# 気候変動の不確実性を考慮した段階的堤防整備計画に関する研究

倉内　萌乃香[1]・瀬木　俊輔[2]

[1]学生会員　神戸大学　大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-0013　神戸市灘区六甲台町 1）

E-mail: 227t114t@cloud.kobe-u.jp

[2]正会員　工博　神戸大学准教授　大学院工学研究科市民工学専攻（〒657-0013　神戸市灘区六甲台町 1）
E-mail: segi@people.kobe-u.ac.jp

近年, 世界的に水害の激甚化が課題となっており, 地球温暖化によって今後はより大きな被害が予測されている. そのため, 今後は気候変動シナリオを予測した水害対策が求められているが, 気候変動シナリオの不確実性が水害対策の長期計画の立案を困難なものとしている. 本研究では, 水害対策の中でも堤防のかさ上げに着目し, 将来の気候変動を考慮した上で堤防投資計画を策定することを目的とする. また, 国内の河川を対象として提案手法を適用し, 実用性を確認する.

***Key Words:*** *climate change,dike height,optimization, flood risks*

## 1.　はじめに

近年, 日本では各地で記録的豪雨が多発しており, 堤防のかさ上げを始めとした水害対策が急がれている. 豪雨の原因は地球温暖化だとする考え方が主流であり, 環境省による「気候変動の影響への適応計画」[1)]では平成 30 年 7 月豪雨は地球温暖化による水蒸気量の増加が寄与しており, 今後気候変動によって猛暑や豪雨のリスクが上がることを示唆している.

このような背景から, 今後は地球温暖化の進行を考慮した堤防整備計画の策定が求められる. 瀬木ら [2)]は気候変動の進行シナリオに不確実性があることに着目し, リアルオプション分析を応用した治水施設の整備計画の策定を提案している. この手法では「事前に定めた水準の気温上昇が見られれば治水施設の整備を始める」という指標を最適化することにより, 気候変動の不確実性を考慮している.

本研究では, 大規模アンサンブル気候予測(d4PDF)を用いることで, 全球気温が 4 度上昇した世界での最適な堤防投資計画と現状の気温での最適な堤防投資計画を作成し, 比較することを目的とする. 堤防嵩上げに要する費用と豪雨時の被害額の期待値の和の現在価値を最小とするような最適化問題を提案する. また, 2004 年の福井豪雨により甚大な被害を記録した福井県足羽川を対象として提案手法を適用し, 実用性を確認する.

## 2.　既往研究のレビュー

堤防の嵩上げ計画に関する研究はオランダの Carel et al[3)]が挙げられる. オランダは地形上標高が低い地域が多く, 治水対策に関する研究も進んでいる.

Carel et al. はオランダの堤防リングに対する堤防投資の最適化問題を定式化し, 地球温暖化による海水面の上昇が一定の速度で進行する環境において, 最適な嵩上げ時期に周期性があることを確認した. この研究では堤防嵩上げの投資費用と豪雨時の被害額の期待値の和の現在価値を目的関数として最適化問題を解いている. この研究では, 約 50 年に一度の周期で堤防の嵩上げが必要であることを示しており, 定期的に堤防の嵩上げ投資が必要であることを主張している.

瀬木ら [2)]は気候変動の不確実性を考慮した治水施設の整備計画を策定するため, リアルオプション分析を用いている. この研究では, ダム・遊水池・河道掘削などの手法を組み合わせた計画を最適化している. 乱数を用いて気候変動シナリオを複数設定することで, 様々なシナリオを考慮した分析を行っている. この手法によって, 「事前に定めた水準の気温上昇が確認できれば整備を開

始する」という指標を最適化することが可能となり，柔軟な整備計画の作成に有用であるという主張がされている．

立川ら[4]はアンサンブル気候予測である d4PDF から得た降水量データを用い，流量の確率分布の将来変化を分析している．この研究では，4 度上昇実験の 200 年確率年最大降水量と過去実験の 900 年確率年最大降水量がほぼ同じ値であることを確認している．また，既往大洪水をもたらした降水要因と d4PDF で再現・予測される大洪水の降水要因はよく一致していることも確認されている．

## 3. モデル

本研究では，福井県九頭竜川の流域に以上のモデルを適用する．足羽川付近は市街地であり氾濫時の被害が大きい上に，川幅が狭いため，リスクの大きい川といえる．本研究では，足羽川の市街地中心に最も近い堤防箇所を破堤させた場合の分析を行う．破堤箇所の現在の堤防の高さは 9.815m である．

本研究で用いるモデルについて説明する．本研究では，気候変動の進行が完了し，現在からの気温変化$s$が永久に不変となった状況を想定し，堤防嵩上げ費用と豪雨時の被害額の期待値との和の割引現在価値が最小になるような最適化問題を解く．

$$\min_{\Delta h}\frac{1}{\rho}V\left(\bar{h}+\Delta h,s\right)+I(\Delta h) \qquad (1)$$

ここで，数式中の文字の定義は以下の通りである．

- $\bar{h}$: 現在の堤防の高さ[m]
- $\Delta h$: 堤防を嵩上げする高さ[m]
- $s$: 現在と比べて気温が何度上がっているか
- $\rho$: 社会的割引率
- $V(h,\ s)$: 堤防の高さが$h$ [m]であり，気温が$s$度上昇した場合の 1 年あたりの被害額の期待値
- $I(\Delta h)$: 堤防を$\Delta h$[m]嵩上げする際に要する費用のうち橋梁の架け替え費を除いたもの

以下では，(1)堤防嵩上げ費用の予測モデル，(2)豪雨時の被害額の期待値の予測モデルにわけて説明を行う．

### (1) 堤防嵩上げ費用の予測モデル

堤防嵩上げ費用は工事費，用地費，橋梁の架け替え費の 3 つに限定して予測した．

工事に関しては，過去の工事費用を参考に護岸面積 1 ㎡あたり 3.00 万円と仮定する．また，堤防の勾配は 1/3 とする．また，設計費は嵩上げの高さに依存しないものと考え，区間の長さ 1m あたり 20 万円と仮定する．

用地費は土地代・建物の価値の 2 つより予測を行う．土地代に関しては，国土数値情報の都道府県地価調査データの令和 5 年度版[5]を使用している．建物の価値については，国土交通省の治水経済調査マニュアル[6]の都道府県別家屋 1 ㎡あたりの評価額を参照する．

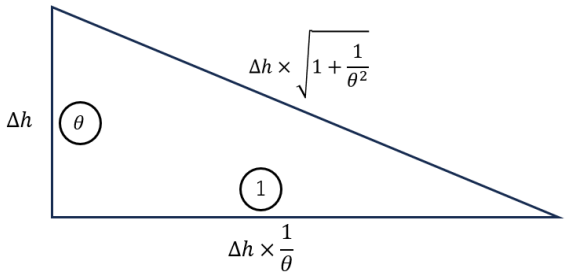



**図 1**　式(2)の算出方法

橋梁の架け替え費に関しては，国土技術政策総合研究所の「橋梁の架替に関する調査結果」[7]を参照する．計算の都合上，すべての橋に対して PC 橋の架替費のデータを用いる．撤去費の単価が 120.66 円/㎡，新設費単価が 485.85 円/㎡，仮設費が 110.64 円/㎡である．これらの合計値を架け替え費の単価とする．

橋梁の架け替え費は堤防の嵩上げを行う場合には嵩上げする高さに関わらず必要になるため，橋梁の架け替え費は最適な堤防の高さには影響を与えないといえる．そのため，$I(\Delta h)$では橋梁の架け替え費を除いた堤防嵩上げの費用となっている．

護岸面積にあたる部分は図 1 の斜辺となり，$\Delta h * \sqrt{1+1/\theta^2}$と表せる．土地を買収する部分は図 1 の底辺にあたるため，$\Delta h * \frac{1}{\theta}$となる．また，堤防のかさ上げを行う際には両岸同時に行うため，全項に 2 をかけてある．

$$I(\Delta h)=2l\Delta h\cdot\left[\alpha\sqrt{1+\frac{1}{\theta^2}}+\frac{1}{\theta}(\beta+\gamma\delta)\right]+2m\varepsilon \qquad (2)$$

ここで，数式中の文字の定義は以下の通りである．

- $l$: 堤防の嵩上げを行う区間の長さ[m]
- $\alpha$: 護岸面積 1 ㎡あたりの工事費用
- $\theta$: 堤防の勾配
- $\beta$: 堤防沿いの土地 1 ㎡あたりの地価
- $\gamma$: 堤防沿いの土地 1 ㎡当たりの延床面積（㎡）
- $\delta$: 都道府県別家屋 1 ㎡あたりの評価額
- $\varepsilon$: 区間 1m あたりの堤防の調査設計費や道路の作り替え費（片側）

橋梁の架け替え費は最適な堤防の高さには影響を与えないが，堤防をかさ上げするタイミングには影響を与える．堤防嵩上げのタイミングは，現時点から橋梁の寿命が来るまでのいずれかの地点で行うと考える．この堤防嵩上げのタイミングに関しては，以下の最適化問題で求められる．社会的割引率$\rho$は 0.04，橋梁の耐用年数$\bar{T}$は 50 年と仮定する．

$$\min_{\tau}\int_0^{\tau}V(\bar{h},s)e^{-\rho t}dt+\int_{\tau}^{\infty}V(\bar{h}+\Delta h,s)e^{-\rho t}dt$$
$$+I(\Delta h)e^{-\rho\tau}+\frac{C}{1-e^{-\rho T}}e^{-\rho\tau} \quad (4)$$
$$s.t.\quad 0\le\tau\le\bar{T}$$

ここで, 数式中の文字の定義は以下の通りである.

- $\frac{C}{1-e^{-\rho t}}e^{-\rho t}$: 耐用年数が$T$年の橋梁を寿命の度に架け替えることを永久に続ける費用の割引現在価値（最初の架け替え時点を基準とする）
- $\tau$: 堤防を嵩上げするタイミング
- $\bar{T}$:橋梁の耐用年数が来るタイミング
- $\int_0^{\tau}V(\bar{h},\ s)e^{-\rho t}dt$: 現時点から堤防を嵩上げするまでに起こる豪雨の被害額の期待値の割引現在価値
- $\int_{\tau}^{\infty}V(\bar{h}+\Delta h,\ s)e^{-\rho t}dt$: 堤防の嵩上げ以降に起こる豪雨の被害額の期待値の割引現在価値
- $I(\Delta h)e^{-\rho t}$: 堤防の嵩上げに要する費用の割引現在価値

橋梁を寿命の度に架け替えることを永久に続ける費用の割引現在価値は, 以下の等比級数として求められる.

$$C+Ce^{-\rho T}+Ce^{-2\rho T}+\cdots=\frac{C}{1-e^{-\rho T}} \quad (3)$$

上の最適化問題を$\tau$で微分することで一階の最適性条件を求めると以下のようになる.

$$V(\bar{h},s)e^{-\rho\tau}-V(\bar{h}+\Delta h,s)e^{-\rho\tau}-\rho I(\Delta h)e^{-\rho\tau}$$
$$-\frac{\rho C}{1-e^{-\rho T}}e^{-\rho\tau}>0 \quad (\tau=0)$$
$$V(\bar{h},s)e^{-\rho\tau}-V(\bar{h}+\Delta h,s)e^{-\rho\tau}-\rho I(\Delta h)e^{-\rho\tau}$$
$$-\frac{\rho C}{1-e^{-\rho T}}e^{-\rho\tau}<0 \quad (\tau=\bar{T}) \quad (4a)$$

この式を整理すると以下の式が得られる.

$$V(\bar{h},s)-V(\bar{h}+\Delta h,s)>\ \rho I(\Delta h)+\frac{\rho C}{1-e^{-\rho T}}$$
$$(\tau=0)$$
$$V(\bar{h}\ s)-V(\bar{h}+\Delta h,s)<\ \rho I(\Delta h)+\frac{\rho C}{1-e^{-\rho T}} \quad (4b)$$
$$(\tau=\bar{T})$$

式(4b)の左辺は堤防の嵩上げによる期待被害額の 1 年間当たりの軽減額を表す. 右辺は嵩上げを 1 年間遅らせることにより節約される金利を表す. 左辺が右辺よりも大きい場合には今すぐ嵩上げを行うことが最適となり, 小さい場合には橋梁の耐用年数を待ってから行うことが最適となる.

堤防の嵩上げの最適なタイミングは今すぐ($t=0$)もしくは橋梁が耐用年数を過ぎるのを待ってから($t=\bar{T}$)のどちらかであることが示された.

### (2) 豪雨時の被害額の期待値の推計モデル

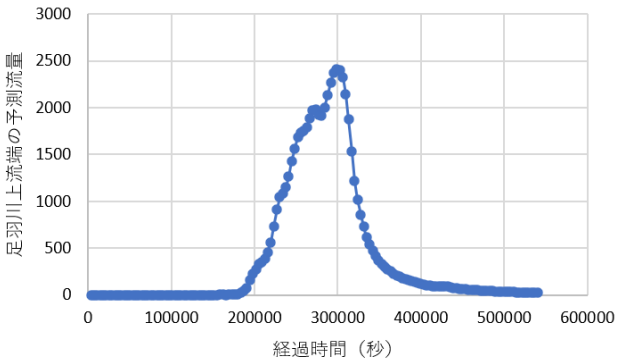



**図 2**　上流端の基準ハイドログラフ

#### a)　被害額の推計方法

株式会社日立パワーソリューションズによる水害シミュレータ DioVISTA[8]を用いて, 足羽川流域における被害額と, 設定した破堤箇所における最大水位を予測する. 本研究では, 堤防からの越水が生じた際に破堤が生じる箇所を破堤箇所と定義する. DioVISTA は, 河道上端のハイドログラフや河道断面を自由に設定して流出解析と氾濫解析を行うことが可能なソフトであり, 河川氾濫時の浸水深を最大 0..5m メッシュレベルで予測することが可能である. 予測した浸水深を用い, 国土交通省による治水経済調査マニュアル(2020)[9]に従って被害額を算出する.

#### b)　被害額の期待値の算出モデル

豪雨時の被害額の期待値を求めるため, $n$個の豪雨の規模を設定する. それぞれの豪雨の規模を$p_1, p_2, \dots p_n$とおく. 100 年に 1 度の災害であれば$p=1-1/100=0.99$となる. また, 豪雨に対応するピーク流量を$q_1$, $q_2 \dots\ q_n$とおく. それぞれの規模の豪雨における上流端のハイドログラフは, 図 2 に示した, 足羽川上流端の基準ハイドログラフの全体を, ピーク流量が$q_1, q_2 \dots\ q_n$に一致するように定数倍することによって与える. 基準ハイドログラフは, d4PDF の 4 度上昇実験における豪雨の下での流出解析により求めた. また, それぞれの豪雨の下で破堤が起こった場合の被害額を$d_1,\ d_2,\ \dots d_n$とする. これは①で前述した方法によって予測する.

さらに, それぞれの豪雨が起こった場合の破堤箇所での最大水位を$h_1,\ h_2,\ \dots\ h_n$とする. 最大水位$h$に関しては DioVISTA を用いて予測をおこなった. 被害額を予測する場合とは異なり, 堤防の高さを無限に設定した状態でシミュレーションを行い, 破堤箇所の最大水位を測ることによって最大水位$h$を予測した.

以下の手順に沿って被害額の期待値を算定する.

STEP1　流量と最大水位, 流量と被害額をもとに関数を作成

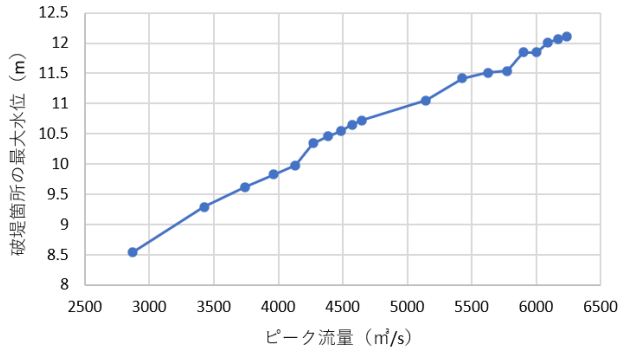



**図 3**　ピーク流量と破堤箇所の最大水位の関係

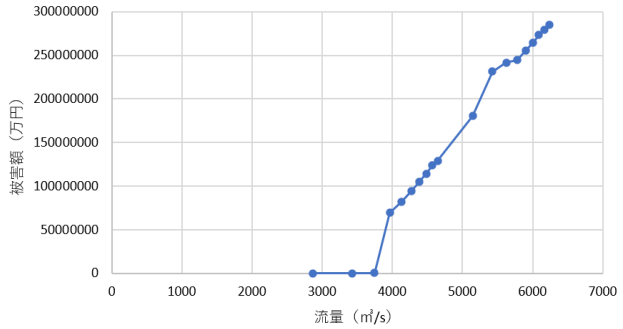



**図 4**　ピーク流量と被害額の関係

流量$q$とその流量が流れた際の破堤箇所の最大水位$h$の関係を表す区分線形関数を以下のように定義する．これは図 3 のように表される．

$$H^{-1}(h) = \begin{cases} q_1 & (h < h_1) \\ q_i + \dfrac{h - h_i}{h_{i+1} - h_i}(q_{i+1} - q_i) & (h_i \le h < h_{i+1}) \\ q_{n-1} + \dfrac{h - h_{n-1}}{h_n - h_{n-1}}(q_n - q_{n-1}) & (h \ge h_n) \end{cases} \quad (5)$$

流量$q$と被害額$D$の関係を表す区分線形関数を以下のように定義する．$d_i$は流量$q_i$の下で破堤が起こった場合の被害額を意味する．これは図 4 のように表される。

$$D(q) = \begin{cases} 0 & (q < q_1) \\ d_i + \dfrac{q - q_i}{q_{i+1} - q_i}(d_{i+1} - d_i) & (q_i \le q < q_{i+1}) \\ d_n + \dfrac{Q - q_{n^D-1}}{q_n - q_{n-1}}(d_n - d_{n-1}) & (q \ge q_n) \end{cases} \quad (6)$$

STEP2　気温がs度上昇した状況に置けるピーク流量$q$の累積分布関数$F(q|s)$の逆関数$\mathrm{F}^{-1}(p|s)$を作成

この関数の作成に当たっては，大規模アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)による 4 度上昇後の足羽川上流端のピーク流量予測データを用いる．本研究では，足羽川と日野川の合流地点を基準に上流に 13,400m 進んだところを上流端と定義する．確率分布を設定するため，$m$個の豪雨の規模を設定する．それぞれの豪雨の規模を$p_1^F$，$p_2^F$，…$p_m^F$とおく．現在の気温（0 度）における規模$p_i^F$の豪雨の下での足羽川上流端のピーク流量を$q_{i,1}^F$で表す．4 度上昇後における規模$p_i^F$の豪雨の下でのピーク流量を$q_{i,2}^F$で表す．$s_1 = 0$，$s_2 = 4$とする．$q_{i,1}^F$と$q_{i,2}^F$は予測データとして得られている．ここで，$s$度上昇後における規模$p_i^F$の豪雨の下での足羽川上流端のピーク流量予測

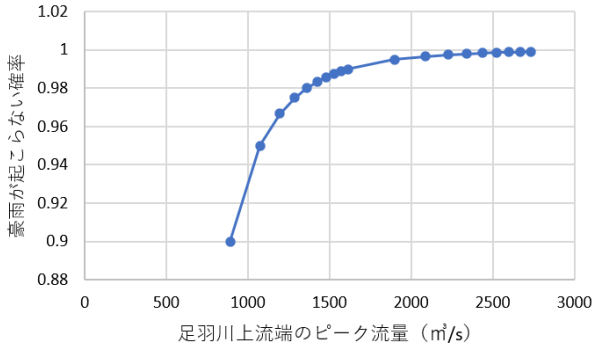



**図 5**　豪雨が起こらない確率とピーク流量の関係

データを$q_i^F(s)$で表す．$q_{i,1}^F$と$q_{i,2}^F$を線形補間することで$s$が 0 と 4 以外のときの$q_i^F(s)$を算出する．例えば$s$が 2 の場合は$q_{i,1}^F$と$q_{i,2}^F$の中点をとることになる．

$$F^{-1}(p|s) = \left[q_i^F(s) + \frac{p - p_i^F}{p_{i+1}^F - p_i^F}\left(q_{i+1}^F(s) - q_i^F(s)\right)\right] * \left(p_i^F \le p < p_{i+1}^F\right) \quad (7)$$

$$q_i^F(s) = \begin{cases} q_{i,1}^F + \dfrac{s - s_1}{s_2 - s_1}\left(q_{i,2}^F - q_{i,1}^F\right) & (s < s_1) \\ q_{i,j}^F + \dfrac{s - s_j}{s_{j+1} - s_j}\left(q_{i,j+1}^F - q_{i,j}^F\right) & \left(s_j \le s < s_{j+1}\right) \\ q_{i,n^S-1}^F + \dfrac{s - s_{n^S-1}}{s_{n^S} - s_{n^S-1}}\left(q_{i,n^S}^F - q_{i,n^S-1}^F\right) & (s \ge s_m) \end{cases} \quad (8)$$

ここで，数式中の文字の定義は以下の通りである．

$p_i^F$: $i$の規模の豪雨が起こらない確率（10 年に 1 度の豪雨であれば 1-1/10=0.9）

$s$: 気温が何度上昇した世界を仮定するか

$q_i^F(s)$: 気温が$s$度上昇した世界で$i$の規模の豪雨が起こった場合の足羽川上流端のピーク流量

STEP3　STEP2 で作成した累積分布関数の傾きを用いることで気温がs度上昇した状況における足羽川上流端のピーク流量$q$の確率密度関数$f(q|s)$を作成

$s = 0$の時の$f(q|0)$は図 5 になる．

$$f(q|s) = \begin{cases} f_1(s) + \dfrac{q - \tilde{q}_1^F(s)}{\tilde{q}_2^F(s) - \tilde{q}_1^F(s)}\left(f_2(s) - f_1(s)\right) & \left(q < \tilde{q}_1^F(s)\right) \\ f_i(s) + \dfrac{q - \tilde{q}_i^F(s)}{\tilde{q}_{i+1}^F(s) - \tilde{q}_i^F(s)}\left(f_{i+1}(s) - f_i(s)\right) & \left(\tilde{q}_i^F(s) \le q < \tilde{q}_{i+1}^F(s)\right) \\ 0 & \left(q \ge \tilde{q}_m^F(s)\right) \end{cases} \quad (9)$$

ただし，$f_i(s)$と$\tilde{q}_i^F$は以下のように定義される．

$$f_i(s) = \begin{cases} \dfrac{p_{i+1}^F - p_i^F}{q_{i+1}^F(s) - q_i^F(s)} & (1 \le i < m) \\ 0 & (i = m) \end{cases} \quad (10)$$

$$\tilde{q}_i^F(s) = \begin{cases} \dfrac{q_i^F(s) + q_{i+1}^F(s)}{2} & (1 \le i < m) \\ \tilde{q}_{n^F}^F(s) & (i = m) \end{cases} \quad (11)$$

STEP4　ある規模の豪雨が起こる確率とそれに対応する

被害額をかけあわせたものを積分することで被害額の期待値を計算する.

$$V(h,s)=\int_{H^{-1}(h)}^{\infty}D(q)f(q|s)dq \qquad (12)$$

ここで, 数式中の文字の定義は以下の通りである.

- $H^{-1}(h)$: 堤防の高さが$h$の場合に破堤が起きる最小のピーク流量
- $D(q)$: 流量$q$の豪雨の下で破堤が起こった場合の被害額

同時に最適な堤防の高さ$h^*$の下で破堤が起こる確率は以下のように算出できる. $h^*$は現状の堤防の高さと嵩上げする高さを足し合わせて算出する.

$$P(h^*,s)=\int_{H^{-1}(h^*)}^{\infty}f(q|s)dq \qquad (13)$$

## 4. 九頭竜川流域への適用結果と考察

### (1) 結果

現在の気温, 全球気温が 4 度上昇後の世界での最適な堤防の高さ$h^*$最適な堤防の高さの下で破堤が起こる確率$P(h^*,s)$堤防嵩上げの適切なタイミング（今すぐもしくは橋梁の耐用年数が過ぎてから）は以下のようになる.

**表-1** 現状の世界と 4 度上昇後の世界の分析結果

| | 現状の世界 | 4 度上昇後の世界 |
|---|---|---|
| $h^*$ | 11. 54m | 12. 56m |
| $P(h^*,s)$ | $4.062*10^{-5}$ | $2.912*10^{-5}$ |
| 堤防嵩上げのタイミング | 今すぐ | 今すぐ |

### (2) 考察

最適な堤防の高さは, 現在の世界であっても, 4 度上昇後の世界であって現状の 9.815m よりも高い結果となった. これは現段階で堤防のかさ上げを行うべきだとする結果を示している. 橋梁の架け替え費用を考慮した上でも同様に今すぐ堤防のかさ上げは行うべきだという結果となった. しかし, 本研究では安全側に立つため最も市街地に近いところに破堤箇所を設定した. そのため, 被害額が多めに見積もられている可能性がある. また, 最適な堤防の高さの下での破堤する確率は現状のものよりも 4 度上昇後の世界の方が小さい結果となったが、予想以上に小さい値となった。その理由として想定しているピーク流量の確率分布の右側の裾が細すぎるためだと考えられる.

## 5. おわりに

### (1) 結論

本研究では, 福井県足羽川を対象に現時点の気温と 4 度上昇後の環境での最適な堤防の高さを予測した. その結果, 確かに現状の気温に比べて 4 度上昇後の世界ではより高い堤防が必要になることが確認された. やはり, 堤防の投資計画を策定する際には気候変動を予測することが必要だといえる. また, 最適な堤防の高さでの破堤確率は 4 度上昇後の世界の方が現状より小さい値となった. 現在は「〇年に 1 度の豪雨に耐え得るような堤防をつくる」といった設計基準が多いが, 必ずしも最適な堤防の高さがこれと一致するとは限らないことを示唆している. しかしながら, 最適な堤防の高さの下での破堤確率は予想以上に小さい値となった. この算出方法については今後改善を試みる.

### (2) 今後の展望

本研究では現時点の気温と 4 度上昇後の世界での最適な堤防投資計画を策定した. しかしながら, 気候変動のシナリオには多大な不確実性があり, この 2 つの状況の分析に限定するのは適切ではないと考えられる. 例えば, 4 度上昇後の世界を想定して堤防投資を行ったが, 実際には気温上昇がほとんど見られなかった場合, 必要以上の対策を行っていることとなり, 経済的ではないといえる. 瀬木ら [3)]はこのような課題に対処するため, リアルオプション分析を用いた柔軟な投資計画の策定を提案している. 今後は, 本研究でもその手法を用いることによって, 気候変動の不確実性を考慮した堤防投資計画の策定を目指したい.

また, 本研究では現在も 4 度上昇後も地価や資産額が変化しないものとして被害額を算出している. しかしながら, 実際は人口減少とともに被害が小さくなるため, 被害額を過大評価している可能性も考えられる. 今後はこういった社会的な変化も考慮して分析を進める余地がある.

## 謝辞

本研究を実施するにあたり, 京都大学防災研究所の佐山敬洋教授から d4PDF によるピーク流量の確率分布のデータや助言を頂いた. ここに記して謝辞を表する.

## 参考文献

1) 環境省 : 気候変動適応計画 （令和 3 年 10 月 22 日 閣議決定） https://www.env.go.jp/content/000138042.pdf
2) 瀬木俊輔, 湧川勝己, 錦織俊之, 小林優輔 : 気候変動の不確実性を考慮した治水施設に対する予算配分の動学的最適化, 土木学会論文集, 78 巻 3 号, pp. 78-92, 2022

3) Carel Eijgenraam, Ruud Brekelmans, Dick den Hertog, Kees Roos : Optimal Strategies for Flood Prevention, MANAGEMENT SCIENCE, Vol.63, pp.1644-1656, 2017
4) 立川康人, 宮脇航平, 田中智大, 萬和明, 加藤雅也, 市川温, キムスンミン：超多数アンサンブル気候予測実験データを用いた極値河川流量の将来変化の分析, 土木学会論文集, 73 巻 3 号, pp. 77-90, 2017
5) 国土数値情報：都道府県地価調査データ第 5.1 版（データ基準年 2023 年）
6) 国土交通省：治水経済調査マニュアル（案）（令和 2 年 4 月）
https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/r204/chisui.pdf
7) 国土技術政策総合研究所：橋梁の架け替えに関する調査結果（IV）2. 調査結果の整理,p40
https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0444pdf/ks044405a.pdf
8) 株式会社日立パワーソリューションズ
水害ソリューション「DioVISTA」
https://www.hitachi-power-solutions.com/service/digital/diovista/index.html