

河川整備段階における内水・外水氾濫による 外力規模毎の治水効果への影響評価

ASSESSMENT OF FLOOD CONTROL EFFECTIVENESS CONSIDERING INTERNAL AND EXTERNAL FLOODING UNDER DIFFERENT EXTERNAL FORCE MAGNITUDES

小林永人¹・田中耕司²・関圭祥³・馬場美智子⁴
Eito KOBAYASHI, Kohji TANAKA, Yoshiaki SEKI and Michiko BANBA

¹学生会員 兵庫県立大学大学院 減災復興政策研究科

²正会員 博（工）兵庫県立大学大学院 減災復興政策研究科・（財）河川情報センター 企画・調整部

³正会員 修（工）八千代エンジニアリング株式会社 北日本支店 河川・水工部

⁴正会員 博（工）兵庫県立大学大学院 減災復興政策研究科

本研究は、一級河川由良川水系を対象として、河川整備段階および外力規模の違いが内水・外水氾濫の発生特性と治水効果に及ぼす影響を評価したものである。近年、河川整備の進展により外水氾濫は抑制されつつある一方、堤防整備に伴う内水氾濫の顕在化が課題となっている。本研究では、内水・外水を同時かつ連続的に扱う氾濫解析モデルを用い、河道改修前から整備計画完成段階までの複数の河道条件と、多段階の外力規模を設定した解析を行った。その結果、外水氾濫の頻度低減とともに内水氾濫が相対的に支配的となる区域が確認された。また、浸水深および流体力を指標とした水害リスクマップを作成することで、洪水被害の性質や対策水準を段階的に整理できることを示した。本研究の成果は、流域治水における対策検討やリスク情報の活用に資する基礎的知見を提供するものである。

Key Words: River basin disaster resilience and sustainability by all, Internal and external water flooding

1. 序論

近年、水害が激甚化・頻発化する中、あらゆる関係者が協働して従来の治水計画に加えて様々な対策に取り組む「流域治水」が全国で進められつつある。これまで河川管理者によって鋭意進められてきた河川改修により、本川からの越水・破堤による甚大な被害は着実に減少してきた。一方で、堤防の整備は本川と支川の連続性を分断し、本川の水位上昇に伴って支川や用水路からの自然排水が困難となるため、堤内地に水が滞留する「内水氾濫」が顕在化することになった。こうした内水氾濫は、超過洪水時に発生する本川からの外水氾濫とは異なり、高頻度な降雨規模で計画される。そのため、計画規模を超える降雨で被害が発生している。

河川整備基本方針は、治水事業の完成形であり、計画規模の外力に対して外水氾濫を防止するための計画である。また、河川整備計画は計画時点から20年から30年先の治水計画の途中段階の整備目標を定めた計画であり、

いわば、暫定的な計画である。一方で、内水処理計画は、本川と支川が堤防で分断されたために、堤内地の排水を効果的に実施するための施設整備を主としている。高頻度の降雨に対して効果的であるが、流域全体としてみれば河川の計画規模に相当する規模での計画でなく、内水排除流域単独の計画として位置付けられる。これまでの計画論の中で、『流域治水』を考えていく上で、河川管理者による河川整備と、河川管理者や地方自治体等が堤内地の減災対策の効果を氾濫域の地先側からも面的・一体的に評価する手法が必要であると提案されている²⁾。さらに、今後頻度が増加すると想定されている計画規模や想定最大規模の降雨に対しても、従来の河道対策だけでなく、氾濫原での対策に加えて総合的に対処するところにあるが、現状の案では両者がほぼ独立に論じられている³⁾。さらに、本川・支川の治水事業と減災対策は、対象とする流域面積や降雨規模が異なるため、降雨規模等に応じて効果量が異なり、対策の効果や影響が相互に関連しあう⁴⁾。そのため、流域を構成する本川、支川群



図-1 由良川水系の概要と河道内水位追跡区間

の洪水の流下形態，安全度の在り方に加えて，流域全体を俯瞰した治水の在り方，進め方が十分に検討されなければならない⁵⁾．以上のことから流域治水を推進するには，流域内において流出現象・河道内水理および氾濫現象を再現するために流域を構成する本川・支川群を一体とした洪水流を解析し，氾濫の内訳を明確にし，浸水リスクを多面的な観点から評価することが必要である．本研究の対象地である由良川では，これまで河川改修が行われてきた一方で，中流域の堤防建設による洪水防御の影響は下流域に及ぶ可能性があると考えられる．

本研究では，一級河川由良川水系を対象に河道改修段階における内外水氾濫の浸水被害に着目し，流域全体で氾濫リスクを評価する．ここでは，河川整備が流域に及ぼす影響範囲をハザード毎に表現し，河道の今昔での氾濫の相違点を明らかにする．さらに，流域治水対策の一つである建物の浸水対策立案上にむけた課題を明らかにすることを目的とする．

2. 対象流域の概要

本研究で対象とした一級河川由良川は，図-1に示すように，流域面積1,880km²，流路延長 146kmを持ち，京都府北部の山間部を流れ，綾部市街地から福知山盆地に入り日本海に流れる．当該流域は，上流部の急峻な山地と中下流部の盆地・谷底平野から構成され，古くから洪水被害が頻発してきた．

戦後直後の昭和22年阿久根台風を契機として国による直轄改修が開始され，昭和28年には改修計画が策定された．昭和36年には大野ダムが完成し，洪水調節機能が導入されたものの，堤防未整備区間や河道能力の制約から，その後も洪水被害が継続的に発生した．

平成11年に河川整備基本方針，平成15年に河川整備計画が策定され，中流部の連続堤整備や下流部の輪中堤・宅地嵩上げなど，区域特性に応じた治水手法が位置付けられた．しかし，平成16年10月台風23号，平成25年8月台風18号と，計画規模に匹敵する洪水による内外水氾濫が相次いで発生し，整備計画の前倒しによる緊急治水対

策が実施された．これにより下流部では輪中堤や宅地嵩上げ，中流部では連続堤や河道掘削が集中的に進められた⁶⁾．

一方，堤防整備の進展に伴い内水氾濫が顕在化し，平成26年8月には福知山市街地で大規模な内水被害が発生した．このため排水機場整備や調節池整備を含む総合的治水対策が実施された．近年は気候変動を踏まえ，「流域治水プロジェクト2.0」の下，河川整備，内水対策，土地利用・住まい方を含めた流域全体での治水へと展開している状況である．

3. 解析方法と計算条件

(1) 計算モデル

従来の治水計画のための解析モデルでは内水・外水を別々で計算することが一般的であった．そのため，実際の氾濫現象と異なるという問題が挙げられる．本研究では，内外水の同時・連続的な浸水現象を表現できるリアルタイムシミュレータ「DioVISTA/Flood Professional」(株式会社日立パワーソリューションズ提供)を用いて解析を行った(以下，DioVISTAとする)．DioVISTAは氾濫シミュレーション・マニュアルおよび浸水想定区域図作成マニュアル(第4版)⁷⁾に基づき，河道を一次元不定流計算，氾濫原を二次元不定流計算で算出する．また，流出モデルは分布型流出モデル(立川ら⁸⁾の三層モデル)を採用し，流出解析結果を直接河川モデルの入力境界条件として与えることとしている．

計算メッシュは国土地理院が提供する基盤地図情報5m標高メッシュを用いている．また，河道断面データについては由良川および土師川の国管轄区間においては河川管理者から提供を受けたレーザー測量成果を用いてモデル化を行った．その他支川や水路については，同基盤地図情報の数値標高モデルおよび現地調査での測量結果から作成している．本解析モデルに組み込んだ河川及び水路の数は35支川74水路である．以下河川改修段階に分けた河道モデルを構築した．なお，内水氾濫による河道内水位や外水氾濫への影響を対比するために，河川整備に資する治水計画での内水を考慮しないケースについても計算している．

①1961年河川改修未着手時河道断面

②2023年頃中流域HWL堤防整備段階河道断面

③河川整備計画完成時河道断面(2033年整備完了予定)

また，由良川の境界条件として実績の下流端水位は実績の潮位を設定した．ただし，本解析では破堤を考慮せず越水のための解析を行った．破堤の不確実性が高いことやリスクの増大については，本研究の大枠での最終目的の内数としているが，今回の報告では，対象外とした．

また，これまで整備されてきた直轄区間の内水排除施設(排水機場，水門，樋門・樋管)をすべて考慮した．

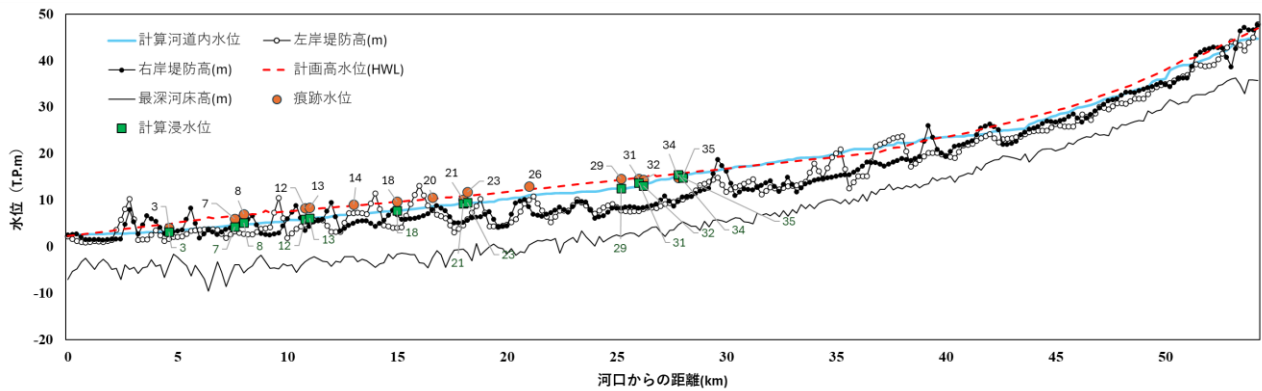


図-2 平成16年（2004年）10月台風23号での堤内地痕跡水位から計算結果の妥当性検証結果

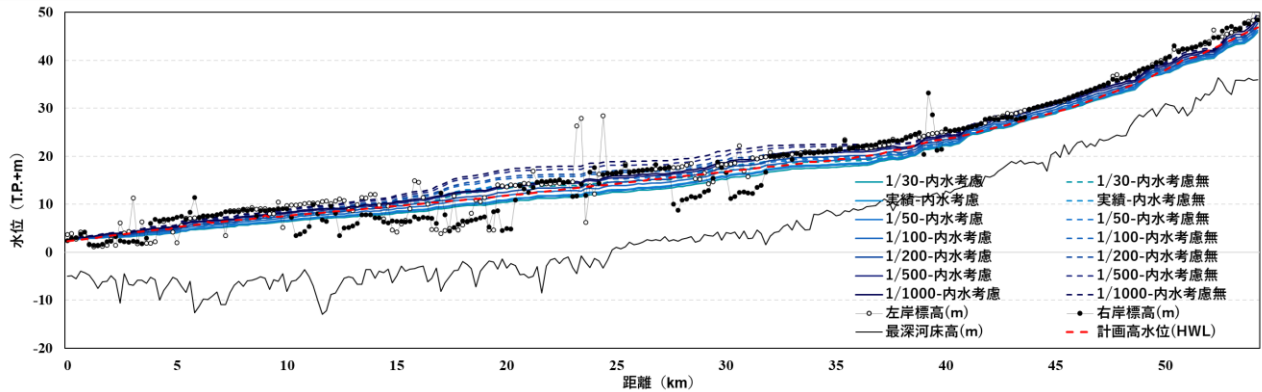


図-3 平成16年（2004年）10月台風23号を対象とした内水の考慮の有無での河道内水位

(2) 外力規模

評価対象外力は、河川整備計画での対象洪水である平成16年10月台風23号の実績降雨（1/30～1/50程度）を、年超過確率毎（1/5，1/10，1/30，1/50，1/100，1/200，1/500，1/1000）に引き伸ばした降雨を設定した。本解析では、流域平均雨量ではなくCバンドレーダー雨量を流出モデルに与えている。外力設定における確率統計解析結果は、福知山河川国道事務所から提供を受けたものを活用した。

4. 河川整備毎の河道内水位と氾濫特性

(1) 氾濫解析の精度検証

本解析モデルの妥当性及精度検証を行うために、痕跡水位と計算浸水位の比較を行った。その結果を図-2に示す。これらの痕跡水位は福知山河川国道事務所から提供された情報を元に現地調査を行った結果である。評価外力として1953年台風13号（S28），1959年伊勢湾台風（S34），1972年台風20号（S47），2004年台風23号（H16），2013年台風18号（H25），2018年西日本豪雨（H30）を用いて、各年代に応じた河道断面、整備状況をもとに解析を行った。ただ、標高データに関しては過去のデータが存在していないため、現況の標高データをモデルに適用している。下流域では、平成16年の水害以降に輪中堤の建設や排水施設の操作実績を今回のシミュレーションでは考慮されていないことや、氾濫原の情報として堤内地の嵩上げを実施していることが影響し、

25kmより下流域の痕跡水位では十分な再現はできなかった。しかしながら、平成16年以前の既設堤防や排水機場の操作で反映できる25kmより上流では、痕跡水位と概ね一致している。

(2) 内水氾濫を考慮した河川水位の変化

本研究では、氾濫の状況を把握するために、内外水を考慮した場合の河川水位の変化を把握した。従来から氾濫計算に基づく治水経済調査、治水計画では、内水氾濫は考慮されていない。そのため河道内水位は、流出解析結果を上流端条件や横流入量として処理されることが多い。したがって、上記の条件では内水での貯留水は河道に流入させるため、河道への負担が増加することとなる。本研究では、内水氾濫を考慮することによって、河道への負担が減ることにより、河道内水位も低下することが容易に想像できる。そこで、確率規模毎の③河川整備計画モデルにおける河道内の最高水位の縦断面図を、内水を考慮したケースと考慮しないケースを比較したものを図-3に示す。これによれば、前者は平成16年10月台風23号の実績に対して再度災害防止の観点で計画高水位を超過しない河道が整備されている状態である。一方で、後者では計画高水位(HWL)を超過するのが、実績よりも高頻度になる。内水氾濫を考慮することで河道への負担は減少し、当然のことながら河道の治水安全度は従来の治水計画に基づく計算方法に比べ向上する。なお、由良川においては、既成の河川整備計画では内水氾濫を考慮していることから、本研究で計算した結果は、いわばそれを

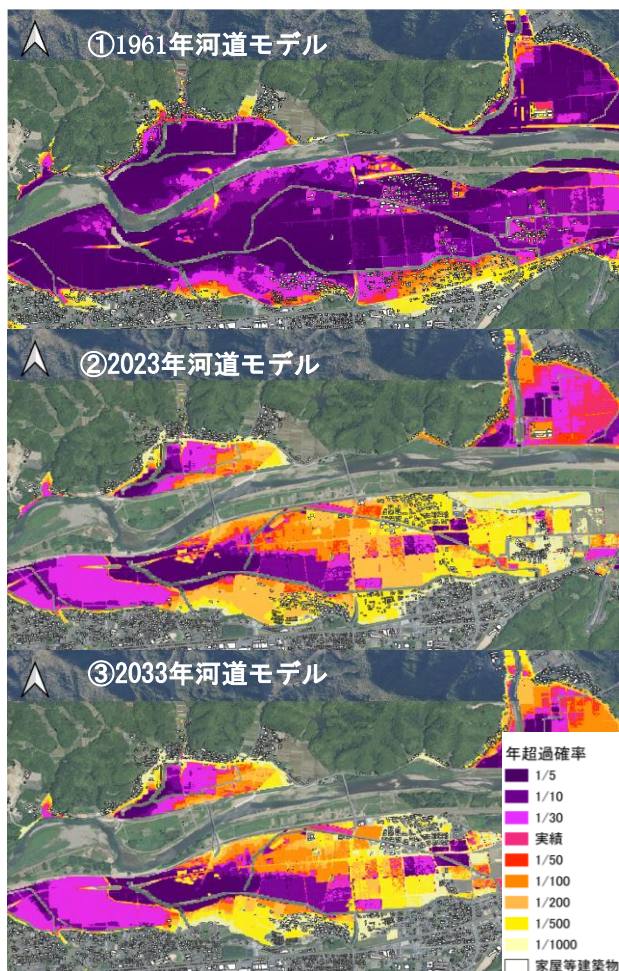


図-4 内外水氾濫解析における浸水深に基づく中流部
区間の堤内地のリスクマップ

裏付けた結果であることを付記しておく。

以上のように、内水氾濫を考慮することで河道の負担はかなり減るばかりでなく、基本方針レベルである超過確率100年以上においても、内水氾濫を考慮しない場合との差は大きいと推察される。

(3) 内水氾濫を考慮したリスクマップによる氾濫特性

一般的には、内水排除は考慮されていない従来の治水計画の考え方は、流出解析モデルで分割された小流域からの流出量をすべて河道に流入させる計算を行っている。本研究では、内水氾濫の貯留効果やそれによる河道内水位の低減を再現した内外水氾濫現象の計算結果から作成したリスクマップで考察を行う。本研究では、由良川全域について計算を実施したが、ここでは、事例として中流部の土師川合流前の堤内地として、2023年に暫定堤防(HWL堤)が完成した中流区間を対象にした。前述した河道モデル①～③での浸水深0.1m以上(床下浸水以上)の水害リスクマップを図-4に、流体力 $1.5\text{m}^2/\text{s}$ 以上の水害リスクマップを図-5にそれぞれ示す。なお、閾値の設定根拠は、内閣府が定める「災害に係る住家の被害認定基準運用指針」⁹⁾における被害認定フローに基づいた。次に、流体力の閾値¹⁰⁾として、同指針の認定フローでは、「水

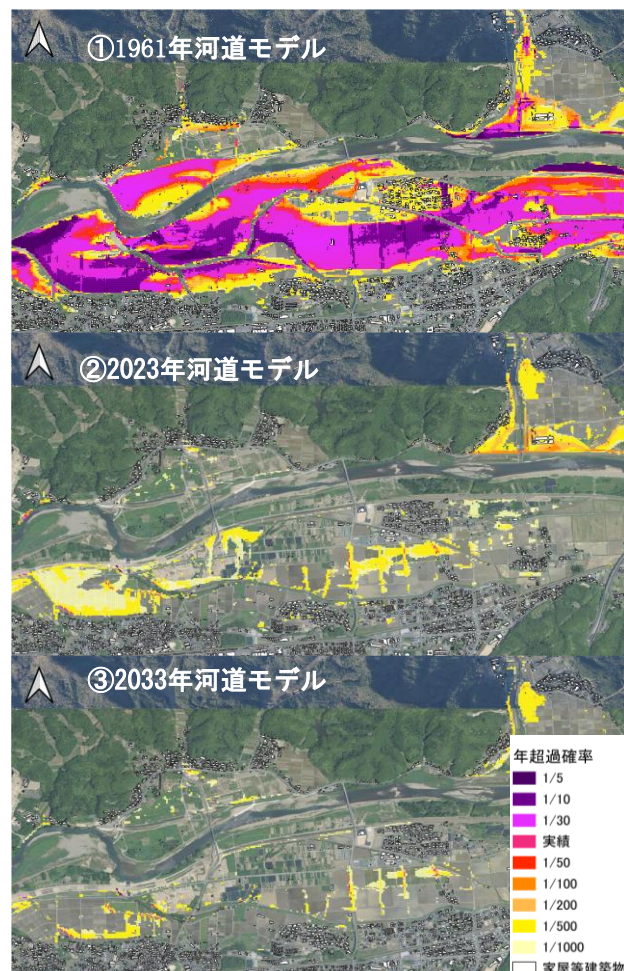


図-5 内外水氾濫解析における流体力に基づく中流部
区間の堤内地のリスクマップ (一部損壊以上)

流や瓦礫の衝突等により外壁及び建具が破壊されている場合」には、同一の浸水深であっても被害区分が著しく増大する(全壊等)ことが明記されている。以上より、浸水深0.1m以上と流体力 $1.5\text{m}^2/\text{s}$ 以上のリスクマップを用いることとした。

これによれば、築堤・河道掘削等の河道整備により外水氾濫が抑えられることによる浸水範囲や浸水頻度が減少することが確認できる。その一方で、河川水位が上昇し逆流防止のための樋門操作、内水排除施設の操作によって内水氾濫が残ることが確認できる。また、支川土師川合流前の最近整備された区間では、河川整備前に比べ、家屋流出、あるいは一部損壊の可能性のある地域は、ほぼ解消されることが理解される一方で、依然としてリスクの高いところには現時点で居住していないことがわかる。

さらに、流域全体で浸水家屋を浸水深、流体力の区分で集計を行った。一例として中流部の地区における被害家屋棟数を前述した河道モデル①～③で比較を行った。この結果を図-6に示す。これによれば、河道モデル①の整備前に比べ、河道モデル②および③では、確実に浸水の程度や損壊被害の影響が想定される家屋は減少する。さらに、河道モデル②では1/50以上、河道モデル③では

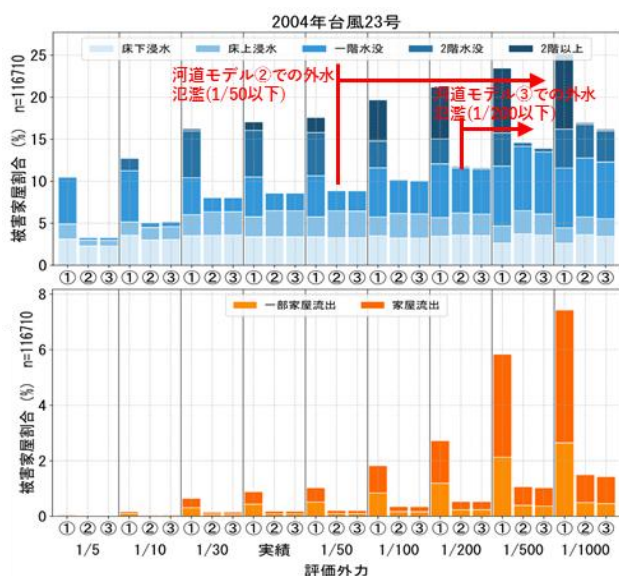


図-6 中流部区間の浸水深・流体力毎の家屋被害棟数

1/200の頻度で堤防越水が発生し、低頻度になるにつれて1階水没以上の家屋が増加する。また、内水氾濫による被害は河川整備計画の想定以下でも発生することや、それ以上でも床下浸水の家屋が床上浸水に被害が拡大する可能性があることを示唆している。

5. 氾濫リスクマップの有効な活用

氾濫原のリスクを表示するためのマップ（水害リスクマップ）は、外力規模に応じた浸水範囲等が示されている。しかしながら、これらのマップの有効な活用を考える上で、都市計画としての視点や、住宅政策としての視点、さらには過去の洪水の教訓などを生かしたまちづくりに対して十分な情報とは言えない。現在、特定都市河川浸水被害対策法に基づく特定都市河川を全国の河川に拡大し、ハード整備の加速に加え、国・都道府県・市町村・企業等のあらゆる関係者の協働による水害リスクを踏まえたまちづくり・住まいづくり、流域における貯留・浸透機能の向上策等が推進されている。個々の流域における治水問題を河川工学的な知見の下で工夫することが必要であるが、今後流域治水を推進するにあたり氾濫解析による科学的な知見と社会科学的視点（社会学、地域経済学、防災心理学など）との融合について考える必要がある。本研究では、これらの融合といったところまでは踏み込まないものの、氾濫解析による科学的知見の翻訳について考察したい。

翻訳にあたり、リスクをマッピングした事例として滋賀県が流域治水条例を策定した際に地先の安全度を評価するために作成したリスクマップが一つの方向性¹¹⁾を示しているものと考えられる。図-7は、滋賀県のリスクの評価指標¹¹⁾を参考に作成したものである。このハザードの区分に対して、床上浸水・1階水没（浸水深0.5m～3.0m）の頻度、2階以上の浸水（3.0m以上）かつ一部家

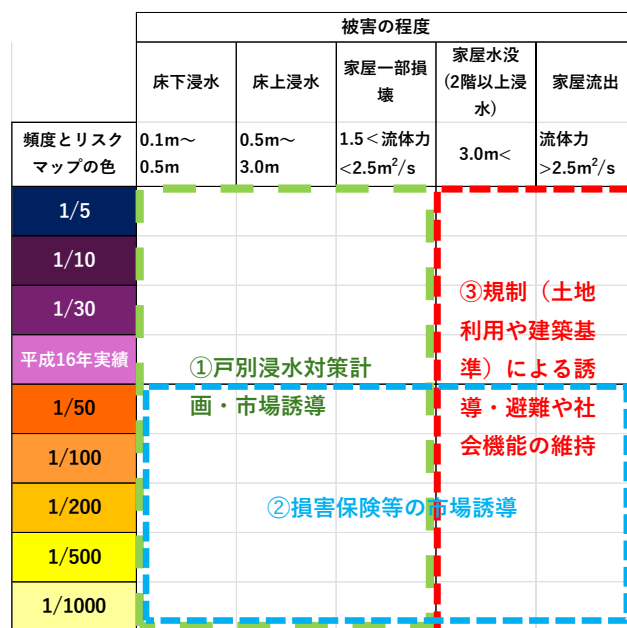


図-7 被害の程度と浸水頻度を指標としたリスク・マトリックス(瀧ら¹¹⁾、木内ら¹²⁾を参考に作成した)

屋損失以上が発生する頻度で図-8に示す2つのマップを作成した。リスク・マトリックスに対応した浸水対策の分類をする際に、木内ら¹²⁾の研究を参考にする。前者は、戸別浸水対策や損害保険のような洪水氾濫リスクと共存する対策が合理的なケースとして捉えることができる。一方で後者は、共存という枠組みではなく、リスクを回避すること、すなわち、住まわせないという規制誘導により、命を守る、資産被害を抑制する対策として捉えることができる。例えば、滋賀県が規制している浸水警戒区域といった建築規制¹³⁾や、三重県紀宝町の災害危険区域の指定¹⁴⁾などの事例にみられる規制誘導という対策の枠組みの適用も考えられる。

また、上記の枠組みから逸脱した図-7中の右下に該当するような計画規模以上の外力であれば、守るべき対象ではなく、維持する対象を定めて、一時的な生活維持、社会復旧・復興といった社会機能を優先に考えるべきであると考えられる。今回作成したマップは、洪水氾濫が発生するプロセスにおいて、洪水処理の施設対応だけでなく、図-7に示す【リスク×ハザード】を基に、想定される抗えない状況を見極めて対策を流域全体で考える必要がある。本研究では、リスクの再分配を考える上で、内外水氾濫解析による氾濫域の【リスク×ハザード】情報をマップ表現することで、対策の優先順位や求められる対策水準を整理することが可能となる。

6. 結論

本研究では、一級河川由良川水系を対象として、内水・外水氾濫を同時かつ連続的に取り扱うことが可能な氾濫解析モデルを用い、河川整備段階別および外力規模別に洪水氾濫特性と浸水リスクの評価を行った。特に、

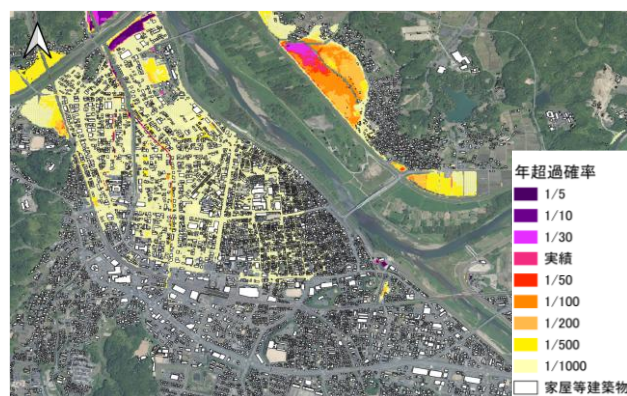
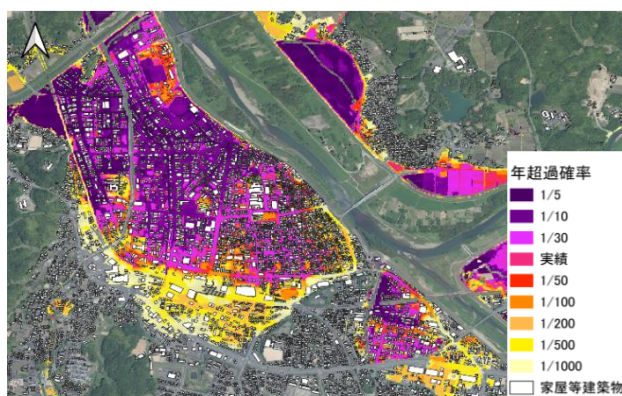


図-8 2033年河川整備計画が完了予定でのリスク分布（福岡山市街地）

左：床上浸水・1階水没（浸水深0.5m～3.0m）の頻度，右：2階以上の浸水（3.0m以上）かつ一部家屋損失以上が発生する頻度

河川改修前から整備計画完成段階に至る複数の河道条件を設定し、多段階の外力規模を与えることで、流域全体における治水効果の変化を体系的に整理した点に本研究の特徴がある。

その結果、河川整備の進展により、中流部を中心として外水氾濫の発生頻度および浸水規模は大きく低減する一方、下流部においては河道内水位の上昇や内水氾濫の影響が相対的に顕在化することが確認された。また、内水氾濫を考慮することで、河道への流入負荷が軽減され、従来の内水を考慮しない計算方法と比較して、河道内水位や治水安全度の評価結果が異なることを明らかにした。

さらに、外力規模別の内外水氾濫解析結果を基に、浸水深および流体力を指標とした水害リスクマップを作成した。これにより、洪水氾濫による被害の性質を単なる浸水有無ではなく、【リスク×ハザード】の観点から整理することが可能となり、対策の優先順位や求められる対策水準を空間的に把握できることを示した。

以上の成果は、流域治水を進める上で、河川整備と内水対策を一体として評価するための工学的基礎情報を提供するものであり、建物の浸水対策や住まい方の工夫等を検討する際の判断材料として活用できる可能性がある。本研究は、由良川流域を対象とした検討であるが、同様の課題を有する中小河川流域においても、治水施策の検討やリスク情報の整理に資するものと考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 23H01592 の助成を受けたものである。さらに、国土技術政策総合研究所 木内望氏、国立建築研究所 中野卓氏から水害対策について助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会：気候変動を踏まえた水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」の転換～，2020年

- 2) 原田守啓，呉修一，内田竜彦：流域治水の実践と求められる技術：持続可能な社会の発展に河川技術はどう貢献するか？，河川技術論文集，第30巻，pp.519-pp.524，2024年
- 3) 石川忠晴：江戸時代の治水思想が流域治水プロジェクトの計画と実践に与えるヒントについて，土木学会論文集D3（土木計画学），Vol.78，No.6，pp.II_509-II_521，2022年
- 4) 井上清敏，武内慶了，山本哲也：流域における減災対策の現場適用に向けた水害ハザード特性の評価手法の試案，河川技術論文集，第29巻，pp.395-pp.400，2023年6月
- 5) 福岡捷二：近年の洪水災害を踏まえた流域治水を考える，河川技術論文集，第28巻，pp.457-pp.462，2022年6月
- 6) 国土交通省近畿地方整備局：由良川水系河川整備計画
- 7) 国土交通省：洪水浸水想定区域図作成マニュアル（第4版）
- 8) 立川康人，椎葉充晴，市川温：流域特性を考慮した分布型降雨流出モデルの構築，土木学会論文集，No.803/II-73，pp.13-24，2005年
- 9) 内閣府：災害に係る住家の被害認定基準運用指針 第二編 水害による被害，令和7年7月
- 10) 佐藤智，今村文彦，首藤信夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について-8610号台風による吉田川の場合-，第33回水理講演会論文集，pp.331-pp.336，1989年
- 11) 瀧健太郎，松田哲裕，鶴飼絵美，小笠原豊，西寫照毅，中谷恵剛：中小河川群の氾濫域における減災型治水システムの設計，河川技術論文集第16巻，pp.477-pp.483，2010年6月
- 12) 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，Vol.54(3)，pp.923-pp.930，2019年
- 13) 滋賀県：滋賀県の流域治水，<https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kendoseibi/kasenkoan/19554.htm>（2026.4.1閲覧）
- 14) 三重県紀宝町：紀宝町災害危険区域に関する条例，https://www.town.kiho.lg.jp/reiki_int/reiki_honbun/i668RG00000067.html，（2026.4.1閲覧）

（2026. 4. 2受付）