

Flood Risk and Climate Change Hokkaido

WP3 Risk assessment

クライアント



Flood Risk and Climate Change Hokkaido

WP3 Risk assessment

最終報告書



著者紹介

Maaskant, Bob (HKV)

戸村 翔 (北海道河川財団／開発公営社)

大村宣明 (ドーコン)

舩谷繁和 (ドーコン)

吉田隆年 (ドーコン)

Rongen, Guus (HKV)

PR3983.10

December 2021

目次

1	はじめに	1
1.1	目的	1
1.2	報告書の構成	1
2	手法	3
2.1	氾濫発生確率	3
2.2	氾濫による影響	3
2.3	氾濫リスク	4
3	氾濫シナリオ	5
3.1	はじめに	5
3.2	破堤箇所	5
3.3	ハイドログラフ	6
3.4	氾濫特性	8
3.5	氾濫シナリオの不確実性	11
4	被害	13
4.1	算出方法	13
4.2	資産	14
4.3	被害	16
4.4	帯広の事例における被害	21
4.5	被害額算出の不確実性	21
5	避難	23
5.1	対象地域の避難率	23
5.2	避難率の設定方法	23
5.3	利用可能なデータおよび情報	25
5.4	解析と結果	26
5.5	結果	27
5.6	避難率	30
5.7	避難の不確実性	30
5.8	避難モデル改善の提案	31
5.9	参考文献	32
6	死者数	33
6.1	近年の水害における対象エリアの死者数	33
6.2	死者数の算定方法	33
6.3	帯広における死者数算定	36
6.4	死者数の算出における不確実性	39

6.5	新たな死者数推定モデルの提案	40
6.6	参考文献	48
7	氾濫発生確率	51
7.1	セクション破堤確率を求めるためのステップの概要	51
7.2	セクション確率からシナリオ確率へ	52
7.3	シナリオ確率	53
8	氾濫リスク	55
8.1	経済的リスク	55
8.2	死者数リスク	58
8.3	氾濫発生リスクの不確実性	62
9	考察、結論と提言	63
9.1	経済的被害	64
9.2	避難と死者数	64
9.3	氾濫リスク	65

1 はじめに

本報告書は、ワークパッケージ3（WP3）の活動概要をまとめたものである。このワークパッケージは、北海道におけるケーススタディ対象となる帯広の氾濫リスクを検討する3つのワークパッケージのうちの1つである。WP1では気候変動が極端流量に与える影響について、WP2では堤防の決壊確率について、WP3では氾濫リスクについて検討する。

氾濫リスクは、氾濫発生確率と氾濫影響の組み合わせたものである。WP3では、WP2の結果を用いて、氾濫シナリオに対する氾濫発生確率を求める。氾濫発生確率に関する手法と解析は、WP2報告書に記載されている。したがって、このWP3レポートでは氾濫発生確率計算の概略について述べる。

氾濫の影響を判断するには、経済的被害（直接・間接）と避難を考慮した想定死者数を使用する。さまざまな水位やハイドログラフの形状を用いて影響を判断し、起こりうる氾濫事象の範囲を示す幅を作り出す。

1.1 目的

WP3の目的は、帯広の氾濫リスクを求め、氾濫リスク計算の不確実性について知見を得ることである。

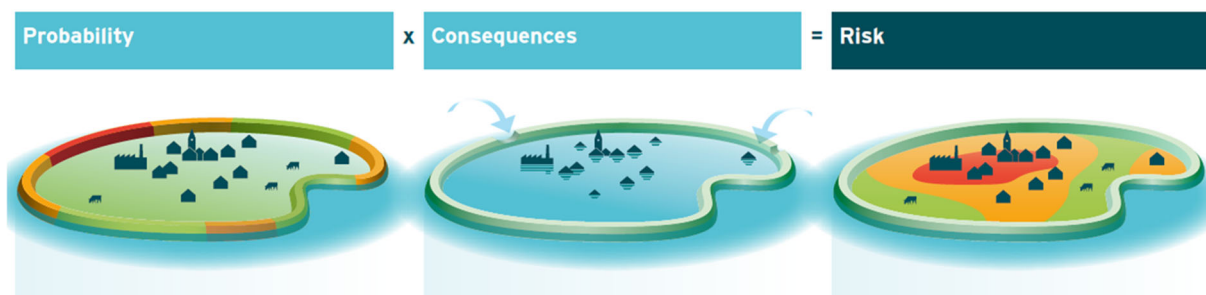
1.2 報告書の構成

本報告書では、まず氾濫リスクを求めるための手法を簡潔に解説する（第2章）。第3章では、利用可能な氾濫シナリオの概要と、氾濫リスク算定に用いるシナリオの選定について述べる。第4章、第5章、第6章では、氾濫シナリオの影響（被害、避難、死者数）について記述する。第7章では、ワークパッケージ2によって求められた、シナリオに基づく確率の概要を記す。シナリオに基づく確率（第7章）と影響（第4章、第5章、第6章）を、第8章において組み合わせ、氾濫リスクを求める。最後に、実施した分析に基づく結果、結論、および提言（第9章）を考察し、本報告書を締めくくる。

2 手法

リスクとは、確率と影響の組み合わせたものがある。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を知ることが重要である。このため、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）の破堤確率を決定する（ワークパッケージ 2）。また、氾濫防御の決壊による影響（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、同じ堤防システム内でも破堤し得る箇所により異なる。したがって、さまざまな決壊地点を評価し、決壊地点ごとの氾濫確率とその決壊地点における影響とを組み合わせる。この方法により、検討する地域の氾濫リスクが求められる。

図1 リスクアプローチの概要 1



2.1 氾濫発生確率

氾濫発生確率の計算は WP2 において行う。そこで得られた結果を用いて、このワークパッケージで氾濫リスクを求める。第 7 章では、氾濫発生確率に関する簡単な要約を載せる。氾濫発生確率の決定に関する詳細は、WP2 の報告書を参照のこと。

2.2 氾濫による被害被害

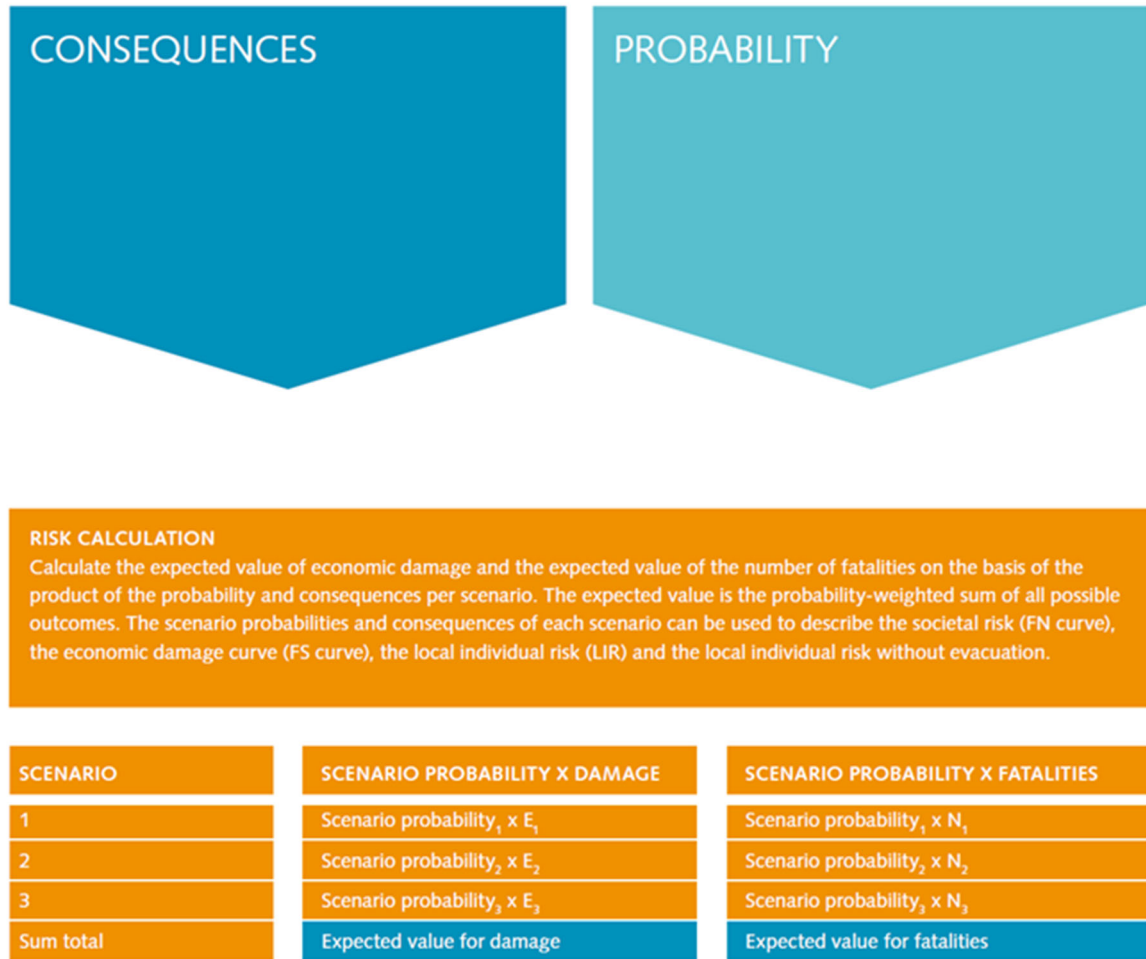
氾濫による被害を求めると、ある地域の被害額と死者数について知見が得られる。死者数や経済的被害の空間的な分布がわかる。氾濫の被害を判断する方法を以下の通り簡単に示す。

- 破堤箇所ごとに堤防セクションの受ける被害を定義する。
- 流出氾濫解析モデルを作成する。
- 氾濫シナリオを定義する。
- 各シナリオの被害を推定する。
 - 経済的損害
 - 避難
 - 死者数

2.3 氾濫リスク

氾濫リスクは、氾濫被害と氾濫発生確率により得られる。下図は、氾濫リスクの計算の概略図である。

図2 リスク算出の概要2



また、被害や死者数の期待値に次いで、リスクを地域別の個人リスクで表す。これは、ある場所にいる人が氾濫によって命を落とす確率を示す。

3 氾濫シナリオ

3.1 はじめに

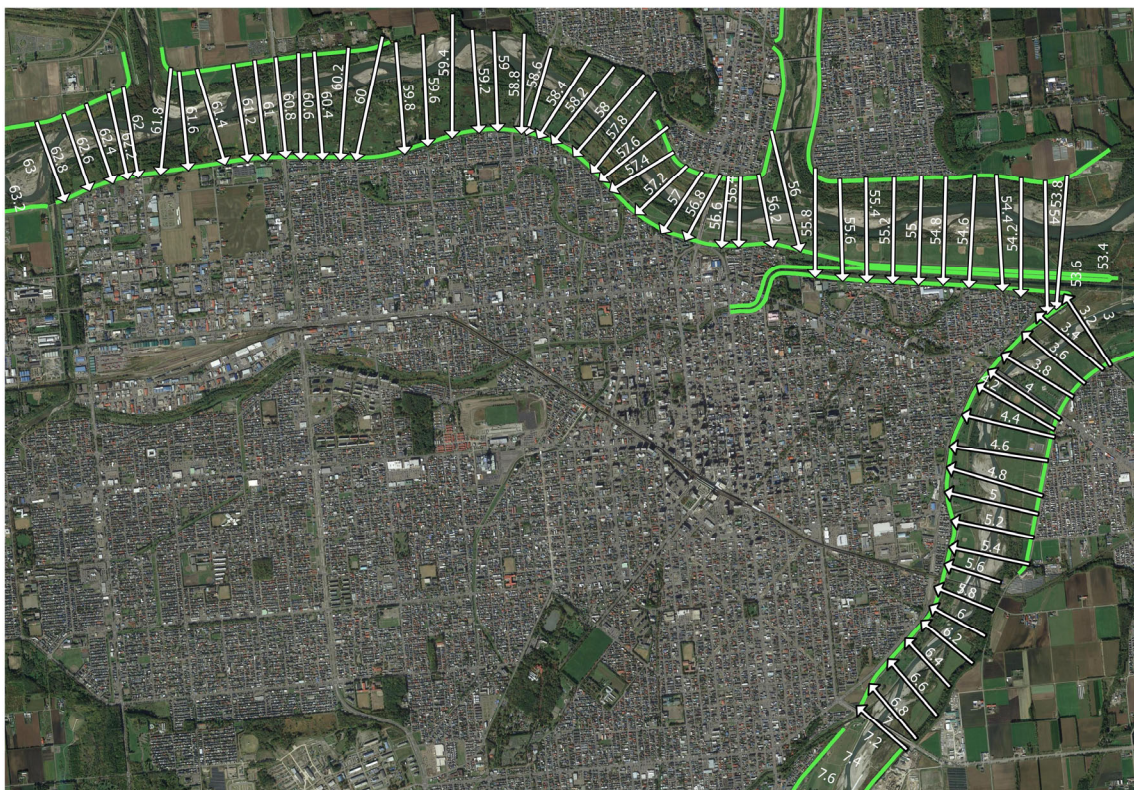
ある地域における浸水は、異なる決壊地点において発生する可能性がある。しかし、想定されるすべての破堤箇所について氾濫による被害を特定しなくても、十分に正確なリスク分析を行うことができる。一連の堤防は、洪水パターンが事実上同じになるセクションに分割することができ、そのセクション内の破堤の正確な位置に関係なく、洪水パターンは同じになる。この章では、帯広のケーススタディとして、さまざまな決壊事例をセクションごとに分類する。

3.2 破堤箇所

浸水域と氾濫特性を計算するために、まず氾濫シミュレーションを行う破堤箇所を決定しなければならない。ある地域に対する破堤箇所の選択は、水理負荷と危険地域の特性によって決まる。例えば、氾濫パターンに変化を及ぼすような影響力の高いものの存在などである。そのため、異なる破堤箇所を決める必要がある。

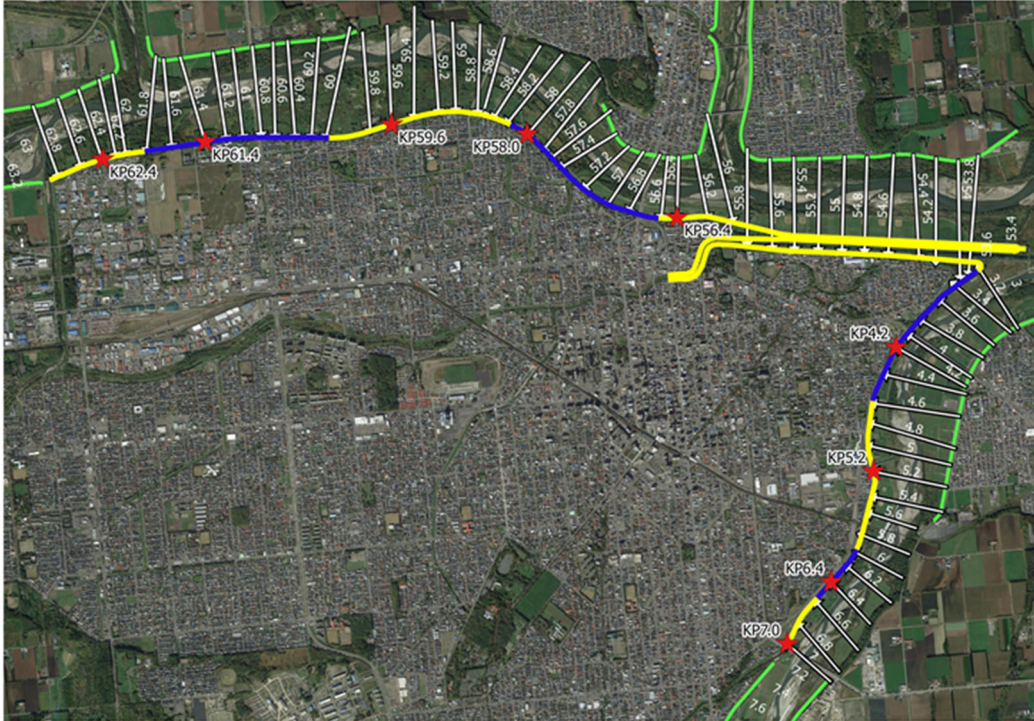
帯広の事例では、200m ごとに破堤箇所を示した氾濫シミュレーションのデータベースがある（図 3 参照）。先に説明したように、近接した破堤箇所の氾濫範囲はほぼ重複しているため、氾濫リスクを求めるためにすべての破堤箇所を含める必要はない。

図 3 帯広ケーススタディーエリア沿いで破堤する可能性のある場所 3



すべての破堤箇所とそれに伴う浸水パターンが分析され、氾濫リスク分析に使用する破堤箇所を選定する。解析では、堤防セクションとそれを代表する破堤箇所を決定する。代表的な破堤箇所を選定するには、主に氾濫範囲と氾濫特性（水深、流速、水位上昇率）を用いる。下図に、セクションと決壊の位置を示す。

図4 堤防セクションと選定した破堤箇所4



選定した破堤箇所を氾濫リスク分析に使用する。十勝川で5カ所、札内川で4カ所を選定した。これらの場所の浸水図とそれに付随するハイドログラフを作成する。

3.3 ハイドログラフ

選択された破堤箇所について、様々な氾濫シナリオを用い、破堤箇所ごとに起こりうる氾濫範囲の帯域幅を示す。これは、氾濫シナリオをハイドログラフと関連させることによって行う。ハイドログラフは、時間経過に伴う流出量と局所的な水位の推移を示す。

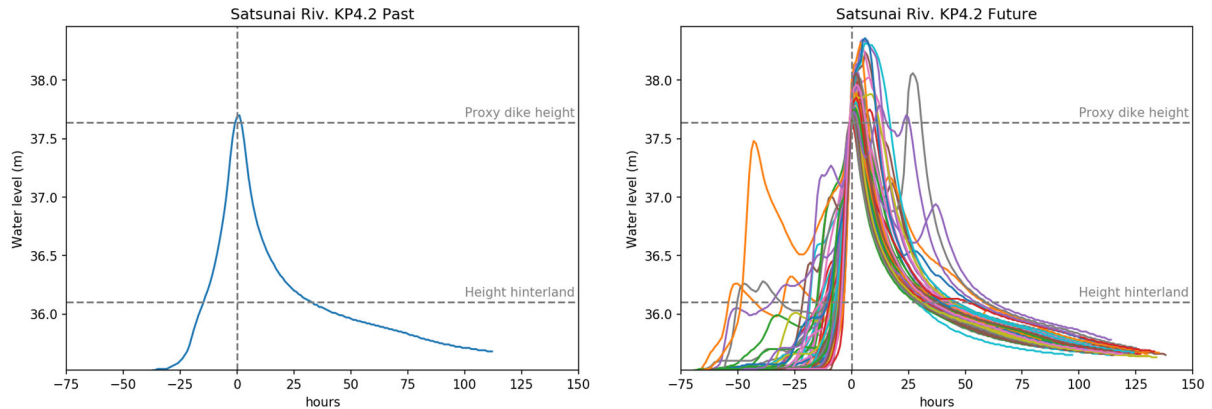
3.3.1 気候変動

帯広のケーススタディでは、ハイドログラフのデータベースを用いる。これらのハイドログラフは2つのセットに分けられ、1つのセットは現在と過去の状況（「過去」）について、1つのセットは将来の状況（「将来」）に関するものである。この2つのセットの違いは、「将来」には気候変動が組み込まれている点である。つまり、流量がはるかに多くなり、氾濫範囲や水深が大きくなる可能性がある。そこで、さらなる分析のために、現状と気候変動を含む2つのデータセットを用いる。

3.3.2 ハイドログラフと氾濫シナリオ

まず、ハイドログラフを使用し、下図のようなプロットを作成することで、ハイドログラフのパターンを理解する。堤防高を越え、越水が発生するようなハイドログラフのみを図に示す。

図5 札内川 KP4.2 地点の過去 (HPB)、将来 (HFB) のハイドログラフの収集事例5

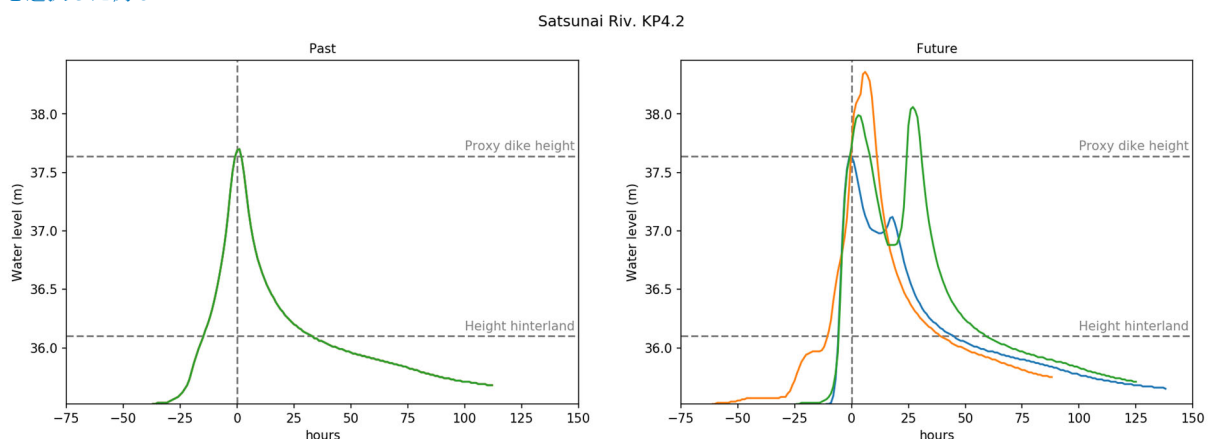


次に、ハイドログラフと浸水範囲を選択し、氾濫リスク分析に用いる。氾濫リスク分析では、氾濫シナリオ間の差は小さい傾向にあるため、個々の氾濫シナリオを使用する必要はほぼ無い。そのため、氾濫シナリオ全体を表すハイドログラフを複数選択する方が効率的である。これらのシナリオを選択する例を図6に示す。ここでは、3つのシナリオを選択した。

- 最大シナリオ：ピーク水位が最も高くなるシナリオ
- 最小シナリオ：ピーク水位が最も低くなるシナリオ
- 最大ボリュームシナリオ：計画堤防高を超えるハイドログラフが最大面積を持つシナリオ（起こりうる流入量を表す）。

堤防高を越え、越水となるシナリオが1つしかない場合には、このシナリオを3つの状況すべてに用いる。

図6 過去 (HPB) と将来 (HFB) のハイドログラフから、札内川 KP4.2 地点の最大、最小、最大ボリュームハイドログラフを選択した例6



選択した各破堤箇所について、3つのシナリオを表1に示す。

表1 各地点における最大、最小、最大ボリュームのシナリオ1

	過去 - 最小	過去 - 最大	過去 - 最大ボリューム	将来 - 最小	将来 - 最大	将来 - 最大ボリューム
札内川 KP4.2	HPB_m045_1960	HPB_m045_1960	HPB_m045_1960	HFB_GF_m111_2082	HFB_MR_m104_2078	HFB_HA_m108_2057
札内川 KP5.2	HPB_m045_1960	HPB_m045_1960	HPB_m045_1960	HFB_GF_m114_2092	HFB_MR_m104_2078	HFB_MP_m103_2085
札内川 KP6.4	HPB_m022_1980	HPB_m045_1960	HPB_m045_1960	HFB_GF_m107_2097	HFB_MR_m104_2078	HFB_MR_m108_2069
札内川 KP7.0	HPB_m069_2006	HPB_m045_1960	HPB_m045_1960	HFB_CC_m104_2099	HFB_MR_m104_2078	HFB_HA_m108_2057
十勝川 KP56.4	HPB_m021_1979	HPB_m067_1978	HPB_m064_1987	HFB_CC_m108_2101	HFB_MR_m104_2078	HFB_MR_m108_2069
十勝川 KP58.0	HPB_m004_2000	HPB_m067_1978	HPB_m064_1987	HFB_CC_m108_2058	HFB_MR_m104_2078	HFB_MR_m108_2069
十勝川 KP59.6	HPB_m063_1968	HPB_m067_1978	HPB_m064_1987	HFB_CC_m112_2090	HFB_MR_m104_2078	HFB_MR_m108_2069
十勝川 KP1.4	HPB_m024_1997	HPB_m067_1978	HPB_m064_1987	HFB_MP_m105_2105	HFB_MR_m104_2078	HFB_MR_m108_2069
十勝川 KP62.4	HPB_m063_1968	HPB_m067_1978	HPB_m067_1978	HFB_GF_m112_2094	HFB_MI_m102_2109	HFB_MI_m108_2094

3.4 氾濫特性

氾濫特性は、氾濫シミュレーションを用いて求める。

3.4.1 氾濫シミュレーション

氾濫原の浸水深は、平面2次元不定流モデルで計算する。河川流量より河川水位を算出し、河川流量が計画水位を超えた瞬間に堤防が決壊して氾濫原に越水したと仮定して計算を行った。計算モデルの概念図を図7に示す。表2には、計算条件を示す。

図7 計算モデルの概念図7

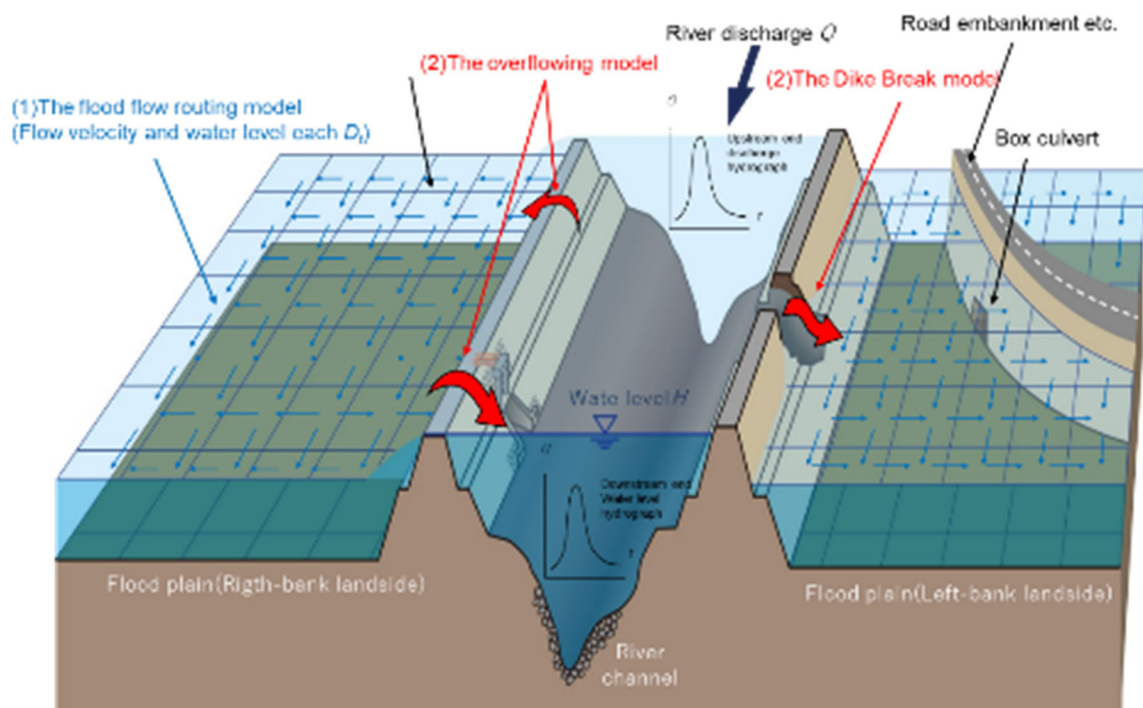


表2 計算条件一覧2

項目	内容
グリッドサイズ、標高	100m グリッド、最新の LP データに基づくグリッド標高
河道状況	2016 年時点の河道
治水ダム	既存の貯水池（十勝ダム、札内川ダム、サホロダム）
破堤地点	氾濫ゾーン内で最大限の被害が想定される箇所のみ、各ゾーンの氾濫シミュレーションを算出。
破堤条件	水位が設定値を超えると、堤防の決壊が始まる（完成堤防の高水位）。
上流部破堤の氾濫による流量の減衰	水位が堤防の高さや地盤高を超えると、流量が減る。

3.4.2 水深

選択されたすべての破堤箇所には、それぞれ氾濫特性がある。その特性のひとつに浸水深がある。十勝川沿いの KP61.4 と札内川沿いの KP6.4 地点について、図 8 と図 9 に氾濫パターンを示す。これらの図の差により、ハイドログラフと氾濫範囲の組み合わせることの効果が分かる。局所水位が最も高いハイドログラフ（図 8）は、最も大きな洪水パターンを示している。このような情報を、すべての地点と選択されたハイドログラフについて求めた。

図8 十勝川沿い KP61.4 地点の将来シナリオ（最大、最小、最大ボリューム） 8

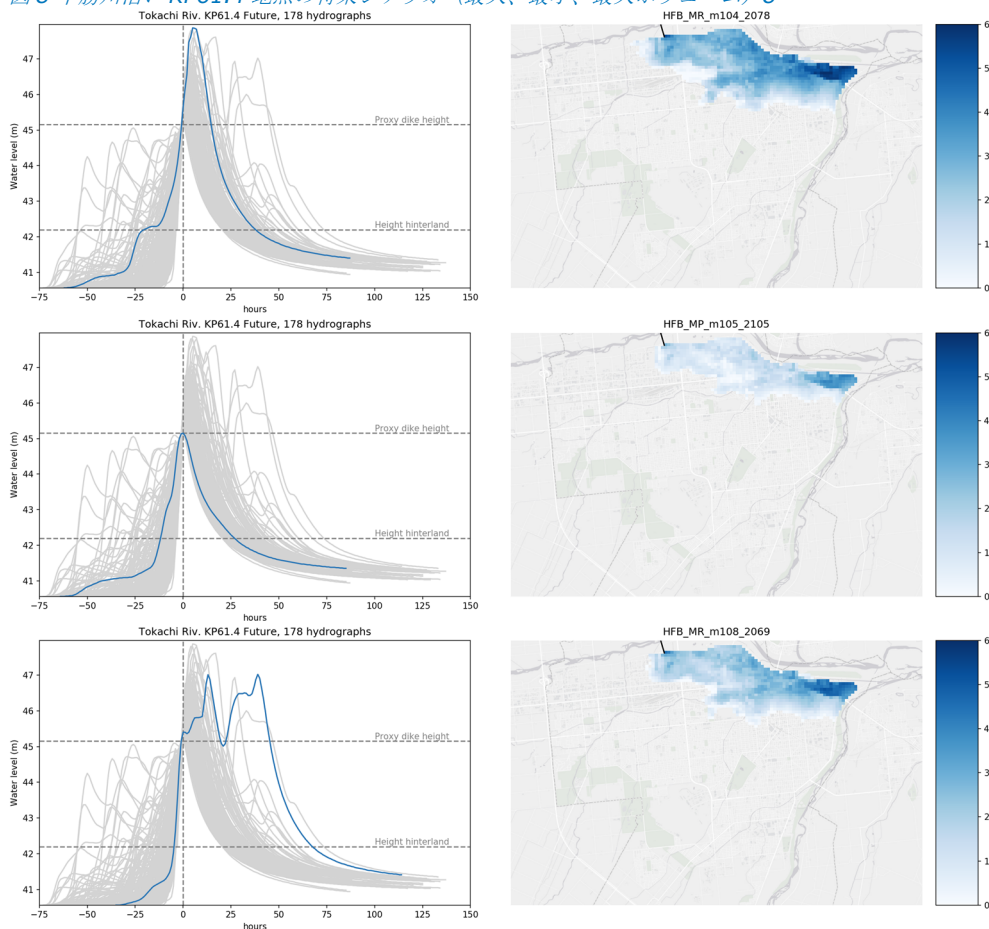
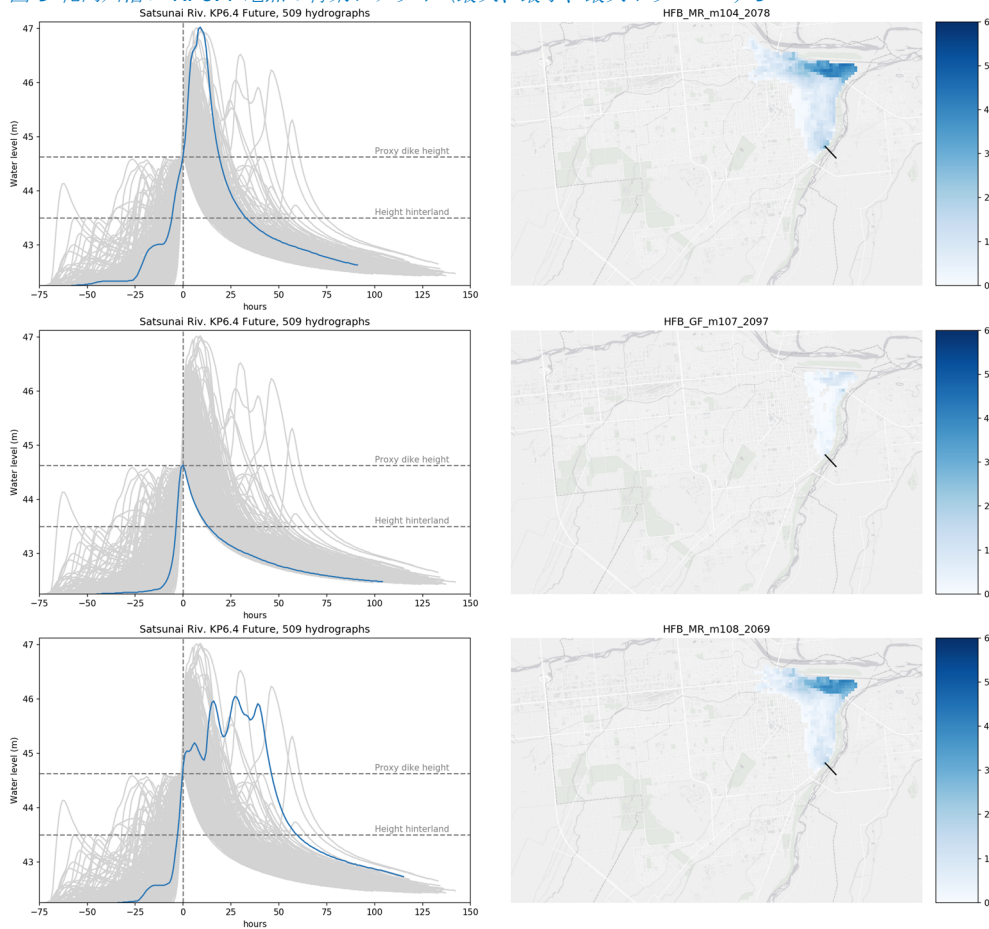


図9 札内川沿い KP6.4 地点の将来シナリオ (最大、最小、最大ボリューム) 9



3.4.3 水位上昇率

水位上昇率とは、水が上昇する速さを表すもので、**m/s** で計算する。水位上昇率は、死亡率を求める上で重要な氾濫特性である。水位上昇率が高く水深が大きい場合、水位上昇率の低い水深と比べて、死亡率が大幅に増加する（詳細は第 6 章を参照のこと）。そのため、すべての氾濫シナリオに関し水位上昇率を用いる。

3.4.4 流速

流速も氾濫特性のひとつで、建物の安定性にとって重要となる。流速が速く水深が深いと、建物が倒壊する確率が高くなり、死亡率に影響する。より詳細な情報については、第 6 章、特に 6.5 節を参照されたい。また、すべての氾濫シナリオに関し流速も用いる。

3.5 氾濫シナリオの不確実性

氾濫シナリオについては、氾濫範囲と氾濫特性に影響を与えるいくつかの側面がある。一般に、以下のような不確実性が考えられる。

- 破堤は、最大ピーク流量の前でも後でも起こりうる。本アプローチでは、水位が計画水位を超えた瞬間を破堤の瞬間とした。特に"最大"と"最大ボリューム"のシナリオにおいては、ピーク前に決壊することになり、比較的長い時間、水が低内地に流入することになる。
- 堤防の越流に対する抵抗が高まれば、破堤はより遅いタイミングで発生し、総流入量が少なくなるため、氾濫範囲や氾濫特性は小さくなる。一方で、堤防を越水する前に決壊することもあり、早い段階で破堤することもある。これは、地盤の破堤メカニズムによって引き起こされる場合である。その場合、総流入量がより多くなり、氾濫範囲も大きくなる。
- また、ハイドログラフの形状も氾濫に影響を与える一面である。したがって、流出のさまざまな形状を理解することは、起こりうる氾濫パターンの理解を深めることになる。
- 破堤のモデル化：氾濫モデリングにおいて破堤の進行をモデル化する方法がいくつかある。破堤が進行すればするほど、流入量も大きくなる。つまり、決壊の深さや幅が大きくなる速度が氾濫に影響するのである。

そのため、概して、浸水範囲や氾濫特性を決定するにあたり、不確実性が存在する。しかし、様々な氾濫シナリオを含む本アプローチでは、これらの不確実性は適切に分析に含まれている。

重要な研究課題として残っているのは、異なるタイプの流出波型が発生する確率である。細くて尖った波と長く広い波、異なるタイプの流出の間にはどのような分布があるのでしょうか。

4 被害

前節で述べた浸水シミュレーションの結果をもとに、予想される被害額を算出する。

4.1 算出方法

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、経済的に評価できる治水事業の便益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月発行のものに従って各損害額を算出している。

氾濫による被害は2種類あり、家屋や事業所、農作物の浸水による直接被害と、浸水した事業所における生産停止やライフラインの寸断などによる間接被害がある。本報告書では、現段階で経済的に評価できる被害を12項目を挙げる。

表3 被害を記録した項目3

分類				被害の内容
直接被害	資産被害	一般資産被害	家屋	事業屋用・事業用建物の被害
			家庭用品	家具・自動車等の浸水被害
			事業所償却資産	事業所の固定資産のうち、土地・建物を除いた償却資産の浸水被害
			事業所在庫資産	事業所在庫品の浸水被害
			農漁家償却資産	農漁業生産に係る農漁家の固定資産の家屋、土地・建物を除いた償却資産の浸水被害。
			農漁家在庫資産	農漁家の在庫品の浸水被害
		農産物被害		浸水による農作物の被害
		公共土木施設等被害		公共土木施設、公益事業施設、農地、農業用施設の浸水被害
間接被害	稼働被害	営業停止被害	事業所	浸水した事業所の生産停止・停滞（生産高の減少）
			公共・公益サービス	公共・公益サービスの停止・停滞
	事後的被害	応急対策費用	家計	浸水世帯の清掃等の事後活動、飲料水等の代替品購入に伴う新たな出費等の被害
			事業所	

4.2 資産

4.2.1 直接被害の対象資産と資産データの調査

被害額算出に必要な浸水域の資産、世帯数、従業員等の基礎数量を、浸水シミュレーションの計算メッシュごとに算出する。調査対象資産は以下のとおりで、基礎数量は総務省統計局による地域メッシュ統計を用いて調査する。

調査対象資産

- 家屋(床面積)
- 家庭用品（世帯数）
- 事業所償却・在庫資産（従業員数）
- 農漁家償却・在庫資産（農漁家世帯数）
- 農作物（水田面積・畑面積）

基礎数量調査

表4 基本資産数量調査4

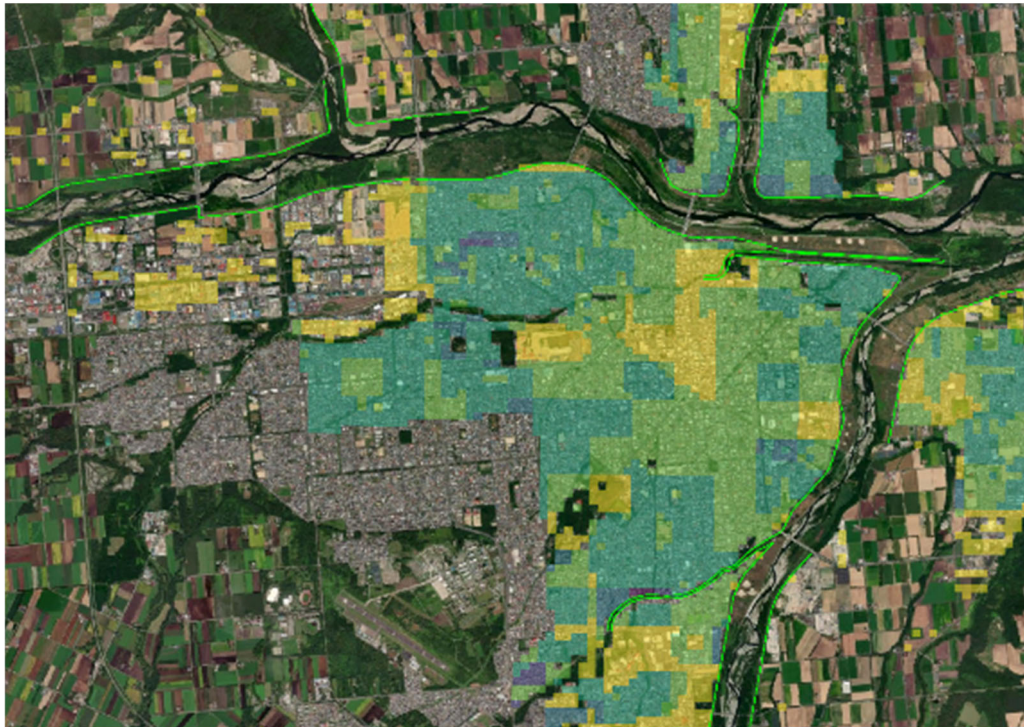
項目	単位	地域メッシュ統計	情報源
人口	人数	2010 年国勢調査	総務省統計局
家屋	床面積	2010 年延べ床面積データ	一般財団法人日本建設情報総合センター
家庭用品	世帯数	2010 年国勢調査	総務省統計局
事業所	従業員数	2009 年経済センサス	総務省統計局
農漁家数	世帯数	2010 年国勢調査	総務省統計局
農作物	水田・畑面積	2009 年国土数値情報	国土交通省国土地理院

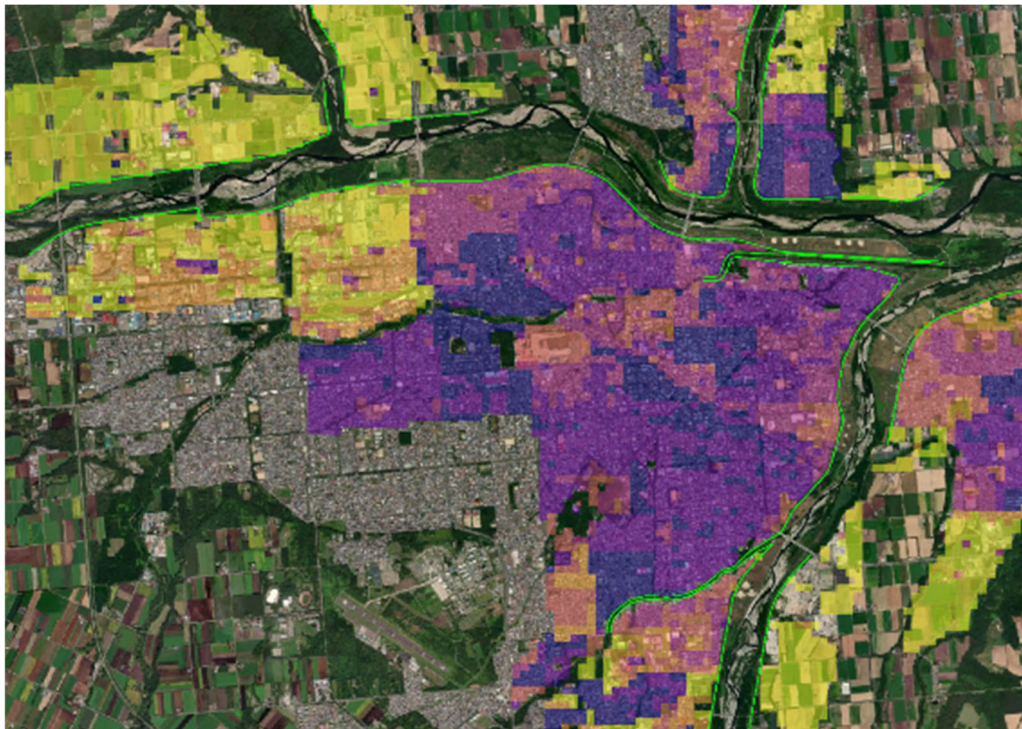
4.2.2 資産額の算出

資産価値は、計算メッシュ単位の資産量に資産評価単価を乗じることで算出する。資産評価単価については、農漁業、畑を除く項目は「治水経済調査マニュアル（案）」に準拠した。「各種資産評価単価とデフレーター（国土交通省河川局河川計画課、2016 年 3 月改訂）」を毎年公表している。農水産物、圃場の評価単価は、当該地域の農業経営規模が全国平均の 16.5 倍であることを踏まえ、地域特性に応じた設定とした。

表5 資産価値単価 (千円) 5

資産項目		2015 年 単価(千円)		備考
家屋		186.2		家屋 1m2 あたり
家庭用品		13,230		一世帯あたり
事業所		償却資産	在庫資産	
産業分類	鉱業、採石業、砂利採取業	14,418	2,255	従業員一人当たり
	建設業	1,452	2,669	
	製造業	4,803	4,691	
	電気・ガス・熱供給・水道業	113,483	5,267	
	情報通信業	5,150	991	
	運輸、郵便業	5,719	1,015	
	卸売、小売業	2,158	1,741	
	金融業、保険業	1,115	210	
	不動産業、物品賃貸業	21,437	7,405	
	学術研究、専門・技術サービス業	1,767	445	
	宿泊業、飲食サービス業	1,525	92	
	生活関連サービス業、娯楽業	3,652	233	
	教育、学習支援業	1,052	267	
	医療、福祉	1,386	58	
	複合サービス業	1,115	210	
	サービス業	1,115	210	
	公務	1,115	210	
農漁業		9,267	1,070	一世帯あたり
農作物	水田	997		ha あたり
	畑	853		ha あたり





4.3 被害

4.3.1 直接被害額

一般資産や農産物の被害額を算出するには、浸水深に応じた資産額と被害率を用いる。公共土木施設等は、一般資産の被害率を適用して算出する。

一般資産被害率

表 6 一般資産被害率（家屋被害） 6

地盤勾配 \ 浸水深	床下	床上				
		50 cm未満	50～99	100～199	200～ 299	300cm 以上
グループ A	0.032	0.092	0.119	0.266	0.580	0.834
グループ B	0.044	0.126	0.176	0.343	0.647	0.870
グループ C	0.050	0.144	0.205	0.382	0.681	0.888

地盤勾配 A : 1/1000 以下、B : 1/1000～1/500、C : 1/500 以上

注：

1. 1993 年から 1996 年までの「水害統計調査」による被害率。
2. 数値には、家屋の全壊も含まれている。

表 7 一般資産被害率（家庭用品の被害状況） 7

浸水深	床下	床上				
		50 cm未満	50～ 99	100～ 199	200～ 299	300cm 以上
被害率	0.021	0.145	0.326	0.508	0.928	0.991

注：1993 年から 1996 年までの「水害統計調査」による被害率。

表 8 一般資産被害率（事業所償却・在庫資産被害） 8

資産	浸水深	床下	床上				
			50 cm未満	50～ 99	100～ 199	200～ 299	300cm 以上
償却		0.099	0.232	0.453	0.789	0.966	0.995
在庫		0.056	0.128	0.267	0.586	0.897	0.982

注：1993 年から 1996 年までの「水害統計調査」による被害率。

表 9 一般資産被害率（農水産物償却・在庫資産被害額） 9

浸水深	床下	床上				
		50 cm未満	50～ 99	100～ 199	200～ 299	300cm 以上
償却	0.0	0.156	0.237	0.297	0.651	0.698
在庫	0.0	0.199	0.370	0.491	0.767	0.831

注：1993 年から 1996 年までの「水害統計調査」による被害率。

表 10 一般資産被害率（農作物の被害） 10

	項目	冠浸水															
		冠浸水深				0.5m 未満				0.5～0.99m				1.0m			
		浸水日数				1 ～ 2	3 ～ 4	5 ～ 6	7 以上	1 ～ 2	3 ～ 4	5 ～ 6	7 以上	1 ～ 2	3 ～ 4	5 ～ 6	7 以上
作物																	
水田	水稻	21	30	36	50	24	44	50	71	37	54	64	74				
畑	陸稲	20	34	47	60	31	40	50	60	44	60	72	82				
	さつまいも	11	30	50	50	27	40	75	88	38	63	95	100				
	白菜	42	50	70	83	58	70	83	97	47	75	100	100				
	青菜	19	33	46	59	20	44	48	75	44	38	71	84				
	根菜	32	46	59	62	43	57	100	100	73	87	100	100				
	瓜	22	30	42	56	31	38	51	100	40	50	63	100				
	豆	23	41	54	67	30	44	60	73	40	50	68	81				
	畑平均	27	42	54	67	35	48	67	74	51	67	81	91				

注）「青菜」はネギ、ほうれん草など、「根菜」は大根、里芋、ごぼう、人参など、「瓜」はきゅうり、メロン、すいかなど、「豆」は小豆、大豆、落花生、玉ねぎなどである。

公共土木施設等の被害率

公共土木施設の被害率は、一般資産の被害額（家屋、家庭用品、事務所、農漁業の被害額の合計）に対する割合とし、北海道の過去 40 年間（1975～2014）の氾濫被害の「水害統計」（国土交通省河川局（建設省））及び「災害記録」（北海道）に基づいて決定したものである。算出にあたっては、各年度を総合物価指数（水害デフレーター）に基づき、2014 年の値に換算した。

表 11 水害統計と災害記録より算出した北海道の公共土木施設の被害率 11

施設	道路	橋	下水道	都市施設	公共の福祉	農地	産業施設	小計
被害率	84.9	11.3	0.1	1.3	15.5	15.5	117.2	245.8

1975 年から 2014 年までの北海道の水害統計・災害記録をもとに算出した値。

出典 1：「水害統計」（1975 年～2014 年）国土交通省（建設省）水管理・国土保全局（河川局）

出典 2：北海道「災害記録」（1975 年～2011 年）

4.3.2 間接被害額

直接被害を除く水害のうち、現段階で経済的に評価できる 3 項目については、「治水経済調査マニュアル（案）」（国土交通省河川局、2005 年 4 月）に基づき、間接被害として算定した。それは、1）営業停止損失、2）家庭における応急対策費用、3）事業所における応急対策費用である。

営業停止損失

営業停止損失は、浸水域の従業員数に、営業停止または停滞による損失日数および 1 人一日当たりの付加価値を乗じて算出した。

産業大分類別産業ごとに、以下の式で損失額 D を算出し、それらの合計として営業停止損失を算出した。

$$D_i = M_i \times (n_0 + n_1/2) \times P_i$$

i ：産業大分類、 M ：従業員数、 P ：付加価値額（円/（人・日））。

n_0 ：業務停止日、 n_1 ：業務停滞日

停止日数は下表のとおりで、停滞日数は停止日数の 2 倍です。

表 12 停止または停滞した日数（日数） 12

浸水深	床下	床上				
	45cm 未満	50cm 未満	50～99cm	100～199cm	200～299cm	300cm 以上
停止日数	3.0	4.4	6.3	10.3	16.8	22.6
停滞日数	6.0	8.8	12.6	20.6	33.6	45.2

表13 従業員1人一日当たりの付加価値 (2015年評価額、円/(人・日)) 13

産業分類	付加価値
鉱業、採石業、砂利採取業	115,235
建設業	23,254
製造業	31,460
電気・ガス・熱供給・水道業	93,098
情報通信業	38,749
運輸、郵便業	24,543
卸売業、小売業	26,464
金融業、保険業	20,439
不動産業、物品賃貸業	46,152
学術研究、専門・技術サービス業	35,924
宿泊業、飲食サービス業	21,594
生活関連サービス業、娯楽業	22,317
教育、学習支援業	24,046
医療、福祉	16,969
複合サービス業	20,216
サービス業	20,924
公務	20,924

出典：「治水経済調査マニュアル(案) 各種資産評価単価及びデフレーター」

(2016年3月改定、国土交通省水管理・国土保全局)

家庭における応急対策費

- 清掃労働対価

家庭における清掃労働に要する被害額は、世帯数に世帯あたりの清掃労働対価と下表の清掃所要日数を乗じて算出する。

表14 労働対価評価額。10,731円/日 (2015年評価) 清掃日数(日数) 14

浸水深	床下	床上				
	45cm未満	50cm未満	50～99cm	100～199cm	200～299cm	300cm以上
日数	4.0	7.5	13.3	26.1	42.4	50.1

注：清掃・片付けに要した日数は、1995年、1996年に実施した「水害に関するアンケート調査」による。

出典：「治水経済研究マニュアル(案)」(2005年4月、国土交通省河川局)。

- 代替活動等に伴う支出

飲料水の購入や通勤の代替交通機関などの代替活動による被害額は、世帯数に下表の被害単価を乗じて算出した。

表 15 代替活動に伴う支出（家庭）（単価：1000 円/世帯） 15

浸水深	床下	床上				
	45cm 未満	50cm 以下	50～99cm	100～199cm	200～299cm	300cm 以上
単価	82.5	147.6	206.5	275.9	326.1	343.3

注：単価は、1995 年、1996 年に実施した「水害に関するアンケート調査」による。

出典：「治水経済研究マニュアル（案）」（2005 年 4 月、国土交通省河川局）

事業所における応急対策費

代替活動等による被害額は、浸水した事業所数に下表の被害単価を乗じ、算定した。

表 16 代替活動費（事務所）（単価：1 世帯あたり 1000 円） 16

浸水深	床下	床上				
	45cm 未満	50cm 以下	50～99cm	100～199cm	200～299cm	300cm 以上
単価	470	925	1,714	3,726	6,556	6,619

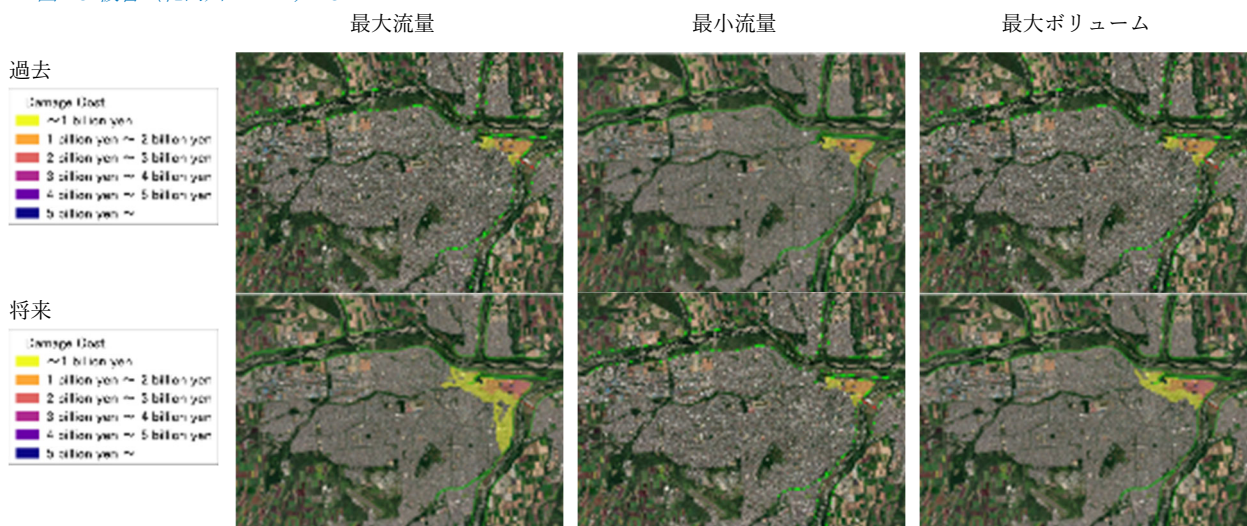
注：単価は、1995 年、1996 年に実施した「水害に関するアンケート調査」による。

出典：「治水経済研：究マニュアル（案）」（2005 年 4 月、国土交通省河川局）

4.3.3 経済的被害の結果

帯広の事例では、「過去」のセットと「将来」のセットの両方について被害額を算出した。下図は、札内 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「過去」の状況、下の図は「将来」の状況での被害状況を表している。比較すると、「将来」の状況ではより大きな流量が発生し、より大きな氾濫範囲とより大きな水深を持つ氾濫が発生することが分かる。

図 10 被害（札内川 KP4.2） 10



4.4 帯広の事例における被害

経済的被害の算定方法については、4.1 節から 4.3 節で述べる。これを選択した破堤箇所適用すると、経済的な被害が算定できる。第 0 セクションでは、破堤箇所が示され、各ハイドログラフについて経済的被害を示した。氾濫被害の程度や場所による違い、ハイドログラフの違いによる影響などについて、この表から見識が得られる。図 10 4.3.3 節では、破堤箇所 KP4.2 について、帯広地域の被害分布を示した。下の表は、「過去」のシナリオで計算された被害額に差はないが、「将来」のシナリオでは氾濫範囲が異なるため、計算された被害額に差が生じることを示している。被害額は最小シナリオで約 800 億円、最大シナリオで約 2,690 億円となる。その差はおよそ 3 倍である。

すべてのシナリオを見ると、異なる氾濫シナリオ間の帯域幅は、概して 1.5～2.5 倍である。ただし、十勝 KP56.4 は例外で、その差は約 6 倍と大きくなっている。そのため、その破堤箇所では、算定被害が、川を流れる流出波のタイプにより敏感に変化する。

表 17 「過去」シナリオと「将来」シナリオの経済被害額（単位：百万円）¹

	破堤箇所	最大	最小	最大ボリューム
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

4.5 被害額算出の不確実性

氾濫シナリオを想定し、経済的被害を算出する。被害額の算定にも不確実性が含まれる。以下の点は、まず挙げられる不確定要素の一覧である。

- ここで重要となるのは、氾濫の範囲と、重要かつ価値の高いインフラの脆弱性である。氾濫範囲が変化し、このような資産が氾濫範囲の端にある場合、被害額に大きな影響を与えうる。
- 直接経済被害と間接経済被害の関係。直接的な被害は、既存資産の損失である。しかし、経済活動の損失による間接的な被害は、特に重要なインフラが浸水した場合に大きな影響が発生しうる。

¹異なるシナリオで被害が同じということは、その破堤箇所には氾濫に至るシナリオが 1 つか 2 つしかないことを意味する。

5 避難

5.1 対象地域の避難率

平成 28 年北海道豪雨災害の際、帯広市全域の対象地域約 54,000 人[1]に避難勧告/命令を出したところ、実際に避難したのは 1,954 人[2]（3.6%）のみであった。実際の避難率を適用し浸水域の死者数を推定するためには、浸水域内の人口をパラメータとして設定する必要がある。ただし、「平成 28 年北海道豪雨災害」では、帯広市は越流による浸水被害がなかったため、実際の避難率を用いるのは適切ではない。そこで、本プロジェクトでは、日本とオランダの既存の避難率設定手法をベースに、日本における大規模水害の死亡率推定に適用できる新たな避難率設定手法を提案する。

5.2 避難率の設定方法

5.2.1 日本の手法

日本における浸水域の死者数を推定するために、日本と米国における過去 6 つの氾濫をもとに、避難率を求めた[3]。表 18 に示した過去 6 回の水害時の避難率を参考に、0%、40%、80%を基本設定とし、浸水域の残存人口（エクスポージャ）を推計した。ただし、近年の大規模水害の避難率[4][5]は含まれていない。気候変動の影響を踏まえた場合、実際の避難率とは異なる可能性が考えられる。実際の避難率を大規模水害のリスク分析に適用した例は少ないが、川畠らによる避難シミュレータを用いた観察研究[6]や馬場らによる避難の実験的研究[7]など、いくつかの事例がある。

表 18 過去の水害における避難率 18

災害	災害発生年	避難率 (%)
長野豪雨	1982	13
東海豪雨	2000	44
台風 9 号、北上川	2002	32
新潟福井豪雨	2004	19（新潟県見附市） 23（新潟県三条市） 36（新潟県中之島町）
台風 23 号、豊岡洪水	2004	33
ハリケーン・カトリーナ	2005	約 80（ニューオリンズ市）。

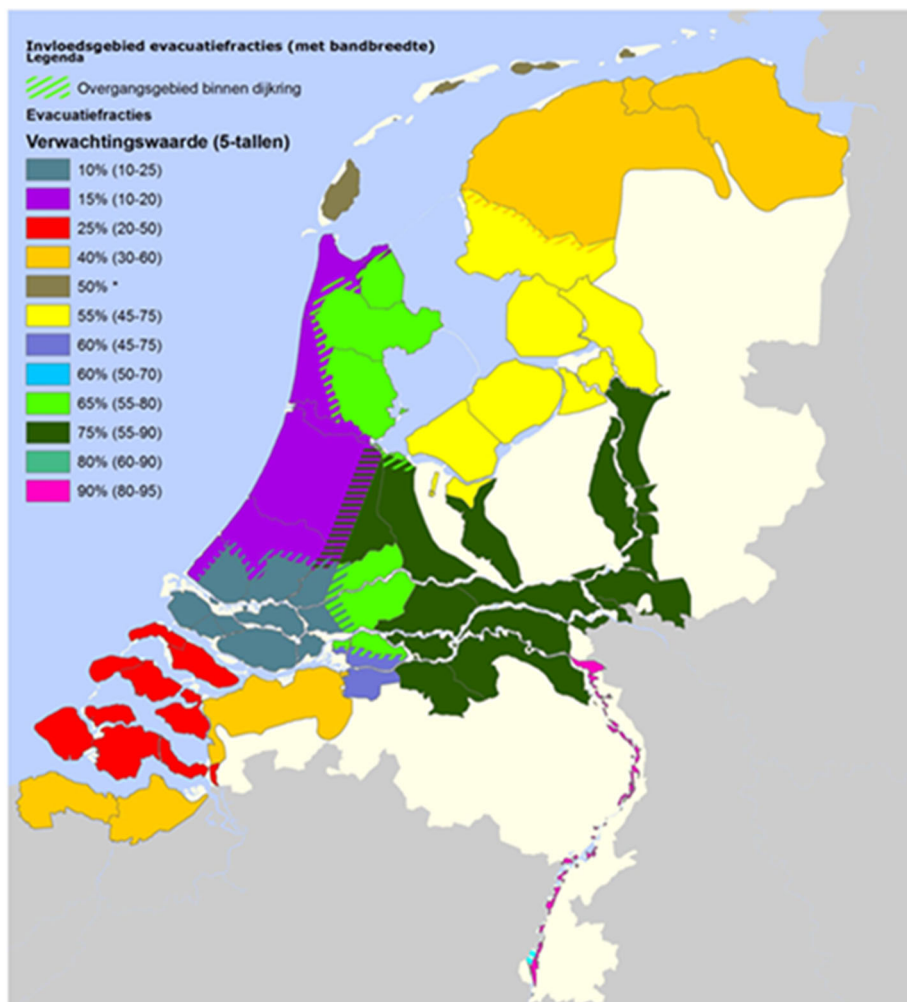
5.2.2 オランダの手法

オランダでは、専門家への聞き取り調査によって浸水地域の避難率を決定し、死亡率を推定する。8) 多様なシナリオの避難率を推定し、堤防リング（輪中堤）ごとに避難率の期待値を算出する。これらのシナリオを、以下の避難プロセスによって分類する。特に「脅威の探知と認識」は、避難に要する時間、いわゆる「リードタイム」で定義され、リードタイムが十分にあるか、リードタイムが短いために急ぐ必要があるかによって、避難率は変わる。

1. 脅威の探知と認識
2. 組織と戦略の選択：政府と社会による意思決定と戦略の選択
3. 実施：避難の方法とルート

シナリオごとの避難率を推定するために、道路の混雑状況や交通規制など、さまざまな可能性を考慮した避難モデルを使用する。そのため、図 11 に示す通り、不確実性と帯域幅を避難率に含む。最後に、避難率を推定するためのパラメータとして関連するすべてのイベントを含むイベントツリーを作成する。ここで挙げられる課題は、帯広では幸いなことに近年水害が発生していないため、モデルの適用可能性やキャリブレーションがなされていないことである。

図 11 堤防リングごとの避難率 11



5.2.3 日本とオランダの手法のコラボレーション

上記を参考に、本プロジェクトでは、日本国内で公表されている大量の水害アンケート調査結果を収集し、多くの水害事例を基にシンプルなイベントツリーを作成し、不確実性を考慮した避難率（期待値）を推定する。イベントツリーは、洪水直前に住民が得た避難のリードタイムをもとに、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3つのシナリオで避難率を推定し、作成した。

5.3 利用可能なデータおよび情報

日本におけるアンケート調査の多くは、国や自治体、研究機関によって水害に遭った住民を対象に、実施したものである。これらの調査から得られた情報は、水害時の住民の行動心理を把握し、効果的な治水対策や危機管理、地域防災計画の検討に寄与している。本プロジェクトでは、日本の水害アンケート調査 86 事例のデータを収集し、イベントツリーを作成する（表 19）。ただし、各調査の母数がそれぞれ異なるため注意が必要である。

表 19 収集した日本の水害事例 19

Year	Target disaster	Target area
1982	Yamato River Flood	Oji town, Nara prefecture
1982	Yamato River Flood	Matsubara city, Osaka prefecture
1982	Flood in September, 1982	Kishima area, Iiyama city, Nagano prefecture
1982	Flood in September, 1982	Tokiwa area, Iiyama city, Nagano prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Suzu, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Furuminato, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Monden, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Ekimae, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Minatoshinomachi, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Morimizo, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Misumi, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Mukainota, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Heavy Rain Disaster in Sanin region	Kurosawa, Misumi town, Shimane prefecture
1983	Flood in September, 1983	Tokiwa area, Iiyama city, Nagano prefecture
1986	Typhoon No.10	Motegi town, Tochigi prefecture
1986	Typhoon No.10	Akemono town, Ibaraki prefecture
1986	Typhoon No.10	Ishige town, Ibaraki prefecture
1986	Typhoon No.10	Mito city, Ibaraki prefecture
1998	Flood in Ketsu region ,Niigata prefecture	Sasakami village,Niigata prefecture
1998	Heavy Rain Disaster in East Japan	Kooriyama city, Fukushima prefecture
2000	Heavy Rain Disaster in Tokai region	Tenpaku ward, Nagoya city, Aichi prefecture
2000	Heavy Rain Disaster in Tokai region	Nishi ward, Nagoya city, Aichi prefecture
2000	Heavy Rain Disaster in Tokai region	Shinkawa town, Aichi prefecture
2000	Heavy Rain Disaster in Tokai region	Nishi-biwajima town, Aichi prefecture
2000	Heavy Rain Disaster in Tokai region	Kita ward, Nagoya city, Aichi prefecture
2001	Heavy Rain Disaster in Southwestern Kochi prefecture	Shimokawaguchi village, Kochi prefecture
2002	Typhoon No.6 Flood	Higashiyama town and Kawasaki village, Iwate prefecture
2002	Typhoon No.6 Flood	Kooriyama city, Fukushima prefecture
2004	Heavy Rain in Niigata and Fukushima prefecture	Sanjo city, Niigata prefecture
2004	Heavy Rain in Fukui prefecture	Toyooka city, Hyogo prefecture
2004	Typhoon No.23 Flood	Fukui city, Fukui prefecture
2005	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Kawayama area, Mikawa town, Yamaguchi prefecture
2005	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Nagawa area, Mikawa town, Yamaguchi prefecture
2005	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Nekasa area, Mikawa town, Yamaguchi prefecture
2005	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Iwakuni city, Yamaguchi prefecture
2006	Heavy Rain in July, 2006	Stsuma-kawauchi city, Kagoshima prefecture
2006	Heavy Rain in Northern Kagoshima prefecture	Satsuma town, Kagoshima prefecture
2006	Heavy Rain in Northern Kagoshima prefecture	Ookuchi city, Kagoshima prefecture
2006	Heavy Rain in Northern Kagoshima prefecture	Hishikari town, Kagoshima prefecture
2006	Heavy Rain in Northern Kagoshima prefecture	Yusui town, Kagoshima prefecture
2006	Heavy Rain in Northern Kagoshima prefecture	Ebino city, Miyazaki prefecture
2006	Heavy Rain in Northern Kagoshima prefecture	Minowa town, Nagano prefecture
2007	Typhoon No.9 Flood	Kamiochiai area, Fujioka city, Gunma prefecture

Year	Target disaster	Target area
2009	Heavy Rain in Chugoku and Northern Koshu region	Sayo town, Hyogo prefecture
2009	Typhoon No.9 Flood	Ootoshi area and Hirakawa area, Yamaguchi city, Yamaguchi prefecture
2010	Heavy Rain Disaster on 15th, July	Kani city, Gifu prefecture
2010	Heavy Rain Disaster on 15th, July	Yaotsu town, Gifu prefecture
2010	Heavy Rain Disaster on 15th, July	Mitake town, Gifu prefecture
2010	Heavy Rain Disaster	Oyama town, Shizuoka prefecture
2011	Typhoon No.15 Flood	Kooriyama city, Fukushima prefecture
2011	Typhoon No.15 Flood	Sukagawa city, Fukushima prefecture
2012	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Tatsuda area, Kumamoto city, Kumamoto prefecture
2012	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Hita city, Oita prefecture
2012	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Nagano area, Yame city, Fukuoka prefecture
2012	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Joyomachi, Yame city, Fukuoka prefecture
2012	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Hoshinomura, Yame city, Fukuoka prefecture
2014	Flood in August, 2014	Wajiki area, naka town, Tokushima prefecture
2015	Heavy Rain in Kanto and Tohoku region	Joso city, Ibaraki prefecture
2016	Typhoon No.10 Flood	Otomo, Iwaizumi town, Iwate prefecture
2016	Typhoon No.10 Flood	Mukaicho, Iwaizumi town, Iwate prefecture
2016	Typhoon No.10 Flood	Horono, Iwaizumi town, Iwate prefecture
2016	Typhoon No.10 Flood	Hinata, Iwaizumi town, Iwate prefecture
2016	Typhoon No.10 Flood	Hikage, Iwaizumi town, Iwate prefecture
2016	Typhoon No.10 Flood	Otofuke town, Hokkaido prefecture
2016	Typhoon No.10 Flood	Minamifurano town, Hokkaido prefecture
2017	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Tofo vallage, Fukuoka prefecture
2017	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Asakura city, Fukuoka prefecture
2017	Heavy Rain in Northern Kyushu region	Hita city, Oita prefecture
2018	Heavy Rain in Western Japan	Aki city, Kochi prefecture
2018	Heavy Rain in Western Japan	Seiyo city, Ehime prefecture
2018	Heavy Rain in Western Japan	Kawabe, mabicho, Kurashiki city, Okayama prefecture
2018	Heavy Rain in Western Japan	Arii, mabicho, Kurashiki city, Okayama prefecture
2019	Typhoon No.19 Flood	Nagano city, Nagano prefecture
2019	Typhoon No.19 Flood	Kashimadai, Oosaki city, Miyazaki prefecture
2019	Typhoon No.19 Flood	Higashimatsuyama city, Saitama prefecture
2019	Typhoon No.19 Flood	Chofu city, Tokyo metropolitan area
2019	Typhoon No.19 Flood	Oosato town, Miyagi prefecture
2019	Typhoon No.19 Flood	Marumori town, Miyagi prefecture
2020	Heavy Rain in July, 2020	Takayama city, Gifu prefecture
2020	Heavy Rain in July, 2020	Seki town, Gifu prefecture
2020	Heavy Rain in July, 2020	Nakatsugawa city, Gifu prefecture
2020	Heavy Rain in July, 2020	Hitoyoshi city, Kumamoto prefecture
2020	Heavy Rain in July, 2020	Gero city, Gifu prefecture
2020	Heavy Rain in July, 2020	Yashiro city, Kumamoto prefecture
2020	Heavy Rain in July, 2020	Shirakawa city, Gifu prefecture
2020	Heavy Rain in July, 2020	Kuma village, Kuma district, Kumamoto prefecture

5.4 解析と結果

定義

- 避難率

避難率とは、本プロジェクトでは「立ち退き」（水平避難）の割合と定義する。避難先は、避難所だけでなく、高台や親戚・友人の家など、安全な場所を含むものである。
- 避難のリードタイム

本プロジェクトにおけるリードタイムは、自宅から避難所までの距離と避難速度（避難時の歩行速度）を考慮し、すべてのケースで一律で求めたが、本来であれば各河川や各水害の水位上昇率等によって、地域・河川ごとに求めるとより良いだろう。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、あるいは最高水位に達するまでの時間である（図 12）。安全な避難に必要なリードタイムは、自宅から避難所までの距離[9]と避難時の歩行速度[10]により推定する。その結果、必要なリードタイムは、歩行に時間がかかる人は日中約 1.4 時間、それ以外の人は 0.6 時間となった（表 20）。夜間は歩行速度がほぼ半減するため[11]、歩行に時間がかかる人のリードタイムは約 2.8 時間、それ以外の人は約 1.2 時間である（表 21）。

そのため、歩行に時間がかかる人を含め、住民が安全に避難するために必要なリードタイムを約 3 時間と想定する。しかし、近年の水害では、多くの住民が車で避難を選択したため、避難速度が大きく異なる可能性があり、今後、より詳細な調査を行う必要がある。

図 12 リードタイムの概念 12

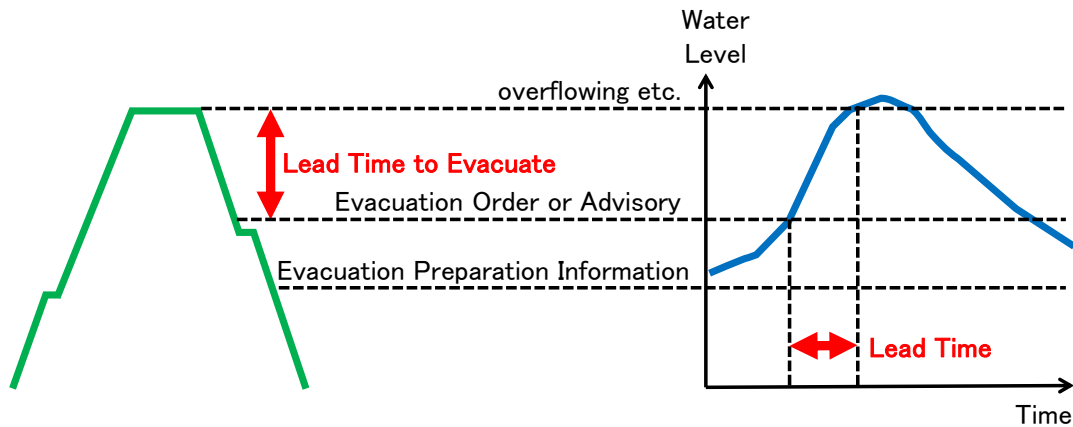


表 20 住民のためのリードタイム（日中） 案 20

対象者	距離	歩行速度（日中）	所要時間
歩くのに時間がかかる人	最大 2,000m [9]	0.4m/s (参考文献[10]より下記の 40%程度と想定)	1.4 時間
その他		1.0m/s [10]	0.6 時間

表 21 住民のためのリードタイム（夜間、歩行速度半減） 案 21

対象者	距離	歩行速度（日中）	所要時間
歩くのに時間を要する人	最大 2,000m [9]	0.2m/s (参考文献[10]より下記の 40%程度と想定)	2.8 時間
その他		0.5m/s [10]	1.2 時間

5.5 結果

以上のように求めた必要リードタイム 3 時間をもとに、収集した 86 事例の避難率を分類した。図 13 と表 22 に示された通り、リードタイムが短い（3 時間未満）ケースは、最小 7.1%から最大 81%の間で幅広く分布していることがわかる。リードタイムが長い（3 時間以上）場合、最低 17.3%、最高 96%となり、10～15%程度高くなる。リードタイムが長い場合の平均は 43.8%で、リードタイムが短い場合の 40.9%よりわずかに高い。

図13 リードタイムに基づく避難率の分類13

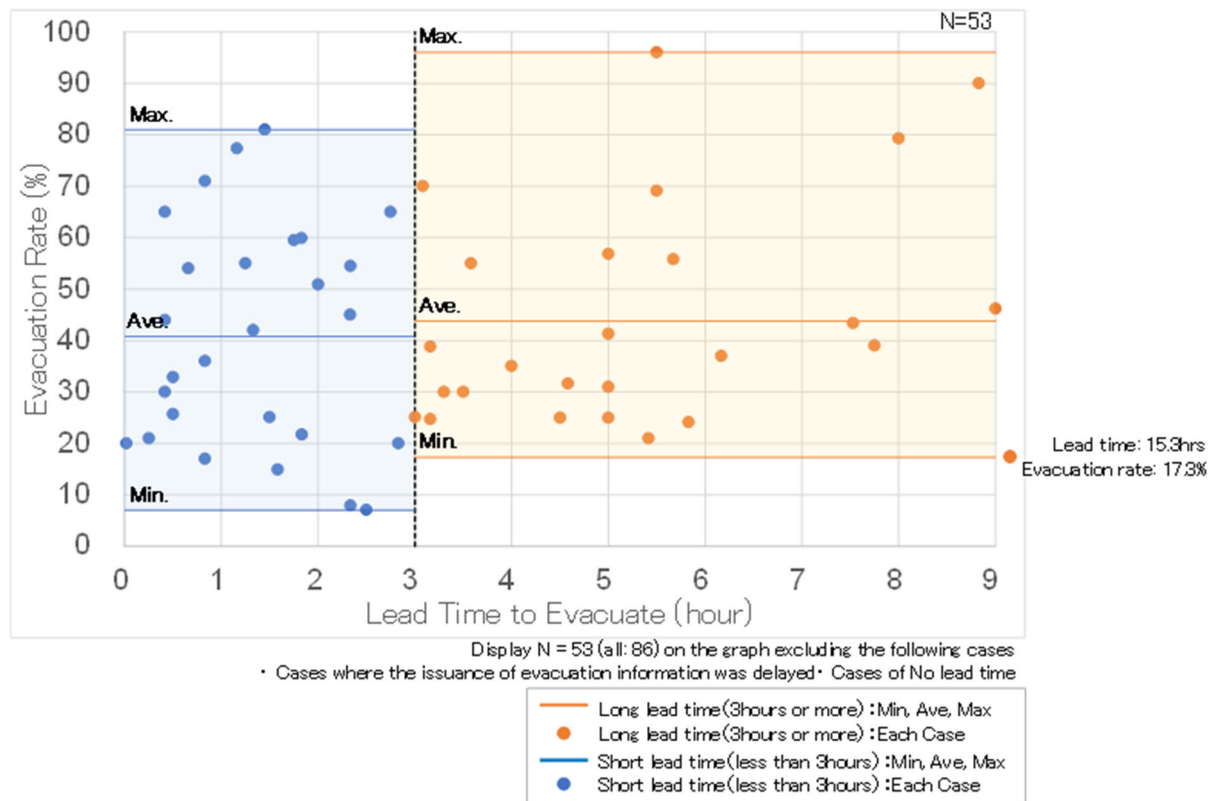


表22 リードタイムが短い場合と長い場合の避難率22

リードタイム	最小	平均値	最大
短いリードタイム (3 時間未満)。	7.1%	40.9%	81%
長いリードタイム (3 時間以上)。	17.3%	43.8%	96%

避難率と水害経験の関係

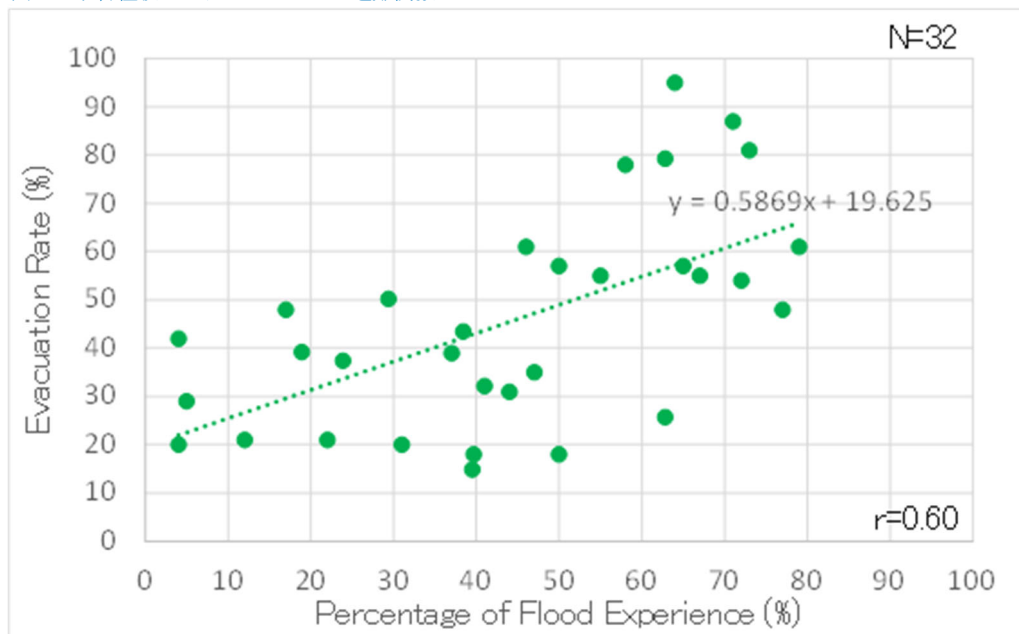
このプロジェクトでは、避難率とさまざまな要素との相関関係を明らかにする。その中でも、避難率と水害を過去に経験した人の割合とで正の相関が現れた点について、本プロジェクトにて紹介する。

ここで、過去に水害を経験した人の割合とは、過去の水害における被害経験や避難経験の割合を示している。該当する事例が少ない理由は、多くのアンケート調査において水害経験に関する質問項目がないためである。32 件すべてにおいて、避難率と水害経験者割合の関係を把握したところ、図に示すように正の相関（相関係数 $r = 0.60$ ）が得られた。これは、被害経験や避難経験のある住民は、水害に対する危機意識が高く、避難する可能性が高い傾向にあることを示している。その点に基づき、以下のように水害経験をパラメータとした避難関数（一次関数）を導き出すことができる。

$$y = 0.5869x + 19.625$$

ここで、 x ：水害経験率（%）、 y ：避難率（%）である。この関数の切片から、水害が発生した地域では少なくとも約 20%の避難率が期待できることがわかる。この避難関数により、任意の x （水害経験者の割合）に対応する避難率を推定することができ、より地域特性を反映した避難率を設定することが可能になる。

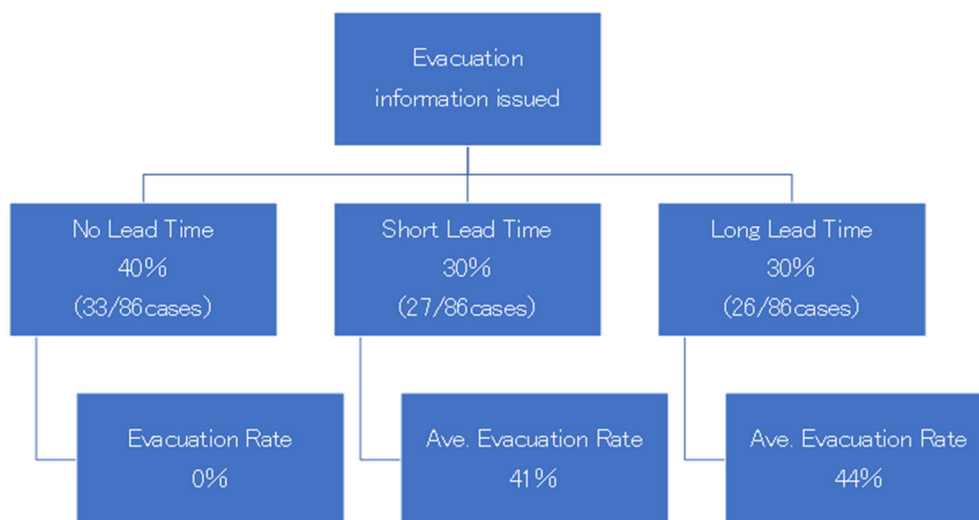
図 14 水害経験をパラメータとした避難関数 14



5.6 避難率

図 15 は、リードタイムに応じて作成されたシンプルなイベントツリーである。中層のリードタイムなし、リードタイム短い（3 時間未満）、リードタイム長い（3 時間以上）の各比率は、本プロジェクトで収集した事例の母数をパラメータとするシナリオごとの比率を示す。下の層は、シナリオごとの避難率を示している。ここでは、リードタイムがない場合、あるいは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判断し、避難率を 0% とした。リードタイムが短い場合、リードタイムが長い場合の避難率は、それぞれ 41%、44% であった。全体平均率（期待値）は 26%。このプロジェクトでは、避難率から算出される浸水域の残存人口（被ばく量）から、浸水域の死亡率を推定しています。また、避難率を向上させるために、ニューオリンズ市におけるハリケーン・カトリーナ災害の実績（80%）を追加しています。本プロジェクトでは、上記の避難率の決定方法と避難率の値を提案する。

図 15 リードタイムに基づくシンプルなイベントツリー-15



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

5.7 避難の不確実性

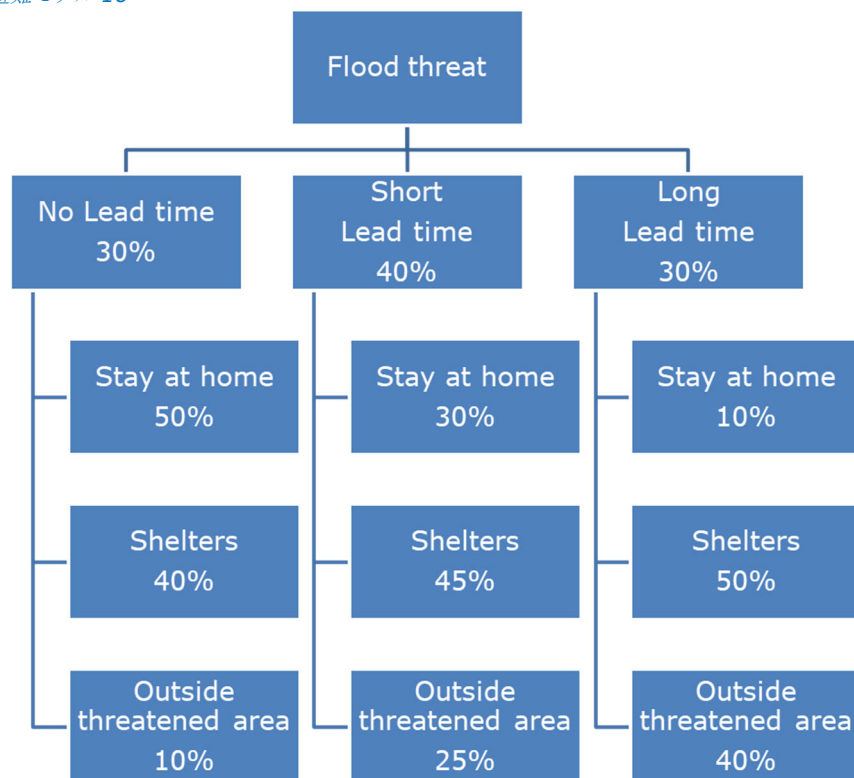
避難は、人間の行動がその効果に大きな影響を与えるため、いくつかの不確実性を伴う側面がある。コミュニケーション、過去の経験、時間、人々の意識、心構え、道路状況、これらすべての側面が避難の効果の結果に影響を及ぼす。また、危険地域外への予防的避難と近所にある避難所への避難の違いも、安全な場所への到達率に大きく影響する。したがって、このテーマに関しては、避難の効果と氾濫リスク軽減の可能性について理解を深めるため、さらなる研究が必要である。

5.8 避難モデル改善の提案

今後の課題として、さらに詳細な調査・検討が必要である。今後の主な検討内容として、日本では大規模水害が頻発しているため、最新の情報（避難率、リードタイムなど）を追加し、それに基づいてイベントツリーと氾濫による死者数を推定すべきである。それに伴い、避難率を更新する必要がある。また、本プロジェクトでは、全ての事例に共通して推定要素としてリードタイムに着目したが、実際には、水害経験など避難率と相関性のある要素に着目し、災害発生直前の避難率を推定すべきである。以下、これらを含めた今後の検討内容を示す。

- 最新情報をもとにイベントツリーを作成する。
- 東日本大震災等の結果を踏まえ、住民が安全に避難できるリードタイムを見直す。
- リードタイム以外の要素（水害経験、洪水ハザードマップの理解率、防災訓練の参加率など）と避難率の相関関係を把握する。どの要素（不確実性）が最も避難率に寄与しているかを分析する。
- 以上を踏まえて、さらに地域特性を反映したイベントツリーを作成する。
- 目標避難率の設定方法を検討する。

図16 改良された避難モデル16



5.9 参考文献

- [1] 十勝毎日新聞（地方紙）「13 市町村 7300 人が避難、帯広市でも 1954 人」2016 年
<https://kachimai.jp/article/index.php?no=2016831133129>.（日本語のみ）
- [2] 帯広市「平成 28 年台風 10 号による災害対応の検証結果」2017 年
https://www.city.obihiro.hokkaido.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/382/zenbun.pdf.（日本語のみ）
- [3] 国土交通省 水管理・国土保全局「水害の被害指標分析の手引き（平成 25 年試行版）」2013,
https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/pdf/higaisihyou_h25.pdf.（日本語のみ）
- [4] 諸岡良優ら「平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害における住民の情報取得状況及び避難行動の実態調査」河川技術論文集, 22 巻, 2016, <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00906/2016/22-0345.pdf>.（日本語のみ）
- [5] 岐阜県 清流の国ぎふ防災・減災センター「令和 2 年 7 月豪雨災害における住民避難行動調査」令和 3 年 7 月, <https://www.pref.gifu.lg.jp/uploaded/attachment/243366.pdf>.（日本語のみ）
- [6] 川畠健一ら「自律的避難のための水害リスクコミュニケーション支援システムの開発」土木計画学研究・論文集 23 巻, 2 号, pp.309-318, 2006,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalip1984/23/0/23_0_309/_article/-char/ja/.（日本語のみ）
- [7] 馬場康之ら「実物大模型を用いた地下浸水時の避難困難性に関する実験的研究」土木学会論文集 F2、水工、地下空間研究、67 巻, 1 号, pp.12-27, 2011,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejusr/67/1/67_1_12/_article/-char/ja/.（日本語のみ）
- [8] Maaskant, B. et al., Evacuatiechattingen Nederland, Rapport HKV lijn in water, 2009.
- [9] 国土交通省都市防災政策室,「改訂 都市防災実践ハンドブック-震災に強い都市づくり・地区まちづくり」 pp.58-59, 174-175, 2005.（日本語のみ）
- [10] 国土交通省都市局都市安全課・街路交通施設課「津波防災まちづくり計画策定にかかる指針(第 1 版)」2013, <https://www.mlit.go.jp/common/001000488.pdf>.（日本語のみ）
- [11] 水野力斗、二瓶泰「様々な環境条件下における水害避難時の歩行速度に関する実験的検討」2016、土木学会論文集 B1、水工学, 72 巻, 4 号, pp.1333-1338, 2016,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/72/4/72_I_1333/_article/-char/ja/.（日本語のみ）

6 死者数

6.1 近年の水害における対象エリアの死者数

前述のように、本プロジェクトの対象地域である帯広市街地では、平成 28 年北海道豪雨災害において、氾濫による浸水被害は生じていない。十勝川帯広基準点における既往最大水位[1]を見ると、2016 年は歴代 2 位の水位であることがわかる。また、2016 年以前の過去最高水位は、35 年遡った 1981 年になる。そのため、近年は水害の被害もなく、浸水による死者も発生していない地域である。

表 23 十勝川帯広基準点、歴代ピーク水位[1]23

順位	氾濫発生日	ピーク水位(m)
1	1962.8.4	38.12
2	2016.8.31	38.07
3	1981.8.5	37.54
4	1957.9.19	37.05
5	1961.7.26	37.00
5	1972.9.17	37.00
7	1955.9.8	36.88
8	1958.8.28	36.60
9	1964.8.26	36.49
10	1962.9.9	36.22

6.2 死者数の算定方法

6.2.1 日本の方法

浸水域の死者数推定に当たって、日本では米国陸軍工兵隊がニューオリンズで発生したハリケーン・カトリーナの人命損失の検証をしたモデル（LIFESim）[2]が使用されている[3][4]。このモデルは、被災者の年齢（65 歳以上/65 歳未満）を踏まえたうえで、浸水深に応じた死亡率を設定している。被災者が 65 歳以上の場合は自宅の最上階まで垂直避難が可能、65 歳未満の場合は垂直避難で最上階の天井に到達すると想定している（図 17）。そして、床面からの最大浸水深から危険水位帯、準危険水位帯、安全水位帯の 3 つに分類した死亡率に、建物の階数から危険度別人数を算出したものを乗じて、死者数を推定する（表 24）。池内ら[3]は、住居の床高、各階の高さ、平均身長等が、日米間で大きな差がないことを確認した上で、荒川などの大規模水害における死者数を推定した。

図 17 LIFESim モデルの概要[3][4]。17

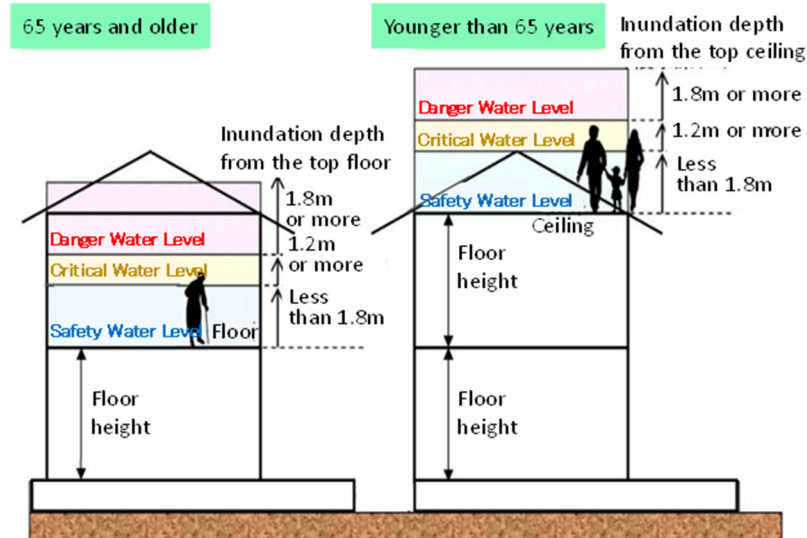


表 24 浸水深に応じた死亡率 [3][4] 24

危険度の分類	死亡率
危険水位帯	91.75
準危険水位帯	12.00
安全水位帯	0.023

6.2.2 オランダの方法

浸水域の死者数推定に当たって、オランダでは氾濫特性を関連づけた死亡率関数を組み込んだモデルが使用されている[5][6]。S.N. Jonkman [5]は、浸水域を 3 つの領域（破堤箇所付近、水位が急激に上昇する領域、その他の領域）に分け、各領域に浸水深をパラメータとした死亡率関数を適用し、氾濫・浸水による死者数を推定した。B. マースカントら[6]は、国全体のリスク評価プロジェクト VNK2 (Floris2)[7]のリスク評価において、死者の大半が 2 つの領域（水位が急激に上昇する領域、その他の領域）に分類・推定されたため、S.N. Jonkman のモデルを改良して浸水域を 4 つに分類した。領域ごとの境界条件と死亡率関数を、以下に示す。

破堤箇所付近の領域

$$d \cdot v \geq 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ かつ } v \geq 2 \text{ m/s}$$

$$F_{D,B} = 1$$

水位が急激に上昇する領域

$$(d \cdot v < 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ または } v < 2 \text{ m/s}) \text{ そして } (d \geq 2.1 \text{ m} \text{ 又は } w \geq 4 \text{ m/hr})$$

$$F_{D,Rise}(d) = \Phi_N \left(\frac{\ln(d) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \mu_N = 1.46, \sigma_N = 0.28$$

遷移領域

$$(d \cdot v < 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ or } v < 2 \text{ m/s}) \text{ and } (d \geq 2.1 \text{ m and } 0.5 \text{ m/hr} \leq w < 4 \text{ m/hr})$$

$$F_D = F_{D,Remain} + (w - 0.5) \frac{F_{D,Rise} - F_{D,Remain}}{3.5}$$

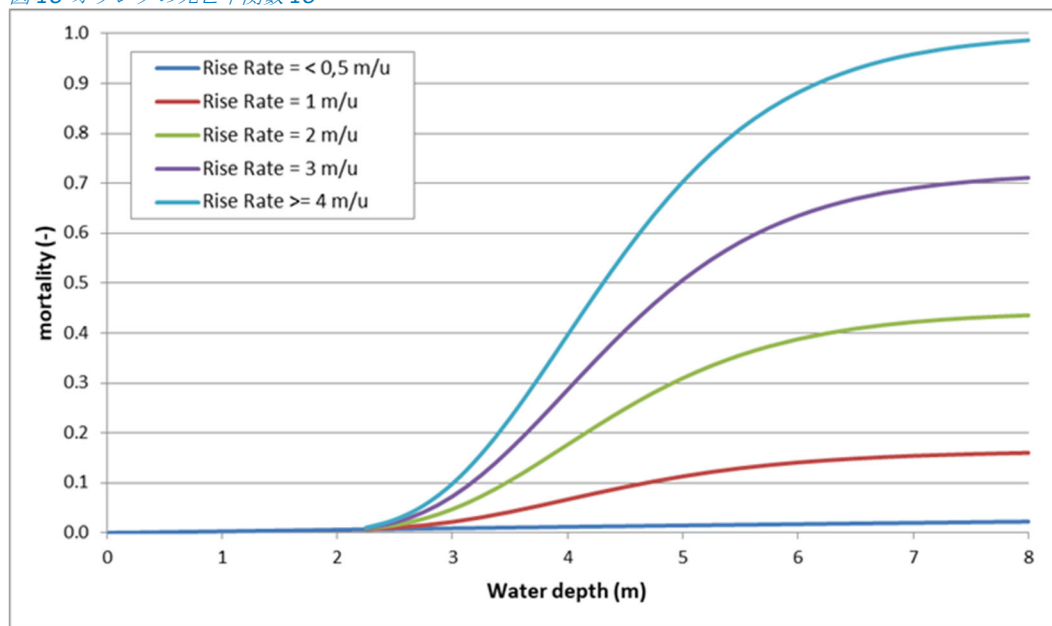
その他の領域

($w < 0.5 \text{ m/hr}$ または ($w \geq 0.5 \text{ m/hr}$ かつ $d < 2.1 \text{ m}$) かつ ($d \cdot v < 7 \text{ m}^2/\text{s}$ または $v < 2 \text{ m/s}$)

$$F_{D, \text{Remain}}(d) = \Phi_N \left(\frac{\ln(d) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \mu_N = 7.60, \sigma_N = 2.75$$

ここで、 d :浸水深(m)、 v :流速(m/s)、 w :水位上昇率(m/h)、 F :死亡率、 Φ :標準正規分布の累積確率密度関数、 μ : h の平均値、 σ : h の標準偏差。

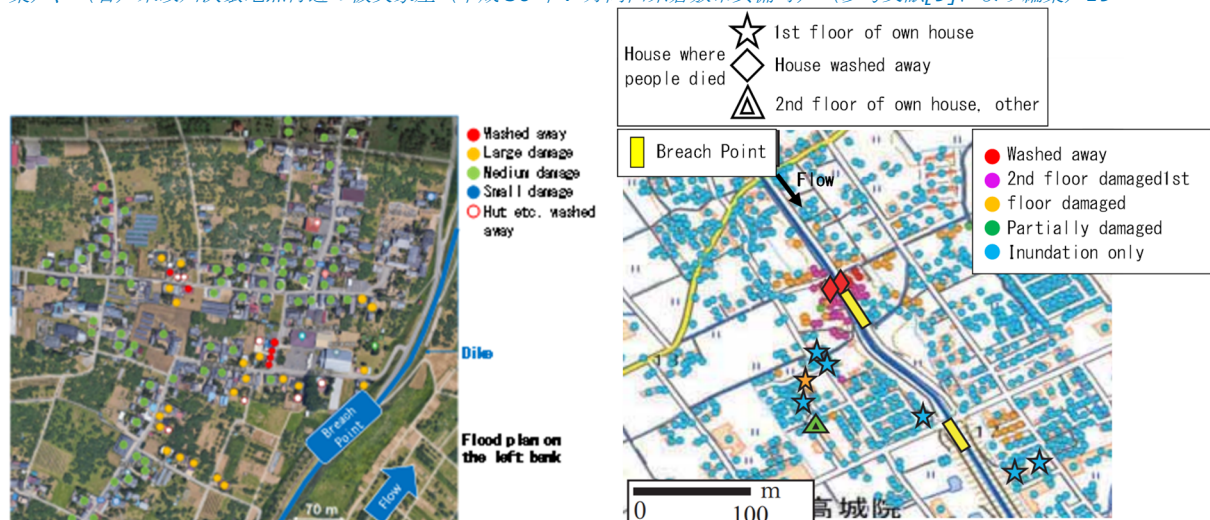
図 18 オランダの死亡率関数 18



6.2.3 適用方法の選択

日本の河川はオランダに比べて急勾配で、その流域も概して急峻である。このため、河川が氾濫すると、図 19 のように、日本では堤防破堤箇所付近の家屋が大きな流体力によって流失・倒壊したりする事例が頻発している [8][9]。二瓶・篠原の研究 [10][11]によると、急激な水位上昇により住民が避難行動に移れずに、あるいは避難途中で死亡する事例が報告されている。(以下 2 つの事例を示す。平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害における茨城県常総市での最大水位上昇速度 0.5 m/h 。平成 30 年 7 月豪雨災害における岡山県倉敷市真備町での最大水位上昇速度： 1.0 m/h 以上)佐藤ら [12]や塚田・池内 [13]によれば、被害者の属性として、多くが高齢者あるいは要援護者であったことも報告されている。このため、日本の水害による死者数を精度良く推定するためには、日本の氾濫特性および被害特性等に応じて、流速や流体力、水位上昇速度等の水理条件や被災者の年齢等を考慮すべきである。

図19 (左) 千曲川決壊地点付近で全壊した家屋 (平成31年10月台風19号 長野県長野市津野) (参考文献[8]により編集)、(右) 末政川決壊地点付近の被災家屋 (平成30年7月岡山県倉敷市真備町) (参考文献[9]により編集) 19



近年の水害による被害状況を踏まえると、帯広市街地を対象とした死者数推定にあたっては、水理条件として浸水深や流速、流体力、水位上昇速度等の要素を考慮すべきである。また、被災者の属性を考慮し、被災者の脆弱性についても考慮すべきである。前述の死亡率関数を適用させる方法は、様々な水理条件を考慮する点においては有用なものである。一方で、LIFESim モデルは、浸水深（水位帯）ごとの死亡率を与えており、水理条件としては浸水深のみの考慮にとどまっているが、被災者の年齢（65歳未満か、65歳以上か）を考慮し、垂直避難の実行可能性を含めている点が特徴である。

以上を踏まえ、堤防決壊時に想定される破堤箇所付近の流速や流体力等の水平方向に働く負荷条件や、低平地や堤防に囲われた地域の貯留による急激な水位上昇を考慮する点から死亡率関数を適用させる方法を用いたが、日本の実河川で同モデルを適用するにあたって課題が多く残る。そこで、本プロジェクトでは死者数推定モデル（6.5節）の改善を導入する。

6.2.4 死亡率

日本の状況の複雑さと今後の課題を踏まえ、帯広の事例ではオランダの死亡率関数を使用することにした。さらに改善が進められた折には、新たな死亡率関数を使用して更新することができる。次の節においては、オランダの死亡率関数を用いた死者数算定について説明する。

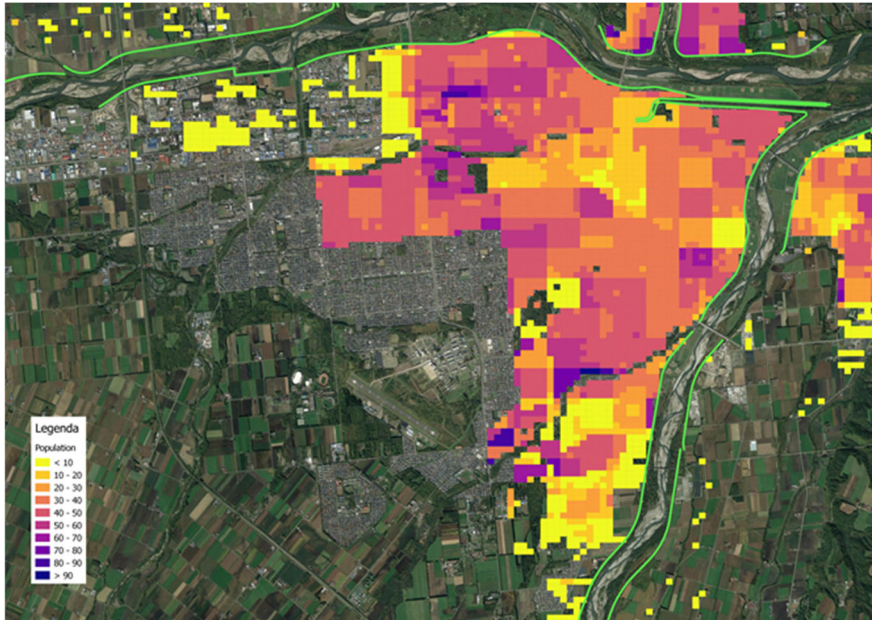
6.3 帯広における死者数算定

6.2節で述べた方法と、これまでに行った選択により、帯広の死者数を算定することができる。以下、死者数の算定について説明する。

6.3.1 人口

対象地域の総人口は約 28,800 人である。これらが、危険にさらされる住民ということになる。下図に、この地域の人口分布を示す。

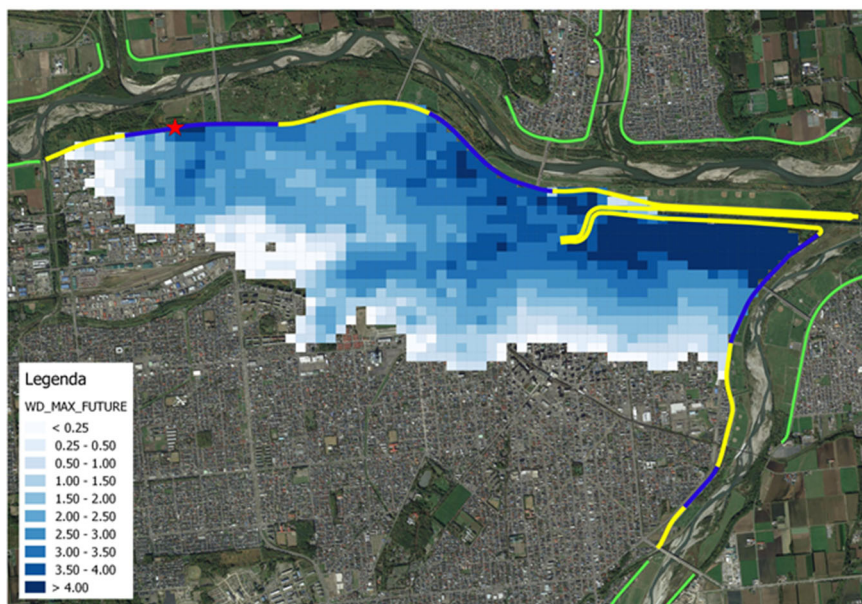
図 20 人口の空間分布 20



6.3.2 死亡率

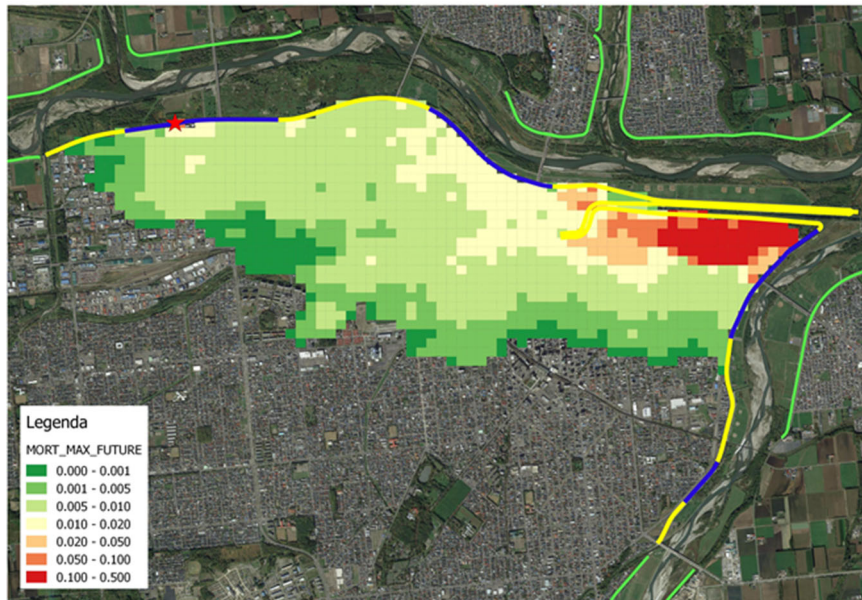
死亡率を求めるには、水深、上昇率、流速を 6.2.4 節の死亡率関数を用いて算定する。死亡率は、すべての決壊地点とすべての浸水パターンについて計算する。ここでは、ある地点を例に、死亡率の求め方を説明する。下図は、最大シナリオの決壊地点 KP61.4 の水深を示したものである。

図 21 最大シナリオにより KP61.4 が決壊した場合の水深 21



この最大水深と氾濫シナリオの最大水位上昇率を組み合わせ、死亡率を計算する。図 22 は各メッシュコードの死亡率を表し、死亡率は 0.1%未満から深部では 10%以上とばらつきがある。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 22 最大シナリオにより KP61.4 が決壊した場合の死亡率 22



6.3.3 死者数

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て算出する。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しうる。下の表に、異なる氾濫シナリオ（最大、最小、最大ボリューム）と 3 つの避難率、避難無し（0%）、総平均避難率（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氾濫の範囲が異なるため、危険にさらされた人口も異なるが、これも表に含まれている。

表 25 全シナリオの死者数一覧 25

破堤箇所		危険に さらさ れた人 口	最大			危険に さらさ れた人 口	最小			危険に さらさ れた人 口	最大ボリューム		
			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

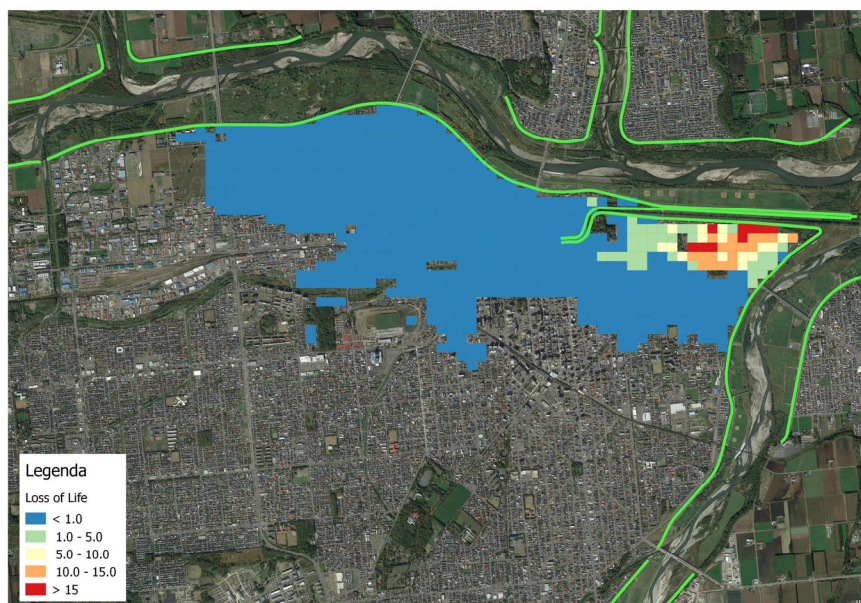
将来	札内_KP4_2	11289	40	30	8	3906	14	11	3	7619	36	27	7
	札内_KP5_2	13861	58	43	12	6638	17	13	3	13575	57	42	11
	札内_KP6_4	20556	100	74	20	8946	6	5	1	16335	53	39	11
	札内_KP7_0	20179	67	50	13	10539	3	2	1	18326	51	38	10
	十勝_KP56_4	35769	365	272	73	5366	22	17	4	21006	165	123	33
	十勝_KP58_0	36646	566	422	113	13526	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

死者数解析により、十勝川沿いの破堤が最大の死者数を引き起こす原因となることが分かる。これは、十勝川の方が札内川よりも流量が多いため、氾濫の範囲が大きくなり、より多くの人が危険にさらされるためである。

算出された被害と比較すると、死者数は河川を流れる流量のハイドログラフの形状により敏感に反応することが分かる。「最大」シナリオと「最大ボリューム」シナリオの差は比較的小さく、2倍である。しかし、「最小」シナリオとの差は比較的大きく、20倍にまでなることもある。

下図は、KP61.4 最大シナリオで避難を考慮しない場合の、対象地域における死者数の分布を示している。これが、死者数が最も多い地点の情報となる。

図 23 最大シナリオ KP61.4 における死者数の空間分布 23



6.4 死者数の算出における不確実性

死者数の算定においても、多くの不確実性が伴う。本ケーススタディでは、オランダの死者数モデルを使用する。この方法は、1953年にオランダで発生した氾濫に基づいており、概してより大きな氾濫地域に適用可能で、州ごとの違いを「平均化」するものである。その他の方法は、より局地的なプロセスや効果を捉えることを狙いとしており、それにより結果に差異が生じることになる。

また、この方法は氾濫発生時の人々の位置にも敏感である。人口の大部分が避難所にいる場合には、死者数モデルの使用に影響を及ぼす。つまり、避難モデルと死者数モデルの組み合わせと相互作用により、死者数の優れた推定と理解を深めることが可能になるのである。

また、地域ごとの状況も、建物の構造、人口の年齢分布、気象条件など、死者数に大きく影響する。

このような不確実性を踏まえ、潜在的な死者数と氾濫リスクについてより深い見識を得るために、このトピックについてさらなる研究が必要であると言える。

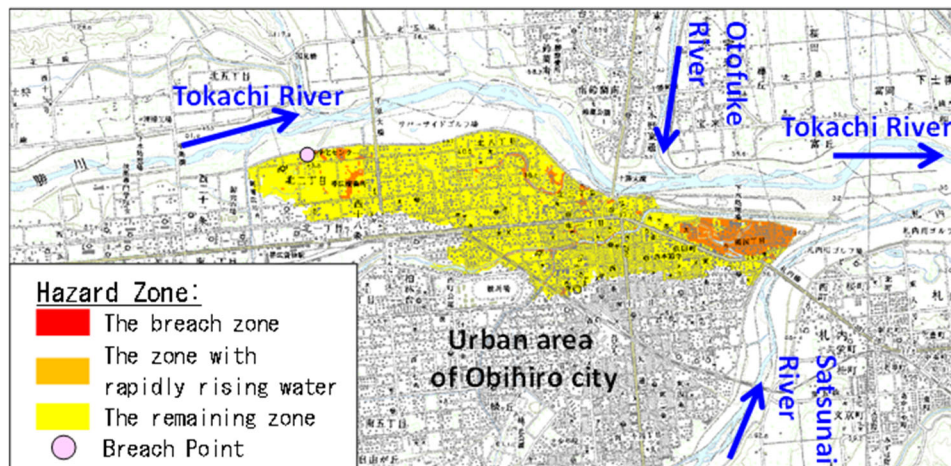
6.5 新たな死者数推定モデルの提案

本プロジェクトでは、両国の技術者・専門家が集い、日本を対象とした死者数推定モデルや推定方法について様々な議論を交わした結果として、堤防決壊時の流速や流体力、貯留による急激な水位上昇を考慮する点から、本プロジェクトでは死亡率関数を適用させる方法を用いた。しかしながら、同モデルを日本に適用するにあたって、日本の特性等に合わせたモデルの校正が必要である。このため、本プロジェクトの成果として、新たな死者数推定モデルを提案する。今後、同モデルによる適用性の検証等が必要である。

6.5.1 着眼点

戸村・舩屋ら[14]の研究によると、図 24 に示すように、気候変動（4 度上昇シミュレーション）を考慮した外力によっても、【破堤箇所付近の領域】に分類される地域が発生しなかった。しかしながら、前述のように日本の近年の水害時の家屋被害状況を見ると、堤防破堤箇所付近では家屋の流失・倒壊が著しい。そのため、浸水域の死者数推定にあたって、【破堤箇所付近の領域】に分類される死者を適切に評価する必要がある。ここでは、【破堤箇所付近の領域】に着目した。

図 24 4 度上昇シミュレーション：死亡率領域マップ [14] 24



【破堤箇所付近の領域】の考え方として、石造り及びレンガ造りの家屋が倒壊した際に、家屋内にいる人が 100% 死亡する（ $FD, B = 1$ ）ことと仮定している。このため、境界条件にはオランダを含むヨーロッパで占める割合の高い石造り及びレンガ造りの家屋の倒壊条件（図 25）15）16）が用いられている。

一方で、日本では木造家屋の占める割合が最も高い現状がある（図 26）[17]。木造住宅は、石造りやレンガ造りの住宅に比べて流体力に弱く、被害が大きくなることが考えられる。大規模地震時の家屋被害想定においては、固定資産台帳データから家屋の構造（木造・非構造）、築年数（旧築年・中築年・新築年）を分類し、各全壊率テーブル、つまりは、被害率関数から家屋の全壊率を推定する手法が用いられている 18)。これらを踏まえると、家屋構造や築年数によって、家屋の脆弱性が異なることが明らかである。特に、大規模地震時の家屋被害想定では、木造及び旧築年は最も脆弱な構造として評価されている。これは、日本で 1995 年の阪神淡路大震災や 2011 年の東日本大震災などの極めて甚大かつ広域で地震による被害が発生しており、被害事例が多数報告されていることから、実績に基づいて家屋の脆弱性を評価できるようになった経緯がある。しかしながら、水害による家屋被害は近年増加傾向にあるものの、大地震による家屋被害のようなオーダーには遠く及ばない。このため、本プロジェクトでは、【破堤箇所付近の領域】の境界条件に着目し、既往研究のレビューによって、木造家屋の倒壊条件を設定することとした。

図 25 石造り及びレンガ造り家屋の倒壊条件 15)25

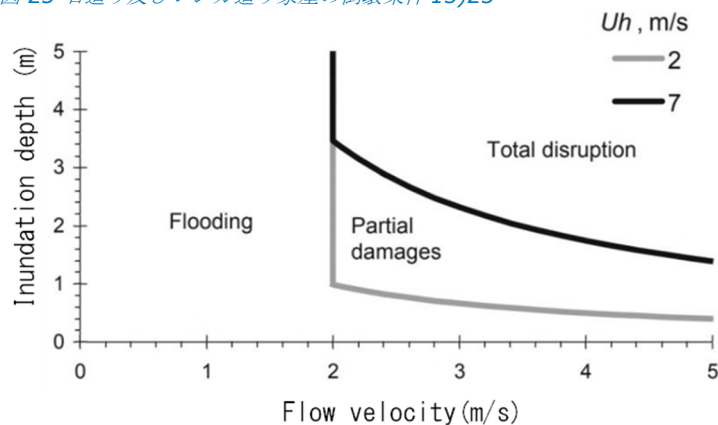
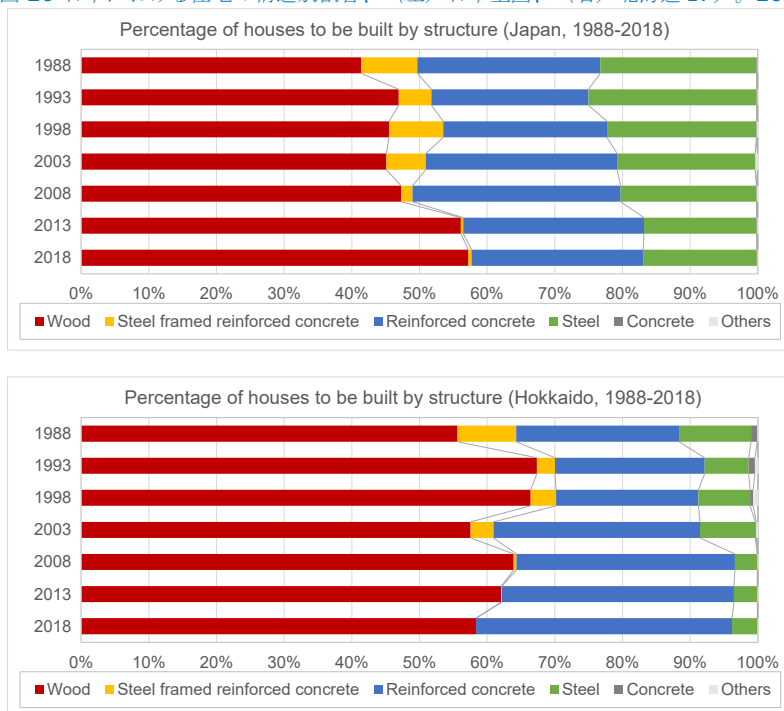


図 26 日本における住宅の構造別割合、（左）日本全国、（右）北海道 17)。26



この研究の根底にあるもの 18 世紀末に出版された童話『三匹の子豚』 [19] をご存じだろうか？ あらすじは次の通りである。ある日、三匹の豚はそれぞれの家を建てることにした。1 匹目の子豚は藁の家を建てた。2 匹目の子豚は、棒（木）で家を建てた。そして、3 匹目の子豚はレンガで家を建てた。そこへ飢えたオオカミがやってきて、家を次々と吹き飛ばしていくが、3 匹目の子豚が作ったレンガの家は倒れなかった。やがて狼は煙突からレンガの家に入り込み、怪我を負う。本プロジェクトで新たな死者数推定モデルを提案するにあたり、私たちはこの物語から大事なインスピレーションを得た。狼が家を吹き飛ばす力は、流速や流体力（水平力）などに置き換えることができる。3 匹目の子豚が作ったレンガの家だけは、ほぼ同じ水平力でも壊れなかった。オランダを含むヨーロッパの家屋は 3 番目の子豚の家、日本の住宅は 2 番目の子豚の家として見なすことができる。日本の氾濫による死者数を推定するためには、2 匹目の子豚の家が壊れるかどうかを評価する必要があると考えた。これが今回の研究の根底にある考えである。

6.5.2 倒壊条件の比較

日本における【破堤箇所付近の領域】の適切な境界条件の設定にあたって、日本の家屋の倒壊条件に係る研究成果や文献等を収集した。既往水害における家屋被害状況に基づく家屋の倒壊条件を表 33 に整理した。日本では、多くの研究で氾濫流の流体力（ v^2d , v は流速、 d は浸水深）を指標として、家屋の流失及び倒壊を評価している。一方、オランダではモーメントに関係する流速水深積（ vd ）と家屋の倒壊に寄与する水平方向の力である流速 v から流体力（ v^2d ）を指標としており、同様の指標に着目していることがわかる。

また、日本においては、津波による家屋被害状況が多数報告されているものの、津波の場合には寄せ波と引き波の二回にわたって大きな流体力が加わる。このため、河川氾濫による家屋被害状況とは現象が異なる恐れがあることから、表 33 に含めていない。

表 26 木造住宅の倒壊条件（ d : 水深（m）、 v : 流速（m/s） 26

整理番号	対象とした家屋構造	倒壊条件	出典
1	2 階建て木造（滑動）	$0 \leq d < 2.6$ のとき $v = \sqrt{(35.76/d)}v = \sqrt{\frac{35.76}{d}}$ $2.6 \leq d < 3.2$ のとき $v = \sqrt{\frac{122.95 - 33.53d}{d}}$ $3.2 \leq d$ のとき $v = \sqrt{\frac{15.65}{d}}$	国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室ほか、氾濫浸水想定区域図作成マニュアル，2017. 20)2
	2 階建て木造（1981 年-新耐震基準）	$1.65 < d$ のとき $v = \sqrt{\frac{5.83}{(d-1.650)}}$	国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室ほか、氾濫浸水想定区域図作成マニュアル，2017. 20)
3	2 階建て木造（1950 年-旧耐震基準）	$1.65 < d$ のとき $v = \sqrt{\frac{1.56}{(d-1.650)}}$	国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室ほか、氾濫浸水想定区域図作成マニュアル，2017. 20)
4	平屋木造	大破： $v^2d = 10$ 流失： $v^2d = 20$	八木隆聖・呉修一，常願寺川および神通川における氾濫氾濫解析とリスクランク評価による垂直・水平避難ゾーンの提案，2020 年. 8)
5	不明	被害生じる $v^2d = 1.5$ 居住不可能家屋出現 $v^2d = 2.5$	河田恵昭・中川一，三隅川の氾濫災害-氾濫氾濫と家屋の被害-，1984. 22)
6	木造	建物被災可能性（ニュージーランドの建物調査結果に基づく） $vd = 1$	佐藤智ら，氾濫氾濫の数値計算及び家屋被害について- 8610 号台風による吉田川の場合-，1989. 23)

		$vd = 1$	
7	不明	家屋流失及び大規模損壊が生じる $2 < v$ かつ $2 < d$	田畑幸輔ら, 平成 27 年 9 月鬼怒川流域における氾濫流・氾濫流の一体解析に基づく水害リスク軽減策に関する研究, 2018. 24)

表 33 の倒壊条件を図 27 で比較した。まず、オランダの石造り及びレンガ造りの家屋（全壊）と日本の木造家屋（新耐震基準対応住宅、倒壊）20）は、近似していることがわかる。これは、現在の日本の耐震基準に対応した家屋がオランダの石造り及びレンガ造りの家屋と同程度の終局せん断耐力（流体力と終局せん断耐力が等しくなった場合に倒壊する）を有していることがわかる。

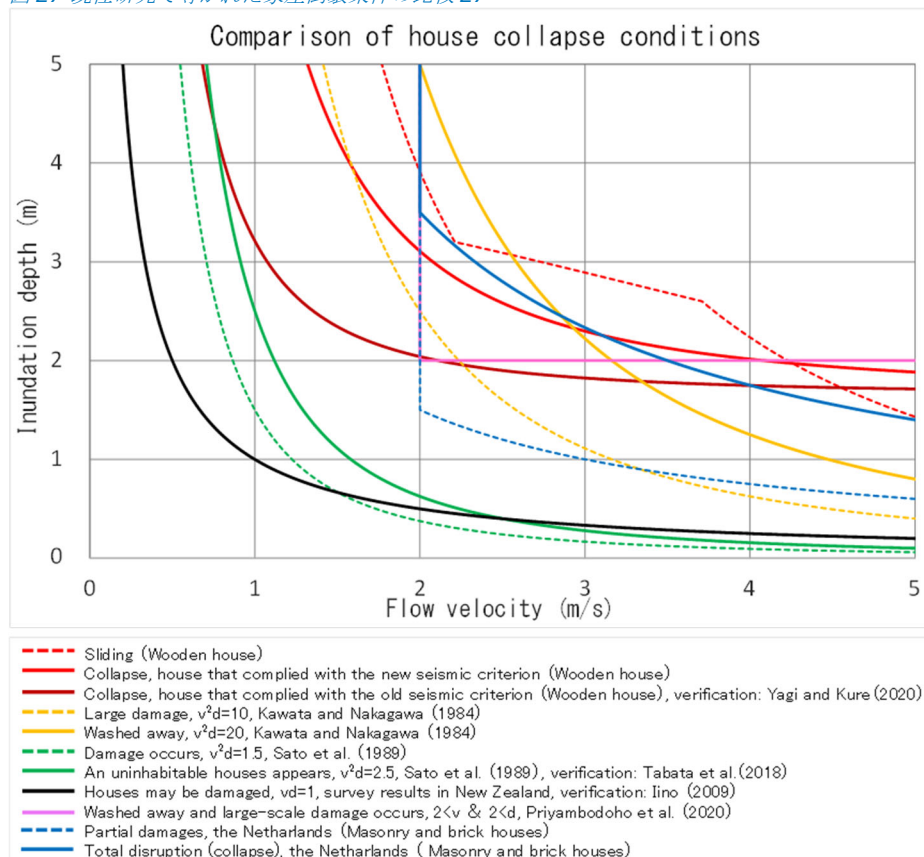
しかし、この日本の木造家屋は、経年劣化（築年数）等を考慮していないため、新築あるいはそれに近い家屋を想定していることが考えられる。新興住宅地等を対象として死者数を推定する場合には適する可能性があるが、古い家屋が多数立地する地域では、被害を過小評価する恐れがある。その他、近年の水害で検証がなされている倒壊条件に着目すると、日本の旧耐震基準に対応した家屋の倒壊条件 20）は、八木・呉 21）によって 2019 年台風 19 号豪雨時における千曲川堤防決壊時の被災家屋を対象として検証がなされている。しかしながら、前述の新耐震基準対応住宅と同様に、経年劣化等を考慮していないため、被害を過小評価する恐れがある。

また、佐藤ら 23）が研究した居住不可能家屋出現ラインについては、田端ら 24）によって 2015 年 9 月関東東北豪雨における鬼怒川堤防決壊時の被災家屋を対象として検証がなされている。佐藤らの「居住不可能家屋出現」を、田端らは「家屋流失の危険性」と表現しており、日本の家屋流失及び倒壊の条件として設定できる可能性がある。さらに、ニュージーランドの建物調査結果 25）に基づいて設定された建物被災可能性ラインについては、飯野 26）によって日本の 4 河川（木造家屋、築年数 20 年以上）を対象に適用性が検証されている。ニュージーランドの実績によって導かれた「建物被災可能性」ラインは、家屋の損傷状況は不明確であり、図 27 から判断できるように家屋倒壊を過大に評価する恐れがある。

日本の耐震基準：

日本では、地震発生時に一定の外力に耐えるよう、家屋の耐震基準が定められている。建築基準法により、過去において大地震発生する度に被災家屋を検証し、耐震基準を改正してきた。1950 年に建築基準法が制定され、1971 年、1981 年、2000 年に耐震基準が改正された。現在の耐震基準は主に 1981 年に改訂されたもので、一般に「新耐震基準」と呼ばれる。一方、1981 年以前のもは「旧耐震基準」と呼ばれる。

図27 既往研究で導かれた家屋倒壊条件の比較27



6.5.3 今後に向けての提案

既往研究に基づき倒壊条件を比較したところ、表 27 に示す結果が得られた。「家屋の流失」及び「倒壊」を表現している点や近年の水害によって検証がなされている点などを踏まえ、佐藤らの「居住不可能家屋」出現ライン $v^2d = 2.5$ が現状で最もふさわしい条件ではないかと考えられる。

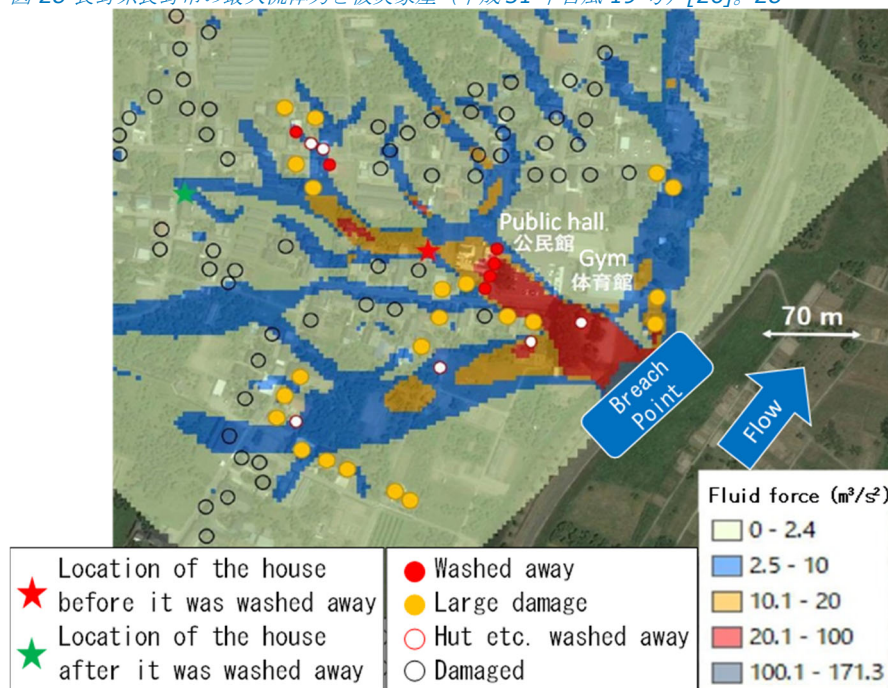
表 27 日本家屋の倒壊条件と検討内容27

整理番号	対象とした家屋構造	倒壊条件	経年劣化の評価	対象現象	近年の氾濫による検証	備考
1	2階建て木造（滑動）	$0 \leq d < 2.6$ のとき $v = \sqrt{\frac{35.76}{d}}$ $2.6 \leq d < 3.2$ のとき $v = \sqrt{\frac{122.95 - 33.53h}{d}}$ $3.2 \leq d$ のとき $v = \sqrt{\frac{15.65}{d}}$	新築のみ	滑動	×	
2	2階建て木造（1981年-新耐震基準）	$1.65 < d$ のとき $v = \sqrt{\frac{5.83}{(d-1.650)}}$	新築のみ	倒壊	×	
3	木造2階建ての家（1950年以降の旧耐震基準）	$1.65 < d$ のとき $v = \sqrt{\frac{1.56}{(d-1.650)}}$	新築のみ	倒壊	○	
4	平屋木造	大破： $v^2d = 10$ 流失： $v^2d = 20$	一部（新築以外も含む）	流失	×	

5	最もふさわしい 不明	被害生じる $v^2d = 1.5$ 居住不可能家屋出現 $v^2d = 2.5$	一部（新築以外も含む）	流失	○	
6	木造	建物被災可能性（ニュージーランドの建物調査結果に基づく） $vd = 1$	一部（新築以外も含む）	被害	○	対象となる現象（家屋の被害想定）が不明確である。
7	不明	家屋流失及び大規模損壊が生じる $2 < v$ かつ $2 < d$	一部（新築以外も含む）	流失および大規模な被害	○	平成 27 年台風 19 号の結果から導かれた倒壊条件

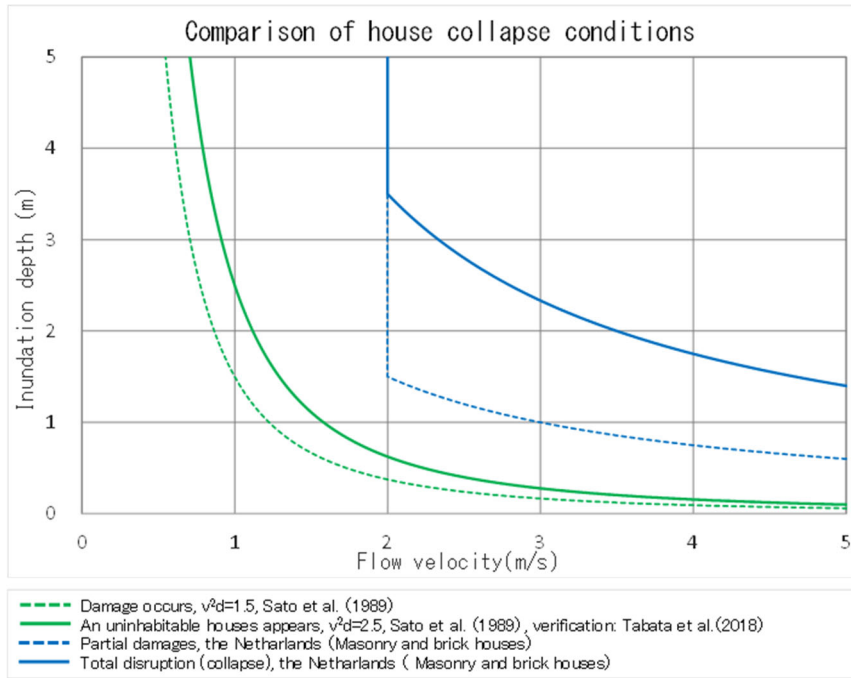
なお、平成 27 年 9 月関東東北豪雨における鬼怒川堤防決壊時の被災家屋によって、佐藤らの倒壊条件（居住不可能家屋が現れる： $v^2d=2.5$ ）が既に検証されているが、詳細なものとなっている。平成 31 年台風 19 号豪雨時の千曲川の堤防決壊による流体力（氾濫シミュレーションに基づく）および被害状況[26]の報告結果と比較したものである。図 7.7 に示すように、流体力 v^2d が 2.5 以上の青い範囲と赤いプロットに示す家が流失した位置はほぼ同じであることがわかる。このことから、佐藤らの倒壊条件（住めない家が現れる： $v^2h=2.5$ ）は、近年 2 回の氾濫により概ね適切であると考えられる。

図 28 長野県長野市の最大流体力と被災家屋（平成 31 年台風 19 号）[26]。28



佐藤らによる倒壊条件を日本の代表的な倒壊条件と仮定し、オランダの石造り・レンガ造り住宅の倒壊条件と比較すると、構造に起因して大きな差異があることがわかる。今後、さらなる研究・検証が必要である。

図 29 日本とオランダの家屋の倒壊条件の比較 29



本プロジェクトの成果により、以下の新たな死者数推定モデルを、今後の検討課題として提案する。

【破堤箇所付近の領域】

$$v^2 \cdot d \geq 2.5 \text{ m}^3/\text{s}^2$$

$$F_{D,B}=1$$

【水位が急激に上昇する領域】

$$v^2 \cdot d < 2.5 \text{ m}^3/\text{s}^2 \text{ and } (d \geq 2.1 \text{ m} \text{ かつ } w \geq 4 \text{ m/hr})$$

$$F_{D,Rise}(d) = \Phi_N \left(\frac{\ln(d) - \mu N}{\sigma N} \right) \quad \mu N = 1.46, \sigma N = 0.28 \quad \left(\frac{(\quad)}{(\quad)} \right)$$

【遷移領域】

$$v^2 \cdot d < 2.5 \text{ m}^3/\text{s}^2 \text{ and } (d \geq 2.1 \text{ m} \text{ and } 0.5 \text{ m/hr} \leq w < 4 \text{ m/hr})$$

$$F_D = F_{D,Remain} + (w - 0.5) \frac{F_{D,Rise} - F_{D,Remain}}{3.5}$$

【その他の領域】

$$(w < 0.5 \text{ m/hr} \text{ または } (w \geq 0.5 \text{ m/hr} \text{ かつ } d < 2.1 \text{ m}), \text{ かつ } (v^2 \cdot d < 2.5 \text{ m}^3/\text{s}^2))$$

$$F_{D,Remain}(d) = \Phi_N \left(\frac{\ln(d) - \mu N}{\sigma N} \right) \quad \mu N = 7.60, \sigma N = 2.75 \quad \left(\frac{(\quad)}{(\quad)} \right)$$

ここで、 d :浸水深(m)、 v :流速(m/s)、 w :水位上昇率(m/h)、 F :死亡率、 Φ :標準正規分布の累積確率密度関数、 μ : h の平均値、 σ : h の標準偏差を表します。

6.5.4 今後の活動

今後の活動として、以下の研究が必要である。再現性の検証にあたっては、平成 30 年 7 月豪雨（岡山県倉敷市真備町）、平成 31 年台風 19 号（長野県長野市）、令和元年 7 月豪雨（熊本県球磨村）等の被害事例や大規模な実物模型実験等の研究成果等を踏まえ、日本への適用性を把握する必要がある。

【破堤箇所付近の領域】

- 近年における複数水害における再現性の検証。日本への適用性の検証。
- 既往研究に基づいて力学的な視点からの家屋倒壊機構の解明。
- 倒壊家屋と築年数の関係性の把握。家屋倒壊条件への築年数の考慮。
- 近年の被害家屋に基づく家屋被害関数の導入。
- 既往水害に基づく死亡率関数の構築。

【水位が急激に上昇する領域】 【その他の領域】

- 各領域での死者発生メカニズムの把握と整理。
- 日本の水害実績に基づく各領域の境界条件及び死亡率関数の構築。
- 実績及び氾濫シミュレーションによって得られる水位上昇速度の考慮。
- 被災者年齢の考慮。
- 両国の家屋や人の身長の高さの違いを考慮。

築年数の考え方

築年数の考え方としては、本プロジェクトで比較した旧耐震基準対応住宅（木造）と佐藤らの倒壊条件が参考となるだろう。佐藤らが設定した倒壊条件の対象が木造家屋と仮定した場合には、両条件ともに木造家屋となる。佐藤らの研究は、昭和61年8月の氾濫時の吉田川流域を対象としている。最大流体力及び経過年数の関係性を見ると、概ね築10年以上経過した家屋が多い（図30）ことから、旧耐震基準（1950年）に対応した家屋か、耐震基準設定前に作られた家屋である可能性が高い。旧耐震基準に対応していることを前提とした場合には、新築である旧耐震基準対応住宅の倒壊条件と経過年数がある程度経った佐藤らの倒壊条件を比較することができる。その差分（図31）が経過年数による耐力の変化であると想定できる。

図30 最大流体力と経過年数の関係（参考文献22）に加筆）30

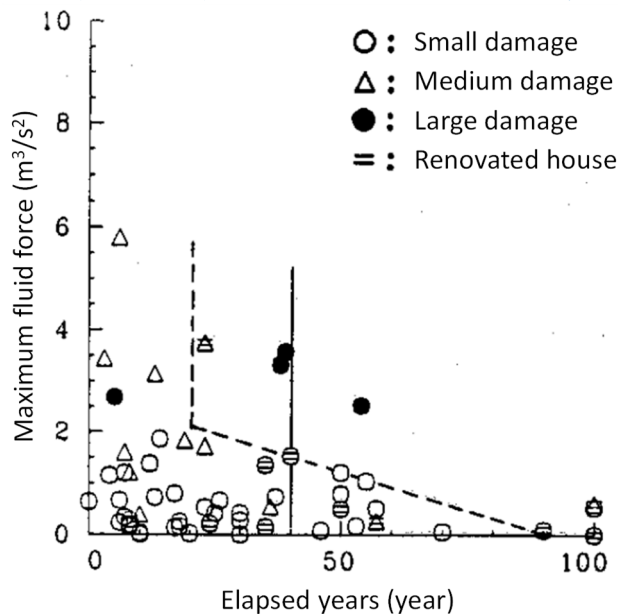
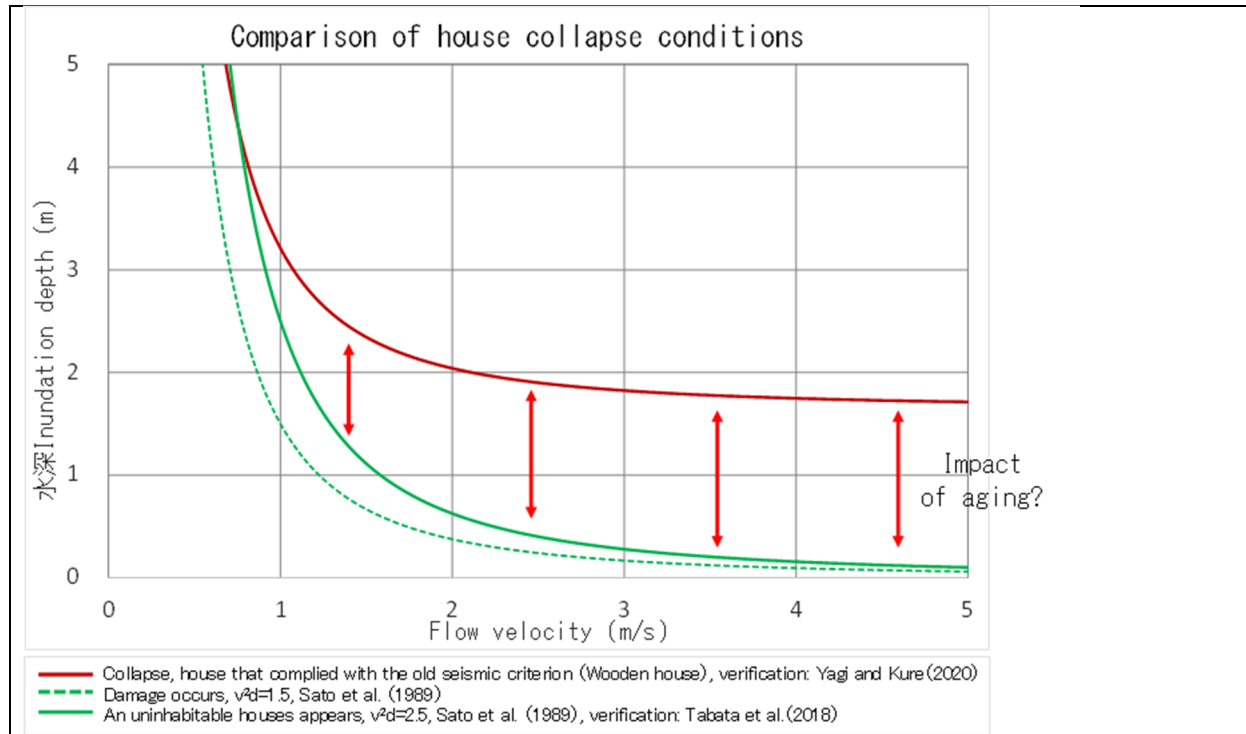


図 31 旧耐震基準に対応した木造住宅の比較 31



6.6 参考文献

- [1] 北海道開発局帯広開発建設部、平成 28 年 8 月発生氾濫記録。(日本語のみ)
- [2] Interagency Performance Evaluation Task Force: Performance Evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane Protection System - Final Report, Volume VII, pp.108-109, US Army Corps of Engineers, 2007.
- [3] 国土交通省水・災害局、水害指標分析の手引き(平成 25 年度試行版), 2013, https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/pdf/higaisihyou_h25.pdf。(日本語のみ)
- [4] 池内幸司ら、大規模水害時の氾濫形態の分析と死者数の想定, 土木学会論文集.B1 水工学, Vol.67, No.3, pp133-144, 2011.https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/67/3/67_3_133/_article/-char/ja/ (日本語のみ)
- [5] Jonkman, S.N., Loss of life estimation in flood risk assessment: Theory and applications, 2007, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aabc4fb945-55ef-4079-a606-ac4fa8009426>
- [6] Maaskant, B., et al., Analyse slachtofferaantallen VNK-2 en voorstellen voor aanpassingen van slachtofferfuncties, 2007.
- [7] Rijkswaterstaat VNK Project Office, The National Flood Risk Analysis for the Netherlands - FINAL REPORT, 2016, <https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/131663/vnk-rapport-eng-lr.pdf>.
- [8] 八木隆聖・呉修一、常願寺川および神通川における氾濫氾濫解析とリスクランク評価による垂直・水平避難ゾーンの提案, 土木学会論文集 B1, 水工学, Vol.76, No.2, I_715-I_720, 2020.(日本語のみ)
- [9] 公益社団法人 土木学会水工学委員会水害対策小委員会、西日本豪雨災害調査報告書(中国地区)、pp91、2019、<https://committees.jsce.or.jp/report/system/files/%E8%A5%BF%E6%97%A5%E6%9C%AC%E8%B1%AA%E9%9B%A8%E7%81%BD%E5%AE%B3%E8%AA%BF%E6%9F%BB%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8%EF%BC%88%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%9C%B0%E5%8C%BA%EF%BC%89.pdf>(日本語のみ)
- [10] 二瓶泰雄、特集 平成 30 年 7 月豪雨: 小田川における氾濫氾濫状態, 消防防災の科学, 2019, http://www.isad.or.jp/wp/wp-content/uploads/2019/06/no136_12p.pdf(日本語のみ)

- [11] 篠原麻太郎・二瓶泰雄, 2018 年西日本豪雨における小田川の氾濫氾濫プロセス, 河川技術論文集第 25 巻, 2019.(日本語のみ)
- [12] 佐藤佑太ら, 家屋内浸水時の潜在リスクに関する実験的検討～H30 年西日本豪雨における倉敷市真備町の人的被害要因の解明に向けて～, 土木学会論文集 B1(水工学) Vol.75, 2019.(日本語のみ)
- [13] 塚田文也・池内幸司, 平成 30 年 7 月豪雨災害による倉敷市真備町での死者の発生場所における浸水状況の分析と人的被害推定手法の改善方策の検討, 河川技術論文集, 第 26 巻, 2020.(日本語のみ)
- [14] 戸村翔ら, 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) Vol.75, No.2, I_1357-I_1362, 2019.
- [15] Clausen, L.K., Potential Dam Failure: Estimation of Consequences, and Implications for Planning.Unpublished M.Phil. thesis at the School of Geography and Planning at Middlesex Polytechnic collaborating with Binnie and Partners, Redhill, 1989.
- [16] Karvonen, R.A., et al., The use of physical models in dambreak analysis, RESCDAM Final Report, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland, 2000.
- [17] 国土交通省, 建築着工統計調査報告, 【住宅】利用関係別 構造別 建て方別 都道府県別 戸数, 2020, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/jouhouka/sosei_jouhouka_tk4_000002.html .(日本語のみ)
- [18] 内閣府, 首都直下地震に係る被害想定手法について, <http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/pdf/shiryou3.pdf> .(日本語のみ)
- [19] The Three Little Pigs, <https://americanliterature.com/childrens-stories/the-three-little-pigs>
- [20] 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 河川研究室 水害研究室, 氾濫浸水想定区域図作成マニュアル (第 4 版), pp24-25, viii, 2017, http://www.mlit.go.jp/river/bousai/main/saigai/tisiki/syozaiti/pdf/manual_kouzuishinsui_171006.pdf (日本語のみ)
- [21] 河田恵昭・中川一, 三隅川の氾濫災害-氾濫氾濫と家屋の被害-, 京都防災研究所年報 第 27 号 B-2(昭 59.4), 1984, <http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/nenpo/no27/27b2/a27b2p12.pdf> .(日本語のみ)
- [22] 佐藤智ら, 氾濫氾濫の数値計算及び家屋被害について-8610 号台風による吉田川の場合-, 第 33 回水理講演会論文集, 1989, <https://web.pref.hyogo.lg.jp/hnk09/documents/000137945.pdf> .(日本語のみ)
- [23] 田畑幸輔ら, 平成 27 年 9 月鬼怒川流域における氾濫流・氾濫流の一体解析に基づく水害リスク軽減策に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学) No.74, No.4, I_1399-I_1404, 2018.(日本語のみ)
- [24] (財)河川情報センター, ハザードマップ作成要領, 2002.(日本語のみ)
- [25] 飯野光則, 死者及び家屋倒壊・流失と氾濫水理現象の関連性分析, 土木技術資料 51-10, 2009, http://www.pwrc.or.jp/thesis_shouroku/thesis_pdf/0910-P014-017_iino.pdf .(日本語のみ)
- [26] Bambang PRIYAMBODOHO ら, 2019 年長野県千曲川氾濫災害における家屋被害状況と氾濫流況の関係, 土木学会論文集 B1(水工学) No.76, No.2, I_619-I_624, 2020.(日本語のみ)

7 氾濫発生確率

WP2 で求めた氾濫発生確率を、氾濫リスク算定に使用する。これらの氾濫発生確率には、堤防セクションの依存関係が組み込まれており、それを「シナリオ氾濫発生確率」と呼ぶ。下表に、セクションとシナリオの氾濫発生確率の違いを示す。後者は、上流で起こりうる氾濫について補正しており、氾濫リスク評価に用いる。次の節では、これらの氾濫発生確率をどのように算出し、どのように依存関係を考慮するかについて概要を説明する。

表 28 将来気候における平均流量統計のセクションとシナリオの氾濫発生確率。最上流部は上流氾濫の影響を受けることが無く同じ破堤確率となるため、その欄を色付けしハイライトした。28

破堤箇所	セクション氾濫発生確率	シナリオ氾濫発生確率(将来)
札内_KP4_2	1/16358	1/29708500
札内_KP5_2	1/3063	1/363030
札内_KP6_4	1/703	1/1530
札内_KP7_0	1/1130	1/1130
十勝_KP56_4	1/13	1/60
十勝_KP58_0	1/73	1/3900
十勝_KP59_6	1/65	1/480
十勝_KP61_4	1/105	1/174820
十勝_KP62_4	1/180	1/180

7.1 セクション破堤確率を求めるためのステップの概要

氾濫発生確率の算出方法については、WP2 報告書で詳しく述べてある。この節では、氾濫リスク計算に用いる氾濫発生確率の考え方を説明するため、各ステップの概要を簡単に説明する。

- WP1 では、札内川と十勝川の流量の超過確率を求めた。この情報を水位-流量曲線と組み合わせ、検討するすべての破堤箇所の水位超過確率を求める。
- フラジリティカーブは、水位とその水位を条件とする破堤確率の関係を示すものである。つまり、堤防の強さを表す指標となる。WP2 では、これらの曲線を、破堤メカニズムの越水について計算した。本研究で考慮したこと：
 - 破堤確率に影響する越水の継続時間。
 - 護岸の状態、護岸の高さ、水位などの不確実性。モンテカルロ法では、これらの不確実性をフラジリティカーブに反映させる。

これらのフラジリティカーブと水位超過確率を組み合わせることで、堤体セグメントごとの破堤確率を得る。これらを算出することは、WP2 の主な目的である。

- 破堤すると、多くの堤防セグメントにおいて同様の氾濫が発生する。これらの類似した結果を持つセグメントを、堤防セクションにまとめ、それに対して破堤確率を決定する。あるセクションに属する異なる堤防セグメントは依存関係にあると仮定し、最も高い破堤確率を持つセグメントをその堤防セクションの代表とする。
- 本研究では、十勝川沿いの 5 つの堤防と札内川沿いの 4 つの堤防、計 9 つの堤防について検討した。上流のセクションが決壊すると、川からその地域に水が流れ込み、下流の水位が下がる。水位低下の規模は、その事象において下流部の破堤が発生しなくなる程度であると想定する。この上流セクションの破堤確率の依存性を考慮するのが、セクション破堤確率からシナリオ破堤確率へ導く最後のステップとなる。次節において、この点に関してさらに詳しく述べる。

7.2 セクション確率からシナリオ確率へ

前節において、堤体セクションごとの破堤確率の算出方法を簡単に説明した。しかし、下流セクションの破堤確率は、上流部の決壊が下流部の破堤を防ぐため、破堤確率そのものよりも低くなっている。この補正された破堤確率をシナリオ破堤確率、または $P_{f,scenario}$ この確率を用いるのは、氾濫がもたらす結果の過大評価を防ぐためである。

この破堤確率を計算するため、氾濫特性の依存関係についていくつかの仮定を設ける。本研究で仮定したこと：

- 河川支流（札内、十勝）ごとの流量は依存関係にある。つまり、ある事象において、河川支流に沿ったすべての堤防で同じピーク流量が発生する。なお、十勝川には帯広周辺でいくつか合流点がある。これらの支流の流量も主要な流れに依存すると仮定する。例えば、100 年に一度の流量は、合流地点の下流では 100 年に一度の流量のままとする（流量が増えることになる）。
- 7.1 節で説明したように、セグメントの破堤確率は依存関係にある。7.1
- セクション破堤確率は（流量を条件に）独立していると考え、セクションの順序を考慮する。上流セクションの堤防が決壊すると水位が下がり、その事象においては下流部の堤防は決壊しないと想定する。

$P_{f,section|qqnn}$ をセクション破堤確率とし、流量を条件とする。ある事象におけるセクション n のシナリオ破堤確率を、上流から流の順に $(1, 2, 3, \dots, n)$ 算出する。

$$\begin{aligned} P_{f,scenario,1}|q &= P_{f,section,1}|q \\ P_{f,scenario,2}|q &= P_{f,section,2}|q \cdot [1 - (P_{f,scenario,1}|q)] \\ P_{f,scenario,3}|q &= P_{f,section,3}|q \cdot [1 - (P_{f,scenario,1}|q + P_{f,scenario,2}|q)] \\ P_{f,scenario,n}|q &= P_{f,section,n}|q \cdot [1 - \sum_{i=1}^{n-1} (P_{f,scenario,i}|q)] \end{aligned}$$

$P_{f,scenario,n}|q$ はシナリオの破堤確率であり、上流の潜在的な決壊を補正したものである。この数値に、氾濫シナリオの影響を乗じ、氾濫リスクの算出に用いる。

最も上流のセクションでは、それより上流の氾濫は考慮しないため、シナリオと独立した破堤確率は等しくなる。2 番目のセクションについては、上流セクションが破堤しない場合にのみ破堤確率を算出するため、破堤確率が減少する。そして 3 番目のセクションは、上流の両セクションにより氾濫リスクが低減する等、考慮していく。

7.3 シナリオ確率

氾濫発生確率の基本シナリオにより、気候変動を踏まえた「将来」の状況における流量の平均超過確率を算出する。これらの確率を表 29 に示す。

表 29 シナリオ氾濫発生確率、将来平均値 29

破堤箇所	シナリオ氾濫発生確率 (将来平均)
札内_KP4_2	1/29708500
札内_KP5_2	1/363030
札内_KP6_4	1/1530
札内_KP7_0	1/1130
十勝_KP56_4	1/60
十勝_KP58_0	1/3900
十勝_KP59_6	1/480
十勝_KP61_4	1/174820
十勝_KP62_4	1/180

気候変動の影響は、「将来」の状況と「過去」の状況を比較することで分析することができる。表 30 に、「過去」の状況での氾濫発生確率を示す。氾濫発生確率は「将来」の状況より小さくなっている。

表 30 シナリオ氾濫発生確率、過去平均 30

破堤箇所	シナリオ氾濫発生確率 (過去平均)
札内_KP4_2	1/1533756680
札内_KP5_2	1/6906020
札内_KP6_4	1/26380
札内_KP7_0	1/39570
十勝_KP56_4	1/90
十勝_KP58_0	1/22290
十勝_KP59_6	1/1870
十勝_KP61_4	1/1007420
十勝_KP62_4	1/7100

氾濫発生確率に影響を与えるもう一つの側面は、流量超過確率の不確実性である。基本解析では平均超過確率を使用するが、超過確率の 95%上限値を用いると氾濫発生確率が上昇する。表 31 に、流量の超過確率の 95%上限値の氾濫発生確率を示す。なお、95%上限値は 95%信用区間の上限値であり、実際には確率分布の 97.5 パーセンタイルである。

表 29 の氾濫発生確率と比較すると、高流量の超過確率の増加により、確率が著しく大きくなっている。

表 31 シナリオ氾濫発生確率（将来 95%）。31

破堤箇所	シナリオ氾濫発生確率（将来の 95%）。
札内_KP4_2	1/2863600
札内_KP5_2	1/35000
札内_KP6_4	1/160
札内_KP7_0	1/70
十勝_KP56_4	1/50
十勝_KP58_0	1/1770
十勝_KP59_6	1/290
十勝_KP61_4	1/63760
十勝_KP62_4	1/20

8 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て求める。リスクは、経済的リスクと死者数リスクで表す。本章では、帯広のケーススタディ地域の氾濫リスクを算出し、示す。リスク分析では、「過去」と「将来」のリスクの違いを示し、さらにハイドログラフの形状の違いが結果に及ぼす影響についても述べる。

8.1 経済的リスク

8.1.1 経済的被害の期待値

経済的被害の期待値は、シナリオごとの氾濫発生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。気候変動の影響を求めるため、「過去」と「将来」のシナリオで結果を示す。表 32 では、「過去」シナリオの経済リスクを示している。

経済的リスクは以下の式で算出する。

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

$n = \text{破堤箇所}$

経済的な被害の期待値は約 37 億円/年となる。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となっている。

気候変動を考慮すると、破堤確率と被害額が増加するため、経済的リスクも増加する（表 33）。経済的被害の期待値は 204 億 64 百万円/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。

基本的な解析では、氾濫シナリオに「最大」ハイドログラフを使用する。感度分析のため、異なるハイドログラフの形状を用いて経済的リスクを算出した。「過去」のシナリオでは、影響は比較的小さく、「最大」と「最小」の間で最大 10%となった。これは、「過去」のデータセットに越水や破堤に至るハイドログラフの数が限られているため、経済的な被害の変動が限定的であることによる。これは、4.4 節の被害計算と一致する。

表 32 各破堤箇所の経済リスクと「過去」の状況における総経済リスク 32

破堤箇所	氾濫発生確率(Pf)	被害額 (百万円)	経済的リスク (百万円/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			3,729

「将来」シナリオでは、ハイドログラフの「最大」、「最小」、「最大ボリューム」間の変動が大きいため、「過去」シナリオに比べて経済的リスクへの影響も大きくなる。上記のとおり、下表の経済的リスクは、「最大」ハイドログラフで計算した。「最小」シナリオを「将来」に適用すると、被害額は約 6400 万円/年に減少し、3 分の 1 となる。

表 33 各破堤箇所の経済リスクと「将来」状況の総経済リスク 33

破堤箇所	氾濫発生確率(Pf)	被害額 (百万円)	経済的リスク (百万円/年)
札内_KP4_2	1/29708500	268983	0.01
札内_KP5_2	1/363030	330438	0.91
札内_KP6_4	1/1530	483160	314.83
札内_KP7_0	1/1130	480609	426.26
十勝_KP56_4	1/60	833980	13346.00
十勝_KP58_0	1/3900	855874	219.20
十勝_KP59_6	1/480	865033	1791.73
十勝_KP61_4	1/174820	917039	5.25
十勝_KP62_4	1/180	798407	4359.83
合計			20,464

上記の経済的リスクは、流量の平均超過確率で計算した。氾濫発生確率の計算に超過確率の上限値（95%）を用いると、氾濫発生確率と氾濫リスクは増加する。表 36 では、その状況における経済的リスクを示す。経済的リスクは 3.5 倍に増加し、経済的リスクの期待値は 716 億 18 百万円/年となった。

表 34 各破堤地点の経済リスクと「将来」の状況および流量の 95% 上限超過確率の総経済リスク 34

破堤箇所	氾濫発生確率(Pf)	被害額 (百万円)	経済的リスク (百万円/年)
札内_KP4_2	1/2863600	268983	0.09
札内_KP5_2	1/35000	330438	9.44
札内_KP6_4	1/160	483160	3029.52
札内_KP7_0	1/70	480609	7082.86
十勝_KP56_4	1/50	833980	15709.33
十勝_KP58_0	1/1770	855874	484.17
十勝_KP59_6	1/290	865033	2993.99
十勝_KP61_4	1/63760	917039	14.38
十勝_KP62_4	1/20	798407	42294.25
合計			71,618

8.1.2 経済的被害の期待値の空間分布

被害の期待値（8.1.1 節）により、地域全体の総リスクを表す。この経済的リスクの期待値を、地域に分布させることもできる。図 32 は、「過去」シナリオの空間分布を示したものである。これにより、経済的リスクの高い位置が分かる。気候変動の影響は、図 33 に示す通りである。経済的リスクの増大が明確に表れている。この増加は、氾濫発生確率が大きくなったことと、氾濫範囲と氾濫特性が大きくなったことが組み合わされたことによる。

図 32 「過去」の経済リスクの空間分布（百万円/年）。32

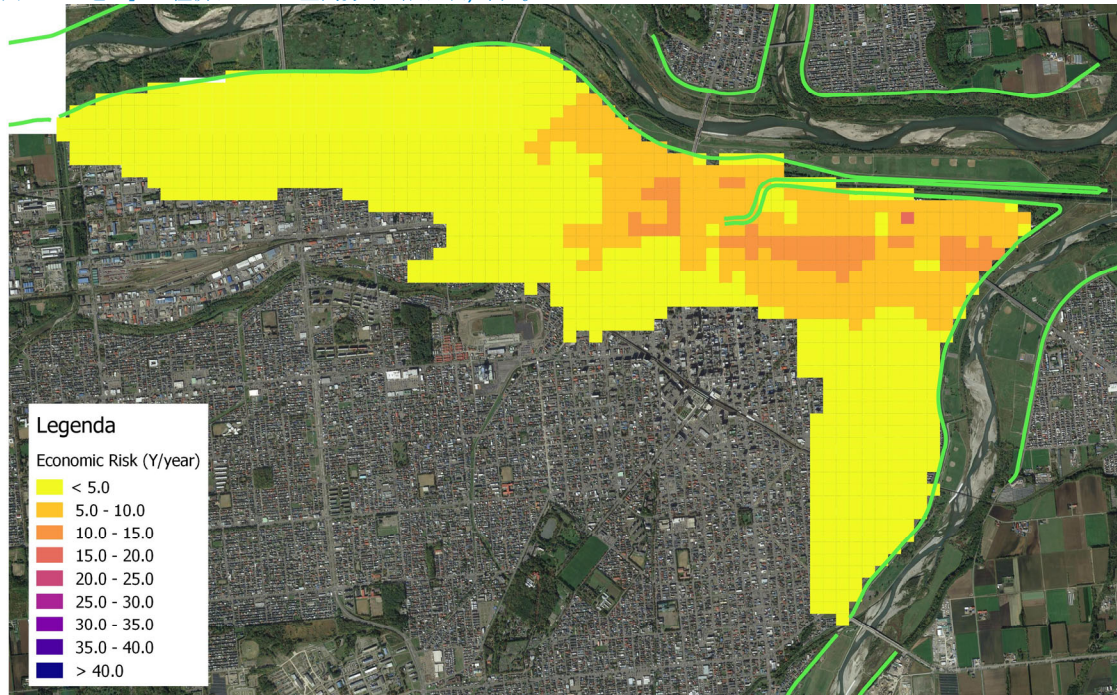


図 33 「将来」の経済リスクの空間分布（百万円/年）。33

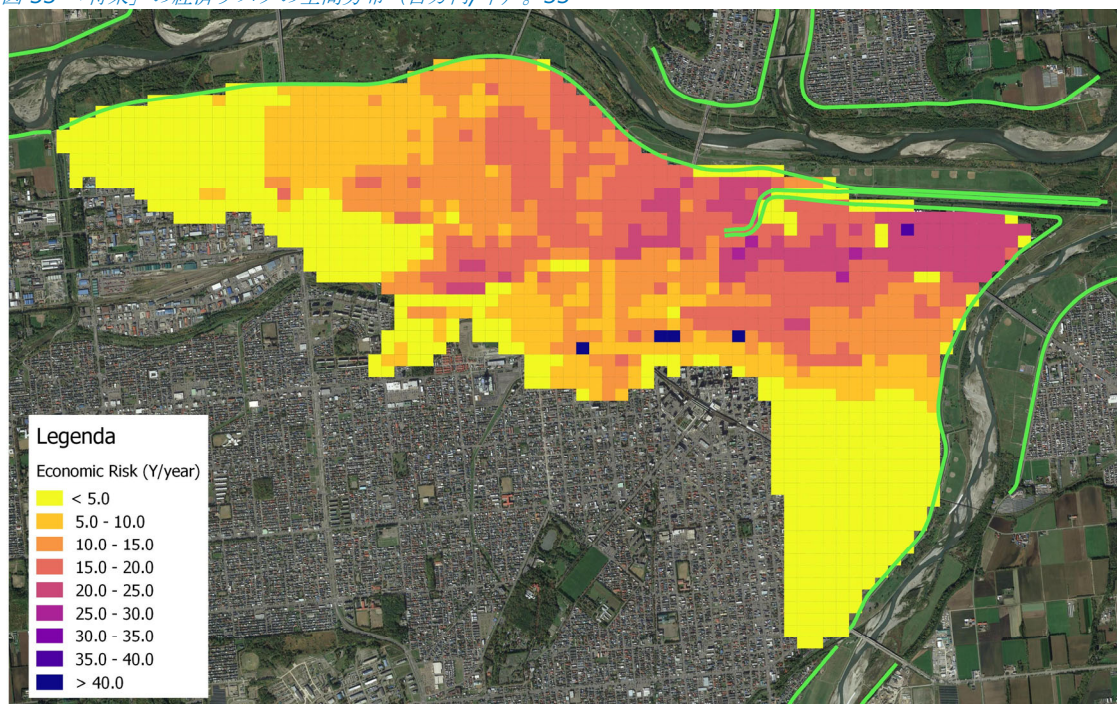


図 33 によれば、経済的リスクは、水深が最も大きい地域で最も高いことがわかる。これは、その地域が最も低い場所であり、すべての浸水シナリオでその地域の水深が最も大きくなっていることから説明できる。また、帯広の中心部では、経済的リスクが高い地域もあり、これは価値の高いインフラが存在することを示していると考えられます。そのような場所の一例を図 34 に示す。

図 34 経済的リスクの高い拠点の一つ 34



8.2 死者数リスク

8.2.1 死者数の期待値

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。死者数に関するすべての分析において、平均的な避難率である 26% を使用した。気候変動の影響を求めるため、「過去」と「将来」のシナリオによる結果を示す。表 35 に、「過去」のシナリオにおける死者数の期待値を示す。期待値は、約 1.63 人/年です。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。

気候変動が考慮されると、破堤確率と死者数が増加し、その結果、死者数リスクも増加する（表 36）。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。

表 35 各破堤箇所に対する死者数期待値と「過去」の状況に対する総期待値 35

破堤箇所	氾濫発生確率(Pf)	死者数	死者数リスク
札内_KP4_2	1/1533756680	13	0.00
札内_KP5_2	1/6906020	17	0.00
札内_KP6_4	1/26380	42	0.00
札内_KP7_0	1/39570	21	0.00
十勝_KP56_4	1/90	139	1.47
十勝_KP58_0	1/22290	121	0.01
十勝_KP59_6	1/1870	253	0.14
十勝_KP61_4	1/1007420	251	0.00
十勝_KP62_4	1/7100	133	0.02
合計			1.63

表 36 各破堤箇所に対する死者数期待値と「将来」状況に対する総期待値 36

破堤箇所	氾濫発生確率(Pf)	死者数	死者数リスク
札内_KP4_2	1/29708500	30	~0
札内_KP5_2	1/363030	43	~0
札内_KP6_4	1/1530	74	0.05
札内_KP7_0	1/1130	50	0.04
十勝_KP56_4	1/60	272	4.35
十勝_KP58_0	1/3900	422	0.11
十勝_KP59_6	1/480	655	1.36
十勝_KP61_4	1/174820	622	0.00
十勝_KP62_4	1/180	308	1.68
合計			7.60

上記の死者数リスクは、流量の平均超過確率を用いて計算した。氾濫発生確率の計算に超過確率の上限値（95%）を用いると、氾濫発生確率と氾濫リスクは増加する。表 37 では、その状況における死者数リスクを示している。リスクは 3.5 倍に増加し、経済的リスクの期待値は 25.16 人/年となる。

表 37 各破堤箇所に対する死者数の期待値と「将来」の状況および流量の 95% 上限超過確率に対する死者数の総期待値 37

破堤箇所	氾濫発生確率(Pf)	死者数	死者数リスク
札内_KP4_2	1/2863600	30	0.00
札内_KP5_2	1/35000	43	0.00
札内_KP6_4	1/160	74	0.46
札内_KP7_0	1/70	50	0.74
十勝_KP56_4	1/50	272	5.12
十勝_KP58_0	1/1770	422	0.24
十勝_KP59_6	1/290	655	2.27
十勝_KP61_4	1/63760	622	0.01
十勝_KP62_4	1/20	308	16.32
合計			25.16

8.2.2 個人リスク

個人リスクにより、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。個人リスクは、シナリオ氾濫発生確率、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。

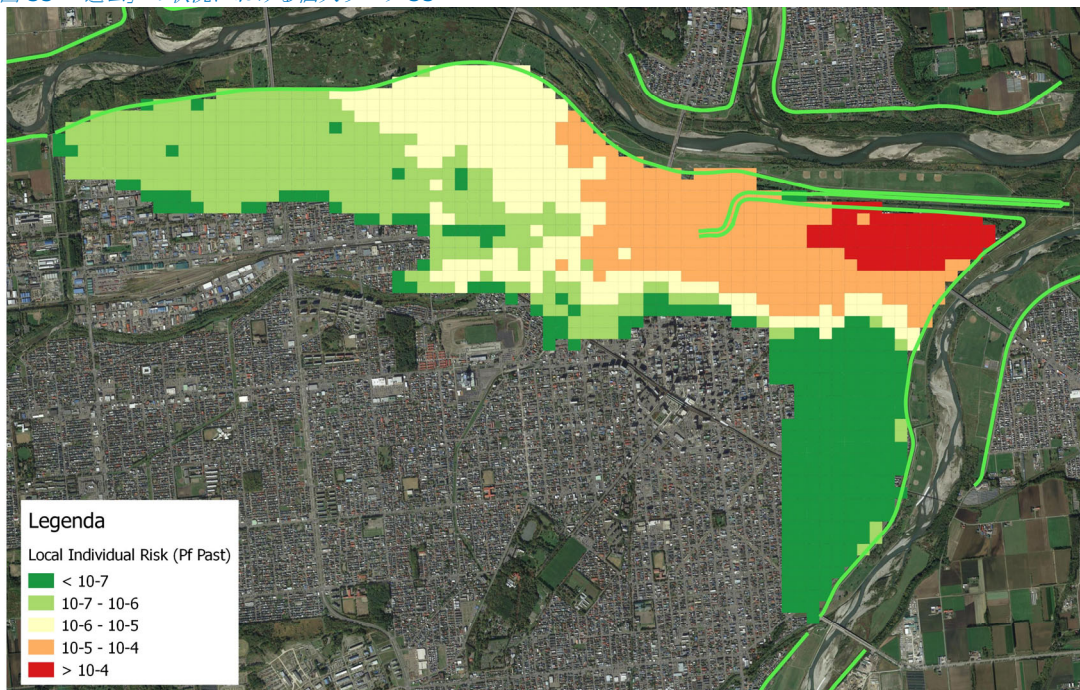
個人リスクは、以下の式で算出する。

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

$n = \text{破堤箇所}$

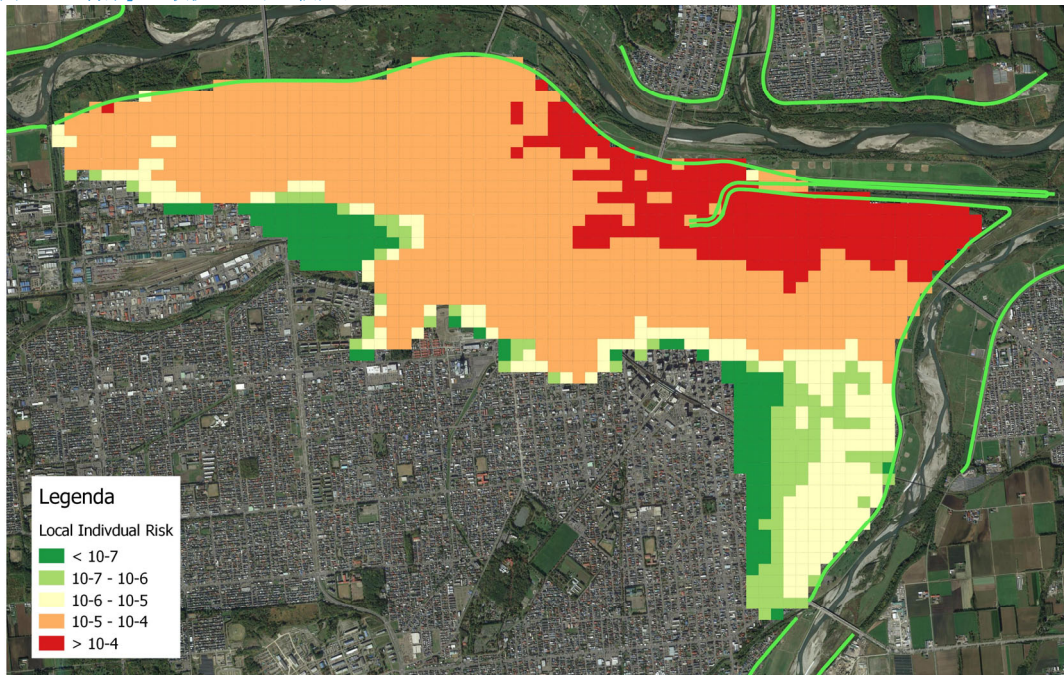
下図は、「過去」の状況における個人リスクを示したものである。リスクの高い場所は、ケーススタディ地域の深部に位置し、経済的なリスクと一致する。

図 35 「過去」の状況における個人リスク 35



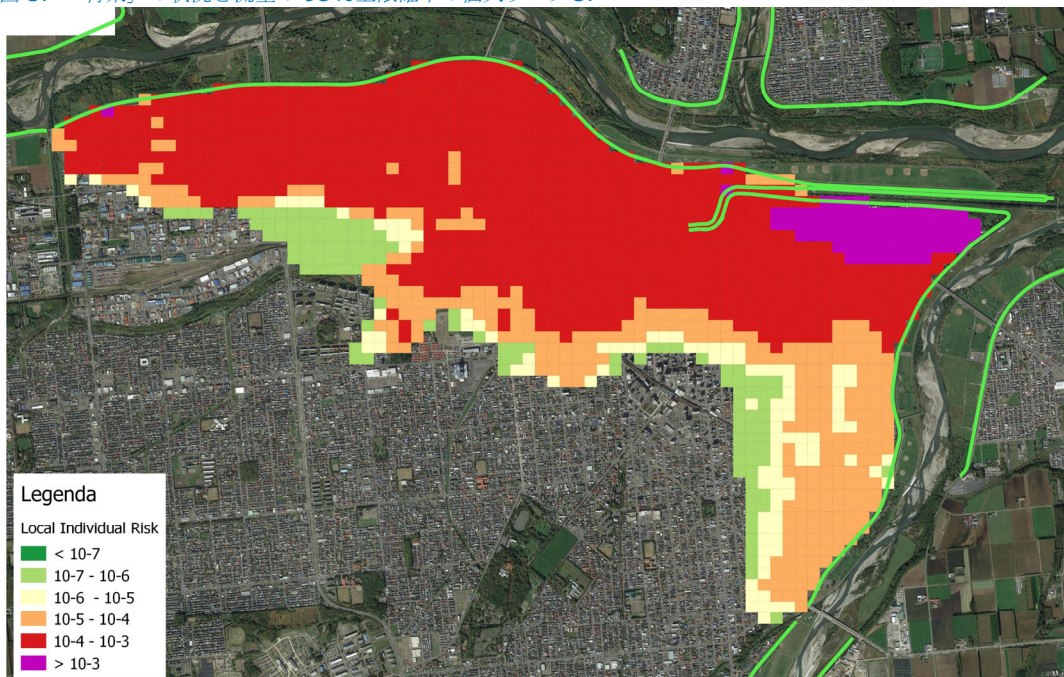
気候変動を踏まえた場合、シナリオの氾濫発生確率は増加し、また浸水の範囲と特性も増大する。氾濫の範囲と氾濫の特性の増加は、死亡率の上昇につながる。図 36 「将来」の状況における個人リスク氾濫範囲は「過去」の状況より大きくなり、またリスクも高くなる。

図 36 「将来」の状況における個人リスク 36



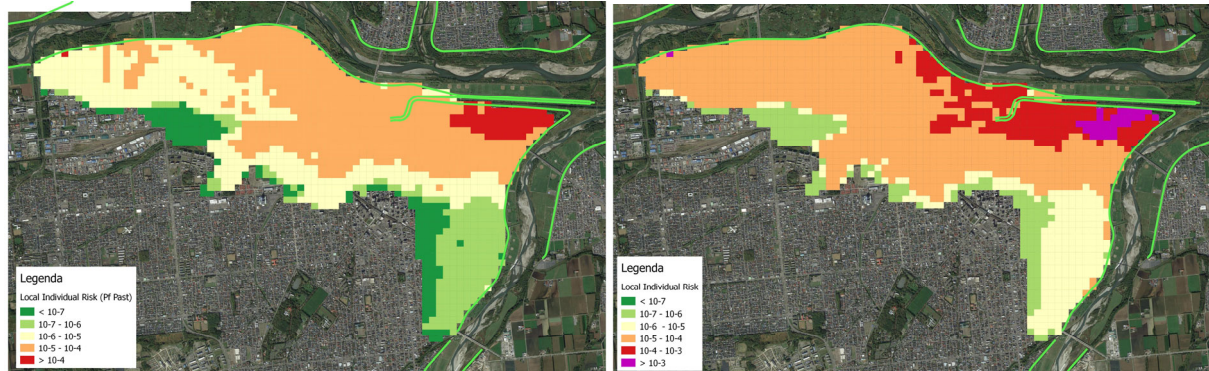
上記の個人リスクは、流量の平均超過確率によって求めた。氾濫発生確率の計算に超過確率の上限値（95%）を用いると、氾濫発生確率と氾濫リスクは増加する。図 37 では、そのような状況における個人リスクを示している。個人リスクの大幅な増加につながり、個人リスクが年間 1/1,000 を超える地域もある。

図 37 「将来」の状況と流量の 95% 上限確率の個人リスク 37



個人リスクは、基本分析では平均避難率 26%で計算した。この割合が増えると、個人リスクは減少する。図 38 では、避難が 80%だった場合の個人リスクを示す。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 38 「将来」状況、80%避難の場合の個人リスク、左は流量の平均超過確率、右は95%上限。38



8.3 氾濫発生リスクの不確実性

不確実性は、氾濫リスクを求めるうえで、切っても切り離せない関係にある。氾濫リスクを求め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。したがって、氾濫リスクを求める際の不確実性は、氾濫リスクを求める全段階における不確実性を直接的に変換したものである。

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。

9 考察、結論と提言

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むことがわかった。

経済的被害については、流出波型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。氾濫範囲は、流出波型の違いによって変化する。特に、あるシナリオでは高額な資産が浸水し、別のシナリオでは浸水しない場合、算出される被害額に大きな差が生じる。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。

帯広の事例では、平均避難率を 26% とした。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、河川流量が非常に速く増加し、鉄砲水が発生する可能性もある。

現在の避難方法では、安全な避難場所にいる人と、自宅で危険にさらされている人とで、目的地は 2 か所のみとなっている。ところが実際には、人々はさまざまな場所におり、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。

- 避難モデルの改善により、氾濫の脅威があった場合の人々の避難場所について、より正確に把握することができる。避難モデル改善の草案は、すでに WP3 の報告書に記載されている。
- 改善された方法では、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。人々がいる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の必要がある。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。
- 避難場所の違いによる死者数モデルの改良に加え、日本の建物構造を取り入れることで、さらにモデルの改善ができる。現在のオランダ方式は、オランダの建物構造（コンクリート）に基づくもので、日本の建物構造は木造が多いため、倒壊の可能性が高く、それにより死傷者の発生確率が高くなる。これも、日本の状況に合わせ、モデルの改善ができる点である。

氾濫リスクは、氾濫発生確率と氾濫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。それらの場所における洪水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、一方では氾濫の範囲や氾濫特性が増大する。もう一方では、氾濫発生確率が増加し、経済的リスクが大幅に増加する。

死者数リスクは、死者数の期待値と個人リスクで表す。想定される死者数は、氾濫発生確率が最も高い破堤箇所において多くなっている。死者数がより多くなるシナリオでは、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。経済的リスクを踏まえ、気候変動がもたらす影響は大きい。

個人リスクにより、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、破堤箇所によって破堤確率が比較的大きいところが主な原因でとなっている。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が年間 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。

9.1 経済的被害

この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。

起こりうる経済的被害は、破堤箇所によって大きなばらつきがある。経済的被害の差は、最大で 8 倍にもなる。流出波型の違いによる 1 つの破堤箇所内での潜在的被害の差は、1.5～3.5 倍程度のオーダーになる。

気候変動は、起こりうる経済的被害にも影響を及ぼす。流量の増加により、氾濫発生確率、氾濫範囲、氾濫特性も増加する。起こりうる被害への影響は、破堤箇所によって異なるが、1.5 倍から 3 倍となる。

9.2 避難と死者数

日本の 86 事例のデータにより、平均避難率を 26% とし、リードタイムがない場合の 0% からリードタイムが「長い」場合 (3 時間以上) の 44% までの帯域幅を設定した。

死者数は、オランダの死亡率関数と避難率の組み合わせで求めた。死亡率関数には氾濫特性 (水深、水位上昇率、流速) を用いて、すべての地点での死亡率を求めた。このケーススタディにより、経済的被害と同様、潜在的な死者数は破堤箇所によって大きなばらつきがあることが分かった。いくつかのシナリオにおいては、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。破堤箇所の違いによる死者数の差は、最大で 20 倍にもなる。

また、流出波型の違いによる 1 つの破堤地点内での死者数の差は比較的大きく、2.5 倍から 20 倍のオーダーになる。係数 20 は、流出波型の差が大きいことが原因となっている。

気候変動は、潜在的な死者数にも影響を及ぼし、流量の増加により、氾濫発生確率、氾濫の範囲、氾濫特性も増加する。潜在的な死者数への影響は、破堤箇所によって異なるが、2 倍から 3.5 倍のオーダーとなる。

そのため、死者数の判定には、流出波型の形状と高さが大きく影響する。

9.3 氾濫リスク

9.3.1 経済的リスク

経済的リスクは、現状（「過去」）と気候変動を含む状況（「将来」）について計算した。気候変動が経済的リスクに与える影響はおおよそ 5.5 倍であり、その差の 50%は破堤確率の増加、50%は経済的被害の増加によるものである。

基本的な経済リスクの計算には、平均的な流量超過確率で算出した氾濫発生確率を用いる。95%信用区間の超過確率の上限値を使用すると、氾濫発生確率は増加する。このように氾濫発生確率が大きくなると、経済的リスクは 3.5 倍にもなる。

経済リスクの空間分布を見ると、ケーススタディ対象地域の中でも概して深部において大きなリスクがあることがわかる。特に目立つのは、明らかに高額な資産の置かれた場所においては、経済的リスクが比較的高くなることである。

したがって、これらの高価値の資産と氾濫に対する脆弱性についてさらなる分析が必要であろう。

9.3.2 死者数リスク

経済的リスクに伴い、死者数リスクを、現状（「過去」）と気候変動を含む状況（「将来」）について算出する。気候変動が死者数に及ぼす影響はおおよそ 4.5 倍であり、その差の 50%は破堤確率の増加、50%は死者数の増加による。

超過確率の 95%上限値を用いると、氾濫発生確率は上昇する。このように氾濫発生確率が大きくなると、死者数のリスクは 3.5 倍増加する。

個人リスクにより、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、深部では年間 1 万分の 1 以上、場所によっては 1 千分の 1 以上のリスクがあることがわかった。これは、いくつかの破堤箇所において破堤確率が比較的大きいところが主な原因となっている。



本社
HKV
Botter 11-29
8232 JN Lelystad
オランダ

支社
Informaticalaan 8
2628 ZD Delft
オランダ

+31 320 294242
info@hkv.nl
www.hkv.nl/en/