



# 流域治水の推進に必要な合意形成のための減災 対策による被害軽減効果の 評価手法の研究

政策研究大学院大学 (GRIPS)

国立研究開発法人 土木研究所 (PWRI)  
水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM),

板垣 修

政策研究大学院大学  
博士 (防災学)

2021年9月



## 1. 要旨

これまでに経験したことのないような豪雨・洪水災害が全国で頻発している。地球温暖化による気候変動の影響予測を踏まえると、豪雨・洪水の強大化、頻発化が引き続き見込まれ、豪雨・洪水被害の防止・軽減対策の推進が喫緊の課題である。

このようななかで、堤防、ダム等の整備等を推進するとともに、氾濫域を含む流域の様々な主体が協働して流域全体で行う持続可能な治水対策である「流域治水」の推進が必要であることが国土交通省 社会資本整備審議会の2020年7月の答申等において強調されている。

我が国のこれまでの歴史を振り返ると、農業生産の拡大等を図るための治水施設整備等が社会・経済の発展に直接的に寄与してきており、気候変動下、豪雨・洪水が強大化、頻発化している状況に応じた適切な治水投資等を行っていくことが、我が国の社会・経済の持続的な発展において重要と考えられる。

気候変動影響を考慮した治水計画への移行については、国土交通省の「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」において具体的な検討が進められ計画降雨の算定手法が提案されるとともに、河川整備基本方針の変更の具体的な検討が進められている。

治水施設の着実な整備（レベル1対策）の推進を前提として、治水施設の整備規模を超える豪雨・洪水への備えとして、減災対策（治水施設の整備規模を超える洪水時に、人命の確保に加え、住家、農地等の資産被害等を軽減するための対策。以下同じ）が重要である。これまで、想定最大規模の洪水（レベル2）を対象とした避難による人命確保を中心とした減災対策が進められてきているが、被災後の地域の迅速な復旧・復興と地域社会の持続性を確保するためには、人命の確保に加え、住家、農地等の資産被害等の軽減対策を併せて実施していくことにより、地域のレジリエンス強化を図っていくことが重要である。

このように、治水施設の整備規模を超える洪水時の住家・農地等の資産被害などを軽減するための減災対策の重要性が気候変動下一層増大しているのにもかかわらず、減災対策の具体的な検討手法と、減災対策による被害軽減効果の評価手法は確立されていない。

一方、昨今のICT技術の発展等により、従来効率的に得ることが困難であった氾濫原の詳細な地形情報等を比較的簡単に入手すること（航空レーザ測量（LP）の活用）などが可能となっており、これらの情報等を活用することにより、減災対策等の実施による被害軽減効果等を様々な洪水ケースについて比較的簡便に計算し比較することが可能となってきた。これは、河川管理者等による堤防等の整備、いわゆるハード対策と、想定氾濫域における様々な主体による暴露・脆弱性対策（いわゆるソフト対策）などの具体的かつ有機的な連携の検討・調整を可能にし、具体的な検討・調整手法が確立していなかった新たな減災対策手法の導入・実施を可能とする条件が徐々に揃ってきていると捉えることが出来る。

本研究は、治水施設の着実な整備推進を前提として、流域の様々な主体が有機的に連携することにより新たに可能となる、命の確保に加え、住家、農地等の資産被害防止を重視する減災対策等の検討・推進手法の確立に向けた議論に資するため、下記2つの減災対策を先行的な例として、減災対策の具体的な検討手法（①について）と洪水被害防止・軽減効果の評価手法（②について）の試案を提示するとともに試験適用を行い、適用性を検証するとともに減災対策による効果を試算した点に新規性がある。

① 治水施設の整備規模を超過する洪水時に堤防越水地点を制御することによる減災対策

② 河川改修と氾濫原における暴露・脆弱性対策を統合した洪水被害防止・軽減対策

検討・評価手法の提案に当たっては、流域の様々な主体による活用を念頭に、既存公表データ等に基づき、誰でも適用可能な手法とすることを重視した。さらに、検討・評価に必要なデータが必ずしも揃っているとは限らない開発途上国の洪水対策の検討の場等でも活用できるように、限られた利用可能データに基づく適用が可能な手法となるよう留意した。

本研究の成果を踏まえ、地域の持続的な社会・経済の発展を確保するための、危機管理対

応を含めた堤防等施設などの整備，減災対策の推進手法の確立に向けた検討が進むことを期待する。

## 2. 謝辞

第 1 章の米国陸軍工兵隊の事例調査に協力いただいた工兵隊水資源研究所、同研究所水文工学センター (Hydrologic Engineering Center, カリフォルニア州デビス)、工兵隊本部各位に心から感謝申し上げます。

第 2 章の試験適用に必要な情報を提供いただいた日本大学工学部梅田信准教授、意見交換をさせていただいた専門家会議委員及び関係各位並びに国土交通省 水管理・国土保全局、国土技術政策総合研究所 (以下「国総研」) の関係各位に心から御礼申し上げます。

第 3 章の研究についてご協力いただくとともに意見交換をさせていただいた、JICA フィリピン事務所 (当時) の中村隼人、井上エリカ両氏並びに職員各位、フィリピン国政府市民防衛局 (OCD) 本部の長官、副長官、部長、職員各位、ミンダナオ島の市民防衛局第 13 地方事務所長ほか各位、フィリピン国政府公共事業・道路省の本省及びアグサン川下流プロジェクト事務所の技官各位、JICA 専門家 (当時) の室永武司氏、ミンダナオ島のブツアン市、マガリヤネス町の職員各位、株式会社インフォマティクスの石橋紀彰氏、フィリピンの市民防衛局及び公共事業・道路省の地方事務所、地方自治体の災害リスク低減・管理部署の各位及びに同部署へ派遣された JICA 海外協力隊員、JICA 本部からの調査団及び本部各位、日本企業のフィリピン駐在員、在フィリピン日本国大使館各位、フィリピン駐在 JICA 専門家、フィリピン駐在のアジア開発銀行の専門家、フィリピンを訪れた日本の学識者、元 JICA 専門家、フィリピン駐在の建設コンサルタント、GIS 技術者各位、フィリピン国政府市民防衛局本部の私の助手であり GIS を用いた分析を担った Dayanara Bianca S. Bermudez 氏、秘書であったアミー氏、私の後任の善本隆典氏に心から御礼申し上げます。

博士課程への進学と在学に当たっては、国総研の藤田光一元所長、小俣篤元所長、伊藤正秀元所長、天野邦彦前所長、木村嘉富所長、佐々木隆研究総務官 (前河川研究部長)、福濱方哉河川研究部長、伊藤弘之前水害研究室長、水害研究室、河川研究部、国総研の各位の理解がなければ実現しなかった。また、博士課程への進学を勧め、応援して下さった早稲田大学理工学術院赤木寛一教授 (学部・修士課程の指導教官)、関根正人教授、国総研河川研究部吉谷純一元流域治水研究官 (現信州大学工学部教授)、重要な参考資料となったデザイン・ウィズ・ネイチャーを読むことを薦め、貸して下さった鳥居謙一元国総研河川研究部長に心から御礼申し上げます。

博士課程の講義にてご指導いただいた政策研究大学院大学福岡捷二元教授、家田仁特別教授、廣木謙三教授、並びにヘマカンス (Hemakanth Selvarajah)、ホアン (Nguyen Van Hoang) 両氏を始めとするクラスメイトから様々な示唆を得ることができ、心より御礼申し上げます。

最後に、本研究について 3 年間辛抱強くご指導くださった政策研究大学院大学/土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) の小池俊雄連携教授、大原美保連携教授、新型コロナウイルス感染防止対策のためリモートでご指導いただいた小山内信智教授、プレ・本審査会でご助言いただいた群馬大学理工学府清水義彦教授、政策研究大学院大学隅蔵康一教授、ご助言いただいた江頭進治連携教授、学術誌投稿に当たっての英訳に詳細にご助言くださった ICHARM の大久保雅彦非常勤職員、リモート会議の手配等様々な支援を行ってくださった中村美貴子元非常勤職員、中村友紀元非常勤職員、八木淳子非常勤職員、大久保久枝秘書に心から御礼申し上げますとともに、家族に感謝する。



3. 目次	
第1章 序論	1
第1.1節 研究の背景	1
第1.2節 水害の防止・軽減に適した土地利用に関する研究	6
第1.3節 気候変動下の各国の治水対策と土地利用規制	7
1.3.1 各国の特性	7
1.3.2 洪水対策分野の気候変動適応策	8
1.3.3 土地利用規制による水害対策	10
第1.4節 環境保全便益の評価手法・事例	14
1.4.1 我が国の事例	14
1.4.2 英国の洪水対策事業による洪水リスク低減以外の便益評価事例	21
1.4.3 本節のまとめ	21
第1.5節 既存施策と本研究の位置づけ	21
第1.6節 研究の目的	23
第1.7節 既往の研究と本研究の位置づけ	24
1.7.1 リスク低減を重視する施策への移行に必要な検討・評価手法に関する研究	24
1.7.2 治水施設の整備規模を超過する洪水時の堤防越水地点の制御による被害軽減対策	28
1.7.3 河川改修事業とともに行う暴露・脆弱性低減対策	35
第1.8節 論文の構成と内容	35
第2章 堤防越水地点の制御による氾濫水量の低減対策の検討手法の研究	36
第2.1節 はじめに	36
第2.2節 堤防の越水地点を制御することによる減災対策の検討	36
2.2.1 洪水被害防止・軽減対策の分類	36
2.2.2 低頻度激甚氾濫対策の種類	36
2.2.3 制御された越水地点の検討手法	37
第2.3節 制御された越水地点の試験的な検討	39
2.3.1 想定洪水の設定	40
2.3.2 氾濫シナリオ群の設定	40
2.3.3 最悪の氾濫シナリオの抽出	44
2.3.4 制御された越水地点の選択肢の設定	44
2.3.5 選択肢ごとの被害防止・軽減効果の比較	45
第2.4節 越水地点の制御による氾濫水量の低減効果の評価	45
2.4.1 他の規模の洪水における効果・デメリットの確認	45
2.4.2 制御された越水地点の選択肢の総合評価	50
第2.5節 まとめ	51
第3章 洪水氾濫防止対策と暴露・脆弱性低減対策を統合した被害軽減効果の評価手法の研究	53
第3.1節 はじめに	53
第3.2節 減災対策による被害軽減効果の評価手法のNILIM枠組みに基づく提案	53
3.2.1 NILIM枠組みが必要な場合	53
3.2.2 各国の洪水被害防止・軽減対策	54
3.2.3 現行の洪水防止便益評価手法の限界	54
3.2.4 洪水被害防止・軽減効果を評価するためのNILIM手法	55

3.2.5	利用可能データに基づく洪水被害防止・軽減効果の評価手法の提案	55
第3.3節	フィリピンでの試験適用	59
3.3.1	試験適用対象河川及び区域の概要	59
3.3.2	試験適用の概要	60
3.3.3	考察	64
第3.4節	まとめ	65
第4章	提言	67
第5章	結論	69
4.	図・表目次	
(1)	図	
図 1.1	生活・社会状況と洪水対策の必要性の変遷の概念図	1
図 1.2	関東流と紀州流の治水手法	2
図 1.3	世界平均地上気温の変化	4
図 1.4	流域治水概念図	5
図 1.5	我が国と米英蘭仏の河川流域面積の比較	7
図 1.6	土砂災害警戒区域等	11
図 1.7	洪水浸水想定区域図	12
図 1.8	米国の洪水保険地図	12
図 1.9	英国の洪水地図	13
図 1.10	仏国の土地利用規制図	14
図 1.11	林野庁事業による生物多様性保全便益評価概念図	18
図 1.12	洪水リスク低減対策の検討のためのNILIM枠組み	22
図 1.13	洪水対策の分類と本研究の対象範囲	23
図 1.14	洪水被害の様々な防止・軽減方策	24
図 1.15	一級河川モデル区間における河川改修による洪水規模別の直接被害額の試算例	25
図 1.16	様々な洪水被害防止・軽減対策によるリスク低減効果の類型	26
図 1.17	気候変動影響により洪水頻度が増大した場合の洪水被害の増分	26
図 1.18	現存する野越しの例	29
図 1.19	堤防高さの縦断形への越水区間の追加の概念図	30
図 1.20	堤防高さの縦断形の検討の概念図	31
図 1.21	複数規模の洪水に対する堤防高さの縦断形の概念図	31
図 1.22	堤防の天端高さの概念図	31
図 1.23	計画的越水箇所の概念図	32
図 1.24	サクラメント川における検討事例	32
図 1.25	越流幅を変えた氾濫シミュレーション結果の比較例	33
図 2.1	制御された越水地点の検討手順	37
図 2.2	氾濫解析手順	38
図 2.3	試験適用対象区域	41
図 2.4	実績洪水の時間水位	42
図 2.5	観測所水位の相関	42
図 2.6	氾濫シナリオ1 氾濫解析結果	43
図 2.7	氾濫シナリオ3 氾濫解析結果	43

図 2.8 氾濫シナリオ 4 氾濫解析結果	44
図 2.9 選択肢 1 (氾濫シナリオ 2) 氾濫解析結果	45-46
図 2.10 選択肢 2 (氾濫シナリオ 5) 氾濫解析結果	46
図 2.11 計画高水位よりも 0.6m 高いピーク水位の想定洪水の氾濫解析結果	47
図 2.12 計画高水位より 0.2m, 0.4m, 0.8m, 1.0m 高いピーク水位の想定洪水の 最大浸水深分布	48
図 2.13 計画高水位より 0.2m, 0.4m, 0.8m, 1.0m 高いピーク水位の想定洪水の 最大氾濫流速分布	49
図 2.14 A川対象区域のリスクカーブと洪水頻度増大時の想定被害の増大量の比較	50
図 3.1 NILIM 手法の手順	56
図 3.2 フィリピンの既存洪水ハザードマップの例	57
図 3.3 フィリピンのプロジェクト NOAH による洪水ハザードマップ	57
図 3.4 洪水規模ごとの洪水被害の大きさと横軸との交点の記入	57
図 3.5 フィリピンの基礎自治単位 (バランガイ) 境界地図例	58
図 3.6 衛星画像に基づく居住区域と非居住区域の判別例	58
図 3.7 潜在的浸水域・非浸水域並びに居住区域・非居住区域の判別例	58
図 3.8 リスクカーブの描出	59
図 3.9 アグサン川位置図	60
図 3.10 堤外地・堤内地の定義	61
図 3.11 アグサン川下流区間を含む横断面の例	62
図 3.12 プロジェクト実施前後の洪水氾濫域内の人口の比較	64
(2) 表	
表 1.1 近年の我が国の主な洪水災害における被害	5
表 1.2 降雨量・流量・洪水発生頻度の変化倍率の評価例	6
表 1.3 地域別降雨量変化倍率の評価例	6
表 1.4 英国の年代・流域地方別洪水ピーク流量変化率	9
表 1.5 英国の H++シナリオにおける洪水ピーク流量増加率	10
表 1.6 大規模公園の間接利用価値のうち効用関数法による計測の対象	15
表 1.7 大規模公園の効用関数のパラメータ推定結果	16
表 1.8 小規模公園の効用関数のパラメータ推定結果	17
表 1.9 土地改良事業の効果項目	17-18
表 1.10(1) 林野公共事業における評価便益(1/2)	19
表 1.10(2) 林野公共事業における評価便益(2/2)	20
表 1.11 英国 Eddleston での洪水対策事業による費用便益評価事例	21
表 1.12 英国 Eddleston での自然環境ごとの経済価値評価事例	21
表 1.13 洪水対策によるリスク低減効果の 4 類型	26
表 1.14 堤防とダムの越水防止対策に関する特性の比較	34
表 2.1 氾濫シナリオ群	41
表 2.2 氾濫シナリオ別氾濫解析結果	48
表 2.3 氾濫水量・排水所要日数・農作物被害額の試算結果	49
表 3.1 6 箇国の洪水被害防止・軽減対策の観点からの比較	54-55

(3) 写真

写真 3.1 堤外地の町並み	61
写真 3.2 堤外地に繁茂する樹木群	61

## 第1章 序論

### 第1.1節 研究の背景

気候変動の影響が指摘される豪雨・洪水災害が頻発する中、従来の治水安全度の向上を重視した施策から、洪水による被害リスク低減を重視した施策への移行が必要である(第1.5節参照)。しかし、このような移行を具体的に実現するための個々の対策の検討・評価手法は未確立である。以下、研究の背景について、人々と洪水との歴史的関係から近年の主な施策まで簡潔に述べる。

人々は地域の地形・社会特性・科学技術等に応じて、洪水氾濫等に適応した居住環境を構築し、生活を営んできたと考えられる(図1.1)。

我が国では狩猟・採集生活から稲作農耕生活への移行に伴い、低平地氾濫原に居住・生活の場が移ってきたと考えられる。ナイル川の事例でも知られるように、洪水時に氾濫原となる場所は農耕にとって有用な栄養分が氾濫水により供給されるとともに、雨が降らない期間の灌漑面から有利であり、利用が進んだと考えられる。なお、洪水氾濫の発生が前提となるため、集落は低平地周辺の比較的高い場所に主に設けられたと考えられる。

全球的な海面水位の低下とともに、営農技術の向上等のもとでの人口増加の中で、従来湿地等であった場所の干拓等による農地の拡大は、集落の低平地部への進出を促したと考えられ、洪水時の集落の防御が課題となった。このため、個別建物における水屋(洪水の際に用いる避難小屋)の設置、集落を守る輪中堤の整備などが行われてきた。(建設省 土木研究所 河川部 総合治水研究室 1983;建設省 土木研究所 河川部 都市河川研究室 2000)

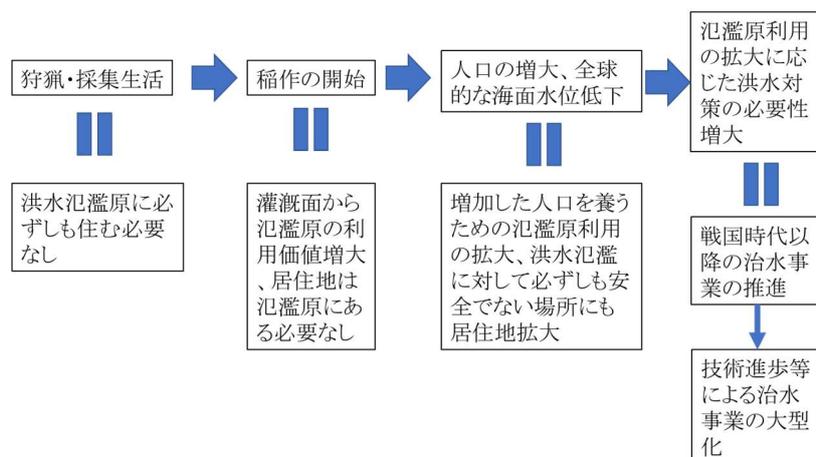


図 1.1 生活・社会状況と洪水対策の必要性の変遷の概念図

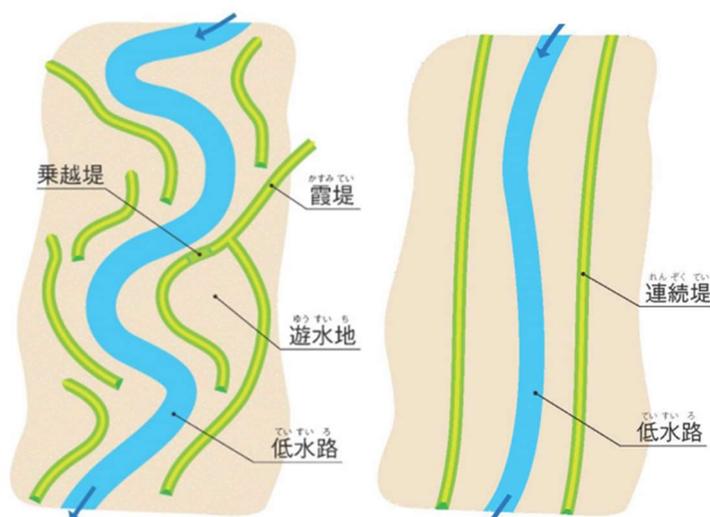
戦国時代以降、武田信玄、加藤清正などの大名が農業生産を高めることなどを目的に治水事業を実施した。江戸時代には、農業開発に加えて、農産物などを運搬するための河川整備(低水工事)が実施された。例えば、近世を迎えるまでの関東平野は合流や分流を繰り返し乱流する原始河川と無数に点在する大小の沼などを抱え、開発の手の届かない大デルタ地帯であったが、江戸幕府が開かれてから、穀倉地帯としてその姿を大きく変貌させている。これを可能としたのは、戦国時代から発展してきた技術で、いわゆる「関東流」と呼ばれる治水手法である。この技術は、江戸幕府直轄の技術として、伊奈氏一族に受け継がれたとされ、水害防止のために乗越堤(越流堤)、霞堤、遊水地などを設け(図1.2(国土交通省 関東地方整備局 荒川上流河川事務所 2021)左図)、河道を幅広く蛇行したままとし、洪水を蛇行部に滞留させつつ徐々に流入させ、農地には肥沃な土砂が流入し、流域内に点在する低湿地を縮小させ耕地造成を促した。このため関東流では「川瀬は一里四十八曲がり」を貴んだとされる。

江戸時代中期、都市や耕地が拡大すると洪水被害が増大した。また、未開発の大河川下流部のデルタ

地帯では相変わらず乱流が放置されていた。そのうえ、用排水兼用の関東流の利水形態では、下流の用水確保が上流の排水困難を招き、開発が進むにつれ上下流の対立が顕在化した。このため、関東流による新田開発は技術的限界を迎えた。

この頃、享保の改革を進めた徳川吉宗は新田開発を奨励し、紀州の井沢弥惣兵衛為永を招き、彼の持つ土木技術を採用し、この手法を関東流に対して紀州流と呼ぶことがある。紀州流では関東流の乗越堤や霞堤を取り払い、それまで蛇行していた河道を強固な築堤と川除(水害防止施設)・護岸などの水制工により直線状に固定した(図 1.2(国土交通省 関東地方整備局 荒川上流河川事務所 2021)右図)。大河川の中・下流地帯の主要部にはじめて高い連続堤が建設され、川の水は河川敷の中に押し込められた。これにより遊水地などは廃止され、放置されていた中流の遊水地帯や下流の乱流デルタ地帯の開発が進められた。(以上、関東平野の例について国土交通省 関東地方整備局 荒川上流河川事務所(2021)に基づき述べた)

一方、当時の土工能力・材料の制約などにより、洪水氾濫の完全防止は困難であることを前提として、大規模洪水発生時には重要な城下町等を氾濫被害から守るための工夫(重要な地域を守る堤防の高さをより高くするなど)が組み込まれていたことが知られている(末次(2017))。上野鉄男(2002)は「この時代の治水工法の特徴は乗り越し堤(越流堤)を用いて洪水を遊水地へ氾濫させるものであった」としている。



©国土交通省 関東地方整備局 荒川上流河川事務所

図 1.2 関東流(左)と紀州流(右)の治水手法

明治時代以降、西欧への留学生やお雇い外国人技術者などにより西洋の土木技術が我が国へ導入され、大規模土木工事を伴う治水事業が富国強兵の国家方針等のもと推進された。明治 29 年(1896 年)には(旧)河川法が制定され、河川管理に関する体系的な法制度が確立した。明治以来の治水方針は「連続堤防を築き、放水路や捷水路などを開削して、洪水を河道内に閉じ込めて流下させる」(上野鉄男 2002)であり、西洋の近代土木技術の導入等がこの方針の採用を可能にしたと考えられる。ここで、上野鉄男(2002)は、寺田寅彦が述べた「・・・ヨーロッパにおいては、台風も地震も知らない国が多く、ヨーロッパ人は自然を恐れることなしに自然を克服しようとして科学を発達させた。また、ヨーロッパの自然条件の単純さは自然に対する認識を普遍化する上で好都合であったと考えられる。自然条件の全く異なるヨーロッパの進んだ科学が輸入されて以後は、わが国でそれ以前に蓄積されてきた自然認識とそれへの対応、それはそれぞれの土地に刻まれた科学と言い得るものであるが、それが軽視され、科学技術の世界から遠ざけられていった」を引用し、「寺田による上記の指摘は、科学技術一般について述べたものであるが、河川に関わる問題にびたりと当てはまることが注目される」との、興味深い考察をしている。

20 世紀前半の太平洋戦争前後の期間は予算・資材不足等により治水事業は一時停滞したが、その後戦後の復興期から河川改修が強力に進められた。昭和 34 年(1959 年)9 月の伊勢湾台風による高潮災害は死者・行方不明者が 5 千人を超える甚大な被害をもたらした。これを契機として災害対策基本法が制定された。昭和 39 年(1964 年)には河川法が改正され、水系一貫の管理制度の導入、利水関係の規定整備、国管理の概念導入が行われ、一級河川の管理を国が直接行うことになった。多目的ダム等の大規模土木構造物による洪水流量制御の導入が進められ、それまでの河道改修の蓄積、並びに比較的豪雨が少ない時期に当たったこともあり、全国の洪水氾濫が比較的少ない期間がしばらく続いた。この時期は社会経済面では高度経済成長の時期に当たり、洪水氾濫頻度が低減した河川氾濫原は、工場・住宅用地等として活発に開発され、資産・人口の集積が進んだ。洪水被害額・死者数は治水施設の整備進捗に呼応するように減少を続ける一方で、浸水面積当たりの被害額は上昇し、氾濫原への資産の集中を反映していた。洪水氾濫経験の減少は、科学技術の進展イメージとも相まって、「河川整備が進んだ大河川ではもう洪水氾濫は発生しないのではないか」という幻想を招いた面があったと考えられる。

平成 7 年(1995 年)1 月の阪神・淡路大震災は、バブル経済後の我が国に、科学技術による地震等災害の防止が容易ではないことを再認識させたと考えられる。その後平成 23 年(2011 年)3 月に発生した東日本大震災は、防災対策における想定規模を超える災害外力に備えることの重要性を明確にした。このため、東日本大震災で甚大な被害をもたらした津波災害を対象として、レベル 1、レベル 2 の 2 つの規模の災害外力を設定した 2 段防災の手法が導入された。すなわち、発生頻度は数百年から千年に 1 回ほどと極めて低いがひとたび発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波(レベル 2 の津波)と、数十年から百数十年に 1 回発生するとされる津波(レベル 1 の津波)であり、前者に対しては避難によって生命を守り、後者に対しては防災施設整備で対処することを基本としている(中央防災会議 2011)。

洪水被害の防止・軽減対策において、治水事業とともに重要な車の両輪とされている「水防」(地先ごと等による水害の防止活動)については、昭和 24 年(1949 年)に水防法が制定され、同法に基づき昭和 30 年(1955 年)に洪水予報制度(洪水予報河川)が導入され、平成 17 年(2005 年)に水位周知河川が導入された。平成 13 年(2001 年)に治水計画(河川整備基本方針)規模の洪水を対象とした浸水想定区域制度が洪水予報河川を対象に導入され、平成 17 年(2005 年)に対象が水位周知河川に拡大された。平成 27 年(2015 年)には想定最大規模降雨の概念が同法に導入され、洪水浸水想定区域(それまでの浸水想定区域の河川版のこと。同改正時に高潮浸水想定区域、雨水出水浸水想定区域が併せて導入された)の指定や避難確保計画の策定等が進められることとなった。したがって、従来の治水の施設計画に用いられてきた計画降雨と想定最大規模降雨が、それぞれ津波災害への対応のレベル 1、2 に対応していると捉えることができる。

平成 27 年(2015 年)12 月の国土交通省社会資本整備審議会の答申「大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について ～社会意識の変革による『水防災意識社会』の再構築に向けて～」(国土交通省 社会資本整備審議会 2015)では、同年 9 月の関東・東北豪雨災害を踏まえ、対応すべき課題として以下を挙げている。

- ①堤防の決壊に伴う氾濫流により家屋の倒壊等のおそれがある区域(家屋倒壊危険区域)、浸水深が大きい区域、長期間浸水が継続する区域からの立ち退き避難の実現方策
- ②広域避難の準備・実施体制
- ③多岐にわたる水防活動の実施体制の確保
- ④従来の「洪水を河川内で安全に流す」施策だけで対応することには限界があることを踏まえた、大規模な洪水に対する被害軽減対策

平成 29 年(2017 年)の水防法改正では、多様な関係者が連携して洪水氾濫による被害を軽減するためのハード・ソフト対策を総合的かつ一体的に推進するため、大規模氾濫減災協議会が導入された。

一方、世界でも、気候変動の影響による豪雨・洪水の頻発と、人口・資産の都市域への一層の集中によ

り、激甚な洪水災害が各地で頻発している。1995年から2015年までに洪水に影響された人口は、死者を除いて、23億人と報告されている(CRED and UNISDR 2015)。洪水被害は、地域の経済発展を阻害し、地域のコミュニティの持続性を危うくし、サプライチェーンを通じて世界経済活動に悪影響を及ぼす懸念がある。

2015年3月に日本の仙台市で開催された第3回国連防災世界会議(Third United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction)で採択された国連仙台防災枠組み(Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030)(United Nations 2015)において、2005年採択の国連兵庫行動枠組み(Hyogo Framework for Action)に基づく活動を踏まえ「災害リスクと生命・生計・健康並びに人々、企業、コミュニティ、国家の経済・物理・社会・文化及び環境面の資産の損失の大幅な削減」を目指している。ここで、災害リスクとは、災害の起こる確率と、災害が起こった場合に見込まれる被害の大きさの組み合わせとして理解される。そして上記達成のため、次の目標を掲げている。

「災害外力への暴露及び災害に対する脆弱性を防止・削減するとともに、災害対応及び災害からの復興の準備及びレジリエンス(社会・生態系において、洪水など周期的に生起する擾乱に対して重要な構造、作用、フィードバックを維持する能力(Gersonius, et al. 2016))の強化を図る統合的かつ包摂的な経済・組織・法令・社会・文化・教育・環境・技術・政治・制度面の方策の実施を通じた災害リスクの新たな発生の防止と既存災害リスクの低減」

さらに、優先行動として次の4つを挙げている。

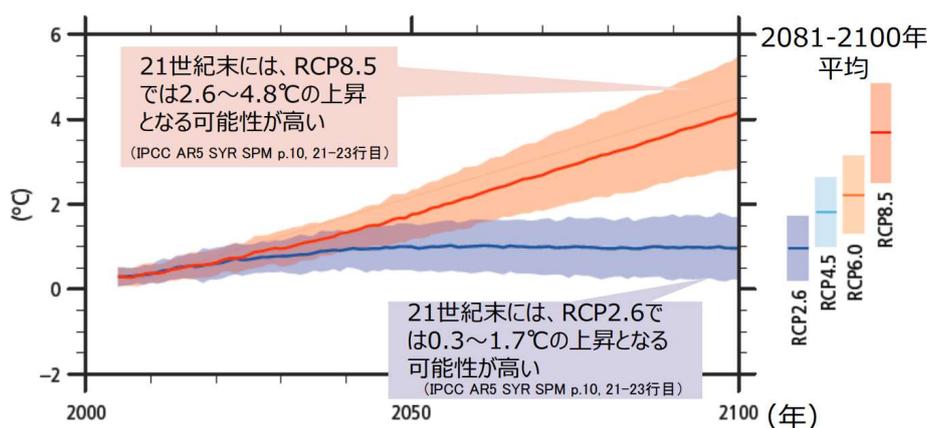
優先行動1: 災害リスクの理解

優先行動2: 災害リスク管理のための災害リスク統治の強化

優先行動3: レジリエンスのための災害リスク低減の投資

優先行動4: 効果的な災害対応と災害復旧・復興時の「災害リスク低減型復興(ビルド・バック・ベター)」のための災害準備の高度化

温室効果ガスの増大に伴う地球温暖化による気候変動の影響については、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)の第5次評価報告書(2014年10月政策決定者向け要約の承認・公表、統合報告書本体採択)において図1.3(環境省 2015)のとおり将来の予測結果が示されており、今後もしばらくは地球温暖化が進み、豪雨・洪水が増大することが見込まれている。



©環境省

図 1.3 世界平均地上気温の変化

このような中で、我が国ではこれまでに経験したことがないような豪雨・洪水災害が近年毎年のように発生している(表1.1)。そして、河川、下水道、砂防、海岸等の管理者が主体となって行う対策に加え、集水域と河川区域のみならず、氾濫域も含めて一つの流域として捉え、その流域の全員が協働して取り組む流域

治水推進の重要性が強調されている(国土交通省 社会資本整備審議会 2020)。流域治水では流域全体を俯瞰して、①氾濫をできるだけ防ぐ・減らす対策、②被害対象を減少させるための対策、③被害の軽減、早期復旧・復興のための対策、を組み合わせ、気候変動によって激甚化するハザードによる社会的機能の低下を抑制するとともに、本来の機能を速やかに取り戻すための方策が提案されている(図 1.4)。

また、気候変動下の治水計画手法については、国土交通省 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会において、気候変動の影響を考慮した治水施設の計画のための計画降雨の算定手法が提案されており、表 1.2 及び表 1.3 に示すように、従来の計画規模を大きく上回るものとなることが想定されている。また、計画降雨と想定最大規模降雨との対応のギャップを如何に埋めかも重要な課題であり、これらへの対応が流域治水への転換を図る主たる理由であると考えられる。

表 1.1 近年の我が国の主な洪水災害における被害

		2015年台風第18号 *1	2016年台風第10号 *2	2017年梅雨前線・台風第3号 *3	2018年7月豪雨・台風第12号 *4	2019年台風第19号・前線 *5	2020年7月豪雨*6	計
死者 人		20	26	42	237	118	84	527
行方不明者 人			3	2	8	3	2	18
重症者 人		11	5	14	126	48	25	229
軽症者 人		71	9	25	339	340	55	839
住家 棟	全壊	81	518	338	6,767	3,263	1,620	12,587
	半壊	7,090	2,281	1,101	11,248	30,004	4,509	56,233
	一部損壊	384	1,174	89	4,199	42,491	3,594	51,931
	床上浸水	2,523	279	223	7,173	7,710	1,652	19,560
	床下浸水	13,259	1,752	2,113	21,337	22,231	5,173	65,865
非住家被害棟	公共建物	37	17	9	159	272	-	494
	その他	1,685	2,500	1,407	2,423	16,129	-	24,144

\*1 (消防庁 2017(1)) \*2 (消防庁 2017(2)) \*3 (消防庁 2018) \*4 (消防庁 2019)なお、上記のほか程度不明負傷者1名 \*5 (消防庁 2020) \*6 (消防庁 2021)

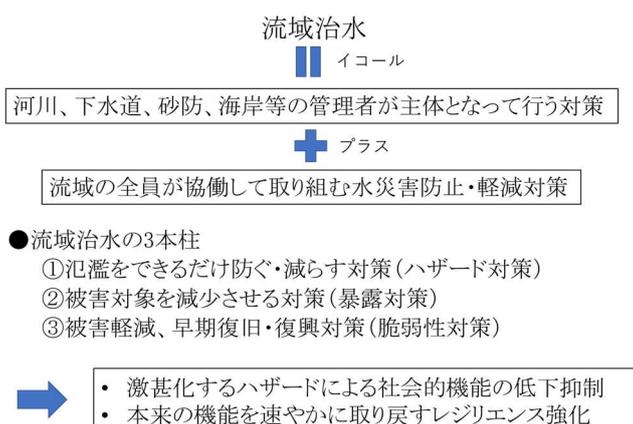


図 1.4 流域治水概念図

表 1.2 降雨量・流量・洪水発生頻度の変化倍率の評価例

	降雨量	流量	洪水発生頻度
4°C上昇	1.3倍	約1.4倍	約4倍
2°C上昇	1.1倍	約1.2倍	約2倍

※年超過確率1/100規模, 全国の一級水系の平均値. 国土交通省 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会(2021)19頁の表-4より.

表 1.3 地域別降雨量変化倍率の評価例

		降雨継続時間 12時間以上	降雨継続時間 3時間以上12 時間未満	降雨継続時間 3時間未満
4°C上昇		1.3	1.4	-
	北海道、九州北西部	1.4	1.5	-
	その他の地域（沖縄含む）	1.2	1.3	-
2°C上昇		1.1	1.1	1.1
	北海道	1.15	1.15	1.15
	その他の地域（沖縄含む）	1.1	1.1	1.1

※国土交通省 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会(2021)18頁の表-2より

## 第 1.2 節 水害の防止・軽減に適した土地利用に関する研究

Ian L. McHarg は 1969 年に、従来の地域計画の反省点として、環境に関する知識が全く欠如しており、社会経済的プロセスだけが考慮された点を挙げ、環境に関するデータを地域計画立案のプロセスに組み込む手法を提供するために Design with Nature を出版した。

彼は、生存に適した環境とは、そこに生きる生物が最小の適合努力で最大の必要を満たしうる環境と定義できるとし、①自然のままに残すべき土地、②特定の利用形態は問題ないが、それ以外の使い方をすべきでない土地、そして、③最も都市化に適した土地、すなわち自然の危険性がなく、しかも都市化しても他の価値を台なしにすることのない土地の 3 種類に土地を仕分ける必要があるとした。そして、当該地域の持つ価値をはじめ、土地利用の諸形態の適地を地図にして公にできれば、何よりも有益な貢献となるに違いないとした。また、美しくかつ豊かで見事な場所に建設された都市を見るとき、そのすばらしさはほとんどの場合、その場所の特性を維持し、生かし、さらには向上させた結果得られたものであり、破壊からきたものでないことが分かるとし、場所に備わる優れた特性を明らかにしなければならないとした。そして、環境が本来の適性に優れていればいるほど、それだけ環境、人間双方の適合、適応作業が不要になることになり、このように適合状態それ自体が創造的と言え、”最小の費用で最大の便益を”を土地利用の解決策としている。(イアン・L・マクハーグ 1994)

また、梯ら(2014)は、国土交通省の水害統計調査の一環として市区町村が作成している水害区域図に基づき、概ね 5 年に 1 回以上外水氾濫が発生している地域を水害常襲地として抽出し、それらが狭隘な谷底平野に主に存在し、その割合が約 8 割となっていることを明らかにするとともに、それらが築堤の困難さにより形成されたとし、その要因として、狭隘な谷底平野において貴重な生活基盤である平坦部を潰してしまう築堤が困難であること、下流の治水整備が十分でないため上下流バランスの問題から上流で築堤できないことを挙げている。そして、下流への流出量抑制を目的とした土地利用の誘導等による遊水

空間の確保に言及し、水害常襲地が遊水空間として活用しやすいとし、今後の治水整備においては下流部の治水安全度の向上という観点でこれら水害常襲地に着目し、新たな治水計画を模索していくことが重要であるとしている。

以上を踏まえると、場所ごとの浸水特性等を把握し、情報を社会で共有し、浸水特性等に応じた土地利用を促進することが、水害防止・軽減対策の推進において有効と考えられる。また、例えば浸水防除が困難な、住宅用地等として利用しにくい土地ほど、自然環境上の保全価値が高いと考えられることから、自然環境の保全価値を適切に評価することにより、水害の防止・軽減につながる土地利用を推進できると考えられる(自然環境の保全価値の評価手法・事例の調査結果については第 1.4 節で述べる)。

### 第 1.3 節 気候変動下の各国の治水対策と土地利用規制

本研究の参考とするため、米国、英国(イングランド)、蘭国(オランダ)、仏国(フランス)の4箇国の洪水被害防止・軽減施策の概要について、我が国と比較しつつ、板垣ら(2019)に基づき以下に述べる。なお、我が国は4箇国に比べ河川の流域面積が小さい(図 1.5)とともに、河床勾配が大きく洪水時に急激に増水する(国土交通省 河川局 2006)などの特徴があり、各国の施策との比較にあたってはこれらの特性の違いを踏まえる必要がある。また、第 3 章の表 3.1 にも関連する情報が整理されている。

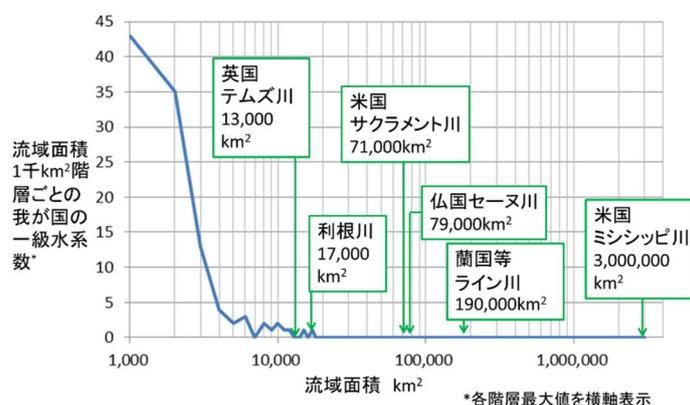


図 1.5 我が国と米英蘭仏の河川流域面積の比較\*

\*図中折れ線は流域面積1千km<sup>2</sup>階層ごとの我が国の一級水系数(国土交通省 2018)

#### 1.3.1 各国の特性

##### (1) 我が国

氾濫原低平地への高度な人口・資産集積。豪雨時の急激な河川水位上昇(洪水予測に基づく洪水対策のリードタイムの短さ)。歴史的に洪水対策が重要視され法定河川管理者が存在。RCP8.5シナリオを用いた予測で 21 世紀末における短時間強雨の発生回数が増加すると予測されている(環境省・文部科学省・農林水産省・国土交通省・気象庁 2018)。

##### (2) 米国

広大な国土。気候変動に対する懐疑論。1969 年以来国家洪水保険制度(National Flood Insurance Program)が社会実装されている。1996 年にそれまでの設計高水位・余裕高(Free Board)に基づく堤防計画・設計体系からリスクを踏まえた計画・設計体系へ移行した陸軍工兵隊(US Army Corps of Engineers, 大河川の堤防整備等を所管)(Davis, et al 2008)と、従来の計画・設計体系を維持している連邦危機管理庁(Federal Emergency Management Agency)の洪水保険制度が併存。気候変動影響による海面上昇・豪雨強度・頻度増大を予測している(U.S. Global Change Research Program 2018)。

### (3) 英国

首都ロンドンの高潮対策の重要性(1953年の高潮災害で300人超の死者(Environment Agency 2019))を踏まえテムズ・バリア(Thames Barrier, テムズ川防潮可動堰)及び高潮堤防により年超過確率1/1000の治水安全度を確保(Environment Agency 2009). 気候変動影響を洪水ピーク流量の増加率等として考慮する手法を実装(1999年より海面上昇量について, 2006年より洪水ピーク流量等について). 気候変動影響による海面上昇・冬期(英国の洪水は冬期発生が多い)の降雨量増大を予測している(Met Office 2018).

### (4) 蘭国

輪中堤で守られた低平地に高度に人口・資産が集積. 氾濫被害が国家の存亡にかかわるとの社会認識が強い. 気候変動影響への柔軟な対応手法を2017年1月1日以降実装. 堤防区間ごとの法定治水安全度を2017年以降法律で規定(ENW 2017), 同年よりライン川等の法定基準洪水流量廃止. 以前は1996年制定の水防御法により輪中ごとの最低防御レベル(水位超過確率)が規定されていた. 気候変動影響による海面上昇・冬期(蘭国の洪水も冬期発生が多い)の降雨量(及び強度)増大を予測(Royal Netherlands Meteorological Institute 2015).

### (5) 仏国

以前の「堤防の時代」から, 20年ほど前より自然への抵抗(堤防整備による洪水の封じ込め等)の限界を認識しリスクの低い土地の利用へ移行している. 堤防新設事業は現在ほぼなし(堤防撤去事業あり). 人口密度が低い場合に堤防強化が費用便益の観点から成り立たないことがある(オランダとは防御対象人口の桁が違うことがある). 災害リスクを考慮した土地利用規制の長い歴史で有名(1.3.3(5)参照). 2018年1月1日以降堤防管理を中央政府から地域(コミューン, 地方自治体の最小単位)へ移管中(単一のコミューンでは管理が難しい場合にはコミューンの連合体で管理). コミューンが土地の開発許可と防災対策の両者に責任を持つこととした. 気候変動影響による海面上昇を課題として明確に位置付ける(ONERC 2015)とともに, RCP2.6, 4.5, 8.5の3シナリオに基づく2071-2100年の豪雨強度増大を予測(Drias 2019).

## 1.3.2 洪水対策分野の気候変動適応策

### (1) 我が国

既述のとおり, 気候変動影響を考慮した治水施設の計画降雨の検討手法が国土交通省が設置した技術検討会で提案され, 河川整備基本方針の変更の検討が進められている(国土交通省 水管理・国土保全局 2021)

### (2) 米国

潮位の影響を受ける河川区間等における陸軍工兵隊による洪水対策事業の計画・設計で将来の海面上昇による影響を3つのシナリオ(High, Intermediate, Low)により考慮するものとされている(USACE 2013). 洪水対策事業の選択肢の比較・検討に当たっては, 中間(Intermediate)シナリオを仮定して事業便益の評価を行うものとされている. なお, 実際に施工される堤防等施設の規模は, 中間シナリオと高(High)シナリオとの間で, 費用便益費等の観点に基づき最も適切な施設規模を決定する. 例えば, 中間シナリオによる海面上昇量が3フィート, 高シナリオによる同量が9フィートの場合, 費用便益等の観点から6フィートのシナリオを選定することがありうる. また, 複数の対策手法を組み合わせた順応的な適応手法(Tiered Approach)を推奨している(Manous 2018). また, 洪水ピーク流量の将来変化については将来予測の不確実性が大きいことから考慮していない.

(3) 英国

環境庁より2016年発出の「Adaptation to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authorities (気候変動への適応:洪水・沿岸侵食リスク管理機関への助言)」(2020年7月22日取り消し(Government of UK 2021(1)))により、気候変動影響による将来の海面上昇、洪水ピーク流量変化等を考慮する手法を提示(表 1.4, 表 1.5(いずれも Environment Agency(2016)より作成)。

河川流域・年代ごとに複数の洪水ピーク流量変化率が提示されており、洪水対策事業の検討時の感度分析に用いられているが、洪水対策の施設(堤防等)設計時には原則として中位(Central)シナリオを適用する。また、順応的適応(Managed Adaptation)を推奨している(Environment Agency 2016)。これらの洪水ピーク流量変化率は、環境・食料・農村地域省(Department for Environment, Food and Rural Affairs)と環境庁による洪水・沿岸侵食リスク管理共同研究開発プログラム(Joint Defra/EA Flood and Coastal Erosion Risk Management R&D Programme)のうちのFD2648プロジェクトにより求められたものである。

FD2648プロジェクトでは、UKCP09(英国気候予測プロジェクト 09)の気候変動シミュレーション結果に基づき、流域ごとに洪水ピーク流量変化を評価している(Kay, et al. 2011)。なお、地球温暖化効果ガス排出シナリオとしては、IPCCの前世代(SRES)のシナリオであるA1B, B1, A1FIの3つを順に「中排出」「低排出」「高排出」シナリオとして用い、表 1.3 に示す洪水ピーク流量変化率は中排出(A1B)シナリオに基づき算定されている。なお、表 1.4 に示すH++シナリオが提示されており、水害発生時に極端な影響が予想される場合(例 原子力発電所、広域エネルギー供給施設の被災)には評価に用いることができるとされている(Environment Agency 2016)。

表 1.4 英国の年代・流域地方別洪水ピーク流量変化率

気候変動影響評価 (パーセンタイル)	2020年頃 (2015年～2039年) に見込まれる潜在的全変化率	2050年頃 (2040年～2069年) に見込まれる潜在的全変化率	2080年頃 (2070年～2115年) に見込まれる潜在的全変化率
<b>Northumbria流域地方</b>			
上位値 (90 <sup>th</sup> )	20%	30%	50%
上位中央値 (70 <sup>th</sup> )	15%	20%	25%
中央値 (50 <sup>th</sup> )	10%	15%	20%
下位値 (10 <sup>th</sup> )	5%	5%	10%
<b>Humber流域地方</b>			
上位値 (90 <sup>th</sup> )	20%	30%	50%
上位中央値 (70 <sup>th</sup> )	15%	20%	30%
中央値 (50 <sup>th</sup> )	10%	15%	20%
下位値 (10 <sup>th</sup> )	5%	5%	10%

※Environment Agency(2016)10頁のTable 2より作成

表 1.5 英国の H++シナリオにおける洪水ピーク流量増加率

	2020年頃（2015～2039年）に見込まれる潜在的 全変化率	2050年頃（2040～2069年）に見込まれる潜在的 全変化率	2080年頃（2070～2115年）に見込まれる潜在的 全変化率
Northumbria流域 地方	20%	35%	65%
Humber 流域地方	20%	35%	65%
Anglian流域地方	25%	40%	80%
Thames流域地方	25%	40%	80%
SE England流域 地方	30%	60%	120%
SW England流域 地方	25%	50%	105%

※Environment Agency(2016)12 頁の Table 3 より作成

#### (4) 蘭国

洪水対策事業において気候変動影響による将来の海面上昇、洪水ピーク流量変化を考慮している。気候変動適応策の検討時に参考としている蘭国気象庁による気候変動シナリオ(KNMI'06 のこと。2020年3月の現地聞き取り調査結果によるとKNMI'14への移行については両シナリオ間の差が小さいことから優先度は高くないとのこと(板垣(2020)))には4つがあり、気候変動影響の大きいほうから順にW+(2100年4℃上昇相当)、W、G+、Gシナリオである。洪水対策施設の計画・設計時には通常高位(W+)シナリオを採用するものとされているが、順応的適応手法を採用する場合には中位(G又はG+)シナリオでも良いこととなっている(Rijkswaterstaat 2018)。これは、洪水対策施設を随時かさ上げしていくような順応的管理が可能な場合には、初期投資を抑えた柔軟な対応を行うものである。

また、将来予測において避けられない不確実性を踏まえ、12年ごとに気候変動影響等による治水安全度の低下状況を確認し、治水安全度が警報レベル(所管大臣が設定)まで低下した時点で堤防のかさ上げ工事等の検討・調整を開始し、法定治水安全度まで安全度が低下する前に堤防かさ上げ等を完了する順応的管理(ENW 2017)を計画的に実施している。なお、蘭国では将来の海面上昇による影響よりも地盤沈下による影響の方が大きいと予測されている点に留意する必要がある。

その後、2020年3月の現地調査時点では、デルタ・プログラム(気候変動影響下の2050年以降をにらんだオランダの洪水対策・水資源確保のための国家計画。2010年開始(国総研 気候変動適応研究本部2017))における今世紀末までの海面上昇予測は最大1m(Ministry of Infrastructure and Water Management, Ministry of Agriculture, Nature, and Food Quality, Ministry of the Interior and Kingdom Relations, the Netherlands 2019)であるが、3から5m上昇した場合について検討中であり、対策の選択肢として(1)海岸線の強化 (2)臨海域からの撤退 (3)臨海部の湖の水位を上げる(この場合自然排水可能時間が短くなるため排水ポンプの増強が必要となる)が挙げられていた。(本段落は板垣(2020)による)

#### (5) 仏国

洪水対策事業において、将来の海面上昇60cm(2100年まで)を考慮している。洪水ピーク流量の変化については、将来予測の不確実性が比較的大きいため考慮していない。

### 1.3.3 土地利用規制による水害対策

#### (1) 我が国

建築基準法第39条に災害危険区域(建築行為の制限)の規定があり、地方公共団体が条例により津波、

高潮、出水等による危険の著しい区域を指定し(同条第1項)、住居の用に供する建築物の建築の禁止その他建築物の建築に関する制限で災害防止上必要なものを定める(同第2項)とされているが、導入事例は限られている。

また、洪水氾濫とは異なるが、土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律(土砂災害防止法)に基づく土砂災害警戒区域及び土砂災害特別警戒区域(図 1.6(東京都 2020))において、警戒避難体制の整備、特に防災上の配慮を要する者が利用する施設の建築及び住宅・宅地分譲を目的とした開発行為に対する許可制の導入、居室を有する建築物の構造基準の設定、災害を受けるおそれが著しい既存の建築物に対する移転等の勧告を行うことができる(全国治水砂防協会 2020)。

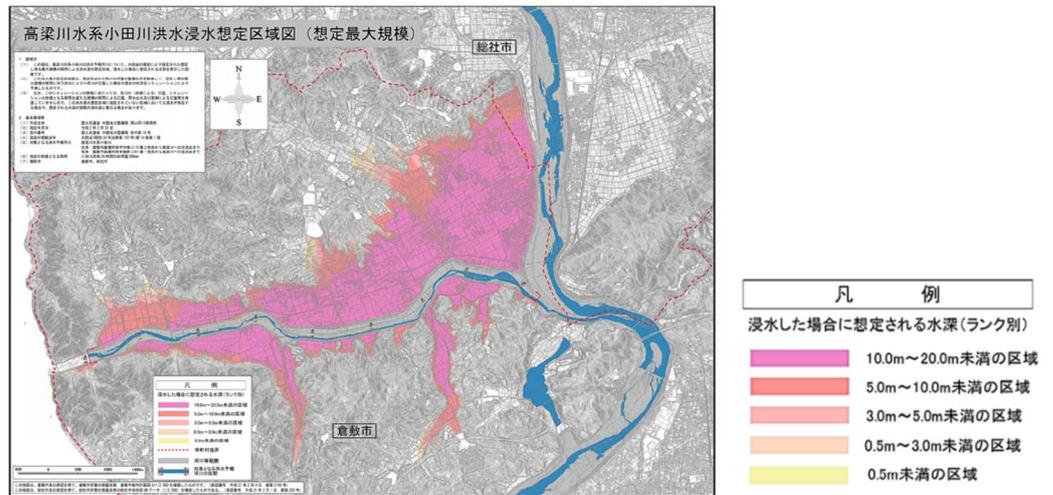
吉田ら(2011)は、フランスの PPR を中心とした防災型土地利用規制の経緯と特徴について報告し、土地利用規制単独ではなく保険制度等と緊密に連動させていること、国が支える「連帯」に基づく保険制度と結びついていることから国が直接的な役割を果たしていること、本来は事後的な救済手段である保険をいかに事前の防災インセンティブ策として利用するかが議論されていること、既開発地での土地利用規制の決め手は見出されていないことを挙げている。そして、我が国では防災を主な目的とする土地利用規制の制度・手法が既に複数存在するが、それらが広範に実施され、災害に強い土地利用構造を生み出してきただけとはいえず、その原因として、これまでの拡大成長社会の中にあつて土地利用規制が非現実的なものと捉えられてきたこと、法令による規制を単独で考え他の手法との相乗効果を生かすことを検討してこなかったこと、保険について事前の防災のためのツールとして利用しようとする発想に乏しかったこと、災害危険区域や土砂災害警戒区域など土地利用規制の主体を地方自治体とするものが多く、国の役割について十分な議論がされて来なかったことを挙げている。

馬場と岡井(2017)は、フランスの水害対策としての土地利用・建築規制について PPRN を中心に述べるとともに、我が国の水害対策としての土地利用・建築規制の課題を挙げ、さらに滋賀県で 2014 年に制定された流域治水条例について述べ、我が国の水害対策としての土地利用・建築規制の課題について考察し、水害対策としての土地利用・建築規制を行わないことに対する責任の所在が明確でなく、罰則規定もないことが行政の不作為を生じさせる結果となっていると指摘している。

なお、土地利用規制に用いられているわけではないが、避難等の確保を図るための情報として、洪水浸水想定区域図(図 1.7(国土交通省 中国地方整備局 岡山河川事務所 2020))が大河川を中心として公表されている。特定都市河川浸水被害対策法が 2021 年 4 月に改正され、水害対策としての土地利用規制を行うための全国的な枠組みが整備されつつあると考えられる。



図 1.6 土砂災害警戒区域等



©国土交通省 中国地方整備局 岡山河川事務所

図 1.7 洪水浸水想定区域図

(2) 米国

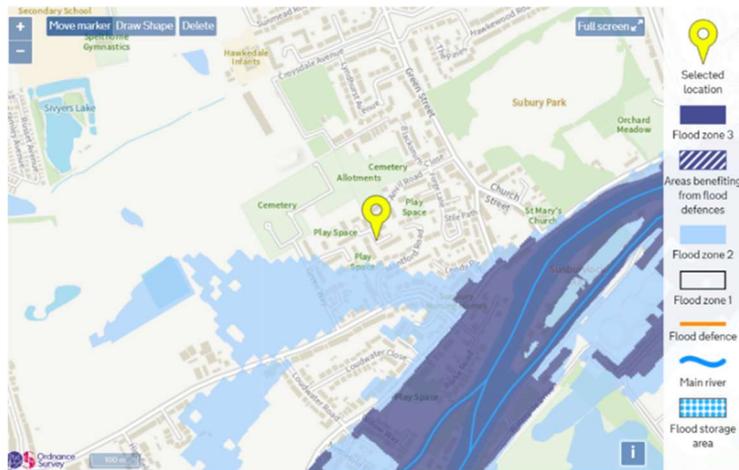
国家洪水保険において高リスク地区に立地する建物の保険料をより高く設定することにより土地利用の低リスク地区への誘導を図っている。連邦危機管理庁(Federal Emergency Management Agency)は、国家洪水保険制度の洪水地図(図 1.8(Federal Emergency Management Agency 2020))により場所ごとの浸水頻度等を公表している。高リスク地区の建物について公的資金を借り入れるには洪水保険への加入が必要条件である。水害リスク低減対策を実施しているコミュニティ内の保険料を割引く制度(Community Rating System)がある。



図 1.8 米国の洪水保険地図

(3) 英国

2006年12月にコミュニティ・地方自治省(Department for Communities and Local Government)発出の「計画政策書第25号:開発と洪水リスク」(Planning Policy Statement 25: Development and Flood Risk)(Department for Communities and Local Government 2009)に基づき、洪水確率に応じた洪水区域を設定(図 1.9(Government of UK 2021(2)))し、土地利用目的に応じて洪水確率のより低い区域へ土地開発を誘導する制度(逐次テスト(Sequential Test), 例外テスト(Exception Test))が実施されている。



©Crown Copyright (Gov. of UK); (2021)

図 1.9 英国の洪水地図

#### (4) 蘭国

約 95%の土地が堤防で守られており水害対策のための土地利用規制はない(環境保全のための規制はある). 約 5%(湖周辺など)の土地は堤防で守られておらず, 市町村による土地利用規制事例(例 床高さを一定以上とする)があるが原則本人の責任とされている. 川沿いの低地は 1995 年から建築禁止(リスク移転防止策を講じれば建築可能).

デルタ・プログラムで掲げられている 3 層からなる洪水対策(第 1 層:堤防等施設による洪水防御, 第 2 層:土地利用計画による洪水被害防止, 第 3 層:危機管理対応による洪水被害防止)は法的には可能であるが輸中堤内における土地利用計画による水害リスク低減対策例はまだない.(本項は板垣(2020)による)

#### (5) 仏国

1935 年の法律により洪水ハザード地図, 都市域のゾーニング及び建築規制が導入されて以来, 法的に強制されるハザード・ゾーニングが社会実装されている. 1982 年に洪水保険制度とともに洪水危険区域図(PER)が導入された. PER では高洪水危険区域(赤色区域)での建築が禁止され, 中洪水危険区域(青色区域)では建築規制(例 基準浸水位より 0.2m 以上の高さに建築すること)が行われた. 1995 年には PER が「予想される自然リスク防止計画」(PPR)に強化され全地方自治体に PPR の作成を義務付けた(RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment 2004). 将来の海面上昇を考慮した洪水リスク図(中央政府出先機関が作成)が作成され同図に基づく土地利用規制図が地域で検討・作成される(図 1.10(DGPR MTES 2016)).

2002 年通達(中央政府発出)が水害対策の原則であり水害リスクの高い土地では都市開発を規制する. ただし既に都市化が進んでいると規制内容が異なる. 既に開発されていればある程度までのリスクを許容し増築を認める(死に関わる重大リスクを除く).

1995 年設置のバルニエ基金により洪水危険区域にある資産を買い取ることができるようになった. 洪水氾濫時の流速・浸水深によるリスク分類が最悪ランクであり, 避難が困難で, なおかつ補強工事では予防できない(その建物の価値と同等以下の費用で対策できない)場合バルニエ基金で買い取る可能性がある.

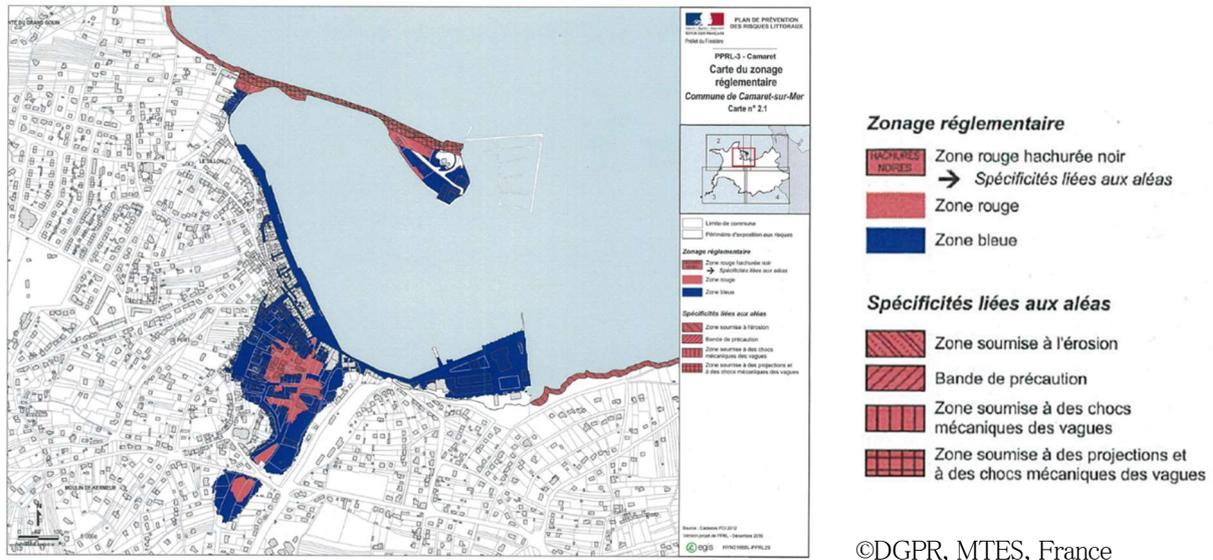


図 1.10 仏国の土地利用規制図

## 第 1.4 節 環境保全便益の評価手法・事例

第 1.2 節で述べたように、水害被害の防止・軽減には、場所ごとの浸水特性等に応じた土地利用が重要と考えられる。また、洪水流量を低減するためには、流域の保水・貯留機能を保全することが有効である。このため、場所ごとの環境価値を評価することにより流域の環境保全を促進し、その結果として水害被害の軽減を図る方策について検討するため、環境保全便益の評価手法について調査した結果について以下に述べる。

### 1.4.1 我が国の事例

#### (1) 海岸事業

海岸事業の費用便益分析指針(改訂版)(農林水産省 農村振興局, 農林水産省 水産庁, 国土交通省 河川局, 国土交通省 港湾局 2004)では、海岸環境保全便益の算定について、「海岸環境の保全効果は、快適性や満足感・安心感の増進などとして捉えられ、簡便な方法で経済的価値を計測することが難しい要素が多い」とし、「簡便な方法では算定できない効果については、CVM(Contingent Valuation Method: 仮想市場法)を用いて包括的に便益を算定すること」としている。また、「事業ごとのCVMの実施が困難な場合で、CVMによる類似した事例の便益算定が行われている場合は、その結果を参考にしてもよい」としており、具体的な便益算定手法はCVM以外明らかではない。

また、海岸利用便益の算定について、「海岸利用の促進は、海岸事業の事業目的の重要な柱のひとつであり、その効果を適切に評価する必要があるが、その効果は満足感や安心感の増進など簡便な方法で経済価値を評価することが難しい要素が多い。そのため、簡便な方法では算定できない効果については、CVM(Contingent Valuation Method: 仮想市場法)やTCM(Travel Cost Method: 旅行費用法)などを用いて包括的に便益を算定することとしている。ただし、事業ごとのCVMの実施が困難な場合で、CVMによる類似した事例の便益算定が行われている場合は、その結果を参考にしてもよい」と同様の記述となっている。

#### (2) 大規模公園

改訂第 4 版 大規模公園費用対効果分析手法マニュアル(国土交通省 都市局 公園緑地・景観課

2018)では、直接利用価値については旅行費用法、間接利用価値(表 1.6)については効用関数法または仮想的市場評価法(CVM)によるとしている。マニュアルに効用関数が提示されており、効用関数法による計測では適切に評価できないと考えられる場合には仮想的市場評価法(CVM)によるとしている。

表 1.6 大規模公園の間接利用価値のうち効用関数法による計測の対象

間接利用価値	間接的に公園を利用することによって生じる価値	都市環境維持・改善	緑地の保全
			動植物の生息・生育環境の保全
			ヒートアイランド現象の緩和
			気候緩和
			二酸化炭素の吸収
			騒音軽減
			森林の管理・保全、荒廃の防止
			都市景観
		季節感を享受できる景観の提供	
		都市形態規制	
		都市防災	洪水調整
			地下水涵養
			災害応急対策施設の確保(貯水槽、トイレ等)
			強固な地盤の提供
			火災延焼防止・遅延
			防風・防潮機能
			災害時の避難地確保
			災害時の救援活動の場の確保
復旧・復興の拠点の確保			

間接利用価値のうち、効用関数法による計測の対象となる価値

※改訂第4版 大規模公園費用対効果分析手法マニュアル(国土交通省 都市局 公園緑地・景観課 2018)5頁の表 1-7より

間接利用価値を測定するための効用関数及びパラメータ値は下記のとおりとしている。間接利用価値算出モデルのパラメータは、平成18年10月に全国を対象として実施したアンケート(2,142票回収)を用いて統計的に推定している。

$$W = a_1 A^{1/2} + a_4 d^2 + a_5 \delta + a_6 (I - x) \quad (1.1)$$

ここで、W:効用関数の確定項

A:緑地面積+広場面積(ha)

d:公園からの距離(km)

$\delta$ :防災拠点機能の有無(あり=1, なし=0)

I:所得

x:世帯の負担額(円/月)

$a_1 \sim a_6$ :パラメータ

なお、間接利用価値全体については上式を用いるが、環境と防災のそれぞれの価値を分けるために、下記の効用関数を用いてそれぞれの価値を個別に計測し、前出の効用関数を用いた結果をトータルコントロールとして、環境、防災のそれぞれの価値を計測するとしている。

$$W=a_2A_g^{1/2}+a_4d^2+a_6(I-x)\cdots\cdots\cdots\text{(環境)} \quad (1.2)$$

$$W=a_3A_0^{1/2}+a_4d^2+a_5\delta+a_6(I-x)\cdots\cdots\text{(防災)} \quad (1.3)$$

ここで、 $A_g$ :公園の緑地面積(ha)

$A_0$ :公園の広場面積(ha)

また、パラメータの推定値として表 1.7 の値が示されている。

表 1.7 大規模公園の効用関数のパラメータ推定結果

	$a_1$ (緑地 + 広場) 面積 ( $ha^{1/2}$ )	$a_2$ 緑地面積 ( $ha^{1/2}$ )	$a_3$ 広場面積 ( $ha^{1/2}$ )	$a_4$ 距離 km*km	$a_5$ 防災拠点機能	$a_6$ 負担金 (円/月)
全体	0.0234962	-	-	-0.0006795	0.6070674	0.0004354
内 環境	-	0.1134198	-	-0.0011004	-	0.0007764
訳 防災	-	-	0.0526422	-0.0007343	0.4713709	0.0005315

※改訂第 4 版 大規模公園費用対効果分析手法マニュアル(国土交通省 都市局 公園緑地・景観課 2018)32 頁の表 3-1 より

### (3) 小規模公園

改訂第 2 版 小規模公園費用対効果分析手法マニュアル(国土交通省 都市局 公園緑地・景観課 2017)では、小規模公園の利用特性を踏まえ、効用関数法または仮想市場評価法を利用するものとし、より汎用性の高い効用関数法による手法を提示している。なお、効用関数のパラメータについては 2006 年 4 月に全国を対象として実施したアンケート(2,080 票回収)を用いて統計的に推定している。

世帯の効用関数は確定項と確率項(誤差項)からなるランダム効用で定義している。また、確定項は説明要因の線形関数とし、式の形は以下のとおりとしている。

$$U=V+\varepsilon \quad (1.4)$$

○「利用」効果について

$$V=a_1A_0^{1/2}+a_2A_1^{1/2}+a_3d^2+a_5(I-x) \quad (1.5)$$

○「環境」効果について

$$V=a_0A^{1/2}+a_3d^2+a_5(I-x) \quad (1.6)$$

○「防災」効果について

$$V=a_0A^{1/2}+a_3d^2+a_4\delta+a_5(I-x) \quad (1.7)$$

ここで、U:効用

V:効用関数の確定項

$\varepsilon$ :効用関数の確率項

$A_0$ :オープンスペース面積( $m^2$ )

$A_1$ :緑地面積( $m^2$ )

A:緑地面積( $m^2$ )+オープンスペース面積( $m^2$ )+その他面積( $m^2$ )

d:公園からの時間距離(分)

$\delta$ :防災施設の有無(あり\*=1, なし=0)

※当該公園内および防災計画上隣接する施設において、備蓄倉庫、耐震性貯水槽、非常用トイレの 3 施設が利用可能な状態であれば「1」とする。

I:所得

x:世帯の負担額(円/月)

$a_i$ :パラメータ

また、各パラメータの推定結果が表 1.8 のとおり示されている。

表 1.8 小規模公園の効用関数のパラメータ推定結果

		利用	環境	防災
$a_0$	(オープンスペース面積 + 緑地面積 + その他面積) (m <sup>2</sup> ) の平方根	-	0.005409	0.003331
$a_1$	オープンスペース面積 (m <sup>2</sup> ) の平方根	0.007496	-	-
$a_2$	緑地面積 (m <sup>2</sup> ) の平方根	0.002495	-	-
$a_3$	公園までの所要時間 (分) の2乗	-0.001684	-0.001014	-0.001246
$a_4$	防災施設の有無	-	-	0.525036
$a_5$	負担額(円/月)	0.000813	0.0007	0.000352

※改訂第 2 版 小規模公園費用対効果分析手法マニュアル(国土交通省 都市局 公園緑地・景観課 2017)13 頁の図表 2-3 より

#### (4) 土地改良事業

土地改良事業の費用対効果分析に関する基本指針(農林水産省 農村振興局 2008)では、表 1.9 のとおり、防災事業による景観・環境保全効果等が効果項目として挙げられている。なお、景観・環境保全効果についてはCVMにより算定するものとされている。

表 1.9 土地改良事業の効果項目

効果項目	主要工程	用水・排水整備	区画整理	農道整備	防災整備
食料の安定供給の確保に関する効果	作物生産効果	○	○	○	○
	品質向上効果	○		○	
	営農経費節減効果	○	○		○
	維持管理費節減効果	○	○	○	○
	営農に係る走行経費節減効果				○
農業の持続的発展に関する効果	耕作放棄防止効果		○		
	災害防止効果(農業関係資産)	○	○		○
	農業労働環境改善効果	○	○		
農村の振興に関する効果	災害防止効果(一般資産)	○	○		○
	地域用水効果	○			
	一般交通等経費節減効果			○	
	地籍確定効果		○		
	国土造成効果				
多面的機能の発揮に関する効果	非農用地等創設効果		○		
	災害防止効果(公共資産)	○	○		○
	水源かん養効果	○	○		
	景観・環境保全効果	○			○
	都市・農村交流促進効果	○			○

注 1) 表の効果項目以外においても、地域の特性を考慮し、簡便的に必要な費用を効果として算定する

手法(費用=効果)以外を用いて定量化が可能な場合, 効果として見込むことができることとする。

ただし, その算定手法については客観性及び妥当性を確保するため学識経験者等の意見を踏まえることとする。

注2) 国土造成効果については, 干拓事業のみ該当する。

※土地改良事業の費用対効果分析に関する基本指針(農林水産省 農村振興局 2008)5頁の表-2より

#### (5) 林野事業

林野公共事業における事業評価マニュアル(林野庁 森林整備部 計画課 2020)では, 表 1.10(1)及び(2) のとおり事業区分別評価便益が示されている。なお, 具体的な便益算定式は例えば図 1.11 及び次式のように提示されているが, 必要な単価(式中のD)はマニュアルに見当たらない。

$$B_{0-1}(\text{円}) = \sum (D \times A) / (1+i)^t \quad (1.8)$$

ここで,  $B_{0-1}$ : 事業による生物多様性保全便益

$\sum$ : t=1 から T までの合計

D: 土地単位面積当たりの生物多様性保全便益(円/ha)

A: 事業実施面積(ha)

T: 事業実施年から3年間

i: 割引率

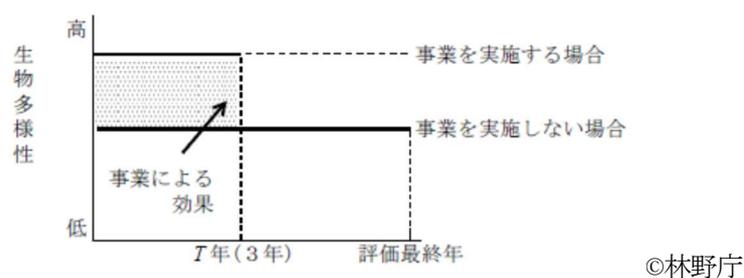


図 1.11 林野庁事業による生物多様性保全便益評価概念図

表 1.10(1) 林野公共事業における評価便益(1/2)

事業名	水源涵養			山地保全		環境保全							災害防止			その他								
	洪水防止	流域貯水	水質浄化	土砂流出防止	土砂崩壊防止	炭素固定	気候緩和	騒音軽減	飛砂軽減	風害軽減	大気浄化	霧害軽減	火災防備	漁場保全	生物多様性	保健休養	山地災害防止	人命保護	なだれ災害防止	湖害軽減	塩害軽減	海岸侵食防止	海岸防災林造成に関する文化保全	
復旧治山（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)の(ア)に定める事業） 復旧治山（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)の(ア)に定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○				○			●	○	○	●	●	●				
山地災害重点地域総合対策（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のイに定める事業） 山地災害重点地域総合対策（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)のイに定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	○	○	●	●	●					
流木防止総合対策（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のウに定める事業） 流木防止総合対策（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)のウに定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	○	○	●	●						
緊急総合治山（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のエに定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	○	○	●	●	●					
緊急予防治山（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のオに定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	○	○	●	●	●					
緊急機能強化・老朽化対策（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のカに定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	○	○	●	●	●					
地域防災対策（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)のオに定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
地すべり防止（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のキに定める事業） 地すべり防止（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)のカに定める事業）				●	●	○	○	○			○			○	○	○	●	●						
緊急総合地すべり防止（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のクに定める事業）				●	●	○	○	○			○			○	○	○	●	●						
防災林造成（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のケの(7)に定めるなだれ防止林） 防災林造成（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)のキに定めるなだれの危険防止）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			○	○	○	●	●						
防災林造成（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のケの(7)に定める土砂流出防止林） 防災林造成（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)のキに定める火山泥流等の防備）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			○	○	○	●	●						
防災林造成（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のケの(7)に定める海岸防災林） 防災林造成（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)のキに定める飛砂、湖害、風害又は霧害の防備）						○	○	○	●	●	○	●	●	○	○	○				●	●	●	○	

※林野公共事業における事業評価マニュアル(林野庁 森林整備部 計画課 2020)1-II-4 頁より

表 1.10(2) 林野公共事業における評価便益(2/2)

事業名	水源涵養			山地保全		環境保全										災害防止				その他				
	洪水防止	流域貯水	水質浄化	土砂流出防止	土砂崩壊防止	炭素固定	気候緩和	騒音軽減	飛砂軽減	風害軽減	大気浄化	霧害軽減	火災防備	漁場保全	生物多様性	保健休養	山地災害防止	人命保護	なだれ災害防止	潮害軽減	塩害軽減	海岸侵食防止	海岸防災林造成に関する文化保全	
防災林造成（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のケの(7)に定める防風林） 防災林造成（国有林治山事業実施要領第3の1の(1)のキに定める飛砂、風害の防備）						○	○	○	●	●	○			○	○	○								
予防治山（国有林治山事業実施要領第3の1の(2)に定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	○	○	●	●	●					
防災林造成（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(2)のケの(4)のaに定める保安林緊急改良）	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	●	●	○	○	●			●	●	●	●	○	
水源森林再生対策（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(3)のアの(7)に定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	○	○	●		●					
水源地域整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(1)のAに定めるもの）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			○	○	○	●		●					
水源地域整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(1)のイに定めるもの）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	○	○	●		●					
奥地保安林保全緊急対策（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(3)のアの(4)に定める事業） 水源地域整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(1)のウに定めるもの）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			●	●	●	●		●					
水源の里保全緊急整備（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(3)のアの(9)に定める事業） 水源地域整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(1)のエに定めるもの）	●	●	●	●	●	○	○	○			○			○	○	○	●		●					
保安林改良（民有林補助治山事業実施要領第2の1の(3)のイの(7)に定める事業） 保安林整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(2)に定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	●	●	○	○	○	●		●	●	●	●	○	
保安林管理道整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(3)に定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	●	●	○	○	○	●		●	●	●	●		
共生保安林整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(4)に定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	●	●	○	○	●	●		●	●	●	●	○	
共生保安林整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(4)のAに定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	●	●	○	●	●	●		●	●	●	●	○	
共生保安林整備（国有林治山事業実施要領第3の2の(4)のイに定める事業）	●	●	●	●	●	○	○	○	●	●	○	●	●	○	○	●	●		●	●	●	●	○	

(注1) ● 直接的効果 ○ 間接的效果

(注2) 民有林直轄治山事業及び直轄地すべり防止事業については、該当する事業の便益を適宜選択して評価することとする。

※林野公共事業における事業評価マニュアル(林野庁 森林整備部 計画課 2020)1-II-5 頁より

### 1.4.2 英国の洪水対策事業による洪水リスク低減以外の便益評価事例

英国の Eddleston での洪水対策事業による全体の費用・便益が表 1.11 (Environment Agency 2018), ハビタットごとの環境便益が表 1.12 (eftec 2010) のとおり示されている. なお, Eddleston での洪水対策事業の概要については Comins, et al (2020) に写真とともに示されている.

表 1.11 英国 Eddleston での洪水対策事業による費用便益評価事例

事例	種類と主な対策	便益 (50年間分の現在価値)	費用 (50年間分の現在価値)	費用 - 便益比
Eddleston Water	氾濫原: 貯留と貯水	20万~600万ポンドの可能性	140万ポンド、うち72万3千ポンドは工事費用	より多くの便益が見込まれるため、恐らくプラス

※Environment Agency (2018)31 頁の Table 2.2 より作成

表 1.12 英国 Eddleston での自然環境ごとの経済価値評価事例

生息・生育域と環境により提供される便益	経済価値 (ポンド 2008年価額)		
	指標的な値	範囲	単位
内陸の沼地: 水質改善、レクリエーション (非消費的)、生物多様性、美観	~1300	200~4300	/ha/年
塩性湿地: 水質改善、レクリエーション (非消費的)、生物多様性、美観	~1400	200~4500	/ha/年
感潮域の干潟: 水質改善、レクリエーション (非消費的)、生物多様性、美観	~1300	200~4300	/ha/年
泥炭湿地: 水質改善、レクリエーション (非消費的)、生物多様性、美観	~300	0~1000	/ha/年

注: 当時利用可能な知見に基づく指標となる値. 新たに得られた知見に応じて更新が必要である. 炭素蓄積による便益は含まれていない.

※eftec (2010)13 頁の Table 2.2 より作成

### 1.4.3 本節のまとめ

上述の我が国の事例については, 公園事業を除き, 環境便益の評価手法が原則として CVM (仮想市場法) とされているなど, 一般化するには課題が少なくないと考えられる.

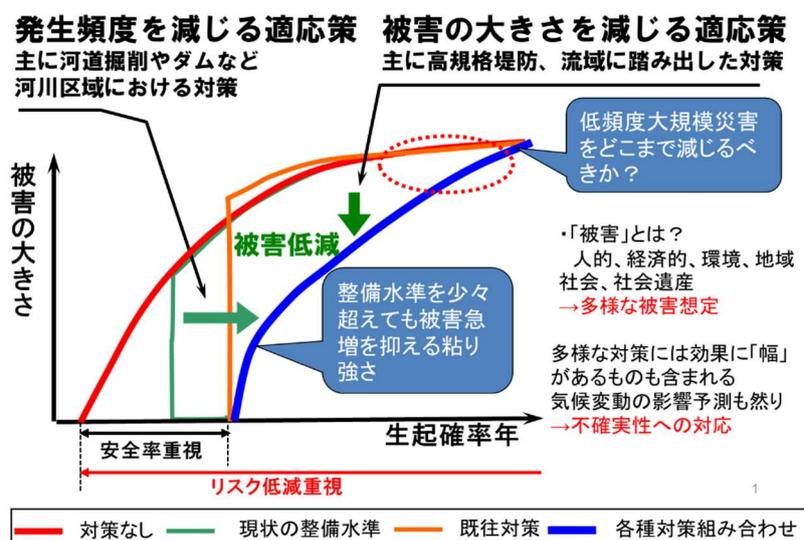
英国の事例については, ハビタットの種類ごとに面積・年あたり便益が示されているが, 根拠についてさらなる調査が必要である. また, 湿地等以外の便益の評価事例を見つけることが出来なかった.

これらを踏まえ, 本研究では, 環境便益を考慮することによる水害対策の促進手法の研究を当面断念し, 水害被害の軽減効果の評価手法の研究を先行して行うこととした.

## 第 1.5 節 既存施策と本研究の位置づけ

地球温暖化に伴う気候変動の影響による豪雨・洪水の強大化, 高頻度化は, 従来の治水施設整備による治水安全度の確保を重視する施策から, 洪水による被害のリスク低減を重視する施策への移行を求めると考えられる. 両施策の観点の違いを概念的に図 1.12 (国土交通省 国土技術政策総合研究所

気候変動適応研究本部(2013)に加筆)に示す。図 1.12 の詳細については第 1.7 節で述べる。



©国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部

図 1.12 洪水リスク低減対策の検討のためのNILIM 枠組み

同図横軸の下に黒矢印で示す、洪水対策実施前後の治水安全度(安全にやり過ごすことのできる洪水規模)に主に着目するのが治水安全度を重視する施策であり、一方、同赤矢印で示すように、これに加え、整備後の治水施設の設計規模を上回る洪水時の被害リスクの低減をも重視するのがリスク低減施策の観点と言えよう。このような観点の移行が必要とされる理由は、地球温暖化に伴う気候変動の影響により、治水施設の設計規模を超過する洪水が頻発すると見込まれるためである。なお、従来の治水安全度の向上を重視する施策のみで気候変動に適応しようとするのであれば、治水施設の設計規模を大幅に大きくし、治水施設の設計規模を超過する洪水の生起頻度を気候変動の影響の顕在化前と同程度に抑える必要があると考えられるが、第 1.1 節で述べたとおり、従来の計画降雨と気候変動の影響を考慮し予測される降雨との差は比較的大きいものとなることを見込まれ、また、気候変動の影響の将来予測においては不確実性を避けることが出来ないことから、治水安全度の向上を重視する施策では適応が困難と考えられる。Garrelts and Lange(2011)は、気候変動下のドイツの洪水対策(沿岸部の洪水対策と河川の洪水対策の 2 事例)について事例分析を行い、治水安全度を重視する施策からリスク低減を重視する施策への移行の必要性に触れつつ、このような移行が行政現場の特性(洪水防御施設に求められる機能の評価の論議は遡及的で経験的な方法に依拠しているため、気候変動モデルに基づく気候研究とその確率的な仮定における中心的な特徴である不確実性を系統的に避ける傾向がある)により困難であることを指摘している。Gersonius, et al. (2016)は、洪水対策においてはレジリエンス(社会・生態系において、洪水など周期的に起こる擾乱に対して重要な構造、作用、フィードバックを維持する能力)の強化が重要であるが、オランダ等のように洪水防御施策を重視する国々ではレジリエンスの強化対策の導入が困難であることを指摘している。

図 1.13 に洪水対策の分類と本研究の対象範囲を示す。同図では横軸が洪水の再現期間(右ほど再現期間が長い稀な大きな洪水)、縦軸が洪水発生時の浸水深、氾濫流速等の大きさ(洪水氾濫時に被害対象物が受ける外力の厳しさ)を表している。レベル 1 規模以下の洪水の氾濫を防止するための堤防、ダム等の整備による従来の洪水対策(いわゆるハード対策)は、同図左側の部分に相当し、一方、レベル 2 規模の洪水を対象として、避難等により命だけは守ろうとする対策は同図右端の部分に相当する。また、

気候変動の影響により洪水発生が頻発化することが見込まれることから、左から右方向への矢印と、気候変動の影響下で想定される境界線のイメージ(赤破線)を重ねて示した。このような気候変動の影響による洪水の頻発化を踏まえると、気候変動の影響を考慮したレベル 1 に対応した治水施設の整備を急ぐとともに、命だけは何としても守るためのレベル 2 対策に加え、両対策の間のギャップを埋めるための、レベル 1.5 等の洪水時の地域の速やかな復旧・復興を図るためのレジリエンス強化対策が必要であることがわかる。そして、このレジリエンス強化対策には、治水施設の整備規模を超える洪水時に、人命の確保に加え、住家、農地等の資産被害等を軽減するための対策(以下「減災対策」という)が重要と考えられる。なお、近年の洪水災害のたびに実態が明らかとなっている、高齢化等に伴う避難率の低さが原因と考えられる人的被害の続発を踏まえた人的被害防止対策としても、住家の被災防止対策は有効と考えられる。

減災対策の推進に当たっては、流域の各主体が独自に実施する対策を単に束ねるのではなく、相互作用を考慮するなど有機的に連携して被害防止・軽減を図っていくことが重要である。このような有機的な連携には、治水施設の整備状況に応じた土地利用や、土地利用に応じた治水施設の整備の検討が含まれる。これまで、治水施設の防御対象資産の多寡により治水事業箇所の優先順位付けを行ってきたことから、想定氾濫域の土地利用は治水施設整備において一定程度考慮されてきたと考えられるが、原則としてレベル 1 以下の洪水を対象とした考慮である。気候変動下においては、これに加えて、治水施設の整備規模を超える洪水時の被害軽減の観点から、治水施設の整備に応じた土地利用や、土地利用に応じた治水施設の整備等の検討・実施が重要と考えられる。

このような有機的な連携による減災対策等を推進するには、洪水時の被害リスクの低減効果を踏まえた各種対策の具体的な検討手法、ある主体が行う減災対策等による被害防止・軽減効果を関係する主体が理解しやすいように評価し、各主体が実施しうる減災対策等の選択肢を踏まえ、最適な減災対策等の組み合わせについて検討する手法、各主体による減災対策等の実施における制約条件等を踏まえ、各減災対策等の内容を変更・拡大することも視野に入れたリスクコミュニケーション手法等の確立が必要と考えられるが、いずれも未確立である。

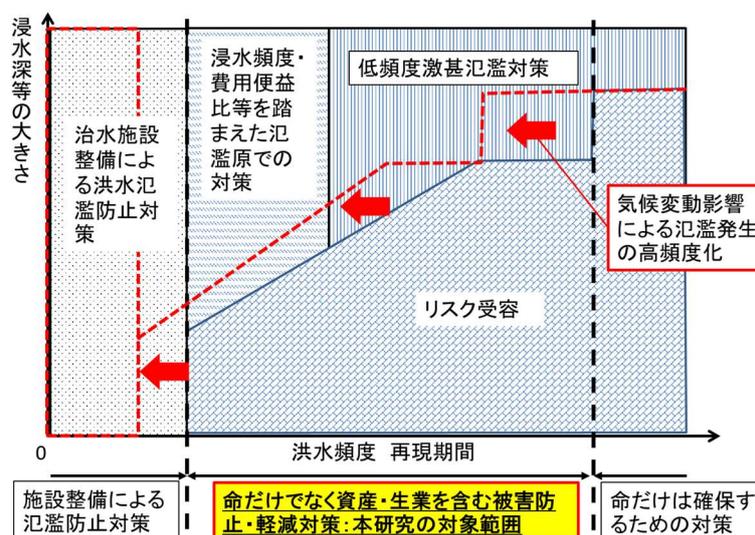


図 1.13 洪水対策の分類と本研究の対象範囲

## 第 1.6 節 研究の目的

気候変動の影響による豪雨・洪水の頻発を踏まえ、治水施設の整備促進を前提として、治水施設の整備規模を超過する洪水時の氾濫被害を防止・軽減するための様々な主体による減災対策の検討・調整に

必要なリスクコミュニケーション、合意形成の促進を図るため、減災対策の具体的な検討手法と減災対策による効果の評価手法を確立する必要がある。

図 1.14 に示すように、洪水被害の防止・軽減対策には様々な種類のものが考えられるが、減災対策の具体的な検討手法と減災対策による効果の評価手法の確立に向けた議論に資するため、本研究では先行的に下記の 2 種類の減災対策について検討を行った。

- 1) 治水施設の整備規模を超過する洪水時の堤防越水箇所を制御することによる氾濫水量低減対策 (第 2 章で述べる)
- 2) 河川改修とともに行う氾濫原における暴露・脆弱性低減対策 (第 3 章で述べる)

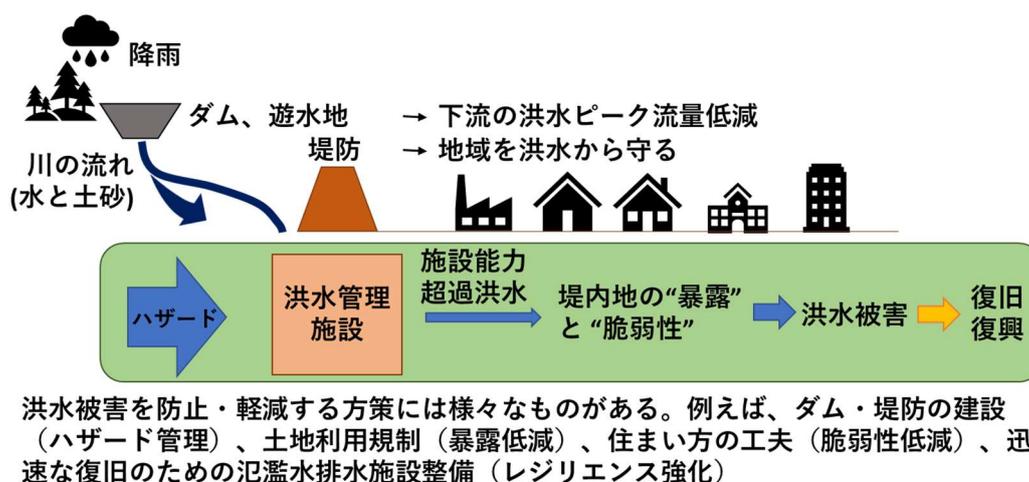


図 1.14 洪水被害の様々な防止・軽減方策

本研究の新規性は次の 2 点である。

- ① 流域治水の推進に必要な減災対策の具体的な検討手法及び減災対策による効果の評価手法の確立に向けた議論に資するため、下記 2 つの具体的な手法の提案を行った
  - ア) 治水施設の整備規模を超過する洪水時の堤防越水地点の制御による氾濫水量の低減対策における堤防越水地点の検討手法
  - イ) 河川改修と氾濫原での暴露・脆弱性低減対策による統合的な効果の評価手法
- ② 上記手法を試験適用し適用性を検証するとともに減災対策による効果を試算した

## 第 1.7 節 既往の研究と本研究の位置づけ

### 1.7.1 リスク低減を重視する施策への移行に必要な検討・評価手法に関する研究

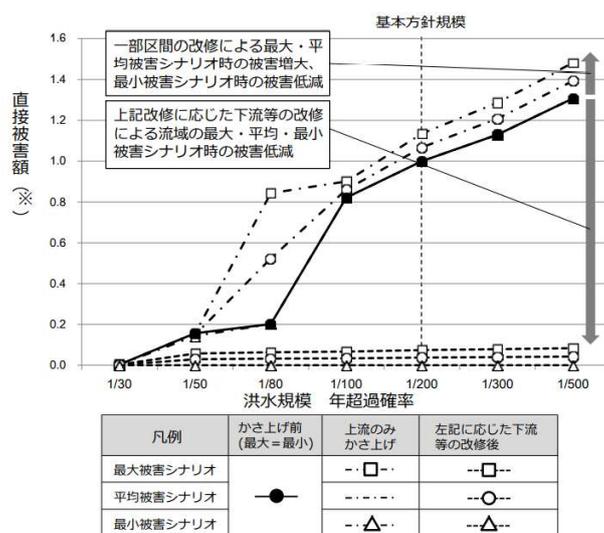
従来の治水安全度を重視する施策から、洪水による被害リスクの低減を重視する施策への移行に当たっては、それに応じた施策の検討・評価手法を導入する必要がある。治水施設の設計規模を上回る規模の洪水を含むリスクの表示手法の 1 つとして、洪水リスクカーブがある。洪水リスクカーブとは、洪水の大きさと洪水被害との間の関係を表すグラフである。洪水リスクカーブには、洪水リスク低減対策による洪水リスク低減効果を評価する際に、起こりうる様々な洪水規模を幅広く考慮することができる利点がある。田中ら (2015) は、地震のイベントカーブに言及し、これまでリスクカーブは地震の評価に主に用いられてきたとしている。

国土交通省 国土技術政策総合研究所 (以下、「国総研」と言う) 気候変動適応研究本部 (2013) は、河川管理者が実施する洪水対策を中心として包括的な洪水リスク低減対策の検討を具体化するために、

図 1.12(国総研 気候変動適応研究本部(2013)に加筆)に示す洪水リスク評価の枠組み(以下「NILIM 枠組み」という)を提案している。NILIM 枠組みは洪水リスクカーブと同様の概念に基づいている。NILIM 枠組みの長所の 1 つは、国土交通省の各河川事務所が河川改修工事の代替案ごとの洪水リスク低減効果を評価するために NILIM 枠組みを具体的に適用するための手法(第 3 章で後述)が、NILIM 枠組みとともに提示されている点である。

図 1.12 において、横軸は洪水規模(例 再現期間)であり、縦軸は洪水生起時に予想される洪水被害の大きさ(例 直接経済被害額, 死者数)である。図 1.12 の関係曲線(以下「リスクカーブ」という)は対象地域のリスクの輪郭を示す。堤防のような洪水対策施設が整備されるとリスクカーブは左から右へと移る。一方、洪水時の被害の大きさを低減するための氾濫原での対策などが実施されれば、リスクカーブは上から下へと移る、つまり、洪水被害の発生頻度は変わらない又は少ししか変わらないが、洪水被害の大きさは減少する。なお、洪水被害の大きさは、洪水の発生時期(例 農地の作物が浸水に対して特に弱い時期、避難等が困難となりがちな深夜)、危機管理対応等により変わりうることから、リスクカーブにおいても不確実性の幅を考慮することが重要であるが、図 1.12 では省略している。

竹中ら(2015)は NILIM 枠組みを国土交通大臣が直轄管理する一級河川の区間のうちの 2 つに試験的に適用した。しかし、破堤シナリオ群を考慮するために膨大な計算作業が必要であることが判明したことから、NILIM 枠組みの現場での適用拡大には計算作業の簡易化が重要であると指摘している(図 1.15 (竹中ら 2015))。



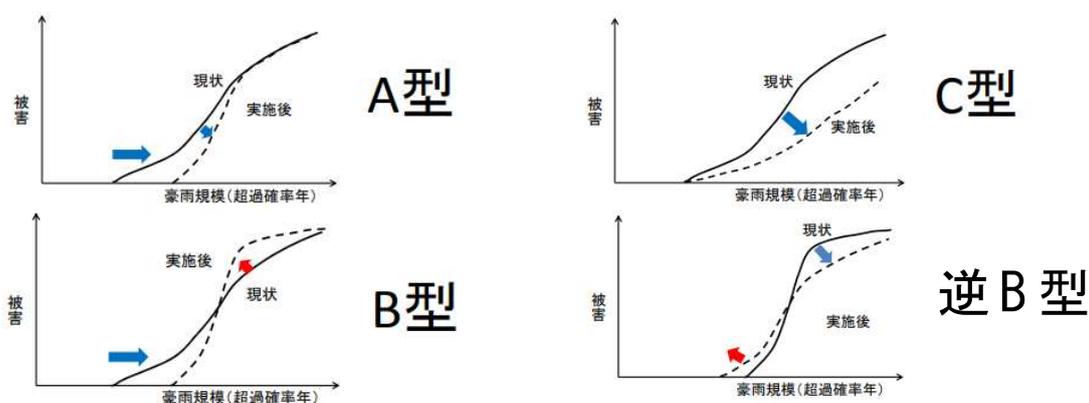
©土木学会

図 1.15 一級河川モデル区間における河川改修による洪水規模別の直接被害額の試算例

また、国総研 気候変動適応研究本部(2017)では、NILIM 枠組みに基づき、表 1.13 及び図 1.16(原典ではカウンターB 型とされている類型を逆 B 型と表記している)のように水害リスク低減効果の観点から洪水対策を 4 つに類型化するとともに、将来の気候変動の影響により豪雨・洪水生起頻度が增大した場合の被害の増分(気候変動の影響の受けやすさ)について図 1.17 のように気候変動影響感度線(赤破線)を導入し分析し、リスクカーブを出来るだけ寝かせる対策が被害の増大防止の観点から有効であることを指摘している。

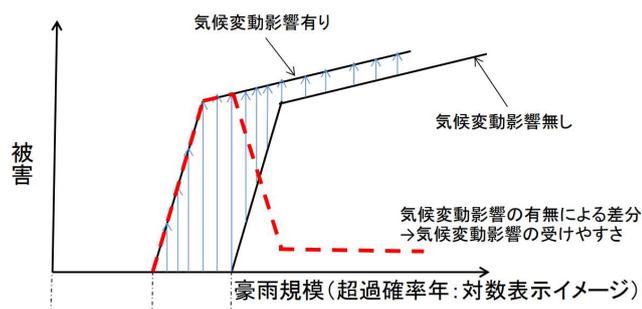
表 1.13 洪水対策によるリスク低減効果の4類型

	A型	B型	C型	逆B型
主なリスク低減効果	無被害洪水規模が拡大	同左	氾濫発生時の被害が低減される	大規模洪水氾濫時の被害が低減される
限界・短所	大規模洪水氾濫時の被害低減効果ほぼなし	大規模洪水氾濫時には現況よりも被害が大きくなる	無被害洪水規模は変わらない	中規模洪水時の氾濫被害が現況より増大する
該当する洪水対策例	一律的な河道掘削	一律的な築堤で下流へのリスク移転が顕著な場合	高規格堤防の整備	連続堤の霞堤化



©国総研 気候変動適応研究本部

図 1.16 様々な洪水被害防止・軽減対策によるリスク低減効果の類型



©国総研 気候変動適応研究本部

図 1.17 気候変動影響により洪水頻度が増大した場合の洪水被害の増分

Apel, et al. (2004)は、ケルン下流のライン川を対象にして、上流の破堤点近傍の氾濫原の広さが下流のリスクカーブの形状を左右することを示している。De Bruijn (2004)は、レジスタンスとレジリエンスの違いをリスクカーブを用いて説明するとともに、レジリエンスの3つの側面(洪水に対する洪水リスク管理システムの対応の大きさ、洪水規模の増大に応じた対応の増大の緩やかさ、復旧速度)に着目した評価指標を提案している。Apel, et al. (2006) はドイツのライン川において、上流における堤防破堤と下流の洪水リス

クとの関係を分析している。Merz and Thieken (2009) はドイツのケルン市内の洪水リスクカーブにおける認識による不確実性の幅を分析している。柿本ら(2011)は約 1km<sup>2</sup> の小地域を対象に洪水リスクカーブを導出し、遊水地整備による効果と対象地域内の市街化による影響について分析している。平野と大楽(2014)は、都内 23 区を対象として、過去の降水量データを使用して被害発生時と全期間の降水量頻度分布を比較し、両者の分布は良く対応しており、降水量の頻度分布で水害被害を推定可能と主張している。田中ら(2015)は降雨の時空間分布を考慮した洪水リスクカーブ導出手法を提案し、京都の由良川流域の洪水調節ダムによる効果を示している。田中ら(2016)は洪水リスクカーブの導出において用いられる年最大洪水流量の確率関数の評価のための総合確率手法の改良について研究している。Tanaka, et al.(2017)は、淀川流域を対象として、上流域における河川からの越流とダム操作が下流の超過洪水の頻度に与える影響について考察している。田中ら(2018)は、洪水リスクカーブ導出手法を利用して、洪水被害確率地図を提案するとともに、モデル地区における場所ごとの土地の嵩上げによる将来の洪水リスク低減効果を評価している。Mens and Clijn(2015)は IJssel 川を対象として、堤防の嵩上げ、高水敷切り下げ、堤防強化、一部嵩上げによる治水システムのロバストネスの強化効果についてリスクカーブ(レスポンスカーブと呼称)により評価している。Morita(2014)は東京の木場地区(面積約 6km<sup>2</sup>)を対象に、非透水性の土地の面積の割合を低減することによる都市洪水被害の軽減効果についてリスクカーブによる評価を試みている。Gersonius, et al.(2016)はオランダの Dordrecht 島において従来の洪水防御施設中心の対策と、施設以外の対策を組み合わせたレジリエンス強化対策の比較をリスクカーブ(レスポンスカーブと呼称)を用いて行い、後者の方がリスク低減効果が大きいことを示す一方で、オランダのような洪水防御施設を重視する施策の国々においてレジリエンス強化対策を導入しがたい理由について考察している。Nguyen, et al.(2020)は、欧州の 379 流域を対象として極値統計モデルを作成し、洪水リスクカーブを用いて国・大陸スケールの洪水リスク評価を行い、地域特性を考慮しないと 200 年確率規模洪水時の被害が過大評価となっているとしている。Ginkel, et al.(2021)は、欧州の道路の洪水リスクについてリスクカーブ(ダメージカーブと呼称)を用いて分析し、ホットスポット(被災しやすい道路区間)を抽出している。Hendrawan and Komori(2021)は、洪水リスクカーブ(バルネラビリティカーブと呼称)に基づき、リモートセンシングを用いてコメの収量減と洪水による浸水深の関係を導出し、インドネシアの Solo 川の 2007 年洪水を対象にケーススタディを実施している。

表 1.13 及び図 1.16 に示す 4 種類のうちの A 型、B 型については、河川改修等による無被害洪水規模の拡大施策が該当するが、一級水系の国の直轄管理区間の 2 河川を対象に河川改修事業の選択肢の間の相対評価を行った事例(竹中ら 2015)があり、上流区間のみ改修する選択肢の場合、河川整備規模を超過する洪水時に流域全体としてのリスクが増大する場合があります、このような場合が B 型であり、そうでない場合が A 型に該当すると考えられる。柿本ら(2011)、田中ら(2015)、Mens and Clijn(2015)、Morita(2014)の事例は A 型に該当する。C 型については、田中ら(2018)の事例が該当する。また、河川改修事業と宅地嵩上げを伴う住家移転(C 型に該当)による統合的なリスク低減効果について、開発途上国の限られた利用可能データに基づき評価したのが本稿第 3 章である。

しかし、残る逆 B 型については、Gersonius, et al.(2016)がオランダの Dordrecht 島において洪水防御施設により守られた地区を 2 線堤により分割することによる経済被害の軽減効果を示した事例において、リスクカーブ(レスポンスカーブと呼称)が逆 B 型となっていることが読み取れるが、洪水防御施設自体に土木施設を追加することによる逆 B 型の対策についての検討・評価事例は見当たらない。

本稿(第 2 章)は、洪水防御施設自体に土木施設(越流堤)を追加することによる逆 B 型の施策の具体的な検討手法について、一連の堤防により防御された氾濫原を対象に提案を行い、モデル地区にて試験適用を行うとともに、被害軽減効果について評価した点が既往研究にはない点である。

### 1.7.2 治水施設の整備規模を超過する洪水時の堤防越水地点の制御による被害軽減対策

#### (1) 治水施設の設計規模を超過する洪水時の住家等被害の軽減対策に関する研究事例

治水施設の整備規模を超過する洪水時の減災対策としては、図 1.4 に流域治水の 3 本柱として示した①から③までの 3 種類(複数種類の効果を併せ持つものを含む)が考えられる。本研究では、従来対象としてきた人命を守ることに加え、住家等被害を併せて軽減する対策を対象とするため、住家等被害軽減対策を中心とした選択肢の例について以下に述べる。

①(ハザード対策)としては、堤防の破堤防止対策がある。長年に渡り営々と築造されてきた堤防は、材料の入手しやすさ、築造・かさ上げ・補修の容易さなどから土で築造されることが一般的であるが、このような土堤は越水に対して弱く、洪水によって堤防が壊れる破堤の原因の 74%が越水との調査結果がある(末次 2006)。堤防強化による破堤防止対策については、越水堤防の研究(建設省 土木研究所 河川研究室 1984)があり、抜本的な破堤防止対策として高規格堤防(国土開発技術研究センター 2000)の整備が現在大都市部の一部区間で進められている。また、洪水水位に応じて洪水流の一部を堤内地に氾濫させ河川水位を下げることにより破堤を避けるとともに、下流のピーク洪水流量を低減させる遊水効果がある霞堤、河川からの氾濫水の広がりを制御する二線堤、氾濫流を制御する防災樹林帯があり、霞堤による遊水効果と治水効果(橋本ら 2019)、二線堤による氾濫流制御と被害軽減効果(建設省 土木研究所 河川部 都市河川研究室 2000)、防災樹林帯による氾濫流制御(末次ら 1998)、水防林が氾濫流に与える影響と減勢効果(秋山 2006;秋山ら 2011(1);秋山ら 2011(2))について研究されている。

一定流量を超える洪水時に堤内地へ氾濫させ河川流量を低減させることにより破堤・利水施設被害等を避ける治水手法が伝統的治水対策において用いられており、江戸時代からの佐賀平野の野越(のこし)の事例(田辺ら 2001)、堰操作による下流の氾濫防止手法について新潟平野の阿賀野川右岸の事例(田辺ら 2000)がある。野越とは河川堤防に設けられた越流堤等を意味し、洪水に際して下流の被害を防ぐために、規定以上の流量を野越から堤内地に引き入れ、下流において河川に放流するものである(図 1.18(国土交通省 九州地方整備局 2016))。なお、田辺ら(2001)には野越周辺の住民意識と都市利用の変化について、「野越を嵩上げて締め切ることは、対岸や下流に対する氾濫の危険度が増大するので簡単にはできない。城原ダムが完成したとしても、洪水がなくなる訳ではなく、同じである」との意識が地域に残っている一方で、「集落に近接した野越以外の受堤は、圃場整備時に邪魔であったので、敷きならした」「1965 年代後半(昭和 40 年代)以降、城原川氾濫による被害を受けていないこともあり、土地利用は次のように、野越からの氾濫による被害が増大する方向に土地利用は進んでいる」とし、受堤(野越から氾濫した水による住家等の被害を防ぐための堤防)の撤去、野越周辺での宅地開発、氾濫流が流下する区域の 1975 年代(昭和 50 年代)以降の住宅地への変化などを挙げている。

②については、滋賀県などにおいて一定の浸水深・頻度の区域を市街化区域に編入しないこと(国総研 気候変動適応研究本部 2019)による新規開発抑制が行われている。また、氾濫原管理(末次 2004)、水害被害防止のための土地利用規制(姥浦ら 2012;木内 2019)の研究が行われている。海外では 1.3.3 及び表 3.1 に示すように英国、フランスでリスクに応じた土地開発・利用規制が行われている。東欧のチェコでは、100 年確率洪水の浸水域での住宅新築時の嵩上げを推奨するとともに、20 年確率洪水の浸水域での住宅新築を禁じている(Duzi, et al 2017)。

③については、建築基準法第 39 条に基づき、札幌市、名古屋市、滋賀県などにおいて条例の制定による居室の床高さなどの規制が行われている(国総研 気候変動適応研究本部 2019)。また、個別建物の浸水発生時の被害防止・軽減対策についての研究(国総研 気候変動適応研究本部 2019)が行われている。各家庭における洪水対策(嵩上げ等)の実施状況について、Duzi, et al(2017)はチェコ東部の Becva 川中流部の 304 世帯を対象として、洪水の経験、認知、対策の実施状況の聞き取り調査を行い、対策の実施には文化的文脈が重要であること、短期的費用が対策実施上の制約要因であることなどを指摘している。



©国土交通省 九州地方整備局

図 1.18 現存する野越しの例

## (2)米国の堤防システムの管理された越水の検討事例

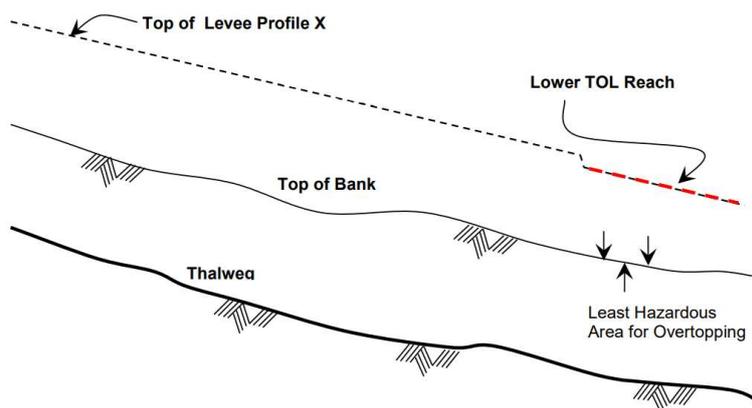
米国の大川川の洪水対策などを所掌している陸軍工兵隊(以下「工兵隊」という)には、計画規模を超過する洪水時の越水箇所を事前に設定し侵食防止対策を施しておくことにより、避難時間の確保や堤防等復旧の費用低減・迅速化を図る「堤防システムの管理された越水(Managed Overtopping of Levee Systems)」手法がある。同手法は 1986 年に工兵隊の技術文書にて最初に概念が提示されたものであり、2019 年 4 月発出の指針にいたっている(USACE 2019)。

本手法について 2018 年 5 月に工兵隊水資源研究所(Institute for Water Resources, バージニア州アレキサンドリア)を訪問し収集した情報について以下に述べる。

工兵隊では、2017 年 7 月 14 日に「Managed Overtopping of levee Systems」(堤防システムにおける管理された越水)という Guidance(手引き)が CECW-CE(Headquarters, Directorate of Civil Works, Corps of Engineers)から発出されている(2019 年 7 月 14 日までの 2 年間の暫定(USACE 2017))。本手引きは 1987 年発出のものの改定版であり、不確実性の考慮と、工兵隊のプロセス変更の 2 点に対応するために改定されたとのことである。

同手引きでは、堤防天端高さの縦断形に意図的な高低差を設ける(図 1.19(USACE 2019)) (仮和訳は次のとおり Top of Levee Profile:堤防天端高の縦断分布, Lower TOL Reach:最初に越水する箇所, Top of Bank:河岸高, Thalweg:最深河床高, Least Hazardous Area for Overtopping:越水時被害最小箇所, Note: Water surface profile downstream of the overtopping section may be impacted due to the flow leaving the system via overtopping section.:注:越水箇所下流の水位は越水による流量低減の影響を受ける可能性がある。)ことにより、計画規模を超える洪水時に越水する箇所の限定を図り避難時間の確保などの減災対策を行う方法について説明されている。なお、本対策は強制ではなく選択肢の 1 つである。図 1.19 を見ると計画的越水箇所の堤防天端高さを通常より低くしているように見えるが、計画的越水箇所以外を通常よりも高くしているものである。なお、計画的越水箇所を設定しない場合の堤防天端高さの縦断形の設定手法の概念図は図 1.20(USACE 2019) (仮和訳は次のとおり(図 1.19 と共通のものは省略) Top of

Levee (TOL) Profile for Frequency X: 頻度 X の洪水に対応した堤防天端高の縦断分布, Peak Water Surface Elevation for Frequency X at time Y: 頻度 X の洪水ピーク時の時刻 Y における水位, Peak Water Surface Elevation for Frequency X at time Y+1: 頻度 X の洪水ピーク時の時刻 Y+1 における水位, 1. WSP generated from the trace of the peak of a routed flood hydrograph or from a steady state backwater analysis. WSP ultimately sets TOL profile. Additional WSP's are created for additional frequency events.: 1. 時間-洪水流量関係に基づくピーク水位の包絡線又は背水区間の定常流解析に基づき縦断水位分布を描出する。水位の縦断分布が最終的に堤防天端高の縦断分布を規定する。他の頻度の洪水についても水位の縦断分布を描出する, 2. Least hazardous area for over-topping is determined from site conditions.: 2. 越水に対し最も危険性が小さい区域は場所の状況に基づき決定する。)及び図 1.21 (USACE 2019) (仮和訳は次のとおり(図 1.19 と共通のものは省略) Top Profile for Hydrograph/ Discharge X: 流量 X での最高水位包絡線, Top Profile for Hydrograph/ Discharge Y: 流量 Y での最高水位包絡線, Top Profile for Hydrograph/ Discharge Z: 流量 Z での最高水位包絡線, 1. Reference WSP generated from the trace of the peak of a routed flood hydrograph or from a steady state backwater analysis. WSP ultimately sets TOL profile. Only one of these profiles will result in the levee that is ultimately selected as the NED plan.: 1. 時間-洪水流量関係に基づくピーク水位の包絡線又は背水区間の定常流解析に基づき水位の縦断分布を描出する。水位の縦断分布が最終的に堤防天端高の縦断分布を規定する。複数の水位の縦断分布のうちの 1 つが費用便益比最大の計画として選択され堤防高さを規定する。), 堤防天端高の概念図は図 1.22 (USACE 2019) (仮和訳は次のとおり Levee Increment for Settlement: 将来の堤防沈下を見越した余盛り, Top of Levee: 堤防天端, Levee Increment for Superiority: 最初越水地点制御のための嵩上げ高さ, Base Levee Height: 基準堤防高), 計画的越水箇所概念図は図 1.23 (Adams 2018) (仮和訳及び補足説明は次のとおり Q: 越流量, Overtopping Height: 捨石工等設計上の越流水深, Length: 越流部幅)のとおりである。計画的越水箇所における計画越水深は, 耐侵食構造(捨石工(リップラップ)等)の強さにより決まり, 3 フィート(約 0.9 m)等に設定される。また, (河川から流入した水が高速で流れる)法尻(堤防を中心として, 通常時に川が流れている側の反対側の地盤と堤防が接する辺り)の侵食対策の追加(費用増)がその他考慮すべき事項として挙げられていた。



Note: Water surface profile downstream of the overtopping section may be impacted due to the flow leaving the system via the overtopping section.

©USACE

図 1.19 堤防高さの縦断形への越水区間の追加の概念図

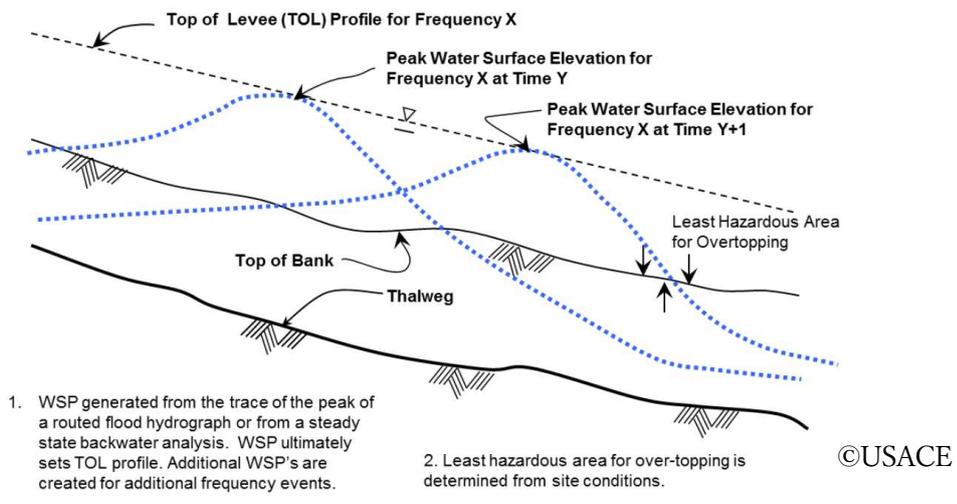


図 1.20 堤防高さの縦断形の検討の概念図

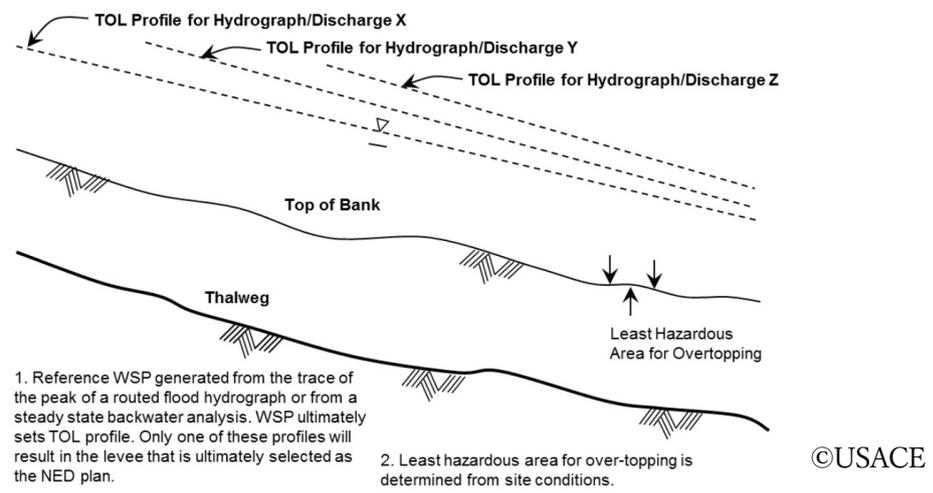


図 1.21 複数規模の洪水に対する堤防高さの縦断形の概念図

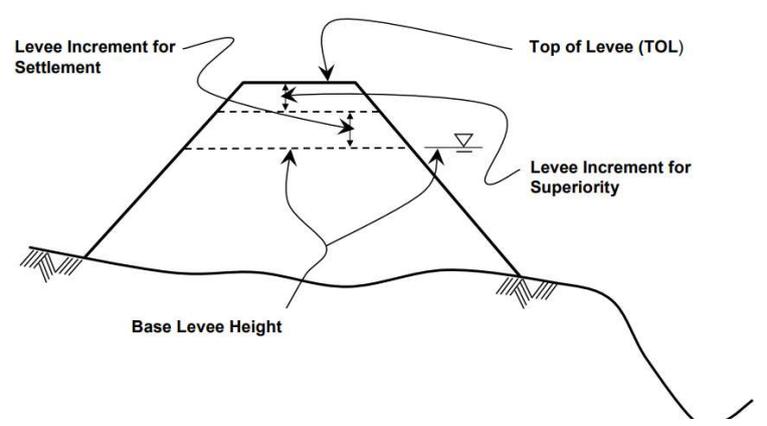


図 1.22 堤防の天端高さの概念図

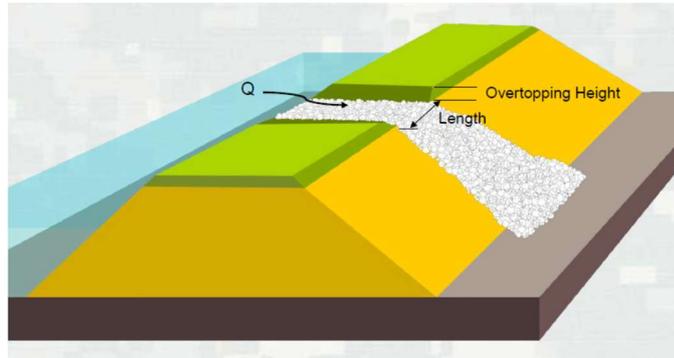


図 1.23 計画的越水箇所の概念図 ©USACE

計画的越水箇所の設定については、地元自治体が発案者となる。工兵隊も検討チームの一員になるが、地元自治体主導とのことである。なお、計画的越水箇所の設定は、同箇所以外の安全を保証するものではなく、時間稼ぎのためのものであるとのことである。

カリフォルニア州のサクラメント市を流れるサクラメント川における計画的越水箇所の工兵隊による検討例を図 1.24(Adams 2018)に示す。図中赤色で示された区間が計画規模を超える洪水時の計画的越水の検討箇所である。同箇所を検討した理由は、堤内地が農地・ゴルフ場であること、氾濫ブロックの下流側である(堤内地の標高が氾濫ブロック内で相対的に低い)ため氾濫流の広がる速さが相対的に小さい(氾濫に気づいてから避難する場合の利用可能な避難時間が相対的に長くなりうるとともに、氾濫流の流速が小さい方が堤内地の建物被害等が相対的に小さくなる)ことなどのためである。

上述のとおり計画上の越流水深が決まるので、越流幅を変えた浸水シミュレーションを行うなどして越流幅を決めるとのことである(図 1.25(Adams(2018)より))。



©USACE

図 1.24 サクラメント川における検討事例



(a)越流幅 A 案(B 案より広い)©USACE

(b)越流幅 B 案(A 案より狭い)©USACE

図 1.25 越流幅を変えた氾濫シミュレーション結果の比較例

2019 年 1 月に工兵隊本部(ワシントン)を訪問し追加調査を行ったところ、同時点で同手法を実際に導入した箇所はなく、その主な理由として以下が挙げられていた。

- ・住民の考え方の習性が変わらない
- ・土地が貴重である
- ・残留リスクの住民による理解が難しい

また、堤防が整備されると住民が安心してしまう現状では、事後的に計画的越水箇所を追加するための地域の合意形成は難しいことから、新たに堤防を整備する箇所において最初から計画的越水箇所を組み込んでおくことが現実的との見解が示された(板垣ら 2019)。

### (3)その他の国の研究事例

その他の国では, Sai, et al(2020)が, ベトナム第 2 の都市ハノイ市について, 市内を流れる Red River の洪水氾濫防止のための分流堰及び越流箇所からの Van Coc 湖への危機管理放流について, 分流堰等治水施設の安全性の確保, 堤防で守られていない地区の住家のリスク低減等の観点から放流シナリオ別の比較分析を行い, 越流箇所の最適越流幅を提示している. 分析は解像度 50m のデジタル標高モデル(DEM)に基づく 50m メッシュ格子の二次元不定流計算により行われている. なお, 比較分析における上流からの洪水流量の設定については, 1971 年の歴史的洪水時の 11 日間のデータのみを用いており, 異なる流量規模の洪水時の分析は行われていない.

Schober, et al(2020)は, オーストリアの 5 河川を対象に, 過去 60 年間の流域の土地利用変化と堤防等整備並びに氾濫原が完全になくなった仮想状態が洪水リスク変化に与える影響について, 75m 解像度のデジタル標高データ及び航空レーザ測量データ等に基づき, 洪水ピーク流量, 洪水到達時間, 氾濫水位の変化の観点から数値計算により分析し, 氾濫原の減少が洪水ピーク流量の低減効果の縮小等につながることを示すとともに, 歴史的土地利用・堤防等整備の経緯を含む流域の洪水特性の情報が洪水リスク管理の計画者にとって有用であるとしている.

### (4)ダム の設計規模を超える洪水時の被害防止・軽減対策を踏まえた対策の検討

堤防と同様に河川水を一時的にせき止めることにより洪水被害を防止・軽減しているダムにおいては, 非常用洪水吐きが設置されることが一般的であり, これにより設計規模を超過する洪水時にダム堤体の越流によるダム決壊を防いでいる. 歴史的には, 紀元前 750 年頃に古代アラビアで築造されたマリブダムが洪水吐きを有する世界最古のダムとされており, 古代エジプトの世界最古のダムから 2000 年を経て洪

水吐きの必要性がようやく理解されたとされている(竹林 1996)。

設計規模を超過する洪水時の被害の軽減対策の特性について堤防とダムを比較した結果を表 1.14 に示す。同表を踏まえると、堤防の設計規模を超過する洪水時の被害の軽減対策(上流での洪水流量低減対策及び防御対象氾濫原での被害軽減対策を除く)としては以下の3つが考えられる。

- 1)高規格堤防の整備
- 2)耐越水型堤防の整備
- 3)非常用洪水吐きに相当する土木施設の整備

表 1.14 堤防とダムの越水防止対策に関する特性の比較

	堤防	ダム
①せき止めている河川水の洪水位の時間経過に伴う低下見込み	洪水が行き過ぎれば自然に低下	洪水が行き過ぎても自然に低下するとは限らない
②施設決壊時の被害	当該氾濫ブロックで甚大	ダム下流一帯で甚大
③施設決壊により河川水をせき止めておくことが出来なくなることによる影響	舟運等に影響する可能性はあるが一般的ではないと考えられる	利水上の被害甚大
④施設の決壊を伴わずに施設を越水した水による被害	防御対象氾濫原内の住家・農地等が浸水することによる被害が生じる	ダム下流の河川の流下能力を超過した場合、沿川で氾濫被害が発生する

高規格堤防は、通常の堤防整備に比べ大幅な事業費が必要であるとともに、川沿いの土地を幅広く盛り立てることから、事業費及び地域の土地利用との整合の観点から一般に採用可能な手法とは言えないと考えられる。耐越水堤防は、技術的に確立しているとは言えないと考えられる。非常用洪水吐きに相当する土木施設については、遊水地の越流堤のように、維持管理等に課題は残されているもの実績がある。そして、このような施設(越流堤)による対策は、当該施設を設置しない場合に比べより小さな規模の洪水時に防御対象区域に流入する河川水による浸水被害が発生しうる一方で、堤防の設計規模を超える洪水時の激甚な破堤被害を防ぐ対策となると考えられる。

以上から、防御対象氾濫原内の資産分布、土地利用等の観点から高規格堤防の採用が現実的ではない河川区間において、次の条件に該当する場合には、非常用洪水吐きに相当する土木施設(越流堤)を堤防区間に設置することが逆B型(1.7.1参照)の対策の選択肢の1つとして検討の俎上に上がりうると考えられる。

- a)洪水時に高水位が長時間継続する傾向のある堤防区間(例 河床勾配が緩い、合流先河川の背水区間)(表 1.14の①関連)
- b)破堤時の氾濫水量が大きくなる堤防区間(例 堤防の破堤敷高から天端までの高さが大きい堤防区間)(同②)
- c)破堤により河川水位が低下した場合に下流本川からの逆流水が流入する場合や、利水・環境・舟運等の観点から河川水位の低下による被害が大きい堤防区間(同③)
- d)防御対象氾濫原内の低地部分に住家が密集していないなど、破堤による浸水被害よりも、越流堤部の管理された越水による浸水被害の方が格段に小さくなることが見込まれる堤防区間(同④)

本稿(第2章)では、上記諸条件を踏まえ、一連の堤防区間に土木施設(越流堤)を追加することによる減災対策について、利用可能データに基づく検討手法を提案するとともに、モデル地区にて試験適用を行い被害軽減効果について評価した点が既往研究にはない点である。

### 1.7.3 河川改修事業とともに行う暴露・脆弱性低減対策

洪水被害を防止するため、堤防、ダム、砂防ダム、下水道、海岸堤防などの洪水対策施設が整備されてきた。しかし、河田(2018)は「防災施設の能力の限界は一般に知られていない」ことを指摘しており、施設的设计規模を超える洪水時には施設は信頼できないことを強く警告している。このため、洪水対策施設の整備(ハザード対策)だけでなく、土地利用・開発規制、洪水警戒情報の提供、安全な避難の促進など(暴露・脆弱性対策)を含めた、包括的な洪水リスク低減対策の推進が重要である。

地域の水害リスクに関する研究には次のようなものがある。洪水時に堤内地の場所ごとに発生する浸水深の確率評価については吉野川流域を対象とした山田ら(2019)の研究がある(ただし浸水深のみであり被害の大きさには換算していない)。河川の洪水リスク評価については、湧川ら(2008)と池内ら(2011)が、具体的な河川を対象に評価を行っている。堤防・ダム等の治水施設等の整備による水害リスク低減量の評価手法の経緯については末次(1998)に述べられている。また、治水経済調査マニュアル(案)(国土交通省 水管理・国土保全局 2020)等の治水事業等の便益・費用の評価手法が、便益の評価対象が実態の一部に限られているといった課題は残されているものの、社会実装されている。

坂井と谷川(2020)、吉田(2020)、小笹山(2020)、安田(2020)は国内の洪水管理施設について、実際の洪水時の被害軽減効果を評価している。

市川ら(2007)は場所ごとの浸水頻度に基づき、仮想的な土地利用規制の費用便益分析を行っている。

本研究(第3章)では、河川改修に加え、堤内地での暴露・脆弱性対策を併せて実施した場合の洪水被害防止・軽減効果の評価手法について、利用可能データに限られる開発途上国の洪水対策の現場での適用を念頭に、限られた利用可能データに基づく手法の試案を提示した点が既往研究にはない点である。

## 第1.8節 論文の構成と内容

本研究は、上述2つの種類の減災対策を対象として、公表データに基づく、減災対策の具体的検討手法(第2章)、被害軽減効果の評価手法(第3章)の試案を提示するとともに、試験適用を行い、減災対策による効果を試算した結果について述べ、流域治水の推進に必要なリスクコミュニケーションの観点から提言を行ったものである。

第1章では、本研究の背景と目的、既往研究と本研究の位置づけ、並びに本論文の構成と内容について述べる。

第2章では、治水施設の整備規模を超過する洪水時の堤防越水地点を制御することによる氾濫水量の低減対策について、公表データに基づく具体的な越水地点の検討手法の試案を提示するとともに、近年破堤による激甚な氾濫被害が発生した河川沿川地区での試験適用の結果について、対策による効果の評価結果とともに述べる。

第3章では、ハザード対策(河川改修)と氾濫原での住家移転・宅地嵩上げ(暴露・脆弱性対策)を併せて実施した場合の被害防止・軽減効果の評価手法の試案を提示し、試験適用の結果について述べる。なお、利用可能なデータが限られている開発途上国の洪水対策現場等を念頭に評価手法を提案し、フィリピン共和国のミンダナオ島のアグサン川下流部で試験適用を行っている。

第4章では、第1章から第3章までを踏まえ、流域治水の推進のための減災対策の促進を図る観点から提言を行う。

最後に第5章では、本研究のまとめについて述べる。

## 第2章 堤防越水地点の制御による氾濫水量の低減対策の検討手法の研究

### 第2.1節 はじめに

令和元年(2019年)の東日本台風において激甚な洪水氾濫被害が発生した地区において、「排水完了までに12日間かかった.何とか短縮できないか」「自然堤防上の家の2階まで浸かった.農地はほとんどの家が耐えられない」との切実な声が上がっているように、治水施設の整備を促進するとともに、治水施設の整備規模を超過する洪水に備えるための減災対策の推進が喫緊の課題である。

従来の洪水対策は、次の2つを基本として実施されてきたと考えられる。

- 治水施設の整備規模以下の洪水は治水施設(ハード対策)により氾濫を防止
  - 治水施設の整備規模を超える洪水は水防活動・避難等で対応し被害を防止・軽減
- 本研究では、上記2種類の対策に加え、次の減災対策の検討手法について検討した。
- 土地利用と治水施設整備(ハード対策)を有機的に連携させた、住家・農地等の資産被害の防止・軽減を含む減災対策

本章では、従来の分野別に専門分化した洪水対策を今一度統合しなおすために必要な手法の確立に向けた議論に資するため、第1章で述べた2事例「江戸時代からの実施が文献で確認されている『野越し』」と「米国陸軍工兵隊の管理された越水」のような、「越水地点を制御することによる氾濫被害の軽減対策」を誰もがアクセス可能な公開データに基づき、比較的簡便に検討できる手法を提案する。この理由は、利用可能データが限られる場合が少なくない中小河川や発展途上国の現場を含め広く適用可能な手法とするとともに、評価結果の透明性・信頼性を高めることにより合意形成を促進するためである。

そして、近年激甚な氾濫被害が発生した河川沿川地区に提案手法を試験適用し、制御された越水地点の候補を選定するとともに、氾濫水量等の低減効果を試算した。

### 第2.2節 堤防の越水地点を制御することによる減災対策の検討

#### 2.2.1 洪水被害防止・軽減対策の分類

第1章の図1.13に洪水被害防止・軽減対策(リスク受容を含む)の分類を示した。図中、中・高頻度の洪水事象については、費用便益比等を踏まえた対策の実施が考えられる。一方、低頻度ではあるが激甚な被害をもたらす稀な洪水事象については、費用便益比に基づき検討することが下記の理由から困難であることを踏まえ、場所ごとに想定されるハザードの大きさに応じた被害防止・軽減対策(以下、「低頻度激甚氾濫対策」と呼ぶ)を実施する必要があると考えられる。

- ① 低頻度の洪水氾濫の再現期間の推定において避けることのできない不確実性の大きさから、年平均被害軽減期待額の推定値の信頼性の確保が困難である場合が少なくない。
- ② 激甚な被害発生後の地域社会・経済への中長期的影響やサプライチェーン等を通じた周辺地域等への波及影響等について一般に適用しうる評価手法が確立していない現状において、直接経済被害額等のみに基づく費用便益比等の観点から低頻度激甚氾濫対策について検討することは、地域の持続性の確保等の観点から合理的とは言えない場合が少なくない。

ここで、本研究における高・中頻度と低頻度の境界は、洪水発生時の地域の被害の深刻さ等により変わらうと考えられることから、一律には定めない。

#### 2.2.2 低頻度激甚氾濫対策の種類

低頻度激甚氾濫対策には、第1章の図1.4に示す①から③までの3種類(複数種類の効果を併せ持つものを含む)が考えられる。本研究で対象とする住家等の資産被害の防止・軽減対策としての低頻度激甚氾濫対策の種類ごとの実践・研究事例については第1.7節で述べた。

堤防の設計規模を超える洪水時の堤防越水地点を制御することによる減災対策は、低頻度激甚氾濫対策の選択肢の1つである。公表データに基づき制御された越水地点を具体的に検討する手法を以下

に提案する。

### 2.2.3 制御された越水地点の検討手法

第1章の1.7.2の(4)で挙げたa)からd)までの4つの観点から、一連の堤防区間に越流堤を設置することが堤防の整備規模を超過する洪水時の被害の軽減対策の選択肢として検討の俎上に上がりうる河川区間において、越流堤の設置位置、すなわち、制御された堤防越水地点の候補について検討する手法を以下に提案する。提案する検討手順を図2.1に示すとともに、以下項目ごとに述べる。

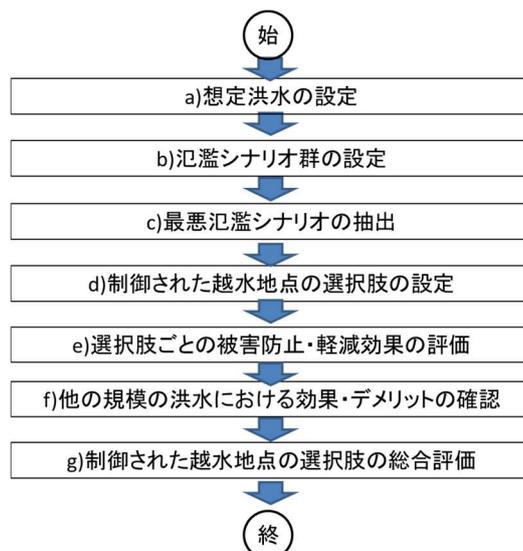


図 2.1 制御された越水地点の検討手順

#### a) 想定洪水の設定

制御された堤防越水地点の検討を行なう際には、想定洪水を設定し、同洪水を対象とした氾濫解析を行い、この結果に基づき堤防越水地点の候補の選定を行う。想定洪水の設定にあたっては、近年発生した代表的な洪水等を選定することが、その後の地域の合意形成等において有効と考えられる。ここで、想定洪水は、被害をゼロとする対象として選定するものではなく、被害の軽減方策について検討するために設定するものであることに留意する。なお、想定洪水が想定最大規模未満の洪水である場合には、避難計画等の検討は想定最大規模洪水を対象とした洪水浸水想定区域図等を踏まえ別途実施するものとする。

#### b) 氾濫シナリオ群の設定

合理的に想定しうる氾濫シナリオ群を設定する。設定は、対象河川の過去の破堤事例等を踏まえ、想定破堤地点を設定することにより実施する。過去の破堤事例等を踏まえ、破堤水位は堤防の設計高水位に限らない。計算作業量等を勘案し、必要最小限の数の氾濫シナリオを設定するものとする。設定された氾濫シナリオごとに氾濫解析を行い、浸水範囲、浸水深等を整理する。なお、例えば Apel, et al (2009)で述べられているように、氾濫被害の評価の精度は、氾濫解析の詳細さよりも入手可能な検証用データの多寡がより大きく影響することが一般的であることから、検証用データが限られている中でいたずらに詳細な氾濫解析等を行い計算時間と費用を浪費しないように注意する必要がある。

氾濫解析の実施にあたっては、利用可能なデータの種類及び内容を踏まえ、氾濫解析の条件設定において不確実性が比較的大きいことを考慮し、より精密な水位計算等は制御された越水の候補地点を

絞り込んだ後に必要に応じて追加的に行うものとし、比較的簡便な手法により見込まれる被害軽減効果の概略把握を効率的に行うことを優先する。提案する氾濫解析の手順は図 2.2 のとおりであり、氾濫解析手法の概要について以下に述べる。なお、対象地域の面積、地形特性等により計算用のメッシュサイズ等を適宜変更するものとする。

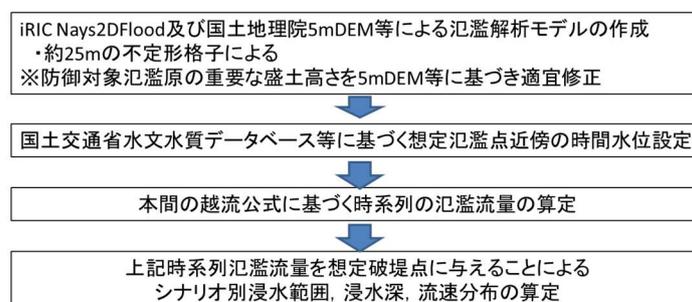


図 2.2 氾濫解析手順

- ア. 無料公開氾濫解析計算プログラムである iRIC の Nays2Dflood(一般社団法人 iRIC-UC 2020)等による二次元不定流計算により防御対象氾濫原の氾濫解析を行う。なお、iRIC は海外の河川にも適用可能である。
- イ. メッシュ格子の大きさは対象地域の面積、地形特性等によるが約 25m を原則とする。
- ウ. 標高は国内であれば国土地理院 DEM5A(基盤地図情報数値標高モデル)(国土地理院 2020)(以下「5mDEM」と呼ぶ)等、海外であれば米国 USGS のデジタル標高モデル等を活用する(iRIC によりダウンロードしメッシュ格子ごとの標高値に自動的に反映できる)。氾濫原の盛土等の越水状況について把握することが重要な場合には、5mDEM 等により盛土位置の地表標高値を手動で補正する。
- エ. 想定破堤点近傍の堤内外 25m 不定形格子標高に基づき各破堤敷高を設定する(想定破堤点からの流入量の算定(後述ケ。)にて必要)。
- オ. 想定破堤点の時系列の河川水位は付近の水位観測所における時系列の観測水位を計画高水位(国土交通省水文水質データベース等より)の勾配等に基づき推定する。計画高水位データを入力できない場合には、河道内の平面 2 次元計算を iRIC の Nays2Dflood 等により行い時系列の水位を概略設定する。
- カ. 水位観測所における観測水位に上流での破堤氾濫による河川水位低下の影響が含まれる場合には、破堤時刻前の破堤点上流の水位観測所の観測水位から洪水流下時間を考慮して水位相関を概略推定し破堤点下流の観測水位を適宜補正する。
- キ. マニングの粗度係数は、作業効率化のため、航空写真等に基づく河道・土地利用特性を踏まえ一律設定することを想定している(例えば、河道内 0.03、氾濫原 0.02)。河道内樹木群、5mDEM に反映されていない水面下の河道形状、家屋建物が氾濫流に与える影響等を考慮することが重要と考えられる場合には、これらを反映する。
- ク. 想定破堤点ごとの破堤の時間進行は、公表資料に記載された実績洪水時の破堤の時間進行、又は治水経済調査マニュアル(案)(国土交通省 水管理・国土保全局 2020)記載の時間進行等に基づき設定する。
- ケ. 想定破堤点から流入する氾濫流量については、エ. で設定した破堤敷高、オ. で推定した河川水位、及びク. で設定した破堤幅、並びに氾濫解析により算定される想定破堤点近傍の堤内地水位に基づき、下記本間の越流公式(国土交通省 水管理・国土保全局 2014)により算定する。なお、

破堤敷高以上の河道断面の流下量を iRIC の Nays2Dflood 等により概略評価しておき、氾濫流量の上限値とする。

$$\text{完全越流時: } Q=0.35Bh_1(2gh_1)^{1/2} \quad (2.1a)$$

$$\text{潜り越流時: } Q=0.91Bh_2(2g(h_1-h_2))^{1/2} \quad (2.1b)$$

ここで、Q: 越流量(m<sup>3</sup>/s), h<sub>1</sub>: 破堤敷高等基準の A 川水位 (m), B: 越流幅 (m), g: 重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>), h<sub>2</sub>: 破堤敷高等基準の堤内地水位 (m), h<sub>2</sub>/h<sub>1</sub><2/3 では完全越流, これ以外では潜り越流とする

- コ. 過去の洪水時に越水が生じた箇所等の近傍の堤内地に越水による流入量を時系列で与える. 越水量は, 合理的に想定される越水幅及び越水深に基づき, 完全越流としてケ. の本間の越流公式により算定する.
- サ. 氾濫解析は, 氾濫シナリオ間の相対比較を行うのに十分な時間行う. ここで, 河川から堤内地への氾濫水の流入が終了しても, 地形勾配により浸水域が拡大する場合等があることから, 浸水域の拡大状況等を確認するために必要な時間だけ氾濫解析を行う.

#### c)地域にとって最悪の氾濫シナリオの抽出

地域の住家, 避難場所, 病院, 主要道路等の分布を踏まえ, 各氾濫シナリオにおいて想定される被害の大きさ等に基づき最悪の氾濫シナリオを抽出する. ここで, 最悪の氾濫シナリオとは, 想定洪水における最悪の氾濫シナリオであり, 全ての規模の洪水における最悪の氾濫シナリオとは限らない. 最悪の氾濫シナリオ抽出の目的は, 避けるべき氾濫シナリオを明確にすることであるので, 複数の氾濫シナリオを抽出しても良いが, あまりに多いと対策が総花的になるため, 必要最小限の抽出数とすべきである.

#### d)制御された堤防越水地点の選択肢の設定

氾濫シナリオごとに想定される被害の大きさ等を踏まえ, 制御された堤防越水地点の選択肢を複数設定する. 選択肢の設定に当たっては, 最悪の氾濫シナリオの防止対策など目的を明確にすることが, 後の地域の合意形成時における説明しやすさ等につながり有効と考えられる.

#### e)選択肢ごとの被害防止・軽減効果の評価

b)で用いた氾濫解析モデルを用いて, 氾濫被害の大きさを選択肢ごとに算定する.

#### f)他の規模の洪水における効果・デメリットの確認

a)で選定された洪水以外の規模の洪水における効果・デメリットを確認するため, その他合理的に想定しうる洪水を複数設定し, 選択肢ごとの氾濫被害の軽減効果等を b)で用いた氾濫解析モデルを用いて算定する.

#### g)制御された堤防越水地点の選択肢の総合評価

e), f)の結果を踏まえ, 制御された堤防越水地点の選択肢ごとの被害軽減効果について総合評価を行い, 最も有効と考えられる制御された堤防越水地点の候補を選定する. 評価に当たっては, 図 1.12 に示す NILIM リスクカーブ, 図 1.17 に示す気候変動影響感度線を適宜用いることで評価結果を分かりやすく表示することが有用と考えられる.

### 第 2.3 節 制御された越水地点の試験的な検討

上記手法を近年破堤氾濫による激甚な被害が発生した河川沿川区域に試験適用した結果について以下に述べる. 対象区域は図 2.3 に示す A 川と B 川に挟まれた区域(約 2.1km×7.4km)であり, 河床

勾配が緩く、合流先河川の水位の影響を受けやすく、堤防の破堤敷高から天端までの高さの大きい区間があり、破堤により河川水位が低下した場合に下流本川からの逆流水が流入する可能性があり、さらに、防御対象氾濫原内の低地部分に住家が密集しておらず、第1章の1.7.2の(4)のa)からd)の4条件に合致している。また、対象区域のその他の特性は次のとおりである。

- ア. 沼の干拓による美田地帯であり、地形的に何度も激甚な洪水氾濫被害を受けている
- イ. 水害対策について地域の高い意識と行動の歴史がある
- ウ. 洪水氾濫状況について報告書が公開されており関連情報を入手しやすい

公表資料よりA川の属する水系の流域面積は約1,100km<sup>2</sup>、B川の属する水系は同120km<sup>2</sup>である。当該区間を含む一連区間の河床勾配はA川が約1/3000、B川が1/1000から1/22000程度である。また、後述の実績洪水時のC水位観測所(河口からの距離標20.3k(キロポスト)付近)、D水位観測所(13.6k付近。地点上流の流域面積約340km<sup>2</sup>)の時間水位データが国土交通省水文水質データベース(国土交通省2020)のホームページで公開されており、以下これを用いて分析を行った。

なお、対象区間の堤防天端高の縦断分布は公開資料には見当たらなかったが、実績洪水時の破堤点(20.9k付近)の堤防高さが計画堤防高(計画高水位プラス1.2m)と一致していることから、対象区間の堤防天端高は概ね計画堤防高程度はあるものと推定した。

### 2.3.1 想定洪水の設定

近年対象区域で激甚な破堤氾濫被害が発生した洪水(以下「実績洪水」)を想定洪水として選定した。国土交通省水文水質データベースに基づく水位観測所ごとの実績洪水時の時間水位変化を図2.3に示す。ここで、E水位観測所(27.9k付近)は実績洪水時の破堤地点(20.9k付近)よりも約7km上流に位置する。実績洪水時の最高水位は、C水位観測所で計画高水位を約1.6m上回り、D水位観測所で同約1.2m上回っている。

### 2.3.2 氾濫シナリオ群の設定

#### a) 氾濫シナリオ設定の考え方

実績洪水に関する公開報告書によると、A川左岸20.9kにおいて延長100mで破堤するとともに、同左岸21.7k+9から21.7k+33までの24m、17.6k+120から17.8k+195までの275m、14.8k+20から16.8kまでの652m、並びに同右岸21.5k+145から22.1k+130までの515m、20.0kから20.0k+80までの80m、18.2k+157から18.4k+138までの181mで越水が記録されていることを踏まえ、20.9k付近の破堤シナリオ(氾濫シナリオ1、再現計算シナリオ)、17.8k付近の想定破堤シナリオ(氾濫シナリオ3)、16.0k付近の想定破堤シナリオ(氾濫シナリオ4)を設定した(図2.3(黄色:越水地点、橙色:破堤地点)及び表2.1参照)。なお、左岸21.7k付近の越水については氾濫シナリオ1と近接しているため設定を省略し、また、今回はA川左岸の氾濫原を分析の対象としていることから右岸の越流箇所については氾濫シナリオの設定を省略した。

#### b) 氾濫解析条件

本試験適用における氾濫解析条件は以下のとおりである。

- ア. 氾濫解析モデルのメッシュ格子は約25mの不定形格子とし図2.3の灰色着色範囲に設定した。
- イ. 標高は5mDEMに基づき設定した。A川の左岸堤は想定破堤点(及び後述の減災対策検討における越流堤)を除いて不透過扱いとし、B川の右岸堤は5mDEMに基づき高さを修正し、B川を乗り越えて氾濫が広がるかどうかを概略ではあるが把握できるようにした。
- ウ. A川対象区間の計画高水位勾配をC水位観測所及びD水位観測所地点の計画高水位(国土交通省水文水質データベースより)から算定し、C又はD水位観測所の時間水位から同勾配に基づ

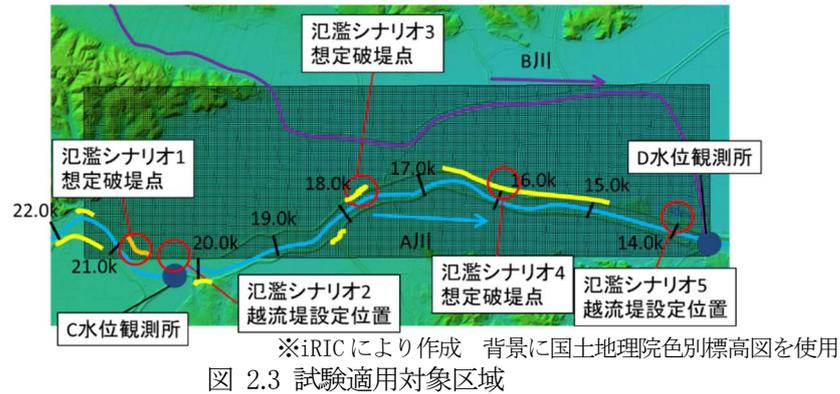


図 2.3 試験適用対象区域

表 2.1 氾濫シナリオ群

氾濫シナリオ	氾濫条件
1	左岸 20.9k 付近破堤 (再現計算)
2	左岸 20.3k 付近仮想越流堤を越流
3	左岸 17.8k 付近破堤
4	左岸 16.0k 付近破堤
5	左岸 14.0k 付近仮想越流堤を越流

き想定破堤点等近傍の水位を推定した。

- エ. 想定破堤点からの氾濫流量の上限値は iRIC の Nays2DFlood による計算結果に基づき 1,300m<sup>3</sup>/s と設定した。
- オ. 破堤後を除く E 水位観測所水位と C 及び D 水位観測所水位との関係に基づき E 水位観測所水位から C, D 水位観測所水位を推定し、破堤後の推定水位を実測水位が下回る場合には推定水位とした。
- カ. 想定破堤点ごとの破堤の時間進行は、公表資料に記載された実績洪水時の破堤の時間進行に基づき下記のとおり氾濫シナリオ 1, 3, 4 共通で設定した。  
 推定破堤時刻の 5 時間 3 分前: 越水開始  
 推定破堤時刻: 初期決壊幅約 20m  
 推定破堤時刻の 4 時間後: 決壊幅約 100m  
 同時刻以降: 決壊幅同じ
- キ. 越流堤以外の堤防区間の越水量を 16.0k, 17.8k 及び 20.9k 付近に与えた(越流堤設定シナリオでは河道水位が低下するためこれら 3 箇所では越水しない)。越水量は公表資料記載の越水幅及び最大越水深(不明の場合には近傍箇所と同じ越水深と仮定)に基づき設定した。氾濫シナリオ 3, 4 の想定破堤点における破堤時刻前の越水量については、実際の破堤点を模した氾濫シナリオ 1 の想定破堤点における推定越水量を共通で与えた。
- ク. 氾濫シナリオ 2, 5(越流堤設定シナリオ)については越水終了後おおむね 10 時間氾濫計算を継続した。これは、越水終了後地形勾配により氾濫範囲が拡大する影響(特に氾濫シナリオ 2 において)を出来るだけ反映するためである。
- ケ. 結果として、氾濫シナリオ 1 では 23 時間、2 は 17 時間 40 分、3 は 13 時間、4 は 15 時間、5 は 16 時間 40 分の氾濫解析を行った。

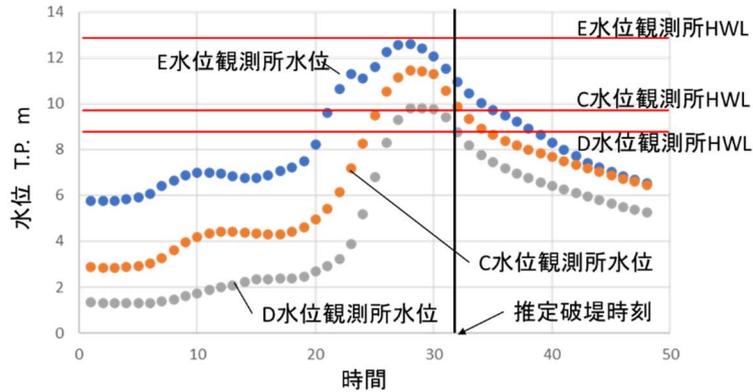


図 2.4 実績洪水の時間水位

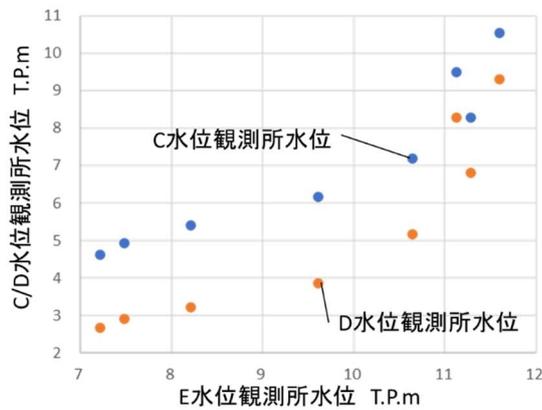
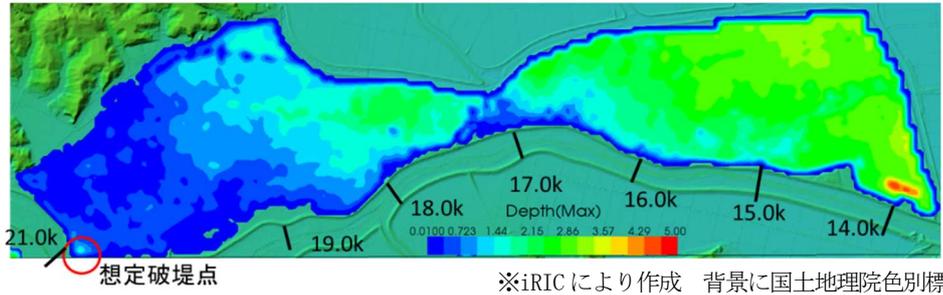


図 2.5 観測所水位の相関

c) 氾濫解析結果と実測値との比較

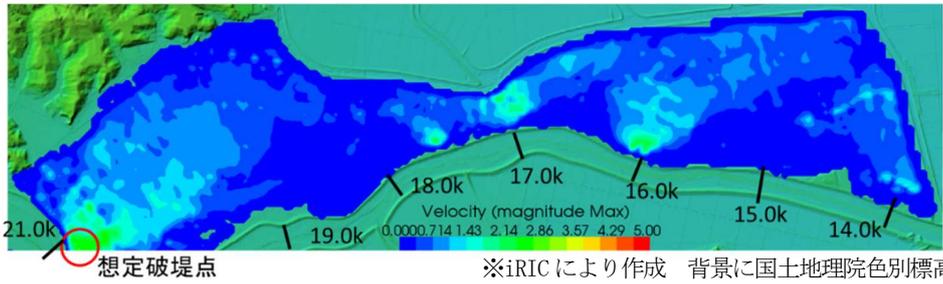
氾濫解析結果を図 2.6 から図 2.8 に示す。実績洪水の国土地理院浸水推定段彩図と図 2.6 (氾濫シナリオ 1, 再現計算結果) を概略目視により比較したところ、A 川と B 川に挟まれた区域の浸水範囲及び浸水深について著しい差異は認められなかった。また、現地で実測された痕跡浸水深データ (12 地点) (梅田 2019) と氾濫シナリオ 1 による最大浸水深 (25m 不定形格子平均) を比較したところ、両者の間の差は 0.2~1.8m 程度であり、差の絶対値の平均は約 0.85m であった。また、浸水面積、浸水深、浸水継続時間の大小が浸水被害の大きさと密接に関係していると考えられることから、排水能力を一定と仮定すると、氾濫水の排水所要時間が浸水被害の大きさの指標として有用と考えられるが、氾濫水の排水所要日数は実績洪水時の 12 日に対して氾濫シナリオ 1 では 14 日 (表 2.2 参照。排水所要日数の算定手法については 2.4.1 の b) 参照) であり、17% 程度の差に過ぎなかった。

以上より、氾濫シナリオ 1 による氾濫解析結果は、低頻度激甚氾濫対策の選択肢の相対比較を行う程度の精度の観点から、おおむね使用に耐えうると判断し、以下の分析を行った。



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

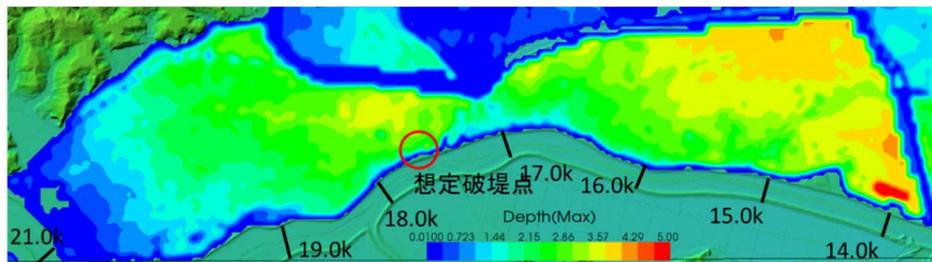
(a) 最大浸水深分布



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

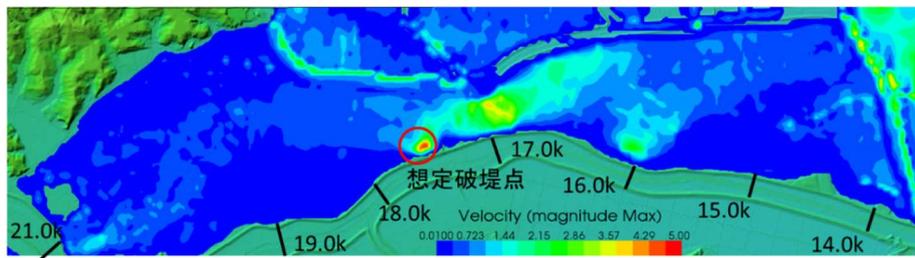
(b) 最大流速分布

図 2.6 氾濫シナリオ 1 氾濫解析結果



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

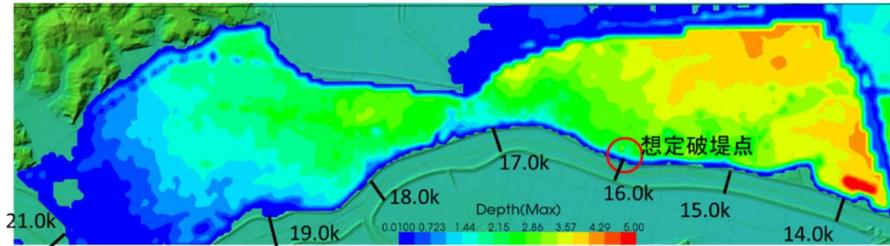
(a) 最大浸水深分布



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

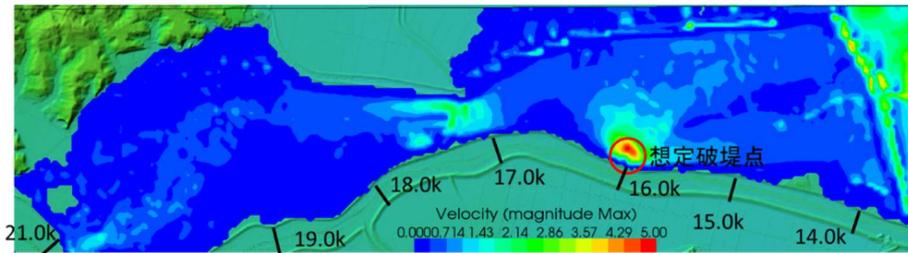
(b) 最大流速分布

図 2.7 氾濫シナリオ 3 氾濫解析結果



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

(a) 最大浸水深分布



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

(b) 最大流速分布

図 2.8 氾濫シナリオ 4 氾濫解析結果

### 2.3.3 最悪の氾濫シナリオの抽出

対象区域の土地利用は美田の間に集落が点在していることから、浸水深・浸水範囲が大きく、浸水継続時間(排水能力を一定と仮定した場合、浸水深・浸水範囲に比例すると推定される)が長いほど被害が大きくなると推定される。図 2.6 から図 2.8 より、氾濫シナリオ 1, 3, 4 では A 川と B 川に挟まれた区域の多くの場所でいずれも 2m 以上の最大浸水深となることが読み取れる。また、氾濫シナリオ 1 と氾濫シナリオ 3, 4 とを比較すると、後者の浸水範囲が前者のそれより広いとともに、広範囲でより大きな浸水深となっていることが読み取れる。さらに、表 2.2 に示すように、氾濫シナリオ 3, 4 の排水所要日数は 22 日から 25 日と、氾濫シナリオ 1 の 14 日より長い。このため、氾濫シナリオ 3, 4 がこれら 3 つのシナリオの中で最悪シナリオであると考えられ、実際に発生した氾濫(氾濫シナリオ 1)は最悪シナリオではなかったと推定される。

### 2.3.4 制御された越水地点の選択肢の設定

実績洪水時には多くの箇所でも越水が発生し、どの箇所でも越水破堤してもおかしくない状況であった(図 2.3 参照)と考えられる。このため、強固に防護された天端高さが計画高水位である越流堤及び減勢工を特定箇所に設けることにより河川水の一部を堤内地へ流入させ対象河川区間の水位を低下させ、越流堤以外の堤防からの越水を防ぎ、最悪シナリオ(越水破堤)を防ぐことを検討する。なお、A 川堤防全区間を越水に耐えよう強化するには延長 8km 程度の両岸に渡り堤内側に減勢工等を設置するための広大な用地を取得すること等が必要であり、現実的ではないと考えた。

以上を踏まえ、実績洪水時の破堤点近傍の非集落部及び対象区域内で最も下流部に当たる箇所の 2 つを選定し、越流堤を新設する次の 2 つの選択肢を設定した。

選択肢 1: 20.3k 付近左岸に幅 50m で天端高さが計画高水位である強固に防護された越流堤を新設(氾濫シナリオ 2)

選択肢 2:14.0k 付近左岸に同様の越流堤を新設(氾濫シナリオ 5)

越流堤の A 川流下方向長さを 50m とした理由は次のとおりである。2.3.2 で用いた A 川の河道内二次元不定流計算モデルに越流堤を追加し、同項で推定した破堤敷高以上の河道断面のピーク流量である約 1,300m<sup>3</sup>/s を 20 時間継続させた場合の A 川水位の低下量を越流堤の幅を変えて試算した。ここで、越流堤近傍の堤内地に自由流出面を設定することにより堤内水位の上昇を防ぎ越流堤の完全越流が維持されるようにした。選択肢 1, 2 ともに、越流堤幅が 50m の場合に計算対象区間上流端付近、C, D 水位観測所地点のいずれにおいても 0.5m 以上水位が低下したことから、越流堤の幅を 50m とした。ここで、水位低下量が 0.5m で良しとした理由は、公表資料記載の実績洪水時 A 川最大越水深は約 0.4m であることから、0.5m の水位低下で越流堤箇所以外の堤防区間の越水を防ぎうると考えたためである。なお、越流堤の具体的な計画・設計には水理模型実験等に基づく詳細検討を別途実施する必要がある。

### 2.3.5 選択肢ごとの被害防止・軽減効果の比較

選択肢ごとの実績洪水時の氾濫解析結果を図 2.9, 図 2.10 に示す。浸水範囲・浸水深ともに氾濫シナリオ 1, 3, 4 よりも小さくなった。また、選択肢 2(氾濫シナリオ 5)の方が浸水範囲・浸水深がより小さいことから、以下選択肢 2 についてさらに分析を進める。

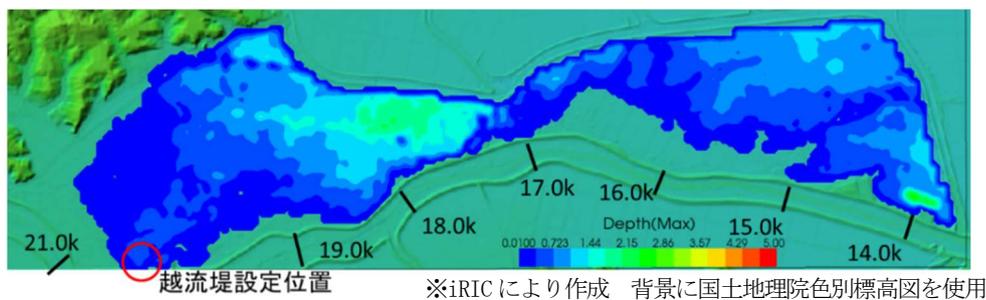
## 第 2.4 節 越水地点の制御による氾濫水量の低減効果の評価

### 2.4.1 他の規模の洪水における効果・デメリットの確認

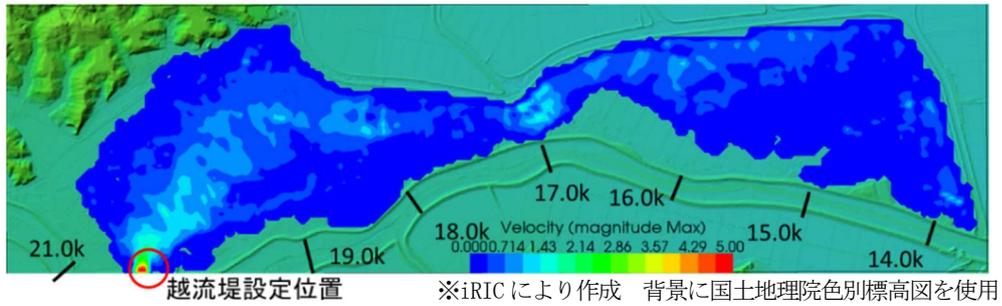
#### a) 想定最大規模洪水時の効果の確認

想定最大規模洪水の設定手法としては、想定最大規模の降雨を設定し流出計算を行う手法があるが、上流での氾濫による流量低減量を適切に見込む必要がある。今回は作業量を軽減するため、過去の研究成果(建設省 土木研究所 河川研究室 1984)を踏まえ、計画堤防天端高よりも 0.6m 高い水位を想定最大規模洪水時の堤防近傍河道内水位とし対策効果を概略分析することとした。

2.3.2 で用いた A 川河道内 2 次元不定流計算モデルを用いて、平水位以上の河道断面における通水継続時間 20 時間の水位が C 水位観測所、D 水位観測所地点の計画堤防天端高プラス 0.6m となる流量を各推定したところ順に約 1,400m<sup>3</sup>/s, 1,200m<sup>3</sup>/s と求められた。当該流量が対象洪水時の平水位以上の河道断面における推定流量と大差ない理由は、上流で氾濫し流量が低減するためである。同モデルに選択肢 2 の越流堤を追加した河道に各流量を 20 時間継続して流し、C 及び D 水位観測所地点近傍の計算水位と計画堤防高とを比較した。その結果、計算水位が計画堤防高を各下回っていたことから、越流堤箇所以外での堤防の越水を防止するという本対策の目的を想定最大規模洪水時でも一定程度果たしうると見込まれる。なお、上記検討は多くの仮定条件のもとで行ったものであり、想定外に備える避難体制の確立が必要であることは言うまでもない。

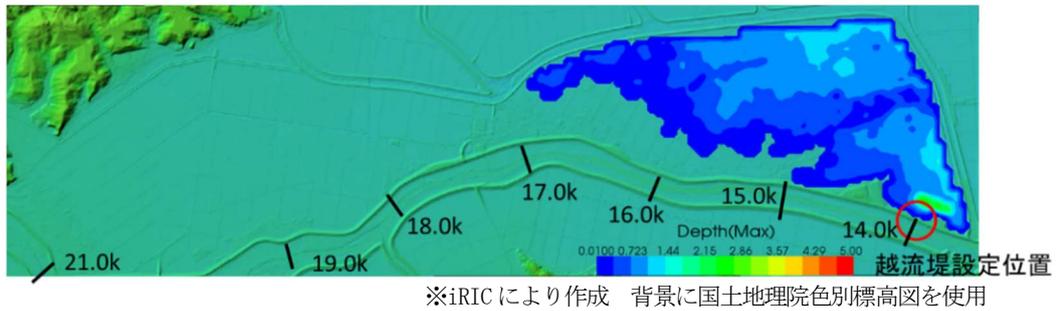


(a) 最大浸水深分布

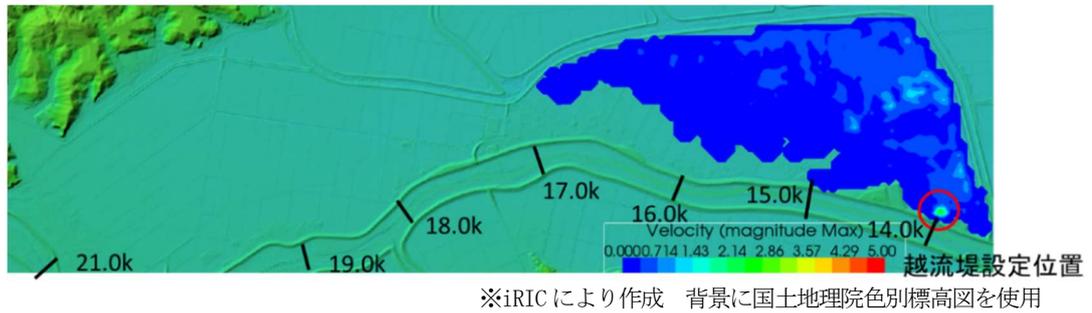


(b)最大流速分布

図 2.9 選択枝 1(氾濫シナリオ 2)氾濫解析結果



(a) 最大浸水深分布



(b)最大流速分布

図 2.10 選択枝 2(氾濫シナリオ 5)氾濫解析結果

b)計画堤防天端高を越水しない規模の洪水時の氾濫水量等の確認

越流堤設置によるデメリットとして、計画高水位を超え計画堤防高以下の高さをピーク水位とする洪水が来襲した場合の氾濫発生がある。

2.3.2 で用いた氾濫解析モデルを用いて、対象洪水の時系列水位を一律上下させた洪水における浸水範囲・浸水深等を算定した(表 2.2 において「氾濫シナリオ 5」と呼ぶ)。図 2.11 に計画高水位よりも 0.6m 高いピーク水位の洪水における最大浸水深分布(対象区域の右半分のみ)を示す。ここで、0.6m とは、対象区間の A 川の計画堤防高と計画高水位との差である 1.2m の半分として設定した。越流堤の越水開始から越水終了まで氾濫解析を行い 5 時間 40 分の解析を行った。なお、地形勾配による氾濫水の流下が顕著ではなかったため、越水終了をもって氾濫解析を打ち切った。

これらの氾濫解析結果に基づき氾濫水量、最大浸水深、氾濫流の最大流速、排水所要日数等を表 2.3 に示す。ここで、排水所要日数は A 川左岸 14.0k 付近の既設排水機場の排水能力 8.5m<sup>3</sup>/s に基づき次式により試算した。

$$\text{「排水所要日数」}=\text{「氾濫水量」}\div(8.5\times 3600\times 24) \quad (2.2)$$

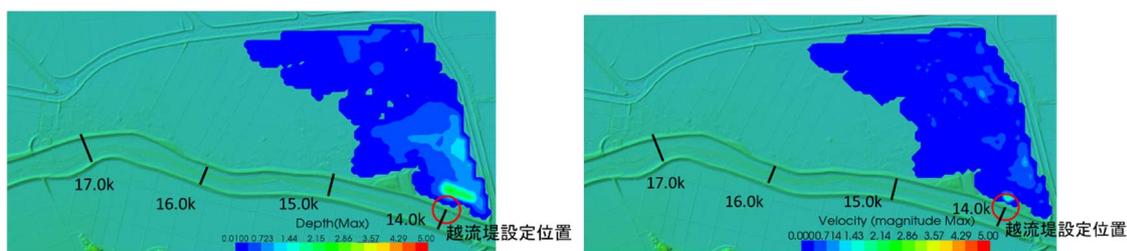
表 2.2 に示すとおり、氾濫シナリオ 1 の排水所要日数は 14 日間と試算されたが、対象洪水時の排水完了までの実際の日数が公表資料で 12 日間とされていることを踏まえると、概ね妥当な計算結果と考えられる。

#### c)年平均値の比較

上記に加え、洪水ピーク水位が計画高水位よりも 0.2m, 0.4m, 0.8m, 1.0m 高い洪水を各想定し、選択肢 2 の場合の氾濫水量、排水所要日数を b)同様に試算(図 2.12, 2.13)するとともに、b)で対象とした洪水を含め、農作物被害額を概略試算した。さらに、各想定洪水の年超過確率を概略試算し、農作物被害額等の年平均値を試算した(表 2.3)。なお、住家、農業用施設、道路等の浸水被害については考慮しなかった。試算条件は下記のとおりである。

- ア. 農作物被害額については、浸水範囲全体に一律に水稻を仮定し、メッシュごとの平均浸水深と対象区域全体の排水所要日数から治水経済調査マニュアル(案)(国土交通省水管理・国土保全局 2020)に基づき被害率を設定し、対象区域が位置する県の 2019 年の水稻 10 アール(100m<sup>2</sup>)当たり 10 年収量と農作物価格(国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課 2021)に基づき試算した。
- イ. 農作物の被害率の設定に当たって土砂埋没による影響は考慮しなかった。
- ウ. 実績洪水当時の河道条件においては、実績洪水規模未満の洪水では氾濫が生じないものと仮定した。なお、計画高水位を超える洪水時の堤防の氾濫防止機能の発揮は無論不確実である。
- エ. 実績洪水を超える規模の洪水時の氾濫水量、排水所要日数及び農作物被害額は、実績洪水における各値と同程度と仮定した。
- オ. 想定洪水の年超過確率については、国土交通省水文水質データベース(国土交通省 2020)の D 水位観測所の過去 42 年間の年最大水位から 2 欠測年及び 1 未掲載年を除く 39 年間の年最大水位データに基づき、L 積率法により一般極値分布(GEV)の母数を推定(国土交通省 水管理・国土保全局 2014)し概略試算した。

表 2.3 より、計画堤防高未満の洪水時に生じる氾濫を考慮しても、選択肢 2 の方が実績洪水当時の河道条件よりも年平均の氾濫水量、氾濫所要日数、農作物被害額ともに小さくなっている。



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

(a) 最大浸水深分布

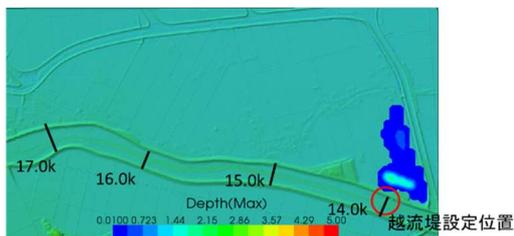
(b) 最大流速分布

図 2.11 計画高水位よりも 0.6m 高いピーク水位の想定洪水の氾濫解析結果

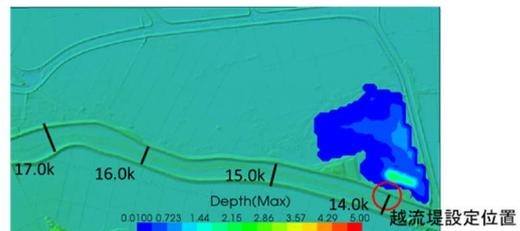
表 2.2 氾濫シナリオ別氾濫解析結果

氾濫シナリオ	氾濫水量 × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	浸水面積 × 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	最大浸水深 m	最大浸水深 0.5m 超の面積 × 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	最大浸水深 3m 超の面積 × 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	最大流速 m/s	最大流速 2m/s 超の面積 × 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	排水所要日数
1*	1,033	715	4.6	546	28	3.0	6.1	14
2*	341	585	2.5	310	0	5.1	1.3	5
3*	1,864	957	5.9	796	230	4.7	30.9	25
4*	1,621	860	6.6	691	221	5.0	25.9	22
5*	139	241	2.6	145	0	2.6	0.2	2
5' **	45	143	2.4	32	0	2.2	0.1	1

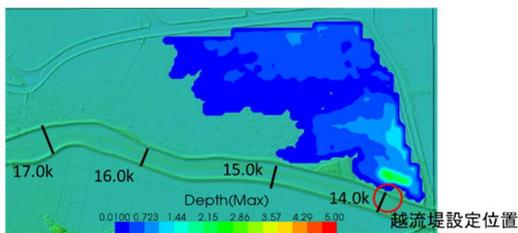
\*実績洪水規模 \*\*実績洪水の時間水位関係をピーク水位が計画高水位プラス0.6mとなるよう引き下げた場合



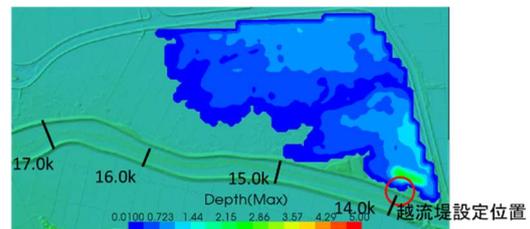
※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用  
(a)計画高水位より0.2m高いケース



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用  
(b)計画高水位より0.4m高いケース

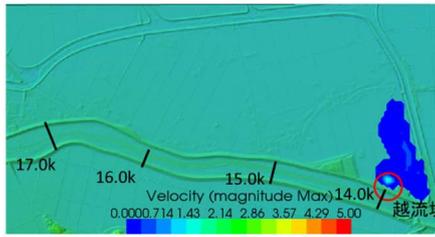


※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用  
(c)計画高水位より0.8m高いケース



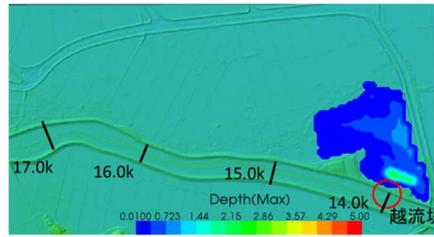
※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用  
(d)計画高水位より1.0m高いケース

図 2.12 計画高水位より0.2m, 0.4m, 0.8m, 1.0m高いピーク水位の想定洪水の最大浸水深分布



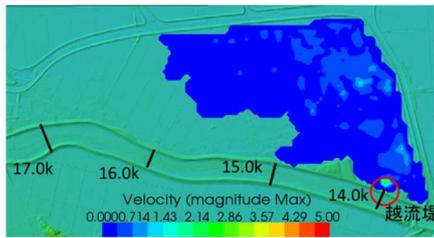
※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

(a)計画高水位より0.2m高いケース



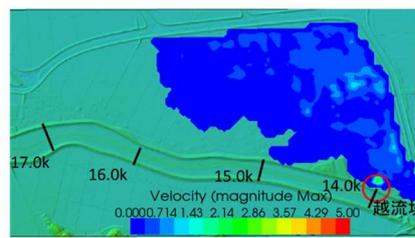
※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

(b)計画高水位より0.4m高いケース



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

(c)計画高水位より0.8m高いケース



※iRICにより作成 背景に国土地理院色別標高図を使用

(d)計画高水位より1.0m高いケース

図 2.13 計画高水位より0.2m, 0.4m, 0.8m, 1.0m 高いピーク水位の想定洪水の最大氾濫流速分布

表 2.3 氾濫水量・排水所要日数・農作物被害額の試算結果

ピーク洪水水位	年超過確率	再現期間年	氾濫水量 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>		排水所要日数 日		農作物被害額 百万円	
			**	***	**	***	**	***
HWL*+0.2m	0.022	46	0	6	0	0	0	5
HWL+0.4m	0.016	64	0	20	0	0	0	14
HWL+0.6m	0.011	90	0	45	0	1	0	37
HWL+0.8m	0.008	130	0	73	0	1	0	48
HWL+1.0m	0.005	193	0	109	0	1	0	56
HWL+1.15m	0.004	265	1,033-1,864	139	14-25	2	570-783	68
年平均	-	-	3.9-7.0	1.4	0.05-0.10	0.02	2.2-3.0	0.8

\* HWL は計画高水位 \*\* 実績洪水当時の河道条件(氾濫シナリオ 1, 3, 4) \*\*\* 選択肢 2 の越流堤を設ける場合

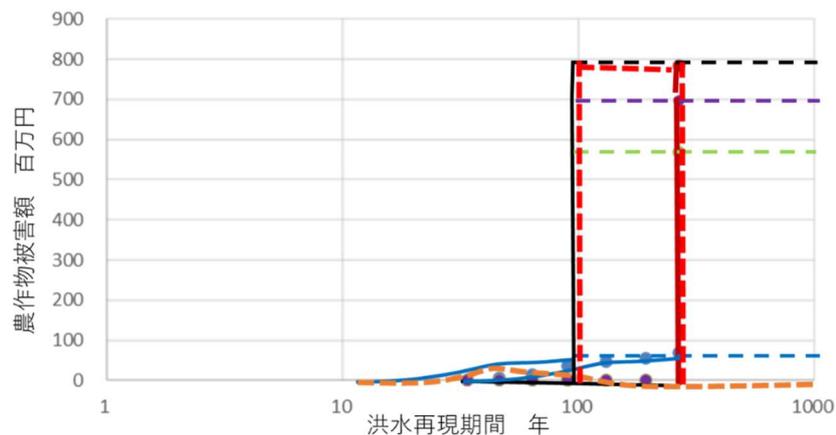


図 2.14 A川対象区域のリスクカーブと洪水頻度増大時の想定被害の増大量の比較

図 2.14 に実績洪水時河道と、選択肢 2 のリスクカーブ(青: 選択肢 2, 黒: 氾濫シナリオ 3, 緑: 氾濫シナリオ 1, 紫: 氾濫シナリオ 4)を比較して示す。なお、実績洪水規模を超過する規模の洪水時の被害の大きさについては試算していないため、実績洪水規模(再現期間 265 年)を超える規模の洪水時の農作物被害額は実績洪水時と同程度と仮定し破線で示した。同図より、実績洪水時河道に比べ選択肢 2 によりリスクカーブが大幅に寝ており、被害が軽減されることが読み取れる。

さらに、気候変動影響により洪水頻度が増大した場合の洪水被害の増分を赤破線(実績洪水時河道の 3 つの氾濫シナリオの中で被害最大の氾濫シナリオ 3 について)及び橙破線(選択肢 2 について)にて示すと、選択肢 2 の方が被害増大量が大幅に低減されることが見て取れる。ただし、選択肢 2 における浸水頻度は現況河道における浸水頻度よりも大きいことに留意する必要がある。

#### 2.4.2 制御された越水地点の選択肢の総合評価

表 2.2 より、選択肢 2(氾濫シナリオ 5)では、実績洪水規模の洪水時の氾濫面積が破堤氾濫シナリオ(氾濫シナリオ 1,3,4)の最小値の 1/3 程度に低減されるとともに、最大浸水深が同 6 割程度に低減されている。また、排水所要日数も、破堤氾濫シナリオにおける 14 日から 25 日に対して、氾濫シナリオ 5 では 2 日程度と大幅に短縮されている。氾濫流速の観点からも、植生の侵食危険度が大きくなると考えられる流速 2m/s(福岡ら 1990)を超えるメッシュ格子の面積が大幅に減少している。なお、氾濫シナリオ 5 において氾濫流速が 2m/s を超えたメッシュ格子は、A 川近傍の排水機場周辺の限られたメッシュ格子であった(図 2.10 参照)ことから、護岸設置等による侵食防止は十分に可能と考えられる。

実績洪水よりも小さな規模の洪水時の被害については、選択肢 2 においてピーク水位が計画高水位よりも 0.6m 高い洪水を想定した場合の氾濫水を排水するのに要する日数は 1 日程度であることから、浸水継続時間の観点から農作物への悪影響を限定的としうる適応方法を見出しうるかと推察される。なお、住家の床上浸水が発生しうる浸水深 0.5m を超える範囲に位置する住家については床上浸水防止対策が、浸水深 0.5m 未満の範囲に位置する住家については床下浸水対策について別途検討が必要である。

年平均の農作物被害額等の観点からは、2.4.1 の c)のとおり選択肢 2 は被害を軽減することが見込まれる。なお、表 2.3 に示すように、選択肢 2 により、実績洪水規模の洪水による農作物被害額を 1/10 程度に低減することが見込まれるが、限界効用逓減の法則を踏まえると、被害額の単純な低減率を上回る被害軽減効果があるものと考えられ、地域の迅速な復旧・復興等の観点からも、本選択肢は有効と考えられる。

気候変動への適応の観点からは、図 2.14 に示すように、選択肢 2 により、洪水頻度増大に伴う被害

の増分を大幅に低減しうる(ただし浸水頻度は実績洪水時河道よりも高い)ことが見て取れる。

以上の結果から、選択肢 2 は、近年激甚な破堤氾濫災害を引き起こした実績洪水及び想定最大規模洪水時に越流堤以外の堤防区間での越水を防ぐ(後者については越流堤以外の区間が完成堤防であることが条件)ことにより、浸水面積、浸水深、氾濫流速、排水所要日数を大幅に低減することが見込まれる。一方、計画高水位を超え計画堤防天端高以下のピーク水位の洪水時の排水所要日数が 1 日程度と見込まれることなどから、農作物等への悪影響を限定的としうる方策を見出せるのではないかと考えられる。さらに、年平均農作物被害額(概算)の低減見込み、並びに、気候変動の影響により洪水頻度が増大した場合の被害の増大しにくさを踏まえ、選択肢 2 は、低頻度激甚氾濫対策の選択肢の 1 つとして有効と考えられる。なお、本研究では特定の氾濫ブロック内のみを対象に分析を行っており、流域全体としての評価については別途検討が必要である。

## 第 2.5 節 まとめ

治水施設整備、氾濫原の土地利用の誘導等様々な対策を総動員した流域治水推進に必要な具体的な対策の検討・評価手法の確立に向け、治水施設の整備規模を超える洪水時の減災対策の選択肢の 1 つである「堤防の越水地点の制御による氾濫水量の低減対策」について、その合意形成に必要な情報の作成を念頭に、制御された越水地点の具体的な検討手法を提案した。提案した手法は、誰でもアクセス可能である公表データに基づき適用できるものであり、堤内地にあふれた氾濫水の潜在的な拡散状況について既存デジタル標高モデルに基づく二次元不定流計算により推定し、氾濫水量、浸水範囲、浸水深、浸水継続時間、氾濫流速等の観点から被害軽減効果を比較し、氾濫水量等が最も小さい越水地点を見出すことが可能と考えられる。

さらに、本提案手法を近年破堤による激甚な氾濫被害が発生した河川沿川区域に試験適用し、制御された越水地点の候補を提示するとともに、同対策による効果を試算した。効果としては、近年破堤氾濫が発生した規模の洪水時の排水所要日数を約 1/7 に短縮する一方で、デメリットは小さい(排水所要日数 1 日程度)ものと試算され、さらに、概算した年平均の農作物被害額を 1/3 から 1/4 程度に低減できると見込まれ、減災対策の有効な選択肢の 1 つと評価された。なお、下流氾濫ブロック等へのリスク移転がないと考えられる場合には、越流堤箇所以外の堤防区間を粘り強くすることなどにより、越流堤箇所以外の堤防区間の破堤氾濫を出来るだけ防止することが合わせて有効と考えられる。

また、対象地域において複数の河川の潜在的な氾濫域が重なっている場合(本研究の試験適用の対象区域(図 2.3)で言えば A 川に加え B 川が流れている)には、各河川が氾濫した場合の浸水範囲・浸水深の大きさ等を踏まえ減災対策を検討する必要がある。

堤防の越水地点の制御による氾濫水量の低減対策は、治水施設の整備規模を超過する洪水時の越水破堤を防止することにより河道の貯留・洪水流下能力を保全し、被害を軽減することを意図するものであり、従来の計画遊水地による洪水対策とは次の点で異なる。

- (ア) 計画遊水地は治水計画規模以下の洪水を対象として洪水流量の調節を行うことにより主に遊水地下流の洪水被害を防止するものである。一方、堤防の越水地点の制御による氾濫水量の低減対策は、治水施設の整備規模を超える洪水時の危機管理対策として、越水破堤を防止することにより河道の貯留・洪水流下能力を保全し、当該地域の被害を軽減しようとするものである。なお、下流を含む流域全体のリスク軽減効果については別途検討が必要である。
- (イ) 計画遊水地は、治水施設の計画規模以下の洪水時に機能を発揮するように設置されるものである。一方、堤防の越水地点の制御による氾濫水量の低減対策は、治水施設の整備規模を超える洪水時に機能を発揮するものであり、治水施設の整備規模以下の洪水時には原則として機能を期待しないものである。なお、河川改修途上の河川の場合には、治水計画規模未満の洪水であっても計画高水位を超えうることから、改修途上の河川が大部分を占める現状においては、改修

完了までのつなぎの対策としても有効と考えられる。

本対策手法の利点は次のとおりである。

- 1) 治水施設の整備規模を超過する洪水時の越水箇所を制御することにより、制御された越水地点以外の箇所での越水破堤の可能性を低減し、水防活動、避難等危機管理対応の安全性向上に寄与する。
- 2) 氾濫水量を低減することにより、地域の浸水被害の軽減、浸水期間の短縮、レジリエンスの強化を図ることができる。
- 3) 破堤を防止し越水だけにとどめることにより、堤内地へ氾濫水とともに流入する土砂量を低減することが見込まれ、氾濫水が引いた後に住家・農地等に残留する土砂量を低減し、残留土砂の除去に要する労力を軽減することにより、被災地域の迅速な復旧・復興に寄与する。
- 4) 堤防の越水破堤を防ぐことにより、破堤箇所の締め切り等の作業が不要となり、堤防等施設の復旧費用の低減と復旧期間の短縮が図られる(堤防等治水施設の強靱性(ロバストネス)の向上が図られる)。
- 5) 計画高水位を超える洪水流を堤内地にあふれさせることにより、下流へリスクを移転せずに、当該氾濫ブロックの被害軽減を図ることができる可能性がある(流域全体でのリスク評価については別途検討が必要である)。
- 6) 今後さらなる研究が必要であるが、越流堤を設置した氾濫ブロックのリスク低減に加え、流域特性によっては下流を含む流域全体のリスク低減を図りうる可能性がある。

一方、本対策の実現に向けた課題は次のとおりである。

- 1) 越水時に破壊されない越流堤の計画、設計、築造、維持管理技術の確立が必要である。
- 2) 越流堤の近傍の土地所有者等にとっては浸水頻度が増加することから、適切な補償制度の確立等による利害関係者間の合意形成が必要である。
- 3) 越流堤及び近隣区間の堤防の天端高さが経年的に沈下等した場合に、越流堤箇所以外での越水を防ぐ機能を発揮できない場合がありうることから、越流堤区間を含む堤防高さ等を適切に維持管理する必要がある。
- 4) 不可抗力による堤防又は(及び)越流堤の破堤等が生じた場合の、堤防及び越流堤の施設管理者の責任の限界の明確化が必要である。基本的に、計画高水位を超える水位の洪水時の破堤氾濫に対して施設管理者が責任を負うことは困難と考えられる。

### 第3章 洪水氾濫防止対策と暴露・脆弱性低減対策を統合した被害軽減効果の評価手法の研究

#### 第3.1節 はじめに

第1章で述べたとおり、治水施設整備を前提として、流域の様々な主体が連携して実施する流域治水の推進が重要である。しかし、各地の洪水対策プロジェクトの検討の現場では、例えば次のような説明手法の不足に直面することがある。

2015年から2017年まで勤務したフィリピンにおける政府開発援助(ODA)による洪水対策の検討の場にて

- 「洪水対策のための河川改修プロジェクトと、避難のための洪水警報システムの整備プロジェクトの両方を要求したところ、何故両方いるのか、片方だけで良いのではないかと問われたが、両者の必要性を説明する手法がない」
- 「堤外地(図3.10参照)の集落の堤内地(同)への移転が遅れている河川改修プロジェクトについて、プロジェクトによる現状の洪水被害防止・軽減効果を評価できないか」

また、第1章でも述べたように、治水施設整備が進むと、「もう洪水氾濫は起きない」との誤解が生じ、治水施設によって守られている氾濫原への資産・人口の過度の集積、浸水に対して脆弱な土地利用により、かえって水害リスクが増大してしまうことがありうる(実際に世界各地で起きていると言われている)。このため、治水施設の整備による洪水被害の防止効果と、その他の減災対策による氾濫被害軽減効果の評価・理解が、流域治水の推進において重要と考えられ、これは仙台防災枠組み(United Nations 2015)において求められている「災害リスクの理解」の面からも重要である。

本研究(第3章)では、上記理解の促進等に資するため、治水施設によるハザード対策に加え氾濫原における減災対策(暴露・脆弱性低減対策)を実施した場合の洪水被害防止・軽減効果を評価する手法の試案を提示し、治水施設管理者と流域の様々な主体との連携・調整の具体化に役立てようとするものである。なお、試案の提示にあたっては、利用可能なデータが限られていることが多い開発途上国の洪水対策の検討の場等での適用を念頭に置き、限られた利用可能データに基づき適用可能な手法とすることを重視した。

#### 第3.2節 減災対策による被害軽減効果の評価手法のNILIM枠組みに基づく提案

本研究(第3章)では、1.7.1で述べたNILIM枠組みに基づき、減災対策による被害軽減効果の評価手法の提案を行った。以下、NILIM枠組みに基づく減災対策検討が必要な場合(3.2.1)、諸外国の特性から同必要性が認められる国の抽出(3.2.2)、既存手法の限界(3.2.3)、本研究(第3章)での提案手法の基となったNILIM手法(3.2.4)、本研究(第3章)での提案手法(3.2.5)について述べる。

##### 3.2.1 NILIM枠組みが必要な場合

洪水対策施設の整備により、社会的に合意可能な高い治水安全度が確保可能な場合には、NILIM枠組みの導入の優先度は高くないと考えられる。例えば、英国ロンドンのテムズ防潮堰とその周辺施設により、年超過確率1/1000規模の高潮に対する安全を確保しており(Environment Agency 2009)、治水安全度は十分に高いと考えられる。

一方、予算、社会的制約等により洪水対策施設による治水安全度を比較的強く抑えざるを得ない場合には、洪水対策施設以外の追加的な減災対策等を計画・実施する必要性が相対的に高くなる。このような場合には、洪水氾濫の防止対策と暴露(及び脆弱性)低減対策により構成される減災対策等を統合した被害防止・軽減効果の評価を行うために、NILIM枠組みを導入する必要性がより高くなる。

なお、洪水対策事業の各段階において必要とされる費用便益比等については、事業実施部局の規定に基づき各算定されることになる。これは、例えば、国際連合教育科学文化機関(UNESCO)と米国陸軍工兵隊の統合水資源管理国際センター(ICIWaRM)が提案している気候リスクを踏まえた政策判断分析

手法(UNESCO and ICIWaRM 2018)の場合と同様である。

### 3.2.2 各国の洪水被害防止・軽減対策

表 3.1 は、オランダ、英国(イングランド)、米国、フランス、フィリピン、日本の 6 箇国を洪水被害防止・軽減対策の観点から比較したものである。同表より、6 箇国中、フィリピンと日本の 2 箇国は、洪水対策施設により提供される治水安全度が比較的低い一方で、人口が密集した洪水氾濫原が広がっている。これは、フィリピンと日本は、ほかの 4 箇国に比べ、NILIM 枠組みを導入する優先度が高いことを意味している。

### 3.2.3 現行の洪水防止便益評価手法の限界

治水経済調査マニュアル(案)(国土交通省 水管理・国土保全局 2020)は、洪水被害の防止便益と治水事業の費用の評価手法を規定している。

しかし、洪水対策施設の整備規模を超える洪水(以下「超過洪水」という)の発生を仮定した場合には、同マニュアルは以下の困難に直面する。

第 1 に、従来型の洪水対策施設(いわゆるハード対策)による超過洪水時の洪水被害の軽減効果の評価手法が未確立である。同マニュアルは、洪水対策施設的设计規模以下の洪水に対してのみ適用可能である。

第 2 に、洪水対策施設以外による洪水被害の防止・軽減効果の評価手法が確立していない。

表 3.1 6 箇国の洪水被害防止・軽減対策の観点からの比較

	オランダ	英国(イングランド)	米国	フランス	フィリピン	日本
洪水リスク面からの土地利用の特徴	低平地に高密度で人口が分布	ロンドンでは高密度で人口が分布	大都市圏では高密度に人口が分布	低平地の高密度の人口分布地域は少ない	大都市圏の洪水氾濫域に高密度で人口が分布	大都市圏の洪水氾濫域に高密度で人口が分布
計画治水安全度	例 干拓地で年超過確率 1/10,000	リスクと状況に応じた治水安全度 例 年超過確率 1/1,000(テムズ防潮堰と周辺施設)	費用便益(国家経済発展)比に応じた治水安全度	年超過確率 1/100~1/500	例 年超過確率 1/30(ミンダナオ島のアグサン川下流)	主要河川で年超過確率 1/100~1/200
治水施設設計規模超過洪水対策	洪水被害軽減のための二線堤など	洪水による浸水しやすさに応じた土地開発の規制	管理された越水	洪水リスクに応じた土地利用の規制	一般に実質的な対策なし	一般になし
洪水保険	公的洪水保険制度なし	政府と保険業界との間の協定に基づく保険を利用可能	公的洪水保険制度あり	公的洪水保険制度あり	公的洪水保険制度なし	公的洪水保険制度なし

Sources: Davis, et al. (2008); Department for Communities and Local Government, England (2009); Department for Environment, Food & Rural Affairs, England (2013); ENW, Netherlands (2017); 板垣ら (2019); Ministry of Housing, Communities & Local Government, England (2014); RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment (2004); USACE (2019); USACE, Rijkswaterstaat,

MLIT, and EA (2011); U. S. Water Resources Council (1983)

### 3.2.4 洪水被害防止・軽減効果を評価するための NILIM 手法

国総研 気候変動適応研究本部(2013)は NILIM 枠組みの適用手法(以下「NILIM 手法」という)を提案している。図 3.1 (国総研 気候変動適応研究本部(2013)より作成)に NILIM 手法の手順を示す。NILIM 手法の長所は次のとおりである。

(1) NILIM 手法は、河川改修工事の選択肢ごとの洪水被害防止・軽減効果の評価において、上流から下流への洪水リスク移転を具体的に反映するために破堤シナリオ群を組み入れている。

(2) NILIM 手法は国土交通省の各河川事務所で一般に利用可能なデータに基づき適用可能である。堤防破堤シナリオは既往研究(例 Apel, et al. (2006))でも洪水リスクカーブ導出時に組み込まれており、これらの研究では、上流での破堤と下流の洪水リスク又は洪水頻度との関係について考察している。しかし、河川改修工事の選択肢ごとの洪水被害防止・軽減効果を評価するために破堤シナリオを組み入れている既往研究は見当たらない。

NILIM 手法は国土交通省管理の一級河川において、必要に応じて、河川改修工事の選択肢ごとの洪水リスク低減効果を評価するために適用されている(例 竹中ら(2015))。

### 3.2.5 利用可能データに基づく洪水被害防止・軽減効果の評価手法の提案

本研究(第 3 章)では、洪水対策プロジェクトによる洪水被害防止・軽減効果を利用可能データに基づき NILIM 枠組みを適用することにより評価する手法を以下(1)から(3)のとおり提案する。

提案する手法は、下記の点で NILIM 手法を簡易化している。

(a) 既存の複数規模の洪水を対象とした洪水ハザードマップ及びデジタル標高モデル(DEM)データを活用することにより、図 3.1 の手順 2 から手順 5 までを省略し計算労力を軽減している。なお、複数規模の洪水を対象とした洪水ハザードマップは常に利用可能というわけではないが、ベルギーの MOG-Maps (Alphen, et al. 2007)、オランダの洪水ハザードマップ(USACE, Rijkswaterstaat, MLIT, and EA 2011)、同フィリピン(JICA 2015; Project NOAH 2017)の事例がある。

(b) 「浸水域内の人口」といった簡易な指標を用いるとともに、利用可能な公的統計の単位地区ごとの人口又は資産、同地区の境界データ、公開衛星画像を活用することにより、図 3.1 の手順 6 と手順 7 に必要な計算作業量を軽減している。

(c) 上流から下流への洪水リスク移転が無視できる場合、すなわち、対象地域の氾濫ブロックが上下流方向に明確には分かれていない場合には、破堤シナリオを組み込まず、計算作業量を軽減している。

#### (1)評価のための具体的対象区域の選定

これは、図 3.1 の手順 1 に相当する。

最初に、対象区域の洪水リスクや洪水ハザードに関する利用可能情報、データ、例えば洪水ハザードマップを収集する。図 3.2 (JICA 2015)及び図 3.3 (Project NOAH 2017; University of the Philippines 2020)に、フィリピンの既存洪水ハザードマップの例を示す。具体的な対象区域の選定に当たっては、地勢、人口・資産の分布、その他の地域特性を考慮する。評価の対象である洪水対策プロジェクトの規模に比べて対象区域が広すぎる場合、洪水被害防止・軽減効果が明確に判定できないことがあるので留意すること。

#### (2)洪水被害指標の選定と評価

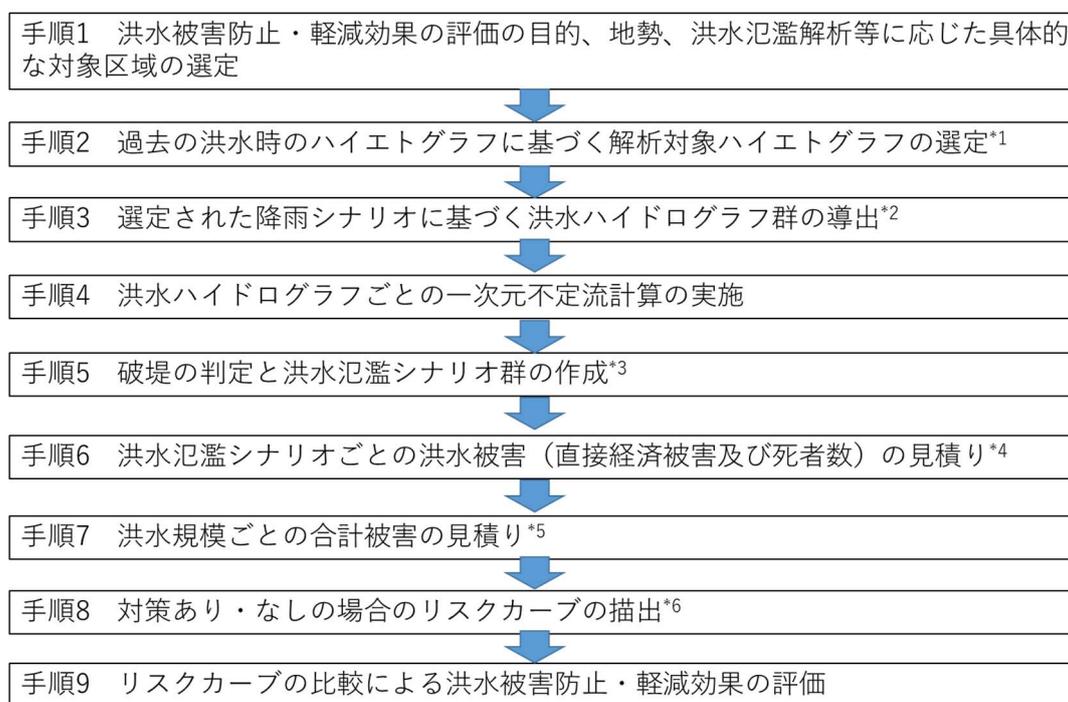
これは、図 3.1 の手順 6 と手順 7 に相当する。

本研究(第3章)では、洪水氾濫による浸水域内の人口といった、簡単な指標を提案する。洪水被害関数(浸水深等に応じた被害率を示す関数)や各家庭が所有する家財の価値といった必要情報の入手が困難な場合に、この様な簡易な指標が有用と考えられる。

家屋などの被害の程度は洪水氾濫流速(流体力)に大きく影響され、洪水氾濫時の浸水位上昇速度は人的被害に影響する(Jonkman 2016)が、本研究では立ち入らない。

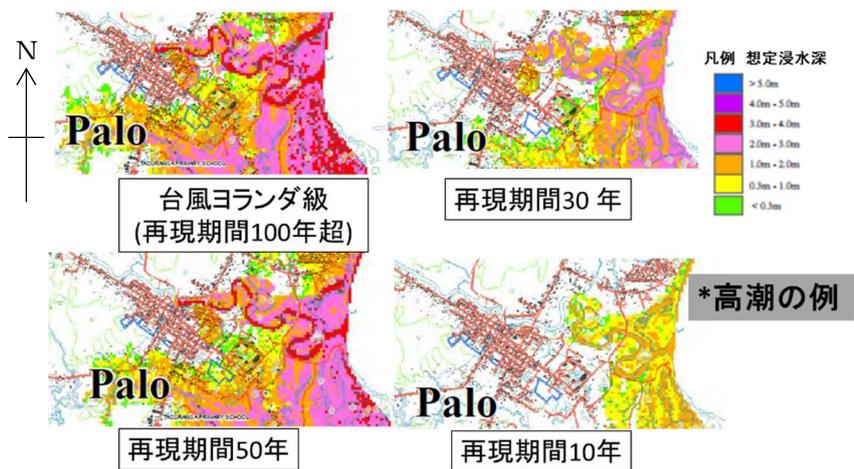
次に、洪水規模ごとの洪水被害の大きさを見積り、図3.4の赤丸印のように記入する。

洪水氾濫による浸水域内の人口を計算するには、人口分布データが必要である。我が国では、人口、世帯数、延べ床面積などの分布データを地域メッシュ統計により入手可能である(総務省 統計局 2020; 日本建設情報総合センター 2010)。しかし、この様なデータの入手が難しい場合には、限られたデータに基づき人口等の分布データを作成する必要がある。統計上の単位区域(例 フィリピンの基礎自治単位であるバラングイ)ごとの人口と単位区域の境界データ(例 図-3.5 (Project NOAH 2017))が利用可能であれば、衛星画像に基づき居住区域(住家のある区域等)と非居住区域(水田など)を区分することにより、洪水氾濫による浸水域内の人口を概略で見積ることが出来る(例 図3.6, 図3.7(プロジェクト NOAH の洪水ハザードマップ(Project NOAH 2017))に加筆)。詳細は3.3.2の(5)で述べる。



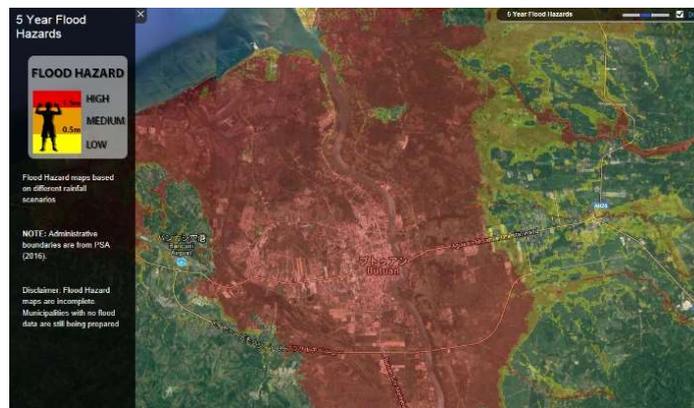
\*1 多くの場合、過去のハイトグラフのうち、河川改修計画の設計規模まで引き伸ばした場合に最も大きな被害をもたらすハイトグラフを選定する。  
 \*2 例えば、国総研 気候変動適応研究本部(2013)の事例では、年超過確率1/10から1/500までの8つの規模の洪水シナリオが設定されている。  
 \*3 堤防の横断面形状、必要な護岸等の整備状況に基づき、水位計算断面ごとに無害水位を設定する。洪水氾濫時の氾濫状況が一連と考えられる潜在的氾濫域を「氾濫ブロック」とし、氾濫ブロックごとに河川水位計算断面1つを想定破堤地点として選定する。河川の計算水位が無害水位を超えた場合、破堤シナリオと無破堤シナリオの2つが生じうるものとする。樹形図を用いることにより、複数の氾濫ブロックで構成される対象河川の洪水氾濫シナリオ群を作成する。上流で破堤した場合、下流の時系列洪水流量を低減させる。  
 \*4 治水経済調査マニュアル(案)(国土交通省 水管理・国土保全局(2020))に規定されている浸水深に応じた被害率に基づき直接経済被害額を見積る。水害の被害指標分析の手引(H25試行版)(国土交通省 水管理・国土保全局(2013))に基づき死者数を見積る。  
 \*5 洪水規模ごとに想定される被害の大きさの幅(洪水氾濫シナリオの最小値、中央値、最大値)を見積る。  
 \*6 洪水氾濫シナリオの最小値、中央値、最大値ごとにリスクカーブを描出する。

図 3.1 NILIM 手法の手順



©JICA

図 3.2 フィリピンの既存洪水ハザードマップの例



©Project NOAH ©Google

図 3.3 フィリピンのプロジェクト NOAH による洪水ハザードマップ

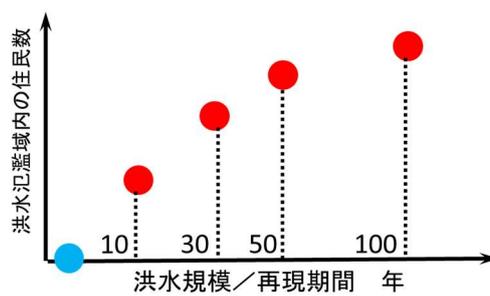
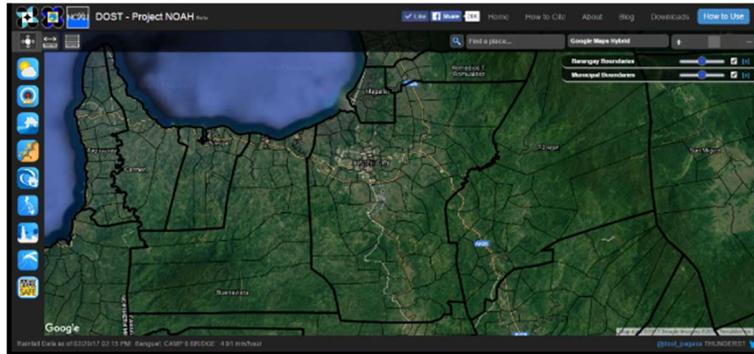


図 3.4 洪水規模ごとの洪水被害の大きさと横軸との交点の記入



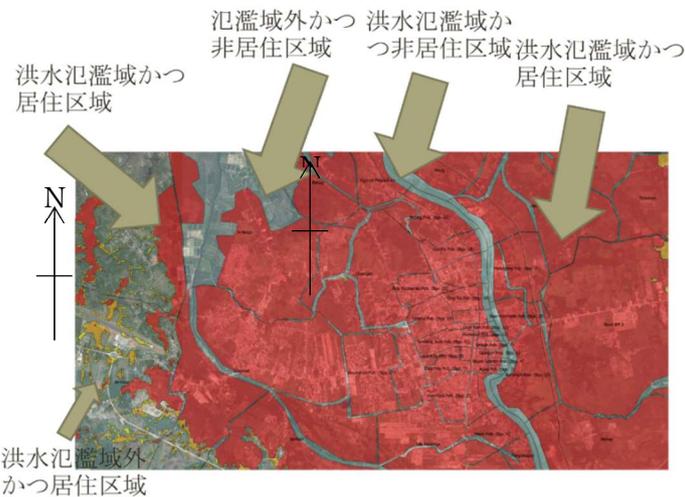
©Project NOAH ©Google

図 3.5 フィリピンの基礎自治単位(バラングイ)境界地図例



©Google

図 3.6 衛星画像に基づく居住区域と非居住区域の判別例



©Project NOAH ©Google

図 3.7 潜在的浸水域・非浸水域並びに居住区域・非居住区域の判別例

対象区域の洪水氾濫頻度については、地域の高齢者や洪水対応を所掌する地方自治体担当者等から聞き取るにより概略見積り、図 3.4 の青丸印のように横軸との交点を記入する。

複数の規模の洪水の既存ハザードマップ及び簡単な洪水被害指標を用いることにより、図 3.1 の手順 6, 手順 7 に比べて氾濫解析や被害評価の作業量が大幅に軽減される。

複数規模の洪水ハザードマップはないが、デジタル標高モデル (DEM) データ及び年超過確率に応じ

た河川水位データを利用可能な場合には、各家屋位置の浸水深を近傍の河川の水位と各地点の浸水位がほぼ同じであると仮定することにより推定する(3.3.2(4)参照)。なお、本推定は、対象区域の地勢を踏まえ上記仮定が許容可能な場合に採用可能である。

### (3)対策あり・なしのリスクカーブの描出と洪水被害防止・軽減効果の評価

本節は図 3.1 の手順8と手順9に相当する。

図 3.8 に示すように、記入された点を滑らかにつなぐことによりリスクカーブを描出する。利用情報・データ、リスクカーブの限界について、グラフの下に明記するものとする(図 3.12 参照)。

対策あり・なしのリスクカーブを比較することにより、洪水リスク低減効果を視覚的に評価する。すなわち、対策ありの場合のリスクカーブが、対策なしの場合のリスクカーブの右下に位置している場合には、対象区域の洪水リスクは当該対策により低減されることになる。

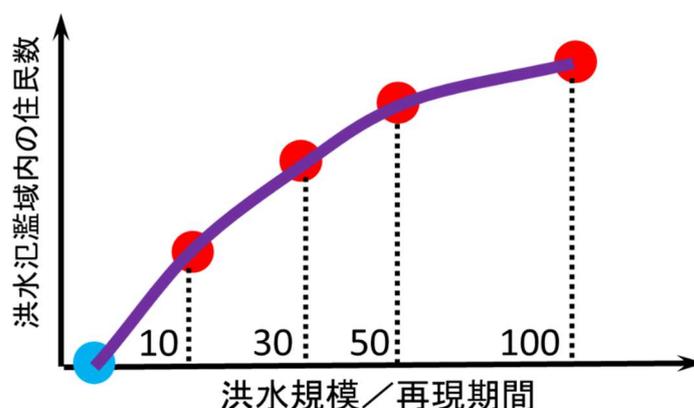


図 3.8 リスクカーブの描出

## 第 3.3 節 フィリピンでの試験適用

### 3.3.1 試験適用対象河川及び区域の概要

上記提案手法をフィリピンで実施された河川改修並びに住家移転と宅地の嵩上げによる洪水対策プロジェクトに試験適用した。フィリピンは東南アジアに位置する島国である。2015 年 8 月時点の人口は約 1 億 100 万人 (Philippine Statistics Authority 2016(1)), 国土面積は約 30 万 km<sup>2</sup> (Philippine Statistics Authority 2016(2))である。フィリピン南部のミンダナオ島のアグサン川の下流区間(図 3.9(Wikipedia 2020(1); Wikipedia 2020(2)))を試験適用対象河川として選定した。この理由は、当該河川における河川改修と宅地嵩上げを伴う住家移転プロジェクトによる洪水被害防止・軽減効果の評価において、後述のとおり困難が生じたためである。

アグサン川は、ミンダナオ島を南から北へと流れブツアン湾に流れ込む。流域面積は約 11,400 km<sup>2</sup> であり、フィリピン国内で 3 番目に大きな流域面積である。同川の下流部は、豊富な降雨量と栄養に富む土壌に恵まれ、農業開発の大きな潜在力を有する。西岸にはブツアン市があり、面積は約 758 km<sup>2</sup> (Philippine Statistics Authority 2019(1)), 人口は約 337,000 人(2015 年時点 (Philippine Statistics Authority 2019(2)))である。同市は、ミンダナオ島北部の地域経済の中心である。しかしながら、アグサン川の頻繁な氾濫は、地域の経済活動を妨げ、農業生産、家屋、人々の生業に深刻な被害をもたらしている(栗野 2010)。

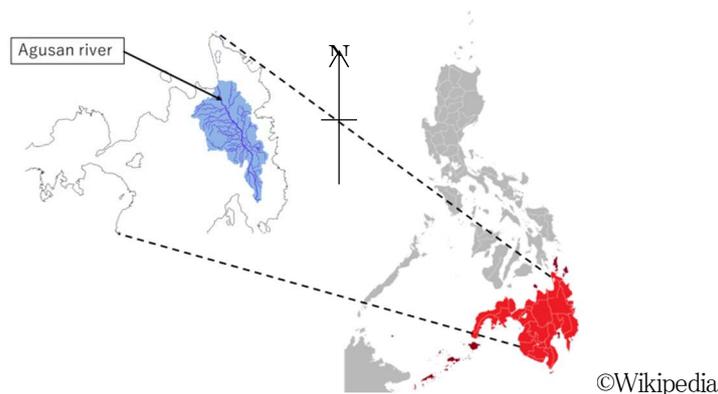


図 3.9 アグサン川位置図

このような理由により、堤防整備と河床掘削による河川改修と、宅地嵩上げを伴う住家移転を行う洪水対策プロジェクトが日本の ODA により 1988 年から 2007 年までアグサン川下流部で実施された。しかしながら、当該プロジェクトの課題の 1 つは、堤防に挟まれた川沿いの氾濫原(以下「堤外地」という。図 3.10 (プロジェクト NOAH の洪水ハザードマップ(Project NOAH 2017)に加筆)参照)にプロジェクトの事後評価時点で 12 バランガイ、約 4,500 世帯が存在していることであった(栗野 2010; 写真 3.1 (2017 年 5 月撮影)参照)。堤外地に住む人々については、堤防により守られる堤内地(図 3.10 参照)への移転が計画され、同計画の実施責任者は地方自治体であった。住家移転先はフィリピン国政府公共事業・道路省 (DPWH)により盛土されたが、住民の反対により、移転は計画どおりには進まなかった。

河道沿いに建設された堤防は、洪水時の河川水の氾濫を防ぐため、堤外地の浸水深は、堤防建設前に比べて大きくなることを見込まれる。言葉を換えれば、堤外地にとどまる世帯にとって、堤防の整備は洪水被害の増大につながる。

さらに、堤外地の家屋は、洪水時に堤外地を流れる水の流れを阻害し水位を上昇させる恐れがあり、また、家屋が押し流され、下流の橋でせき止められた場合、河川の流れを塞ぎ、河川水位を上昇させる恐れがある。このような河川水位の上昇は、堤防破堤の可能性を増し、堤防で守られた地域の洪水リスクを悪化させる。

これらのリスクについて吟味するため現地状況を視察し、堤外地の残存家屋による洪水時の河川水位上昇への影響は無視できる程度であると結論づけた。この理由は、堤外地に沢山の高木が繁茂(写真 3.2 参照)していたからである。

### 3.3.2 試験適用の概要

他地域への将来の適用拡大を念頭に、試験適用に当たっては公表データのみを用いた。

試験適用の具体的な手順は以下のとおりである。

#### (1)既存洪水ハザードマップの収集

アグサン川下流部の洪水リスクと洪水ハザードに関する情報、例えば洪水ハザードマップを探したところ、フィリピン国政府とフィリピン大学によるプロジェクト NOAH が提供している洪水ハザードマップ(図 3.3 参照)を同プロジェクトのホームページで見つけた。

当該洪水ハザードマップは、3つの洪水規模、すなわち年超過確率 1/5, 1/25, 1/100 について提供されていた。これらのマップでは見積られた浸水深に応じて赤、オレンジ、黄に色分けされており、順に、浸水深 1.5m 以上、1.5m 未満 0.5m 以上、0.5m 未満に対応している。なお、堤防による洪水防御効果は当該洪水ハザードマップには反映されていない。



©Project NOAH ©Google

図 3.10 堤外地・堤内地の定義



写真 3.1 堤外地の町並み



写真 3.2 堤外地に繁茂する樹木群

#### (2) 評価対象区域の選定

ブツアン市(既出)とマガリヤネス町(2015 年時点人口約 2 万 1 千人 (Philippine Statistics Authority 2019(3)))の 2 つの自治体を対象区域として選定した。この理由は、両自治体がアグサン川下流部で見積られた氾濫域の大部分を占めているためであり、これは、プロジェクト NOAH の洪水ハザードマップと自治体境界線図を重ね合わせることで判断した。

#### (3) バランガイ境界と人口データの収集

上記 2 自治体のバラングイの境界データ(図 3.5)をプロジェクト NOAH のホームページから入手した。バラングイごとの人口データは、フィリピン国政府統計庁(Philippine Statistics Authority)のホームページより入手した。

#### (4) 家屋ごとの洪水浸水深の見積りの試み

プロジェクト NOAH の洪水ハザードマップで対象としている洪水規模以外の規模の洪水における、各家屋位置の浸水深を見積ることを試みるため、各家屋位置における地盤高の推定を試みた。フィリピン国内の GIS データの無料提供を行っている PhilGIS のホームページより 30 m 及び 90 m のデジタル標高モデル(DEM)データを手出し、無料 GIS ソフトウェアである QGIS を用いてアグサン川下流区間を含むいく

つかの横断面を作成し、グーグルマップのホームページから入手した衛星画像と比較した。この結果、河川などの水面部分の標高が周辺の地盤高よりも高いことが認められた(図 3.11 (PhilGIS (2015)データより作成)参照)。このように標高データの信頼性が高くないと考えられたため、DEM データに基づく家屋位置ごとの標高の推定を断念した。

#### (5)洪水氾濫域内の住民数の見積り

対象 2 自治体内の家屋位置データを入手できなかったため、当初、グーグルの衛星画像から各家屋位置を読み取り、洪水氾濫域内の家屋数を見積ろうとした。しかし、このような作業には膨大な時間が掛かることが判明したため、以下のような別の方法を採ることとした。

対象区域の住民の分布は、次のような簡易な手法により見積ることとした。

- 1) グーグルの衛星画像に基づき、家屋の見える居住区域と、開放水面、水田等の非居住区域に概略区分する(図 3.6 参照)。
- 2) 洪水ハザードマップにバランガイ境界図及び居住・非居住区域区分図を重ね合わせ、これらに基づき、バランガイ区域を下記 4 つの区域に分類した(図 3.7 参照)。
  - (a) 洪水時の氾濫域内の居住区域
  - (b) 洪水時の氾濫域内の非居住区域
  - (c) 洪水時の非氾濫域内の居住区域
  - (d) 洪水時の非氾濫域内の非居住区域

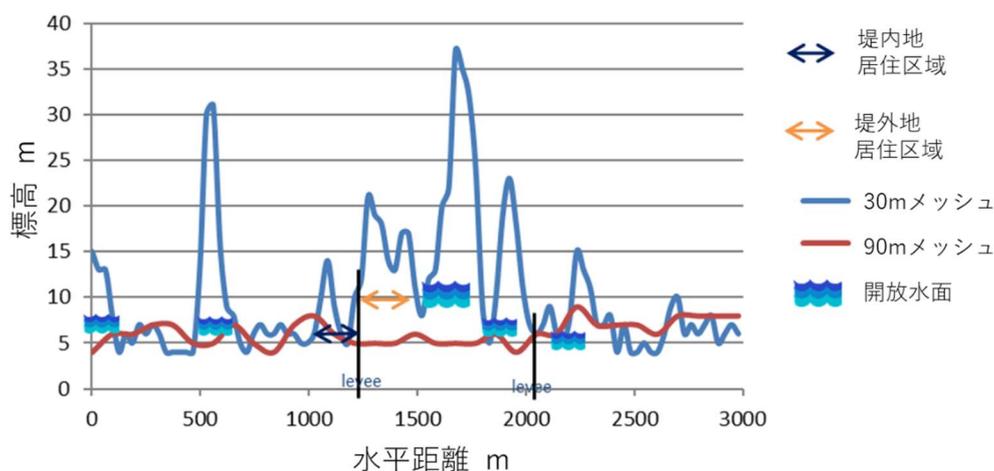


図 3.11 アグサン川下流区間を含む横断面の例

居住区域に均一に住民が分布していると仮定することにより、各バランガイの洪水氾濫域に居住する住民数は次式により算定される。

$$P_{fi} = P_i * A_i / (A_i + C_i) \quad (3)$$

ここで、 $P_{fi}$  はバランガイ  $i$  の洪水氾濫域内の住民数、 $P_i$  はバランガイ  $i$  の人口、 $A_i$  はバランガイ  $i$  内の洪水氾濫域内の居住区域面積、 $C_i$  はバランガイ  $i$  の非氾濫域内の居住区域面積。

そして、 $P_{fi}$  を対象区域全体で足し合わせた。

## (6)追加情報の収集

フィリピン国政府公共事業・道路省(DPWH)の、アグサン川下流改修プロジェクトを所掌している現地事務所(公共事業・道路省第13 地方事務所(DPWH-R XIII))を訪問し、下記情報を収集した。これらの情報は、河川改修事業による洪水ハザードへの影響(氾濫しやすさ、浸水深等の変化)の評価に必要である。

- 1) 堤防により守られている区域を推定するために必要である、堤防高さの縦断分布図(河川改修実施前後)。
- 2) 洪水対策プロジェクト実施後のリスクカーブの屈曲点を設定するために必要である、治水計画(河川改修計画)の治水安全度(年超過確率)。
- 3) 治水計画規模以下の洪水時のリスクカーブの調整に必要である、河川改修により整備された堤防により洪水流下幅が狭められることによる堤外地の水位上昇量に関する情報。

収集した情報から、下記条件が確認又は推定された。

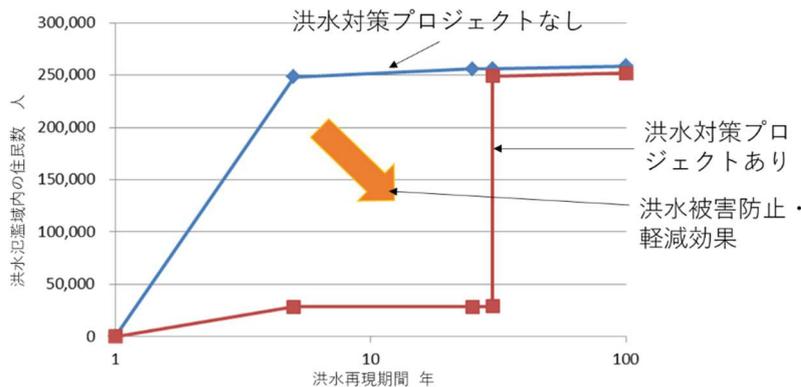
- i. 河川改修実施前の堤防高さは無視できる程度である(低い)。
- ii. 治水計画の治水安全度は年超過確率約 1/30 であり、設計洪水流量は 6,000m<sup>3</sup>/s である。
- iii. 洪水対策施設は将来的に治水安全度 1/100(年超過確率)、設計洪水流量 8,000m<sup>3</sup>/s まで改良可能である。
- iv. 堤防整備により洪水流下幅が狭められることによる堤外地の洪水水位上昇量は、治水計画規模洪水時において、場所により 1.0m から 1.5 m と見積られる。

## (7)リスクカーブの描出

以上の結果、洪水対策プロジェクト実施前後のリスクカーブが各描出された。なお、洪水氾濫域内の人口分布はプロジェクト実施前後で同じと仮定した。

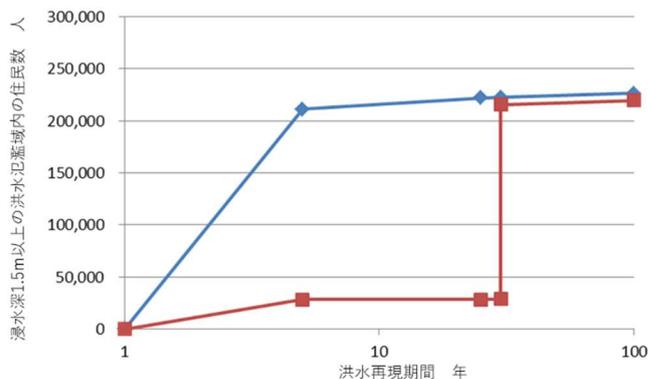
その他の条件及び仮定は次のとおりである。

- 1) 堤内地: プロジェクト実施後は、年超過確率 1/30 規模(治水計画規模)以下の洪水時には洪水氾濫は発生しないものとする。年超過確率 1/30 規模を超える洪水時には、プロジェクト NOAH の洪水ハザードマップに示されるように洪水氾濫が生じる。
  - 2) 堤外地:年超過確率 1/1 規模を超える洪水から 1/30 規模までの洪水時には、プロジェクト NOAH の洪水ハザードマップに示される浸水深に 1.5 m を加えた浸水深となる(堤防整備により洪水流下幅が狭められることによる水位上昇の影響を考慮するため)。このため、プロジェクトによる洪水被害防止・軽減効果を吟味するために、「浸水深 1.5m 以上の浸水域内の住民数」との指標を追加した。1/30 規模を超える洪水時にはプロジェクト NOAH の洪水ハザードマップに示される浸水深となる。
  - 3) 堤内地において 27.83 ヘクタール(0.2783 km<sup>2</sup>)の土地の嵩上げ工事が住家移転先として実施されるとともに、プロジェクト期間中に 1,479 の住家が堤外地から堤内地へ移転された(栗野 2010)。これら 1,479 の住家は年超過確率 1/100 規模洪水に対して安全であると仮定し、これら 1,479 の住家の居住者数を 6,803 と見積った。これは、フィリピンの世帯当たり平均人数が 4.6 人(Philippine Statistics Authority 2012)であることから、1,479 に 4.6 を掛けて算定した。そして、プロジェクト実施後については、この 6,803 人を堤内地の洪水氾濫域内の人口から差し引いた。
- 5 つの洪水規模、すなわち、年超過確率 1/5, 1/25, 1/100, 1/30, 1/1 における洪水氾濫域内の住民数に基づきリスクカーブを描出した。ここで、最初の 3 つの洪水規模はプロジェクト NOAH の洪水ハザードマップで採用された洪水規模であり、4 つめの洪水規模はアグサン川下流の河川改修の治水計画規模であり、最後の洪水規模はほぼ洪水被害がない洪水規模であり、2017 年 5 月時点の聞き取り調査や情報に基づき設定したものである。描出されたリスクカーブを図 3.12 に示す。



※この図はフィリピン国政府市民防衛局派遣JICA専門家が同国政府の公共事業・道路省 (DPWH)第13地方局、プロジェクトNOAH、統計庁 (PSA)、及び同国ミンダナオ島のアグサン・デル・ノルテ州のブツアン市、マガリヤネス町並びにグーグルマップの利用可能データに基づき2017年5月18日に暫定的に作成したものである。本図はブツアン市域とマガリヤネス町域を対象に作成したものである。

(a)対象区域の想定浸水域全体



※この図はフィリピン国政府市民防衛局派遣JICA専門家が同国政府の公共事業・道路省 (DPWH)第13地方局、プロジェクトNOAH、統計庁 (PSA)、及び同国ミンダナオ島のアグサン・デル・ノルテ州のブツアン市、マガリヤネス町並びにグーグルマップの利用可能データに基づき2017年5月18日に暫定的に作成したものである。本図はブツアン市域とマガリヤネス町域を対象に作成したものである。本図では、河川改修工事の設計規模 (再現期間30年) までの規模の洪水時に、堤防に挟まれた河川域で1.5mの水位上昇が生じるものと仮定している。

(b)対象区域の浸水深 1.5m 以上の想定浸水域のみ

図 3.12 プロジェクト実施前後の洪水氾濫域内の人口の比較

### (8) 洪水リスク低減効果の評価

図 3.12 より、プロジェクト実施前のリスクカーブに比べプロジェクト実施後のリスクカーブが右下に位置していることが見て取れる。したがって、当該プロジェクトにより、対象区域の洪水リスクが低減されたと言える。

### 3.3.3 考察

フィリピンのミンダナオ島のアグサン川下流部における河川改修 (ハザード対策) と住家移転・盛土 (暴露・脆弱性対策) による洪水被害防止・軽減効果を限られた利用可能データに基づき、提案

した手法を適用し評価した。ここで、当該河川改修の治水安全度は年超過確率 1/30 と高くない。評価の結果、対象 2 自治体内(ブツアン市、マガリヤネス町)の洪水リスクは当該プロジェクトにより低減された。住家移転の一部は完了していないが、本研究ではプロジェクト実施後の状況の正しさの判断を行わずに洪水被害防止・軽減効果を評価した。

評価結果は、プロジェクト実施後に地域住民を対象に JICA(国際協力機構)が実施したアンケート調査の結果と定性的に一致している。すなわち、回答者の 81%はプロジェクト実施後洪水氾濫がないと答え、78%はプロジェクト実施後浸水期間がないと答えている(栗野 2010)。

上記プロジェクトの実施に加え、仮に堤外地での居住禁止措置が採られた場合、再現期間 1 年から 30 年までのリスクカーブは、堤外地から堤内地の安全な場所へ移転した住民数に応じて、さらに下方へ変化するであろう。

なお、プロジェクト NOAH で提供された複数規模の洪水を対象とした洪水ハザードマップは、河川改修と住家移転プロジェクトによる洪水リスク低減効果の評価において有用であった。

提案手法の長所は次のとおりである。

- 1) 浸水が洪水被害の主な発生原因であるとともに、河川改修により確保される治水安全度があまり高くなく、河川改修に加えて暴露・脆弱性対策が必須の場合について、ハザード対策と暴露・脆弱性対策を統合した洪水被害防止・軽減効果を限られた利用可能データに基づき評価することが出来る。洪水リスク評価を行うために必要なデータが十分にあるとは一般に言えない、開発途上国における洪水対策の検討の場合等において、本提案手法は有用と考えられる。
- 2) 複数規模の洪水を対象とした洪水ハザードマップ、区域ごとの人口又は資産の公表データ及び区域境界データ、並びに公開された衛星画像が入手可能であれば、ハザード対策と暴露・脆弱性対策を統合した洪水被害防止・軽減効果を評価することができる。
- 3) 本章で対象とした対策の種類以外の対策、例えば避難場所の整備、早期警報システムの導入についても、リスクカーブの縦軸の指標を例えば「洪水氾濫域から避難場所へ避難できない住民数」等に変えることにより、本提案手法の適用対象範囲を拡げることが可能と考えられる。

一方、本提案手法の主な限界は次のとおりである。

- ① 洪水対策プロジェクトの費用便益費を評価することができない。
- ② 対象区域の洪水氾濫ブロックが上下流方向に分かれているとともに堤防で防御される場合、本提案手法では上流から下流への洪水リスク移転を考慮することができない。このような洪水リスク移転を考慮するには、図 3.1 に示す NILIM 手法における手順 5, 6, 7 のような、より多くの水理計算が必要である。
- ③ 本提案手法の適用性は、これまでのところ、河川改修と土地の嵩上げを伴う住家移転プロジェクトについてのみ吟味されたに過ぎず、流域治水の推進において想定される様々な種類の対策における適用性の確認が引き続き必要である

### 第 3.4 節 まとめ

フィリピンのミンダナオ島のアグサン川下流部で実施された、河川改修(ハザード対策)と土地の

嵩上げを伴う住家移転(暴露・脆弱性対策)による洪水対策プロジェクト(河川改修により確保される治水安全度が年超過確率 1/30 と高くない)による統合的な洪水被害防止・軽減効果を限られた利用可能データに基づき評価した。評価結果は、当該プロジェクト実施後に JICA が実施したアンケート調査結果と傾向が一致していた。

本提案手法は、複数規模の洪水を対象とした洪水ハザードマップ、区域ごとの人口又は資産データ及び区域境界データ、一般的な公開衛星画像が利用可能である場合に適用可能であることから、利用可能データが限られる開発途上国の現場等において有用な手法と考えられる。

なお、本提案手法は、プロジェクトの費用便益費の評価には適用できない。また、河川上流から下流へのリスク移転が無視できない場合には、さらなる計算作業が必要となる。また、本研究では、河川改修と土地の嵩上げを伴う住家移転プロジェクトのみを対象に提案手法の適用性を吟味したものである。

## 第4章 提言

本研究の成果に基づく提言は次のとおりである。

1. 地球温暖化に伴う気候変動の影響による豪雨・洪水の強大化、頻発化が引き続き見込まれる中で、治水施設の整備推進を前提として、治水施設の整備規模を超える洪水時の被害の防止・軽減を図る流域治水の促進が重要であるが、様々な主体が有機的に連携した減災対策等を推進していくには、リスクコミュニケーション、合意形成等に必要である、減災対策の具体的な検討手法と、減災対策による被害軽減効果の評価手法の確立が必要である。
2. 減災対策等の検討に当たっては、従来の担当部局ごとの(縦割りの)減災対策等に限らず、近年の ICT 技術等を活用し、より具体的なリスクコミュニケーションを通じた、新たな減災対策手法の導入の検討が可能となってきたと考えられる。
3. これまでの治水施設整備の蓄積を生かしつつ次のステップへ進むための、従来の「洪水防御」に加え、新しい概念に基づく対策(超過洪水時の被害軽減対策となる治水施設整備)の検討手法とそれによる効果の評価手法の確立が必要である。
4. 上記新たな対策手法の1例として、治水施設の整備推進を前提として、治水施設の整備規模を超過する洪水時の堤防の越水地点を制御することによる減災対策手法について、公表データに基づき越水地点を具体的に検討する手法を提案するとともに、試験適用により効果を試算した(第2章)。なお、堤防の越水地点の制御による氾濫水量の低減には、越水時に破壊されない越流堤の計画、設計、築造技術と、計画どおりの越水を将来にわたり確保するための越流堤及び隣接する堤防区間の天端高さ等の維持管理の技術の確立が必要である。本提案により、洪水氾濫を防止・制御するための堤防等の整備状況・機能に応じた土地利用や、土地利用に応じた堤防等施設の整備を実現するための手法の確立に向けた議論が進むことを期待する。
5. 堤防の越水地点の制御による氾濫水量の低減対策を地域に導入するには、以下の要件を満たす必要があると考えられる。
  - 1) 洪水対策を治水施設管理者任せにしない地域の社会特性(高い意識)
  - 2) 地域全体の利害について責任を持って考える主体の存在
  - 3) 治水施設の整備規模を超える洪水における治水施設管理者の責任範囲の明確化と地域との合意
  - 4) 流域・地域全体としての被害を軽減するために洪水氾濫域を偏在化させる対策を導入する場合、浸水被害の適切な補償制度の確立
  - 5) 地域の合意形成を図るファシリテーター・コーディネーターの存在
6. 堤防の越水地点を制御することによる氾濫水量の低減対策は「土地の浸水頻度を偏在化させることによる減災対策」であり、従来の、「資産集積度等は踏まえるが、出来るだけ平等な治水安全度の確保」と一見異なるが、本対策は治水施設の整備規模を超過する洪水時の危機管理対策であることから、従来の方針と必ずしも相容れないものではないと考えられる。

7. 第 3 章で提案した「ハザード対策と暴露・脆弱性対策を合わせた被害防止・軽減効果の評価手法」は、流域治水を推進していく過程で、各主体が実施する防災・減災対策による被害防止・軽減効果を流域の各主体間で相互に理解し、各主体間の具体的調整等を行ううえで必要な評価手法の試案の 1 つであり、引き続き手法の確立に向けた議論・検討が進むことが期待される。
8. 氾濫原の様々な主体による減災対策の実施には各主体の費用(時間を含む)が掛かることから、堤防等施設の整備中心の洪水対策に比べ住民の負担は増すと考えられる。このため、氾濫原における減災対策等を後回しにして、堤防等施設の整備のみを要望する場合があります。このような事態は、流域治水の推進にとって好ましくないことから、流域における減災対策の実施を堤防等施設整備の要件とするなどの制度上の工夫が重要であると考えられる。
9. 氾濫原での減災対策が進んだために、堤防等整備の優先順位が下げられるようなことがあると、氾濫原における減災対策を進める意欲が低下することが考えられる。社会的合意である治水計画(河川整備基本方針等)に基づく堤防等整備と、治水施設の整備規模を超過する洪水時の減災対策とは別のものである(図 1.12, 図 1.13, 図 3.12 参照)ことを踏まえ、減災対策の進捗を理由として治水安全度の向上を怠ってはならない(流域での対策により治水施設整備を代替しようとしてはいけない)。
10. 減災対策等による洪水被害防止・軽減効果が具体的に評価され、リスクコミュニケーションを通じて各主体の疑問点が解消されること等により、適切な規模の治水投資・減災対策が持続的に実施されることが、我が国のこれまでの歴史を踏まえ、社会・経済の持続的な発展にとって重要と考えられる。
11. 流域治水は様々な主体が自分ごととして取り組むことが重要であるが、多くの主体は減災対策等以外の様々な仕事等を処理しながら日々を過ごしている。このため、具体的な減災対策等の検討に当たっては、これまでの知見等の蓄積のある学識者、防災部局、河川管理者等が技術的に支援していくことが、効率的かつ現実的と考えられる。

## 第5章 結論

本研究は、地球温暖化に伴う気候変動の影響による豪雨・洪水の強大化、頻発化を踏まえ、堤防・ダム等の治水施設の整備等の着実な推進を前提として、流域の様々な主体が連携して実施する持続的な洪水被害の防止・軽減対策(流域治水)の検討・実施過程におけるリスクコミュニケーション、合意形成に必要である、減災対策の具体的な検討手法及びそれによる効果の評価手法の確立に向けた議論に資する試案を提示するとともに、試験適用結果について述べた。特に、これまでの治水施設整備の蓄積を生かしつつ次のステップへ進むため、従来の「洪水防御」に加え、治水施設の整備規模を超過する洪水時の被害軽減対策となる治水施設整備の具体的な検討手法とそれによる効果の試算例について第2章で述べた。

今回提案した検討・評価手法は、近年のICT技術の発展等により利用可能となった、公開されたデジタル標高モデル、衛星画像等を用いて、専門的な技術がなくとも適用できる手法となるよう努めた。この理由は、流域の様々な主体が連携して実施する流域治水において、必ずしも洪水対策の専門知識を持たない主体が含まれることから、誰でも適用可能な手法であることが、検討・評価結果の透明性・信頼性を高めると考えられるためである。さらに、利用可能データが限られる場合が多い開発途上国の洪水対策現場等においても適用可能な手法となるよう配慮した。

なお、気候変動下の流域治水を促進するため、下記課題について引き続き研究していく必要がある。

- 1) 河川改修が途上である場合、第2章で提案した堤防の越水地点の制御による減災対策による効果が発現するような規模の洪水の生起頻度がそれほど低くないと見込まれることから、対策による年平均被害軽減期待額を公開データに基づき簡便に評価する手法の開発(第2章でその第1段階として概略の評価を試みた)
- 2) 上記減災対策の実施における課題のうち、本研究で取り組むことが出来なかった、流域全体としてのリスク評価手法の開発
- 3) 本研究で対象としなかった種類の減災対策による被害軽減効果の評価手法の開発
- 4) 本研究の試験適用の対象区域とは異なる地形、河川氾濫、社会・経済特性等を有する地区における本研究で提案した手法の適用性の検証

## 参考文献

- 秋山壽一郎:樹林帯の氾濫流抑制機能, 自然災害科学, Vol. 25, No. 3, pp. 268-276, 2006.
- 秋山壽一郎, 重枝未玲, 有働貴行, 山尾匡人:水防林が氾濫流の流況に及ぼす影響と減勢効果, 土木学会論文集, B1, Vol. 67, No. 4, pp. L907-L912, 2011(1).
- 秋山壽一郎, 重枝未玲, 松田健介, 山尾匡人, 大庭康平:樹林帯と堤内地盤高が越水氾濫流量に及ぼす影響, 河川技術論文集, 第 17 卷, pp. 347-352, 2011(2).
- 栗野晴子:フィリピン アグサン川下流域開発事業 アグサン川下流域灌漑事業, 事後評価報告書, pp. 2-11 - 2-13, 2010.
- イアン・L・マクハーグ:デザイン・ウィズ・ネーチャー, 集文社, 1994.
- 池内幸司, 越智繁雄, 安田吾郎, 岡村次郎, 青野正志: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, Vol. 67, No. 3, pp. 133-144, 2011.
- 板垣修:オランダの洪水対策最新事情, 土木技術資料, 62-9, pp. 44-45, 2020.
- 板垣修, 大山璃久, 天野邦彦:米英蘭仏の事例を踏まえた洪水対策分野の気候変動適応策に関する考察, 河川技術論文集, 第 25 卷, 土木学会水工学委員会河川部会, pp.25-30, 2019.
- 市川温, 松下将司, 堀智晴, 椎葉充晴:水災害危険度に基づく土地利用規制政策の費用便益評価に関する研究, 土木学会論文集, B, Vol. 63, No. 1, pp. 1-15, 2007.
- 一般社団法人 iRIC-UC:Nays2DFlood, 2020.
- 上野鉄男:治水事業をめぐる諸問題とこれからの治水の課題と展望, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号, B-1, pp. 1-16, 2002.
- 姥浦道生, 石坂公一, 佐藤健:水害リスクを考慮した土地利用コントロールの実態とその可能性, 研究 No.1106, 住総研研究論文集, No.39, 2012.
- 梅田信:浸水痕跡現地調査データ, 2019.
- 柿本竜治, 田代達郎, 山田文彦, 藤見俊夫:土地利用の空間分布推定の曖昧性を考慮した水害リスクカーブ生成システムの構築 -熊本市壺川地区の再現期間別浸水被害額推定による実用性の検証-, 都市計画論文集, 日本都市計画学会, Vol.46, No.3, pp. 931-936, 2011.
- 梯滋郎, 中村晋一郎, 沖大幹, 沖一雄:日本の水害常襲地の分布とその特性, 土木学会論文集, B1, Vol.70, No.4, pp. L1489-L1494, 2014.
- 河田恵昭:津波災害 増補版, 岩波新書(新赤版), 1708, 岩波書店, p.113, 2018.
- 環境省:IPCC 第 5 次評価報告書の概要, 2015 年 3 月版, p. 20, 2015.
- 環境省・文部科学省・農林水産省・国土交通省・気象庁:気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート 2018, パンフレット, p. 2, 2018.
- 木内望:水害リスクを踏まえた建築・土地利用マネジメントに関する考察 -土地利用・建築規制, 計画誘導, 市場誘導に関わる制度の実態と課題-, 都市計画論文集, 日本都市計画学会, Vol.54, No.3, pp. 923-930, 2019.
- 建設省 土木研究所 河川研究室:越水堤防調査最終報告書 -解説編-, 土木研究所資料, 第 2074 号, 1984.

建設省 土木研究所 河川部 総合治水研究室:建築物の耐水化に関する研究, 治水研究〔III〕, 土木研究所資料, 第 1916 号, 1983.

建設省 土木研究所 河川部 都市河川研究室:二線堤の氾濫流制御機能と被害軽減効果, 土木研究所資料, 第 3695 号, 2000.

国土開発技術研究センター:改定解説・河川管理施設等構造令, 日本河川協会, 山海堂, p. 106, 2000.

国土交通省: 河川関係情報・データ, 水系別・指定年度別・地方整備局等別延長等調, 平成 30 年 4 月 30 日現在, 2018.

国土交通省:水文水質データベース, 2020.

国土交通省 河川局: 河川事業概要 2006, 日本と世界の河川の比較, p. 3, 2006.

国土交通省 関東地方整備局 荒川上流河川事務所:治水事業の系譜 ～「関東流」と「紀州流」～, [000659531.pdf \(mlit.go.jp\)](https://www.mlit.go.jp/000659531.pdf), 2021. (2021 年 4 月 18 日閲覧)

国土交通省 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会:気候変動を踏まえた治水計画のあり方 提言, 令和 3 年 4 月改訂, pp. 18, 19, 2021.

国土交通省 九州地方整備局:現存する野越について, 城原川ダム事業の関係地方公共団体からなる検討の場, 第 3 回, 参考資料-2, 2016.

国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部:気候変動適応策に関する研究 (中間報告), 国土技術政策総合研究所資料, 第 749 号, pp. II-213 - II-216, II-232 - II-235, 2013.

国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部:河川・海岸分野の気候変動適応策に関する研究, 国総研プロジェクト研究報告, 第 56 号, pp. 160-161, 203, 206, 2017.

国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部:気候変動下の都市における戦略的水害リスク低減手法の開発, 国土技術政策総合研究所資料, 第 1080 号, pp. 55-57, 248-253, 270-274, 304, 2019.

国土交通省 社会資本整備審議会:大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について ～社会意識の変革による「水防災意識社会」の再構築に向けて～, 答申, 2015.

国土交通省 社会資本整備審議会:気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について ～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～, 答申, 2020.

国土交通省 中国地方整備局 岡山河川事務所:高梁川水系小田川洪水浸水想定区域図, 想定最大規模, 2020.

国土交通省 都市局 公園緑地・景観課:小規模公園費用対効果分析手法マニュアル, 改訂第 2 版, 2017.

国土交通省 都市局 公園緑地・景観課:大規模公園費用対効果分析手法マニュアル, 改訂第 4 版, 2018.

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(H25 試行版), 2013.

国土交通省 水管理・国土保全局:国土交通省河川・砂防技術基準調査編, 第 3 章第 2 節 p. 14, 第 7 章第 3 節 p. 5, 2014.

国土交通省 水管理・国土保全局:治水経済調査マニュアル(案), 2020.

国土交通省 水管理・国土保全局:河川整備基本方針の変更の考え方について, 社会資本整備審議会 河川分科会, 河川整備基本方針検討小委員会, 第 113 回, 資料 1, 2021.

国土交通省 水管理・国土保全局 河川計画課:治水経済調査マニュアル(案)各種資産評価単価及びデフレーター, 令和 3 年 3 月改正, 2021.

国土地理院:基盤地図情報数値標高モデル, 基盤地図情報ダウンロードサービス, DEM5A, 2020.

小笹山秀夫:大洲雨水貯留池(広島市民球場地下)による都市浸水対策の取組と効果, 水循環貯留と浸透, 雨水貯留浸透技術協会, Vol.117, pp. 25-28, 2020.

坂井啓吾, 谷川寛太郎:東京都内の中小河川における河川整備のストック効果, 水循環 貯留と浸透, 雨水貯留浸透技術協会, Vol.117, pp. 15-19, 2020.

消防庁:平成 27 年台風第 18 号による大雨等に係る被害状況等について, 第 40 報, 2017(1).

消防庁:平成 28 年台風第 10 号による被害状況等について, 第 43 報, 2017(2).

消防庁:平成 29 年 6 月 30 日からの梅雨前線に伴う大雨及び台風第 3 号の被害状況及び消防機関等の対応状況について, 第 77 報, 2018.

消防庁:平成 30 年 7 月豪雨及び台風第 12 号による被害状況及び消防機関等の対応状況, 第 59 報, 2019.

消防庁:令和元年東日本台風及び前線による大雨による被害及び消防機関等の対応状況, 第 67 報, 2020.

消防庁:令和 2 年 7 月豪雨による被害及び消防機関等の対応状況, 第 56 報, 2021.

末次忠司:治水経済史 一水害統計及び治水経済調査手法の変遷一, 土木史研究, 第 18 号, pp. 603-618, 1998.

末次忠司:氾濫被害軽減のための氾濫原管理, 水利科学, 47 巻, 6 号, pp. 57-89, 2004.

末次忠司:河川の科学, 図解雑学, ナツメ社, p. 80, 2006.

末次忠司:江戸時代の水管理技術, 水利科学, No.358, pp. 44-47, 2017.

末次忠司, 舘健一郎, 小林裕明:防災樹林帯による氾濫流制御に関する研究, 水工学論文集, 第 42 巻, pp. 805-810, 1998.

全国治水砂防協会:土砂災害防止法令の解説, 改訂 3 版, pp. 21-29, 2020.

総務省 統計局:地域メッシュ統計, <http://www.stat.go.jp/data/mesh/index.html>, 2020. (2020 年 4 月 2 日閲覧)

竹林征三:ダムのはなし, 技報堂出版, pp. 40-42, 1996.

竹中裕基, 板垣修, 小林勝也, 服部敦:様々な洪水規模に対する河道一構造物群システムの応答シナリオに基づく氾濫リスク・減災効果評価, 河川技術論文集, 第 21 巻, pp. 492-494, 2015.

田中智大, 立川康人, 萬和明:降雨の時空間分布を考慮した浸水・氾濫に対する水害リスクカーブの作成, 土木学会論文集, B1, Vol. 71, No. 4, pp. I1483-I1488, 2015.

田中智大, 立川康人, 市川温, 萬和明:降雨継続時間に対する総降雨量の条件付き確率分布を用いた水害リスクカーブの作成, 土木学会論文集, B1, Vol. 72, No. 4, pp. I1219-I1224, 2016.

田中智大, 市川温, 萬和明, 立川康人: 浸水被害確率マップ作成手法の開発と宅地かさ上げによる便益評価への応用, 土木学会論文集, B1, Vol. 74, No. 4, pp. L1477-L1482, 2018.

田辺敏夫, 大熊孝: 城原川流域における野越の役割と効果に関する研究 - 氾濫許容型治水の実例と今後の発展可能性について -, 土木史研究, 第 21 号, pp. 147-158, 2001.

田辺敏夫, 大熊孝, 中川武雄: 阿賀野川右岸地区における氾濫許容型治水に関する研究 - 安野川流域における白川堰・羽黒堰の役割に関する今日的評価 -, 土木史研究, 第 20 号, pp. 129-140, 2000.

中央防災会議: 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告, p. 9, 2011.

東京都: 土砂災害警戒区域等マップ, [土砂災害警戒区域等マップ \(sabomap.jp\)](http://sabomap.jp), 2020. (2021 年 6 月 28 日閲覧)

日本建設情報総合センター: 100 m メッシュ延べ床面積データ, 2010.

橋本将明, 中辻崇浩, 岸野晃子, 山本一浩, 池内幸司: レーザ測量データを用いた霞堤における遊水機能の実態把握と治水効果の検証, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp. 103-108, 2019.

馬場美智子, 岡井有佳: 日仏の水害対策のための土地利用・建築規制 - 滋賀県の流域治水条例とフランスの PPRN を事例として -, 都市計画論文集, 日本都市計画学会, Vol.52, No.3, pp. 610-616, 2017.

平野淳平, 大楽浩司: 東京 23 区における降水変動を考慮した水害リスク評価手法の開発, 防災科学技術研究所研究報告, 第 81 号, pp. 7-14, 2014.

農林水産省 農村振興局: 土地改良事業の費用対効果分析に関する基本指針, 2008.

農林水産省 農村振興局, 農林水産省 水産庁, 国土交通省 河川局, 国土交通省 港湾局: 海岸事業の費用便益分析指針(改訂版), pp. 26, 27, 2004.

福岡捷二, 藤田光一: 堤防法面張芝の侵食限界, 水工学論文集, 第 34 巻, pp. 319-324, 1990.

安田将広: 古都を水害から守る「いろは呑龍トンネル」の整備効果について(桂川右岸流域下水道事業), 水循環 貯留と浸透, 雨水貯留浸透技術協会, Vol. 117, pp. 29-34, 2020.

山田真史, 知花武佳, 渡部哲史: 地先のハザードカーブに基づいた流域の地理的構造化とその自然的・社会的要因の分析, 河川技術論文集, 第 25 巻, pp. 37-42, 2019.

吉田真琴: 寝屋川流域総合治水対策の経緯と浸水被害軽減効果, 水循環 貯留と浸透, 雨水貯留浸透技術協会, Vol.117, pp. 20-24, 2020.

吉田恭, 古本一司, 馬場美智子: フランスにおける PPR を中心とした防災型土地利用規制に関する研究, 都市計画論文集, 日本都市計画学会, Vol.46, No.1, pp. 88-98, 2011.

林野庁 森林整備部 計画課: 林野公共事業における事業評価マニュアル, pp. 1-II-4 - 1-II-5, 2020.

湧川勝己, 岡安徹也, 天野雄介: 損失余命を用いた洪水のリスクコミュニケーションに関する研究, 河川技術論文集, 第 14 巻, pp. 187-192, 2008.

Adams, L.: Overview of ECB 2017-15 Managed Overtopping of Levee Systems, Presentation

Material at Institute for Water Resources, USACE on May 23, 2018.

Alphen, J., Passchier, R., and Jetten, V.: Atlas of Flood Maps, pp. 4-5, 4-7, 2007.

Apel, H., Thielen, H. A., Merz, B., and Blöschl, G.: Flood risk assessment and associated uncertainty, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, pp. 295-308, 2004.

Apel, H., Thielen, A., Merz, B., and Blöschl, G.: A probabilistic modelling system for assessing flood risks, *Natural Hazards*, 38, pp. 79-100, 2006.

Apel, H., Aronica, T. G., Kreibich, H., and Thielen, H. A.: Flood risk analyses - how detailed do we need to be?, *Natural Hazards*, 49, pp. 79-98, 2009.

Comins, L., Garft, D., Spray, C., and MacDonald, A.: Case study 9. Eddleston water project, pp. 1, 5, 2020. (2020年6月17日閲覧)

CRED and UNISDR: The human cost of weather related disasters 1995-2015, p. 13, 2015.

Davis, D., Faber, B., and Stedinger, J.: USACE experience in implementing risk analysis for flood damage reduction projects, *Universities Council on Water Resources, Journal of Contemporary Water Research & Education*, Issue 140, pp. 3-14, 2008.

De Bruijn, M. K.: Resilience indicators for flood risk management systems of lowland rivers, *International Journal of River Basin Management*, Vol.2, No.3, pp. 199-210, 2004.

Department for Communities and Local Government, England: Planning policy statement 25: development and flood risk practice guide, 2009.

Department for Environment, Food & Rural Affairs, England: Securing the future availability and affordability of home insurance in areas of flood risk, p. 6, 2013.

DGPR MTES: Carte de laeale a echeance 100 ans (avec prise en compte de leffet des structures de protection), Commune de Camaret-sur-Mer, 2016.

Drias: France in the 21<sup>st</sup> Century, [DRIAS, Les futurs du climat - Accompagnement \(drias-climat.fr\)](https://drias-climat.fr/), 2019. (2021年8月7日閲覧)

Duzi, B., Vikhrov, D., Kelman, I., Stojanov, R., and Juricka, D.: Household measures for river flood risk reduction in the Czech Republic, *Journal of Flood Risk Management*, 10, pp. 253-266, 2017.

eftec, U.K.: Flood and coastal erosion risk management: economic valuation of environmental effects, handbook for the Environment Agency for England and Wales, p.13, Revised March 2010, 2010.

Environment Agency: Thames catchment flood management plan, summary report, p.6, 2009.

Environment Agency: Adapting to climate change: advice for flood and coastal erosion risk management authorities, pp. 6-12, 2016.

Environment Agency: Working with natural processes - evidence directory, pp. 31, 33, 2018.

Environment Agency: the Thames Barrier and associated tidal defences, Pamphlet, received at Thames Barrier Office in London on Jan. 28, p. 1, 2019.

ENW, Netherlands: Fundamentals of flood protection, English edition, pp. 6-7, 48, 51, 65, 2017.

Federal Emergency Management Agency: <https://msc.fema.gov/portal/home>, 2020. (2021年8月7日閲覧)

Garrelts, H., and Lange, H.: Path dependencies and path change in complex fields of action: climate adaptation policies in Germany in the realm of flood risk management, Royal Swedish Academy of Sciences 2011, 40, pp. 200–209, 2011.

Gersonius, B., van Buuren, A., Zethof, M., and Kelder, E.: Resilient flood risk strategies: institutional preconditions for implementation, Ecology and Society, 21(4), 28, 2016.

van Ginkel, H. K., Dottori, F., Alfieri, L., Feyen, L., and Koks, E. E.: Flood risk assessment of the European road network, Natural Hazards and Earth System Sciences, 21, pp. 1011–1027, 2021.

Government of UK: [LIT 5707 Adapting to Climate Change: Advice for Flood and Coastal Erosion Risk Management Authorities \(publishing.service.gov.uk\)](https://www.gov.uk/government/publications/lit-5707-adapting-to-climate-change-advice-for-flood-and-coastal-erosion-risk-management-authorities), 2021(1). (2021年5月28日閲覧)

Government of UK: [Flood map for planning – GOV.UK \(flood-map-for-planning.service.gov.uk\)](https://www.gov.uk/government/publications/flood-map-for-planning), 2021(2). (2021年5月28日閲覧)

Hendrawan, A. S. V., and Komori, D.: Developing flood vulnerability curve for rice crop using remote sensing and hydrodynamic modeling, International Journal of Disaster Risk Reduction, 54, pp. 1–16, 2021.

JICA: Urgent Development Study on the Project on Rehabilitation and Recovery from Typhoon Yolanda. Fourth JICA Seminar, DPWH Multi-Purpose Hall, DPWH Region 8, Palo Municipality, 4 Sept, 2015.

Jonkman, N. S., Maaskant, B., Kolen, B., and Needham, T. J.: Loss of life estimation – review, developments and challenges. Flood risk 2016 – 3<sup>rd</sup> European conference on flood risk management, p. 2, 2016.

Kay, A. L., Crooks, S., Davies, H. N., Prudhomme, C., and Reynard, N. S.: Practicalities for implementing regionalized allowances for climate change on flood flows, final technical report, Project FD2648, p. iii, 2011.

Manous, J.: USACE approach to water resources adaptation from climate impacts, presentation material, p. 9, Nov. 28, 2018.

Mens, P. J. M., and Klijn, F.: The added value of system robustness analysis for flood risk management illustrated by a case on the IJssel River, Natural Hazards and Earth System Sciences, 15, pp. 213–223, 2015.

Merz, B., and Thielen, H. A.: Flood risk curves and uncertainty bounds. Natural Hazards, pp. 51, 3, 437–458, 2009.

Met Office: UKCP18, Factsheet, 2018.

Ministry of Housing, Communities & Local Government, England: Guidance flood risk and coastal change, <https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-and-coastal-change#Strategic-Flood-Risk-Assessment-section>, 2014. (2020年4月2日閲覧)

Ministry of Infrastructure and Water Management, Ministry of Agriculture, Nature, and Food Quality, Ministry of the Interior and Kingdom Relations, the Netherlands: Delta program 2020, p. 20, 2019.

Morita, M.: Flood risk impact factor for comparatively evaluating the main causes that contribute to flood risk in urban drainage areas, *Water* 2014, 6, pp. 253–270, 2014.

Nguyen, D. V., Metin, D. A., Alfieri, L., Vorogushyn, S., and Merz, B.: Biases in national and continental food risk assessments by ignoring spatial dependence, scientific reports, *Nature Research*, 10, 19387, 2020.

ONERC: The coastline in the context of climate change, report to the Prime Minister and Parliament, p. 1, 2015.

PhilGIS: <http://philgis.org/>, 2015. (2020年4月2日閲覧)

Philippine Statistics Authority: Household population of the Philippines reaches 92.1 million, <https://psa.gov.ph/content/household-population-philippines-reaches-921-million>, 2012. (2020年8月18日閲覧)

Philippine Statistics Authority: Highlights of the Philippine population 2015 census of population, <https://psa.gov.ph/content/highlights-philippine-population-2015-census-population>, 2016(1). (2020年8月17日閲覧)

Philippine Statistics Authority : Philippine population density, <https://psa.gov.ph/content/philippine-population-density-based-2015-census-population>, 2016(2). (2020年8月17日閲覧)

Philippine Statistics Authority: Butuan city, <https://psa.gov.ph/content/butuan-city-three-out-five-housing-units-galvanized-iron-roof-and-wood-walls-results-2000>, 2019(1). (2020年4月2日閲覧)

Philippine Statistics authority : Cities in the province of Agusan Del Norte, <https://psa.gov.ph/classification/psgc/?q=psgc/citimuni/160200000>, 2019(2). (2020年4月2日閲覧)

Philippine Statistics authority : Municipalities in the province of Agusan Del Norte, <https://psa.gov.ph/classification/psgc/?q=psgc/citimuni/160200000>, 2019(3). (2020年4月2日閲覧).

Project NOAH: <http://www.noah.dost.gov.ph/#/>, 2017. (2020年4月2日閲覧)

Rijkswaterstaat: RWS informatie -Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken - Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie Groene versie 2018, p.34, 2018.

RIZA Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment: A quick scan of spatial measures and instruments for flood risk reduction in selected EU countries, pp. 47, 53, 59, 2004.

Royal Netherlands Meteorological Institute: KNMI' 14, revised edition 2015, p. 5, 2015.

Sai, A. H., Tabata, T., Hiramatsu, K., Harada, M., and Luong, C. N.:An optimal scenario for the emergency solution to protect Hanoi Capital from the Red River floodwater using Van Coc Lake, *Journal of Flood Risk Management*, 13, e12661, 2020.

Schober, B., Hauer, C., and Habersack, H.:Floodplain losses and increasing flood risk in the context of recent historic land use changes and settlement developments: Austrian case studies, *Journal of Flood Risk Management*, 13, e12610, 2020.

Tanaka, T., Tachikawa, Y., Ichikawa, Y., and Yorozu, K.:Impact assessment of upstream flooding on extreme flood frequency analysis by incorporating a flood-inundation model for flood risk assessment. *Journal of Hydrology*, 554, pp. 370–382, 2017.

UNESCO and ICIWaRM:Climate risk informed decision analysis (CRIDA) Collaborative water resources planning for an uncertain future, UNESCO and ICIWaRM Press, Alexandria, VA, USA, p. 12, 2018.

United Nations:Sendai framework for disaster risk reduction 2015 - 2030, UNISDR. Switzerland, 2015.

University of the Philippines:Philippines flood hazard maps, <http://www.nababaha.com/>, 2020.(2020年4月2日閲覧)

USACE: Managed overtopping of levee systems, ECB2017–15, CECW–CE, Headquarters, Directorate of Civil Works, Corps of Engineers, p. 10, 2017.

USACE, Rijkswaterstaat, MLIT, and EA:Flood risk management approaches as been practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom, and United States, IWR Report No: 2011–R–08, pp. 80, 107, 2011.

USACE: Incorporating sea level change in civil works programs, ER 1100–2–8162, p. 2, 2013.

U.S. Global Change Research Program: Fourth national climate assessment, summary findings, 10. Infrastructure and 11. Oceans & Coasts, 2018.

USACE:Managed overtopping of levee systems, engineering and construction bulletin, No. 2019–8, 2019.

U. S. Water Resources Council:Economic and environmental principles and guidelines for water and related land resources implementation studies, pp. iv - v, 1983.

Wikipedia:Agusan River, [https://en.wikipedia.org/wiki/Agusan\\_River](https://en.wikipedia.org/wiki/Agusan_River), 2020(1).(2020年4月2日閲覧)

Wikipedia:Mindanao, <https://en.wikipedia.org/wiki/Mindanao>, 2020(2).(2020年4月2日閲覧).