

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

APPLICATION OF REAL OPTIONS ANALYSIS TO LONG-RUN INVESTMENT PLANNING OF FLOOD CONTROL INFRASTRUCTURES UNDER THE UNCERTAINTY OF FUTURE CLIMATE CHANGE

瀬木 俊輔¹・湧川 勝己²・錦織 俊之³・小林 優輔⁴

Shunsuke SEGI, Katsumi WAKIGAWA, Toshiyuki NISHIKORI and Yusuke KOBAYASHI

¹正会員 工博 京都大学助教 大学院工学研究科都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²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)

³正会員 工修 株式会社東京建設コンサルタント 環境防災事業本部
(〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)

⁴正会員 工博 無所属

It is expected that rainfall and frequency of torrential rain will increase in future due to the global warming. Therefore, flood control infrastructures should be developed to deal with the increased future rainfall. However, there is large uncertainty about how fast the global warming progresses and how high temperature increases. Therefore, it is difficult to decide on the level of future rainfall in advance to evaluate the investment projects of flood control infrastructures. With this background, this study proposes a method to apply real options analysis to investment planning of flood control infrastructures under the uncertainty of future climate change. The analysis finds the investment planning which minimizes the expected net present value of the sum of the investment cost and the flood damage, taking account of the all possible future scenarios of temperature change. This study applies the proposed method to assess the investment projects of flood control infrastructures in a river basin of Japan to confirm its validity.

Key Words : *climate change, real option, investment planning, dynamic optimization*

1. 序論

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、降雨量の増加等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、治水施設の適切な整備手順を評価することは難しい。

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・計画に対する、リアルオプション分析 (Real options analysis, ROA) の適用手法を提案する。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の評価などを行うものである。

本研究の提案するリアルオプション分析は、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、純便益の現在価値を最大化するような、治水施設の整備手順を導出する。分析に当たっては、IPCCの報告書に掲載されている将来の気温変化に関するシナリオを利用する。また、貯留関数法を用いた様々な降雨波形に対する流出解析及び氾濫解析の結果から得られる水害被害額を利用し、気温上昇時におけるピーク流量の確率分布や、流域に生じる被害額の期待値をモデル化する。これらの工夫により、実用的なリアルオプション分析手法を開発することが、本研究の目的である。また、本研究は、提案した分析手法を、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する。以下、2. ではリアルオプション分析を治水計画に適用する意義を述べる。

3. ではリアルオプション分析に用いるモデルの定式化を行う。4. では日本国内の特定の流域を対象としてモデルのパラメータのキャリブレーションを行い、2020年から2100年にかけての治水施設の最適な整備手順を求める。5. では結論及び今後の課題を述べる。

2. リアルオプション分析の意義

リアルオプション分析は、主として民間企業による高リスクの事業投資の実施時期の評価に利用されている。また、その他の様々な分野においても活用されており、例えば、高速道路の建設・更新の実施時期の分析や、気候変動下の環境政策の評価などに使われている。

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.³⁾は数少ない実用的な分析を行っている。彼らは、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。ただし、彼らの分析では、堤防以外の治水施設の整備時期は検討されていない。本研究は、堤防整備、河道掘削、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する。

将来の気候変動に不確実性が存在することを踏まえると、リアルオプション分析を治水計画に適用する意義は大きいと考えられる。なぜなら、そのような環境においては、治水施設整備の前提となる基準等も変化していく可能性が高いからである。例えば、「過去の降雨量の観測値を基に、流域の重要性等（被害額）に応じた治水施設の整備を進める」という基準があるとしても、その降雨量に多大な不確実性が含まれるため、特定の降雨量と降雨パターン等を定めることが困難である。さらに、想定される被害額という基準も、適切であり続ける保証は無い。気候変動後の環境では、大きい被害をもたらす洪水の頻度が増加することを踏まえると、観測値に基づく降雨量に対応するだけでは、社会的な要請を満たす治水施設整備にならない可能性がある。

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メニューを事前に用意し、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必要である。リアルオプション分析は、そのような治水施設の整備手順を導出するための手法として利用できる。

リアルオプション分析は、「目的関数（純便益など）を最適化する計画を求める」タイプと、「与えられた基準を達成するための費用を最小化する計画を求める」タイプに大別できる。日本の治水計画の立案プロセスは後者に近い。しかし、本研究では、気候変動後の環境における適切な基準について考察するため、前者のタイプを

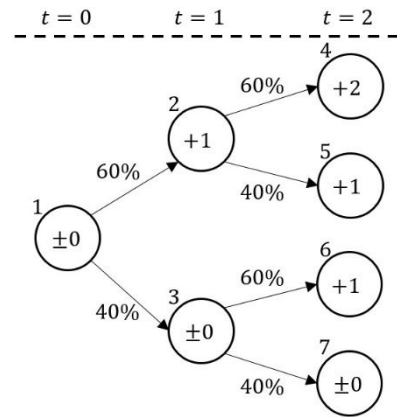


図-1 気温変化のシナリオツリーの一例

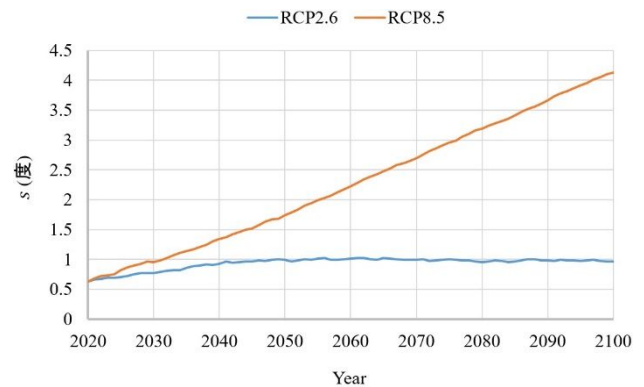


図-2 将来の気温変化のシナリオ

採用する。目的関数には、治水施設整備の純便益（物的資産の被害軽減額と整備費用の差額）の現在価値を利用する。純便益は、このような分析の目的関数として標準的なものである⁴⁾。

3. モデル

(1) 気温変化のシナリオ

リアルオプション分析を行うには、まず、将来の気温変化に関するシナリオツリー (Scenario tree) を作成する必要がある。シナリオツリーとは、将来に想定される多様なシナリオを、時間の経過に伴い枝分かれしていく、樹形図の形式で表現したものである。シナリオツリーの一例を図-1に掲載する。この例では、 $t = 0, 1, 2$ の3時点に関するシナリオを想定している。時点0は現在時点を表し、時点1, 2は将来時点である。シナリオツリー上のノード（図中の丸）は、特定のシナリオにおける、ある時点の気温変化を表している。ノード内の数字は気温変化(度)を表す。ノードの左上に振られている数字はノードの番号である。シナリオツリー上のリンク（図中の矢印）は、シナリオの分岐を表す。リンクに振られている数字は、その分岐が生じる確率を表す。このようなシナリオツリーを利用する利点は、時間の経過とともに、

将来の見通しが良くなることを表現可能なことにある。

本研究は、気温変化のシナリオツリーの作成に、IPCCの報告書⁹⁾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-2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、RCP2.6シナリオと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95%信頼区間を表すと仮定する。また、 s の推移はドリフト付きのランダムウォークに従うと仮定する。

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

ここで、 s_t (度)は時点 t における気温変化を表す。 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量が従う正規分布 $N(\mu_t, \sigma_t^2)$ 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。上述の仮定の下では、 μ_t と σ_t は以下のように導出できる。

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

$$\sigma_t^2 = \left[\frac{s_t^{8.5} - s_t^{2.6}}{2 \cdot \Phi_{norm}^{-1} \left(1 - \frac{0.05}{2} \right)} \right]^2 - \left[\frac{s_{t-1}^{8.5} - s_{t-1}^{2.6}}{2 \cdot \Phi_{norm}^{-1} \left(1 - \frac{0.05}{2} \right)} \right]^2 \quad (3)$$

$s_t^{2.6}$ 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。 Φ_{norm}^{-1} は標準正規分布の累積分布関数の逆関数である。式(1), (2), (3)を用いると、シナリオツリー上の各リンクが実現する確率を計算できる。例えば、時点 $t-1$ から t にかけての気温の変化量が、 $+1$, $+0.5$, ± 0 のいずれかになるようなシナリオツリーを作成する場合、 $+0.5$ のリンクが実現する確率は、 $s_t - s_{t-1}$ が 0.25 以上 0.75 以下になる確率として表せば良い。

本研究は、シナリオツリーの作成に当たって、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) ノード別の費用の定式化

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。これらの治水施設の整備手順を最適化するリアルオプションモデルを構築する。シナリオツリー上の各ノードにおいて生じる社会的費用（社会全体に生じる費用の総計）を、以下のように定式化する。

$$C_n = \beta^{t(n)} \left[\sum_{i=1}^{N_I} c_i y_{ni} + ED_{t(n)}(\mathbf{x}_n, s_n) \right] \quad (4)$$

n はノードの番号を表す添え字である。図-1の例ではノードが7つあるため、 $1 \leq n \leq 7$ となる。 C_n はノード n において生じる社会的費用である。 $t(n)$ はノード n の存在する時点である。図-1の例では、 $t(2)=1$, $t(4)=2$ である。 β は、社会的割引率 ρ を用いて、 $1/(1+\rho)$ と表される定数である。

式(4)の[]内の第1項は治水施設の整備費用を表し、第2項は流域に生じる被害額の期待値を表す。 y_{ni} はノード n における治水施設 i の整備の実施を表す二値変数であり、実施する場合は1に、実施しない場合は0になる。 c_i (億円)は治水施設 i の整備費用を表す定数である。 \mathbf{x}_n は $x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nN_I}$ を並べたベクトルである。 x_{ni} はノード n における治水施設の存在の有無を表す二値変数であり、治水施設が存在する場合は1に、存在しない場合は0になる。 x_{ni} は、以下の式に従い変化する。

$$x_{ni} = x_{a(n),i} + y_{ni} \quad (5)$$

$$x_{ni} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

$a(n)$ はノード n の親ノードの番号を表す。図-1の例では、 $a(2)=1$, $a(4)=2$ である。 $x_{ni}=1$ となるのは、ノード n において整備を実施する($y_{ni}=1$)場合、もしくは、ノード n よりも前の時点において既に整備が実施されている場合($x_{a(n),i}=1$)となる。現実には、整備を決定してから整備完了までには時間がかかるが、本研究では定式化の単純化のため、整備は瞬間的に終わると考える。ノード1（現在時点）よりも前の時点では治水施設は未整備($x_{a(1),i}=0$)である。

s_n (度)はノード n における気温変化を表す。関数 $ED_{t(n)}$ は、時点 $t(n)$ において、治水施設の整備状況が \mathbf{x}_n であり、かつ、気温変化が s_n 度のときに、ノード n において生じる洪水の被害額(億円)の期待値である。

関数 ED は以下のように定式化する。想定されている流域に存在する居住地のブロックを、 $r=1, 2, \dots, N_R$ で表す。ブロック r の堤防が破堤して浸水が生じた際に生じる被害額 D_r (億円)を、以下のように関数として表す。

$$D_r(\mathbf{x}_n, Q_r) = \frac{V_r^M}{1 + \left(\frac{V_r^M}{V_r^m} - 1 \right) e^{-\alpha_r Q_r}} \left(\text{if } Q_r \geq \bar{Q}_r + \sum_{i=1}^{N_I} h_{ir} x_{ni} \right) \quad (7)$$

$$D_r(\mathbf{x}_n, Q_r) = 0 \left(\text{if } Q_r < \bar{Q}_r + \sum_{i=1}^{N_I} h_{ir} x_{ni} \right) \quad (8)$$

Q_r (m^3/s)は、ブロック r の上流端における、年最大のピーク流量である。被害額 D_r は Q_r に関するロジスティック曲線として表せると仮定する。 α_r , V_r^m , V_r^M は曲線の形状を決めるパラメータである。 V_r^M は当該ブロックに存在する総資産額(億円)を表すとする。 $D_r(\mathbf{x}_n, Q_r)$ は $Q_r \rightarrow \infty$ のとき V_r^M に収束する。ただし、 Q_r がある閾値（無害流量）を下回る場合には、式(8)に示すように、破堤が生

じず、被害も生じないと考える。その閾値は、 $\bar{Q}_r + \sum_{i=1}^{N_I} h_{ir} x_{ni}$ として表す。 \bar{Q}_r は現状の堤防高を前提としたときの閾値である。治水施設*i*がブロック*r*の堤防の嵩上げである場合には、 $h_{ir} > 0$ であり、当該施設の整備により閾値を上げることができる。それ以外の治水施設については、 $h_{ir} = 0$ となる。

Q_r は確率変数としてモデル化する。まず、気温変化が $s = 0$ の状況における、年最大降雨量を R_{base} (mm)で表す。 R_{base} が従う確率分布を、ガンベル分布によってモデル化し、その確率密度関数 ψ を以下のように定式化する。

$$\psi(R_{base}) = \frac{1}{\eta} e^{-\frac{R_{base}-\mu}{\eta}} \exp\left(-e^{-\frac{R_{base}-\mu}{\eta}}\right) \quad (9)$$

μ と η はパラメータである。いま、気温*s*(度)の上昇は、年最大降雨量を $(1 + us)$ 倍する効果があるとする。 u は正の定数(例えば0.05など)である。このとき、気温変化が $s_n \geq 0$ の状況における、年最大降雨量 R (mm)は、 R_{base} を用いて以下のように表せる。

$$R = (1 + us_n)R_{base} \quad (10)$$

次に、降雨量が R (mm)であり、かつ、治水施設*i* = 1, 2, ..., N_I が全て整備されていない状況における、ブロック*r*の上流端におけるピーク流量を \tilde{Q}_r (m³/s)で表す。 \tilde{Q}_r を R の関数として、以下のように定式化する。

$$\tilde{Q}_r = \gamma_{r1} R^{\gamma_{r2}} + \gamma_{r3} \quad (11)$$

γ_{r1} , γ_{r2} , γ_{r3} はパラメータである。

次に、治水施設*i*によるブロック*r*の上流端におけるピーク流量のカット効果を Δq_{ir} で表す。 Δq_{ir} を \tilde{Q}_r の関数として、以下のように定式化する。

$$\Delta q_{ir} = \delta_{ir1} \tilde{Q}_r^{\delta_{ir2}} + \delta_{ir3} \quad (12)$$

δ_{ir1} , δ_{ir2} , δ_{ir3} はパラメータである。ダムや遊水地のような施設によるピーク流量の削減効果は、一般に洪水の規模と正の相関を持つ。式(12)はこの相関関係を表現したものである。流出解析の結果を調べたところ、 Δq_{ir} は一般に R よりも \tilde{Q}_r との相関が強かったため、 Δq_{ir} を \tilde{Q}_r の関数として表している。 Δq_{ir} を用いると、 $\mathbf{x}_n \geq 0$ の状況における、ブロック*r*の上流端におけるピーク流量は、

$$Q_r = \tilde{Q}_r - \sum_{i=1}^{N_I} \Delta q_{ir} x_{ni} \quad (13)$$

と表せる。式(10)-(13)を用いると、 \mathbf{x}_n , s_n , R_{base} から Q_r を算出することができる。この算出過程を関数として考え、 Q_r を明示的に $Q_r(\mathbf{x}_n, s_n, R_{base})$ と表す。

次に、関数 D_r と Q_r を用いて、治水施設の整備状況が \mathbf{x}_n のときに、降雨量 R (mm)が生じた際の総被害額 \bar{D} (億円)を、以下のように関数として表す。

$$\begin{aligned} & \bar{D}(\mathbf{x}_n, s_n, R_{base}) \\ & = \max_r [D_r(\mathbf{x}_n, Q_r(\mathbf{x}_n, s_n, R_{base}))] \end{aligned} \quad (14)$$

すなわち、洪水時に破堤が生じるブロックは、被害額 D_r が最大のブロックになると考える。その他のブロックに

ついては、破堤は生じず、被害も生じないと考える。式(14)のような定式化を採用する理由は、被害額の過剰推計を避けるためである。一般に、あるブロックにおいて破堤が生じると、そのブロックに洪水流が流入する結果として、他のブロックの被害は抑えられる。したがって、被害額 D_r を全ブロックについて単純に合計すると、被害額の過剰推計に繋がる。式(14)はそのような過剰推計を避ける簡便な定式化である。

最後に、 \bar{D} の期待値を計算することにより、 $ED_{t(n)}$ を導くことができる。

$$\begin{aligned} ED_{t(n)}(\mathbf{x}_n, s_n) & = \int_0^\infty \bar{D}(\mathbf{x}_n, s_n, R_{base}) \psi(R_{base}) dR_{base} \\ & \quad (\text{if } t(n) < T) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} ED_{t(n)}(\mathbf{x}_n, s_n) & = \frac{1}{1-\beta} \\ & \cdot \int_0^\infty \bar{D}(\mathbf{x}_n, s_n, R_{base}) \psi(R_{base}) dR_{base} \\ & \quad (\text{if } t(n) = T) \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、最終時点 $t = T$ のノードは、2100年以降の全期間を表していると考えられる。このとき、 $1/(1-\beta)$ を係数として掛ける必要がある。

(3) 社会的費用のNPVの導出

全ノードの社会的費用の総和の期待値を以下の式により求め、目的関数 W として設定する。

$$W = \sum_{n=1}^{N_N} p_n C_n \quad (17)$$

p_n は現在時点($t = 0$)を基準としたときの、ノード*n*が実現する確率である。図-1の例では、 $p_1 = 1$, $p_2 = 0.6$, $p_4 = 0.6 \cdot 0.6 = 0.36$ である。 N_N はシナリオツリー上のノードの総数である。 W は社会的費用の割引現在価値の期待値を表す。 W を最小化することは、治水施設整備の純便益の割引現在価値を最大化することに他ならない。 W を最小化する y_1, y_2, \dots, y_{N_N} を求めることによりリアルオプション分析が行われる。

ただし、一般に N_N は膨大な数になるため、 y_1, y_2, \dots, y_{N_N} を厳密に最適化することは不可能である。そこで、本研究では、以下のような単純なルールを採用する。

$$y_{ni} = \begin{cases} 1 & (\text{if } x_{a(n),i} = 0 \text{ and } s_n \geq \bar{s}_i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (18)$$

\bar{s}_i は気温変化の閾値であり、 s_n がこの水準を超えたら、治水施設*i*を整備すると考える。この \bar{s}_i を最適化することにより、リアルオプション分析を実行する。式(17)の目的関数は、 s_0, s_1, \dots, s_T に関する1,000本のサンプルパスを発生させることにより、近似的に評価する。

$$W \approx \frac{1}{1000} \sum_{k=1}^{1000} \sum_{t=0}^T C_t^k \quad (19)$$

C_t^k はk本目のサンプルパスにおける、時点tにおいて生じる社会的費用である。

4. リアルオプション分析の適用

(1) パラメータのキャリブレーション

本研究は、3.において構築したリアルオプションモデルを、日本国内のX川流域に適用した。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3区間（下流から区間A掘削・区間B掘削・区間C掘削）を対象として分析を行った。これらの治水対策は現在の河川整備計画を基本に、掘削方法等を単純化して設定したものである。河道掘削は、1区間につき0.25mの掘削を2回まで、合計で0.5mまでの掘削を行えると考えた。社会的割引率 ρ には4%を用いた。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 ($u = 0.05$)。

モデルの適用に当たっては、モデル中のパラメータをキャリブレーションする必要がある。まず、 R_{base} が従うガンベル分布のパラメータ μ と η 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。次に、求められたガンベル分布を用いて、気温変化無し（0度上昇）の状態における、確率規模1/10～1/1500の12時間降雨量を複数設定した。そのうえで、対象河川の基本高水検討対象洪水波形のハイトグラフの、特定の時間帯の降雨量を引き延ばすことにより、様々な確率規模と降雨波形の下での流出解析と氾濫解析を実施した。

式(7), (11), (12)に含まれるパラメータは、流出解析と氾濫解析の結果に対して、非線形最小二乗法による曲線当てはめを行うことによりキャリブレートした。 α_r と V_r^m は、 \bar{Q}_r と V_r^M を所与としたうえで、氾濫解析の結果に対して非線形最小二乗法を適用して求めた。 γ_{r1} , γ_{r2} , γ_{r3} は、流出解析の結果に対して非線形最小二乗法を適用して求めた。図-3と図-4はそれぞれ、式(7), (8)と式(11)の当てはめ結果の一例を示している。図中のプロットは流出解析や氾濫解析の結果であり、曲線は当てはめ結果である。

δ_{ir1} , δ_{ir2} , δ_{ir3} は、様々な確率規模と降雨波形の下で、治水施設iのみを整備した際のピーク流量のカット効果を調査し、その結果に対して非線形最小二乗法を適用して求めた。流出解析におけるダムの整備効果は、単純化して一定量カット方式でモデル化した。また、遊水地の整備効果は、遊水地地点のハイドログラフから、ちょうど遊水地の容量分に相当する量をカットする形でモデル化した。図-5は、式(12)をダムのカット効果に対して当てはめた例を示している。曲線がグラフの右側で右下がりとなっているのは、ダムにおいて異常洪水時防災操作に移行し、カット効果が減少することを表現している。

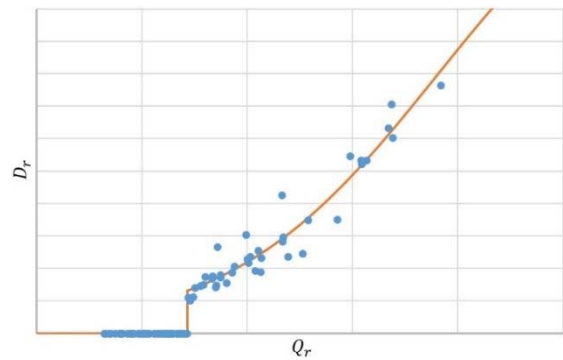


図-3 式(7), (8)の当てはめ結果の一例

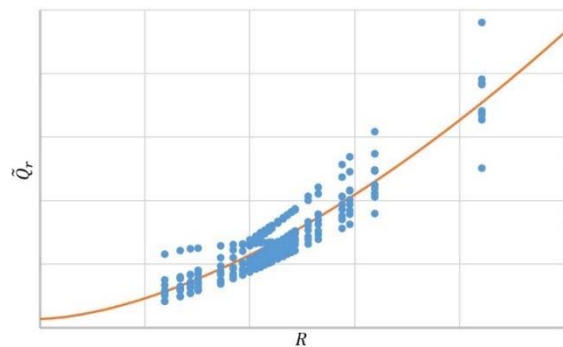


図-4 式(11)の当てはめ結果の一例

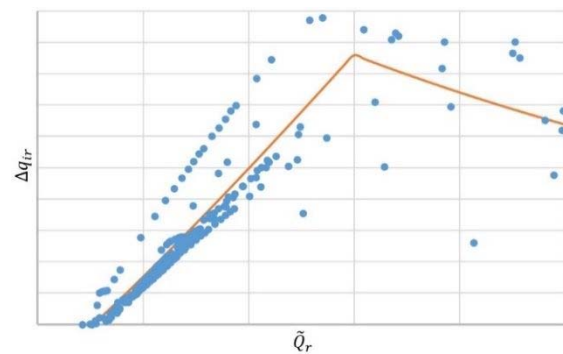


図-5 式(12)の当てはめ結果の一例（ダム対象）

河道掘削の効果の評価は、流出解析ではなく、等流計算法を用いた概算により行った。具体的には、掘削による流下能力の増加率を求め、この増加率を掘削地点のブロックの \bar{Q}_r に掛けることにより、ピーク流量のカット効果を求めた。よって、河道掘削については、カット効果は \bar{Q}_r に依存しない定数とした ($\delta_{ir1} = 0$)。

(2) 整備手順検討に利用することの有効性

図-2の気温変化のシナリオを対象にリアルオプション分析を実施すると、全ての施設を2020年時点において整備することが最適となった。これは、現行の河川整備計画の目標規模と施設が気候変動への対応として不十分であり、見直す必要があることを示唆している。このよう

表-1 仮想分析における治水施設別の \bar{s}_t

治水施設	図-2 シナリオ	μ_t 半減
遊水地 B	0.63	0.63
区間 B-0.25m	0.63	0.63
区間 B-0.50m	0.63	0.63
区間 C-0.25m	0.63	0.63
区間 C-0.50m	0.63	0.64
区間 A-0.25m	0.89	0.89
遊水地 A	1.83	1.93
区間 A-0.50m	2.22	2.23
ダム	3.80	3.66

に、純便益を最大化するタイプのリアルオプション分析を行うことにより、社会全体の費用を最小化するという観点から、治水計画の基準の適切性を評価可能であることが、リアルオプション分析の意義の一つである。

次に、リアルオプション分析を整備手順の検討に利用することの有効性を示すために、年最大降雨量の平均値と分散が実態よりも少なく、喫緊の整備が不要な治水施設が存在する仮想的なシナリオを用いて、再度の分析を実施した。この仮想的な分析の結果の一例を表-1の「図-2シナリオ」の列に示す。 \bar{s}_t は式(18)において定義した通り、「気温変化が何度になったら当該の治水施設を整備すべきか」を表す。この分析結果によれば、2020年の時点において実施すべきことは、遊水地Bの整備、区間Bの河道を0.5m掘削すること、および、区間Cの河道を0.5m掘削すること、となる。その後、気温の上昇に伴い、区間Aの河道を0.25m掘削、遊水地Aを整備、区間Aの河道を追加で0.25m掘削、ダムを整備、という順番で事業を実施することが、経済的な合理性の高い結果になる。一般的に、ダムは下流河道の流下能力が不足する場合、洪水調節容量に比べてピークカット効果が小さくなるため、掘削後にダムを整備するのは妥当な結果であると考えられる。また、2020年時点において掘削が必要な区間Bや区間Cは、現時点において相対的に流下能力の低い上流側である。また、遊水地Bの整備が必要であるのは、遊水地Aに比べて容量が半分程度と小さく、かつ、概算事業費が約1/3となっており、現状においても効果的な案であるためと考えられる。したがって、この分析結果は通常の整備手順に関する検討に照らしても妥当な結果であると考えられる。

また、感度分析として、気温変化の期待値 μ_t が全ての時点 t において「図-2シナリオ」の半分であるシナリオを想定した分析も実施した。このシナリオの下での分析結果を表-1の「 μ_t 半減」の列に示す。この分析結果は「図-2シナリオ」とほとんど変わらなかった。よって、この事例においては、分析結果に頑健性があると言える。

上述したように、リアルオプション分析を用いると、経済的な観点からの最適な施設の組合せと規模が評価できるとともに、治水施設のメニューに対して、実際の

気候変動のモニタリング状況に合わせた、段階的な整備の手順を示すことができる。よって、最悪のシナリオにも対応可能な治水施設のメニューを事前に用意しておけば、リアルオプション分析を行うことにより、気候変動の不確実性が存在する環境においても、柔軟な対応が可能な整備計画を作ることができる。これが、リアルオプション分析のもう一つの意義である。

5. 結論

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・計画に対する、リアルオプション分析の適用手法を提案した。さらに、提案した分析手法を、日本国内の特定の流域に対して適用することにより、提案手法の有効性を確認するとともに、リアルオプション分析を治水計画に適用する意義を示した。

今後は、より実用的な分析を行うために、分析手法を改良する必要がある。まず、治水施設の整備を決定してから、整備が完了するまでの時間の長さを考慮する必要がある。次に、各年度において利用可能な予算の上限を考慮する必要がある。これは、流域別の予算配分を検討するうえでも有用だと考えられる。最後に、目的関数を最適化するタイプと、与えられた基準を達成するための費用を最小化するタイプの、どちらのリアルオプション分析がより実用的であるのかを検討する必要がある。また、前者の場合には、目的関数として適切な指標について（例えば、生命の価値は考慮すべきか）検討する必要がある。後者の場合には、流域の重要性等を考慮した適切な基準について検討する必要がある。

参考文献

- 1) Zhao, T., Sundararajan, S. K. and Tseng, C.-L.: Highway development decision-making under uncertainty: A real options approach, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 10, No. 1, 2004.
- 2) Morel, B.: *Real Option Analysis and Climate Change - A New Framework for Environmental Policy Analysis*, Springer, 2020.
- 3) 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.
- 4) Kuik, O., Scussolini, P., Mechler, R., Mochizuki, J., Hunt, A. and Wellman, J.: Assessing the economic case for adaptation to extreme events at different scales, ECONADAPT, The Economics of Adaptation, 2016.
- 5) 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.

(2020. 4. 2受付)