

# 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

瀬木 俊輔<sup>1</sup>・湧川 勝己<sup>2</sup>・錦織 俊之<sup>3</sup>・小林 優輔<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学客員教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)  
E-mail: wakigawa-k@tokencon.co.jp

<sup>3</sup>正会員 工修 株式会社東京建設コンサルタント (〒170-0004 東京都豊島区北大塚 1-15-6)  
E-mail: nishikohri-t@tokencon.co.jp

<sup>4</sup>正会員 工博 無所属  
E-mail: yusuke.kobayashi@gmail.com

地球温暖化の進行に伴い、降雨量や豪雨の頻度が増加することが予測されており、これらに対応するための治水施設の整備が必要とされている。しかし、今後、気候変動がどの程度の速度で進行し、気温が何程度上昇するのかについては、多大な不確実性が存在している。そのため、従来のように降雨量を決め打ちして、治水施設の整備順序を適切に評価することは困難である。本研究は、気候変動の不確実性を考慮したうえで、治水施設に対する予算配分を動的に最適化する問題と、この問題のヒューリスティックな解法を提案する。最適化問題の目的関数としては、期待純便益の割引現在価値と、期間内の総死者数の期待値を考える。本研究はさらに、提案した最適化問題と解法を、日本国内の特定の流域に対して適用し、その有効性を確認する。

**Key Words:** *climate change, flood management, dynamic optimization, budget allocation, real option*

## 1. はじめに

地球温暖化の進行に伴い、降雨量や豪雨の頻度が増加することが予測されており、これらに対応するための治水施設の整備が必要とされている。しかし、今後、気候変動がどの程度の速度で進行し、気温が何程度上昇するのかについては、多大な不確実性が存在している。そのため、従来のように降雨量を決め打ちして、治水施設の整備手順を適切に評価することは困難である。限られた予算を治水施設に対して適切に配分するためには、将来の気温変化と、それに伴う降雨量の増加に関する、あらゆるシナリオを考慮した分析枠組みが必要となる。

本研究はこのような分析枠組みとして、気候変動の不確実性を考慮したうえで、治水施設に対する予算配分を動的に最適化する問題を提案する。この最適化問題は、様々な降雨量と降雨波形を想定して実施された流出解析と氾濫解析の結果を、インプットデータとして利用することにより、降雨量の増加や治水施設の整備と、流域に

生じる洪水の被害の関係をモデル化する。本研究は、この工夫により、現実の流域に適用可能な、実用的な最適化問題を定式化する。最適化問題の目的関数としては、期待純便益の割引現在価値と、期間内の総死者数の期待値を考える。前者の目的関数を用いることにより、効率性を重視した予算配分計画を、後者の目的関数を用いることにより、人命を重視した予算配分計画を求めることができる。

本研究が提案する最適化問題は、厳密に解くことが困難な問題である。そこで本研究は、遺伝的アルゴリズムを応用した、この問題のヒューリスティックな解法も提案する。本研究はさらに、提案した最適化問題と解法を、日本国内の特定の流域に対して適用し、その有効性を確認する。以下、2. では既往研究のレビューと本研究の位置付けを述べる。3. では最適化問題の定式化を行う。4. では最適化問題の解法を提案する。5. では提案した最適化問題と解法を、日本国内の特定の流域に対して適用し、その有効性を確認する。

## 2. 既往研究のレビューと本研究の位置付け

地球温暖化の進行が降雨量に及ぼす影響については、水文学の分野をはじめとして、多くの分野において精力的な研究が行われている。国土交通省国土技術政策総合研究所<sup>7)</sup>は、気候モデルの出力値を用いて、気候変動後の環境における降雨量が、現在の何倍となるのか（降雨量倍率）を、日本全国の各水系について求めている。

「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)」に収録されているモデル出力降雨を用いて、気候変動後の環境における降雨量の確率分布を求める研究も行われている<sup>2,3)</sup>。これらの研究は、気候変動後（例えば気温4度上昇後）の環境における降雨の特性を分析するものであり、将来の気温変化の程度や、気温変化の推移過程に関する不確実性は分析の対象となっていない。そのため、地球温暖化が不確実性を伴いながら進行していく環境の中で、治水施設に対する予算配分をどのように行っていくべきかという問いに対して、直接的な答えを提供するものではない。

気温変化の推移過程の不確実性を踏まえ、治水計画の評価を行う手法も、学術的な研究の分野において関心の対象となっている。その中でも多く使われている手法は、気候変動の推移過程に関する特定のシナリオを決め打ちし、そのシナリオの下で評価を行うものである。例えば、Rojas, et al.<sup>4)</sup>は、気象シミュレーションのアンサンブルデータ、流出・氾濫シミュレーション、流域の土地利用と人口に関するデータ、土地利用形態別の浸水深さ・被害額カーブのデータを総合的に利用し、気候変動が進行する中で水害の被害がどのように増加していくのかを分析している。

近年では、より洗練された評価手法として、リアルオプション分析を採用した研究も存在している<sup>5,7)</sup>。リアルオプション分析とは、将来の環境に不確実性が存在する際に利用される意思決定手法である。この分析は、将来に実現し得るシナリオを網羅的に考慮したうえで、事業投資の適切な実施時期の評価などを行うものである。将来の気候変動の不確実性に対応するためには、最悪のシナリオにも対応可能な治水施設の整備計画を事前に用意し、実際の気候変動のモニタリング状況に合わせて、段階的に治水施設の整備を実行していくことが望ましいと考えられる。リアルオプション分析は、このような治水施設の段階的な整備の手順に関する分析を行う手法として利用できる。

治水計画の分野においては、実用的なリアルオプション分析を行った研究は少なく、ほとんどの研究は仮想的・概念的な分析に留まっている。そのような研究の中で、Kind et al.<sup>6)</sup>と瀬木ら<sup>7)</sup>は実用的な分析を行っている。Kind et al.は、現実的な将来シナリオを設定したうえで、

オランダ・ライン川支流の堤防高の設計にリアルオプション分析を適用している。瀬木ら<sup>7)</sup>は、河道掘削や、ダム・遊水地整備等の様々な治水施設を対象としたリアルオプション分析手法を開発し、日本国内の特定の流域に対して適用している。

以上のリアルオプション分析は、治水施設の整備に使える予算に上限が無い状況を想定している。これは、治水施設の整備に割り当てるべき予算の規範的な金額を検討するうえでは有用な性質である。一方で、予算に上限が存在する環境においては、以上のリアルオプション分析を適用することは困難である。そこで、本研究では、治水施設の整備に使える単年度予算に上限が存在する環境を想定し、気候変動の不確実性下において、治水施設に対する予算配分を動的に最適化する問題を提案する。このような枠組みを用いることにより、より実用的な分析を行うことが可能となる。これが本研究の新規性の一つである。

治水施設の整備に使える予算に上限を設定することは、最適化問題の目的関数の設定を自由に行ううえでも有用である。治水施設の最適整備計画を求める既存研究においては、社会的費用（治水施設の整備費用と洪水の期待被害額の和）の割引現在価値の最小化を目的としたものがほとんどである<sup>8,10)</sup>。このとき、洪水の被害額としては、物的資産の被害額のみが考慮され、洪水による死者数などは考慮されないことが一般的である。これは、人命の価値を金銭の尺度で表現することが困難であるためである。Eijgenraam et al.<sup>9)</sup>は例外的な研究であり、彼らは、洪水により失われる人命の価値や復旧不可能な物的財産の価値を被害額に含めて、堤防の最適な高さを求める最適化問題を分析している。これらの価値は、住民に対するアンケート調査の結果を用いて評価している。このように、CVMのようなアンケート調査手法を用いれば、人命の価値を算出することはできるものの、その数値が適切なものである保証は無い。

最適化問題の目的関数として、将来の総死者数の期待値を用いる場合には、人命の価値の定義が困難であるという問題を回避できる。ただし、この場合には、治水施設の整備に使える予算に上限を設けないと、L2 規模の洪水においても死者数がゼロになるまで、莫大な金額を投じて治水施設を整備することが最適解となり、実用的な治水施設の整備計画は求められない。一方で、予算に上限が存在する場合には、予算の範囲内において、可能な限り人命の損失を抑えるような、治水施設の整備計画を求められる。もちろん、この場合でも、予算の上限を増やせば救える人命が増えるのに、与えられた上限をなぜ受け入れなければいけないのか、という問題は生じる。しかし、人命の価値の特定化が困難である一方で、予算の上限については、現状で採用されている数値が存在す

るという点において、予算の上限を設定した分析は、より実用的であると考えられる。予算の範囲内において、可能な限り人命の損失を抑えるような、治水施設の整備計画を求める最適化問題を提案した研究は、筆者らの知る限り存在せず、この点も本研究の新規性である。

### 3. モデル

#### (1) 気温変化のシナリオ

本研究は、将来の気温変化が従う確率過程の設定に、IPCCの報告書<sup>1)</sup>に掲載されているグラフ（報告書中のFAQ 12.1, Figure 1）から読み取ったデータを利用する。図-1は読み取ったデータをグラフ化したものである。横軸は年、縦軸は気温変化 $s$ (度)である。青いグラフと赤いグラフはそれぞれ、最も気温上昇の低いシナリオ（RCP2.6シナリオ）と、最も気温上昇が高くなるシナリオ（RCP8.5シナリオ）の下での予測モデルの平均値である。本研究では、これらの曲線に挟まれた領域は、将来の気温変化 $s$ の予測の90%信頼区間を表すと仮定する。また、 $s$ の対数値はドリフト付きのランダムウォークに従うと仮定する。

$$\ln s_t = \ln s_{t-1} + \mu_t + \sigma_t \varepsilon_t \quad (1)$$

ここで、 $s_t$ (度)は時点 $t$ における気温変化を表す。 $\mu_t$ と $\sigma_t$ は時点 $t-1$ から時点 $t$ にかけての気温の変化率が従う正規分布 $N(\mu_t, \sigma_t^2)$ のパラメータである。時点の間隔は1年とする。 $\varepsilon_t$ は標準正規分布に従う確率変数である。

式(1)の仮定の下では、時点0において予測される、時点 $t$ の気温の対数値 $\ln s_t$ は正規分布に従う。その期待値 $E_0[\ln s_t]$ と分散 $V_0[\ln s_t]$ はそれぞれ、

$$E_0[\ln s_t] = \ln s_0 + \sum_{\tau=1}^t \mu_\tau \quad (2)$$

$$V_0[\ln s_t] = \sum_{\tau=1}^t \sigma_\tau^2 \quad (3)$$

と表される。 $s_0$ は時点0の気温であり、確定値である。 $E_0[\ln s_t]$ と $V_0[\ln s_t]$ を用いると、時点0において予測される、 $\ln s_t$ の90%信頼区間は、

$$E_0[\ln s_t] - 1.64V_0[\ln s_t] \leq \ln s_t \leq E_0[\ln s_t] + 1.64V_0[\ln s_t] \quad (4)$$

と表せる。本研究は、この信頼区間の下限が $\ln s_t^{2.6}$ を、信頼区間の上限が $\ln s_t^{8.5}$ に一致すると考える。ただし、 $s_t^{2.6}$ と $s_t^{8.5}$ はそれぞれ、RCP2.6シナリオとRCP8.5シナリオの下での時点 $t$ の気温変化(度)である。このとき、式(2)-(4)を用いて、 $\mu_t$ と $\sigma_t$ は以下のように導出できる。

$$\mu_t = \frac{\ln s_t^{2.6} + \ln s_t^{8.5}}{2} - \frac{\ln s_{t-1}^{2.6} + \ln s_{t-1}^{8.5}}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_t^2 = \max[\tilde{\sigma}_t^2, 0] \quad (6)$$

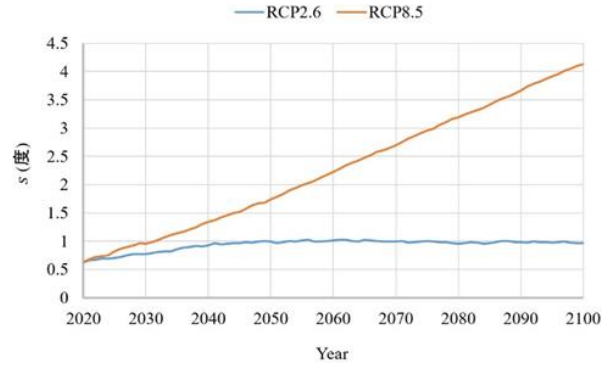


図-1 将来の気温変化のシナリオ

$$\tilde{\sigma}_t^2 = \left[ \frac{\ln s_t^{8.5} - \ln s_t^{2.6}}{2 \cdot 1.64} \right]^2 - a_{t-1} \quad (7)$$

$$a_t = \begin{cases} \left[ \frac{\ln s_t^{8.5} - \ln s_t^{2.6}}{2 \cdot 1.64} \right]^2 & (\tilde{\sigma}_t^2 \geq 0) \\ a_{t-1} & (\tilde{\sigma}_t^2 < 0) \end{cases} \quad (8)$$

$\tilde{\sigma}_t^2$ と $a_t$ は導出の際に使われる補助的な変数である。式(8)は $t \geq 1$ の場合に成立する式であり、 $a_0 = 0$ とする。基本的には、 $[(\ln s_t^{8.5} - \ln s_t^{2.6})(2 \cdot 1.64)]^2$ の時間差分が $\tilde{\sigma}_t^2$ となるが、この差分が負になる時点 $t$ が生じることがある。このような場合には $\tilde{\sigma}_t^2 = 0$ とし、式(8)を用いて差分の計算を繰り返す。

本研究は、現在時点 $t = 0$ を2020年に取り、モデル中の最終時点 $t = T = 80$ を2100年を取る。 $t = 0$ における気温変化 $s_0$ （確定値）は0.63度である。 $t = T$ における気温変化の期待値は2.55度である。

#### (2) 期待純便益の割引現在価値の最小化問題

本節では、最適化問題の目的関数として、期待純便益の割引現在価値を用いる場合のモデルの定式化を行う。ある流域を想定する。この流域における、現在時点では未整備の治水施設を $i = 1, 2, \dots, N_t$ で表す。時点 $t$ において生じる社会的費用 $C_t$ を、以下のように定式化する。

$$C_t = \sum_{i=1}^{N_t} y_{ti} + D_t \quad (9)$$

$y_{ti}$ は、時点 $t$ において治水施設 $i$ の整備に投入される工費である。 $D_t$ は、時点 $t$ において生じる洪水の被害額を表す確率変数である。

時点 $t$ の期首における、治水施設 $i$ の整備の進捗率を表す変数として、変数 $x_{ti}$ を定義する。 $x_{ti}$ は0以上1以下の実数値を取り、 $x_{ti} = 0$ は治水施設が未着工であることを、 $x_{ti} = 1$ は治水施設の整備が完了していることを表す。時点 $t = 0$ の期首における治水施設の整備状況 $x_{0i}$ は確定的に与えられているとする。 $x_{ti}$ は以下の式に従い遷移する。

$$x_{t+1,i} = x_{ti} + \frac{y_{ti}}{c_i} \quad (10)$$

$c_i$ は治水施設*i*の総工費を表す定数である。過去から時点*t*までに投入された工費の総額が $c_i$ に達すると、治水施設*i*の整備が完了する。

時点*t*の1年間の工費 $y_{ti}$ は、以下の制約を満たす必要がある。

$$y_{ti} \leq c_i(1 - x_{ti}) \quad (11)$$

$$y_{ti} \leq \bar{y}_i \quad (12)$$

式(11)は、整備の進捗率 $x_{t+1,i}$ が1を超えないことを表す。式(12)は、1年間に達成可能な工程の量には、物理的な上限が存在し、治水施設*i*の整備には、最低でも $c_i/\bar{y}_i$ 年の期間が必要であることを表す。 $\bar{y}_i$ は定数である。治水施設の整備に使える1年間の予算には、上限 $\bar{Y}$ が設定されている。

$$\sum_{i=1}^{N_I} y_{ti} \leq \bar{Y} \quad (13)$$

$\bar{Y}$ は定数として与えられる。 $y_{ti}$ は式(11)-(13)の制約の範囲内で決定される。

次に、確率変数 $D_t$ が決定される過程を定式化する。 $D_t$ は以下のような過程を経て決定される。まず、時点*t*の年最大降雨量 $R_t$ と、降雨波形 $w_t$ がランダムに決定される。次に、このように決定された降雨量と降雨波形、および、時点*t*における治水施設の整備状況を所与として、流域の被害に関するシミュレーションを行い、 $D_t$ を総被害額として求める。

時点*t*の年最大降雨量 $r_t$ (mm)の決定過程をモデル化する。 $r_t$ が従う確率分布をガンベル分布で表し、その確率密度関数 $\phi$ を以下のように定式化する。

$$\phi(r_t|s_t) = \frac{1}{\eta(s_t)} e^{-\frac{r_t - m(s_t)}{\eta(s_t)}} \exp\left[-e^{-\frac{r_t - m(s_t)}{\eta(s_t)}}\right] \quad (14)$$

$m(s_t)$ と $\eta(s_t)$ はガンベル分布の形状を決定するパラメータであり、時点*t*の気温 $s_t$ に依存する。これらのパラメータを以下のように定式化する。

$$m(s_t) = (1 + us_t)m_{\text{base}} \quad (15)$$

$$\eta(s_t) = (1 + us_t)\eta_{\text{base}} \quad (16)$$

$m_{\text{base}}$ と $\eta_{\text{base}}$ はそれぞれ、気温変化が $s = 0$ の環境における、ガンベル分布のパラメータを表す。 $u$ は定数である。式(15),(16)は、気温が $s$ 度上昇すると、年最大降雨量の期待値と標準偏差が $1 + us$ 倍になることを表している。 $r_t$ は式(14)のガンベル分布に従いランダムに決定される。

時点*t*の降雨波形 $w_t$ の決定過程をモデル化する。 $w_t$ は、あらかじめ設定された $N_w$ 個の降雨波形のうち、いずれかになると考える。降雨波形 $w$  ( $1 \leq w \leq N_w$ ) が実現する ( $w_t = w$ となる) 確率を $p_w$ で表す。 $p_w$ は時間を通じて不変であると考え (現実には、気温変化 $s$ に依存

すると考えられるが、このモデルでは単純化のため、 $s$ に依存しないと考える)。

$r_t$ と $w_t$ がランダムに決定されると、降雨波形 $w_t$ の特定の時間帯の降雨量が定率で拡大・縮小され、この時間帯の降雨量が $r_t$ に一致するような調整がなされる。この拡大・縮小の方法は、実務において流出解析を行う際のものと同じである。このように、 $w_t$ の一部を拡大・縮小して得られた降雨波形の下で、流出解析と氾濫解析を行い、流域の被害に関するシミュレーションを行う。ただし、本研究の最適化問題を解くためには、数多くの状況を想定してシミュレーションを行う必要があるため、流出解析と氾濫解析を厳密に実行することは、計算時間の観点から現実的ではない。そこで、以下では、流出解析と氾濫解析の結果を近似的に評価できるような、簡易なシミュレーションモデルを定式化する。

想定されている河川の破堤の候補地点を、 $j = 1, 2, \dots, N_j$ で表す。地点の番号は、上流の地点が下流の地点に先行するように並べられているとする。後述するように、複数の河川が合流する状況においても、上述の番号の並べ方が満たされていれば、問題なく分析が可能である。時点*t*の地点*j*の上流端におけるピーク流量を $q_{tj}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )で表す。 $q_{tj}$ を以下のように定式化する。

$$q_{tj} = K_j(r_t|w_t) - \sum_{i=1}^{N_I} \Delta_{ij}^X(r_t|w_t)f_i(x_{ti}) - \sum_{j'=1}^{j-1} \Delta_{ij'}^B \quad (17)$$

$K_j(r|w)$ は、全ての治水施設 $i = 1, \dots, N_I$ が未整備の状況において、降雨波形 $w$ と降雨量 $r$ が実現した際の、地点*j*のピーク流量 $q_{tj}$ を評価する関数である。この関数は、各降雨波形 $w$ に対して定義される、区分線形関数(Piecewise linear function)である。この関数は、以下のように設定される。まず、 $N_R$ 通りの降雨量 $r^1, r^2, \dots, r^{N_R}$ を定数として設定する。このとき、 $r^1 < r^2 < \dots < r^{N_R}$ が成立するように設定する。そのうえで、全ての治水施設が未整備の状況を対象として、降雨波形 $w$ と降雨量 $r^k$  ( $1 \leq k \leq N_R$ )の下で流出解析を行い、各地点のピーク流量 $q_j^k$ を求める。すると、 $r - q_j$ 平面上の点 $(r^k, q_j^k)$  ( $1 \leq k \leq N_R$ )が得られる。これらの点の間を直線で結ぶことにより、区分線形関数 $K_j(r|w)$ を得る。なお、 $r < r^1$ の場合には、 $(r^1, q_j^1)$ と $(r^2, q_j^2)$ を結ぶ直線を補外することにより、また、 $r > r^{N_R}$ の場合には、 $(r^{N_R-1}, q_j^{N_R-1})$ と $(r^{N_R}, q_j^{N_R})$ を結ぶ直線を補外することにより、 $K_j(r|w)$ を表現する。補外された直線が負の値になった場合には、値を0に切り上げる。

$\Delta_{ij}^X(r|w)$ は、治水施設*i*の整備による、地点*j*のピーク流量の削減効果を表す区分線形関数である。この関数は、以下のように設定される。治水施設*i*のみが整備され

( $x_i = 1$ )、その他の治水施設は整備されていない状況を考える。この状況の河道を対象として、降雨波形 $w$ と降雨量 $r^k$  ( $1 \leq k \leq N_R$ )の下で流出解析を行い、地点 $j$ のピーク流量を求め、こうして求められた地点 $j$ のピーク流量を $q_j^{k'}$ で表す。すると、降雨量 $r^k$ の下で、治水施設 $i$ が地点 $j$ のピーク流量を削減する効果は、 $(r^k, q_j^k - q_j^{k'})$ と表せる。これらの点の間を直線で結ぶことにより、区分線形関数 $\Delta_{ij}^x(r|w)$ を得る。治水施設 $i$ が河道掘削もしくは堤防の整備である場合には、 $\Delta_{ij}^x(r|w) = 0$ とする。

$f_i(x_i)$ は、治水施設 $i$ の整備の進捗率が $x_i$ のときに、治水施設 $i$ が発揮する効果の大きさを表す関数である。ダムなどの治水施設の場合には、 $f_i(x_i)$ は以下のように表される。

$$f_i(x_i) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x_i < 1) \\ 1 & (x_i = 1) \end{cases} \quad (i \in I_1) \quad (18)$$

これは、治水施設の整備が完了しない限り、治水施設が全く効果を発揮しないことを意味する。一方、河道掘削のような治水施設の場合には、 $f_i(x_i)$ は以下のように表される。

$$f_i(x_i) = x_i \quad (i \in I_2) \quad (19)$$

これは、治水施設の整備が完了していない場合でも、工程の進行に伴い、徐々に治水効果が発現することを意味する。 $I_1, I_2$ はそれぞれ、式(18)と式(19)を採用する治水施設の集合を表す。

治水施設の整備によるピーク流量の削減効果は、線形に足し合わせることが可能であると仮定する。この仮定の下では、式(17)の右辺第二項は、時点 $t$  (の期首)において整備されている治水施設が、地点 $j$ のピーク流量を削減する効果を表す。

$\Delta_{tj}^B$ は、地点 $j'$ で破堤が生じた際に、その下流の地点 $j$ におけるピーク流量が減少する効果を表す。 $\Delta_{tj}^B$ は後に述べる過程を経て、確率的に決定される。

以下では、式(17)に基づき、流域の被害額が決定される過程をモデル化する。まず、 $j = 1$ に設定する。 $j = 1$ の場合、式(17)の右辺第3項は存在しないため、 $r_t$ と $w_t$ を所与として、 $q_{t1}$ は確定的に計算される。

次に、以下の式を用いて、地点 $j$ の堤防の破堤確率 $\pi_{tj}$ が決定される。

$$\pi_{tj} = \begin{cases} 0 & (q_{tj} \leq \tilde{q}_{tj}) \\ \frac{q_{tj} - \tilde{q}_{tj}}{\bar{q}_{tj} - \tilde{q}_{tj}} & (\tilde{q}_{tj} < q_{tj} < \bar{q}_{tj}) \\ 1 & (q_{tj} \geq \bar{q}_{tj}) \end{cases} \quad (20)$$

$\tilde{q}_{tj}$ は、地点 $j$ において破堤が生じる可能性のあるピーク流量の下限値 (氾濫開始流量) であり、 $\bar{q}_{tj}$ は破堤が確実に生じるピーク流量 (堤防満杯流量など) である。

$\tilde{q}_{tj}$ と $\bar{q}_{tj}$ は河道掘削と堤防の整備の影響を受ける。これらの治水施設の整備の影響を、以下の式により表現する。

$$\tilde{q}_{tj} = \tilde{q}_j^{\text{base}} + \sum_{i=1}^{N_I} \tilde{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (21)$$

$$\bar{q}_{tj} = \bar{q}_j^{\text{base}} + \sum_{i=1}^{N_I} \bar{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (22)$$

$\tilde{q}_j^{\text{base}}, \bar{q}_j^{\text{base}}$ はそれぞれ、全ての治水施設が未整備の状況における、 $\tilde{q}_{tj}$ と $\bar{q}_{tj}$ の値である。 $\tilde{h}_{ij}$ は、治水施設 $i$ の整備による $\tilde{q}_{tj}$ と $\bar{q}_{tj}$ の増加効果を表す定数である。治水施設 $i$ が地点 $j$ の堤防もしくは河道掘削である場合には、 $\tilde{q}_{tj}$ と $\bar{q}_{tj}$ が同じ量だけ増えると考え、 $\tilde{h}_{ij} > 0$ とする。それ以外の治水施設については、 $\tilde{h}_{ij} = 0$ とする。

式(20)-(22)により破堤確率 $\pi_{tj}$ が決定されたら、その確率に基づき、破堤の生起がランダムに決定される。

$$b_{tj} = \begin{cases} 0 & (z_{tj} \geq \pi_{tj}) \\ 1 & (z_{tj} < \pi_{tj}) \end{cases} \quad (23)$$

$b_{tj}$ は時刻 $t$ における地点 $j$ の破堤を表す確率変数であり、破堤する場合は1を、破堤しない場合は0を取る。 $z_{tj}$ は一様分布 $U(0,1)$ に従う確率変数である。

地点 $j$ において破堤が生じた際には、以下の式に基づき、その破堤がもたらす被害額 $d_{tj}$ を決定する。

$$d_{tj} = b_{tj} g_j(\hat{q}_{tj}|w_t) \quad (24)$$

$$\hat{q}_{tj} = q_{tj} - \sum_{i=1}^{N_I} \tilde{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (25)$$

$g_j(\hat{q}|w)$ は、地点 $j$ の破堤がもたらす被害額を表す区分線形関数である。被害額 $d_{tj}$ は当該地点のピーク流量の関数として表せると仮定する。ただし、地点 $j$ において河道掘削が行われている場合には、同じピーク流量 $q_{tj}$ の下でも、被害額が減少することを考慮する必要がある。そこで、式(24)のように、治水施設 $i$ が地点 $j$ を含む河道掘削である場合には、治水施設 $i$ の整備により、実質的なピーク流量を表す $\hat{q}_{tj}$ が $\tilde{h}_{ij}$ だけ減少する効果を得られると考える ( $\tilde{h}_{ij} = \bar{h}_{ij}$ とする)。それ以外の治水施設については、 $\tilde{h}_{ij} = 0$ とする。関数 $g_j$ は $\hat{q}_{tj}$ に依存する。関数 $g_j(\hat{q}|w)$ は、以下のように設定される。全ての治水施設が整備されていない状況を考える。この状況の河道を対象として、降雨波形 $w$ と降雨量 $r^k$  ( $1 \leq k \leq N_R$ )の下で流出解析と氾濫解析を行い、地点 $j$ のピーク流量と被害額の組 $(q_j^k, d_j^k)$ を得る。これらの点の間を直線で結ぶことにより、区分線形関数 $g_j(\hat{q}|w)$ を得る。

地点 $j$ において破堤が生じた際には、当該地点から下流のピーク流量が減少する。この効果は以下の式に基づき決定される。

$$\Delta_{tj}^B = b_{tj} L_{jj'}(\hat{q}_{tj}|w_t) \quad (26)$$

$L_{jj'}(\hat{q}|w)$ は、地点 $j$ で破堤が生じた際の、当該地点から下流の地点 $j'$  ( $j' > j$ )におけるピーク流量の減少量を表す関数である。この関数は、以下のように設定される。全ての治水施設が整備されていない状況を考える。この

状況の河道を対象として、降雨波形 $w$ と降雨量 $r^k$  ( $1 \leq k \leq N_R$ )の下で流出解析と氾濫解析を行い、地点 $j$ のピーク流量と、地点 $j$ で破堤が生じた際の地点 $j'$ におけるピーク流量の減少量の組 $(q_j^k, q_j^k - q_{j'}^k)$ を得る。これらの点の間を直線で結ぶことにより、区分線形関数 $L_{jj'}(\hat{q}|w)$ を得る。 $\Delta_{tj}^B$ を導入することにより、上流の破堤のリスクを下げると、下流の破堤のリスクが増す関係を表現できる。複数の河川が合流する状況においては、一部の $(j, j')$ について $L_{jj'}(\hat{q}|w) = 0$ と設定すれば、問題なく分析が可能である（例えば、地点1が合流前の本川に存在し、地点2が合流前の支川に存在する場合には、 $L_{12}(\hat{q}|w) = 0$ となる）。

以上の式(17), (20)-(26)を用いると、 $q_{t1}, \pi_{t1}$ を求めることができ、さらに、 $b_{t1}, d_{t1}, \Delta_{t1}^B$ の値を確率的に決定できる。すると、この結果と式(17), (20)-(26)を用い、今度は、 $j = 2$ の場合について、 $q_{t2}, \pi_{t2}$ を求めることができ、さらに、 $b_{t2}, d_{t2}, \Delta_{t2}^B$ の値を確率的に決定できる。この操作を $j = 3, \dots, N_j$ と繰り返すことにより、全ての地点について、 $d_{tj}$ の値を確率的に決定できる。

全地点の $d_{tj}$ が決定されたら、それらの合計値として $D_t$ を決定する。

$$D_t = \sum_{j=1}^{N_j} d_{tj} \quad (27)$$

以上により、各時点 $t$ において生じる社会的費用 $C_t$ が決定される過程をモデル化した。以上のモデルを前提として、時点 $t = 0$ における、将来の社会的費用の割引現在価値の総和の期待値を、動学的最適化問題の目的関数 $V_0$ として設定する。

$$V_0 = E_0 \left[ \sum_{t=0}^{T-1} \beta^t C_t + \beta^T v_T \right] \quad (28)$$

$\beta$ は割引因子であり、社会的割引率を $\rho$ とするとき、 $\beta = 1/(1 + \rho)$ と表される。動学的最適化問題の決定変数は、各時刻において各治水施設 $i$ の整備に投入される工費 $y_{ti}$ である。 $V_0$ を最小化することは、治水施設の整備から得られる純便益の割引現在価値の期待値を最大化することに等しい。

$v_T$ は時点 $T$ 以降に発生する社会的費用の期待値の、時点 $T$ における割引現在価値を表す。 $v_T$ は以下のように決定される。本研究では、 $t \geq T$ において、気温変化 $s_t$ は時点 $T$ の気温変化 $s_T$ のまま維持され( $s_t = s_T$ )、治水施設の整備状況も、時点 $T$ の期首の状態のまま維持される( $\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_T, \mathbf{y}_t = \mathbf{0}$ )と仮定する。このとき、

$$v_T = \frac{1}{1 - \beta} E_T[D_T] \quad (29)$$

と表せる。

### (3) 期間内の総死者数の期待値の最小化問題

本節では、最適化問題の目的関数として、期間内の総死者数の期待値を用いる場合のモデルの定式化を行う。モデルの大部分は前節と同じであるため、異なる部分のみ定式化を行う。

地点 $j$ において破堤が生じた際には、以下の式に基づき、その破堤がもたらす死者数 $d_{tj}^{\text{cas}}$ を決定する。

$$d_{tj}^{\text{cas}} = b_{tj} g_j^{\text{cas}}(\hat{q}_{tj}|w_t) \quad (30)$$

$g_j^{\text{cas}}(\hat{q}_{tj}|w_t)$ は、地点 $j$ の破堤がもたらす死者数を表す区分線形関数である。この関数は、 $g_j(\hat{q}|w)$ と同様にし、氾濫解析の結果に基づき設定される。

時点 $t$ において生じる洪水による死者数を表す確率変数 $D_t^{\text{cas}}$ は、全地点の $d_{tj}$ の合計値となる。

$$D_t^{\text{cas}} = \sum_{j=1}^{N_j} d_{tj}^{\text{cas}} \quad (31)$$

時点 $t = 0$ から $T - 1$ までの期間内の総死者数の期待値を、動学的最適化問題の目的関数 $V_0^{\text{cas}}$ として設定する。

$$V_0^{\text{cas}} = E_0 \left[ \sum_{t=0}^{T-1} D_t^{\text{cas}} \right] \quad (32)$$

この目的関数は、将来の死者数を割り引かないことを意味している。割引率は金銭に対して適用されるものであり、死者数に割引率を適用する理論的な根拠は存在しないため、このような定式化を採用する。

## 4. 最適化問題の解法

3.で定式化した最適化問題は、一般に多数の状態変数を含むため、動的計画法を適用して問題を解くことは困難である。このような問題の解法は大別して二つ存在する<sup>12)</sup>。一つは強化学習である。もう一つは、決定変数を決める方策 (Policy) を、パラメータを含む形で定式化し、シミュレーションを通じて、このパラメータを最適化する手法 (Parametric optimization) である。両者の適用を試みたところ、Parametric optimizationの方が良好なパフォーマンスを示したため、本研究ではParametric optimizationを採用する。

### (1) 方策の定式化

決定変数を決める方策を、パラメータを含む形で定式化する。問題の構造より、気温変化 $s_t$ が一定の閾値を超えた場合に、治水施設の整備を開始することが効率的となることが予想される。そこで、本研究では、以下のような方策を採用する。まず、時点 $t$ において整備費を投入する治水施設の集合 $\Lambda_t$ を、下記の式に従い決定する。

$$\Lambda_t = \{i | s_t \geq \tilde{s}_i \text{ and } x_{ti} < 1\}$$

$$\cup \{i | i \in I_1 \text{ and } 0 < x_{ti} < 1\} \quad (33)$$

ここで、 $\bar{s}_i$ は治水施設ごとに設定されるパラメータであり、「気温変化 $s_t$ がこの水準以上であれば、治水施設 $i$ に整備費を投入すべきである」ことを示す閾値である。式(33)の1行目は、 $s_t \geq \bar{s}_i$ を満たす治水施設 $i$ のうち、整備の完了していないものが $H_t$ に含まれることを表している。1行目のルールだけでは、気温変化 $s_t$ が減少した場合に、過去に着工した治水施設の整備が停止することが起こり得る。治水施設の整備が完了しない限り、治水効果が全く発揮されない、 $I_1$ に含まれる治水施設の場合には、このような整備の停止は、過去に投入された整備費を無駄にすることに繋がる可能性がある。そこで、 $I_1$ に含まれる治水施設については、一旦着工したら、整備が完了するまで、常に $\Lambda_t$ に含まれると考える。一方、整備工程の進行に伴い、徐々に治水効果が発現するタイプの治水施設 ( $I_2$ に含まれる治水施設) の場合には、整備が停止しても、過去に投入された整備費が無駄になることはないため、2行目のルールは適用しない。

次に、 $\Lambda_t$ に含まれる治水施設に対する、整備費の配分の優先順位を定める。治水施設 $i = 1, \dots, N_t$ に対して、整備の優先順位 $\text{rank}(i)$ を設定する。整備費の配分は、 $\bar{s}_i$ が小さい治水施設を優先して行うものとする。このとき、 $\text{rank}(i)$ は以下の式を満たすように定まる

$$\text{rank}(i) < \text{rank}(i') \Leftrightarrow \bar{s}_i < \bar{s}_{i'} \quad (34)$$

$$\text{rank}(i) \in \{1, 2, \dots, N_t\} \quad (35)$$

このとき、 $y_{ti}$ は以下のように決定される。

$$y_{ti} = \begin{cases} 0 & (i \notin \Lambda_t) \\ \min[c_i(1 - x_{ti}), \bar{y}_{ti}, \bar{Y}_{\text{rank}(i)}] & (i \in \Lambda_t) \end{cases} \quad (36)$$

$$\bar{Y}_1 = \bar{Y} \quad (37)$$

$$\bar{Y}_{l+1} = \bar{Y}_l - y_{t, \text{rank}^{-1}(l)} \quad (38)$$

$\bar{Y}_l$ は、優先順位が $l$ 位の治水施設が利用可能な予算の上限額である。式(37)が示すように、優先順位が1位の治水施設が利用可能な予算の上限額は、年間の予算上限額 $\bar{Y}$ である。式(38)は、優先順位の高いものから順に整備費 $y_{ti}$ が配分されていくことを表す。 $\text{rank}^{-1}(l)$ は $\text{rank}(i)$ の逆写像であり、優先順位が $l$ 位の治水施設の番号 $i$ を表す。式(36)は、治水施設 $i$ の整備費 $y_{ti}$ が、式(11)、(12)の制約と、利用可能な予算 $\bar{Y}_{\text{rank}(i)}$ の制約を満たす範囲内において、最大の値に設定されることを意味する。ただし、治水施設 $i$ が整備費を投入する候補に含まれない場合には、 $y_{ti} = 0$ となる。式(36)-(38)により、整備費の配分を決定できる。

## (2) 目的関数の評価手法

以上で定式化した方策のパラメータは、各治水施設 $i$ に対して定義される気温変化の閾値 $\bar{s}_i$ である。式(28)、(32)の目的関数を最大化するような $\bar{s}_i$ を求めることによ

Input: 関数  $f(\mathbf{x})$ , 変数  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  の定義域  $[\underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}]$ ,  $\mathbf{x}$  の初期値  $\mathbf{x}^{\text{init}}$

Output:  $\min f(\mathbf{x})$  の近似解  $\mathbf{x}^*$

- 1)  $\mathbf{x}^1 \leftarrow \mathbf{x}^{\text{init}}$
- 2) 一様乱数を用い、 $\mathbf{x}^k \in [\underline{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{x}}]$  を満たすベクトルを 99 個生成する ( $2 \leq k \leq 100$ ).
- 3)  $\mathbf{x}^k$  ( $1 \leq k \leq 100$ ) を、 $f(\mathbf{x}^k)$  の値が昇順になるように並べ替える.
- 4)  $g \leftarrow 1$
- 5)  $k' \leftarrow 101$
- 6)  $\mathbf{x}^k$  ( $1 \leq k \leq 100$ ) から 2 つのベクトルを非復元抽出する。その際、 $\mathbf{x}^k$  が抽出される確率を、 $101 - k$  に比例させる.
- 7) 6) で抽出された 2 つのベクトルを交叉させ、新たなベクトルを 2 つ生成し、それらのベクトルに変異を適用する。このようにして生成された 2 つのベクトルを  $\mathbf{x}^{k'}, \mathbf{x}^{k'+1}$  とする.
- 8)  $k' \leftarrow k' + 2$
- 9)  $k' \leq 199$  なら 6) に戻る。そうでなければ 10) に進む.
- 10)  $\mathbf{x}^k$  ( $1 \leq k \leq 200$ ) を、 $f(\mathbf{x}^k)$  の値が昇順になるように並べ替える。その後、 $\mathbf{x}^k$  ( $101 \leq k \leq 200$ ) を削除する.
- 11)  $g \leftarrow g + 1$
- 12)  $g \leq 50$  なら 6) に戻る。そうでなければ  $\mathbf{x}^1$  を  $\mathbf{x}^*$  として返却して終了する.

図-2 実数値の遺伝的アルゴリズム

り、動学的最適化問題を近似的に解くことができる。これが Parametric optimization の考え方である。

目的関数を評価する際には期待値を計算する必要があるが、この期待値の計算を厳密に行うことは不可能である。そこで、モンテカルロ・シミュレーションを用いて、目的関数を近似的に評価する。本研究のモデルに含まれる確率変数は、気温変化 $s_t$ 、年最大降雨量 $r_t$ 、降雨波形 $w_t$ 、そして、破堤の生起に関わる式(23)の $z_{Tj}$ である。これらの確率変数の乱数のサンプルパスを $M$ 本発生させたうえで、目的関数 $V_0, V_0^{\text{cas}}$ を、以下の式に従い評価する。

$$V_0 \approx \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{t=0}^{T-1} \beta^t C_t^m + \beta^T v_T^m \right] \quad (39)$$

$$V_0^{\text{cas}} \approx \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{t=0}^{T-1} D_t^{\text{cas}, m} \right] \quad (40)$$

変数の添え字 $m$  ( $1 \leq m \leq M$ ) は、 $m$  本目の乱数のサンプルパスの下で、その変数を取る値を表す。式(29)により定義される、時点 $T$ 以降に発生する社会的費用の期待値 $v_T$ を評価する際には、1本のサンプルパスにつき、 $D_T$ の実現値を100個生成し（つまり、 $r_T, w_T, z_{Tj}$ の乱数を100組生成し）、その平均値を用いる。

$$v_T^m = \frac{1}{1-\beta} \cdot \frac{1}{100} \sum_{n=1}^{100} D_{T,n}^m \quad (41)$$

$D_{T,n}^m$ は、 $m$ 本目の乱数のサンプルパスの下で生成される、 $n$ 番目 ( $1 \leq n \leq 100$ ) の  $D_T$  の実現値である。  $D_T$  の実現値100個の平均を取る理由は、  $1/(1-\beta)$  を  $v_T^m$  に掛けるため、  $D_T$  の実現値1個のみで評価すると、  $v_T^m$  の分散が大きくなり過ぎるためである。

### (3) 目的関数の最適化手法

式(39), (40)を用いれば、与えられた  $\tilde{s}_i$  の下で、目的関数の評価を行える。ただし、最適化の際に、目的関数の勾配を用いた手法を使うことはできない。なぜなら、式(39), (40)は、  $\tilde{s}_i$  について階段状の関数形を取り、目的関数の勾配はほぼ全ての点でゼロとなるためである。そこで、本研究では、目的関数の勾配を用いない最適化手法として、実数値の遺伝的アルゴリズムを採用する。

遺伝的アルゴリズムの実装には様々な手法が存在するが、本研究では、Yoon and Kim<sup>13)</sup>を参考に、図-2に示す遺伝的アルゴリズムを採用する。図中の変数や関数の名前の意味は、3.で定式化したモデルとは異なることに注意されたい。  $k$  はベクトルの個体番号を表し、  $g$  はアルゴリズムの繰り返し数（世代数）を表している。個体数は100、最終世代数は51に設定している。親を選択する際の選択確率は、個体の目的関数値の順位に応じて設定される。個体の置き換えは、親子の200個体を順位付けし、順位の低い100個体を削除することによって行う。交叉と変異には、図-3に示すアルゴリズムを採用する。図中の2)-4)が交叉を表し、ベクトルの要素ごとに、両親の数値の中間的な数値が、一様分布に従い決定される。5)が変異を表し、ベクトルの要素ごとに、両親の数値の差に依存した大きさのノイズが乗せられる。図-2の7)では、図-3のアルゴリズムを2回用いて、2つの子を生成する。

図-2の遺伝的アルゴリズムを適用する際、目的関数の評価に用いる  $M$  本の乱数のサンプルパスは、固定されなければいけない。サンプルパスを固定しないと、目的関数の評価の度に評価値が大きく変動するため、最適化が進行しない。しかし、サンプルパスを固定すると、最適解はそのサンプルパスのみに適応したものとなり、異なるサンプルパスの下でのパフォーマンスが悪くなる。そこで、本研究では、複数の異なるサンプルパス（の束）の下で最適解を求め、それらの最適解の中央値を取ることで、汎用性のある解を求めることを試みる。平均値ではなく中央値を取る理由は、乱数の分散のために生じる極端な値の影響を減らせるためである。本研究が最適な  $\tilde{s}_i$  を求めるために用いたアルゴリズムを図-4に示す。このアルゴリズムでは、100個の最適解を求め、それらの解の中央値を求めている。

Input: 親となる2つのベクトル  $\mathbf{x}^{p1}, \mathbf{x}^{p2}$   
 Output: 子となる1つのベクトル  $\mathbf{x}^c$

- 1)  $i \leftarrow 1$
- 2)  $m \leftarrow \min[x_i^{p1}, x_i^{p2}]$
- 3)  $M \leftarrow \max[x_i^{p1}, x_i^{p2}]$
- 4)  $x_i^c \leftarrow U(m, M)$
- 5) 25% の確率で  $x_i^c \leftarrow x_i^c + N(0, M - m)$  を実行。
- 6)  $i \leftarrow i + 1$
- 7)  $i \leq n$  なら 2) に戻る。そうでなければ  $\mathbf{x}^c$  を返却

図-3 交叉と変異のアルゴリズム

Input: 3.で定式化した最適化問題のパラメータ、  $\tilde{s}_i$  ( $1 \leq i \leq N_I$ ) の下限と上限  $[\tilde{s}_l, \tilde{s}_u]$ 、乱数のサンプルパスの本数  $M$   
 Output: 最適化問題の解  $\mathbf{s}^* = (\tilde{s}_1^*, \dots, \tilde{s}_{N_I}^*)$

- 1)  $\tilde{s}_i^0 \leftarrow U(\tilde{s}_l, \tilde{s}_u)$  ( $1 \leq i \leq N_I$ ) により  $\mathbf{s}^0$  を得る。
- 2) iter  $\leftarrow 1$
- 3)  $s_t, r_t, w_t, z_{tj}$  の乱数のサンプルパスを  $M$  本発生させる。
- 4) 変数  $\mathbf{s}$  の各要素の定義域を  $[\tilde{s}_l, \tilde{s}_u]$ 、  $\mathbf{s}$  の初期値を  $\mathbf{s}^{\text{iter}-1}$  として遺伝的アルゴリズムを実行し、3)のサンプルパスの下での最適解  $\mathbf{s}^{\text{iter}}$  を得る。
- 5) iter  $\leftarrow$  iter + 1
- 6) iter  $\leq 100$  なら 3) に戻る。そうでなければ 7) に進む。
- 7)  $\tilde{s}_1^1, \tilde{s}_2^1, \dots, \tilde{s}_{N_I}^1$  の中央値を  $\mathbf{s}^*$  として返却して終了。

図-4 最適な  $\tilde{s}_i$  を求めるアルゴリズム

5.でこのアルゴリズムを適用する際には、  $\tilde{s}_i$  ( $1 \leq i \leq N_I$ ) の下限と上限は  $\tilde{s}_l = 0$  (度)、  $\tilde{s}_u = 5$  (度) とし、乱数のサンプルパスの本数は  $M = 1000$  とした。1000本のサンプルパスを100回発生させるため、結果的に、10万本のサンプルパスを考慮して分析を行ったことになる。

図-4のアルゴリズムにより得られる最適解は、  $M \rightarrow \infty$  とすれば真の最適解に収束する。一方で、最適解を求める回数（図-4では100回）を無限大にしても、得られる最適解が真の最適解に収束する保証は無い。例えば、  $f(x) = 0.5ax^2 - x$  という関数があり、  $a$  が必ず正の値を取る確率変数であるときに、  $E[f(x)]$  を最小化する最適化問題を考える。この最適化問題の解は  $1/E[a]$  である。しかし、この最適化問題を解くために、  $M = 1$  として図-4のようなアルゴリズムを適用すると、得られる最適解は  $E[1/a]$  となり、真の最適解とは異なったものになる。このバイアスは  $M$  を一定程度大きくすれば小さくできると考えられる。5.の分析では、  $M = 1000$  のとき、このバイアスは実用上十分に小さいと考えられることを確認する。



### 5. 最適化問題の適用

#### (1) 問題の設定

本研究は、提案した最適化問題と解法を、日本国内のX川流域に適用した。適用に当たり設定した諸条件を以下に整理する。

社会的割引率 $\rho$ には4%を用いた。式(15)、(16)のガンベル分布のパラメータ $m_{base}$ と $\eta_{base}$ は、対象河川の基準地点における、過去50年間の年最大降雨量の実績値に対して、最尤法を適用することにより推定した。降雨量は10通り設定し ( $N_R = 10$ )、それぞれの確率規模は、現状の年最大降雨量の確率分布の下で、1/10, 1/20, 1/30, 1/50, 1/80, 1/100, 1/200, 1/500, 1/1000, L2の水準に設定した。気温 $s$ (度)の上昇は、年最大降雨量を $(1 + 0.05s)$ 倍する効果があるとした ( $u = 0.05$ )。降雨波形には、対象河川の基本高水検討対象洪水の実績降雨ハイトグラフを用い、各降雨波形の実現確率 $p_w$ は全ての波形について等しいとした。

破堤の候補地点は9か所設定した ( $N_j = 9$ )。現状の河道を想定するとき、L2規模の降雨量 $r^{NR}$ が生じ、かつ、ピーク流量を最大化する降雨波形が実現し、かつ、各地点 $j$ で破堤が生じた場合の被害は、表-1のように整理できる。被害額と死者数は有効数字2桁で示している。なお、死者数は避難率が0%である場合の数値である。

現時点において未整備の治水施設として、ダム1ヶ所、遊水地2ヶ所（遊水地A、遊水地B）、河道掘削8区間の合計11施設を考える ( $N_i = 11$ )。各施設に関するパラメータと、各施設が治水効果を及ぼす破堤地点を表-2に整理する。ダムと遊水地は、整備が完了するまで治水効果が得られない一方で、河道掘削は工程の進行に伴い徐々に治水効果が発現すると考えている。 $c_i$ の数値は有効数字1桁で示している。遊水地Bは遊水地Aよりも小規模なものである。 $\bar{y}_i$ は全ての施設について25億円と設定した。ダムと遊水地は全破堤地点に対して治水効果をもたらすのに対して、河道掘削は特定の破堤地点にのみ治水効果をもたらす。

#### (2) 最小化問題の解

式(28)の目的関数 $V_0$ を採用した場合と、式(32)の目的関数 $V_0^{cas}$ を採用した場合のそれぞれについて、最適解 $s_i$ は表-3のようになった。

#### (3) アルゴリズムの収束状況

式(28)の目的関数 $V_0$ を採用した場合について、図-4のiterが1から10までのサンプルパスの下における、遺伝的アルゴリズムの収束状況を図-5に示す。横軸は世代数 $g$ 、縦軸は目的関数値である。51世代目において、目的関数値はほぼ収束していることが確認できる。

表-1 最悪規模の洪水が生じたときの破堤地点別被害

破堤地点 $j$	被害額[億円]	死者数[人]
1	31,000	390
2	17,000	5,700
3	38,000	500
4	15,000	1,000
5	7,300	20
6	13,000	200
7	5,800	30
8	3,000	2
9	6,300	320

表-2 未整備の治水施設の設定

治水施設 $i$	$f_i(x_i)$ 関数形	$c_i$ [億円]	$\bar{y}_i$ [億円]	効果を及ぼす 破堤地点 $j$
ダム	$I_1$	300	25	1-9
遊水地 A	$I_1$	100	25	1-9
遊水地 B	$I_1$	40	25	1-9
区間 1 掘削	$I_2$	90	25	1
区間 2 掘削	$I_2$	200	25	2
区間 3 掘削	$I_2$	20	25	3
区間 4 掘削	$I_2$	50	25	4
区間 5 掘削	$I_2$	20	25	5
区間 6 掘削	$I_2$	60	25	6
区間 7-8 掘削	$I_2$	60	25	7,8
区間 9 掘削	$I_2$	20	25	9

表-3 目的関数別の最適解最適解 $s_i$

治水施設 $i$	$V_0$	$V_0^{cas}$
ダム	3.69	0.58
遊水地 A	2.94	0.72
遊水地 B	1.07	0.65
区間 1 掘削	1.25	0.65
区間 2 掘削	4.47	2.73
区間 3 掘削	0.64	2.22
区間 4 掘削	0.37	0.56
区間 5 掘削	0.44	3.82
区間 6 掘削	1.08	0.34
区間 7-8 掘削	0.79	0.27
区間 8 掘削	0.30	0.66

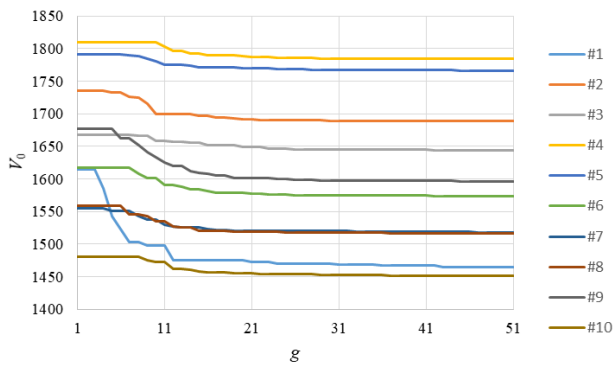


図-5 各サンプルパスの下での遺伝的アルゴリズムの収束状況

謝辞：本研究の遂行に当たり、国土技術研究センター研究開発助成第 19004 号の助成を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 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，No.749，2013.
- 北野利一，高橋倫也，田中茂信：気候モデルから得られる多数のアンサンブルデータを用いた確率降水量の推定法，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.73，No.4，pp.1-6，2017.
- 実河川流域における大量アンサンブル気候予測データに基づく不確実性を考慮した将来気候下での確率雨量，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.74，No.5，pp. 121-126，2018.
- Rojas, R., Feyen, L. and Watkiss, P.: Climate change and river floods in the European Union: Socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation, *Global Environmental Change*, Vol. 23, pp. 1737–1751, 2013.
- Woodward, M., Kapelan, Z. and Gouldby, B.: Adaptive flood risk management under climate change uncertainty using Real Options and optimization, *Risk Analysis*, Vol. 34, No. 1, pp. 75-92, 2014.
- Kind, J. M., Baayen, J. H. and Wouter Botzen, W. J.: Benefits and limitations of real options analysis for the practice of river flood risk management, *Water Resources Research*, Vol. 54, pp. 3018–3036, 2018.
- 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長期的な治水計画に対するリアルオプション分析の適用，河川技術論文集，Vol. 26，pp. 259-264，2020.
- Kind, J. M.: Economically efficient flood protection standards for the Netherlands, *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 7, pp. 103–117, 2014.
- Eijgenraam, C., Kind, J., Bak, C., Brekelmans, R., den Hertog, D., Duits, M., Roos, K., Vermeer, P. and Kuijken, W.: Economically efficient standards to protect the Netherlands against flooding, *Interfaces*, Vol. 44, No. 1, pp. 7–21, 2014.
- Saint-Geours, N., Grelot, F., Bailly, J.-S. and Lavergne, C.: Ranking sources of uncertainty in flood damage modelling: A case study on the cost-benefit analysis of a flood mitigation project in the Orb Delta, France, *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 8, No. 2, pp. 161-176, 2015.
- Collins, M., et al.: Chapter 12: Long - term climate change: Projections, commitments and irreversibility, in Working Group 1 Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report—Climate Change: The Physical Science Basis, 2013.
- Gosavi, A.: *Simulation-Based Optimization - Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning*, Second Edition, Springer, 2015.
- Yoon, Y. and Kim, Y.-H.: The roles of crossover and mutation in real-coded genetic algorithms, In: Gao, S. (Ed.), *Bio-Inspired Computational Algorithms and Their Applications*, InTech, Rijeka, 2012.

(Received March 7, 2021)  
(Accepted ?)

## FORMATTING JAPANESE MANUSCRIPT FOR JOURNALS OF JSCE

Taro DOBOKU, Hanako YOTSUYA and John SMITH

This template is prepared for your preparation of manuscript for JSCE journals. It provides instructions: page layout, font style and size and others. If you replace the relevant text with your own by using “cut & paste,” you can make your manuscript easily. The English ABSTRACT should be justified, leaving a 30 mm margin on the left and right sides. Font should be a 10-point Times-New-Roman. The length should be 300 words or less. It should be placed below the title and authors’ names set in 12 pt, spacing a single line.