

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¹・湧川 勝己²・錦織 俊之³・小林 優輔⁴

¹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

²正会員 工博 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: wakigawa-k@tokencon.co.jp

³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

⁴正会員 工博 大阪大学特任准教授 世界最先端研究機構 (〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-2)
E-mail: y-kobayashi@qiqb.osaka-u.ac.jp

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、過去の降雨量のデータに対する統計解析の結果を用いて、治水施設の適切な整備時期を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学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。本研究はさらに、提案した最適化問題と解法を、日本国内の匿名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 options*

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、過去の降雨量のデータに対する統計解析の結果を用いて、治水施設の適切な整備時期を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学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。これにより、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最適化問題を定式化する。

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その解法を、日本国内の匿名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、総雨量や時空間分布などの降雨特性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⁷⁾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²⁾。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、治水施設の整備の優先順位付け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.⁴⁾は、特定のシナリオの下で、気象シミュレーションのアンサンブルデータを利用し、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。Kind⁹⁾やEijgenraametal.⁶⁾は、気候変動に伴う洪水の生起確率の増加シナリオを決め打ちしたうえで、堤防の高さを動的に最適化問題を定式化し、分析を行っている。

近年では、より洗練された評価手法として、確率的動的最適化問題（あるいはリアルオプション分析、ROA）^{7,8)}の枠組みを採用した研究も存在している⁹⁻¹¹⁾。これらの研究では、将来に実現し得るシナリオを網羅的に考慮したうえで、治水施設の最適な整備時期の評価を行っている。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。確率的動的最適化問題は、このような治水施設の段階的な整備順序に関する分析を行うための枠組みとして利用できる。

治水計画の分野においては、現実の河川を対象にして確率的動的最適化問題を扱った研究は少なく、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.¹⁰⁾と瀬木ら¹¹⁾は、実際の河川を対象に分析を行っている。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を最適化している。瀬木ら⁷⁾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

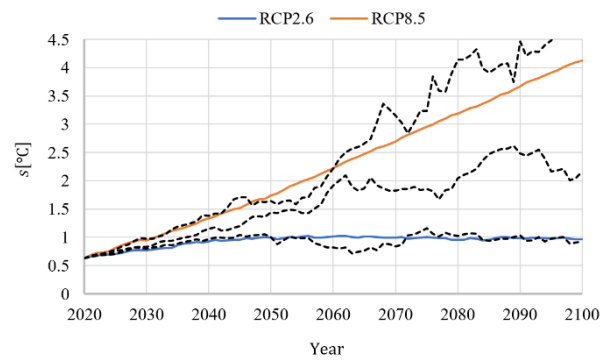


図-1 将来の気温変化のシナリオ

た確率的動的最適化問題を定式化し、日本国内の匿名の流域に対して適用している。

以上の確率的動的最適化問題は、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、以上の研究の枠組みを採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である。

3. モデル

(1) 気温変化のシナリオ

時点 $t = 0, 1, 2, \dots$ のように離散的に表現する。 $t = 0$ は現在時点を表す。 $t = T$ は気温変化のシナリオを考える最終時点を表す。本研究は、 $t = 0$ を2020年に取り、 $t = T = 80$ を2100年に取り。以下では、 $0 \leq t \leq 80$ の気温変化のシナリオをモデル化する。時点0の気温 s_0 は確定しており、外生的に与えられるとする。

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¹²⁾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。読み取ったデータをグラフ化したものが、図-1の青いグラフと赤いグラフである（破線のグラフについては後述する）。横軸は年、縦軸は気温変化 $s[°C]$ 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、最も気温上昇の高いシナリオ（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 [°C]は時点 t における気温変化を表す。 μ_t と σ_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。 μ_t と σ_t の値は時点ごとに異なる。時点の間隔は1年とする。 ε_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、パラメータ μ_t と σ_t の値は以下のようにキャリブレートできる。

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

$$\sigma_t^2 = [\tilde{\sigma}_t^2]_+ \quad (6)$$

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

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

$[x]_+$ は $\max[x, 0]$ を表す記号であり、 x の値が負の場合には0への切り上げを行うことを意味する。 $\tilde{\sigma}_t^2$ 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 σ_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 $\sigma_t^2 = 0$ とし、式(8)を用いて差分の計算を繰り越す。図-1の破線で表された3本のグラフは、以上のようにキャリブレートされた μ_t と σ_t を利用して発生させたサンプルパスの例である。このように、様々な気温変化のシナリオが実現し得るという前提に立つモデルを採用することにより、シナリオを決め打ちしない分析が可能となる。以上の手法を用いると、 $t = T$ における気温変化の期待値は2.55度となる。

(2) 気温変化と降雨量の関係

ある流域を想定する。この流域の基準地点における、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す。ガンベル分布は年最大日降水量に良い適合性を示すことが知られている¹³⁾。分布の確率密度関数 ϕ を以下のように定式化する。

$$\phi(r_t | s_t) = \frac{1}{\eta(s_t)} e^{-\frac{r_t - \theta(s_t)}{\eta(s_t)}} \exp \left[-e^{-\frac{r_t - \theta(s_t)}{\eta(s_t)}} \right] \quad (9)$$

$\theta(s_t)$ 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。

$$\theta(s_t) = (1 + u s_t) \theta_{\text{base}} \quad (10)$$

$$\eta(s_t) = (1 + u s_t) \eta_{\text{base}} \quad (11)$$

θ_{base} と η_{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(10)、(11)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 $1 + u s$ 倍になることを表している。 r_t は式(9)のガンベル分布に従い確率的に決定される。

(3) 複数の降雨波形の考慮

降雨波形としては、あらかじめ設定された N_w 種類のうち、いずれかが実現すると考える。降雨波形 $w \in \{1, \dots, N_w\}$ が実現する確率を 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、本研究は単純化のため、 s に依存しないと考える）。時点 t の降雨波形を w_t で表す。 r_t と w_t が確率的に決定されると、次節で述べる手順に従い、時点 t の水害被害が評価される。

(4) 水害被害の評価方法

本研究の最適化問題を解くためには、降雨量や降雨波形、破堤地点、治水施設の整備状況が異なる極めて多くの状況について、水害の被害を評価する必要がある。しかし、これらの全ての状況について、水文学のモデルに基づく流出解析と氾濫解析を実行することは、計算時間の観点から困難である。そこで本研究では、以下のような手法を用いて、水害の被害を近似的に評価する。まず、最適化問題を分析する前の段階において、降雨量や降雨波形、破堤地点、治水施設の整備状況が異なる複数の条件を設定し、各条件の下で、水文学に基づく流出・氾濫解析を実施しておく。そのうえで、この解析結果を用いて、降雨量・降雨波形とピーク流量の関係など、水害の被害の評価に必要な情報を、区分線形関数(Piecewise linear function)として表現する。そして、最適化問題を分析する際には、この区分線形関数を用いて、様々な状況における水害の被害を近似的に評価する。すなわち、水文学に基づく流出・氾濫解析の結果を補間・補外することにより、水害被害の近似的な評価を行う。

実際の河川を対象とした5.の分析においては、水文学に基づく流出・氾濫解析の手法として、日本の実務において標準的に採用されている手法を採用した。流出モデルには貯留関数法¹⁴⁾を利用し、氾濫解析には洪水浸水想定区域図作成マニュアル¹⁵⁾の手法を用いた。降雨の時空間分布を表す降雨波形には、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た。特定の降雨量に対応する降雨波形は、実績降雨ハイトグラフの特定の時間帯の降雨量を定率で拡大・縮小することによって得た。複数の氾濫ブロック（地区）を設定し、各氾濫ブロックごとに、被害最大となる1地点を破堤地点として設定した。そのうえで、降雨量や降雨波形、破堤地点、治水施設の整備状況が異なる複数の条件を設定し、各条件の下で流出・氾濫解析を実施した。

以下では、水文学に基づく流出・氾濫解析の結果を用いて、特定の降雨量と降雨波形が実現した状況における水害被害を、近似的に評価する方法を説明する。

想定されている氾濫ブロックの数を N_j で表す。氾濫ブロックを添え字 $j \in \{1, 2, \dots, N_j\}$ で表す。河川の左岸と右岸には異なる氾濫ブロックを設定する。各氾濫ブロックは、破堤を起こし得る候補地点（破堤候補地点）を一つのみ有する。氾濫ブロックの番号は、上流のブロックの破堤候補地点が下流のブロックの破堤候補地点に先行するように並べられているとする。

現実には、各ブロックに複数の破堤候補地点が存在しており、右岸のブロックの候補地点と左岸のブロックの候補地点が交互に並ぶような場所も存在する。ただし、本研究では、各ブロックが破堤候補地点を一つのみ有しており、これらの候補地点は上述の条件を満たすように並べられると考える。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分析が可能である。

時点 t のブロック j の破堤候補地点におけるピーク流量を $q_{tj}[\text{m}^3/\text{s}]$ で表す。 q_{tj} を以下の式により評価する。

$$q_{tj} = K_j(r_t|w_t) - \sum_{i=1}^{N_j} \Delta_{ij}^x(r_t|w_t) f_i(x_{ti}) - \sum_{j'=1}^{j-1} \Delta_{tj'}^B \quad (12)$$

$K_j(r|w)$ は、現況（ $t=0$ 期首）の河道において、降雨波形 w と降雨量 r が実現した場合の、ブロック j のピーク流量 q_{tj} を評価する関数であり、水文学に基づく流出解析の結果を用いて構築される。構築の手順は以下の通りである。まず、基準地点における降雨量として、 N_R 通りの水準 r^1, r^2, \dots, r^{N_R} を設定する（5.の分析においては、現状の年最大降雨量の確率分布における確率規模1/10, 1/20, 1/30, 1/50, 1/80, 1/100, 1/200, 1/500, 1/1000, L2の10通りの水準を用いた）。このとき、 $r^1 < r^2 < \dots < r^{N_R}$ が成立す

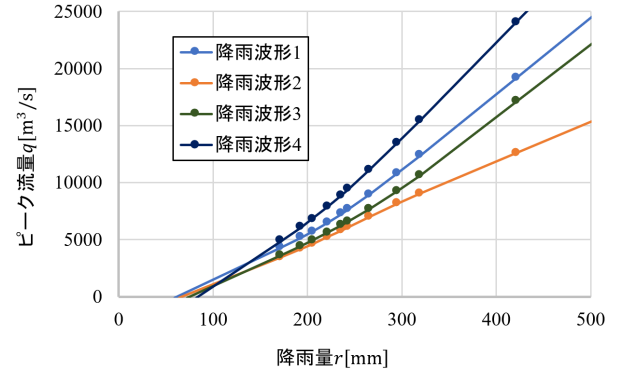


図-2 降雨量とピーク流量の関係を表す区分線形関数の例

るように設定する。そのうえで、現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、水文学に基づく流出解析を行い、各ブロックのピーク流量 q_j^k を求める。この流出解析においては、越水は考慮するものの、破堤は生じないと考える。流出解析の結果として、 r - q_j 平面上の点 $(r^k, q_j^{w,k})$ ($1 \leq k \leq N_R$)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。

$$K_j(r|w) = \text{PL}(\{r^k, q_j^{w,k}\}_{k=1}^{N_R}) \quad (13)$$

ただし、 $\text{PL}(\{x^k, y^k\}_{k=1}^N)$ は、 N 個の点 (x^k, y^k) ($1 \leq k \leq N$)の間を直線で結ぶことにより得られる区分線形関数であり、以下のように定義される。

$$\text{PL}(\{x^k, y^k\}_{k=1}^N) = \begin{cases} \left[y^k + \frac{y^{k+1} - y^k}{x^{k+1} - x^k} \cdot x \right]_+ & (x \in [x^k, x^{k+1}]) \\ \left[y^1 + \frac{y^2 - y^1}{x^2 - x^1} \cdot x \right]_+ & (x \in [0, x^1]) \\ \left[y^{N-1} + \frac{y^N - y^{N-1}}{x^N - x^{N-1}} \cdot x \right]_+ & (x \in [x^N, \infty)) \end{cases} \quad (14)$$

$x < x^1$ の場合には、 (x^1, y^1) と (x^2, y^2) を結ぶ直線を補外する。 $x > x^N$ の場合には、 (x^{N-1}, y^{N-1}) と (x^N, y^N) を結ぶ直線を補外する。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。

図-2に示したグラフは、5.の分析に用いた $K_j(r|w)$ の例である。この図には、降雨量 r と、あるブロックのピーク流量 q の関係を表す区分線形関数 $K_j(r|w)$ のグラフが4本描かれている。各グラフは、特定の降雨波形 w に対応している。グラフ上のマーカーは、水文学に基づく流出解析の結果である (r, q) の組である。

この流域には、現時点では未整備であり、かつ、整備の検討されている治水施設が N_i 件存在する。これらの治水施設を添え字 $i \in \{1, 2, \dots, N_i\}$ で表す。 $\Delta_{ij}^x(r|w)$ は、治水施設 i の整備による、ブロック j のピーク流量の削減効果を評価する関数であり、水文学に基づく流出解析の結果を用いて構築される。構築の手順は以下の通りであ

る。現況の河道に対して、治水施設*i*のみを整備する（その他の治水施設は整備しない）という変更のみを加えた状況を考える。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、水文学に基づく流出解析を行い、降雨量 r^k とブロック*j*のピーク流量の減少量の組 $(r^k, \Delta q_{ij}^{w,k})$ を得る（減少量を計算する際の基準には $q_j^{w,k}$ を用いる）。これらの点の間を直線で結ぶことにより、区分線形関数 $\Delta_i^X(r|w)$ を得る。

$$\Delta_i^X(r|w) = \text{PL} \left(\{r^k, \Delta q_{ij}^{w,k}\}_{k=1}^{N_R} \right) \quad (15)$$

図-3に示したグラフは、5.の分析に用いた $\Delta_i^X(r|w)$ の例である。これらのグラフは、ダムを整備した際の、あるブロックのピーク流量の削減量を表している。グラフに単調増加ではない部分が存在する理由は、ダムの貯水量が容量に達し、異常洪水時防災操作が行われることを表している。

$x_{ti} \in [0,1]$ は、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。 $x_{ti} = 0$ 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。 $f_i(x_i)$ 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。ダムのように、治水施設の整備が完了しない限り、効果が全く発揮されない治水施設の場合には、 $f_i(x_i)$ は以下のように表される。

$$f_i(x_i) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x_i < 1) \\ 1 & (x_i = 1) \end{cases} \quad (i \in I_1) \quad (16)$$

一方、河道掘削のように、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。

$$f_i(x_i) = x_i \quad (i \in I_2) \quad (17)$$

I_1, I_2 はそれぞれ、式(16)と式(17)が適用され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(12)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、ブロック*j*のピーク流量を削減する効果を表す。

$\Delta_{tj'j}^B$ は、ブロック*j'*で破堤が生じた際に、その下流のブロック*j*におけるピーク流量が減少する効果を表す。

$\Delta_{tj'j}^B$ 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(12)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(12)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、ブロック*j*の堤防の破堤確率 π_{tj} が決定される。

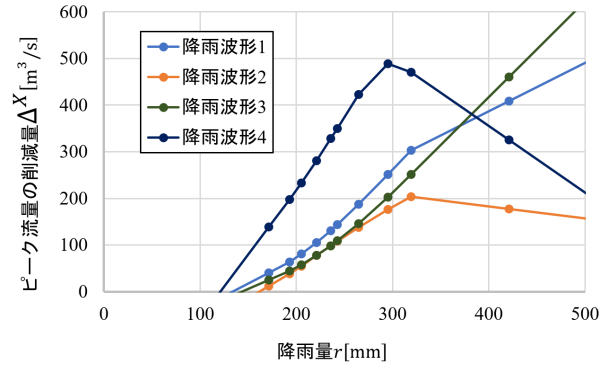


図-3 降雨量とダム整備によるピーク流量の削減効果の関係を表す区分線形関数の例

$$\pi_{tj} = \begin{cases} 0 & (q_{tj} \leq \tilde{q}_{tj}) \\ \frac{q_{tj} - \tilde{q}_{tj}}{\bar{q}_{tj} - \tilde{q}_{tj}} & (\tilde{q}_{tj} < q_{tj} < \bar{q}_{tj}) \\ 1 & (q_{tj} \geq \bar{q}_{tj}) \end{cases} \quad (18)$$

\tilde{q}_{tj} は、ブロック*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。

$$\tilde{q}_{tj} = \tilde{q}_j^{\text{base}} + \sum_{i=1}^{N_I} \tilde{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (19)$$

$$\bar{q}_{tj} = \bar{q}_j^{\text{base}} + \sum_{i=1}^{N_I} \bar{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (20)$$

$\tilde{q}_j^{\text{base}}, \bar{q}_j^{\text{base}}$ はそれぞれ、現況（ $t = 0$ 期首）の \tilde{q}_{0j} と \bar{q}_{0j} 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*がブロック*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(18)-(20)により破堤確率 π_{tj} が決定されると、その確率に基づき、破堤の生起がランダムに決定される。

$$b_{tj} = \begin{cases} 0 & (z_{tj} \geq \pi_{tj}) \\ 1 & (z_{tj} < \pi_{tj}) \end{cases} \quad (21)$$

b_{tj} は時刻*t*におけるブロック*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。

ブロック*j*において破堤が生じると、当該ブロックに被害が生じる。さらに、場合によっては、当該ブロックの下流のブロック*j' > j*にも被害が生じる可能性がある。ブロック*j*において破堤が生じた際に、ブロック*j'* ($j' \geq j$)にもたらす被害額 $d_{tjj'}$ は、以下の式により決定される。

$$d_{tjj'} = b_{tj} g_{jj'}(\hat{q}_{tj} | w_t) \quad (22)$$

$$\hat{q}_{tj} = q_{tj} - \sum_{i=1}^{N_I} \tilde{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (23)$$

$g_{jj'}(\hat{q}|w)$ は、ブロック j の破堤がブロック j' にもたらす被害額を表す区分線形関数である。被害額 $d_{tjj'}$ はブロック j のピーク流量の関数として表せると仮定する。ただし、ブロック 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(23)のように、治水施設 i がブロック 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。

ブロック j において破堤が生じた際には、当該ブロック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。

$$\Delta_{tjj'}^B = b_{tj} L_{jj'}(\hat{q}_{tj}|w_t) \quad (24)$$

$L_{jj'}(\hat{q}|w)$ は、ブロック j で破堤が生じた際の、当該ブロックから下流のブロック j' ($j' > j$)におけるピーク流量の減少量を表す区分線形関数である。 $\Delta_{tjj'}^B$ 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ことを表現できる。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、ブロック1が合流前の本川に存在し、ブロック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)。

関数 $g_{jj'}(\hat{q}|w)$ と $L_{jj'}(\hat{q}|w)$ は、水文学に基づく流出・氾濫解析の結果を用いて構築される。構築の手順は以下の通りである。現況の河道を対象として、降雨波形 w と降雨量 r^k ($1 \leq k \leq N_R$)が生じ、ブロック j の堤防のみが破堤し得るという前提の下で水文学に基づく流出・氾濫解析を行う。この流出・氾濫解析において、ブロック j を除くブロックにおける越水は考慮するものの、破堤は生じないと考える。解析の結果、ブロック j のピーク流量とブロック j' ($j' \geq j$)の被害額の組 $(q_j^{w,k}, d_{jj'}^{w,k})$ 、および、ブロック j のピーク流量とブロック j' ($j' > j$)のピーク流量の減少量の組 $(q_j^{w,k}, \Delta q_{jj'}^{w,k})$ を得る (減少量を計算する際の基準には $q_j^{w,k}$ を用いる)。前者の点の間を直線で結ぶことにより $g_{jj'}(\hat{q}|w)$ を、後者の点の間を直線で結ぶことにより $L_{jj'}(\hat{q}|w)$ を得る。

$$g_{jj'}(\hat{q}|w) = \text{PL} \left(\left\{ q_j^{w,k}, d_{jj'}^{w,k} \right\}_{k=1}^{N_R} \right) \quad (25)$$

$$L_{jj'}(\hat{q}|w) = \text{PL} \left(\left\{ q_j^{w,k}, \Delta q_{jj'}^{w,k} \right\}_{k=1}^{N_R} \right) \quad (26)$$

図4と図5に示したグラフはそれぞれ、5.の分析に用いた $g_{jj'}(\hat{q}|w)$ と $L_{jj'}(\hat{q}|w)$ の例である。 $L_{jj'}(\hat{q}|w)$ のグラフには単調増加ではない部分が存在する。この理由は、堤内側の水位が高くなり、氾濫した水が堤内に流入しにくくなっていることを表している。

以上の式(12), (18)-(26)を用いると、 q_{t1}, π_{t1} を求めることができ、さらに、 $b_{t1}, d_{t1j'} (j' \geq 1), \Delta_{t1j'}^B (j' > 1)$ の

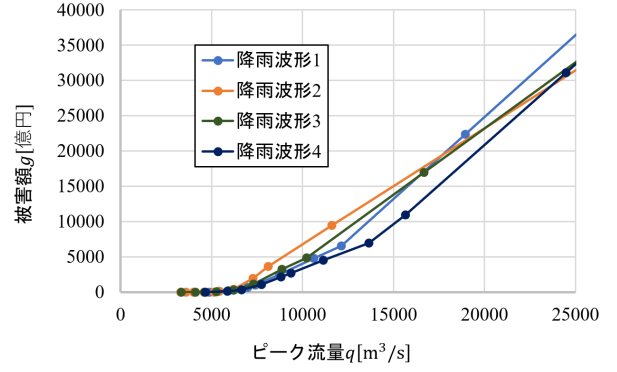


図4 ピーク流量と被害額の関係を表す区分線形関数の例

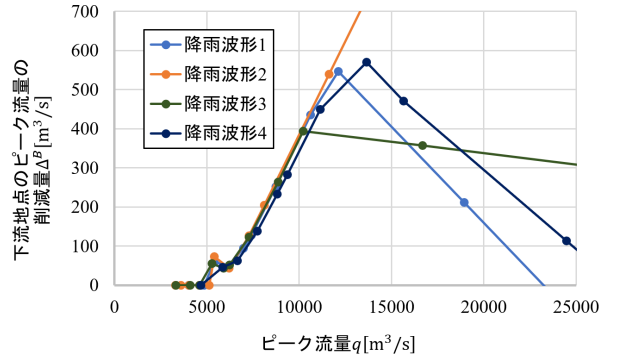


図5 ある地点のピーク流量と破堤時の下流地点のピーク流量の削減効果の関係を表す区分線形関数の例

値を確率的に決定できる。すると、この結果と式(12), (18)-(26)を用い、今度は、 $j = 2$ の場合について、 q_{t2}, π_{t2} を求めることができ、さらに、 $b_{t2}, d_{t2j'} (j' \geq 2), \Delta_{t2j'}^B (j' > 2)$ 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、全てのブロックについて、 $d_{tjj'} (j' \geq j)$ の値を確率的に決定できる。

ブロック j の被害額 d_{tj} は、 $d_{tj'j} (j' \leq j)$ の中で最大の金額として求める。

$$d_{tj} = \max_{j' \leq j} d_{tj'j} \quad (27)$$

この定式化を採用する理由は、複数のブロックで破堤が生じた際に、被害額の二重計上を避けるためである。全ブロックの d_{tj} が決定されたら、時点 t において生じる水害の被害総額 D_t を、それらの合計値として決定する。

$$D_t = \sum_{j=1}^{N_j} d_{tj} \quad (28)$$

以上が、本研究が採用する、特定の降雨量と降雨波形が実現した状況における水害被害を、近似的に評価する方法である。この手法は、水文学に基づく流出・氾濫解析の結果を補間・補外するものであるとは言え、状況によっては、被害額の評価に無視できない誤差をもたらす可能性がある。ただし、治水施設の整備に最適化問題を適用する既存の研究においては、洪水の被害額の評価に

単純な関数を採用することもあることを踏まえると（例えば、Kind⁵⁾やEijgenraam et al.⁶⁾は降雨量や降雨波形などを考慮しない単純な指数関数を採用している）、本研究が採用する手法には一定の合理性があると考えられる。

なお、本節の手法は内水氾濫を考慮していないことを付記しておく。ただし、本節の手法は、水文学に基づく流出・氾濫解析の結果を補間・補外するだけのものであるため、内水氾濫を考慮した氾濫解析の結果があれば、同様の考え方にに基づき、内水氾濫の被害を表現することができると考えられる。

(5) 予算配分と治水施設整備の進捗の関係

時点 t において治水施設 i の整備に投入される工費を y_{ti} で表す。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 x_{ti} は、 y_{ti} に依存して遷移する。

$$x_{t+1,i} = x_{ti} + \frac{y_{ti}}{c_i} \quad (29)$$

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。

$$y_{ti} \leq c_i(1 - x_{ti}) \quad (30)$$

$$y_{ti} \leq \bar{y}_i \quad (31)$$

式(30)は、整備の進捗率 $x_{t+1,i}$ が1を超えないことを表す。式(31)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1年間の工費の上限を表す定数である。

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。

$$\sum_{i=1}^{N_I} y_{ti} \leq \bar{Y} \quad (32)$$

\bar{Y} は定数として与えられる。 y_{ti} は式(30)-(32)の制約の範囲内で決定される。実際の流域を対象に分析を行う際には、当該の流域に割り当てられた年間予算の実績値を基に \bar{Y} を設定することになる。 \bar{Y} の値を無制限に大きく設定すれば、予算制約が無い状況を表現できる。

(6) 目的関数

本研究では、最適化問題の目的関数として、社会的費用の割引現在価値の総和の期待値を用いる。まず、時点 t において生じる社会的費用 C_t を、治水施設の工費と水害の被害総額 D_t の和として定式化する。

$$C_t = \sum_{i=1}^{N_I} y_{ti} + D_t \quad (33)$$

C_t を用いて、時点 $t = 0$ における、社会的費用の割引現

在価値の総和の期待値 V_0 を、以下のように定式化する。

$$V_0 = E_0 \left[\sum_{t=0}^{T+\bar{T}} \beta^t C_t \right] \quad (34)$$

E_t は時点 t の期首に入手可能な情報を用いて期待値を計算する操作を表す。 β は割引因子であり、社会的割引率を ρ とすると、 $\beta = 1/(1 + \rho)$ と表される。 \bar{T} は、目的関数を評価する際に、 $t \geq T$ 以降の何期間を考慮するかを表す定数である。気温変化のシナリオを考慮する最終時点は $t = T$ であるが、この時点以降も治水施設は洪水被害の軽減に役立つため、 C_t ($t \geq T$)も考慮しなければ、治水施設の便益を過少評価してしまう。そこで、 $T \leq t \leq T + \bar{T}$ の期間の C_t を目的関数に含めることにより、過少評価を防止する。 $t \geq T$ において、気温変化 s_t は時点 T の気温変化 s_T のまま維持される ($s_t = s_T, t \geq \bar{T}$) と考える。

本研究は、 V_0 を動学的最適化問題の目的関数として採用する。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。このような目的関数の設定は、他の研究や実務においても見られる一般的なものである。なお、式(34)のように社会的費用の割引現在価値の総和を定義する場合、各時点における社会的費用 C_t はフローとして定義される必要がある。しかし、水害の被害額 D_t の評価には、ストックの毀損額を用いることが一般的であり、本研究においてもこの評価方法を採用する。ストックの毀損額を用いてフローの被害額を評価することは、一定の仮定の下では正当化が可能である。その議論は付録Iに記す。

4. 最適化問題の解法

3で定式化した最適化問題は、多数の状態変数を含むため、動的計画法を適用することや、厳密解を求めることは困難である。このような問題の解法は大別して二つ存在する⁸⁾。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の方が目的関数 V_0 の値を低くできたため、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 Λ_t を、下記の式に従い決定する。

$$\Lambda_t = \{i | s_t \geq \tilde{s}_i \text{ and } x_{ti} < 1\} \cup \{i | i \in I_1 \text{ and } 0 < x_{ti} < 1\} \quad (35)$$

ここで、 \tilde{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(35)の1行目は、 $s_t \geq \tilde{s}_i$ 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治水施設 (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 Λ_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、 Λ_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 $i = 1, \dots, N_I$ 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、 \tilde{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

$$\text{rank}(i) < \text{rank}(i') \Leftrightarrow \tilde{s}_i < \tilde{s}_{i'} \quad (36)$$

$$\text{rank}(i) \in \{1, 2, \dots, N_I\} \quad (37)$$

このとき、 y_{ti} は以下のように決定される。

$$y_{ti} = \begin{cases} 0 & (i \notin \Lambda_t) \\ \min[c_i(1 - x_{ti}), \bar{y}_{ti}, \tilde{Y}_{\text{rank}(i)}] & (i \in \Lambda_t) \end{cases} \quad (38)$$

$$\tilde{Y}_1 = \bar{Y} \quad (39)$$

$$\tilde{Y}_{l+1} = \tilde{Y}_l - y_{t, \text{rank}^{-1}(l)} \quad (40)$$

\tilde{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(39)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(40)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(38)は、治水施設 i の整備費 y_{ti} が、式(30)、(31)の制約と、利用可能な予算 $\tilde{Y}_{\text{rank}(i)}$ 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(38)-(40)により、整備費の配分を決定できる。

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 $\tilde{\mathbf{s}}^* = (\tilde{s}_1^*, \dots, \tilde{s}_{N_I}^*)$

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

図6 最適な \tilde{s}_i を求めるアルゴリズム

(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 \tilde{s}_i である。目的関数 V_0 を最大化するような \tilde{s}_i を求めることにより、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困難である。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(21)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 を、以下の式に従い評価する。

$$V_0 \approx \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left[\sum_{t=0}^{T+\bar{T}} \beta^t C_t^m \right] \quad (41)$$

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、その変数が取る値を表す。

(3) 目的関数の最適化手法

式(41)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(41)の右辺は、 \tilde{s}_i について階段状の不連続な関数形を取り、目的関数の勾配は定義域のほぼ全体において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。採用した遺伝的アルゴリズムの詳細は付録

IIに示す。

遺伝的アルゴリズムを適用して式(41)の右辺を最適化する際、右辺の評価に用いる 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目的関数値が悪くなる。そこで本研究では、以下のような手法を採用する。まず、 M 本のサンプルパスの束を100束生成する（すなわち、合計100 M 本のサンプルパスを生成する）。そのうえで、各束の下で遺伝的アルゴリズムを適用し、100個の最適解を求める。最後に、こ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。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すためである。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-6に示す。

$U(a, b)$ は区間 (a, b) の一様分布に従う乱数を表す。

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)、 $\tilde{s}_u = 7.5$ (度)とし、一束のサンプルパスの本数は $M = 1000$ とした。この場合、10万本のサンプルパスを考慮して分析を行うことになる。

5. 最適化問題の適用結果

(1) 問題の設定

本研究は、提案した最適化問題と解法を、日本国内の匿名の河川である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 ρ には4%を用いた。1年間の予算の上限 \bar{y} には50億円を用いた。式(10), (11)のガンベル分布のパラメータ θ_{base} と η_{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。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 ($u = 0.05$)。この設定は、降雨量が2度上昇で1.1–1.15倍、4度上昇で1.2–1.4倍になるという国土交通省の試算¹⁰⁾に基づいている。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エトグラフを用い、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。

氾濫ブロックは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。被害額は物的資産の被害額を示す。死者数は避難率が0%である場合の数値である。表中の被害額と死者数は有効数字2桁で示されている。

表-1 最悪規模の洪水が生じたときの氾濫ブロック別被害

氾濫ブロック j	被害額[億円]	死者数[人]
1	4,100	110
2	22,000	3,600
3	26,000	4
4	15,000	160
5	7,300	0
6	13,000	1
7	5,700	12
8	3,000	0
9	6,300	160

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 ブロック 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	20	25	1
区間2-3掘削	I_2	60	25	2,3
区間4掘削	I_2	60	25	4
区間5掘削	I_2	20	25	5
区間6掘削	I_2	50	25	6
区間7掘削	I_2	20	25	7
区間8掘削	I_2	200	25	8
区間9掘削	I_2	90	25	9

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氾濫ブロックを表-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。総工費 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。1年間の工費の上限 \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。

4.(4)でも述べたように、水害の被害を近似的に評価するための区分線形関数の作成には、日本の実務において標準的に採用されている流出・氾濫解析の手法を採用した。河道掘削に分類される治水施設 i については、式(19), (20), (23)に含まれる $\bar{h}_{ij}, \tilde{h}_{ij}$ （破堤が生じる流量の増加量）の値を設定する必要がある。この値は、掘削に伴う径深と断面積の増加に伴う流下能力の増加量を、等流計算によって評価することにより設定した。

以下の分析では、水害の被害額の評価手法として、人

命の価値を考慮しない手法と、人命の価値を考慮する手法の二通りを考える。人命の価値を考慮しない手法では、物的資産の被害額のみを水害の被害として考慮する。人命の価値を考慮する手法では、人命の価値を1人当たり10億円と設定し、死者数×10億円を被害額に算入する。このような二通りの評価手法の各々を用いて分析を行うことにより、人命の価値の考慮が分析結果に与える影響に関する感度分析を行う。

(2) アルゴリズムの有効性

本節では、水害の被害額として、人命の価値を考慮しない手法を採用する場合の分析過程を取り上げ、提案したアルゴリズムの有効性を確認する。

図-7は、図-6の繰り返し数が $iter = 1$ のサンプルパスの束の下における、遺伝的アルゴリズムの収束状況を示したものである。横軸は世代数 g 、縦軸は目的関数値である。51世代目までに目的関数値がほぼ収束していることを確認できる。よって、遺伝的アルゴリズムの世代数の設定は適切だと考えられる。

図-8の青い実線は、図-6の繰り返し数 $iter$ が1から100までのサンプルパスの束の下における、目的関数の最適値（図-7に示されたグラフの $g = 51$ における数値に対応する）を示したものである。図-8のオレンジの破線は、図-6のアルゴリズムにより得られた最適解 \mathbf{s}^* を利用して、100万本のサンプルパスの下でシミュレーションを行い、式(41)により求めた V_0 の値（以下では、 V_0^* で表す）の水準である。 V_0^* は1740.8億円である。各繰り返しの100本のサンプルパスの下での最適値は、 V_0^* を中心に変動していることが確認できる。青い実線で表される100個の最適値の平均値（以下では、 \bar{V}_0 で表す）は1721.0億円であり、 V_0^* に近い値となっている。両者の差はサンプルパスの本数に由来している。1000本のサンプルパスを用いて目的関数の評価を行う場合には、サンプルパスに存在する偏りのため、最適解は \mathbf{s}^* とは異なったものになる。例えば、ある1000本のサンプルパスには、たまたま、大規模な洪水をもたらす乱数があまり含まれていなかったとする。このとき、そのサンプルパスの束の下では、治水施設の整備を控えることにより、目的関数値を減らすことができる。 V_0^* と \bar{V}_0 の差が小さいことは、このようなサンプルパスの偏りを利用した、目的関数値の改善の余地が小さいことを表している。よって、一束のサンプルパスの本数 M が最適解 \mathbf{s}^* に及ぼす影響は、 $M = 1000$ のとき、実用上問題の無い大きさであると考えられる。

(3) 分析結果

分析により得られた最適解 \mathbf{s}_i を表-3に示す。「物的資産のみ」と「人命価値含む」の列はそれぞれ、水害の被害額の評価手法として、人命を考慮しない手法と、人命

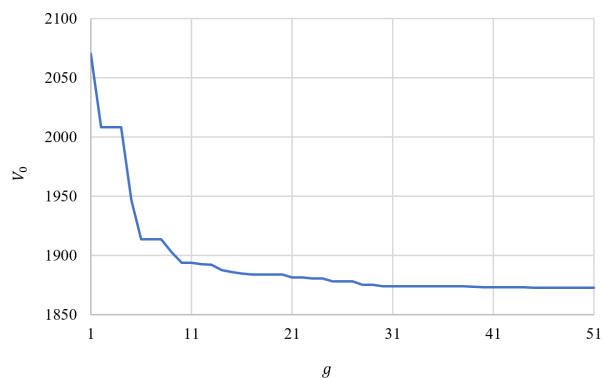


図-7 $iter = 1$ のサンプルパスの束の下での目的関数値の収束状況

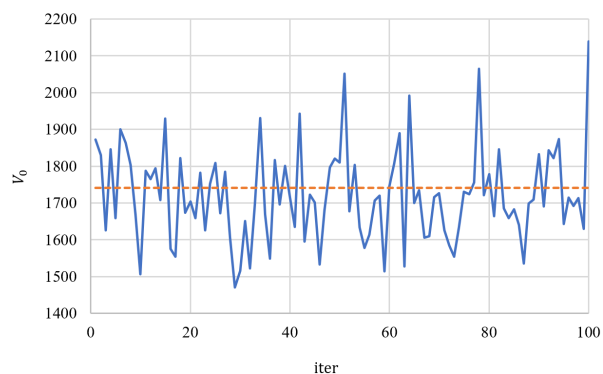


図-8 各サンプルパスの束の下での目的関数の最適値

表-3 最適解 \mathbf{s}_i と目的関数値

治水施設 i	物的資産のみ	人命価値含む
ダム	3.53	3.46
遊水地 A	3.05	2.77
遊水地 B	0.88	0.86
区間 1 掘削	0.30	0.29
区間 2-3 掘削	0.43	0.36
区間 4 掘削	0.98	1.00
区間 5 掘削	0.41	0.43
区間 6 掘削	0.31	0.34
区間 7 掘削	0.64	0.65
区間 8 掘削	5.51	5.41
区間 9 掘削	1.23	0.98
V_0 [億円]	1740.8	1818.2
V_0^{bad} [億円]	2246.1	2379.5

を考慮する手法を採用した場合の最適解を示している。現時点 $t = 0$ における気温変化 s_0 （確定値）は0.63度であるから、 $\mathbf{s}_i \leq 0.63$ である治水施設は、現時点もしくは近い将来において、整備を開始すべきであることを意味している。また、式(36)で定義したように、 \mathbf{s}_i の低い治水施設は、整備の優先順位が高い。例えば、人命を

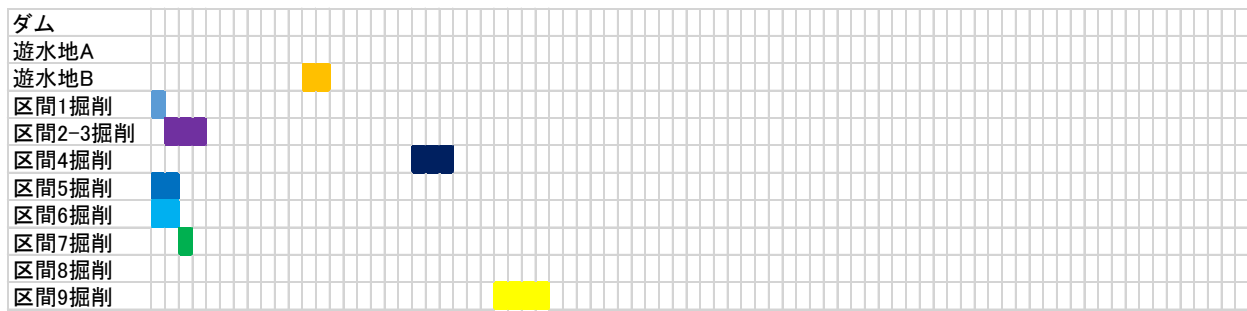


図-9 人命の価値を考慮しない場合の平均シナリオ下の各治水施設の最適整備時期

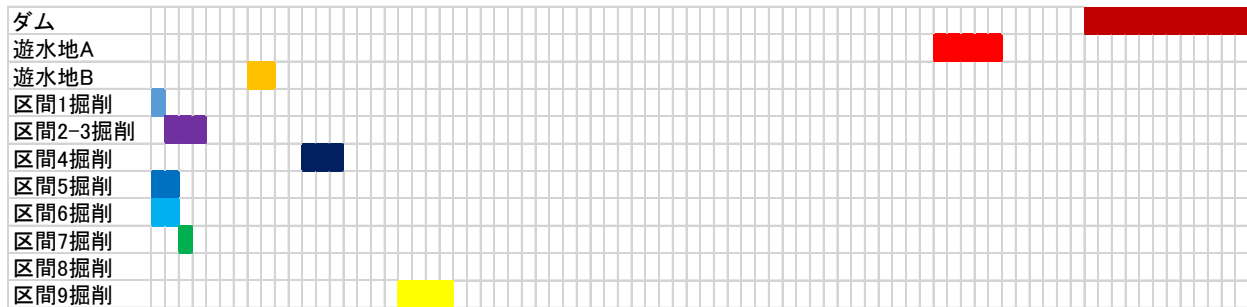


図-10 人命の価値を考慮しない場合の温暖化急速進行シナリオ下の各治水施設の最適整備時期

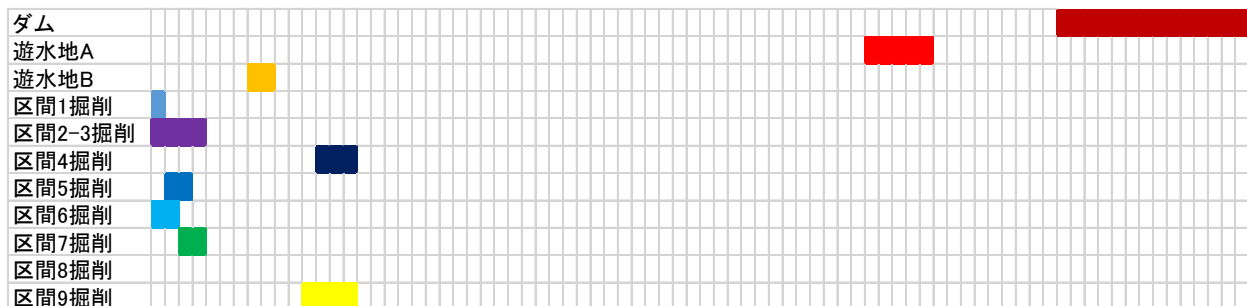


図-11 人命の価値を考慮する場合の温暖化急速進行シナリオ下の各治水施設の最適整備時期

考慮しない手法の場合、時点 $t = 0$ における予算50億円が配分される治水施設は、区間1の掘削（15億円）、区間5の掘削（10億円）、区間6の掘削（25億円）となる。

表-3の「 V_0 [億円]」の行は、最適解を採用した場合の目的関数値を示している。「 V_0^{bad} [億円]」の行は、現在時点以降に、治水施設の整備を一切行わないという、無作為の方策を採用した場合の目的関数値を示している。これらの目的関数値は、100万本のサンプルパスの下でシミュレーションを行うことにより評価している。 V_0 と V_0^{bad} の差は、治水施設の整備を最適に実施することにより得られる純便益の期待値を示している。水害の被害額の評価手法として、人命を考慮しない手法の下での純便益は505.3億円、考慮する手法の下での純便益は561.4億円と評価できる。

治水施設の最適な整備時期は、将来に実現する気温変化に依存したものとなる。この性質を具体的に示すために、気温変化に関する二本のサンプルパスを設定する。

一本目は、図-1に示したRCP2.6シナリオとRCP8.5シナリオの中間の気温変化のサンプルパスであり、平均シナリオと呼ぶ。二本目は、図-1に示したRCP8.5シナリオの気温変化のサンプルパスであり、温暖化急速進行シナリオと呼ぶ。水害の被害額の評価手法として、人命を考慮しない手法を採用する場合、これらの二本のサンプルパスの下で、各治水施設の整備が行われる時期を、図-9、図-10に示す。表の各行は治水施設 i を、各列は時点 t を表す。左の列から右の列に向かって、2020年、2021年、…、2100年を表している。各行の塗りつぶされた枠が、当該治水施設の整備が行われる時点（ $y_{ti} > 0$ となる時点）を表している。温暖化急速進行シナリオの下では、平均シナリオの場合と比較して、より早い時期に遊水地Bの整備と区間4、9の河道掘削が行われていることを確認できる。さらに、平均シナリオの下では、ダムと遊水地Aは整備されないのに対して、温暖化急速進行シナリオの下では、これらの治水施設が2075年以降に整備されるこ

とを確認できる。

このように、本研究の提案する最適化問題とその解法を利用することにより、実際の気候変動のモニタリング状況に合わせた、段階的かつ柔軟な治水施設の整備計画を求めることができる。この最適化問題を解く過程においては、「現段階では、気温が大きく上昇する可能性が低いから、この治水施設にはまだ投資しない方が良い」、あるいは、「気温がこの水準まで上昇してから、この治水施設の整備を開始したのでは遅すぎる」といった比較が暗黙的に行われている。このような比較に基づいて整備計画を導くことが可能であることが、本研究の提案する分析枠組みの有用性である。

図-11 は、水害の被害額の評価手法として、人命を考慮する手法を採用する場合、温暖化急速進行シナリオの下で、各治水施設の整備が行われる時期を示している。

図-10 と比較すると、より早い時期にダム・遊水地 A の整備と、区間 9 の河道掘削が行われていることを確認できる。一方、その他の治水施設の整備時期は、図-10 と図-11 の間に大きい差は無い。この原因は二つあり、第一に、表-1 に示すように、多くの氾濫ブロックにおいては、死者数が少ないため、これらのブロックを保護する河道掘削の便益は、命の価値を考慮してもあまり変わらないことである。第二に、死者が出る状況は、床上浸水を伴うような大規模な洪水の場合に限られるため、気候変動がかなり進行しないと、治水施設が死者数を減らす便益は顕在化しにくいことである。以上のように、本研究が提案する分析枠組みを用いて、人命の価値に関する感度分析を行うことにより、最適解の頑健性を確認できる。これにより、遊水地 A や区間 9 の河道掘削のように、最適整備時期が命の価値に依存する治水施設を特定できる。

6. おわりに

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、現実の流域に適用可能なモデルを提案するとともに、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を提案した。さらに、提案した最適化問題と解法を、日本国内の匿名の流域に対して適用し、その有効性を確認した。

本研究には三つの課題が残されている。第一の課題は、提案した分析枠組みを、複数の流域を対象に適用することである。それにより、複数の流域の間で、治水施設の整備の予算をどのように配分していくべきかを考察することができると考えられる。第二の課題は、分析の内容をより精緻化することである。具体的には、将来の流域

の人口・資産の変化や、治水施設の維持管理・更新費用を考慮することが挙げられる。第三の課題は、決定変数を決める方策を、より複雑な関数形で表現することである。例えば、全ての状態変数を入力とするニューラルネットワークなどを用いることが考えられる。

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。

付録 I 被害額の評価にストックの毀損額を用いることの正当性

(1) フローの被害額とストックの毀損額の関係

被害額の評価にストックの毀損額を用いることは、一定の仮定の下では正当化できる。その仮定とは、資産価値の評価額が、その資産が将来に生み出す付加価値の割引現在価値に等しいことである。

耐用年数が L 、一時点に生み出す付加価値が R の資産を考える。この資産が調達される時点 $t = 0$ の期首、除却される時点 $t = L - 1$ の期末とする。この資産が時点 τ ($0 \leq \tau < L$) 以降に生み出す付加価値の、時点 τ における割引現在価値 S_τ は、

$$S_\tau = \sum_{t=\tau}^{L-1} \beta^{t-\tau} R = \frac{1 - \beta^{L-\tau}}{1 - \beta} \cdot R \quad (42)$$

と表される。ただし、 $\beta = 1/(1 + \rho)$ は社会的割引率 ρ に対応する割引因子である。仮に、この資産の時点 τ における価値の評価額が S_τ に等しいとすれば、この資産が時点 τ (の期首) において失われる損害の社会的費用は、ストックの毀損額 S_τ として表せる。なぜなら、 S_τ はこの資産が失われることによって消失する、将来のフローの価値を表しているからである。

会計上は、資産価値の評価額は、取得価額から減価償却累計額を控除した簿価として表される。これは、資産が将来に生み出す付加価値の割引現在価値とは一般に異なる。しかし、経済学における一般均衡の考え方を用いると、簿価と付加価値の割引現在価値は近い値を取ることが期待される。式(42)において考えた資産の取得価額を A とする。この資産の市場が均衡状態にあると仮定すると、 $S_0 = A$ が成立するように、 A と R の水準が市場メカニズムにより調整されていると考えられる。すなわち、 $S_0 > A$ が成立している状況においては、この資産に対する投資が増加するため、この資産の需要と、この資産が生み出す財・サービスの供給が増加する。これは A の増加と R の減少をもたらす。 $S_0 < A$ が成立している状況においては、逆の現象が生じる。よって、長期的には、 $S_0 = A$ が成立する均衡状態が実現すると考えられる。

この均衡においては、

$$R = \frac{1 - \beta}{1 - \beta^L} \cdot A \quad (43)$$

が成立する。これを式(42)に代入すると、

$$S_\tau = \frac{1 - \beta^{L-\tau}}{1 - \beta^L} \cdot A \quad (44)$$

が成立する。ここで、 $\beta = 1/(1 + \rho)$ とおき、 $\rho \ll 1$ と仮定すると、 $\beta^{L-\tau} \approx 1 - \rho(L - \tau)$ であるため、

$$S_\tau \approx \frac{L - \tau}{L} \cdot A \quad (45)$$

と近似できる。これは資産を定額法により償却する場合の簿価に等しい。すなわち、資産の市場が均衡状態にあると仮定すると、会計上の資産の簿価を用いて、その資産が失われることによって消失するフローの価値を近似的に評価できる。

国土交通省の治水経済調査マニュアル¹⁷⁾においては、資産の被害額の評価に再調達価格（すなわち A ）を用いることとされているため、以上の議論に基づけば、被害額を過大評価することになる。ただし、以上の数式で用いられている耐用年数 L は、資産が調達された時点から、資産が使用に耐えなくなる時点までの、物理的な耐用年数であることに留意する必要がある。会計上の資産の簿価の評価に用いられる法定耐用年数が、物理的な耐用年数より短い場合には、会計上の資産の簿価を用いることは、被害額を過小評価する可能性がある。治水経済調査マニュアルにおける被害額の評価方法は、資産の物理的な耐用年数が非常に長いという仮定を置いた評価方法であると解釈できる。本研究では、適切な耐用年数についての議論は行わず、治水経済調査マニュアルに従って物的資産の被害額を評価した。適切な耐用年数の設定に基づく被害額の評価方法は今後の課題である。

(2) 被害額とストックの復旧時期の関係

前節の議論は「被災した資産の復旧（再調達）をいつ行うべきか、あるいは、復旧を放棄すべきか」という判断とは無関係に成立することに注意されたい。被害額の評価にストックの毀損額を用いる理由は、その資産が将来に生み出していたはずの付加価値の割引現在価値を近似しているからであって、その資産の復旧に要する支出額に等しいからではない。後者の理由を採用すると、資産の復旧を放棄すれば、その資産の被害額はゼロとなるが、これは不合理である。資産が復旧されない場合でも、資産が耐用年数を迎えるまでに生み出していたはずの付加価値（フロー）は失われており、経済的な被害が生じている。式(42)の S_τ は、この失われた付加価値を評価するものである。

被災した資産の復旧時期に依存せずに前節の議論が成立する理由は、 $S_0 = A$ の成立を仮定していることであ

る。この仮定の下では、ある時点において資産の復旧に要する支出額 A は、それ以降に資産が生み出す付加価値 S_0 によって丁度相殺される。よって、復旧時期に依存せず、資産の所有者（公共資本の場合は国民）が得る純便益は変化しない。

(3) $S_0 \neq A$ の場合

$S_0 = A$ が成立しない場合には、被害額の評価にストックの毀損額を用いることは、被害額の過大評価もしくは過小評価をもたらす。このバイアスについて、 $S_0 < A$ の場合と $S_0 > A$ の場合に分けて議論する。

a) $S_0 < A$ の場合

この場合には、式(43),(44)の等号(=)が不等号(<)に置き換えられる。よって、ストックの毀損額(式(44)の右辺)は、フローの被害額 S_τ を過大評価する。過大評価の大きさは式(44)の両辺の差となる。

この場合には、被災後に資産の復旧を行わないことが最適となる。資産の復旧を行うと、資産の所有者が得る純便益は（復旧を行う時点を基準にして） $A - S_0$ だけ減少する。

b) $S_0 > A$ の場合

この事例が該当する資産は、市民の生活再建のために不可欠なインフラなどである。このような資産は、被災後に直ちに復旧することが最適となる。復旧が遅れるほど、資産の所有者が得る純便益は減少する。すなわち、フローの被害額が増加する。

このような資産の所有者は、資産が耐用年数を迎える度に、資産の再調達を行うことが最適となる。この最適な行動を取る所有者が、将来にわたり獲得する純便益を求めよう。時点 $t = 0$ の期首において資産の再調達が行われるとき、次の再調達が行われる時点 $t = L$ までの間に所有者が得る純便益 B は、時点 $t = 0$ を基準にして、

$$B = \sum_{t=0}^{L-1} \beta^t R - A \quad (46)$$

と表せる。この純便益が L 期間ごとに生じるため、所有者が時点 $t = 0$ から無限期間にわたり得る純便益 W は、

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} \beta^{iL} B = \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t R - \sum_{i=0}^{\infty} \beta^{iL} A \quad (47)$$

と表せる。 W は再調達が行われる時点以降に所有者が得る純便益である。一方、時点 $t = \tau$ ($0 \leq \tau < L$)以降に所有者が得る純便益は、時点 $t = \tau$ を基準にして、

$$S_\tau + \beta^{L-\tau} W = \sum_{t=\tau}^{\infty} \beta^{t-\tau} R - \beta^{L-\tau} \sum_{i=0}^{\infty} \beta^{iL} A \quad (48)$$

と表せる。

いま、時点 $t = \tau$ の期首において災害が生じ、この資産が失われたとする。このとき、最適な行動を取る所有

者は、直ちに資産を復旧する。この災害の結果として、所有者が得る純便益は、 $S_t + \beta^{L-\tau}W$ から W に減少する。この減少額は式(48)と式(47)の値の差であるから、

$$S_t + \beta^{L-\tau}W - W = (1 - \beta^{L-\tau}) \sum_{i=0}^{\infty} \beta^{iL} A$$

$$= \frac{1 - \beta^{L-\tau}}{1 - \beta^L} \cdot A \quad (49)$$

と表せる。この結果と式(44)の右辺を比較すると、実は $S_0 > A$ の場合の被害額も、会計上の資産の簿価を用いて評価できることがわかる。

このように、 $S_0 > A$ の場合にも、ストックの毀損額はフローの被害額に一致し得る。ただし、これは、被災後に資産が直ちに復旧されるという前提の下で成り立つ結果であることに留意する必要がある。資産の復旧が遅れば遅れるほど、所有者が得る純便益の減少額は拡大する。よって、資産の復旧が被災後に直ちに行われない場合には、ストックの毀損額はフローの被害額を過小評価することになる。

付録 II 遺伝的アルゴリズムの実装

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 Kim¹⁸⁾を参考に、図-12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。個体が親として選抜される確率は、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-13に示すアルゴリズムを採用する。図中の4)-6)は交叉を表し、ベクトルの要素ごとに、両親の数値の中間的な数値がランダムに決定される。交叉の結果として決定される x_i^{c1}, x_i^{c2} は、 (m, M) の範囲の値を取り、 $|x_i^{c1} - x_i^{c2}| = (M - m)/2$ を満たす。図中の7), 8)は変異を表し、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-12の7)では、図-13のアルゴリズムを用いて、2つの子を生成する。個体別の関数の値 $f(\mathbf{x}^k)$ の計算は、並列化による高速化が可能である。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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

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}^{init}

Output: $\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x})$ 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5)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-12 実数値の遺伝的アルゴリズム

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

Output: 子となる2つのベクトル $\mathbf{x}^{c1}, \mathbf{x}^{c2}$

- 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) $z \leftarrow U(0,1)$
- 5) $x_i^{c1} \leftarrow m + (M - m)z$
- 6) $z < 1/2$ ならば $x_i^{c2} \leftarrow (M + m)/2 + (M - m)z$ を実行する。そうでなければ $x_i^{c2} \leftarrow m + (M - m)(z - 1/2)$ を実行する。
- 7) 25%の確率で $x_i^{c1} \leftarrow x_i^{c1} + N(0, M - m)$ を実行する。
- 8) 25%の確率で $x_i^{c2} \leftarrow x_i^{c2} + N(0, M - m)$ を実行する。
- 9) $i \leftarrow i + 1$
- 10) $i \leq n$ なら2)に戻る。そうでなければ \mathbf{x}^c を返却して終了する。

図-13 交叉と変異のアルゴリズム

- 1) 量の推定法，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.73，No.4，pp.1-6，2017。
- 2) 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.
- 4) 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.
 - 5) Kind, J. M.: Economically efficient flood protection standards for the Netherlands, *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 7, pp. 103–117, 2014.
 - 6) 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.
 - 7) Powell, W. B.: *Approximate Dynamic Programming – Solving the Curse of Dimensionality*, Second Edition, Wiley, 2011.
 - 8) Gosavi, A.: *Simulation-Based Optimization - Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning*, Second Edition, Springer, 2015.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 椎葉充春, 立川康人, 市川温: 水文学・水工計画学, 京都大学学術出版会, 2018.
 - 14) 日本学術会議: 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的評価について, 2011.
 - 15) 国土交通省: 洪水浸水想定区域図作成マニュアル(第4版), 2015
 - 16) 国土交通省: 気候変動の影響について, https://www.mlit.go.jp/river/shin-ngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou_suigai/1/pdf/09_kikouhendounoeikyoku.pdf (2022年3月11日アクセス)
 - 17) 国土交通省: 治水経済調査マニュアル(案), 2020.
 - 18) 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 June 7, 2021)
(Accepted June 3, 2022)

DYNAMIC OPTIMIZATION PROBLEM OF BUDGET ALLOCATION FOR FLOOD CONTROL FACILITIES TAKING ACCOUNT OF CLIMATE CHANGE UNCERTAINTY

Shunsuke SEGI, Katsumi WAKIGAWA, Toshiyuki NISHIKORI and Yusuke KOBAYASHI

It is predicted that the amount of rainfall and the frequency of heavy rainfall will increase as global warming progresses. Therefore, it is necessary to develop flood control facilities to deal with the increase in rainfall. However, there is a great deal of uncertainty about how fast climate change will progress and how much the temperature will rise. Therefore, it is difficult to properly determine the order of construction of flood control facilities by assuming a deterministic magnitude of rainfall. This study proposes a stochastic dynamic optimization problem to control the budget allocation for flood control facilities, taking the uncertainty of climate change into account. This study also proposes a heuristic solution method for the problem. We apply the proposed optimization problem and solution method to a watershed in Japan and confirm its effectiveness.