

メタ概念を導入した治水計画に関する研究

京都大学 助教 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、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、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、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ものである。モデル内では、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がモデル化されている。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, メタ概念, 事業評価手法

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。

リアルオプション分析を治水計画に応用することには二つの意義がある。第一に、将来の状況に応じて政策のオプションを選択することにより、不確実性への柔軟な対応が可能になる。例えば、「当面の治水施設整備をどの段階まで進めるべきか」や、「降雨量の予測シナリオの不確実性が小さくなるまで、整備の意思決定を保留すべき治水施設はどれか」を決めておくようなことが可能になる。第二に、流域住民の負担を伴う施策（土地利用規制や住宅移転など）をオプションに含めて分析を行うことにより、そのような施策の潜在的な有効性や、適切な実施時期を示すことができる。これにより、流域住民との合意をいつまでに形成すべきかを判断する際に有用な情報を提供することができる。

2. 研究の方法

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、1年目の2019年度に実施した研究について報告する。

(1) 治水計画に関する施策の評価手法の整理

水害の被害軽減策には、治水施設の整備や道路のかさ上げのようなハードな施策と、土地利用規制などのソフトな施策が存在する。これらの施策をどのように組み合わせるべきか、また、各々の施策をいつ実施すべきかを検討するためには、施策の望ましさを評価するための手法（あるいは評価指標）が必要となる。リアルオプション分析も、何らかの評価指標に基づき、事業投資の実施時期の適切性などを判断するため、評価指標の選定は重要である。また、気候変動が進展する中では、従来の評価手法とは異なる手法が求められると言える。そこで、各国の実務や研究においてどのような評価手法が用いられているのか、また、気候変動に対応した評価手法にはどのようなものがあるのかについて、文献調査を通じて整理した。

(2) 気候変動の不確実性に対応するためのリアルオプション分析手法の開発と適用

気候変動の不確実性の下での治水計画に対する、リアルオプション分析の適用手法を開発した。開発したリアルオプション分析手法は、将来の気温変化に関するあらゆるシナリオを考慮する。分析に当たっては、IPCCにより公表されている将来の気温変化に関するシナリオを利用した。また、貯留関数法による流出・氾濫解析の結果を利用し、気温上昇時におけるピーク流量の分布や、流域に生じる被害額の期待値をモデル化した。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した。また、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、開発した手法の有効性を確認した。

3. 治水計画に関する施策の評価手法の整理

(1) 実務において利用されている評価手法

治水計画に関する施策の評価手法として広く活用されているのは、伝統的な費用便益分析 (Cost Benefit Analysis, CBA) である¹⁾。これは、施策の実施により生じる便益（洪水の被害の軽減効果）と、施策の実施に必要な費用の差額である純便益によって、施策を評価する手法である。アメリカでは、1950年代から、治水施設の整備プロジェクトの評価に費用便益分析を利用している。EUにおいても、洪水対策に関する指令 (Directive 2007/60/EC²⁾) において、「洪水リスクに対応するための計画(治水計画)は、費用、便益...などのように、計画に関連する様々な要素を考慮すべきである。」と要請している。欧州委員会の実施した加盟国の取り組み事例の調査³⁾によると、加盟国26か国のうち19か国が治水対策に関する何らかの費用便益分析を行っている。

費用便益分析に類似した分析手法として、Cost

Effectiveness Analysis (CEA)と呼ばれる手法が採用されている事例も存在する。これは、「基本高水流量を安全に流下させる」といった目標を設定したうえで、その目標を達成するための費用を最小化する施策（の組み合わせ）を選択する分析である。日本の治水計画において採用されている手法は、このCEAに近い。

ただし、いずれの国においても、費用便益分析やCEAによって機械的に施策の実施を判断するようなことは行われていない。例えばオランダでは、費用便益分析が治水計画に関する意思決定の最高レベルにおいて利用されている⁴⁾が、オランダの多くの堤防の高さは費用便益分析に基づいて決定されているわけではない⁴⁾。洪水の発生には不確実性が大きいこと、また、洪水対策基準は社会的重要性の高い基準であることから、基本高水流量のような目標の設定は多くの国において、政治的な判断事項である。すなわち、機械的に判断されるような事項ではない⁵⁾。

費用便益分析において考慮される便益は、物的資産の被害軽減便益に限られることがほとんどである。しかし、一部の事例では、金銭的な評価の難しい便益（人命、健康、環境など）を、何らかの手段により金銭換算したうえで、費用便益分析に利用している。Eijgenraam et al.⁶⁾はオランダの洪水対策基準の理論的根拠として採用された学術的な研究であるが、彼らは、人命の価値や復旧不可能な物的財産の価値を考慮した費用便益分析を行っている。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。スロベニア、スロバキア、ポーランドでは、住民の健康や自然環境、文化財を洪水から守る便益を費用便益分析に取り入れている³⁾。デンマークの地方部では、遊水地が有する、平常時のレクリエーション空間としての便益を考慮している³⁾。

以上のように、金銭的な評価の難しい便益を考慮した費用便益分析の事例はあるものの、それらの数は限られている。そのような便益を考慮して施策を評価する際には、多基準意思決定分析 (MCA, Multi-Criteria Analysis) が使われることが多い⁷⁾。これは、施策がもたらす様々な効果について、効果ごとに得点を設定し、それらの得点の合計値によって施策を評価する手法である。MCAは、地区レベルの意思決定において用いられることが多い。MCAを使う際には、効果に関する得点の配分を決めなければいけない。その配分は、地区の住民のような利害関係者や、専門家の意見や議論を踏まえて決定される⁷⁾。

地区レベルの意思決定にはおいては、参加型アプローチが利用されることも多い⁷⁾。参加型アプローチとは、意思決定のプロセスにおいて、住民などの利害関係者に何らかの形で参加してもらう手法である。参加型アプローチは、土地利用規制のように、住民の生活や経済活動に大きい影響をもたらす施策においては、特に重要視さ

れている。

気候変動に対応した評価手法に目を向けると、実務的に利用されている定量的な評価手法はこれといって存在しないのが現状であると考えられる。もちろん、将来の気候変動に対応するための治水計画は各国において策定されているが、その際に利用されている定量的な評価手法についての記述は見つけられなかった。例えば、ドイツはドナウ川の堤防を気候変動に備え 0.5m 高くする計画を出している⁹⁾。その計画の根拠となる文献を探したが、見つけられなかった。おそらく、専門家らによる高度な判断の下に基準を設定したものと考えられる。

(2) 学術的な研究において利用されている評価手法

学術的な研究の分野においては、研究者らによって、評価手法が自由に提案されている。そのため、細かく分類すれば非常に多様な評価手法が利用されている。ただし、大きい分類では、それらの評価手法は、費用便益分析、CEA、MCA のいずれか、もしくはそれらの組み合わせになる。

学術的な研究においては、以上の評価手法を最適化問題の中で利用することが多い。すなわち、費用便益分析を用いるのであれば純便益⁶⁾を、CEA を用いるのであれば総費用⁹⁾を、MCA を用いるのであれば総得点¹⁾を最大化するような施策を選択する分析を行うことが多い。

気候変動に対応した評価手法は、学術的な研究の分野においても大きい関心の対象となっており、近年に精力的に研究が行われている。その中でも多く使われている手法は、将来の気候変動に関する最悪のシナリオを採用し、そのシナリオの下で評価を行うものと指摘されている⁹⁾。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⁹⁾。リアルオプション分析を行うには、施策の望ましさを評価するための指標を設定する必要がある。この指標には、費用便益分析、CEA、MCA などが採用される。治水計画の分野におけるリアルオプション分析の研究の多くは、理論的なもの、もしくは、実データに基づかないシナリオを設定したものであり、実用的な研究は限られていると指摘されている⁹⁾。

以上で取り上げた研究は、何らかの目的関数を最大化する、最も望ましい施策を見つけ出すとする分析手法である。一方、そのような施策を見つけ出すのではなく、気候変動や治水対策の効果を、詳細かつ科学的に分析しようとする研究も存在している。そのような研究としては、Rojas, et al.¹⁰⁾を挙げることができる。これは、EU から支援を受けて行われた研究であり、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、気候変動のもたらす被害の大きさを分析している。

この研究の中では、治水対策のレベルを気候変動に合わせてアップグレードする便益についても分析している。以上で見たように、気候変動に対応した評価手法は未だ研究途上にあり、実用的な評価手法を開発することには大きい意義があると言える。また、施策の評価手法には、費用便益分析、CEA、MCA など、特徴の異なる手法が存在しており、全てのケースに適した分析手法は存在しないことが確認された。

4. 気候変動の不確実性に対応するためのリアルオプション分析手法の開発と適用

(1) リアルオプション分析の意義

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.⁹⁾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。

将来の気候変動の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」費用便益分析や MCA を応用したタイプと、「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」CEA を応用した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が、

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、前者のタイプを採用する。目的関数には、治水施設整備の純便益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。

(2) モデル

a) 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¹⁰⁾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。

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

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

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

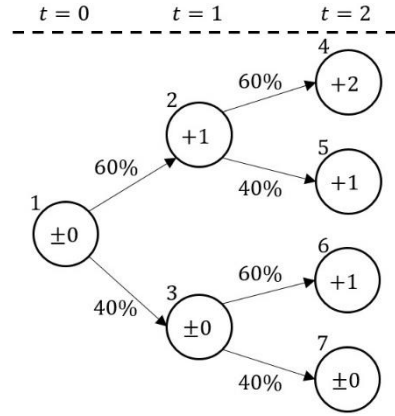


図-1 気温変化のシナリオツリーの一例

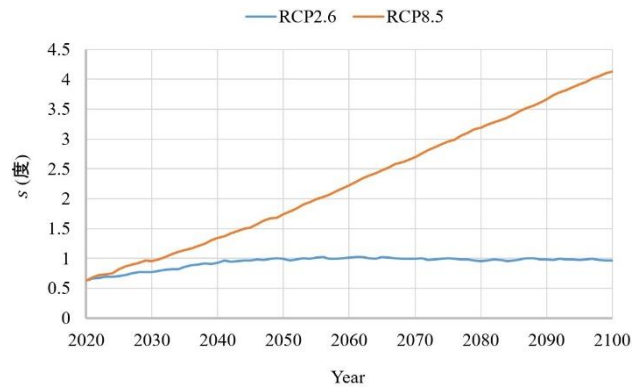


図-2 将来の気温変化のシナリオ

$s_t^{2.6}$ 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。

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年にする。 $t = 0$ 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。

b) 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。

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 度るときに、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 の定式化には、年最大降雨量の従う確率分布の推定結果と、流出解析・氾濫解析の結果を利用している。気温の上昇は、 $ED_{t(n)}$ を増加させる効果を持つ。モデル中では、気温 s (度)の上昇が、年最大降雨量を $(1 + us)$ 倍する効果があると考え、この想定の下で、流出解析・氾濫解析の結果を利用して、ブロック別の被害額の期待値を計算し、 $ED_{t(n)}$ の値の算出を行う。

c) ノード別の費用の定式化

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。

$$W = \sum_{n=1}^{N_N} p_n C_n \quad (7)$$

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。

$$y_{ni} = \begin{cases} 1 & (\text{if } x_{a(n),i} = 0 \text{ and } s_n \geq \bar{s}_i) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (8)$$

\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。

4. リアルオプション分析の適用

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($u = 0.05$)。

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。

そこで、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に示す。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。

上述したように、リアルオプション分析を用いると、

表-1 仮想的な分析結果 (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)

治水施設	\bar{s}_i
遊水地 B	0.63
区間 B-0.25m	0.63
区間 B-0.50m	0.63
区間 C-0.25m	0.63
区間 C-0.50m	0.63
区間 A-0.25m	0.89
遊水地 A	1.83
区間 A-0.50m	2.22
ダム	3.80

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意義の一つである。

5. まとめ

本年度の研究においては、治水計画に関する施策の評価手法の整理を行うとともに、気候変動の不確実性に対応するためのリアルオプション分析手法の開発を行った。さらに、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、手法の有効性を確認した。適用の結果を見ると、標準的なケースでは2020年時点において全ての治水施設を整備することが最適となった。気候変動の進行に伴い将来的に必要となる治水施設が、分析対象に含まれないということは、現在の治水計画の基準が、将来の気候変動に対応できていないことを意味している。このように、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も、リアルオプション分析の意義の一つである。

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) 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.
- 2) EU: DIRECTIVE 2007/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, 2007.
- 3) European Commission: European Overview - Flood Risk Management Plans, REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the implementation of the Water Framework Directive (2000/60/EC) and the Floods Directive (2007/60/EC), Second River Basin Management Plans, First Flood Risk Management Plans, COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT, 2019.
- 4) Kind, J. M.: Economically efficient flood protection standards for the Netherlands, *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 7, pp. 103–117, 2014.
- 5) 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.
- 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) Mechler, R. et al.: Making communities more flood resilient: The role of cost-benefit analysis and other decision-support tools in disaster risk reduction, Zurich Flood Resilience Alliance, 2014.
- 8) 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.
- 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) 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.