

メタ概念を導入した治水計画に関する研究

神戸大学 准教授 瀬木 俊輔

概要：

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。以上の背景を踏まえ、本研究は、気候変動の不確実性を考慮した治水施設の整備手順・整備計画に対する、実用的なリアルオプション分析の適用手法を開発した。この分析手法は、将来の気温変化に関するあらゆるシナリオを考慮したうえで、複数の治水施設に対する長期的な予算の配分計画を最適化するものである。最適化問題の目的関数には、純便益の割引現在価値や、計画期間内の総死者数などを用いることができる。本研究は、開発した分析手法を、日本国内の特定の流域に対して適用し、提案手法の有効性を確認した。

キーワード: 気候変動, リアルオプション分析, 事業評価手法, メタ概念

1. 研究の目的

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いる。しかし、現行の治水計画は、従前に想定された規模以下の降雨を対象としているため、降雨量の増加等に対応することが難しい。そこで、将来の気候変動に対応するために、現行の治水計画を転換すること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、治水計画を策定することは困難である。

したがって、今後の治水計画においては、気候変動予測の不確実性を考慮に入れながら、段階的な治水施設の整備や、土地利用規制などのソフトな施策の実施を検討することが不可欠である。そこで本研究は、このような治水計画を実現するための基礎研究として、メタ概念を導入した治水計画の具体的な設計手法について検討し、その考え方の整理と技術的な分析手法の開発を行うことを目的とする。本研究は、メタ概念を導入した治水計画を、「水害の被害軽減策に関するハード・ソフトの施策のオプション（選択枝）を事前に用意し、さらに、それらのオプションの将来時点における実施の可能性に関して、関係主体の社会的合意（メタ合意）を得ること」と定義する。本研究は、メタ概念を導入した治水計画の設計を

行うために、リアルオプション分析（Real options analysis, ROA）を応用した手法を開発する。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などを導出する。

2. 研究の要旨

本研究の研究期間は2019年度と2020年度の2年間である。以下では、2年目の2020年度に実施した研究について報告する。2019年度に構築したリアルオプションモデルには、実践的なモデルとして使用するには課題が残されていた。そこで、より実践的な分析が可能となるように、モデルの拡張を行った。この拡張により可能となった分析を以下に整理する。まず、治水施設の整備主体の予算制約を考慮したうえで、複数の治水施設に対する最適な予算配分計画を求めることが可能となった。次に、予算配分計画を最適化の際の目的関数として、純便益の割引現在価値と、計画期間内の総死者数の期待値の二種類を用いることが可能となった。前者を目的関数に用いる場合には、効率性を重視した予算配分計画を求められ、後者を目的関数に用いる場合には、人命を救うという観点から最も効果的な予算配分計画を求められる。最後に、治水施設別に、「今後の気候変動シナリオとして、

このシナリオを想定する場合には、何年から何年にかけて整備を行うことが望ましい」といった、状況依存的な整備時期を求めることが可能となった。これにより、気候変動のモニタリング状況に合わせた、柔軟な対応が可能な整備計画を作ることができるようになった。

本研究は、開発した分析手法を、日本国内の特定の流域に対して適用することにより、以上に挙げた手法の有効性を確認した。 さらに、以上の成果を踏まえ、メタ合意を得るために実践的モデルの分析結果を活用する方法を考察した。

3. リアルオプションモデルの構築

(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¹⁾に掲載されているグラフから読み取ったデータを利用する。図-1の青いグラフと赤いグラフは、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 [°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。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。図中の破線で表された3本のグラフは、以上の前提の下で発生させた気温変化の s のサンプルパスの例である。

(2) 期待純便益の割引現在価値の最大化問題

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 $i = 1, 2, \dots, N_i$ 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。

$$C_t = \sum_{i=1}^{N_i} y_{ti} + D_t \quad (2)$$

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、

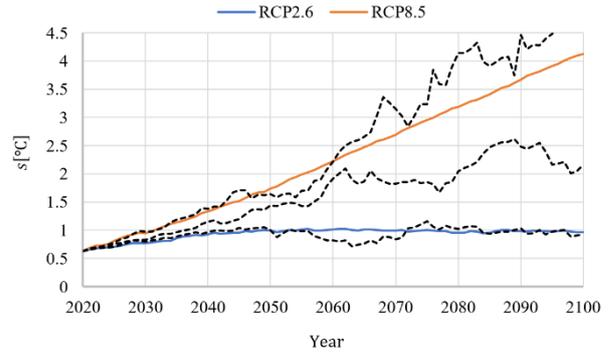


図-1 将来の気温変化のシナリオ

$x_{ti} = 1$ 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。

$$x_{t+1,i} = x_{ti} + \frac{y_{ti}}{c_i} \quad (3)$$

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。

$$y_{ti} \leq c_i(1 - x_{ti}) \quad (4)$$

$$y_{ti} \leq \bar{y}_i \quad (5)$$

式(4)は、整備の進捗率 $x_{t+1,i}$ が1を超えないことを表す。式(5)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。

$$\sum_{i=1}^{N_i} y_{ti} \leq \bar{Y} \quad (6)$$

\bar{Y} は定数として与えられる。 y_{ti} は式(4)-(6)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 ϕ を以下のように定式化する。

$$\phi(r_t | s_t) = \frac{1}{\eta(s_t)} e^{-\frac{r_t - m(s_t)}{\eta(s_t)}} \exp \left[-e^{-\frac{r_t - m(s_t)}{\eta(s_t)}} \right] \quad (7)$$

$m(s_t)$ 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。

$$m(s_t) = (1 + us_t)m_{\text{base}} \quad (8)$$

$$\eta(s_t) = (1 + us_t)\eta_{\text{base}} \quad (9)$$

m_{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(8),(9)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(7)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られる。

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。このような調整がなさ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、本研究のリアルオプションモデルを解くためには、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、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。時点 t の地点 j の上流端におけるピーク流量を q_{tj} [m^3/s] で表す。 q_{tj} を以下のように定式化する。

$$q_{tj} = K_j(r_t|w_t) - \sum_{i=1}^{N_j} \Delta_{ij}^X(r_t|w_t) f_i(x_{ti}) - \sum_{j'=1}^{j-1} \Delta_{tj'}^B \quad (10)$$

$K_j(r|w)$ は、全ての治水施設 $i = 1, \dots, N_j$ 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、区分線形関数である。この区分線形関数の構築には、全ての治水施設が未整備の状況を対象として、各降雨波形の下で行った流出解析の結果を用いる。この関数の具体例を図-2に示す。この図には、ある地点における、降雨量 r とピーク流量 q の関係を表す区分線形関数のグラフが4本描かれている。各グラフは、特定の降雨波形に対応する。グラフ上のマーカーは、流出解析の出力である (r, q) の組である。

$\Delta_{ij}^X(r|w)$ 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、

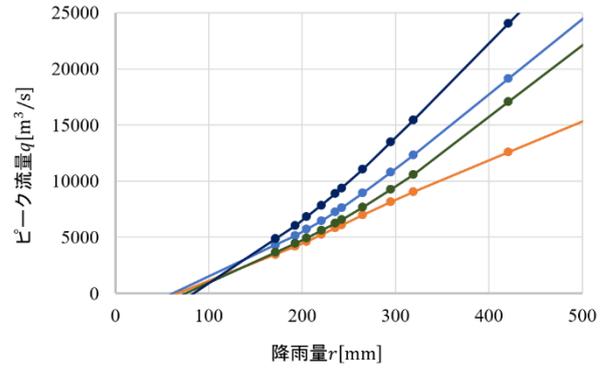


図-2 降雨量とピーク流量の関係を表す関数の例

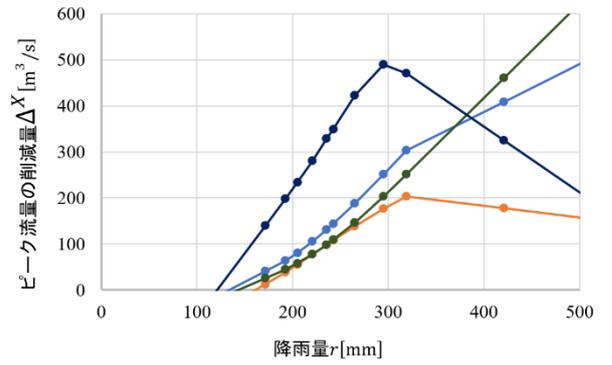


図-3 降雨量とダム整備によるピーク流量の削減量の関係を表す関数の例

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、各降雨波形の下で流出解析を行い、地点別のピーク流量の削減量を求める。この結果を用い、 $\Delta_{ij}^X(r|w)$ を構築する。この関数の具体例を、図-2と同様の様式により図-3に示す。この図には、ある地点における、降雨量 r とダム整備によるピーク流量の削減量の関係を表すグラフが描かれている。

$f_i(x_i)$ 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、 $f_i(x_i)$ は以下のように表される。

$$f_i(x_i) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x_i < 1) \\ 1 & (x_i = 1) \end{cases} \quad (i \in I_1) \quad (11)$$

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、 $f_i(x_i)$ は以下ようになる。

$$f_i(x_i) = x_i \quad (i \in I_2) \quad (12)$$

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(11)と式(12)を採用する治水施設の集合を表す。

$\Delta_{tj'}^B$ 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。 Δ_{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(10)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(10)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 π_{tj} が決定される。

$$\pi_{tj} = \begin{cases} 0 & (q_{tj} \leq \tilde{q}_{tj}) \\ \frac{q_{tj} - \tilde{q}_{tj}}{\bar{q}_{tj} - \tilde{q}_{tj}} & (\tilde{q}_{tj} < q_{tj} < \bar{q}_{tj}) \\ 1 & (q_{tj} \geq \bar{q}_{tj}) \end{cases} \quad (13)$$

\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。

$$\tilde{q}_{tj} = \tilde{q}_j^{\text{base}} + \sum_{i=1}^{N_i} \bar{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (14)$$

$$\bar{q}_{tj} = \bar{q}_j^{\text{base}} + \sum_{i=1}^{N_i} \bar{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (15)$$

$\tilde{q}_j^{\text{base}}$ 、 \bar{q}_j^{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。 \bar{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、 $\bar{h}_{ij} > 0$ とする。それ以外の治水施設については、 $\bar{h}_{ij} = 0$ とする。

式(13)-(15)により破堤確率 π_{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。

$$b_{tj} = \begin{cases} 0 & (z_{tj} \geq \pi_{tj}) \\ 1 & (z_{tj} < \pi_{tj}) \end{cases} \quad (16)$$

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。

$$d_{tj} = b_{tj} g_j(\hat{q}_{tj} | w_t) \quad (17)$$

$$\hat{q}_{tj} = q_{tj} - \sum_{i=1}^{N_i} \bar{h}_{ij} f_i(x_{ti}) \quad (18)$$

$g_j(\hat{q} | w)$ 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(18)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 \bar{h}_{ij} だけ減少する効果を得られると考える

($\bar{h}_{ij} = \bar{h}_{ij}$ とする)。それ以外の治水施設については、 $\bar{h}_{ij} = 0$ 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、各降雨波形の下で流出解析と氾濫解析を行い、地点別のピーク流量と被害額の組を得る。この結果を用い、 $g_j(\hat{q} | w)$ を構築する。

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。

$$\Delta_{tjj'}^B = b_{tj} L_{jj'}(\hat{q}_{tj} | w_t) \quad (19)$$

$L_{jj'}(\hat{q} | w)$ 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、各降雨波形の下で流出解析と氾濫解析を行い、各地点で破堤が生じた際の下流の地点におけるピーク流量の減少量を求める。この結果を用い、 $L_{jj'}(\hat{q} | w)$ を構築する。

以上の式を用いると、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。

$$D_t = \sum_{j=1}^{N_j} d_{tj} \quad (20)$$

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、リアルオプションモデルの目的関数 V_0 として設定する。

$$V_0 = E_0 \left[\sum_{t=0}^{T-1} \beta^t C_t + \beta^T v_T \right] \quad (21)$$

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。 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。動的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。

(3) 期間内の総死者数の最小化問題

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}^{cas} を決定する。

$$d_{tj}^{cas} = b_{tj} g_j^{cas}(\hat{q}_{tj}|w_t) \quad (22)$$

$g_j^{cas}(\hat{q}_{tj}|w_t)$ 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、 $g_j(\hat{q}|w)$ と同様にして、
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^{cas} は、全地点の d_{tj} の合計値となる。

$$D_t^{cas} = \sum_{j=1}^{N_j} d_{tj}^{cas} \quad (23)$$

時点 $t = 0$ から $T - 1$ までの期間内の総死者数の期待
値を、リアルオプションモデルの目的関数 V_0^{cas} として設
定する。

$$V_0^{cas} = E_0 \left[\sum_{t=0}^{T-1} D_t^{cas} \right] \quad (24)$$

4. リアルオプションモデルの適用

(1) 適用事例の設定

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 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。ガンベル分布のパ
ラメータ m_{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

表-1 目的関数別の最適解 s_i

治水施設	V_0 最小化	V_0^{cas} 最小化
ダム	3.78	0.42
遊水地 A	3.02	0.68
遊水地 B	1.14	0.52
区間 1 掘削	1.17	0.54
区間 2 掘削	5.00	2.46
区間 3 掘削	0.63	1.80
区間 4 掘削	0.24	0.47
区間 5 掘削	0.38	3.62
区間 6 掘削	1.10	0.14
区間 7-8 掘削	0.72	0.12
区間 9 掘削	0.23	0.56

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か所を設定した ($N_j = 9$)。

現時点において未整備の治水施設としては、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施設を考えた ($N_I = 11$)。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



図-4 平均シナリオの下で V_0 を最小化する場合の各治水施設の整備時期



図-5 温暖化急速進行シナリオの下で V_0 を最小化する場合の各治水施設の整備時期

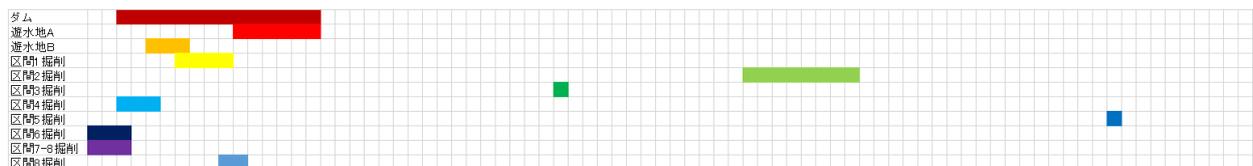


図-6 温暖化急速進行シナリオの下で V_0^{cas} を最小化する場合の各治水施設の整備時期

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。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と考えた。

(2) 分析結果

本研究は、将来の気温変化、各時点の降雨量・降雨波形に関する10万本のサンプルパスを考慮したうえで、目的関数を最適化するような、治水施設に対する予算配分計画を求めた。最適解は、各治水施設に対して求められるパラメータ \bar{s}_i によって表される。これは、「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(21)の目的関数 V_0 を採用した場合と、式(24)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 \bar{s}_i は表-1のようになった。現在時点 $t = 0$ における気温変化 s_0

(確定値)は0.63度であるから、 $\bar{s}_i \leq 0.63$ である治水施設は、現在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。治水施設の最適な整備順序や整備時期は、将来に実現する気温変化に依存したのものとなる。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。 V_0 を最小化する最適解を採用する場合、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-4、図-5に示す。表の各行は治水施設を、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1、6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。

V_0 を最小化する場合と V_0^{cas} を最小化する場合では、最適解が大きく異なる。図-6は、 V_0^{cas} を最小化する最適解

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。総工費の高いダムと遊水地Aは、 V_0 を最小化する場合には、気温がかなり上昇しない限り整備が開始されない。それに対して、 V_0^{cas} を最小化する場合には、近い将来に整備が開始されることを確認できる。この結果は、ダムや遊水地は整備費が高い一方で、人命を救う観点からは効果的であることを示している。このように、予算の上限 \bar{Y} を設定したうえで、目的関数として V_0^{cas} を採用した問題を解くことにより、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ことができる。このような分析手法は、人命を重視した治水施設の整備計画を求めるうえで有用だと考えられる。

5. メタ合意を得るための分析結果の活用方法

以上のようなリアルオプション分析から得られる分析結果は、流域住民の負担となる施策(土地利用規制や住宅移転)に関する社会的合意を得るために活用できると考えられる。リアルオプション分析の枠組みの中では、流域住民の負担となる施策も、治水施設の整備と同様に、オプションの一つとして扱うことができる。そのような施策を考慮したうえでリアルオプション分析を行えば、「気候変動がどの程度進展すると、流域住民の負担となる施策が必要になるのか」を明らかにできる。これにより、早急な合意形成が必要な施策を洗い出したうえで、それらの施策の合意形成に対して重点的に資源を投入するような政策が可能となる。

また、リアルオプション分析を用いれば、以下のような情報提供も可能となる。流域住民の負担となる施策を実施できない場合には、その他の利用可能なオプションを利用し最善を尽くしたとしても、流域に大きい被害が生じるリスクが増す。リアルオプション分析の結果を見れば、このリスクの大きさや、流域住民に生じる不利益を定量的に示すことができる。このような情報提供を通じたコミュニケーションにより、メタ合意の実現を促進できると考えられる。このようなコミュニケーションの具体的な方法については、実践の中で検討していく必要があり、今後の課題である。

参考文献

- 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.