

# 様々な極端降雨シナリオによる洪水氾濫シミュレーションに基づく 事業所の水害対策設備への投資判断支援

## Investment Decision Support for Business Sustainability Improvement with Structural Measures Based on Flood Inundation Simulations with Variety of Extreme Rainfall Scenarios

野 中 沙 樹 岩 前 伸 幸 野 原 大 督 山 田 順 之

### 要 約

近年、日本では深刻な豪雨災害が頻発しており、民間企業の事業継続計画（BCP）における水害対策の重要性が高まっている。大規模水害対策のための基本情報として、河川管理者は河川整備の計画規模と想定最大規模の洪水浸水想定区域図を公開しており、民間企業がBCPを策定する際にはまずこの情報を参照することも多い。ただし、事業所の立地条件によっては、二つの洪水規模の想定浸水深が大きく異なり、浸水対策のための施設整備の適切な水準を決定することが困難な場合がある。費用対効果の高い施設計画や合理的な設備投資判断を行うためには、様々な大きさの降雨に対する詳細な浸水ハザード情報が不可欠である。そこで本研究では、多摩川流域を対象に様々な再現期間の降雨を想定した洪水氾濫シミュレーションを実施することで得られた浸水深の情報に基づいて、浸水対策を講じることによる被害低減効果を評価することで、対策の費用対効果が大きくなるような施設整備水準を選定するケーススタディを行った。

### 目 次

- I. はじめに
- II. 流出氾濫解析・浸水対策の費用対効果算定手法
- III. ケーススタディ
- IV. おわりに

#### I. はじめに

近年、豪雨に伴う水害が激甚化・頻発化しており、日本各地で河川の洪水氾濫が発生し、甚大な被害をもたらしている。このような背景の中、民間企業においても事業の継続性を高める上で、水害リスクの評価や水害対策を検討・実施することが重要な課題となっている。また、気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）の提言を受け、国内においても気候変動による物理的リスクに関する情報の開示が企業価値を維持するための要件となりつつある。我が国において、水害は気候変動により生じる物理的なリスクの最も主要な要因のひとつとして認識されており、この観点からも個々の民間企業を対象とした水害リスク評価の重要性は高まっている。

民間企業が自社の水害リスクを評価する上で参照できる最も基本的な情報は、自治体が公開するハザードマップであ

り、計画規模と想定最大規模の2つの外力レベルのハザード情報（浸水想定区域や想定浸水深）を得ることができる。一級水系の計画規模降雨量の再現期間が一般に100～200年程度であるのに対し、想定最大規模降雨量の再現期間は1,000年前後である。このため、想定最大規模降雨による想定浸水深が3～5mを超えるなど、止水壁等のハード対策により防護可能なレベルを上回ることがある。その場合、現実的に取りうる対策案の中から、経済的に合理的な案を選定することになる。費用対効果の高い対策や投資決定を行うためには、浸水リスクの評価が必要であり、そのためには計画規模降雨と想定最大規模降雨の間の発生確率を持つ降雨を合わせて考慮することが重要である。しかし、前述のとおり、計画規模と想定最大規模の中間の洪水ハザード情報は一般に提供されておらず、氾濫シミュレーションなどの方法によって個別に必要な情報を準備する必要がある。

一方で、地形等の理由で想定浸水深がより高頻度の洪水でも大きくなりやすい地点においては、計画規模より低頻度の発生確率の洪水で浸水深が施設対応のレベルを超える場合もあり、この場合においては費用対効果の分析でよく検討される年期待被害額の低減の観点からは、高頻度の発生確率の洪水において浸水を軽減できるような施設対策が重要とな

**キーワード**：多摩川、水害対策、BCP、洪水氾濫解析、費用対効果分析

**Keywords**：Tama river, flood protection, business continuity planning, flood inundation simulation, cost-benefit analysis

ることが考えられる。このように、対象とする地点の浸水ハザードカーブに応じて、適切な水害対策の施設整備判断を行う方法は変わるものと考えられる。

降雨規模の増大に伴う最大浸水深の増加傾向は氾濫原内の位置に応じて大きく異なることが示されている<sup>2)</sup>。そのため、氾濫原内の各地点の水害リスクカーブ<sup>3)</sup>を考慮し、個別の事業所における浸水深別の被害額や対策費用を設定<sup>4)</sup>した上で浸水対策の費用対効果を算定する必要がある。そこで本研究では、多摩川流域を対象に様々な降雨規模を想定した氾濫シミュレーションを実施し、その結果に基づいて異なる浸水ハザードカーブを持つ事業所を想定した浸水対策の費用対効果分析のケーススタディを行った。その結果から、浸水ハザードカーブの違いが対策費の回収年数に及ぼす影響について考察し、費用対効果分析の適用における課題について述べる。

## II. 流出氾濫解析・浸水対策の費用対効果算定手法

Fig.1 に、本検討で用いた氾濫シミュレーションに基づく事業所における浸水対策の費用対効果分析の流れを示す。降雨流出・氾濫解析と、浸水対策のリスク分析の2つから構成される。以下では、本ケーススタディで用いたモデルについて説明する。

### 1. 降雨シナリオの作成方法

まず、降雨流出・洪水氾濫解析の入力降雨シナリオに対応する再現期間を推定するための極値統計解析を行った。

確率降水量の推定および入力降雨データの作成を行うため、多摩川流域内に位置する国土交通省水文水質データベースにてデータが公開されている雨量観測所 11 地点と気象庁の地域気象観測所 3 地点を含む、計 14 地点 (Fig.2) の毎時雨量データを用いた。1958 年から 2018 年までの 61 年分のデータについて、多摩川水系の河川計画の基準である石原地点の上流域平均雨量の年最大 48 時間雨量を、ティーセン法を用いて算出した。確率降水量の推定方法<sup>5)</sup>に従い、極値分布を当てはめ、最も適合度の良かった Gumbel 分布を採用し、各年最大 48 時間雨量の再現期間を求めた。推定された再現期間 200 年に対応する 48 時間雨量は 457.4mm となり、多摩川の計画規模の浸水想定に用いられている 48 時間雨量 457mm と同程度であることを確認した。

降雨流出・氾濫解析の入力降雨データは、降雨波形については全て計画規模降雨のものを用いて、石原上流域平均 48 時間雨量が、以下の目標雨量となるように調整して作成した。目標雨量は 300mm (推定した再現期間 14.4 年) から 590mm (再現期間 1883.7 年) まで 10mm 間隔で 30 通りとした。

### 2. 降雨流出・氾濫解析モデル

降雨流出・氾濫解析については、既往研究<sup>2)</sup>と同一の対象領域および解析モデルを使用した。解析モデルは降雨流出解

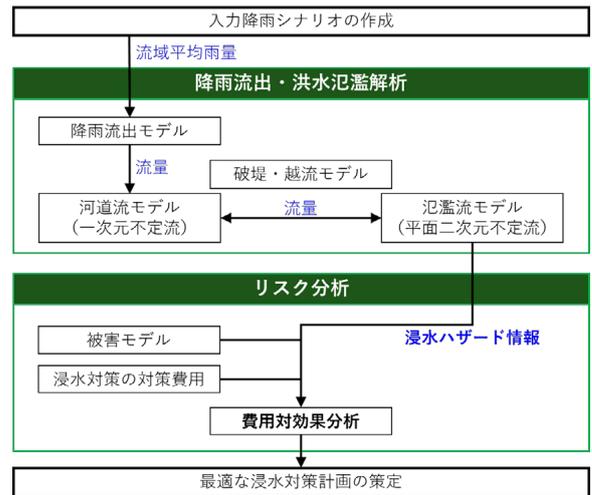


Fig.1 解析の流れ (Analysis Framework)

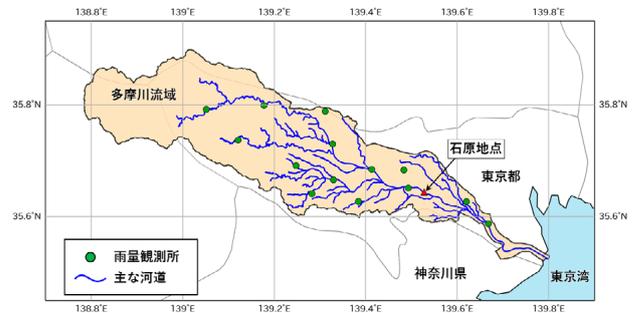


Fig.2 多摩川流域図 (Map of Tama River Basin)

析モデルと河道流・氾濫流一体解析モデルで構成される。降雨流出解析モデルには貯留関数法を、河道流・氾濫流一体解析モデルには、河道内の流れを解く次元不定流モデルと氾濫原の氾濫流を解く平面二次元不定流モデルを用いている。なお、本研究では河道流モデルは現況河道条件で計算し、河道流モデルと氾濫流モデル間の流量交換は、越流だけでなく、河川堤防の破堤も考慮した計算を行っている。破堤条件は石原地点のやや上流側の左岸 29.00km 地点を計画高水位で破堤させ、破堤点以外からの越流も考慮した。氾濫流モデルは 25m×25m 解像度の計算メッシュを用いており、メッシュ毎の浸水深分布を得ることができる。

氾濫解析結果の一例として、計画規模のケースにおける最大浸水深の空間分布を Fig.3 に示す。Fig.3 に示す領域の左岸側氾濫原の地形の特徴としては、河道に沿った狭い領域に低地が分布しており、堤内へと氾濫した水は、河道の流下方向と同じ方向に氾濫原を流下していく。この最大浸水深分布の結果については、国土交通省が公開する地点別浸水シミュレーション検索システム<sup>6)</sup>で同じ地点が破堤する条件での最大浸水深と比較し、整合的であることを確認している。

### 3. 事業所での浸水対策の費用対効果の算定方法

浸水対策の費用対効果は治水経済調査マニュアル(案)<sup>7)</sup>および先行研究<sup>4)</sup>を参考に、以下の手順で算定した。

(1) 無対策時と浸水対策後の被害モデルの設定

対象地点の建物に対する浸水深と被害額の関係をモデル化する(被害モデル)。被害モデルは無対策の場合と、浸水対策実施後の2種類を設定する。本研究では建物の耐水性や資産の鉛直分布は考慮せず、浸水による被害額も直接被害のみを扱い、簡易な被害モデルとした。想定した浸水対策としては、事業所の周囲に高さ  $H$  (m) の止水壁を建設することとし、浸水深が止水壁の高さ以下の場合には無被害、止水壁の高さを超えた場合は、浸水深の大きさによらず一定の被害額  $\alpha$  (百万円) が発生するという被害モデルを考える。なお、対策の有無によらず、浸水深が 0.1m 以下の場合には無被害とした。浸水深  $h$  (m) のときの被害額  $D(h)$  (百万円) は以下のように表せる。

無対策時

$$D(h) = \begin{cases} 0 & (h \leq 0.1) \\ \alpha & (h > 0.1) \end{cases} \quad (1)$$

浸水対策(高さ  $H$  の止水壁建設)後

$$D(h) = \begin{cases} 0 & (h \leq H) \\ \alpha & (h > H) \end{cases} \quad (2)$$

上記の想定は、浸水深の大きさよりも浸水の有無が被害に大きく影響するように事業所内の資産が存在する状況を考慮しており、例えば、地盤面や地下階に高価な機器を置いている工場のような施設がこれに当たる。

対策費(止水壁の建設費)については、当社の過去の検討事例を参考に仮想的に設定した。対策費  $C_m$  は、止水壁の高さによらない固定の建設費用と壁の高さ  $H$  に比例する建設費用の和としてモデル化し、 $C_m = 40H + 48$  (百万円) とした。

(2) 年平均被害額の期待値の算出

任意の間隔で離散的に設定した年超過確率  $F_i (i = 0, 1, \dots, n, F_i > F_{i+1})$  の各降雨(再現期間は  $T_i = 1/F_i (T_i < T_{i+1})$  となる)に対応する最大浸水深  $h_i$  を氾濫解析により求める。各浸水深  $h_i$  に被害モデルを適用することで、それに対応する被害額  $d_i$  が求められる。年平均被害額の期待値(Expected Annual Damage, EAD)は、各区間の平均被害額に生起確率を乗じ、全区間について足し合わせたものとして、次式で表される。

$$EAD = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \cdot (F_i - F_{i+1}) \quad (3)$$

式(3)より、無対策時(式(1)の被害モデル)の年平均被害額の期待値  $EAD_0$ 、浸水対策実施後(式(2)の被害モデル)の年平均被害額の期待値  $EAD_m$  をそれぞれ算出する。

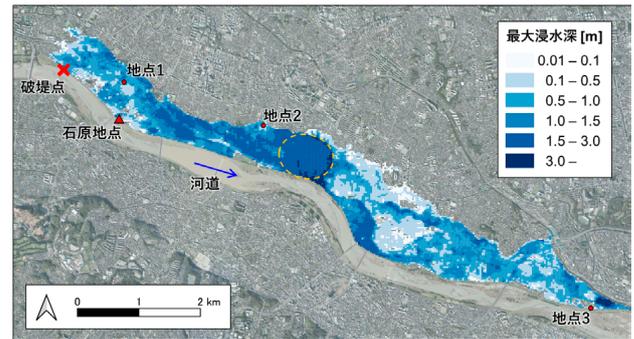


Fig.3 氾濫解析結果の例  
(Result of Flood Inundation Simulation)

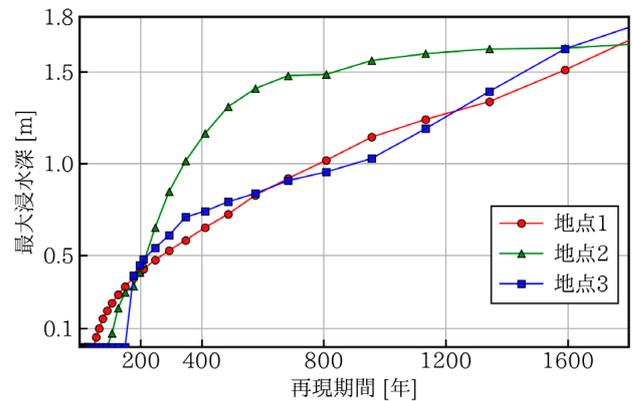


Fig.4 地点1~3の最大浸水深と再現期間  
(Return Period of Maximum Inundation Depth at Sites 1-3)

(3) 水害対策の費用対効果の算定

対策効果は浸水対策を実施したことによる年平均被害軽減期待額  $EAD_0 - EAD_m$  で評価できる。想定した浸水対策にかかる費用を  $C_m$  とすると、浸水対策費の平均回収年数は、 $C_m / (EAD_0 - EAD_m)$  で求められる。なお、本研究では割引率は考慮していないため、年平均被害軽減期待額が過大評価されていることに留意する必要がある。

III. ケーススタディ

1. 検討対象地点と浸水ハザードカーブの特徴

浸水対策の費用対効果のケーススタディを行う対象地点としては、Fig.3に示す領域の左岸側氾濫原の地点の中から、計画規模降雨(再現期間200年)による浸水深が0.4~0.5mと同程度で、かつ浸水ハザードカーブの特徴が異なる、地点1~3の3地点とした。各地点の浸水ハザードカーブ(本研究で設定した入力降雨の再現期間とその入力条件の降雨流出・氾濫解析で算出される最大浸水深との関係)をFig.4に示す。地点1は3地点の中で破堤点に最も近く、3地点の中では最小の再現期間の降雨で氾濫水が到達するため、浸水が発生する再現期間は最も小さい。地点2は近くに氾濫水の流下側の標高が高いため氾濫水が溜まりやすい地域(Fig.3内の橙色

の破線で囲んだ地域)が存在している。降雨規模が大きくなると、氾濫水がこの地域で一旦せき止められるため、上流側である地点2の浸水深は比較的再現期間の小さい降雨でも急激に増大しやすくなっている。地点3は3地点の中では最下流側にあり、破堤点から最も遠いが、破堤点からの氾濫水は堤内を流下し、地点3の周辺まで到達する。また、地点2と地点3については、それぞれ上流側の河道に越流氾濫が発生する地点があり、降雨の再現期間が大きくなると、破堤点だけでなく越流地点からの氾濫水も到達することから、浸水深が増大しやすい。このように、各地点は周囲の地形や破堤点・越流点からの距離によって異なる特徴の浸水ハザードカーブとなっている。

2. 各地点での浸水対策の費用対効果の検討

上述の地点1~3の各地点に事業所があると仮定して、同一の被害モデル、浸水対策を適用する場合の対策費の費用対効果分析を行った。浸水対策については、止水壁の高さを0.5m~1.8mまで0.1m刻みに変化させた計14ケースについて検討した。対策費は、壁の高さ0.5mで68百万円、1.8mで120百万円となる。また、被害額は過去の検討事例を参考に仮想的に設定し、450百万円とした。

まず、止水壁の高さが最小の0.5mのときの費用対効果の試算結果をTable 1に示す。200年確率降雨での最大浸水深が0.4m~0.5mとなる地点を選定しているため、3地点とも計画規模の降雨に対応した対策を想定していることになる。Fig.4の浸水ハザードカーブより、最大浸水深が0.1m以上となる降雨の再現期間は、地点1, 2, 3の順に大きくなる。このため、Table 1を見るとEAD<sub>0</sub>は地点1で最も大きく、地点2, 3の順に小さくなる。各地点のEAD<sub>m</sub>の差がEAD<sub>0</sub>の差と比べて小さいため、EAD<sub>0</sub>が大きいほど対策による年平均被害軽減期待額は大きくなり、対策費の平均回収年数は小さくなる。壁高が0.5mの場合、対策費の平均回収年数は、最小で11.4年(地点1)、最大で85.2年(地点3)となり、止水壁の高さに対応する降雨の再現期間が同程度でも、それより再現期間の小さい降雨の浸水ハザードカーブの特徴が大きく異なるため、対策費の平均回収年に73.8年と大きな差が生じた。

次に、止水壁の高さを変えたときに費用対効果分析によって得られた、止水壁高さと年平均被害軽減期待額(EAD<sub>0</sub>-EAD<sub>m</sub>)の関係をFig.5に、止水壁高さと対策費の平均回収年数の関係をFig.6に示す。地点毎に特徴を見ると、まず、地点1は、壁高に依らず被害軽減額が大きい(Fig.5)、建設費を被害軽減額で割った平均回収年数は11~17年程度と最小となっている(Fig.6)。EAD<sub>0</sub>は無対策時のものなので、浸水対策に依らず地点毎に値が得られ、EAD<sub>m</sub>は壁高を高くすると、値は等しいか小さくなるので、壁高を高くすると、被害軽減期待額は大きくなる。そのため、壁高が最低の0.5mのときに3地点の中で被害軽減期待額が最大である地点1が、

Table 1 高さ0.5mの止水壁建設に対する費用対効果分析 (Cost-benefit Analysis of 0.5m Wall Height)

地点番号	1	2	3
200年確率降雨の最大浸水深 [m]	0.41	0.41	0.45
EAD <sub>0</sub> [百万円/年]	7.41	3.66	2.54
EAD <sub>m</sub> [百万円/年]	1.44	1.75	1.75
年平均被害軽減期待額[百万円/年]	5.97	1.91	0.80
対策費の平均回収年数 [年]	11.4	35.5	85.2

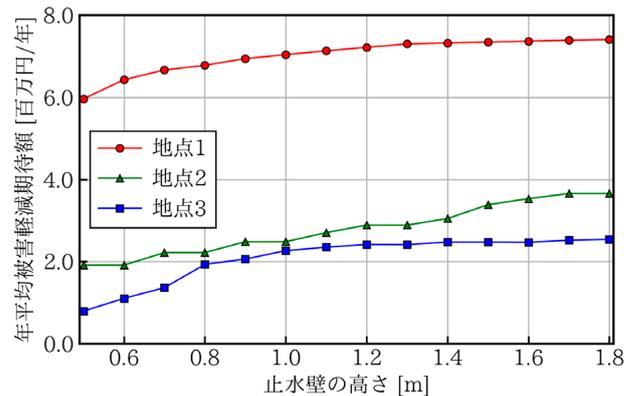


Fig.5 止水壁の高さと年平均被害軽減期待額 (Expected Annual Damage Reduction)

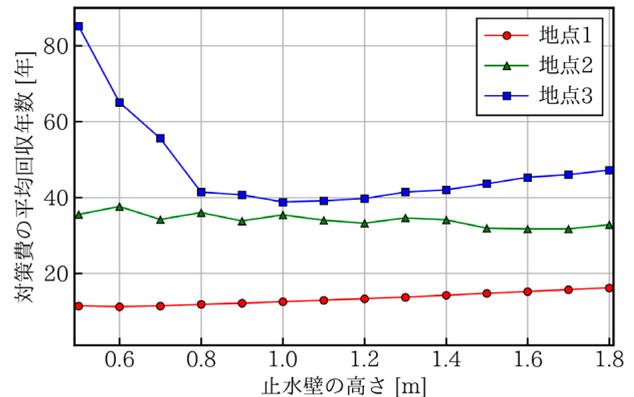


Fig.6 止水壁の高さと平均回収年数 (Payback Period for Construction Cost of Flood Wall)

壁高によらず回収年数も最小となる。次に、地点2については、壁高が高くなると被害軽減期待額はほぼ一定の傾きで増加しており、特に壁高0.5~1.3m程度まではほかの地点と比べて被害軽減期待額の増加量が小さく(Fig.5)、壁高に応じて変わる建設費用を被害軽減期待額で割った平均回収年数は壁高に応じてあまり変わらない結果となった(Fig.6)。これは、最大浸水深が0.5~1.3m程度までは、ほかの地点よりも最大浸水深の増加に対して、降雨の再現期間の増加量が小さいため(Fig.4)、壁高の増加に対するEAD<sub>m</sub>の減少量がほかの地点よりも小さいことになり、EAD<sub>0</sub>は壁高に応じて変わらないので、壁高が0.5~1.3m程度では、被害軽減期待額の増加量がほかの地点より小さくなっている。地点3は壁高

0.5m の平均回収年数が特に大きく、壁高を高くすると 0.8m あたりまで平均回収年数が急激に小さくなる (Fig.6)。地点 1 とは逆に無対策時に浸水深が 0.1m を超える降雨の再現期間が大きいため、壁高 0.5m での被害軽減期待額が小さくなり、平均回収年数は大きくなっている。0.5m より壁高を高くすると、建設費は増加し、EAD<sub>m</sub> が減少するため被害軽減期待額も増加するが、建設費の増加率に比べて被害軽減額の増加率の方が大きいと、急激に減少している。

地点 1~3 はともに止水壁高さを変えた場合に平均回収年数が極小となる壁高が存在する。浸水対策の費用対効果が最大となるように壁高を最適化すると、Fig.6 より各地点における対策費の平均回収年数が最小となる壁高となるため、地点 1 で 0.6m (平均回収年数 11.2 年)、地点 2 で 1.6m (31.7 年)、地点 3 で 1.0m (38.8 年) となる。

### 3. 考察・課題

ケーススタディを通して、氾濫解析結果に基づいた浸水対策の費用対効果分析に関して得られた知見や課題について整理する。

#### (1) ケーススタディ結果の考察

計画規模降雨による浸水深が同程度であったとしても、ほかの再現期間の降雨による浸水深の傾向は同じとは限らない。地点によって浸水ハザードカーブが異なると、浸水対策による費用対効果は大きく異なり、対策高さを高くしたときの対策費の平均回収年数の変化傾向も地点によって異なる。特に、本研究で用いた被害モデルでは、対策レベルの壁高さの浸水深をもたらす降雨規模よりも再現期間の小さな降雨に対するハザード情報が無対策時の被害額の期待値に大きく影響するため、様々な降雨規模に対して詳細に各地点の浸水ハザードを検討する必要があることがわかった。以上より、各事業者が経済的に合理的な水害対策を行うためには、ハザードマップの情報に加え、様々な降雨規模におけるハザード情報が詳細に必要であることがわかる。近年では水害リスクマップ<sup>8)</sup>として多段階の降雨規模に対する浸水想定図も公開され始めている。それらの公開情報を活用しつつ、必要な情報がない場合には氾濫シミュレーションを実施するなどの検討が望まれる。

#### (2) 浸水対策検討への適用についての課題

本研究では、降雨波形や破堤条件を固定し、浸水深に影響する確率変数として 48 時間雨量のみを考えた。実際には、降雨の時空間分布や破堤の有無も確率的な要素であり、尚且つ、浸水深に与える影響も大きい。これらについて、ハザードマップと同様に最大の浸水深を引き起こす条件を採用する方法も考えられるが、その場合、同じ降雨確率に対応する浸水深を大きく見積もることになる。ハザードマップは災害時に危険な箇所や避難場所を広く周知することを大きな目的としており、最悪ケースを想定することはその目的にかな

っているが、民間企業の洪水対策で同様の想定をすることは必ずしも合理的な方法とは言えない。もう少し楽観的な想定をすることによるリスクを許容できるのであれば、雨量以外の要因について最悪ではないケースを想定して計画を立てることもあり得る。また、シミュレーションにかかるコストを許容できるのであれば、雨量以外の要因についても何らかの確率モデルを考え、浸水深の超過確率をモンテカルロ・シミュレーションにより評価する方法も考えられる。

また、都市部では外水氾濫よりも内水氾濫による浸水リスクの方が高い地域も多く、特に再現期間の小さい降雨に対する浸水被害額の評価には内水氾濫を考慮する必要がある。ほかにも、気候変動を踏まえた外力の設定方法や、河道掘削や遊水地等の治水対策による将来の安全度の向上分を見込むのかといった課題もある。

細かく浸水深の超過確率を求めて被害額の期待値を算出したほうが近似精度は良くなるが、氾濫解析モデルの不確実性も存在するため、特に閾値付近 (本研究では無対策時は 0.1m、対策時は止水壁高さ) での浸水深の精度をどこまで厳密に評価するのかといった課題もある。これらの不確実な要因をふまえた意思決定、合意形成のプロセスについては今後さらなる議論が必要である。

### IV. おわりに

本研究では、様々な降雨規模を想定した氾濫シミュレーション結果に基づき、氾濫原内に位置する事業所を想定し、浸水対策の費用対効果に関するケーススタディを行い、得られた知見や課題を整理した。計画規模での浸水深が同程度でも浸水ハザードカーブが異なれば、浸水対策の費用対効果も異なるので、各地点における浸水ハザードカーブを考慮することが重要である。今後は、内水氾濫も考慮した浸水深の超過確率の評価方法や間接被害や損害保険等も考慮した被害モデルの設定方法について検討を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) ; Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures, 2017.
- 2) 野中沙樹ほか; 降雨波形が氾濫規模に及ぼす影響に関する一検討, 土木学会年次学術講演会, 2021.
- 3) 田中智大ほか; 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(水工学), 74(4), 2018, pp.I\_1477-I\_1482.
- 4) 木内望, 中野卓; 建築物の浸水対策案の試設計に基づくその費用対効果に関する研究, 建築研究報告, No.153, 2023.
- 5) 気象庁; 異常気象リスクマップ, 確率降水量の推定方法. [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/cal\\_qt.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/riskmap/cal_qt.html)

- (2023.06.27 閲覧)
- 6) 国土交通省；地点別浸水シミュレーション検索システム  
<https://suiboumap.gsi.go.jp> (2023.06.27 閲覧)
- 7) 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, pp.59-60.
- 8) 国土交通省；水害リスクマップ一覧（2023.06.27 閲覧）  
[https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki\\_pro/risk\\_map.html](https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/risk_map.html)

## **Investment Decision Support for Business Sustainability Improvement with Structural Measures Based on Flood Inundation Simulations with Variety of Extreme Rainfall Scenarios**

*Saki Nonaka, Nobuyuki Iwamae, Daisuke Nohara and Yoriyuki Yamada*

In recent years, heavy rainfall disasters have occurred frequently in Japan, which increases the importance for private companies to take flood countermeasures and prepare improved business continuity plans (BCPs). Although river authorities have published flood hazard maps for design rainfall (return periods of 100-200 years for most major river systems) and probable maximum rainfall (PMR, return periods of around 1000 years) in Japan, hazard information for floods with other return periods is also required for target business facilities to make cost-effective plans and investment decisions based on flood risk assessment. In this study, we conducted flood inundation simulations for rainfall scenarios with various return periods in the expected inundation area of the Tama River basin. On the basis of the simulated inundation depth, we conducted a case study on determining a cost-effective investment level for flood protection measures by evaluating the expected damage reduction with them. The results showed that the cost-effectiveness of flood control measures varies greatly depending on the characteristics of the inundation depth rise, suggesting the importance of assessment at a target business site.