

多様なハザード源を統合的に解析した 地先の水害リスクカーブ算定方法の提案

平子 遼¹・多々納 裕一²

¹学生会員 京都大学大学院 情報学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: tatano.hirokazu.7s@kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: hirako.ryo.82r@st.kyoto-u.ac.jp

³Member of JSCE, JSCE Corp.

変化する水害の傾向に対応するため、流域治水の考え方が拡大している。流域治水の実現には、従来のように管理している治水施設の限界を超える影響を考慮するのではなく、住民らが住む地(以下、地先)に影響を及ぼす様々な治水施設の影響を統合的に考慮するような視点の変化が必要である。リスク推定のための氾濫シミュレーションにおいても、地先に影響を及ぼす様々な特性を持つ氾濫現象を解析できるようにすることが求められる。近年、d4PDF のような大アンサンブル気候データが公開され、多様な降雨傾向を含んだ解析や莫大なデータを用いた水文統計が可能となっている。本研究では、多数アンサンブルの降雨外力を用い、同時生起確率を推定することで、多様なハザード源を統合的に考慮した地先のリスクカーブの算定方法を示すものである。

Key Words: River Basin Disaster Resilience and Sustainability by All, Integrated Flood Simulation, d4PDF, Co-occurrence Rate, Risk Curve

1. はじめに

気候変動の影響により、短期集中豪雨の増加などの変化から水害被害の様相が変化している。

これらの背景から、国土交通省では令和 3 年 3 月に流域のあらゆる関係者が一体に取り組む“流域治水プロジェクト”の加速を発表している。これにより、河川・下水道管理者といった排水事業による治水だけではなく、建築規制などの開発事業など、様々なハード・ソフト対策との連携により流域内の総合的な治水効果の向上が期待できる。しかし、流域のあらゆる関係者が関わる流域治水プロジェクトに対して、対策を検討するためのリスク情報が不足しているという点が指摘できる。浸水想定区域図などで想定される外力の再現期間が等しい場合でも、それぞれの河川に適応される外力は等しいとは限らないため、再現期間中に物件所在地(以下、地先)に迫る可能性のある水害リスクを表しているとは言えない。

本研究では、統合型氾濫シミュレータを用いた浸水深の推定と、アンサンブル降雨の頻度解析を用いて、様々なハザード源の特性を考慮した水のリスクを統合的に考慮したリスクカーブ算定手法を提案する。

2. 既往のリスク算定手法

従来までに広く用いられてきた水害リスク情報として、「洪水浸水想定区域図」が挙げられる。洪水浸水想定区域図は対象河川に想定最大規模もしくは計画規模の降雨を対象として氾濫域の最大値を取ることから、避難計画の検討に用いることに有効であるが、投資や立地などの被害の確率が求められる計画に用いるのが難しいという点が指摘²⁾されている。このため、国土交通省では多段階の浸水想定図及び水害リスクマップの検討を進めようとしている。多段階の浸水想定区域図では、図 1 のように従来の計画規模を下回る水害の可能性について検討が可能となる図である。また、水害リスクマップは図 2 の

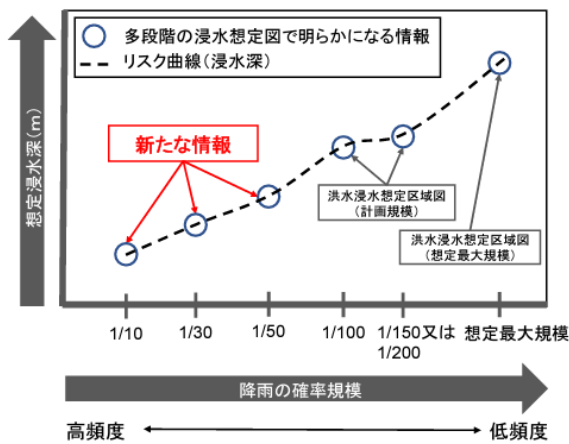


図 1 多段階の浸水想定図で明らかになる情報²⁾

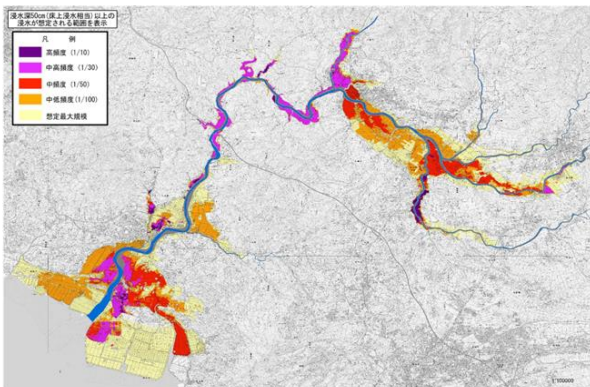


図 2 水害リスクマップの表示例²⁾

ように基準の浸水高が生じうる頻度を示した図である。上記の取り組みでは、図 3 のような検討フローが示されている。このフローでは主要河川(以下、大河川)とその他河川・下水道等(以下、中小河川)は個別で計算されており、作成された浸水想定図を統合することで内外水統合の浸水想定図を作成することになっている。大河川と中小河川のそれぞれの氾濫が卓越した降雨シナリオ群を設定することから、大河川用の降雨シナリオ群と中小河川用の降雨シナリオ群の降雨確率は地先に生じる降雨シナリオとしては独立している。このような独立した降雨シナリオや氾濫シミュレーションの結果を重ねた結果が地先に生じる水害リスクを統合的に評価できているかについては疑問が残る。

他の取り組みとして、滋賀県では、瀧らの成果³⁾を元に地先の安全度マップを作成し、運用している。これは、大河川と中小河川の統合型氾濫シミュレーションモデルを用いることによって、氾濫現象を統合的に評価できるモデルとなっている。また、降雨外力については、流域内で同一の降雨波形を一樣に分布させて入力しているこ

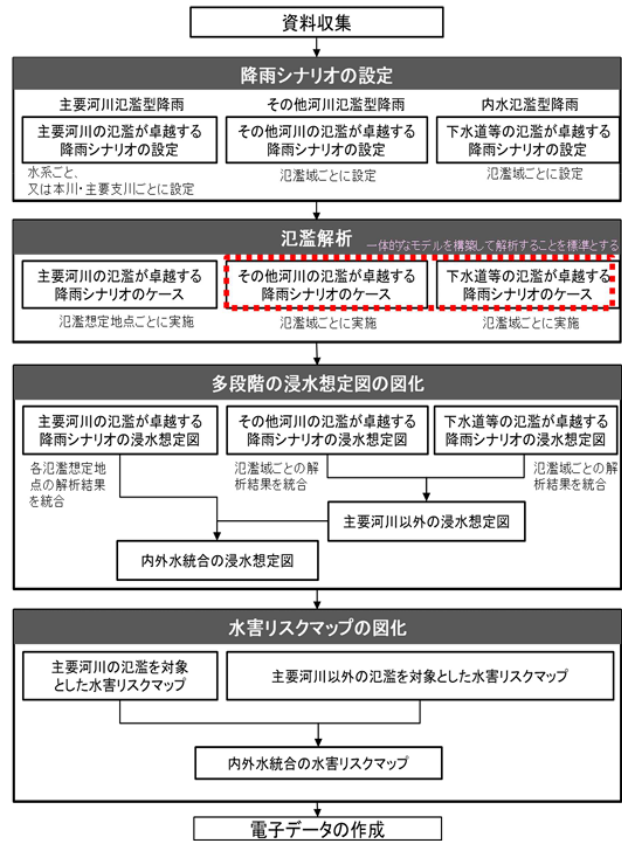


図 3 水害リスクマップ等の標準的な検討フロー²⁾

とから、流域内で同じ降雨シナリオの入力条件を流域内で統合的に評価することが可能となっている。しかし、上記の取り組みの降雨は滋賀県降雨式に基づく県下一様降雨で設定されていることから、主に大河川に卓越する降雨シナリオとなっていることと、山地を含む流域内の降雨波形等の降雨特性の異なりを考慮できていない。

しかし、従来の手法を用いて多様な降雨波形や降雨量を考慮した降雨シナリオを整備することは困難である。これは約半世紀の気象観測によって得られた水門統計によって得られたパラメータを用いて外力が生成されていることによる課題であり、観測量が少ないものや観測されていないもののシナリオ生成については困難が生じるためである。

本提案では、上記のような降雨シナリオ生成の困難さを解決するために、大規模アンサンブル降雨を用いた統合型氾濫シミュレーションによる地先の浸水シミュレーションと、頻度解析を用いた地先の水害リスクカーブ生成手法を提案する。

3. 大規模アンサンブル降雨を用いた地先の水害リスク評価手法

近年、地球シミュレータなどの成果から、d4PDF などの大規模アンサンブル大気モデルのデータが充実している。d4PDF では、多数のアンサンブルを活用することで、集中豪雨などの極端現象の将来変化を、確率的に、かつ高精度に評価できる⁴⁾ものとしている。このような多数アンサンブルの特性から、従来のような降雨波形を設定して氾濫計算をするパラメトリックな手法から、多数アンサンブルシナリオをそのまま導入するノンパラメトリックな手法でも確率的に降雨現象や氾濫現象を評価することが可能になる。

しかし、d4PDFのデータは例えば20kmメッシュの4度上昇実験データで5400年分存在する。また、5kmダウンスケーリングモデル⁵⁾の4度上昇データは372年分存在することから、全ての降雨イベントを抽出して統合型氾濫シミュレーションを実施することは、現在の計算機環境では途方もない計算時間がかかる。そこで、大規模アンサンブル降雨を用いた統合型シミュレーションでの水害リスクを分析するために、氾濫などの水害が生じる極端事象の降雨イベントを抽出し、氾濫解析に用いる。このとき、降雨イベントは大河川の氾濫現象に卓越した長期継続降雨(例：24時間降雨量)と中小河川の氾濫現象に卓越した短期集中降雨(例：1時間降雨)の2つの特性を有する降雨イベントをPOT手法⁶⁾により抽出する。前述の多様な洪水特性を含んだ大小様々な流域特性を統合的に評価するために、大河川・中小河川での氾濫現象に卓越する降雨イベントを抽出することになる。

4. 複数特性を有する降雨イベント群の同時生起確率推定

上記のように、リスクを推定するための外力は、それぞれの治水施設を設計する際に想定された外力を上回る超過外力を用いる。超過外力は既往の降雨外力の観測データの中でも非常に低頻度で発生しているものや未だに発生していないものを考慮に入れる必要があり、超過外力の想定のためには極値統計⁷⁾の手法が用いられる。極値統計では、十分に大きな閾値を超過するデータに適合する分布を推定することが可能であり、一般化パレート(Generalized Pareto: GP)分布と呼ばれる。一般化パレート分布での極値統計は一変量での解析が主であるが、近年H. Rootzenら⁸⁾によって多変量のGP分布解析の手法が

示され、北野ら⁹⁾はこれを用いた降水量の同時生起頻度の推定法を示している。本稿では、2変量の同時生起確率を求める手法から、流域内被害の期待値を求める手法をまとめる。

ある閾値を超えたイベント数を数え上げたものを生起数という。この生起数の期待値を取ったものが生起率である。この期待値の分母に該当する単位時間を明記する場合には、 $\lambda_{n,AB}$ のように単位時間を明記する。このような定義から、生起率は次のような比例関係を満足する。

$$1: \lambda = n: \lambda_n \rightarrow \lambda_n = n\lambda_1 \quad (1)$$

d4PDFより、時間降雨量データの集合Aおよび日降雨量データの集合Bを抽出する。1変数の時、任意の降雨量 y_A を超える生起率 λ_A は式(1)を満足する場合においては次の関数形となる。

$$\lambda_{n,A}(y_A) = \left(1 + \xi_A \frac{y_A - \mu_{n,A}}{\sigma_{n,A}}\right)^{-1/\xi_A} \quad (\xi_A \neq 0) \quad (2)$$

$$= \exp\left(-\frac{y_A - \mu_{n,A}}{\sigma_{n,A}}\right) \quad (\xi_A = 0) \quad (3)$$

また、 y_B も同様となる。2変量 y_A と y_B のいずれかが超えて生起する確率である包括生起率 λ_* は一つの関数形に限定されないが、初期の極値理論の検討で用いられた2変量極値分布に含まれる包括生起率は次の関数形となる

$$\lambda_{n,*}(y_A, y_B) = \left\{ \lambda_{n,A}^{1/\alpha}(y_A) + \lambda_{n,B}^{1/\alpha}(y_B) \right\}^\alpha \quad (4)$$

また、同時生起確率 λ_{AB} は

$$\lambda_{n,AB}(y_A, y_B) = \left\{ \lambda_{n,A}^{-\beta}(y_A) + \lambda_{n,B}^{-\beta}(y_B) \right\}^{-1/\beta} \quad (5)$$

から求められる。比例関係よりこれらの定数 α, β は二つの分布の相互乗入れを定義するものである。A, Bそれぞれの生起率が同じ値を取るとき、両モデルの同時生起率が等しくなるとすると、下記の比例関係が認められる。

$$\alpha \approx \frac{\log(2 - 2^{-1/\beta})}{\log 2} \quad (6)$$

上記の生起確率や定数を整理すると、閾値(u_A, u_B)の超過確率分布 F_u は、次の式のようになる。

$$F_u = \frac{\lambda_*(y_A \wedge u_A, y_B \wedge u_B) - \lambda_*(y_A, y_B)}{\lambda_*(u_A, u_B)} \quad (7)$$

超過確率が求められた各降雨シナリオを用いて、氾濫シミュレーションを実施する。超過確率と各地先の浸水深の関係から、図4のようなリスクカーブを描くことが

できる。このとき、 i は被害の大きい順に昇順に並べている。

$$E(\text{Loss}) = \sum_i \text{Loss}(U^i) \cdot \{F_{(U^i)} - F_{(U^{i-1})}\} \quad (8)$$

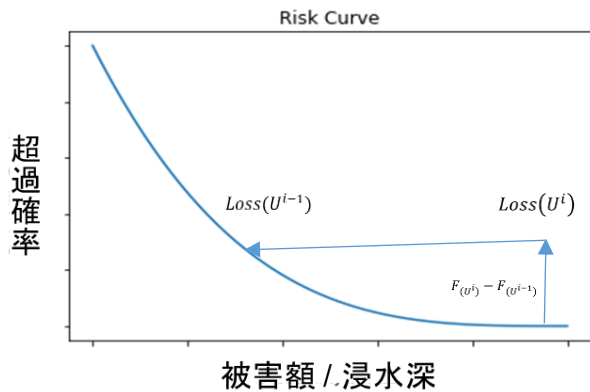


図4 リスクカーブ生成の計算イメージ

5. まとめ

まず、流域治水の実現に向けた現在までに取り組まれているリスク推定方法についてまとめた。そこから、大小さまざまな河川特性を統合的に評価した地先の水害リスク推定のためには、降雨イベントの設定方法と降雨イベントの発生確率について推定する方法が必要であることを突き止めている。d4PDFなどの多数アンサンブル気象データを用いることで様々な降雨特性を有する大量の降雨イベントを用いることができ、ノンパラメトリックな推定による氾濫計算が可能となることを導いている。しかし、大量の降雨イベントを全て用いた流域全体の統合型氾濫シミュレーションは計算量が大きいため、降水量が閾値を超えた降雨イベントを用いた氾濫シミュレーションを実施し、極値解析によって降雨イベントの生起確率を推定する方法を提示している。このとき、大小様々な洪水特性を有する河川を統合的に評価するために、大河川の氾濫に卓越する長期継続降雨イベント群、中小河川の氾濫に卓越する短期集中降雨イベント群を抽出し、

同時生起確率を求めることでそれぞれの降雨イベントの生起確率や超過確率を推定する方法を示した。また、水害対策の効果検証にも用いるリスクカーブの生成手法までをまとめたことで、治水オプションによって変化する治水効果の検証につなげることができる。

これらの成果より、流域内の多様な治水の取り組みの現状を統合的に評価することができ、それぞれの取り組みが流域に及ぼす影響も統合的に比較や評価することが可能となり、流域治水の実現に向けた合意形成資料への応用が期待できる。

REFERENCES

- 1) 国土交通省水管理国土保全局：流域治水プロジェクト <https://www.mlit.go.jp/river/kasen/>
- 2) 水管理・国土保全局 河川環境課 水防企画室 国土技術政策総合研究所 河川研究部 水害研究室：多段階の浸水想定図及び水害リスクマップの検討・作成に関するガイドライン、
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/guideline_kouzuishinsui_2301.pdf
- 3) 瀧ら：中小河川群の氾濫域における超過洪水を考慮した減災対策の評価方法に関する研究、河川技術論文集、第15巻、2009
- 4) Ryo Misutani et al. OVER 5,000 YEARS OF ENSEMBLE FUTURE CLIMATE SIMULATIONS BY 60-KM GLOBAL AND 20-KM REGIONAL ATMOSPHERIC MODELS, American meteorological society, Vol. 98, Issue 7, pp.1383–1398, 2017
- 5) T. Sasai et al. Future Projection of Extreme Heavy Snowfall Events With a 5-km Large Ensemble Regional Climate Simulation, JGR Atmospheres, Vol.124, Issue 24, pp.13975–13990, 2019
- 6) 寶馨：水門頻度解析の進歩と将来展望、水門・水資源学会誌, Vol. 11, No. 7 pp.740–756, 1998
- 7) 国友直人ら：極値現象の統計分析、朝倉書店, 2021
- 8) H.Rootzen et al.: Multivariate generalized Pareto distributions, Bernoulli Vol.12 No.5, 2006 pp.197-930
- 9) 北野ら：2変量 GP 分布による降水量の同時生起頻度の推定法、土木学会論文集 B1(水工学)Vol.74, No.4, pp.I_319-I_324, 2018