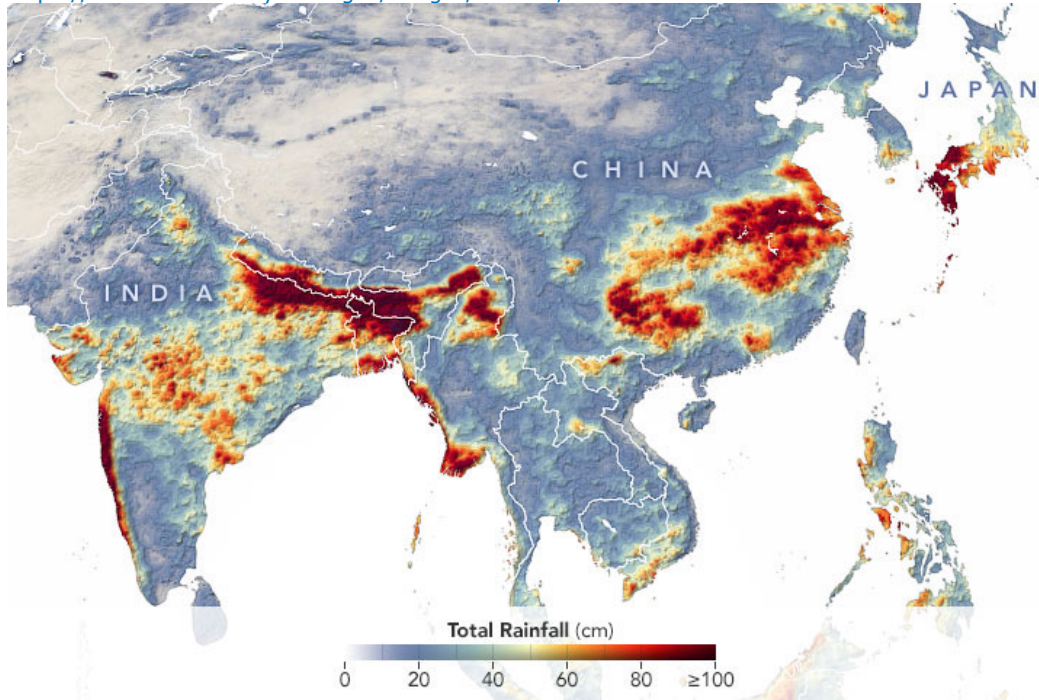
#### 2020 Rainy Season Front

Hitoyoshi-city, Kumamoto



Kyushu Regional Development Bureau  
[http://www.qsr.mlit.go.jp/sendai/////bousai\\_info/ryuikitisui/images/s1-1.pdf](http://www.qsr.mlit.go.jp/sendai/////bousai_info/ryuikitisui/images/s1-1.pdf)

図3 人口衛星からのリモートセンシングによる降水量推定値（2020年6月1日～7月20日）  
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/147006/excessive-monsoon-rains-flood-asia>



### 1.1.2 オランダ

一方、オランダにおいても、気候変動の影響に対処しなければならない。海面上昇、平均気温の上昇、降雨パターンの変化により、熱波や干ばつが増加し、極端降雨も増加すると予想されている。氾濫リスク管理の分野では、気候変動に対処するための政策方針がいくつかあり、下記はその例である。

- 堤防の強化。堤防は、気候変動を含む将来の水理条件を考慮して設計されている。
- デルタプログラムによる土地利用政策の適応。このプログラムは、気候変動の影響に耐え得るよう土地利用の適応を促進するものである。
- 研究プログラム「海面上昇」このプログラムにより、オランダで起こりうる海面上昇、その影響、緩和策についてより深く理解することができる。

2021年の夏、リンブルフ地方が気候変動の影響に伴い極端降雨の発生に直面し、この研究の必要性が顕著になった。以下は、ENWが実施した実地調査に基づく氾濫事象の概要である。参照：

<https://www.enwinfo.nl/publicaties/>

降水量は、広範囲に渡り2日間で160～180mmであった。この地域で同様の大雨が発生することは稀であり、さらに夏季に記録されたことはこれまでに無かった。過去事象の観測から直接導き出される確率よりもはるかに小さいが、過去事象の測定値とモデルシミュレーションの大量アンサンブルを組み合わせると、マース川の2日間の降雨とピーク流量の確率は、100年に一度から1000年に一度の確率になることが示される。

この極端降雨は、ベルギーのマース川やドイツ、ルクセンブルクのライン川の支流を含む広範囲にわたり、同時に降った。丘陵地帯のため、雨水はすぐに河川に流れ込んだ。ヴェストレ川、アー川、ザウアー川に近く狭い谷間にある村では大きな被害を受け、一部が破壊された。インフラ（建物、橋、道路、鉄道）は完全に流出した。数十万人の住民が被災し、**200** 人以上が死亡した。その被害額は数百億ユーロにのぼると推定されている。ベルギーとドイツでは、被害と損害が最も大きく、死者数が記録されたのもこれらの国のみだった。これらの国々で発生した氾濫は、さらなる大雨、急勾配の地形、急流の河川などと合わせ、壊滅的な被害をもたらした。

オランダでは、マース川エイスデン地点と地域水系である支流において、過去最大のピーク流量を記録した。マース川下流のルールモンド地点の水位は、過去に記録されたピークよりも低く、またモデル計算で得られた予想より低いものであった。水位が下がったのは、大規模な「ルーム・フォー・ザ・リバー」プログラムに含まれる「マース・ワークス」の実施と、水系の下流部で強い洪水波が平坦化されたためである。記録された水位の発生確率は、マース川ボルフハーレン地点にて **200** 年に一度、下流では **15** 年に一度に減少する。オランダのマース川沿いの主な氾濫防御施設は正常に機能し、決壊することはなかった。

リンブルフ州の支流では、記録された水位の発生確率は大きく異なる。ヘウル川、ヘレーンベーク川、ルール川沿いの多くの地点において、確率年は **100** 年から **1000** 年に一度と推定される。

オランダの出水は、被災地に甚大な経済的被害と損害をもたらした。最初の見積りでは、**2,500** 軒以上の家屋、**5,000** 人以上の住民、約 **600** の事業所が影響を受けている。家屋や事業所への物理的被害、事業の中断、インフラの被害、農作物の被害などが深刻であった。個々の構造物（住宅や商業施設）で確認された被害は、非常に多岐にわたる。被災地の推定被害額は、**1993** 年と **1995** 年の河川洪水（**2021** 年価格に換算：それぞれ約 **2** 億ユーロ、**1** 億 **2500** 万ユーロ、事業中断による損害を除く）よりも明らかに大きい。**1993** 年と **1995** 年はマース川主流の氾濫原で被害が大きかったが、今回は支川ヘウル川の氾濫原で被害が大きかったことに注目したい。

氾濫した河川沿いでは、約 **5** 万人が避難している。ヘウル川沿い、特にファルケンブルフ市では、一部のキャンプ場と医療機関にいた **193** 人を除いて、ほとんどの人が氾濫時に避難していなかった。マース川沿いでは、ピーク流量に至る前にほとんどの人が避難していた。最終的に、オランダでは死者は出ず、大半の人が自力で避難した。

大多数の医療従事者（約 **3** 分の **2**）が、心理的な問題（ストレス、悩み、心配など）を持つ患者が増加したと報告している。洪水による飲料水への影響は、ドゥネア水道事業者では限定的であったが、エヴィデスと WML ではかなりの影響があった。マース川とアイザーベーク川の飲料水用井戸は、化学物質と微生物による汚染のため、一時的に閉鎖された。雨の多い穏やかな夏だったこともあり、あらかじめ貯水された量で、飲料水の供給不足を十分に防ぐことができた。リンブルフ州はオランダ国内で **COVID-19** の感染リスク率が最も高く、また洪水後の新規感染者の増加も最も大きかった。洪水に見舞われたファルケンブルフ・アーン・デ・ヘウル市では感染リスク率が **5%** を超え（リンブルフ州の上位 **5** 位以内）、洪水が **SARS-CoV-2** の感染に寄与した可能性が示唆された。しかし、その差は小さく、局所的な現象とも考えられる。

## 1.2 共同研究の必要性

日本では毎年、記録的な大雨による水害が発生し、気候変動の影響が顕在化してきている。国土交通省は、従来、堤防やダムなどの治水施設整備により氾濫発生を抑制することに一定の成功を収めてきたが、近年、気候変動に伴う外力増加や水害の頻発を踏まえ、「流域治水」へと方針の転換を図っている。

流域治水は、流域に関わる関係者が協力して流域全体の氾濫リスクを低減するための取り組みであり、氾濫リスクの時間的・空間的分布やその確率評価など、定量的な把握が欠かせない。このため、本プロジェクトで開発された北海道モデルとオランダモデルを統合した新しいアプローチは、気候変動による氾濫リスクの変化を定量的に評価する優れたツールとなり得るであろう。

また日本の近隣諸国においても、気候変動の顕在化や急速な降雨流出など、同様の課題を抱えており、頻発する水害の予防や被害軽減のための先進的な事例となる可能性を有している。

また、オランダを含む欧州では **2021 年 7 月** にかつてない豪雨災害が発生しており、気候変動に伴う降水量の増加や局所的な豪雨による災害のリスクが高まっている。

局所的な豪雨による急激な出水や災害への対応に関する日本の豊富な知見は、オランダを含むヨーロッパ諸国にとって極めて有益である。

オランダの **Floris**（フローリス）プロジェクトにおいて開発された氾濫リスク評価モデル（以下、オランダモデルと呼ぶ）は、複数の氾濫シナリオを総合的に解析し、人的リスクと経済的リスクの分布を定量的かつ確率的に評価する優れたモデルである。オランダモデルは、オランダ全土におけるリスクベースアプローチの基礎としてすでに社会実装されており、確かな信頼性を有する。

一方、北海道で開発された気候予測モデル（以降、北海道モデルと呼ぶ）は、日本の気象予報で実績のある地域気候モデルにより、過去 **3000 年**、将来 **3240 年**（2 度上昇）、将来 **5400 年**（4 度上昇）の気候予測データを **5km** 水平解像度に物理的ダウンスケールした、極めて精緻で大量のデータである。このモデルにより、日本の急峻な地形に起因する地形性降雨などの気象現象を高い精度で再現することが可能になった。また、過去から将来にかけて物理的に起こりうる降雨現象を豊富に含むことから、統計的な解析が可能である。

物理シミュレーションに基づく豊富な確率情報を持つ北海道モデルと、氾濫リスクの確率評価に長けたオランダモデルは、相補的であり、このプロジェクトで開発された、両者の知見を組み合わせた新しいアプローチは、世界の様々な河川に適用できる可能性を秘めている。

北海道では、オランダの専門家と継続的な技術交流を築き、得られた知見をもとに、死者数想定などオランダの手法を参考にした研究を開始した。

2018年1月には、北海道のメンバーがデルタ委員会、公共事業局、KNMI、HKVなどを訪問して意見交換を行い、両国の技術交流が始まった。2018年11月には、北海道で開催された日蘭治水セミナーにオランダの専門家を招聘し、土木学会第63回水工学講演会で特別講演を開催した。2019年6月、北海道メンバーが2度目のオランダ訪問を行い、再び意見交換を行った。

こうした技術協力を背景に、上記のような技術的課題を解決するため、両国の専門家によるコンソーシアムが結成された。

このコンソーシアムは、日本とオランダの大学、研究機関、企業、政府間で築いた既存のネットワークの上に構成するものである。このネットワークは、近年の北海道の水害をきっかけに、気候変動への取り組みのため、この2年間で構築された。このネットワークは、優秀な専門家のみで構成されており、日本で求められ受け入れられる付加価値を提供できるのは他でもない彼らのみである。このような専門家こそ、知識を兼ね備えた事業家と呼べる人物である。この取り組みにより、オランダの専門家が日本とつながり、さらに規模拡大への（一生に一度の）チャンスを作り出す結果となる。

オランダと日本の大学、研究機関、コンサルタント、政府の優れた専門家が揃っている。

- 大学（安全と保全、土木工学）：デルフト大学、北海道大学
- 氾濫リスク管理の研究開発に力を入れている民間組織や研究機関（コンサルタント）：HKV、デルタレス、ドーコン、北海道河川財団
- パートナーとしての政府：1）公共事業局、2）国土交通省北海道開発局

オランダのパートナーは、互いに補完し合っている。いずれも氾濫リスク分析に強く、それぞれに異なる専門性を持っている。コンサルタントとしてプロジェクトを管理するHKVは、リスク分析の専門家であり、オランダの洪水安全性アセスメントの開発・応用する経験が豊富である。デルタレスは幅広い水の知識を持ち合わせた研究機関で、関連する様々な研究やモデルにアクセスでき、オランダの氾濫リスク手法を世界各国に適用してきた多くの経験がある。デルフト工科大学は、深い専門知識の開発、意見や質の管理をサポートする。また、彼らの日本や東南アジアのネットワークを通じて、プロジェクトの成果を普及することもできる。

日本のパートナーも補完関係にある。北海道河川財団は水の安全性に関する研究のコーディネートを担い、北海道大学は気候変動による台風や降雨の変化を定量的に予測する専門知識を有する。ドーコンは、氾濫リスクと関連する技術開発に関する専門知識を有する。

北海道河川財団、ドーコン、北海道大学は、気候変動による降雨量の変化を定量的に予測し、氾濫リスクの増加を科学的に評価する、新しい氾濫リスク評価手法を確立するために共同で取り組んでいる。

### 1.3 研究の目的

この研究の長期的な狙いは以下である。

1. 両国の氾濫リスク分析と破堤確率を統合した、北海道における新たな氾濫リスクアプローチの技術開発。オランダと日本の取り組みの統合は、この手法を世界の他の地域にも拡大していく長期的な大望の第一歩となる。このプロジェクトを終えた次の段階は、このアプローチを日本全国で導入し、最終段階として東南アジアでの利用の可能性を探る。
2. また日本とオランダの研究者や専門家の持続可能な関係を築き、オランダの **Horizon2020** のような研究プログラムへの共同提案、日本土木学会での論文発表、博士号取得、公共事業局の国家研究プログラム（NKWN、WBI）の知識開発および国交省に向けて技術提案書を作成する。

これらの狙いを実現するため、プロジェクト期間中にビジネスと研究のロードマップを作成し、さらに取り組みを拡大する。

上記のような機会を確実に実現するためには、次のことを達成する必要がある。

- このプロジェクトで確かな成果を作り上げること。
- 本プロジェクトの技術的課題を明確にし、その解決策を次期プロジェクトの計画立案とすること。
- このプロジェクトの成果を日本の他の河川へと適用し、一般化を図ること。
- その成果を適用する他の河川や次期プロジェクトに関わるステークホルダーと情報提供し理解を得ること。
- 学会などを通じて、本プロジェクトの成果を幅広く周知すること。
- このプロジェクトを通じて、持続可能な技術・人的交流の仕組みを構築し、日本とオランダの協力関係をさらに発展させること。

### 1.4 共同プロジェクトにおけるチームメンバー間の連携

本コンソーシアムは、**2018**年に築かれた日本とオランダの大学、研究機関、企業、政府による既存のネットワークを基盤にしたものである。近年北海道において氾濫が複数発生し、気候変動に立ち向かう必要性が増したためであった。コンソーシアム全体を通し、この共同プロジェクトの主旨は、持続可能なネットワークを構築し、手法や見識を向上させることであった。プロジェクト期間中には、日本とオランダの専門家が合同でプロジェクトチームを結成し作業を進めた。降雨を用いて洪水外力を評価するプロジェクトチーム、堤防の評価を行うチーム、リスクと死者数を評価するチームが結成された。これらのトピックに共同で取り組むため、対面での会議と、**COVID-19**に際してはオンライン会議が行われた。会議では、これらのトピックについて、また手法をどうケーススタディに適用するかについて、深く議論した。また対面会議の期間には、社交的な活動も行い、相互理解を深めた。この共同プロジェクトは、すべてのパートナーや個々の専門家にとって付加価値があり、それは例えば、プロジェクトチームの変更が一切不要であったことにも表れている。

北海道の専門家は、コンソーシアムの一員として、また日本の土木業界の一員として、この関係を今こそ発展させようとしている。**2018**年**11**月**29**日に開催された「日蘭治水セミナー」には多くの土木技術者（**200**名以上）が参加し、オランダ手法（新聞参照のこと）に大変な関心が寄せられた。この共同研究の提案は、**2018**年にオランダ（**1**月）と、北海道（**11**月）で行われた合同会議に続いて、次のステップとなるものであった。北海道では、日本のパートナーが主導し、日本の水分野を対象とした公開セミナーも開催された。

参加パートナーは大学、研究機関、コンサルタント、政府などから、オランダと日本のトップレベルの専門家が集まっている。

- 大学（安全・保全、土木工学）：デルフト大学、北海道大学
- 氾濫リスク管理の研究開発に力を入れている民間団体や研究機関（コンサルタント）：HKV、Deltares、ドーコン、北海道河川財団

- パートナーとしての政府：1) オランダ公共事業局、2) 国土交通省北海道開発局

コンソーシアムのパートナーは、氾濫リスクモデリングの全分野（土木工学、統計学、ガバナンスの専門知識）に精通している。被害、死者数、避難の評価、費用便益と多基準分析の使用から、早期警報や気候変動モデリング、水文学、水理学、形態学的プロセスまで。

オランダのパートナーは互いに補完し合っている。いずれも氾濫リスク解析に強みを持つが、注力するテーマは異なる。HKVは、リスク分析の専門家であり、オランダにおける洪水安全性評価手法の開発・適用に多くの経験を有していることから、コンサルタントとしてプロジェクトの運営にあたる。デルタレスは水に関する研究機関として、関連する様々な研究やモデルへのアクセスを有し、世界各国にオランダ氾濫リスク手法を適用してきた多くの経験を持つ。デルフト工科大学は、深い専門知識の開発、意見や質の管理をサポートする。

日本のパートナーも補完関係にある。北海道河川財団は水の安全性に関する研究のコーディネートを担い、北海道大学は気候変動による台風や降雨の変化を定量的に予測する専門知識を有する。ドーコンは、氾濫リスクに関連する技術開発の専門知識を持つ。

専門レベルの高い日本とオランダの両者が協力することで、両者がプロジェクトを通して多くを学び、得られた知識を異なる用途に適用できるようになるという利点がある。

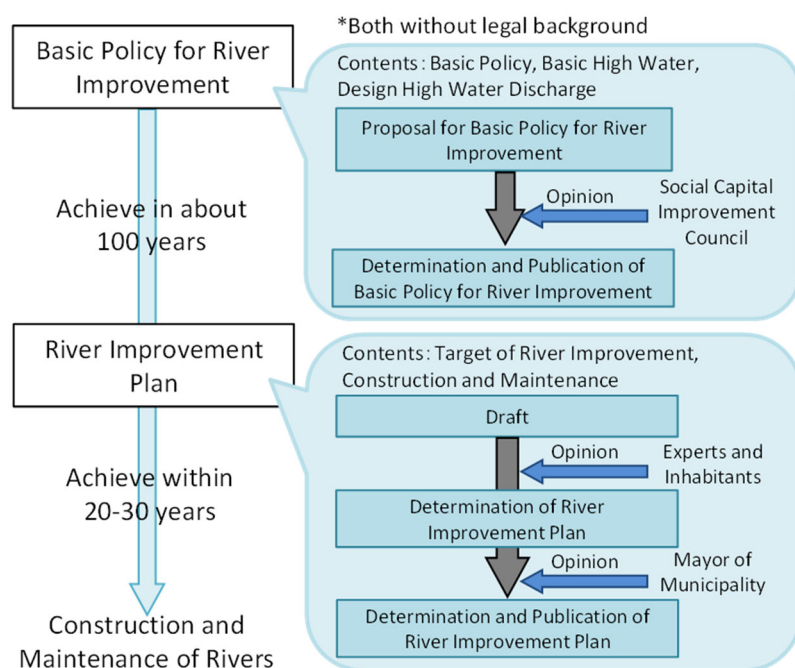
## 2 日本（北海道）とオランダの氾濫リスク管理についての導入

### 2.1 日本の氾濫リスク政策

これまでの日本の治水計画では、過去数十年の観測実績を統計解析し、年超過確率  $1/150$  などの極端降雨を推定してきた。確率降雨を決定論的に表現するため（ある年超過確率に対する降雨が一つに決定されることを前提に）、外れ値を解析から除外している。

各河川流域の特性に応じて長期的な河川整備基本方針の下に、設定された年超過確率の降雨量に対して推定される複数の降雨群に対して流出計算を行う。これにより、各支川や基準点の流量が計画される。これは基本高水と呼ばれ、その指針は「国土交通省河川砂防技術基準」\*）に示されている。さらに、概ね  $20\sim 30$  年程度の期間で達成すべき具体的な目標を定めた河川整備計画が策定され、洪水時の水位が計画高水位以下に収まるよう、河川ごとに河道掘削、治水施設、堤防などの整備を行う。<sup>1</sup>

図4 日本の治水計画



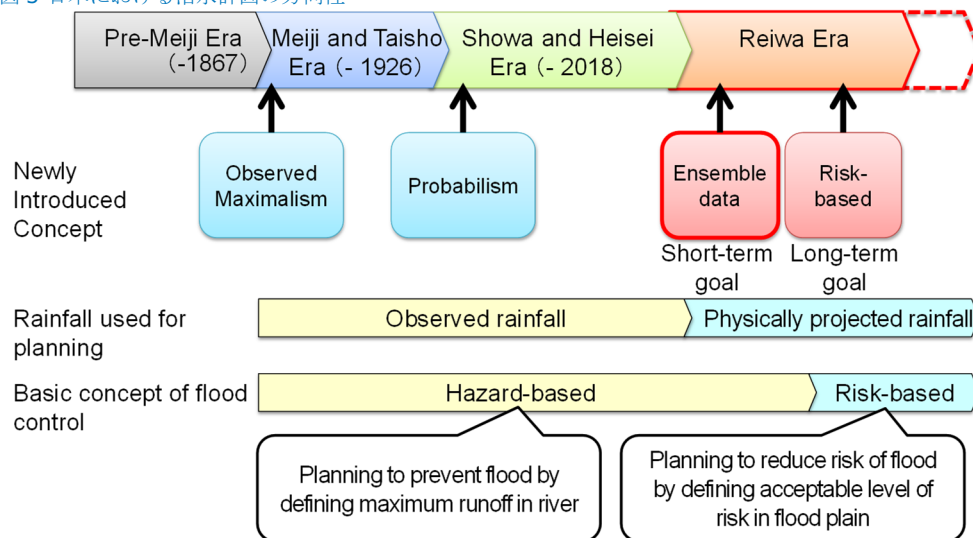
出典：「新しい河川整備の計画制度について」国土交通省北海道開発局札幌開発建設部、  
[https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/kasen\\_keikaku/kluhh4000000ft54.html](https://www.hkd.mlit.go.jp/sp/kasen_keikaku/kluhh4000000ft54.html)

日本の治水政策の経緯を振り返ると、**1870**年にオランダ人技師が来日し、近代的な河川工学を導入した。河川整備の目標となる流量を、過去に観測された最大洪水流量をもとに決定するものである。そして**1953**年に策定された「河川砂防技術基準」の初版では、上記のように年超過確率によって基準高水を設定する確率論的な方法が構築された。

さらに近年、日本ではアンサンブル気候予測データベース **d4PDF** (Mizuta et al, 2017) が構築された。このデータベースにより、過去 **3,000** 年分 (**60** 年×**50** 通り)、将来 **2°C** 上昇下 **3,240** 年分 (**60** 年×**54** 通り)、将来 **4°C** 上昇下 **5,400** 年分 (**60** 年×**90** 通り) と、大量の予測情報が利用できるようになった。この情報は、過去から将来にかけて起こりうる気象現象 (過去に経験したことのない雨も含む) を、スーパーコンピュータを用いて詳細にシミュレーションしたもので、より確かな確率降雨量の推定が可能になった。

日本では、これまで観測降雨に基づくハザードベースの治水計画が用いられてきたが、気候変動影響の顕在化に伴い、予測に基づく治水計画への転換が求められている。

図 5 日本における治水計画の方向性



出典：中村，基礎高水の制度化に関する歴史的研究，を基に作成

<https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/records/7541#.YbhbvVIUthE>

さらに国土交通省は、近年の災害の頻発と激甚化を踏まえ、**2020**年には、流域のあらゆる関係者の協働により被害軽減を図る「流域治水」への転換を打ち出した。従来の河川計画が、洪水を計画規模以下に抑え、安全を確保するための河川管理施設に主眼を置いていたのに対し、「流域治水」は、集水域、河川区域、氾濫域を含めて一つの流域として捉え、想定を超える洪水に対しても被害を軽減するための総合的かつ多層的な取り組みである。流域治水には、氾濫域における住まい方の工夫や、氾濫流のコントロールも含まれ、氾濫リスクを定量的に評価し、対策の効果を把握するリスクベースの取り組みが有効である。このため、科学的な気候変動予測と確率論的なリスク評価を統合する本研究の試みは、今後の日本の治水安全度を向上させる上で極めて重要な知見となるであろう。

図 6 流域治水, 国土交通省

出典 : <https://www.mlit.go.jp/river/kokusai/pdf/pdf21.pdf>



## 2.2 オランダの氾濫リスク政策

オランダは、ライン川、マース川、スヘルデ川など複数の川によって形成されたデルタ地帯に位置し、北海に面する小さな国である。その結果、オランダは洪水に見舞われやすく、特に気候変動と海面上昇により、水位上昇と極端な河川流量がますます頻発することが予想されている。

堤防や高潮堰などの氾濫防御施設がなければ、オランダの 60% は定期的に浸水することになる。それら地域に住む人口は約 900 万人、国民総生産の約 7 割が生産されている。そのため、適切な氾濫リスク管理は極めて重要である。

氾濫リスク政策は、オランダの国策デルタプログラムの中で共同作成・開発されている。

### オランダ国策デルタ・プログラム（出典 : [Deltaprogramma.nl](https://deltaprogramma.nl)）。

政府は、現在および将来のオランダを水害から守り、十分な淡水の供給を確保することを目指している。さらに、気候変動や水害に耐え得る国を目指している。そのために立てられた計画が、デルタプログラムである。

デルタプログラムの狙いは、2050 年までに氾濫リスク管理、淡水供給、土地利用計画を気候変動や水害に耐え得るものにし、増大する極端気象に対してオランダが十分に対処し続けられるようにすることである。現段階においては、災害後の対策を練るのではなく、災害を未然に防ぐことに努める。

2050 年までに、オランダは気候変動や水害に耐え得る実装をしなければならない。つまり、氾濫リスク管理、淡水供給、土地利用計画などを改善する必要がある。それができれば、オランダは気候変動の影響に対処し続けることができる。

政府はパートナーとともに、デルタ地帯での取り組みに新たなアプローチを採用した。

- 新しい氾濫防御基準を導入した。政府は、氾濫発生確率に注目するのではなく、水害の潜在的な影響も考慮した（リスクベースアプローチ）。基準設定の厳しさは、潜在的な影響の範囲によって決定される。
- また、農業、産業および自然に対する淡水の確保についても、より深い見識を得ることが可能となる。
- つまりオランダの土地利用計画は、より気候変動や水害に耐え得るものとなる。

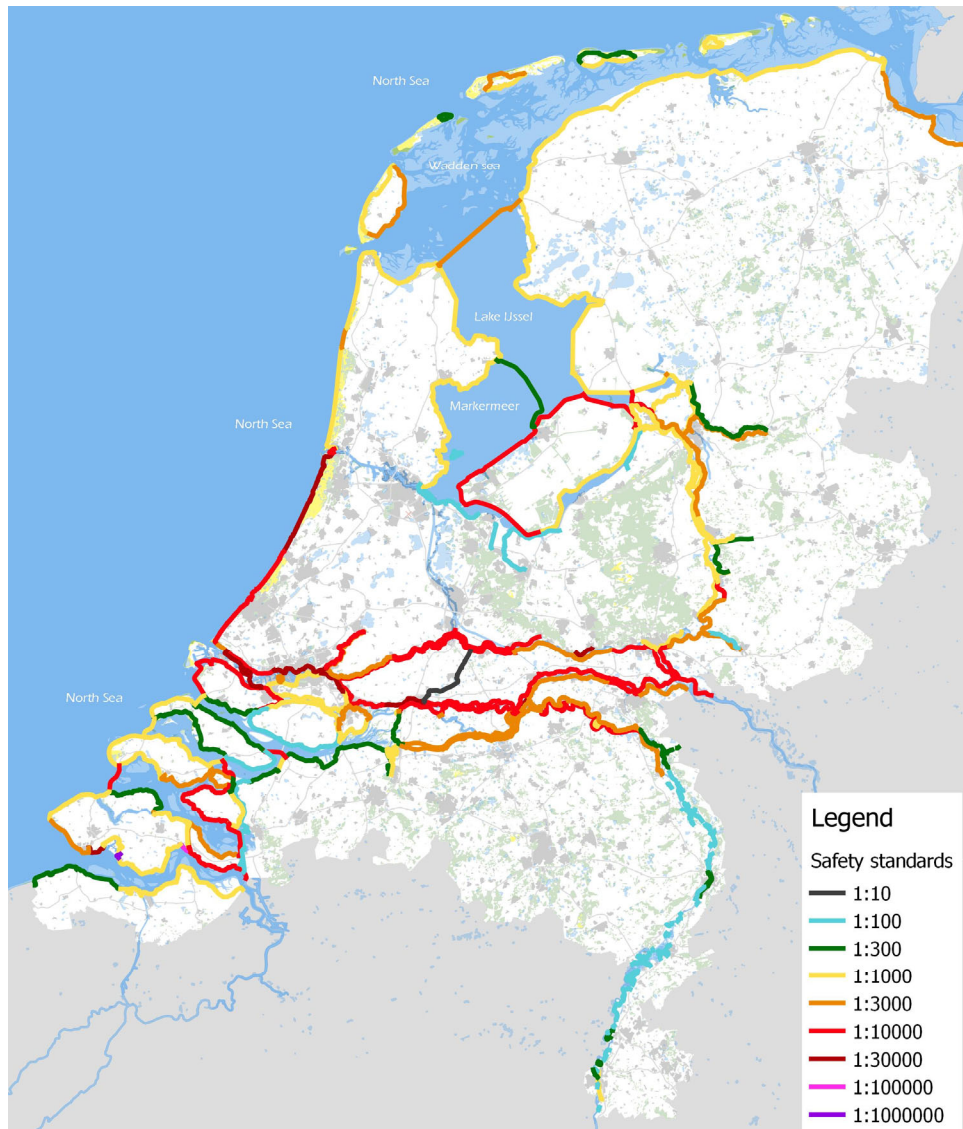
デルタ決定のひとつに、氾濫リスク管理がある。氾濫リスク管理に関するデルタ決定の主旨は、遅くとも 2050 年までに、堤防の背後に住むあらゆる住民の洪水による死亡率が、年間 10 万分の 1（または 0.001%）を超えてはならないということである。これが、いわゆる許容可能な個人死亡リスクと呼ばれるものである。

氾濫リスク管理に関するデルタ決定は、リスクベースアプローチに基づいている。これにより、オランダの治水対策は、より狙いを定めた投資が可能となる。堤防の背後に住むすべての住民が、等しく最低レベルが保証された氾濫防御を享受することになる。氾濫による影響が大きい場所（例：多数の死者数、大きな経済的被害、および／または国家的に重要なインフラへの被害）では、防御レベルが引き上げられる。

また 2015 年から 2020 年にかけて、氾濫リスク管理に関するデルタ決定事項の実施に大きな進展があった。例えば、防護目標は主要な氾濫防御施設である堤防、砂丘、ダム、高潮堰の基準に置き換えられ、海、主な河川、主な湖の氾濫からオランダを守っている。これらの基準は、2017 年 1 月 1 日に施行された「水法」で定められている（図 7）。

2017 年には、これらの主要な氾濫防御に対し、全国アセスメントが初めて行われた。これを実施するため、主要な氾濫防御の評価に関する一連の協定と方法という、新しい法定文書が作成された。2022 年 12 月 31 日までは、インフラ・水管理大臣は、最初の全国アセスメントに基づき、主要な氾濫防御の状況について上院と下院に報告する。第 2 回全国アセスメントは、2023 年から 2034 年にかけて開催される予定である。

図 7 オランダの安全基準 1



さらに、氾濫防御プログラムも展開されている。このプログラムでは、オランダにある 21 の水管理委員会と中央政府が協力し、デルタ計画以来の大規模な堤防整備工事を実施する。氾濫防御プログラムは、各地域において水管理委員会の管理する主要な氾濫防御が 2050 年までに基準を満たすことを目的としている。対象となっているのは、約 1,300 キロメートルの堤防と約 500 の水門やポンプ場であり、すでに多くの堤防整備プロジェクトが進行中である。

オランダの国策デルタプログラムは、治水安全に関するオランダの政策と、氾濫リスクへの対処に関するリスクベースアプローチの実施について、優れた枠組みを提供しています。

## 2.3 気候変動に伴う課題

### 2.3.1 日本

平成 28 年 8 月北海道豪雨災害を契機に、国土交通省北海道開発局と北海道は、災害の検証や今後の水防対策の検討を行うため、有識者会議<sup>1)</sup>を設置した。そして「気候変動の影響による水害の激甚化の予測と懸念が現実になったものと認識」し、「気候変動の影響を科学的に予測」して「具体的なリスク評価をもとに、治水対策を講じるべき」との内容をとりまとめた。

この報告を受けて、2017 年に大量アンサンブル気候データ<sup>2)</sup>に基づく気候変動影響予測および氾濫リスク評価を実施した。2018～2019 年には、国土交通省による気候変動に伴う治水計画の検討<sup>3)</sup>や、北海道の河川流域を対象とした社会実装を目指す適応策の検討<sup>4)</sup>につながった。大量アンサンブル気候データは、過去や将来の気候で物理的に起こりうる多様な気象現象を豊富に含むため、極めて稀な極端大雨事象をも発生確率に基づき定量的に評価することが可能になる。これら一連の検討は、国内初の試みであるだけでなく、2019 年 6 月 20 日にドイツ、ボンで開催された国連気候変動枠組の定例会議で報告されるなど、世界的にも注目されている<sup>5)6)</sup>。

図8 日本における気候変動の課題



- 1) 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，2017，  
[https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa\\_kei/ud49g7000000f0l0.html](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/ud49g7000000f0l0.html)
- 2) 北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会，2018，  
[https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa\\_kei/splaat000000vdyw.html](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000000vdyw.html)
- 3) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会，2019，  
[https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai\\_blog/chisui\\_kentoukai/index.html](https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/index.html)
- 4) 北海道地域における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会，2019，  
[https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa\\_kei/splaat000001offi.html](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000001offi.html)
- 5) 山田智仁，日本における高解像度気候モデルシミュレーションの巨大アンサンブルを用いた異常洪水への適応策，ボン気候変動会議，2019  
[https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2.5Tomohito\\_Yamada\\_presentation\\_ver1.5plus.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2.5Tomohito_Yamada_presentation_ver1.5plus.pdf)

- 6) 山田朋人, 国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) 第 50 回補助機関会合 (SB50) 参加報告, 2019,  
[https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa\\_kei/splaat000001ofky-att/splaat000001pcj9.pdf](https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/splaat000001ofky-att/splaat000001pcj9.pdf)

### 2.3.2 オランダ

国策デルタプログラムでは、氾濫リスク管理に関するデルタ決定により、オランダの安全基準の更新と、氾濫リスクへの対応について更なるリスクベースのアプローチが行われるようになった。しかし、課題は残り、状況は変化する。

- 海面が上昇する（ますます加速する可能性あり）一方、土壌が沈下している。
- 集中豪雨の頻度と強度が増している。
- 気温が上昇している。
- 気候がより乾燥してきている。

このような変化と経済成長により、オランダで最後に大きな洪水が発生した 1953 年当時よりも、洪水による影響はより大きくなることが予想される。そこで重要なことは、海面上昇と極端降雨に関する知見を活かすことである。

海面上昇については「海面上昇研究プログラム」を設置し、今世紀後半以降の海面上昇のペースについて調査を行い、その最終成果は、2026 年に発表される。

2021 年夏、オランダ、ベルギー、ドイツで極端降雨が発生し、地域および主要水系に極端な流量が発生した。オランダでは、主要水系が極端な水位に脅かされたが、堤防の決壊は起こらなかった。これは地域水系には当てはまらなかった。極端降雨により地域水系に負荷がかかり、地域河川への急速な流出により地域堤防が越水し、オランダ南部で大きな被害が発生したが、幸いにも死者は発生しなかった。この事象により、オランダがこのような極端降雨にどのように対処しなければならないのか、どのような対策が可能なのかという新たな研究課題につながった。



## 3 氾濫リスク分析の方法論

### 3.1 全般的な取り組み

リスクとは、確率と影響の組み合わせである。したがって氾濫リスクを求めるためには、氾濫が発生する確率とその影響について知ることが重要である。この目的のため、氾濫防御システムの様々な要素（堤防の様々なセグメント）の破堤確率を算出する。

また、氾濫防御施設の決壊による影響（経済的被害と死者数）も求める。破堤確率と破堤による影響は、同じ堤防内でも破堤し得る箇所によって異なる。したがって、さまざまな破堤箇所を評価し、破堤箇所ごとの氾濫確率と各破堤箇所の影響を組み合わせる。この方法によって、対象地域の氾濫リスクが求められる。

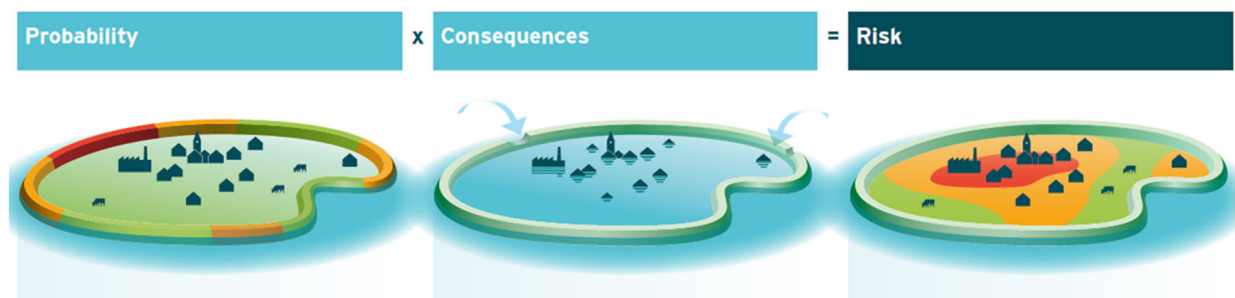
その際に不確実性を考慮することは、氾濫防御の破堤確率を計算し、氾濫の影響を求める上で重要である。例えば、ある任意の年の最大負荷や、任意の破堤が起こった場合の正確な浸水域は分からないものである。

しかし、統計と専門家の判断に基づいて、起こりうる負荷と強度を確率的に割り出すことは概ね可能である。また、氾濫の影響については、さまざまなシナリオを作成し、幅を持たせて起こりうる氾濫の影響を決定することが可能である。

氾濫防御施設の破堤確率は、氾濫防御施設を破壊する負荷と強度をすべて組み合わせた総合的な確率である。確率論的アプローチにより、氾濫防御の安全レベルを検討する際に、実際の負荷や強度にまつわる不確実性を明確に表すことができる。

計算された氾濫確率と起こりうる氾濫影響の組み合わせにより、氾濫リスクが決定される。

図 9 リスクアプローチの概要（以下、VNK2 メソッドについて簡潔に説明する）



### 3.1.1 氾濫シナリオ

ある地域において、浸水は様々な箇所で発生しうるものであり、破堤もいたるところで起こる可能性がある。しかし、十分に正確なリスク分析を行うためには、想定されるすべての破堤箇所について氾濫の影響を特定する必要はない。まず水系を、ほぼ同様の氾濫パターンが想定されるセグメントに分割する。その際、セグメント内における破堤箇所の正確な位置にはこだわらない。そこで、地域や水系の特性に基づき、様々な破堤箇所を定義し、破堤確率と氾濫被害を求める。

さらに、破堤箇所の選択に加えて、流出波の形状や高潮の形状設定についても選択しなければならない。形状が異なれば、ある位置の破堤による流水に違いが生じるからである。そのため、起こりうる浸水の範囲と氾濫特性を把握するために、様々なタイプの水理負荷の形状を考慮することが重要である。

### 3.1.2 影響

氾濫の影響を求めると、ある地域の被害額と死者数が想定できる。そして死者数や経済的被害の空間的な分布がわかる。氾濫の影響を求める方法を、以下に簡潔にまとめる。

- 破堤箇所と、それにより各セグメントが受ける影響を定義する。
- 氾濫流解析モデルを作成する。
- 氾濫シナリオを定義する。
- シナリオ毎に影響を推定する。
  - 経済的被害
  - 避難
  - 死者数

これらの影響を求めると、堤防の決壊によって発生し得る被害について見識が得られる。

### 3.1.3 氾濫発生確率

氾濫防御施設の破堤確率は、氾濫防御が決壊する負荷と強度をすべて組み合わせた総合的な確率である。水理的な負荷は、極端な降雨による河川への流出、または極端な風により海岸沿いの高水位や高波が引き起こされる場合に発生する。これらの異なる破堤に至る条件は、特定の水理的な負荷を超過する確率に変換される。

水理的な負荷の超過確率を堤防の強度と組み合わせて、検討対象とする堤防セグメントの氾濫確率を決定する。

いくつかの水系（主に河川）では、堤防の破堤は、より下流に位置する堤防の水理負荷に影響を与える可能性がある。つまり、上流と下流の破堤箇所には依存関係がある。上流の破堤箇所が決壊した場合、水理的な負荷は減少し、下流に位置する破堤箇所の破堤確率は小さくなる。下流の堤防の破堤確率が過大評価されるのを防ぐため、この効果を氾濫発生確率の計算に組み込む必要がある。

### 3.1.4 氾濫リスク

氾濫リスクは、各シナリオの氾濫発生確率と氾濫の影響に基づいて算出する。すべてのシナリオが氾濫リスクに寄与し、その合計が総氾濫リスクとなる。

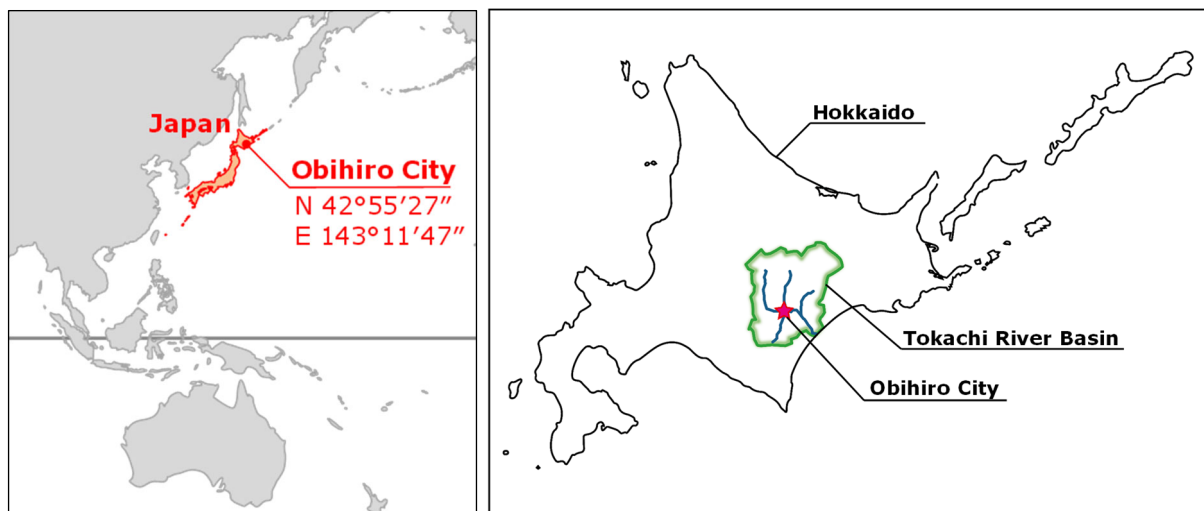
氾濫リスクを表現する方法は様々であり、リスクのすべての測定は、氾濫発生確率とその影響に基づいて計算することが可能である。リスクの測定は以下の通りである。

- 経済的被害の年間期待値
- 経済的被害の年間期待値の空間的分布
- 死者数の年間期待値
- 地点別個人リスク
- 社会的リスク

## 3.2 ケーススタディ対象地域

- 本研究の対象地域は、北海道南東部の十勝平野を流れる十勝川流域のうち、中流部に位置する帯広市を対象とした。
- 十勝川は、流路延長 156km、流域面積 9,010km<sup>2</sup> の一級水系である。標高 2,077m の大雪山系十勝岳を水源とし、多くの支流を合わせて帯広市を貫流し太平洋に注ぐ。流域の北側と西側は 2,000m 級の山々に囲まれており、台風などの気象条件によっては、地形性降雨による大量の降雨と河川の急激な出水をもたらす。

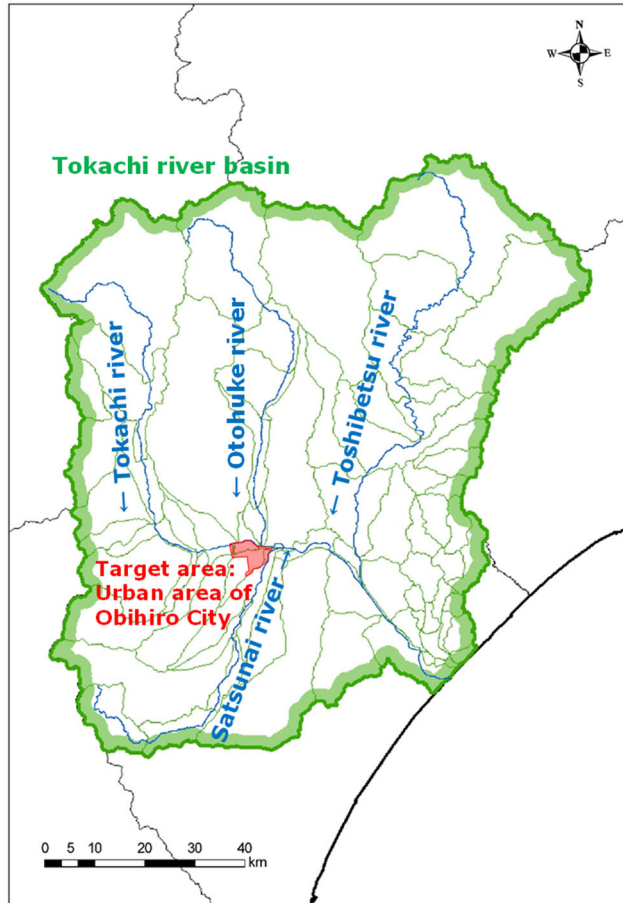
図 10 北海道と帯広市の位置



- 本研究のリスク評価は、基幹機能が集中する帯広市の市街地を対象とする。帯広市は、日本有数の食糧供給基地として知られる十勝地方の中心である。人口は約 17 万人で、そのうち 10 万人が市役所や病院、商工・エネルギー・流通の拠点など地域の重要施設が多く備わる中心街に住んでいる。

- 帯広市街地は、十勝川本川と同水系で 2 番目に大きな支川である札内川の合流地点に位置し、氾濫の可能性が高い地域である。1922 年、1962 年、1980 年に大きな水害を経験した後は、河川整備の進展も寄与して浸水被害は免れているが、気候変動影響の顕在化による氾濫リスクの増大が危惧されている。

図 11 十勝川流域の対象域



- 北海道は、日本国内の治水分野における気候変動適応の先進地域であり、十勝川においては、日本の気候予測データベース d4PDF（水田ら, 2017）に基づき、過去と将来に物理的に起こりうる大雨事象に関する 1 万ケース以上の詳細な気象シミュレーションと氾濫シミュレーション結果を持つ。本研究では、日本の大量の物理シミュレーションとオランダの確率的な氾濫リスク評価を組み合わせた新しいリスク評価手法の開発を試みた。

### 3.3 第 1 部：極端降雨と河川流量

#### 3.3.1 観測値と気候予測データセットに基づく氾濫被害推定

2016 年 8 月、日本の北海道地方に 1 週間で 3 つの台風が上陸した。その後、さらに台風 10 号がこの地方に接近した。これらの台風は、北海道の各地で記録的な大雨をもたらし、河川の氾濫や土砂崩れ、道路や橋の流出、地域の主要産業である農地に大きな被害をもたらした（参考；国土交通省、グエン、山田 2017）。この共同研究プロジェクトの日本側リーダーを中心とする研究グループは、国産スーパーコンピュータ（地球シミュレータ）を用いて、20 世紀半ばから今世紀末までをカバーする地域気候モデルによる大規模気候シミュレーションを行い、大量のアンサンブルメンバーと高い空間解像度を持つ気候変動予測データベースを開発した（Yamada 2020, Hoshino et al., 2020）。さらに、予想された大雨の規模や発生確率の妥当性を、数学的・統計学的理

論を用いて実証した (Shimizu et al, 2020)。このデータを使う利点は、起こりうる極端降雨の発生確率と強度が推定できることである。また、これらの現象の将来的な変化を予測することも可能である。我々は、数千年にわたる気候変動予測の結果をもとに、大雨の時空間特性とそれに伴う氾濫特性を解析し、現在の気候および地球温暖化が進行した将来の気候において起こりうる大規模氾濫に伴う人的・経済的被害のリスクを定量化した (Yamada 2020)。本研究は、過去の降雨観測に基づく従来のハザードベースの治水計画から、将来の気候における極めて大規模な氾濫を考慮した新たなリスクベース計画への転換に貢献した。

治水分野では、降雨流出から浸水までの過程を記述する水文モデル（降雨流出モデル、浸水モデルなど）が計画条件の設定に根本的な役割を果たす。一方で、過去に観測された氾濫事象の数が有限であるため、モデルのパラメータは不確実性を伴う。本共同研究の「ワークパッケージ 1」では、十勝川流域のピーク流量を推定する手法を開発するために、各モデルで表される降雨とピーク流量の関係について検討した。降雨-ピーク流量関係を定量化することの利点は、異なる水文モデルの特性の不確実性が推定できるようになることである。モデルで表現された降雨-ピーク流量関係を導入することで、低頻度かつ大規模な極端降雨の空間-時間特性の将来変化を検討し、力学モデルによるシミュレーションと統計的手法により極端降雨時のピーク流量を算出した。ここで、ワークパッケージ 1 で構築された方法論は、同じレベルの極端降雨分布と水文モデルにより得られる降雨-ピーク流量関係を用いて、計画レベルの確率年におけるピーク流量の確率分布を推定することを目的としている。この手法の利点は、気候モデルや降雨流出モデルの違いや精度に応じて、アウトプットとしての推定ピーク流量が更新されることである。本テクニカルレポートにて、ワークパッケージ 1 で得られた方法論と結果について述べていく。

### 3.3.2 確率年ごとのピーク流量分布の推定方法

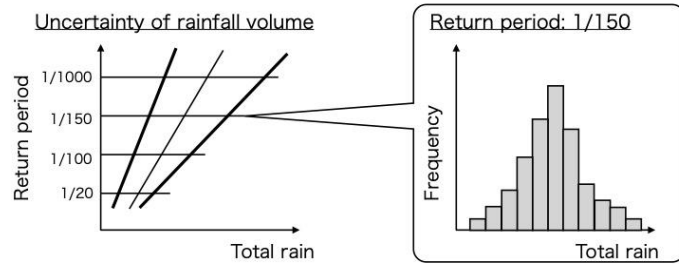
確率年ごとのピーク流量頻度の推定方法は、図 12 に示す通り 3 段階で構成されている。まず、リサンプリング手法によるアンサンブル気候データを用いて、確率年ごとの降雨量頻度を推定する。この処理により、任意の確率年を持つ降雨の頻度分布、ここでは任意の確率分布の範囲を信用区間として定義している。図 12 各確率年のピーク流量頻度の推定方法 2

第二段階では、降雨流出モデルの結果を用いて、降雨量とピーク流量との関係を推定する。アンサンブル気候データセットに含まれるいくつかの降雨パターンについて降雨流量シミュレーションを行い、対象地点のピーク流量を算出する。次に、降雨量とピーク流量との関係に分位点回帰を適用し、降雨量の関数としてのピーク流量の相対頻度を求める。

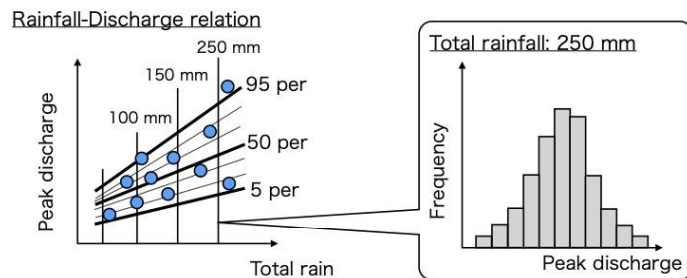
第三段階は、確率年ごとのピーク流量頻度の推定である。アンサンブル気候データから得られる対象確率年  $T$  の降雨の頻度分布を用いることで、条件付き分布に対応する、任意の降雨量によるピーク流量分布の発生頻度を定量化することができる。そして、ピーク流量と  $T$  年降水量分布の条件付き分布の加重平均をとることで、 $T$  年ピーク流量の確率分布が導き出される。以下、その方法について詳しく説明する。

図 12 各確率年のピーク流量頻度の推定方法 2

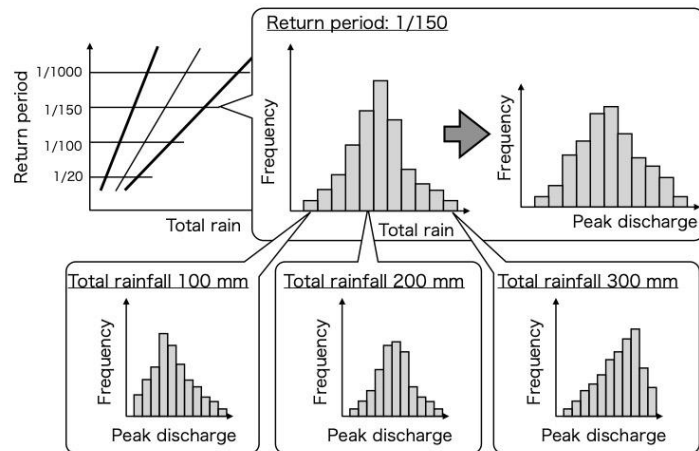
**Step 1. Estimation of rainfall volume frequency for each return period**



**Step 2. Estimation of relationship between rainfall volume and peak-discharge**



**Step 3. Estimation of peak-discharge frequency for each return period**



### 3.3.2.1 降雨の確率年

現在の日本の治水管理における設計雨量は、一般に次のような手順で算出される。まず、観測年間最大雨量を、計画雨量の推定候補であるいくつかの確率分布に当てはめた。そして、安定性と適合度が最も高い確率分布を選択し、この選択した分布における対象年間超過確率「 $p$ 」に対応する分位値としての計画降雨量を求める。超過確率  $p$  に対応する確率雨量とは、1 年間にこの確率雨量を超える雨量が発生する確率が  $p$  になることを意味する。また、確率年は、採用した確率分布における超過確率の逆数として定義され、治水管理において重要な指標となる。日本の主要河川流域の治水管理は、100 年から 200 年までの確率年を計画レベルとしている。

しかし、先進国の主要な河川流域における水文量の観測期間は、数十年から百年を上回る程度である。これは、観測期間が氾濫防御施設の計画確率年より短いことを示している。つまり、年最大値データを用いた場合、観測される極値の数は数十から百程度であり、従来の水文頻度解析における計画条件の推定は大きな不確実性（推定誤差）を含んでいる。アンサンブル気候データは、算出された気象現象の物理的な実現可能性を検証する力学モデルに基づく降雨のサンプルを多数有するため、確率的な降雨の不確実性を頻度分布として定量化することができる。不確実性を定量化するため、本研究ではアンサンブルデータのリサンプリングを行った。

大量アンサンブル気候データから得られた年間最大大雨のリサンプリングを行い、確率的な降雨の頻度分布を明らかにした。気候実験においては、リサンプリングを適用し 10 万個のサンプルを作成した。T 年確率降雨の頻度分布を得るため、過去と 4°C 上昇気候条件からリサンプリングした 10 万個のサンプルに対して、個々にガンベル分布を用いた。すなわち、60 年間の年間最大 72 時間雨量に合うガンベル分布を 10 万個推定することで、任意の確率年の T 年確率雨量が 10 万セット得られ、その頻度分布を推定することができる。気候モデルを用いているため、導入されたリサンプリング法は物理的なモンテカルロ実験と解釈することができる。ここで、ガンベル分布の累積分布関数は、式 (1) のようになる。

$$F_X(x) = \exp \left[ -\exp \left\{ -\left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

なお、 $F_X(x)$  はガンベル分布の累積密度分布、 $x$  は年間最大雨量、 $\mu$  は位置パラメータ、 $\sigma$  はスケールパラメータである。

### 3.3.2.2 降雨-ピーク流量関係

降雨量の関数としてのピーク流量の頻度分布は、分位点回帰を用いて推定した。時空間的な降雨パターンの違いにより、同じ降雨量であってもピーク流量に幅がある。降雨量とピーク流量との関係は関数で表される。ピーク流量の範囲は、分位点回帰を用いてパーセンタイル値として定量化し、各降雨量について 1~99 パーセンタイルの各分位値を抽出した。得られた 99 個の流量を用いて、ピーク流量の頻度分布を作成した。分位点回帰を適用することで、任意の降雨量によって発生するピーク流量の条件付き確率分布を算出することができる。

### 3.3.2.3 ピーク流量の確率年

各確率年のピーク流量の頻度分布を推定した。ステップ 1 で得られた各確率年の降雨量の頻度分布と、ステップ 2 で得られた各降雨量のピーク流量の頻度分布を用いて、各確率年のピーク流量の頻度分布を算出する。降雨量の各棒（ヒストグラムのセクション）は、ピーク流量の頻度分布を示す。ピーク流量の頻度分布を方程式(2)で表す。

$$f_{Q_p}(q_p, T) = \int_r f_{Q_p}(q_p | r, T) f_R(r, T) dr \quad (2)$$

ここで、 $T$  は対象確率年、 $Q_p$  はピーク流量、 $R$  は降雨量、 $f_{Q_p}(q_p | r)$  は任意の降雨量  $r$  の下で発生しうるピーク流量の条件付き確率密度関数、 $f_R(r)$  は降雨量の確率密度関数、 $f_{Q_p}(q_p)$  はピーク流量の確率密度分布とする。

本研究では、任意の確率年  $T$  に対する確率降雨  $f_R(r, T)$  の連続分布を構築するために、上述のリサンプリング法で得られる確率降雨値のセットにガンベル分布を用いる。また、任意の期間の総雨量と計算ピーク流量との関係から算出できる、与えられた総雨量値  $r$  に対して得られた計算ピーク流量値の集合にガンベル分布を用い、ピーク流量の条件付き分布  $f_{Q_p}(q_p | r)$  を構築することができる。式 (2) は、任意の確率年  $T$  の総雨量下でのピーク流量  $f_{Q_p}(q_p, T)$  の確率分布を  $f_R(r, T)$  としたものであり、以下の手順によって導き出すことができる。 $f_{Q_p}(q_p, T)$  は任意の降雨値  $f_{Q_p}(q_p | r)$  の下でのピーク流量条件付き分布の加重平均であり、降雨の分布  $f_R(r, T)$  は d4PDF-5km から算出する。

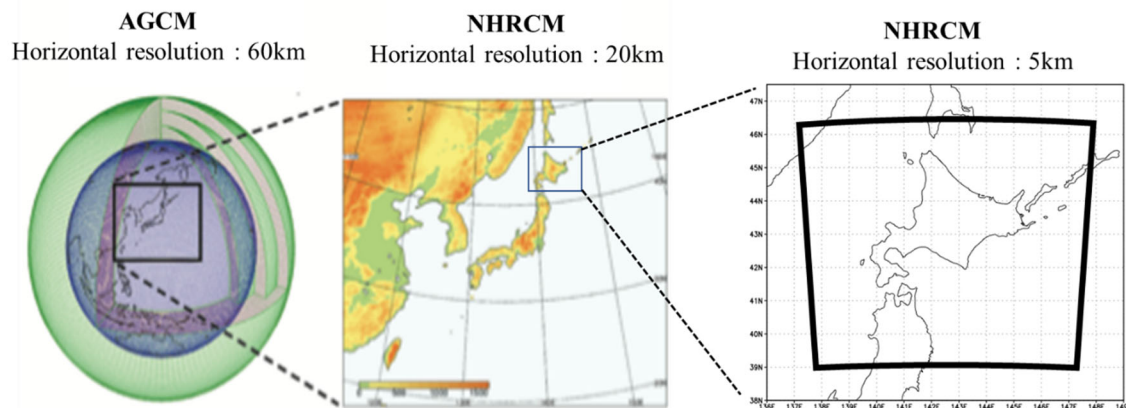
上記の確率ピーク流量法により、降雨流出モデルから得られる総雨量とピーク流量との関係で表される条件付き分布と、アンサンブル気候データから得られる確率雨量そのものの分布を統合する。つまり、気候モデルと降雨流出モデルの違いや精度の改善に伴い、出力されるピーク流量の確率分布を更新することが可能な手法である。

### 3.3.3 大量アンサンブル気候データ

近年、文部科学省の研究プロジェクト（SOUSEI、TOUGOU、SI-CAT、DIAS）や JAMSTEC 地球シミュレータ特別推進課題により、大量アンサンブル気候シミュレーションデータベース（d4PDF）（Mizuta et al, 2017）が作成・活用されている。それにより、d4PDF と過去・現在・将来の気候に関する豊富なデータを用いることで、災害につながる稀な気象現象の発生頻度を初めて評価することが可能になった。もともと d4PDF は、気象研究所 AGCM バージョン 3.2（MRI-AGCM3.2）と呼ばれる大気 GCM（AGCM）のシミュレーションで構成されており 2）（Mizuta et al, 2012）、水平解像度約 60km のシミュレーション（d4PDF-60km）と、日本を対象とした地域気候モデル（RCM）を用いて d4PDF-60km から水平解像度 20km に力学的ダウンスケール（DDS）したもの（d4PDF の地域実験）（以下、d4PDF-DS20）（図 13）がある。d4PDF の実験設定は、過去の気候条件（以下、過去実験；50 アンサンブル×60 年（1951-2010））と、産業革命前より 4°C 上昇した気候条件（以下、+4K 上昇実験；6 海面水温パターン×15 アンサンブル×60 年）となっている。過去実験で用いた海面水温（SST）は、海面水温と海上気象要素の格子点データ第 2 版（COBE-SST2）（Hirahara et al, 2014）から得たものである。SST の解析誤差に基づく小さな摂動を SST の初期条件に加え、アンサンブルメンバーを準備した。+4K 実験で用いた海面水温は、第 5 次 CMIP5 で実施された RCP8.5 実験に基づく 6 パターンで構成されている（Taylor et al., 2012）。PDF の実験設定の詳細については、水田ら（2017）を参照されたいさらに、d4PDF-DS20 の年間最大雨量事象を水平解像度 5km に変換するために、力学的ダウンスケーリング（DDS）を行った。対象降雨事象は、毎年 6 月 1 日～12 月 1 日の期間の d4PDF-DS20 において、十勝川帯広基準点流域で 72 時間の降雨量が最大値となるイベントと定義した。また本研究では、降雨事象を年間最大降雨事象と定義した。力学的ダウンスケーリングには、d4PDF-DS20 で用いた NHRCM（Sasaki, 2008）を採用し、力学的ダウンスケーリングの対象域を北海道周辺 800km に設定した図 13 d4PDF におけるダウンスケーリング

処理（図 13）。さらに、計算格子数を水平方向に 161、垂直方向に 50 とした。力学的ダウンスケーリングには、Kain-Fritsch 対流パラメタリゼーションスキーム (Kain et al., 1993) が用いられた。その他の物理スキーム（微物理スキーム、地表スキーム、境界層スキーム）は川瀬らが用いたのと同様である (Kawase et al., 2018)。本研究ではグリッド平均地形を用いたが、Kawase et al. (2018) は envelope-type mountains を使用した。本研究では、d4PDF-DS20 の値を利用して、計算のための初期条件と境界条件を設定した。力学的ダウンスケーリングの対象期間は、年間最大降水量の発生期間を含む 15 日間とした。力学的ダウンスケーリングは、合計で過去実験 3000 事象、+4K 実験 5400 事象において行われた。山田ら (2018) は、豪雨特性の観点から、d4PDF-5km の有効性を検証した。図 13 d4PDF におけるダウンスケーリング処理

図 13 d4PDF におけるダウンスケーリング処理



### 3.3.4 水文モデル

本セクションでは、両国が選定した降雨流出モデルについて説明する。これらの物理モデルで表現される降雨やピーク流量の特性から、モデル計算の不確実性を評価することができる。

#### 3.3.4.1 Wflow\_sbm

Wflow\_sbm は、簡略化された物理関係に基づくバケツ型水文モデルで、水平方向の輸送に Kinematic wave 法による表面流と中間流のシミュレーションを使用している。wflow\_sbm モデルは分布型水文モデルであり、高解像度空間入力データの利用を可能にする。このため、高解像度気候モデル出力の利用に適したモデルとなっている。wflow モデルはオープンソースで、自由に利用することができる。

#### 3.3.4.2 MATSIRO モデル

ここでは、陸路過程モデル (MATSIRO) (Takata et al., 2003) も使用されている。MATSIRO は、陸面と大気間の水蒸気、エネルギー、運動量の相互作用を物理的にシミュレートすることができる。大気と陸面の相互作用を大循環モデル (GCM) で再現することができるのである。MATSIRO は、人間の活動による影響 (Pokhrel et al., 2017) や地下水の影響 (Koirala et al., 2014) など、水循環の様々な影響評価に利用されている。近年、地表や河川の状態をリアルタイムで推定するシステムが開発・運用されている (Today's Earth)。このシステムは、陸面過程モデルと河道モデル CaMa-Flood で構成されている。気象の予報・観測データをシステムの入力データとして、地球規模で水害のリスクを推定する。MATSIRO は、ベースフロー、saturation excess runoff (Dunne runoff)、infiltration excess runoff (Horton runoff)、土壌最上層の飽和流出の 4 種類の流出を考慮して、表面流と中間流を解く。最初の 3 つの流出タイプは、サブグリッドスケールの勾配プロファイルを仮定した簡略化した TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979) を適用して計算されている。

#### 3.3.4.3 RRI モデル

RRI モデルは、洪水流や浸水のシミュレーションのために用いられる。RRI モデルは、降雨流出と浸水を同時にシミュレーションできる 2 次元モデルである (Sayama et al, 2012, Sayama et al, 2015)。河道のあるグ

リッドセルでは、勾配と河川が同じグリッドセル内に配置されていると仮定している。河道は、その上にある斜面のグリッドセルの中心線に沿った 1 本の線として離散化される。斜面のグリッドセル上の流れは 2 次元拡散波モデルで、河道の流れは 1 次元拡散波モデルで計算された。RRI モデルは、氾濫特性をよりよく表現するために、水平方向の中間流、鉛直方向の浸透、地表流をシミュレートする。

### 3.4 第 2 部：堤防の破堤確率

日本の治水計画や浸水想定区域図策定に関わる解析では、計画高水位を超えると堤防が決壊するという条件で計算が行われている。堤防が決壊するか、どうかの確率を 0 または 1 で評価している。しかし、実際に起こる破堤現象は、水位が計画水位に達しても決壊しない場合と、水位が計画水位に達しなくても決壊する場合がある。これは、堤防の破堤メカニズム、堤防の強度、水理条件の時間的な変化など、さまざまな要因によるものである。氾濫リスクを正しく評価するためには、破堤を確率的に評価することが不可欠である。

オランダでは、フラジリティカーブを用いて破堤確率から氾濫リスクを評価し、政策に導入している。本研究では、オランダの破堤確率計算法を十勝川流域に適用し、日本の氾濫の特徴を踏まえて修正を加え、フラジリティカーブを作成する方法を提案するものである。

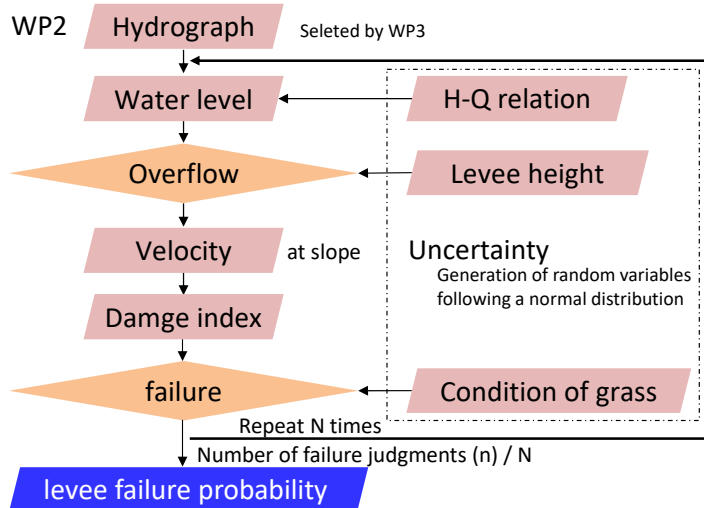
破堤の原因には、いくつかの要因がある。日本では一般的に、越水、浸食・洗掘、浸透の 3 つの要因に分かれている。2019 年は台風 19 号により日本各地で水害が発生し、国が管理する河川で 14 件、都道府県が管理する河川で 128 件など、各地で堤防が決壊した。破堤の原因に関する調査結果によると、主な原因は越水で 86% に及ぶ。本研究では、日本で最も多く報告されている堤防決壊の原因の一つである越水について、破堤確率を算出した。

### 3.4.1 アプローチの概要

本研究で適用した手法は、VNK<sup>2</sup>とオランダの堤防安全評価手法であるBOI<sup>3</sup>に基づいており、その一部を改良したものである。<sup>23</sup>

- 破堤メカニズムに関しては、帯広にとって最も重要であると考えられる越水のみを検討した。また、ハイドログラフの継続時間を考慮し、被害を累積値として評価するアプローチを適用した。
  - ピーク流量の確率だけでなく、ハイドログラフの形状も考慮した。水位の高い状態が長く続くと、護岸に与える被害が大きくなるため、破堤確率が高くなる。
  - 対象地域の全体の破堤確率を計算する際には、異なる堤防のセクション間の依存関係を考慮した独自の手法を採用した。
- 破堤確率は、流量増加において異なるセクションの破堤が同時に起こり得るため、流量に応じた条件で組み合わせている。
  - 各セグメントの破堤確率をセクションの破堤確率へと統合する際には、各流量において最大となるセグメントの破堤確率を使用した。つまり、各セグメントの破堤確率は非独立と見なしている。
  - 各セクションの破堤確率を河川全体の破堤確率へと統合する際には、上流区間にて起こりうる破堤による、下流の破堤確率の減衰効果を考慮した。

図 14 不確実性を考慮した破堤確率の計算の流れ 3



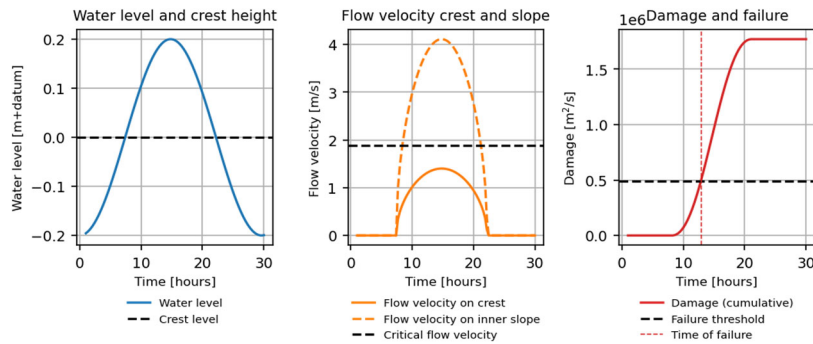
<sup>2</sup>公共事業局 VNK プロジェクト・オフィス, オランダ氾濫リスク分析 -最終報告書, 2016, <https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/131663/vnk-rapport-eng-lr.pdf>.

<sup>3</sup><https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/nieuwsbrieven/nieuwsbrief-landelijke-beoordeling/nieuwsbrief-boi-oktober-2019/programma-boi-2023/>

### 3.4.2 フラジリティカーブ

本研究では、越水による破堤メカニズムに着目し、越流水による堤防法面の浸食による破堤の発生を評価する方法を採用した。

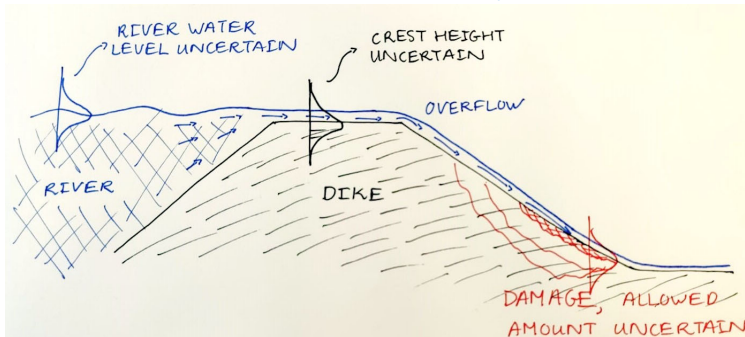
図 15 累積的越水法を用いた越水による被害計算例。4



### 3.4.3 不確実性

次の図は、破堤メカニズムの越水を考える際に考慮した、被害（前項にて触れた限界流速）、水位、天端高などによる不確実性を示したものである。

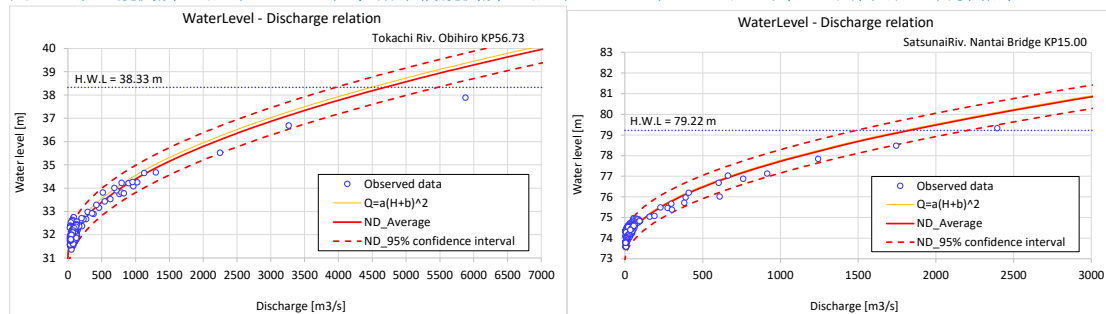
図 16 不確実性を持った変数を示す越水のスケッチ。5



#### 1. 水位

河川水位の不確実性は、HQ 曲線式から算出した水位と対象河川で現地観測された水位との関係から評価した。観測は、十勝川帯広観測所基地点（KP56.73）、札内川南帯橋観測所基地点（KP15.00）で実施した。データは 2014 年から 2018 年までの 5 年分である。観測は週 1 回、または流出時に実施されたものを使用した。そして、観測水位と、観測流量に対する H-Q 曲線式から算出した水位との差を算出し、この差の平均と分散を用いて、不確実性を評価した。

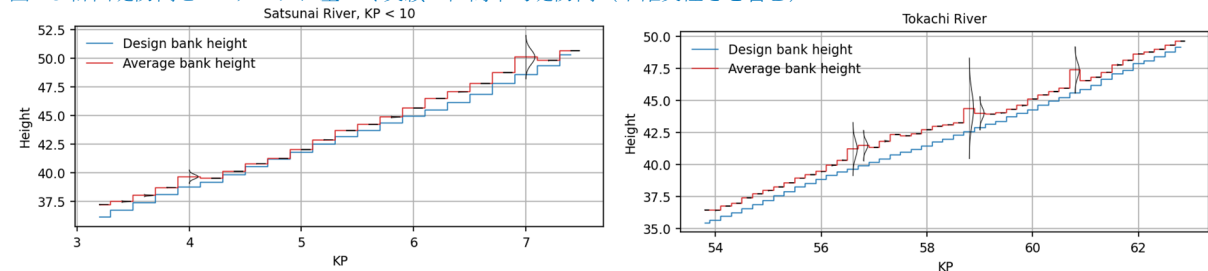
図 17 帯広観測所地点（KP56.73）、南帯橋観測所地点（KP15.00）における水位の不確実性の計算結果 6



## 2. 堤防高

十勝川と札内川の河川計画で定められた計画高水位は「計画堤防高」と定義されている。航空レーザ測量で得られた地上高データ（LP データ）をもとに天端高を縦断方向に整理し、堤防縦断方向 0.2km ごとに平均値と標準偏差を算出し、堤防高の不確実性を評価した。計画中の堤防高、LP データは北海道開発局より提供されたものである。

図 18 計画堤防高と LP データに基づく実績の区間平均堤防高（不確実性を含む） 7



## 3. 限界流速

本研究のアプローチのうち、限界流速の不確実性は Dean ら(2010)によって示された限界流速の平均値及び標準偏差を用いた。これらにより、堤防法面の強度に関する不確実性を定量化することができる。

- 「平野の芝生…良好なカバー」 :  $u_{cu\_c} = 1.80$ ,  $\sigma_{(u\_c)} = 0.38$
- 「平野の芝生…平均的なカバー」 :  $u\_c = 1.30$ ,  $\sigma_{(u\_c)} = 0.12$
- 「平野の芝生…貧弱なカバー」 :  $u\_c = 0.76$ ,  $\sigma_{(u\_c)} = 0.04$

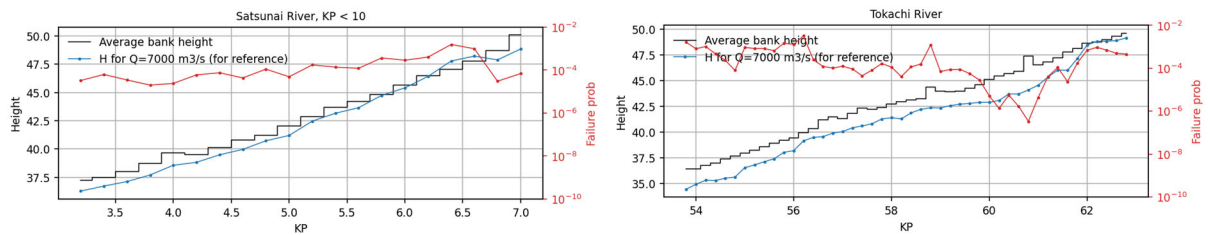
十勝川の堤防は適切な管理が実施されているため、本研究においては、平野の芝生の状態は「良好なカバー」としている。

これらの様々な不確定要素（確率変数）は一つのフラジリティカーブにまとめることができる。本研究では、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、不確実性を考慮したフラジリティカーブを算出した。

### 3.4.4 破堤確率

十勝川と札内川の堤防の決壊確率を算出した。約 0.2km の間隔で破堤確率を算出した。その結果、札内川の堤防の破堤確率は  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  程度となった。十勝川の堤防の決壊確率は、場所によって大きく異なるものの、札内川と同様に  $10^{-5}$  から  $10^{-3}$  の範囲に収まっている。

図 19 1 箇所あたりの破堤確率 (KP)。8



### 1. セグメントをセクションに統合する

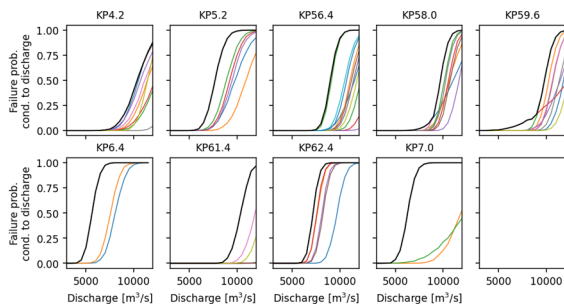
ここまでで、堤防の破堤確率を、堤防のセグメント毎に計算した。ここでは、セグメント毎の破堤確率をセクション及び帯広市街地全体の破堤確率へと組み合わせていく。その際、同一の氾濫シナリオの影響が重複して考慮されるのを回避する必要がある。つまり、あるセグメントが決壊すると、破堤条件が独立していると考えない限り、次のセクションの破堤確率が下がるということである。したがって、破堤確率を組み合わせるということは、確率を独立と非独立のどちらでとらえて組み合わせるかという現実的な選択をすることになる。

- まず、流量を条件として確率を統合する。つまり、一回の出水で、すべての堤防に沿って高水位が発生すると想定する。これは、2つの川（札内、十勝）では少し単純化されているかもしれないが、高水位が同じ雨によって引き起こされることから、おそらく非常に現実的な単純化だと言える。
- 次に、氾濫により影響が類似している区間ごとに、セグメントをセクションにグループ化する。これらのセクションは近接しているため、強度は依存関係にあると仮定する。つまり、堤防は常に（その流量に対して）最も高い破堤確率を持つセグメントで決壊することになる。
- 第三に、セクションは河川ごとに独立して組み合わせられるが（やはり流量が条件）、セクションの順番を考慮する。各セクションは十分に離れているため、堤防の強度は独立しているとみなすことができる。ただし、上流側の堤防が決壊した場合、下流側の水位が下がり堤防は決壊しないと想定している。

### 2. セグメントの確率をセクションに統合する

セグメントの確率をセクションに統合した結果を下図に示す。出水ごとに最大破堤確率を選択した結果、黒い曲線が得られる。ほとんどのセクションでは1つのセグメントが支配的であるが、KP59.6（図 20 の右上）だけは2つのセクションが組み合わせられたフラジリティカーブになっている。

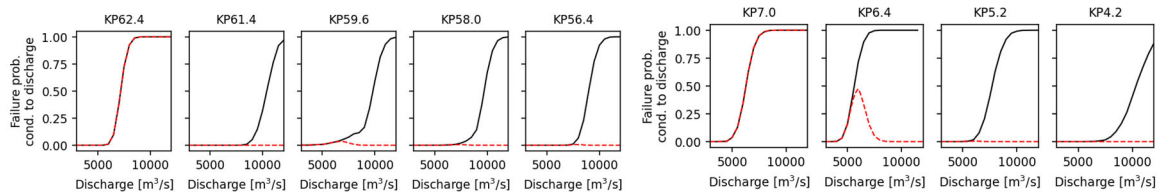
図 20 全セグメントのフラジリティカーブ（色）、統合セクション曲線（黒）。9



### 3. 河川ごとのセクション確率の統合

河川ごとのセクション確率を組み合わせた結果を下の 2 つの図に示す。黒い曲線は、上流セクションに依存しないオリジナルのセクション曲線である。赤の破線曲線は、上流部の破堤の可能性を考慮したものである。最も高い流量は確実に上流の破堤につながり、これらの流量の下流での条件付き破堤確率を減少させる。したがって、下流側のセクションは、比較的低い流量においてのみ、特に破堤確率の高いセクションにて決壊することになる。

図 21 上流部の影響を考慮する前と後における十勝川全セクションの脆弱性カーブ 10



#### 3.4.5 氾濫発生確率

氾濫確率は、WP1 で算出した破堤確率と水位超過確率を用いて算出した。WP3 で設定した各セクションの氾濫確率を算出した。

表 1 WP3 で用いられるセクションの過去平均/破堤確率。シナリオ確率は、上流での決壊を補正した後の破堤確率である。1

| 破堤箇所     | セクション破堤確率 | シナリオの確率  |
|----------|-----------|----------|
| 札内 KP7.0 | 2.53e-05  | 2.53e-05 |
| 札内 KP6.4 | 5.67e-05  | 3.79e-05 |
| 札内 KP5.2 | 4.62e-06  | 1.45e-07 |
| 札内 KP4.2 | 3.00e-07  | 6.52e-10 |
| 十勝KP62.4 | 1.41e-04  | 1.41e-04 |
| 十勝KP61.4 | 3.36e-04  | 9.93e-07 |
| 十勝KP59.6 | 1.21e-03  | 5.36e-04 |
| 十勝KP58.0 | 6.62e-04  | 4.49e-05 |
| 十勝KP56.4 | 2.04e-02  | 1.06e-02 |

表 2 WP3 で用いるセクションの将来平均/破堤確率。2

| 破堤箇所     | セクション破堤確率 | シナリオの確率  |
|----------|-----------|----------|
| 札内 KP7.0 | 8.87e-04  | 8.87e-04 |
| 札内 KP6.4 | 1.42e-03  | 6.52e-04 |
| 札内 KP5.2 | 3.26e-04  | 2.75e-06 |
| 札内 KP4.2 | 6.11e-05  | 3.37e-08 |
| 十勝KP62.4 | 5.46e-03  | 5.46e-03 |
| 十勝KP61.4 | 9.52e-03  | 5.72e-06 |
| 十勝KP59.6 | 1.55e-02  | 2.07e-03 |
| 十勝KP58.0 | 1.37e-02  | 2.56e-04 |
| 十勝KP56.4 | 7.53e-02  | 1.60e-02 |

### 3.5 第3部：被害、避難、死者数、氾濫リスク

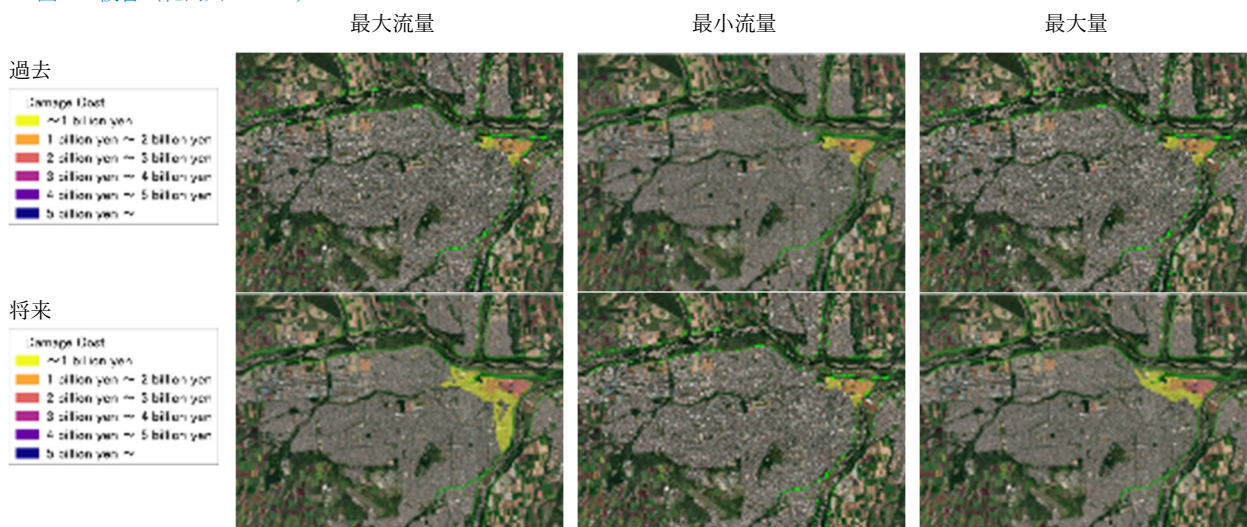
第3部では、帯広の事例における氾濫の影響を示す。経済的被害、避難、死者数、氾濫リスクのすべての側面に関し、アプローチと結果の概要を述べる。より広範な解析と詳細な説明は、報告書「氾濫発生リスクと気候変動北海道 WP3、2021年」に記載する。

#### 3.5.1 経済的被害

被害額の算出は、日本における治水事業の効果を費用対効果で表す一般的な手法である「治水経済調査マニュアル（案）」に基づいて行った。「治水経済調査マニュアル（案）」は、全国的に公表されている基礎数量と被害率から、治水事業の経済的評価可能な効果を求めるための具体的な方法を示したものである。現在、最新版は2020年4月発行のものであるが、本調査では2005年4月発行のものに準拠して各被害額を算出している。

帯広の事例では、現状と気候変動を踏まえた状況について被害額を算出した。気候変動の状況下では、より極端な流量が発生し、洪水被害が増加する可能性がある。また、気候変動の影響に加え、越波も洪水や被害予測に影響を及ぼす。下図は、札内川 KP4.2 地点で破堤した場合の経済的被害の空間分布を示したものである。上の図は現在の「過去」の被害状況、下の図は気候変動を含む「将来」の被害状況を表している。シナリオごとに3つの被害計算を行い、越波の違いによる影響を表す。「最大流量」はピークが非常に高い越波、「最小流量」は越波のピークが堤防高よりやや上、「最大量」は比較的幅の広い越波であることを意味す。

図22 被害（札内川 KP4.2） 11



被害額の計算は、氾濫リスク分析に使用したすべての破堤箇所について行った。表3は、破堤箇所ごとの被害額の計算結果である。この表から、洪水被害の程度や場所の違い、形状の違いによる影響などを把握することができる。

表3 「過去」「将来」シナリオの経済的被害額3

|    | 破堤箇所      | 最大     | 最小     | 最大量    |
|----|-----------|--------|--------|--------|
| 過去 | 札内_KP4_2  | 83200  | 83200  | 83200  |
|    | 札内_KP5_2  | 170400 | 170400 | 170400 |
|    | 札内_KP6_4  | 362700 | 201800 | 362700 |
|    | 札内_KP7_0  | 308000 | 224800 | 308000 |
|    | 十勝_KP56_4 | 311300 | 143500 | 290200 |
|    | 十勝_KP58_0 | 465600 | 309300 | 450200 |
|    | 十勝_KP59_6 | 568200 | 488200 | 541200 |
|    | 十勝_KP61_4 | 641300 | 597600 | 637400 |
|    | 十勝_KP62_4 | 606800 | 547800 | 606800 |
| 将来 | 札内_KP4_2  | 269000 | 77800  | 177500 |
|    | 札内_KP5_2  | 330400 | 141000 | 324300 |
|    | 札内_KP6_4  | 483200 | 193000 | 380100 |
|    | 札内_KP7_0  | 480600 | 226400 | 430700 |
|    | 十勝_KP56_4 | 834000 | 129000 | 479400 |
|    | 十勝_KP58_0 | 855900 | 294200 | 598300 |
|    | 十勝_KP59_6 | 865000 | 483000 | 697000 |
|    | 十勝_KP61_4 | 917000 | 583800 | 778000 |
|    | 十勝_KP62_4 | 798400 | 532300 | 837400 |

この経済的被害とは、堤防が決壊した際に発生しうる被害のことである。気候変動が計算上被害に与える影響は、最大シナリオで1.5～3倍となる。破堤箇所によっては、ハイドログラフの形状が算出被害に同様の影響を及ぼすところもあれば、越波の形状の影響がさらに大きくなることもある。

### 3.5.2 避難

避難は、洪水発生前と発生時の人々の位置を把握することができるため、死者数を求める上で重要な要素である。このケーススタディでは、避難率の定義を、安全な場所にたどり着いた人の割合とする。避難所だけでなく、高台や親戚・友人の家等の安全な場所も含む。

そこで重要な要素は、リードタイムが挙げられる。リードタイムは、安全な場所に到着するまでの時間を表す。このケーススタディでは、自宅から避難所までの距離と歩行速度を考慮し、利用可能なすべての事例（86件）を通じて標準的にリードタイムを設定しているが、地域/河川ごとに設定し、各河川/洪水の水位上昇率も含めることが今後の課題である。安全に避難するためのリードタイムの定義は、避難情報が発表されてから、堤防の決壊、越水、浸水などの災害が発生するまで、または高水位に到達するまでの時間である。自宅から避難所までの距離と避難時の歩行速度から、安全に避難するためのリードタイムを推定する。

図 23 リードタイムの概念 12

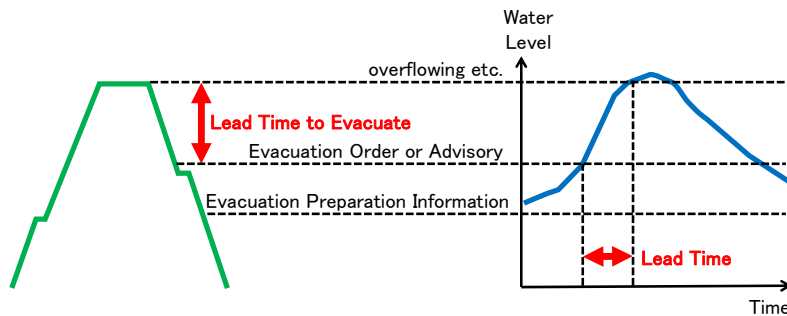
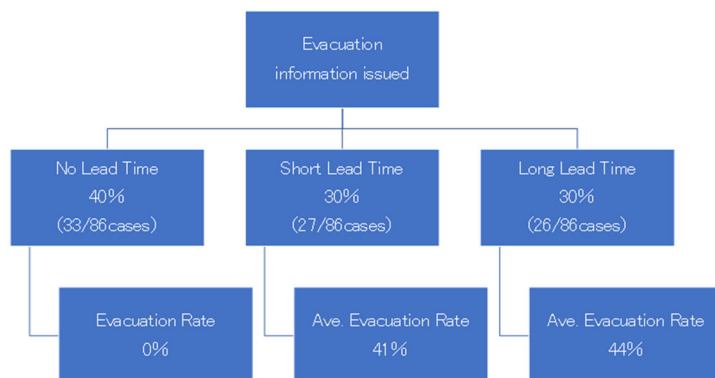


図 23 に、リードタイムに沿って作成されたシンプルなイベントツリーを示す。中間層のリードタイムなし、短いリードタイム（3 時間未満）、長いリードタイム（3 時間以上）の各比率は、このプロジェクトで収集した事例の母数をパラメータとしシナリオごとの比率を示したものである。下層は、シナリオごとの避難率を示す。ここで、リードタイムがない場合や避難情報の発表が遅れた場合は、住民が安全に避難できないと想定し、避難率は 0% とする。避難率は、リードタイムが短い場合は 41%、長い場合は 44% であった。全体の平均避難率（期待値）は 26% である。このプロジェクトでは、浸水域の残存人口（暴露/エクスポージャ）を算出することで、浸水域の死亡率を推定する。

図 24 リードタイムに基づくシンプルなイベントツリー 13



$$\text{Overall Ave. (Expected Value)} = 0.4 \times 0\% + 0.3 \times 41\% + 0.3 \times 44\% = 26\%$$

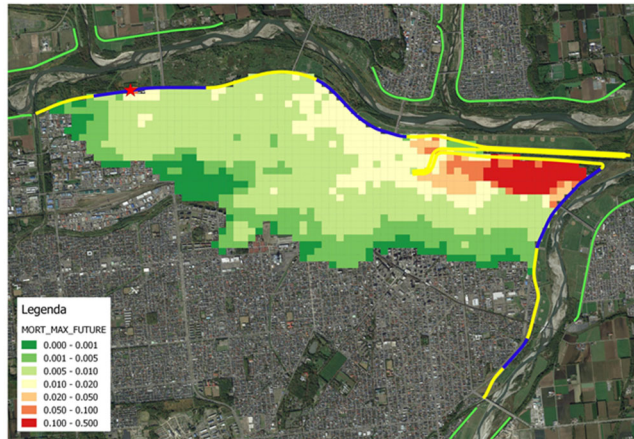
### 3.5.3 死者数

浸水域の死者数算出には、さまざまなモデルがある。例えば、米国陸軍工兵隊（USACE）が開発した「LIFESim」というモデルがある。このモデルは、被災者の年齢（65 歳以上/65 歳未満）を考慮し、水深により死亡率を求める。死者数は、床上水深が最大となる危険水位帯、準危険水位帯、安全水位帯の 3 つに分類された死亡率と、建物のどの階に危険にさらされた人数がどのくらいいるかを掛け合わせて推定する。

もう一つのモデルは、オランダモデルが挙げられる。このモデルでは、氾濫特性に即した死亡率関数を求める。浸水域を 3 つのハザードゾーン（決壊箇所付近、水位が急激に上昇する領域、その他の領域）に分け、各ゾーンの浸水深をパラメータとする死亡率関数を用いて、洪水時の死亡率を推定した。帯広のケーススタディでは、オランダの死者数モデルを用いた。

異なる破堤箇所については、浸水範囲と氾濫特性を用いて、浸水域の死亡率を定めた。これを用い、全地点での死亡率を求めた。KP61.4 地点の死亡率を図 25 に示しており、死亡率は 0.1% 未満から低地においては 10% 以上の間で変化する。これは、一般に水深が深くなるほど死亡率が高くなることで説明できる。図 25 死亡率最大シナリオ KP61.414

図25 死亡率最大シナリオKP61.414



各破堤シナリオの死者数は、死亡率に避難を考慮した人口を乗じることで算出する。避難を考慮すると、組み込まれた避難率に応じて、死者数の数値が変化することがある。下の表に、異なる氾濫シナリオ（最大、最小、最大量）と3つの避難率、避難無しの場合（0%）、全体平均率（期待値）26%、上限値80%について死者数を示す。氾濫シナリオによって浸水範囲が異なるため、暴露人口（エクスポージャ）も異なるため、これも表に含まれている。

表4 全シナリオの死者数概要4

| 破堤箇所 |           | 暴露人口<br>(エクスポー<br>ジャ) | 最大  |     |     | 暴露人口<br>(エクスポー<br>ジャ) | 最小  |     |     | 暴露人口<br>(エクスポー<br>ジャ) | 最大量 |     |     |
|------|-----------|-----------------------|-----|-----|-----|-----------------------|-----|-----|-----|-----------------------|-----|-----|-----|
|      |           |                       | 0%  | 26% | 80% |                       | 0%  | 26% | 80% |                       | 0%  | 26% | 80% |
| 過去   | 札内_KP4_2  | 4076                  | 17  | 13  | 3   | 4076                  | 17  | 13  | 3   | 4076                  | 17  | 13  | 3   |
|      | 札内_KP5_2  | 7830                  | 23  | 17  | 5   | 7830                  | 23  | 17  | 5   | 7830                  | 23  | 17  | 5   |
|      | 札内_KP6_4  | 15594                 | 56  | 42  | 11  | 9358                  | 9   | 7   | 2   | 15594                 | 56  | 42  | 11  |
|      | 札内_KP7_0  | 13930                 | 28  | 21  | 6   | 10445                 | 2   | 2   | 0   | 13930                 | 28  | 21  | 6   |
|      | 十勝_KP56_4 | 13411                 | 186 | 139 | 37  | 5985                  | 27  | 20  | 5   | 12427                 | 118 | 88  | 24  |
|      | 十勝_KP58_0 | 21555                 | 162 | 121 | 32  | 14200                 | 47  | 35  | 9   | 20769                 | 127 | 94  | 25  |
|      | 十勝_KP59_6 | 26884                 | 340 | 253 | 68  | 23204                 | 134 | 100 | 27  | 25533                 | 225 | 168 | 45  |
|      | 十勝_KP61_4 | 30421                 | 337 | 251 | 67  | 28893                 | 218 | 162 | 44  | 30283                 | 289 | 215 | 58  |
|      | 十勝_KP62_4 | 28880                 | 179 | 133 | 36  | 26558                 | 76  | 57  | 15  | 28880                 | 179 | 133 | 36  |
| 将来   | 札内_KP4_2  | 11289                 | 40  | 30  | 8   | 3906                  | 14  | 11  | 3   | 7619                  | 36  | 27  | 7   |
|      | 札内_KP5_2  | 13861                 | 58  | 43  | 12  | 6638                  | 17  | 13  | 3   | 13575                 | 57  | 42  | 11  |
|      | 札内_KP6_4  | 20556                 | 100 | 74  | 20  | 8946                  | 6   | 5   | 1   | 16335                 | 53  | 39  | 11  |
|      | 札内_KP7_0  | 20179                 | 67  | 50  | 13  | 10539                 | 3   | 2   | 1   | 18326                 | 51  | 38  | 10  |
|      | 十勝_KP56_4 | 35769                 | 365 | 272 | 73  | 5366                  | 22  | 17  | 4   | 21006                 | 165 | 123 | 33  |
|      | 十勝_KP58_0 | 36646                 | 566 | 422 | 113 | 13526                 | 41  | 31  | 8   | 26538                 | 169 | 126 | 34  |
|      | 十勝_KP59_6 | 37052                 | 879 | 655 | 176 | 23014                 | 115 | 86  | 23  | 30825                 | 310 | 231 | 62  |
|      | 十勝_KP61.4 | 39174                 | 834 | 622 | 167 | 28380                 | 164 | 122 | 33  | 33886                 | 352 | 262 | 70  |
|      | 十勝_KP62.4 | 34274                 | 414 | 308 | 83  | 25887                 | 60  | 45  | 12  | 35913                 | 514 | 383 | 103 |

死者数分析では、十勝川沿いの破堤が最大の死者数を引き起こす原因であることが分かる。これは、十勝川の方が札内よりも大きい浸水範囲が広がり、より多くの人が暴露されることになるからである。

### 3.5.4 氾濫リスク

氾濫リスクは、計算された氾濫発生確率に氾濫の影響を乗じることで求められる。リスクは経済的リスクと死者数リスクで表す。リスク分析では、現状「過去」と気候変動を含む状況「将来」のリスクの違いを示し、さらに越波の形状が結果に与える影響も示している。

#### 3.5.4.1 経済的リスク

経済的被害の期待値は、シナリオごとの氾濫確率に経済的被害を乗じ、それを氾濫シナリオに組み込んで算出する。

経済的リスクは以下の式で算出する。

$$Economic\ risk = \sum_{n=1}^n P_{f,scen,n} \cdot Damage_{scen,n}$$

$n$  = 破堤箇所

経済的被害の期待値は、約 **3,700 円/年** である。この経済的リスクは、破堤箇所 **KP56.4** が主要因となっており、比較的高い確率で決壊することが原因となっている。

表 5 各破堤箇所の経済リスクと「過去」の状況における経済リスク合計 5

| 破堤箇所      | 氾濫発生確率(Pf)   | 被害額 (円) | 経済的リスク (円/年)    |
|-----------|--------------|---------|-----------------|
| 札内_KP4_2  | 1/1533756680 | 83200   | 0.00            |
| 札内_KP5_2  | 1/6906020    | 170400  | 0.02            |
| 札内_KP6_4  | 1/26380      | 362700  | 13.75           |
| 札内_KP7_0  | 1/39570      | 308000  | 7.78            |
| 十勝_KP56_4 | 1/90         | 311300  | 3296.58         |
| 十勝_KP58_0 | 1/22290      | 465600  | 20.89           |
| 十勝_KP59_6 | 1/1870       | 568200  | 304.38          |
| 十勝_KP61_4 | 1/1007420    | 641300  | 0.64            |
| 十勝_KP62_4 | 1/7100       | 606800  | 85.51           |
| 合計        |              |         | <b>3,729,38</b> |

気候変動を考慮すると、破堤確率や被害額が大きくなるため、経済的なリスクも高まる。経済的被害の期待値は、**20,464 円/年**に増加する。これは **5.5 倍**の増加であり、その差の **50%**は破堤確率の増加によるもの、**50%**は経済的被害の増加によるものである。

#### 3.5.4.2 死者数リスク

死者数の期待値により、氾濫による年間平均死者数を把握することができる。気候変動の影響を判断するため、現在の状況「過去」と気候変動を踏まえた状況「将来」の結果を示す。現在（「過去」）の状況の期待値は、約 **1.63 人/年** である。この死者数のリスクは、破堤箇所 **KP56.4** が主要因であり、比較的高い破堤確率となっている。死者数に関するすべての分析では、平均的な避難率である **26%**を使用した。

気候変動が考慮されると、破堤確率と死者数が上がり、死者数リスクも高まる。死者数の期待値は 7.6 人/年に増加する。これは 4.5 倍の増加であり、その差の 50%は破堤確率の増加、50%は死者数の増加によるものである。

地域別個人リスクは、ある個人が特定の場所で死亡する年間確率を、避難率の影響を含めて把握するものである。地域別個人リスクは、シナリオの氾濫確率、死亡率、避難率を組み合わせたものである。避難率については、平均値である 26%を使用した。

地域別個人リスクは以下の式で算出できる。

$$Local\ individual\ risk = \sum_{n=1}^n P_{f,scen,n} \cdot Mort_{scen,n} \cdot (1 - evac.\ percentage)$$

$n = \text{破堤箇所}$

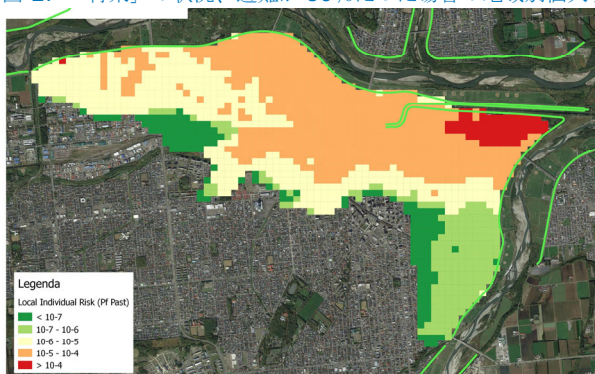
下図は、現在の「過去」状況について、地域別個人リスクを示したものである。リスクの高い場所はケーススタディ対象地域の中でも低地に位置し、経済的なリスクと一致する。気候変動を踏まえた場合、シナリオの氾濫確率は増加し、また浸水の範囲と特性も増大する。浸水の範囲と特性の増大は、死亡率の上昇につながる。浸水範囲は「過去」の状況より大きくなり、リスクも高くなることが右図に示されている。

図 26 「過去」の状況（左）と「将来」の状況（右）の地域別個人リスク 15



地域別個人リスクは、基本分析では平均避難率 26%で計算されている。この割合が増え、地域別個人リスクは減少する。図 27 では、避難が 80%できた場合の地域別個人リスクを示す。リスクの減少は、避難率が 26%から 80%に増加したことと同様、3 倍である。

図 27 「将来」の状況、避難が 80%だった場合の地域別個人リスク 16



## 4 主な成果

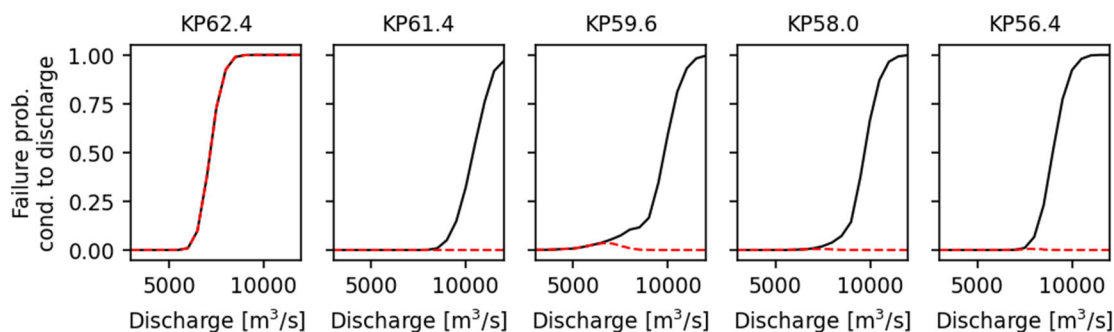
### 4.1 メソッドの適用

この研究では、極端降雨に基づく流出統計を作成し、その後、脆弱性カーブを用いて破堤確率を求め、氾濫の被害、死者数、リスクの観点から氾濫の影響をマッピングした。この手法は、他の河川やデルタにも適用可能である。また第5章において、考察についても述べる。

流出統計の集計における主な課題は、水系と降雨パターンの不確実性の扱い方にあり、その結果、得られた流出統計に比較的大きな不確実性の幅が生じることになる。

この不確実性は、脆弱性カーブを用いた破堤確率の決定にも直接的な影響を与える。解析により、越流・越水による氾濫防御システムの浸食の破堤確率を決定した。まず、異なる決壊地点間の依存関係がない場合の決壊地点の脆弱性を求め（図28の黒線）、次に異なる決壊地点間の依存関係を含めた（図28の赤線）。つまり、上流で発生した破堤は下流で発生する破堤確率を下げる効果があるため、下流の方が破堤確率は低くなる。これらの依存関係が考慮されているため、確率は、より上流の破堤地点では1/100年、下流の地点では1/100,000年以下とばらつきがある。

図28 堤防における各地点の脆弱性カーブ 17



氾濫リスクを求めるため、破堤箇所ごとの確率と氾濫による影響を組み合わせる。そのため、経済的被害と各決壊地点による死者数の両方を算出した。経済的リスク（ユーロ/年）、死者数リスク（死者数/年）に加え、地域別個人リスク（LIR）も求めた。LIRは、ある地点で氾濫の犠牲者になる確率を表す。水文学と水理学

#### 4.1.1 水文学的特徴

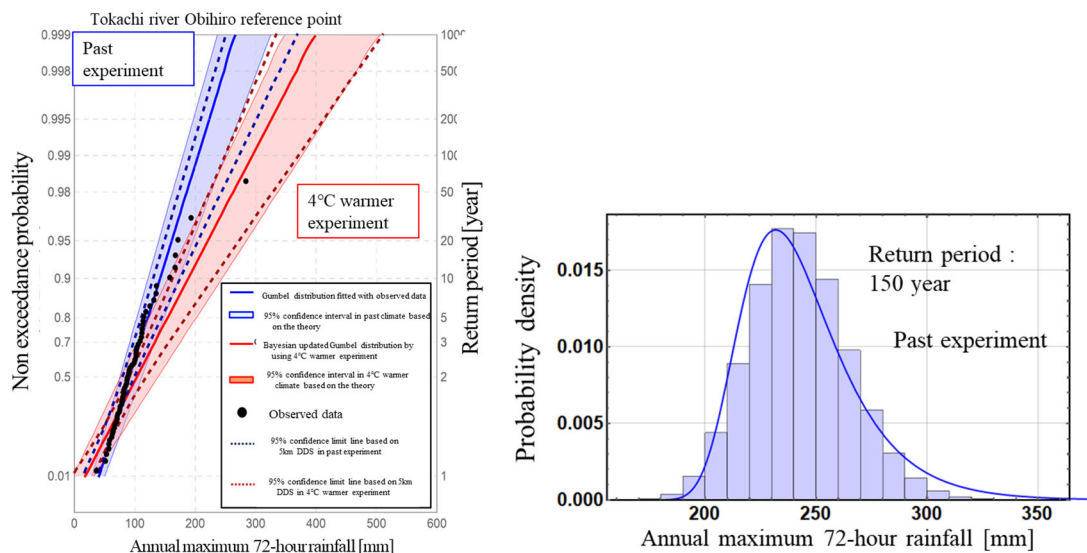
図29は、過去の実験と4K温暖化実験における十勝川流域の降水確率の信頼区間を示している。この図において、黒い点は観測された年間最大流域平均72時間雨量、青い実線はガンベル図281地点の脆弱性曲線PR3983.10 - 2022年1月40

これらの観測値が従うと仮定される分布。また、青色と赤色の部分は、それぞれ過去と未来の気候の確率降雨量の信頼区間である。過去と未来の気候の信頼区間は、3.3.2節で述べた物理的モンテカルロ法を用いて構築されている。各サンプルにおける年間最大雨量の算出数は、観測値と同じである。2つの区間の間に紫色の重複領域が存在することは、世界平均気温が4K異なる両気候において、同じ再現期間でありながら頻度の異なる大雨現象が物理的に発生しうることを示す。アンサンブル気候データに基づく確率評価の結果は、統計理論にも裏付けられ、その科学的妥当性を担保する研究成果も得られている（清水ら、2020）。本研究では、想定される年間最大降水量の確率分布のもとで発生しうる降水量の統計的閾値を導出できる確率限界法（Moriguti, 1995）を採

用し、この検定に基づく信頼区間を構築しました。図 29 の青点線と赤点線である。図 29 は、この理論に基づく信頼区間の幅を示したものである。この図から、アンサンブル気候データに基づく信頼区間と確率限界法に基づく信頼区間は、過去の気候でも未来の気候でも非常によく一致することがわかる。物理的なモンテカルロ計算と確率限界法から独立に構築された信頼区間が一致することは、本研究の数学的妥当性を裏付けている。

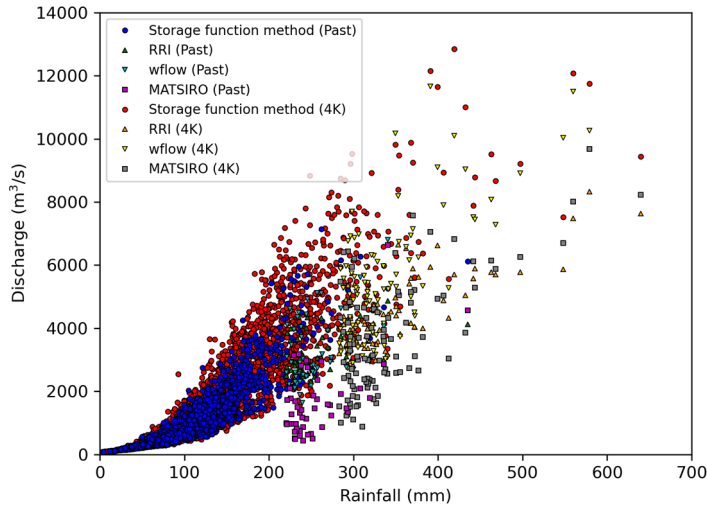
図 29 左図：d4PDF-5km を用いた確率雨量の信頼区間（Shimizu et al., 2020）。右図：過去実験における 150 年間の年間最大 72 時間雨量の頻度分布（青い棒）と、頻度分布にフィットしたガンベル分布の確率密度関数  $fR(r,150)$ （青実線）。

18



雨量とピーク流量との関係は、時空間的な降雨パターンと流出モデルおよびそのパラメータの違いから求められる。図 30 に、異なる流出モデルによる雨量とピーク流量の分布図を示す。なお、3.3.4 で説明した流出モデルは、デフォルトのパラメータと初期条件を採用している。実用化にはパラメータの調整が必要であるが、本研究の目的がモデルの違いに基づく評価を実現する手法の提案であるため、この設定とした。提案された手法によって、各流出モデル、あるいは各流出モデルの統合結果に対して、降雨-ピーク流量関係に回帰曲線を適用することにより、複数の流出モデルを考慮した各確率年におけるピーク流量分布を推定することができる。以下、単一モデルの雨量とピーク流量との関係から、ピーク流量の確率年を推定する。

図 30 十勝川流域の基準点における年間最大 72 時間雨量と各流出モデルで推定されたピーク流量との関係 19



各実験における年間最大 72 時間雨量とピーク流量との関係、および推定された分位点回帰曲線を図 31 に示す。また、図 31 は、単一モデルの結果に基づく、過去実験と 4 度上昇実験における 150 年ピーク流量の確率分布の導出過程である。また、図 32 は、過去実験と 4 度上昇実験の 150 年ピーク流量の確率密度関数の比較である。気候条件の違いにより、確率分布の形状が変化している。将来変化の倍率は、期待値で 1.88、4 度上昇実験と過去実験の 95%信頼区間の上限で 2.04 となった。

帯広川、札内川、美星川、音更川の合流地点で、この方法における 150 年ピーク流量を算出した。この確率ピーク流量は、計画確率規模に相当する流量による水位評価、越水や破堤の確率評価、人的・経済的リスクの定量化の出発点として用いることができる。

図 31 過去実験（左）と 4 度上昇実験における T 年確率ピーク流量の導出過程 20

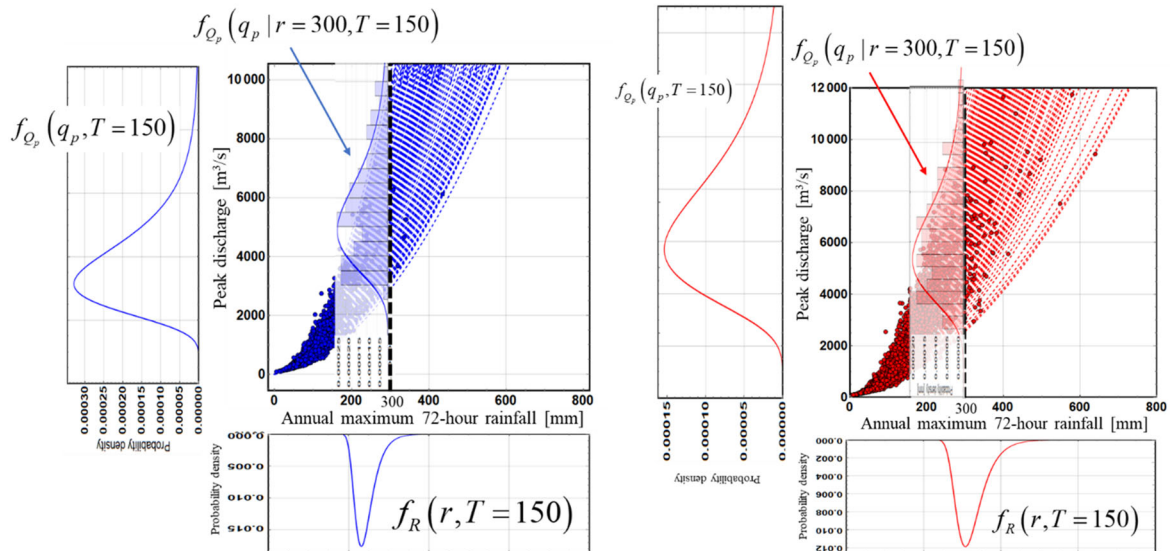
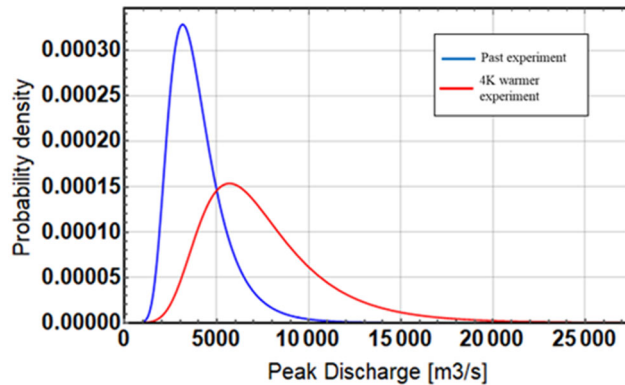


図 32 過去実験と 4 度上昇実験の 150 年確率ピーク流量の確率密度関数の比較 21



#### 4.1.2 堤防の決壊

破堤確率の計算結果によると、十勝川 KP60.8 付近の破堤確率は低く  $10^{-6}$  ほどである。これは、この区間に橋があり、その前後の区間に比べて比較的高い位置にあるためと考えられる。一方、十勝川 KP58.8 付近の破堤確率は、その前後の区間よりも比較的高い。橋梁を含むため天端高の平均は高くなるものの、橋梁前後の区間と比べると天端高の不確実性が破堤確率の上昇に影響を及ぼしたと考えられる。この点については、不確実性を正の変動のみと評価することで、今後、正確に評価する必要がある。

不確実性の感度解析の結果、水位-流量関係は対象地点の破堤確率に大きな影響を与えることが示された。水位と流量の関係は、川底の地形が時間的に変化することに起因している。個別の流出現象、また流出中の時間の経過と共に変化する。この結果は、流速が速く、水位変化が大きいという対象流域の氾濫特性に起因すると考えられる。

破堤確率には、3つの不確実性が考慮されている。この不確実性が WP3 のリスク評価にどの程度影響するかは不明である。リスクアセスメントの結果への影響が小さい場合、ここでの不確実性は無視できるかもしれない。一方、影響が大きい場合は、不確実性をもたらす要因の再確認やデータの感度分析が必要となる可能性がある。今後は、リスク評価結果に対する各 WP の計算結果の不確実性の感度分析を行うべきだと考える。

氾濫発生確率については、同じ河川の同じ計画規模（流量）の区間内において、破堤確率は上流ほど大きく、下流ほど小さいという結果が出た。例えば、十勝川の然別川合流点以降の区間（KP59.6 から KP56.4 まで）では、確率年は上流で約  $1.5 \times 10^3$  年、下流で約  $4.5 \times 10^6$  年の降水量となった。札内川における確率年は上流側で約  $3.0 \times 10^3$  年、下流側で約  $4.9 \times 10^6$  年である。この結果は、下流の堤防法面の破堤確率を計算する際に、上流の堤防法面の破堤確率が差し引かれることに起因している。

日本で公表されているハザードマップは、計画された河川の規模や想定される最大外力によって浸水被害が示されている。破堤条件は、計画高水位を超えることとなっている。氾濫解析結果は、想定されるすべての破堤箇所に対する氾濫解析の結果を重ね合わせたものである。つまり、堤防の安全度は一定であり、堤防の決壊は独立した現象と考える。この方法により、より安全側のハザード評価を住民に提供することができる。一方、氾濫リスク評価のために被害を定量化する場合、過大評価となっている可能性がある。

本研究では、各地点の破堤確率を確率論的に表し、上流の破堤の発生を考慮した非独立的なアプローチを採用した。その結果、この方法はより現実的な氾濫発生確率を表現していると考えられる。今後、氾濫原の治水対策を推進するためには、定量的な氾濫リスク評価が必要となる。本研究で提案した手法を採用することで、より精度の高い氾濫リスク評価が可能になるであろう。

#### 4.1.3 被害、避難、死者数、リスクアセスメント

第3章では、その方法と適用事例を示す。氾濫の影響、経済的被害、死者数の結果より、氾濫リスクも不確実性を含んでいることがわかった。

経済的な被害については、越波のタイプの違いによって、算出される被害額に大きな影響を与えることがわかった。浸水範囲は越波の違いによって異なり、特に高価値の資産がある場所にてあるシナリオでは浸水し、別のシナリオでは浸水しない場合、算出した被害額に大きな差が生じ得る。

そのため、被害額の算定や経済的被害が地域の高額資産によってどのような影響を受けるかについて、適切な分析を行うことが重要である。

帯広のケーススタディでは、平均避難率を **26%** に設定した。これは比較的低い割合で、リードタイムが短いことが主な原因である。極端降雨のため、河川流量は非常に速く増加し、鉄砲水が発生する可能性がある。鉄砲水の特徴として、避難する時間が比較的短いことが挙げられるが、今回のケースもそのような結果となっている。

帯広の事例における氾濫の可能性は、水深が深く、局所的に高い水位上昇率になることが予想される。これにより、潜在的に多くの死者数につながる可能性がある。シナリオによっては、避難率の期待値を考慮しても、死傷者の数は数百人にのぼる。

氾濫リスクは、氾濫発生確率と氾濫による影響を合わせたものである。その結果、水深の大きい場所で経済的リスクが最も高いことがわかったが、高額資産も経済的被害に大きな影響を与えることがわかった。ある場所における氾濫に対する脆弱性に関し、さらなる分析を進めることが賢明である。気候変動の影響は大きく、一方では浸水範囲や特性が増加し、他方では氾濫発生確率が増加するため、経済的リスクが大幅に増加する。

死者数リスクは、死者数の期待値と地域別個人リスクで表現される。予想される死者数は、氾濫発生確率が最も高い破堤位置において著しい。死者数がより多くなる可能性のあるシナリオは、氾濫発生確率が比較的低いため、死者数リスクとしてはあまり重要ではない。経済的リスクに伴い、気候変動の影響が大きい。

地域別個人リスクは、ある個人が特定の場所で死亡する年間確率を、避難の効果も含めて把握することができる。帯広の事例では、深いところでは年間 1 万分の 1 以上、場所によっては年間 1 千分の 1 以上のリスクがある。これは、一部の破堤箇所の破堤確率が比較的大きいことが主な原因である。一方、オランダの氾濫リスク政策では、堤防の背後に住む住民全員が氾濫によって死亡する確率は、年間 10 万分の 1 (0.001%) を超えてはならないことになっている。これが、いわゆる許容個人リスクと呼ばれるものである。

## 4.2 不確実性の扱い方

不確実性は、氾濫リスクを求める際に、切っても切れない関係にある。氾濫リスクを決定するすべての段階において、不確実性の取り扱い方を選択しなければならない。統合的なアプローチにより、不確実性による影響とそれが最終的なリスクにどう影響するかを示した。また、統合的なアプローチにより、モデル作成時の選択による影響について多くの知見を得ることができた。これらの影響は、プロジェクトの中で一連のモデルの繋がりについて議論したことで明確になった。

氾濫リスクを求める全過程において、最大の不確実性は、氾濫発生確率の決定と、特に水理負荷の超過頻度である。

帯広の事例における氾濫リスク分析では、これらの不確実性の影響を、計算された氾濫リスクの帯域幅で表し、帯域幅の原因についての考え方を示した。これらの帯域における考え方は、帯域を減らすためさらなる研究を行う必要性を定義するために有効である。しかし、帯域の発生や下限が異なる判断や対策の要因にならない場合は、これらの決断をするのに十分な情報であると判断することもできる。

## 4.3 共同プロジェクトにおける協力体制

日本とオランダの専門家が、それぞれのテーマで緊密に連携していたことが、このプロジェクトの最大の意義である。つまり、大学、研究機関、企業の日本とオランダの人々が、様々なテーマごとに協力を進めた。実際に解析を行い、モデルを適用したため、具体的に取り組むことができ、データが不完全であるなどの問題もそれぞれ責任を持って解決した。また、ある人が得た成果を他の人が引き継ぐため、相互の調整も重要であった。このように、それぞれのパートナーによる貢献により、また各々の手法を適用したことで、多くの知見を得ることができた。

成功の要因は、結果と方法を議論するだけでなく、これらの方法を一緒に適用し、結果を生み出すための詳細を実際に理解しようとしたことにある。このようにして、相互理解と信頼関係を築き、プロジェクトの成果として得られた付加価値を実践するための基盤を整えたのである。その結果、日本やオランダの経験をもとに、リスク評価に活用でき、さらに発展させることができる統合的なリスクフレームワークが完成した。

プロジェクト期間中、私たちは世界中の人々と同様、COVID-19 のパンデミックに直面した。そのため、日本やオランダを互いに訪問し合うことができなくなり、プロジェクトに大きな影響を与えた。しかし、このプロジェクト期間中に、共同作業や情報共有の方法を変更して対応した。このプロジェクトが成功したのは、オンラインミーティングが可能であったこと、通訳として正城麻紀さんの貢献があった事、日本でのワークショップ開催をオランダ大使館が支援してくれた事などが要因である。また札幌で開催された IAHR 国際会議 2020 の特別セッションで、中間結果が（オンラインにて）発表された。

さらにこのプロジェクトにより、携わっている専門家間の長期的な関係が構築でき、科学論文の作成はもちろん、両国の生活ぶりや働き方への関心を深めることもできた。

## 5 考察

### 5.1 極端降雨・極端流出

今回のケーススタディでは、メソッドの詳細をすべて明らかにすることはできなかった。そのため、このアプローチにおいて近道をした部分があり、後続の研究において注意を払う必要がある。以下のような改善点、考察が考えられる。

- モデルのキャリブレーション；本研究で使用したモデルは、キャリブレーションを行わなかった。モデルの質については、簡単な評価のみ行った。シンプルな感度分析に基づき、最適なモデルパラメータのセットを選択した。モデルの質は、WP1 で得られる流量統計に影響を与える。したがって、WP1 で得られた結果を実際に適用する前に、モデルの質をさらに向上させる必要がある。
- 初期条件の影響；モデルにおける不確実性で重要となるのは、水文モデルの初期条件にある。事象単位でモデルを用いるため、各事象を同じ初期条件でスタートさせる。しかし実際には、事象ごとに初期条件が大きく異なることがある。長い間雨が降った後に起こる事象もあれば、乾燥した状態の後に起こる事象もある。例えば、土壌と貯水池の貯水量は全く異なるため、発生する流量に影響を与える可能性がある。初期条件も不確実なパラメータとしてシミュレーションに含め、WP2 に受け渡す不確実性評価に含めることが望ましい。
- ダム等の運用による影響；貯水池とその運用は、下流の流量に大きな影響を与える可能性がある。ダム等の運用は、現状では水文モデルには十分に含まれていない。この点は、モデルを改良する上で重要なポイントである。また、実際の運用における詳細が不明なケースも多いため、複雑な点でもある。貯水池の運用や、それを水文モデルにどのように組み込むかについて、さらなる研究が求められる。
- ハイドログラフの形状；今のところ、ハイドログラフの形状による影響はあまり重視されていない。ハイドログラフの形状（および量）は、下流の氾濫レベルや氾濫リスクに影響を与えるため、この点にはもっと注意が必要である。  
山間部を中心に；今のところ、都市部やそこでの氾濫の影響に注目されてきた。北海道における多くの氾濫では、山間部でも道路や橋など重要なインフラに多くの被害が出たことが確認されている。これらの被害に関する直接的な被害額は、都市部での被害やそれに伴う死者数に比べれば小さいが、連鎖的な影響により、救急隊が容易に到着できない地域があるなど、大きな二次災害や死者数が発生する可能性もある。
- また、気候変動の影響は山間部で強くなる可能性が高く、その結果、被害が拡大することが考えられる。したがって、これらの地域の氾濫リスクの評価も行うことが望ましい。

土砂によって十勝川流域の氾濫リスクに与える影響を調べるには、長期的な研究が必要である。これまでの経験上、ある事象における土砂流入や河床の形態変化が、シミュレーションされた水位や堤防の安定性に大きな影響を与えることが分かっている。この影響はモデルには含まれていないが、簡易的であっても、加えることは可能である。このテーマを調査し、十勝川流域および一般的な氾濫リスク評価の方法論全体に土砂を加え得る方法を考えることが望ましい。

## 5.2 破堤確率

本研究では、越水による破堤を評価対象としている。今回は越水による破堤に焦点を当てたが、日本では侵食やパイピングによる破堤も報告されている。したがって、今後、他の破堤メカニズムによる破堤確率を評価する必要がある。

本研究では、モデル波形を想定して氾濫（水理）解析を行う。日本における氾濫流出は、様々な形状のハイドログラフを持つことが特徴であり、氾濫時の破堤確率や被害に影響を与えることが予想される。したがって、氾濫発生確率は、ハイドログラフの形状を考慮して評価する必要がある。

## 5.3 被害計算

本ケーススタディにおいては、経済的被害を日本の方式で求めた。この方法では、様々な資産の価値と浸水深を用い、浸水深毎の被害率を資産の価値に乗じて計算する。この方法は、オランダの経済的被害の求め方とよく似ている。

両国のアプローチにおける長所を把握するには、比較してみると良いであろう。メソッド間でどのようなギャップが起こりうるか、一方のモデルが他のモデルより優れている点はどこか、メソッドの改善点はどこか、などに関する比較である。

## 5.4 避難と死者数

現在の避難モデルにおいては、人々が安全な場所にいる場合と、自宅で危険にさらされている場合の2つの目的地のみ対象としている。ところが実際には、人々はさまざまな場所にて、脆弱性にも違いがある。危険地域外にいる人は脆弱ではなく、危険地域内の避難所にいる人は脆弱ではあるものの自宅にいる人よりも脆弱ではない。

そのため、避難モデルを改善することで、ある氾濫の脅威が発生したときに人々がどこに避難するかをよりよく理解することができる。避難モデルの最初の改定案は、すでに **WP3** の報告書に記載されている。

改訂版では、避難命令が出されたときに、人々がどこに行く可能性が高いかを示す。人々の居場所によって脆弱性が異なるため、死者数モデルもこの違いに合わせて調整する必要がある。したがって、避難戦略を死者数に反映させるためには、死者数モデルも改善しなければならない。

避難先の違いによる死者数モデルの改良に加え、日本の建築構造を組み込むことによりモデルを改善することもできる。現在のオランダ方式はオランダの建築様式（コンクリート）に基づくものであるが、日本の建築様式は木造が多く、そのため倒壊の可能性が高まり、死者の発生確率が高くなる。この点を改善することで、モデルをより日本の状況に適したものにすることができる。

## 6 おわりに

はじめに、「北海道における氾濫リスクと気候変動プロジェクト」として、オランダにおいて治水分野における気候変動適応策として先進的に進められている取り組みを学ばせていただくとともに、日本とオランダの共同研究として新たなリスク評価技術の開発に取り組めたことに感謝申し上げます。

また、オランダの治水分野における気候変動適応策の取り組みは、北海道の治水を考える上で非常に先進的で有益であり、必要な考えであると信じている。惜しめない技術交流をしていただいたオランダ関係者の協力と本研究に携わった全ての方のご尽力に感謝申し上げます。

さて、日本においては、気候変動影響の顕在化に伴う洪水の激甚化・頻発化が叫ばれて久しく、近年、毎年のように大規模な洪水が発生し、甚大な被害が生じるなど、国民の安全・安心が脅かされている。北海道という地域は、自然環境が非常に豊かな土地であり、日本の食料基地としての役割や、自然環境を活用した観光資源も多く、多くの人々に恩恵をもたらしている。

その一方で、豊かな自然は歴史的に災害も引き起こしてきた。特に、洪水被害については、これまで、日本の他の地域と比べて、比較的規模や頻度が少なかったが、近年は、大規模な洪水が度々発生している状況である。また、気候変動の影響に伴う水害リスクの増大についても、日本国内で北海道が一番影響を受けると予測されていることから、以下のキーワードをもとに、検討を進めているところである。

- 日本でも気候変動の影響が特に大きいと予測されている北海道から、次の時代に向けて新たな水防災対策のあり方を発信する。
- 気候変動による将来の影響を科学的に予測し、リスク評価をもとに治水対策を講ずる。

本プロジェクトがとりまとめられたことで、我々は非常に大きな成果を得ることができた。

本研究成果を北海道で社会実装しつつ、更に研究を深め、再び社会実装に反映することを繰り返すことで、一歩ずつ気候変動の影響という大きな課題へ対処し国民の安全・安心を確保していくことが我々に課されているミッションであり、北海道の発展につながると考えている。

研究に終わりはない。研究を深化させ、新たな課題に対して、解決への道を開いていく必要がある。引き続き、オランダとの技術交流を継続し、気候変動という大きな課題に対して、再び一緒に向き合い、道を開いていくことができれば、これほど心強いことはない。

北海道の開拓が始まって **150** 年あまり、まだまだやるべきことが山積していると痛感しているが、一歩ずつ北海道の安全・安心を確保し、今後の治水のあり方を前進させることができれば幸いである。

国土交通省北海道開発局 建設部河川計画課 河川計画管理官 松原 寛



**HKV**