

様々な洪水規模に対する河道-構造物群 システムの応答シナリオに基づく氾濫リスク・ 減災効果評価

EVALUATION OF RIVERINE FLOOD RISK REDUCTION BY SCENARIO-BASE ANALYSIS FOR RESPONSE OF FLOOD PREVENTION SYSTEM TO WIDE-SCALE FLOODS

竹中 裕基¹・板垣 修²・小林 勝也³・服部 敦⁴
Yuki TAKENAKA, Osamu ITAGAKI, Katsuya KOBAYASHI, Atsushi HATTORI,

¹正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工修 国土交通省 大臣官房付 (前: 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室)
(〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

³非会員 国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 (前: 同上)
(〒270-2218 千葉県松戸市五香西6-12-1)

⁴正会員 博(工) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

We proposed an evaluation method for examining riverine flood damage reduction measures using the risk analysis framework. With this method, we can list up a set of potential flood damage scenarios, and grasp the worst damage scenario, the range of potential flood damage, etc. in each river basin.

We applied the evaluation method to 20 rivers as first case studies, and extracted characteristics concerning effects of flood damage reduction countermeasure alternatives in each river. We confirmed that this evaluation method was useful for examining the effect of flood damage reduction measures, and for explaining the flood risk characteristics of the river basin and the effect of flood damage reduction alternatives to the stakeholders in the river basin.

Key Words : *riverine flood damage, uncertainty, worst flood damage scenario, range of flood damage*

1. はじめに

我が国は急峻な地形の上に台風・豪雨等の厳しい自然外力にさらされる一方、氾濫原に人口・資産が集中しており、気候変動の影響による洪水外力・氾濫被害の増大が懸念されている。国土交通省社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適應した治水対策検討小委員会においても、気候変動影響への適應を計画的に進めることが重要とされ、洪水等による災害リスクのきめ細かな情報を提示することが必要とされている¹⁾。

一方、気候変動が顕在化した将来気候下での豪雨の発

生頻度と雨量や、所与の能力を上回る外力が作用した際の河道・堤防等施設の挙動の予測には、不確実性を伴う。そうした予測を用いる氾濫リスクの評価においては、当然、不確実性の大きさに応じた幅をもった結果となる。この本質的な特性を内包するリスク評価においては、無理に不確実性を排除した設定を行うのではなく、生じうる事象について幅広に想定を行い、種々の状況下でも災害リスクを極力低減できる施策(適應策)を見いだすことを基本に据えることが重要である。

服部ほか²⁾は、全国の一級水系国土交通大臣直轄管理区間を対象として、気候変動予測シミュレーション結果を用いて所与の確率年に対する雨量の現在値に対する将

来値の比として表される雨量の増加率とその予測幅を算定した。その結果に基づき、雨量の増分による流量増を吸収して洪水を安全に流下させるために必要な付加的な河川整備労力の増加率とその予測幅を算定した。その結果から雨量の増加率とその幅が河川整備労力においては約10倍に増大することを示し、雨量増が河川整備に与える影響度が全体としては相当に大きく、予測の幅についても相当大きな幅を想定せざるを得ないこと、そのような幅があること前提として、その対処の考え方を具体化する必要性を指摘している。

本論文は、この指摘を受けて米英蘭における洪水リスク分析手法³⁾の考え方を取り入れて、対処の検討手法について検討したものである。具体的には、安全に流下できる水位を超過した洪水時における堤防の応答、すなわち破堤発生の有無とその位置について、生じる全ての組み合わせを氾濫シナリオとして設定し、各シナリオに対して直接被害額及び人的被害を推算することで、ある洪水規模に対してシナリオ数に応じた複数の被害推算値、すなわち被害の幅を算定する。この算定を確率年が異なる複数の洪水規模に対して行うことで、洪水の発生頻度と幅を持った被害推算値の関係として氾濫リスクを求め、さらにリスク低減施策の実施前後について氾濫リスクを算定してその差異から減災効果を評価することを試み、その有効性と課題についてとりまとめたものである。

2. リスク低減施策の検討手法の概要

(1) リスク低減施策の検討の枠組み

本研究では、図-1に模式的に示すように、横軸を洪水規模（ピーク洪水流量の年超過確率）、縦軸を被害（直接被害額、人的被害等）の大きさとしたグラフ上の曲線（以下、リスクカーブと呼ぶ）として、氾濫リスクを表示する³⁾。なお、図-1では被害の大きさの幅の表示を省略しているが、実際には(2)に後述するように幅についても算定し表示する。

図-1の縦軸を対象流域の総被害とすると、流域全体のリスクについて概観でき、また各氾濫区域別の被害として区域別に算定したリスクカーブを比較することで、流域内のリスク分布についても把握することができる。

河川改修などによる防災対策は、氾濫防止が行える洪水規模を増大させる効果として、グラフ上ではリスクカーブの横軸との交点の右側への移動として表される。同様に氾濫流量を減じる、避難や流域利用の工夫など浸水被害ポテンシャルを下げるといった種々の減災対策は、洪水規模の増大に対して被害の増加を抑える効果として、リスクカーブの傾きが緩くなることで表される。以上のように、防災・減災対策とも、縦軸の被害指標のもと同一グラフ上で効果をシームレスに評価することが可能で

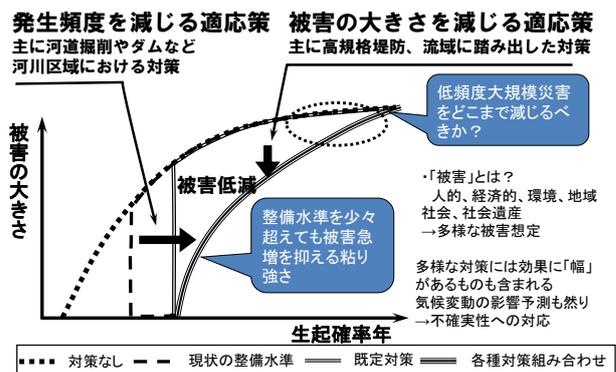


図-1 洪水被害低減対策検討の枠組み

あるため、各種対策の最適な選定・組合せの検討・分析に高い利便性と有用性を有すると考えている。

リスクカーブを用いた種々の対策群選定・組み合わせ案から最適案を抽出する考え方については、本検討では治水の原則に基づいて、①流域全体のリスクカーブでは、対策実施前に比べて実施後ではあらゆる洪水規模に対して被害が低減していること、②氾濫区域別のリスクカーブでは、ある地区の被害を低減することが他の地区での被害の増大に繋がるといった副作用がほとんどないことを基本とした。なお、これはあくまでも基本事項であり、今後これに追加して、例えばある流量規模ごとに被害の上限値を定めてそれ以下にリスクカーブを収める、またリスクカーブの傾きをある所定の値以下にする、といった考え方を取ることも可能である。これら追加の考え方を導入するかは、減災のあり方・目標設定に関わる事項であるため、本論文では扱わず、今後の議論に委ねる。

本研究では、上記の考え方を各洪水規模において最大被害となるシナリオの被害値によるリスクカーブと、全シナリオ群の単純平均値によるリスクカーブの双方に適用することとした。これは、被害が最大化するという観点で最悪の氾濫シナリオにおいても対策効果が発揮されるとともに、それ以外のシナリオ群においても低減効果が平均的には発現されることを確認するという考え方をとったことによる。

(2) 氾濫シナリオの設定

被害の大きさに幅を持ったリスクカーブの算定にあたっては、氾濫シナリオの設定により結果が変わりうる。本研究において氾濫シナリオは以下の手順で設定した。

氾濫発生の有無を与える氾濫想定地点は、浸水想定区域図作成マニュアル⁴⁾に基づいて氾濫ブロックを設定し、破堤氾濫した場合に当該ブロックで最大被害を生じさせる箇所として設定した。

氾濫発生の有無については、以下に示す考え方に基づいて、各氾濫想定地点におけるピーク洪水水位によって判定する手法を用いた。

土堤は越水に対して構造的にそもそも弱く、そのため

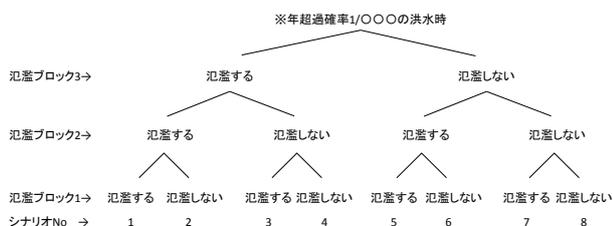


図-2 ツリー図による氾濫シナリオの網羅的抽出

越水させないことによって機能確保をすることを堤防構造の基本としていること、またこれまでの実績でも越水区間において破堤する事例が多いことから、越水が生じた時点で破堤氾濫すると設定する。

天端高以下の水位では、堤防に関する技術基準類等に基づいて機能が十全と判断できる「最高水位」以下の水位の場合には氾濫しないと設定する。本研究では、浸水想定区域図作成マニュアル⁴⁾に基づいて「最高水位」を設定した。一方、「最高水位」を超える場合には、機能が十全とは判定できないが、実態として即破堤に直結するものばかりではなく、変状が発生しながらもなんとか氾濫を免れた場合などがある。ただし、所定の安全性を担保できない状態であって、現状の技術では氾濫してもおかしくない条件と考えられる。一方、現状の技術では、十全の安全性を欠いた状態にある堤防区間で氾濫に至る水位を言い当てることは、まず不可能である。これらの特性を踏まえて、「最高水位」以上の水位の場合には、氾濫する・しないの両方を設定する。

以上の考え方によると、ある出水規模に対する氾濫シナリオ群は図-2に模式的に示すツリー図のように設定される。図-2は対象河川区間の下流側に位置する氾濫ブロックから番号1～3を付しており、いずれのブロックの破堤想定地点においても天端高以下「最高水位」以上に該当し、氾濫する・しないの両方となる例について示している。この例では全8種のシナリオとなり、これらをシナリオ1～8と呼ぶこととする。

上記手順による氾濫シナリオの設定は、氾濫発生候補地点をあらかじめ選定した代表箇所のみに限定する単純化がなされているものの、単独または複数の氾濫ブロックにおいて破堤氾濫が生じる組み合わせの全てを、氾濫シナリオ群として網羅的に抽出・設定できる。言い換えれば、リスク低減を検討する上で重視すべき被害最大となる最悪の氾濫シナリオの取りこぼしが無い、という特長がある（これについては後述する(4)に具体的な計算例を示して補足説明する）。

(3) 被害推算

本研究では、氾濫シナリオとして設定した氾濫地点において河道からの氾濫流量を与え、これを境界条件として、算定する氾濫ブロック内の最大浸水位分布と別途与える家屋など資産分布・人口分布に応じて、各地点での

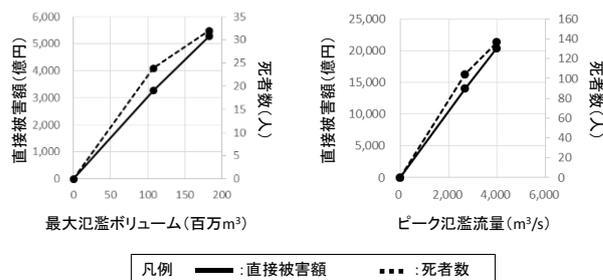


図-3 (左) 最大氾濫ボリュームと直接被害額・死者数
(右) ピーク氾濫流量と直接被害額・死者数の関係例

直接被害額⁵⁾および死者数⁶⁾を求めている。

ただし、氾濫ブロックを200m程度のメッシュに分割し、最高浸水位を非定常平面2次元浅水流解析により算定し、メッシュ単位で被害推算を行う治水経済調査マニュアル⁷⁾に準じた手法を適用するのは、膨大な数の氾濫シナリオ⁸⁾に対しては計算労力の観点から困難であった。そこで、リスクカーブの差異からリスク低減施策の減災効果を評価するという本研究の目的に適用精度を確保しつつ、より計算負荷の小さい現実的な手法として、以下に示すポンドモデルによる被害推算手法を採用した。

- ①別途実施された既往の非定常平面2次元浅水流解析による浸水位算定結果を収集し、各氾濫ブロック内を氾濫流が水面勾配を持って流れる流下域と、そうして運ばれてきた氾濫水が貯留される水面勾配が概ねゼロである湛水域に分割した。
- ②収集した浸水位算定結果を用いて直接被害額および死者数をメッシュごとに算定した結果を流下域と湛水域に分けて集計し、湛水域では最大氾濫水量（氾濫ブロック内に貯留される水量の最大値の計算結果）、流下域ではピーク氾濫流量（境界条件として各氾濫ブロックに与えた氾濫流量の最大値の計算結果）との関係として整理し、その関係式を導出する（図-3）。
- ③河道内の洪水流を一次元不定流計算として解き、各氾濫ブロックへの氾濫流量を本間の越流公式により与えることで、ポンドモデルにより各氾濫ブロックの最大氾濫水量とピーク氾濫流量を求める。その値を図-3に示した関係式に代入することで算定される流下域・湛水域の総被害として、各氾濫ブロックの直接被害額と死者数を推算する。

なお上記の計算において、河道と氾濫ブロック間の水のやり取りによる河道内洪水流量の低減・増加については、その水の出入りを一次元不定流計算に組み込み、考慮している。なお、河道への戻り流れが氾濫地

⁵⁾ n個の氾濫ブロックの場合、氾濫シナリオ数は最大で2のn乗となる。さらに、m種の洪水規模を対象とすると、被害推算を行う総ケース数は最大 $m \cdot 2^n$ となる。例えば、10個の氾濫ブロック、5種の洪水規模とすると、最大 $5 \times 2^{10} = 5120$ となる。

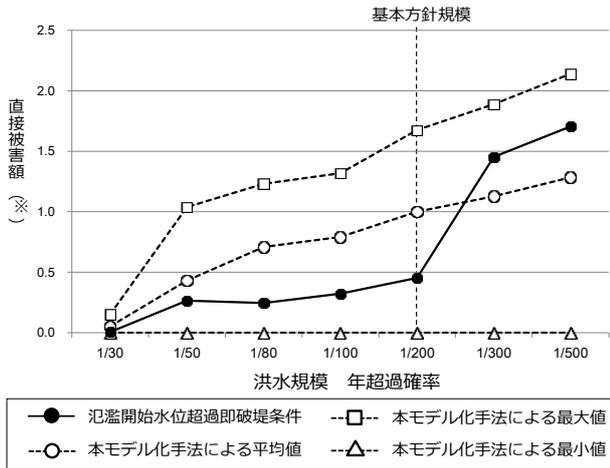


図-4 氾濫発生条件による流域の直接被害額の違い（モデル河川5）※直接被害額は基本方針規模洪水時の本モデル化手法による平均値を1として無次元化

点と異なる位置で生じる場合には、氾濫地点から当該地点まで氾濫ブロック内を流下するのに要する時間をポンドモデルでは別途与える必要があるが、それはそれら2点間の距離等に応じて設定した。

(4) リスクカーブの導出

降雨時空間分布は既往観測結果から1種類を選定し、これを引き延ばし・縮めた雨量に対して流出解析を行うことによって、現況流下能力を少し上回る規模から河川整備基本方針の目標規模を上回る規模（年超過確率1/500等）までの8種類程度の洪水流量ハイドロを設定した。各流量規模について、(2)の手順で設定される全氾濫シナリオについて(3)に示した被害推算を行い、氾濫シナリオのうち最大・最小の被害（直接被害額又は死者数）をもたらすもの（以下各最大・最小氾濫シナリオと呼ぶ）を抽出する。それらによって、最大・最小リスクカーブを得た。同様に、全氾濫シナリオの単純平均値（以下平均氾濫シナリオと呼ぶ）によって、平均リスクカーブを求めた。

流域全体の総被害のリスクカーブ算定例を図-4に示す。なお、図中には(2)に示した氾濫発生の有無の判定手法とは異なり、「最高水位」を超えた時点で氾濫すると設定した場合の被害推算結果を併記した。この設定では氾濫シナリオは一つに定まるが、そのリスクカーブは最大リスクカーブより小さい総被害額となった。

この計算例は、1)上記設定は個々の氾濫ブロック単位で見ると氾濫被害が最も生じやすい条件ではあるが、複数の氾濫ブロックの被害総和の観点では最大値を与えるシナリオに必ずしもならないこと、2)それに対して(2)に示した設定は図-2に模式的に示したように氾濫シナリオが複数となる煩雑さがある反面、最大リスクを与えるシナリオを機械的に抽出できる特長があること、を端的に示している。

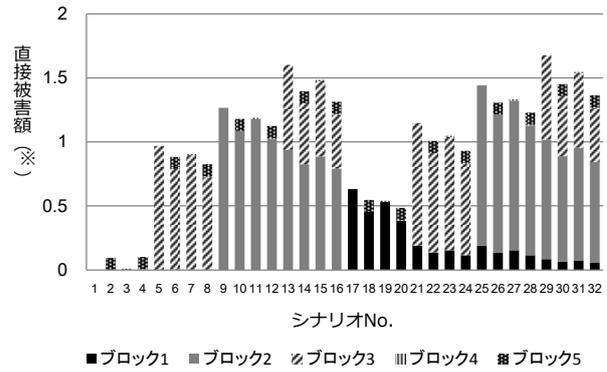


図-5 シナリオ別の氾濫被害（直接被害額）（モデル河川5）※直接被害額は基本方針規模洪水時の本モデル化手法による平均値を1として無次元化

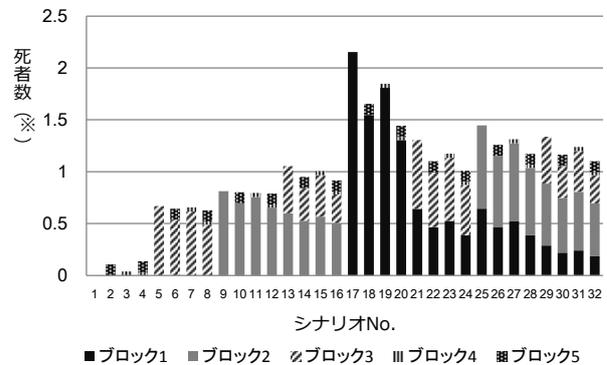


図-6 シナリオ別の氾濫被害（死者数）（モデル河川5）※死者数は基本方針規模洪水時の本モデル化手法による平均値を1として無次元化

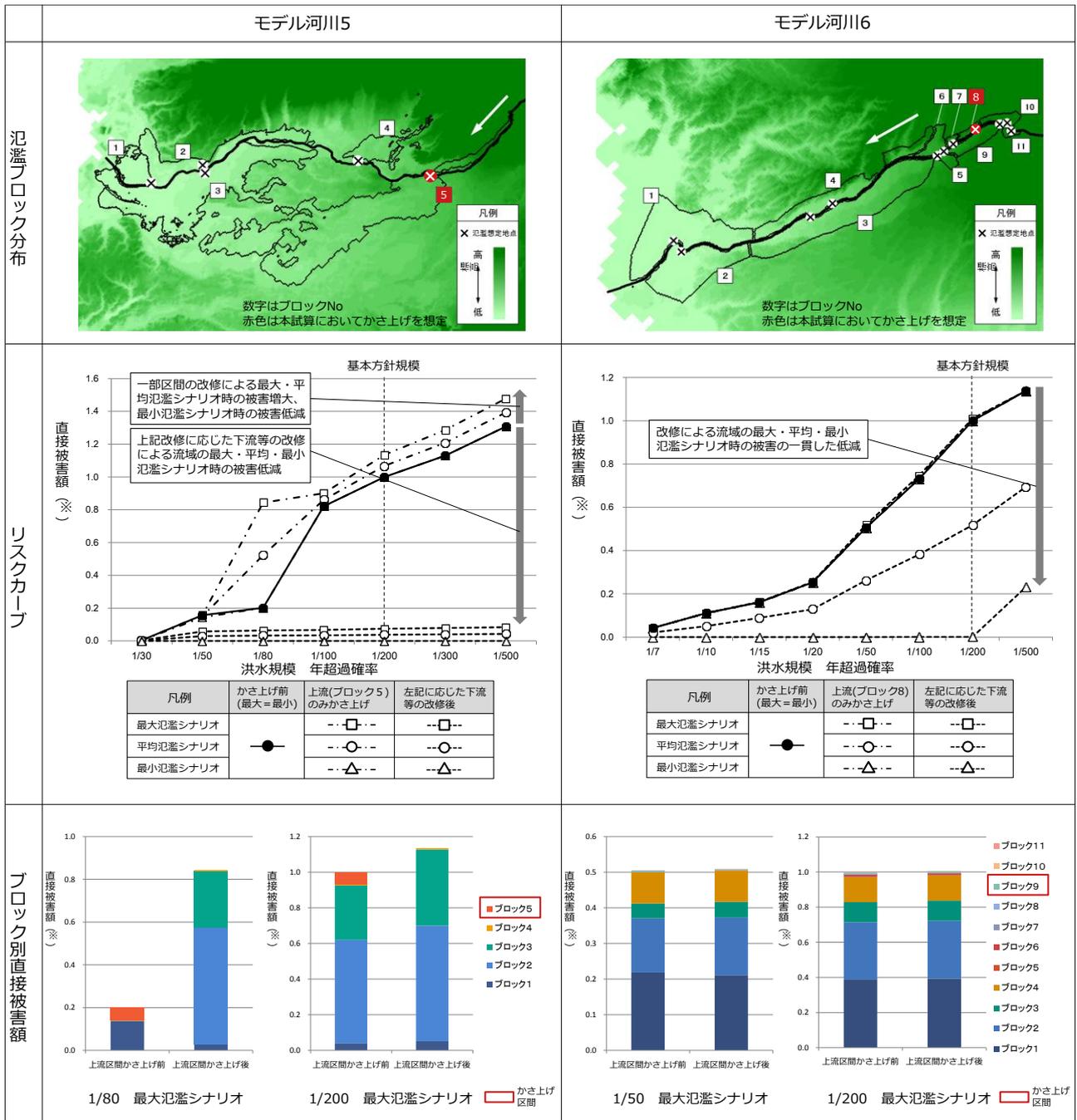
3. モデル河川の氾濫被害特性

本研究では、前述の考え方にに基づき、モデル河川を対象としてリスクカーブの算定を行った。

モデル河川の選定にあたっては、一級水系本川の国土交通大臣直轄管理区間のうち、資産・人口が下流に集中、分散している河川等対照的な河川を抽出し、全ての地方整備局等から最低1河川ずつ選ぶようにして20河川を選定した。以下では、これらをモデル河川1～20と呼ぶ。

(1) シナリオ別の氾濫被害の試算例

氾濫ブロック数が5つの河川（モデル河川5）において、図-2に基づいてシナリオ別の直接被害額及び死者数を算定した。その結果例を図-5及び図-6に示す。モデル河川5においては、ブロック2において直接被害額が最大となるが、死者数が最大となるのはブロック1である。そのため、被害額が最大となるシナリオはシナリオ29であるが、死者数が最大となるシナリオはシナリオ17であり、氾濫被害の試算において、流域の特性を踏まえた試算がなされていることを確認できる。



※直接被害額は基本方針規模洪水時の本モデル化手法による平均氾濫シナリオの値を1として無次元化

(2) 一部区間の河川改修による氾濫被害への影響特性の分類

地先ごとの治水安全度確保を目標とする洪水対策では、ある地先の改修は当該地先の氾濫被害を低減するものと理解され、ほかの区間（例えば下流）の氾濫被害への影響についての定量的な検討手法は確立していない。しかし、河川は上下流・本支川が一連のシステムとしてつながっており、一部区間の改修は、ほかの地先の氾濫被害を変化させることがある点を見落としてはならない。なお、同氾濫被害の変化は上下流の氾濫ブロック等の特性に依存すると考えられる。

水系一貫の河川整備基本方針・整備計画を策定する中で、上下流・本支川の河道の流下能力のバランスを考慮してきている。これは、計画規模以下の洪水に対しては有効な手法と考えられるが、計画規模を上回る洪水までを対象とすると、流域特性によっては十分な考慮とは言えないことが予想される。一部区間の改修は一部の氾濫シナリオによる被害を増大させることがあり、下流を十分に改修することにより各シナリオによる被害を低減させることが重要である。

そこで、一部区間の改修による流域の最大・平均氾濫被害への影響特性（リスク移転特性）について感度分析

を行った。感度分析は、氾濫時の氾濫ボリューム又は氾濫ピーク流量が比較的大きい上中流の氾濫ブロック1つの堤防を仮想的にかさ上げし、かさ上げ前後の流域の最大・平均氾濫シナリオを試算・比較した。その結果、図-7に示すとおり、かさ上げ後の方がかさ上げ前より被害が増大する場合と、増大しない場合を確認することができた。

モデル河川5は、リスクカーブに示すとおり、流域の上流区間であるブロック5をかさ上げたことにより、流域全体の最大氾濫シナリオの被害額がかさ上げ前と比較して増大している。これは、上流区間での氾濫を低減することによって、下流に流下する水量が増大し、氾濫ブロック2及び氾濫ブロック3における氾濫水量が増大したためである。これは、図-7のモデル河川5におけるブロック別直接被害額に示すとおり、上流区間をかさ上げすることによって、ブロック5の直接被害額は減少しているものの、下流のブロック2及びブロック3の直接被害額が増大し、流域全体の最大被害も増大していることから確認することができる。しかし、リスクカーブに示すとおり、上流の改修に応じ、下流の氾濫ブロックを適切に改修することによって、被害を低減させることが可能である。

モデル河川6は、リスクカーブに示すとおり、流域の上流区間であるブロック8をかさ上げしても、流域全体の最大氾濫シナリオの被害額は大幅な増大を見せない。また、ブロック別直接被害額についても、上流の一部区間をかさ上げしても、個別の氾濫ブロック及び流域全体のリスクは大きく増大しないことが確認できた。

抽出された代表的な特性及び洪水被害低減対策検討上の留意点は以下のとおりである。

- (a) 被害が増大するとされたモデル河川と類似の特性を有する河川では、上下流の流下能力のバランスの妥当性について本手法により確認することが重要であり、図-7（モデル河川5）に示すとおり当該モデル河川の氾濫ブロック分布は上流の氾濫ブロックが下流に比べ大きい。しかし、上流の堤防かさ上げに応じた下流区間の改修等を行うことにより、最大・平均氾濫シナリオにおける被害は低減するため、上下流の流下能力のバランスを考慮した改修を行い、個別の氾濫ブロック及び流域全体の被害を低減することが重要である。
- (b) 被害が増大しないとされたモデル河川と類似の特性を有する河川では図-7（モデル河川6）に示すとおり、地先ごとの治水安全度の確保を目的とする改修を推進しても本手法により抽出された氾濫シナリオの観点からは問題が少ないと考えられる。なお、当該モデル河川の氾濫ブロック分布は同図に示すとおり、上流の氾濫ブロックが下流に比べ小さい。

4. おわりに

今回提案した手法は、計画規模を上回る洪水を含む様々な規模の洪水を対象として、洪水規模ごとの氾濫被害算定に係る不確実性を限定的ではあるものの考慮し被害の幅を含む氾濫被害低減対策効果の検討を行うことができ、不確実性を考慮した気候変動下の氾濫被害低減対策の具体的な検討において有効な手法であると考えられる。

なお、本手法は河川技術者が常識として持ってきた治水上の原則を数値的に確認する手法に過ぎないと筆者らは考えている。本手法による試算結果はいずれも常識的なものであり斬新なものではない。しかし、本手法を用いることにより流域の洪水被害の特性及び洪水被害低減対策の効果について河川分野以外の関係者に対してもより明快な、統一かつ具体的な説明をできるようになることが本手法を活用する大きな利点であると考えられる。

さらに、若手河川技術者等が流域の最悪の氾濫シナリオを見落していないかどうか確認するためにも、本手法は有効であると考えられる。

引き続き、洪水時のピーク水位に影響する河道の維持管理レベル、氾濫ブロック内の将来の土地利用の変化、氾濫ブロック内での被害低減対策による効果等のモデル化手法について、各種氾濫被害低減対策の検討・分析手法の開発を進め、想定外を可能な限り少なくした洪水被害低減対策を促進する必要があると考えられる。

謝辞：モデル河川のデータ提供及び現地調査にご協力いただいた地方整備局等及び関連する河川事務所等の担当者の方々に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適応した治水対策検討小委員会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し減災に取り組む社会へ～中間とりまとめ、2015。
- 2) 服部 敦・板垣 修・土屋修一・加藤拓磨・藤田光一：気候変化の治水施策への影響に関する全国マクロ評価、河川技術論文集、第18巻、pp.481-486、2012。
- 3) 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、第749号、pp.II-188-II-203、2013。
- 4) 国土交通省河川局治水課：浸水想定区域図作成マニュアル、pp.7、2005。
- 5) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル（案）、2005。
- 6) 国土交通省水管理・国土保全局：水害の被害指標分析の手引（H25試行版）、2013。

(2015. 4. 3受付)