

## 2.3 日本における気候変動適応策検討のポイント

### 2.3.1 概観

#### 2.3.1.1 我が国の治水に関わる基本的状況

第Ⅱ部2章3節に入るに当たって、最初に、我が国の治水に関わる基本的状況を踏まえ、日本における気候変動適応策を検討する上での論点を整理し、2.3.2以降に続く内容の位置づけを明らかにしておく。

まず、図-Ⅱ.2.3.1.1を用いて、治水に関して我が国が置かれた状況を概観してみる。日本においては、先進諸国の中でも有数の激しい洪水外力を受ける自然地理的状況に置かれる中、高度な土地利用がなされている氾濫原の治水安全度を必要なレベルで確保するため精力的に河川整備がなされ、苛烈な洪水外力と高度に整備されつつある治水施設がせめぎ合う構図の下、一定の治水安全度を確保するに至っている。しかし、近年も激しい水害に見舞われることに現れているように、目標とする治水安全度に対して（それは先進諸国の中で決して高いものではないが）、実際の安全度は未だ十分とは言えないレベルにとどまっている。そのため、下図において河川整備〔既実施〕に対し河川整備〔計画〕が有意な割合で残り、その完遂に向けての取り組みが続けられてきているところである。

ところが、第Ⅱ部2.1.2、2.1.3で述べたように、気候変動によりたとえば豪雨量が現在気候に対して $\alpha$ 倍になり、それにしたがって洪水ピーク流量が $\beta$ 倍になることで、気候変動影響がなくても今後まだ投じる必要のある河川整備の労力 $W_p$ が、 $W_f = \gamma W_p$ に増大してしまう。これは、いわば、河川整備という営為に関する“逃げ水”的状況の出現と言えよう。そして、増大率が、 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ になるにつれ増幅する特性があること、さらに、氾濫可能性に関する倍率 $\varepsilon$ の増大率は $\gamma$ のそれよりさらに増幅される特性があることは、やはり第Ⅱ部2.1ですでに述べたとおりである。

加えて、そもそも洪水外力は自然の極端現象であって、その上限が河川整備に関わる治水安全度目標（たとえば超過確率年200年など）にとどまるという合理的理由はなく、気候変動影響の度合いに関わらず、低頻度ではあるが起こりうる大規模洪水に対する治水方策を考えることの重要性は今日ますます高まっていると言える。

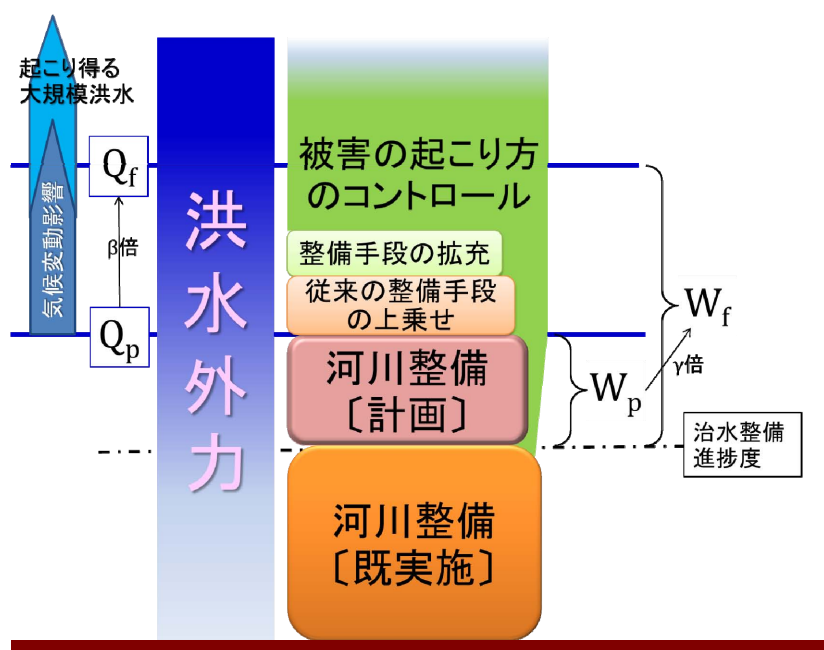


図-Ⅱ.2.3.1.1 治水に関して日本が置かれた概況の説明

以上を模式的に表現した図-Ⅱ.2.3.1.1において、気候変動適応を含む治水方策について議論してみる。気候変動により豪雨したがって洪水外力が大きくなったのであるから、それに応じて従来の手段による河川整備を上乗せしていこうという考えがまず出てこよう。しかし、これから行うべき河川整備を量的に拡大することは種々の制約条件から必ずしも容易ではない。この点について代表的例示をするなら、2-4割のピーク流量増を吸収するために、現在の計画よりも河道の流下能力をさらに増大させること、あるいは洪水ピーク流量の低減をさらにはかることが必要となり、これは実効可能性という点で高いハードルである。流下能力の増大というと、大規模な引堤等に頼らなくて済むという観点から、また、しばしば数字上は流下能力増が説明できてしまうことから、河道の掘削という手段に傾きがちであるが、流下能力の2-4割増に見合う河道掘削を現計画からさらに行うことが広い意味の河川技術として本当に妥当であるのか・どこまで可能であるのか、という技術的問いにしっかり答えることが必要となる。

従来の手段による河川整備を上乗せするという選択肢については、気候変動の予測に伴う不確実性の取り扱いも関係してくる。河川整備の着手から治水効果発現までに多くの場合長時間を要することを踏まえ、不確実性を持つ情報に基づく適応策（治水）のための先行投資をどのような考えに基づき実施するか？という課題は、いわゆる“後悔しない施策”の具体的あり方を見定めることと相まって重要なポイントとなる。 $\alpha$ の増加率に対して $\gamma$ や $\varepsilon$ の増加率が増幅して伝搬するという上述の特性は、 $\alpha$ に関する少しの予測の幅が、実施すべ施策量や治水安全度への影響度を大きく変えることを意味することから（2.1.3.4参照）、施策実施の判断に関わる不確実性が豪雨に関する気候変動影響予測の持つ不確実性よりも大きくなることに留意する必要がある。いずれにしても、従来の手段による河川整備の上乗せという方策は検討すべきことの1つではあるが、それだけを考えておけば事足りるわけではないことを、ここで改めて確認しておきたい。

となると、次の展開として、治水安全度を向上させるための河川整備の手段を技術開発等によって拡充（革新というニュアンスも場合によっては含めて）するという方向が出てこよう。たとえば、XRRAINの配備や短時間気象予測の進展など、少し前までは実務上存在しない技術的道具が技術開発により手に入るようになってきた状況において、それらを活用することにより従来の枠組みを超えて治水手段を拡充する方策を追求することは、今後重要となる。河道設計の考え方を新たに構築する取り組み、河道管理の合理化をはかる技術的枠組みの検討などを含め、先端技術を突破口にするものから、確立されたと思われていた技術体系のリノベーションを目指すもの、さらには従来技術の地道な改良の積み重ねまで、様々な切り口からの技術展開が期待される。ただし、こうした方策は、技術開発の成否と一体不可分であり、その追求の重要性は論を俟たないものの、やはり、それに全面的に依存するというスタンスは適切でなかろう。また、「従来の枠組みを超える」という点において、既往の治水施策との整合性を確保するのに新たな検討を要する状況も場合によっては想定でき、その難易にも留意しておく必要がある。

以上から、「従来の整備手段の上乗せ」「整備手段の拡充」を追求することもそれぞれ重要であるが、その上で、「被害の起こり方のコントロール」という方策に改めて力を入れていくことの重要性に行き当たる。そして、これら3つは、いずれかを選択するというのではなく、当該河川・流域等の状況や技術開発の進捗を見据えて適切なバランスで並行的に実施していくという考え方を基本にすることが肝要であろう。その中でも「被害の起こり方のコントロール」は、洪水外力の規模や河川整備の進捗段階によらず、すべての局面で考慮すべき方策に位置づけられるものと考えられる。そのことを意識して、図-Ⅱ.2.3.1.1は、「被害の起こり方のコントロール」がカバーする範囲を広く描いている。ただし、「被害の起こり方のコントロール」の具体的中身や実質的な有効性を見定めるにはまだ議論・整理が必要と考えられる。そこで、次項では、このための題材を提供してみる。

### 2.3.1.2 被害の起こり方のコントロールについての議論

#### a) 被害の起こり方のコントロールに関する包括的表現

「被害の起こり方のコントロール」を包括的に表現する1つの方法を図-Ⅱ.2.3.1.2に例示する。ここで横軸は豪雨規模（超過確率年）、縦軸は被害（想定）を表す。この図に示される【被害～豪雨規模（超過確率年）関係】を“制御”することが「被害の起こり方のコントロール」であると表現することができよう。この場合、この関係線が立ち上がる場所の横軸の値、すなわち無被害で済む可能性（確率）を増大させることも包含して表現される。さらに言うならば、「被害の起こり方のコントロール」とは、【被害～豪雨規模（超過確率年）関係の制御】と【無被害で済む可能性（確率）の拡大】の“合わせ技”と位置づけることができる。

ここで縦軸の値については、河川区間ごとでなく、まずは、当該水系で生起する全被害の推計に基づき検討することを想定している。さらには、同一の豪雨イベントによる洪水被害エリアが複数の水系からの氾濫に関係するならば、水系単位にこだわることなく複数の水系の洪水被害を集計することもありうる。その上で、被害の種別を1つに絞って縦軸を表現することにこだわる必要はなく、むしろ、重要な複数の被害種別で縦軸を表現し、それぞれごとに被害～豪雨規模関係を把握することが重要と考えられる。この場合、人的被害と金額換算できる被害がまずは代表的な軸としてあげられる。なお、被害の起こり方のコントロールが主眼であるから、この図から豪雨規模について積分して包括被害期待値に一本化して検討することは、本旨から外れることになる（あくまで“関係の制御”に力点を置くもの）。なお、ここで「河川区間ごとでなく、まずは、当該水系で生起する全被害の推計に基づき検討」としたが、上記関係が作られている要因の分析や、どこに施策を展開するとどのように関係が変わり、どこにどのように起こりうる被害が軽減されるか？などの応答関係を具体的に検討することは当然必要となり、具体の施策検討は積み上げにより行うことになる。

横軸の豪雨規模（超過確率年）の検討範囲については、たとえば次のような値を考慮しつつ、河川整備についての治水安全度目標を内数に含む幅広い外力範囲を設定することが必要であり、その標準的決め方がポイントとなる（イ）既往最大、（ロ）整備計画目標、（ハ）整備方針目標、（ニ）著名豪雨（地理的類似性を持つ他流域での豪雨も場合によっては含める）、（ホ）歴史上の大洪水を引き起こした豪雨、（ヘ）可能最大豪雨（手法の違いによる数値の違いの意味を踏まえることも重要になると考えられる）。この中でも（ニ）（ホ）（ヘ）は、考慮すべき最大クラスの豪雨の設定に密接に関係してくる。

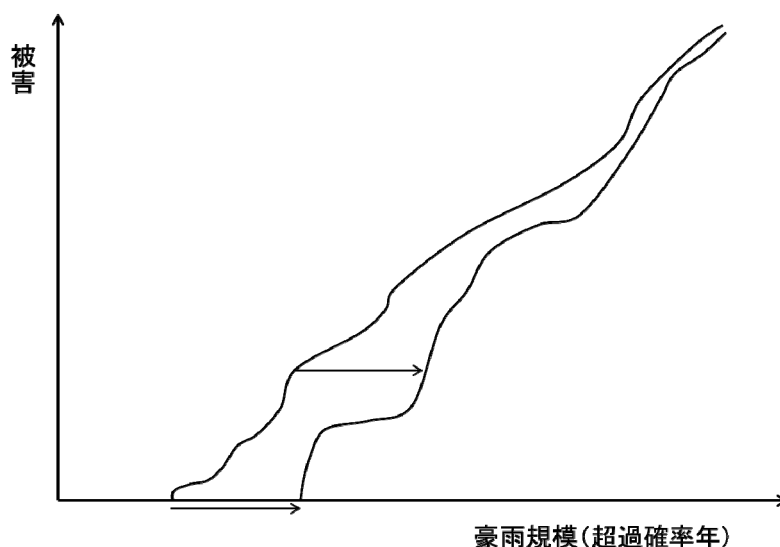


図-Ⅱ.2.3.1.2 被害～豪雨規模関係による「被害の起こり方のコントロール」の包括的表現

## b) 被害～豪雨規模関係の制御に関する目標設定について

仮に、図-Ⅱ.2.3.1.2 に示した関係を制御しようとする場合、その目標設定が必要となる。先に述べたように、無被害で済む可能性（確率）は、この関係制御においても引き続き重要な目標となるが、それに加えて、関係全体を制御する際の目標設定も必要となってくる。これについては、さらに議論や検討を積み重ねる必要があるが、そうした作業を行いやすくするための仮説的案として、とりあえず次のようなものが考えられよう。

- 整備段階を上げる際に、被害～豪雨規模（超過確率年）関係のいかなる場所でも、整備後の被害想定が整備前を上回らない。
- 被害～豪雨規模（超過確率年）関係の傾き（豪雨規模の増加に伴う被害増大の度合い）が  $A_{CR}$  以下
- Tipping point（ある外力を超えると被害の様相が急激に深刻な方向に変化するような特性を持つ閾値）が存在しない。
- 豪雨規模（超過確率年）毎に定められた許容最大被害値を上回らない。

上記には、 $A_{CR}$  や Tipping point、許容最大被害値など、新たな規準としての意味を持ちうるものを含み、その妥当性、実効性などについて様々な観点からの検討が必要となり、すぐに実現につながるものではないが、このような具体的な考え方を材料に目標設定の考え方を検討していくことは、技術政策検討の手法として必要と考えられる。

## c) 各種方策を組み合わせた被害～豪雨規模関係制御のイメージ

ここではまず、被害軽減方策を表-Ⅱ.2.3.1.1 のように類型化してみる。ここにある各類型に属する施策の適用により図-Ⅱ.2.3.1.2 に示した関係がどう変わるかを調べることが、被害～豪雨規模関係制御に向けての技術検討を行う手順になると考えられる。すなわち、当該水系について、各類型の施策を組み合わせて適用することにより被害～豪雨規模関係がどのように改善されるかを、種々の施策群（組み合わせ）代替案について算定、比較し、合わせて技術面、コスト面、制度面、要する時間、社会的側面などから実行可能性や不確実性を吟味するという手順のイメージである。こうした検討に用いる基盤図としての活用を意図して、各類型の施策の組み合わせ効果を総合的に表現する図を図-Ⅱ.2.3.1.3 に模式的に示す。

この図から、施策群の適用によって無被害で済む可能性がどの程度拡大するかを把握でき、さらに、各規模の豪雨外力に対して、どの施策によりどのようなレベルの防災・減災がなされ、なお残る被害がどのようなものかを一括して把握することができる。表-Ⅱ.2.3.1.1 中のベストエフォートの施策の記述にあるように、施策の類型によって効果発揮の確実性が異なっており、そうした違いを表現することができるようになれば、さらに多面的な施策群吟味が可能となろう。また、図-Ⅱ.2.3.1.3 を基にすれば、ある豪雨規模に対して起こりうる被害について、施策群遂行に伴う時間的変化を表現することも可能であり、これは、被害制御に時間軸の観点を取り込む際に有用となるはずである。

気候変動影響による豪雨増は、被害～豪雨規模関係図における各類型の施策効果総合表現図において、たとえば図-Ⅱ.2.3.1.4 のように、関係線を左方にシフトさせることで表現できる。影響予測の不確実性については、この図中の上下にあるように、シフト量に幅を設けることで最低限の考慮ができる。この図から、気候変動影響によって防御状態がどのように退行するか、影響の出やすい局面と比較的にくい局面がどのようになっているか、などを読み取ることができる。当然のこととして、被害～豪雨規模関係が“寝ている”と影響は出にくく、立っていると影響が出やすい。気候変動により、場合によっては、類型Ⅰの施策による防災効果が全て失われ、さらに後退する（現状よりも被害が大きくなる）ことも起こりえるが、そうした時に類型Ⅰ以外の施策群が組み合わせられていると、気候変動影響が相当程度緩和される可能性があることも、こうした図から把握できる（図-Ⅱ.2.3.1.5 参照）。

表-Ⅱ.2.3.1.1 治水に関する被害軽減方策の類型化例  
 ー被害～豪雨規模関係制御の具体像を議論するためにー

類型 <sup>欄外注1)</sup>	内容説明
I	河川での施策；既存手段による河川整備→河道改修、放水路、洪水調節施設（ダム、遊水池、防災調節地など）
I+	河川での施策；たとえば、積極的河道管理により河川の流過能力を極力高く保つ、あるいはその縦断変化を適切なものにする方策を付加的に講じるなど。「整備手段の拡充」の範疇。
I++	河川での施策；河川の施設を対象としたベストエフォートの手法 <sup>欄外注2)</sup> の適用（施設への粘り強さの付与、気象予測に基づくダム操作など）。「整備手段の拡充」の範疇。
I+++	河川での施策；危機管理措置。たとえば、各種水防、破堤箇所 <sup>欄外注2)</sup> の緊急締め切りや破堤口拡大の緊急抑制工、氾濫水排除のためのポンプ稼働、氾濫流緊急制御工法など。
II	流域（降雨から洪水への流出エリア）での施策で、洪水流出の低減につながるもの（ベストエフォートの <sup>欄外注2)</sup> 側面を持つものを含む）
III	氾濫エリアでの施策（施設や土地条件の整備、状態制御が主）；たとえば、二線堤による氾濫制御、深刻な氾濫が生じる場所の土地利用を被害が大きくなりにくい、あるいは被害から回復しやすいものに制御する方策、氾濫時にそこに居ても深刻な被害を受けないような建築構造・諸元にする方策、氾濫時に近場に緊急避難ができる地物を配置する方策、ライフラインや重要な公共サービスに支障が出ない、あるいは復旧しやすいようにする方策など。いずれも、氾濫エリアの物理的、施設的、施設管理面での条件を整えることに属するもの。
III+	氾濫エリアでの施策（主に人間の行動が対象）；たとえば、情報の提供を受け適切な避難を行うなど、人的被害の回避や軽減につながる人間の行動が生じるようにする方策。

注1) 各類型は互いに独立しているわけではなく、相互に補完する関係になることもありうる。

注2) 「ベストエフォートの」の意味：所定の機能の確実な発揮を前提とする類型Iの方策と異なり、有意な効果の発揮を期待できるが、場合によっては効果発揮が減退するなど、状況によって発揮される効果が変わってくるという特徴を持ち、大きい効果を発揮する場合があることに期待して講ずるという性格を持つもの。こうした方策を適用することの可否や位置づけについての議論も必要。

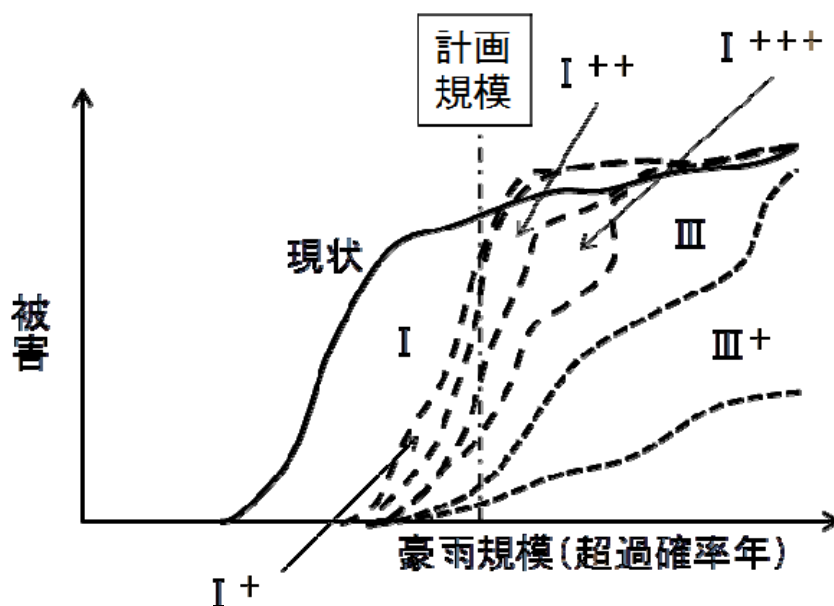


図-Ⅱ.2.3.1.3 被害～豪雨規模関係図における各類型の施策効果の総合表現（模式的例示）

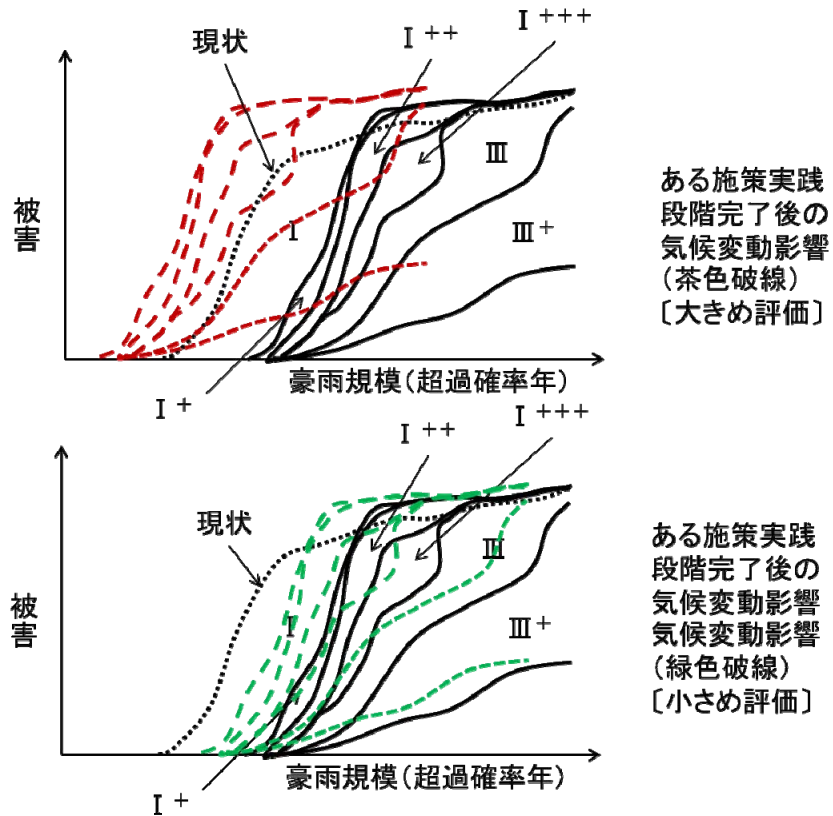


図-Ⅱ.2.3.1.4 各類型の施策効果の総合表現図における気候変動影響の表現

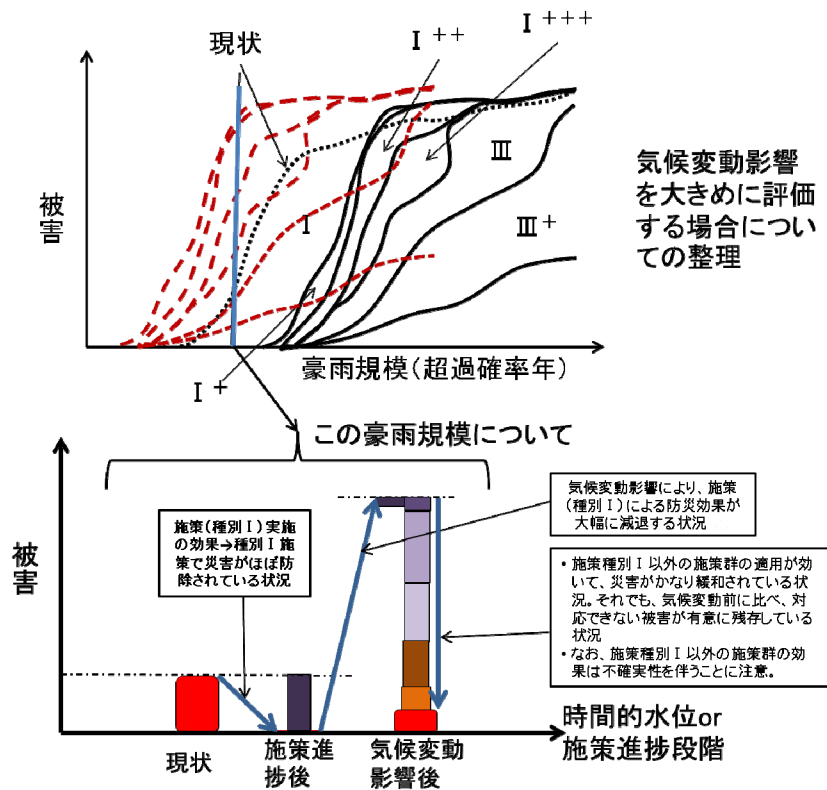


図-Ⅱ.2.3.1.5 ある豪雨規模に着目した被害対応状況と気候変動影響の表現

### 2.3.1.3 論点の整理

2.3.1.2において模式的に示した検討を、技術的裏付けをもって個々のケースで具体的に行えるようになれば、今まで取り組んできた治水施策を包含し、気候変動影響や超過洪水の対応を見据えた治水施策の広範な検討が可能になると期待できる。そこで、2.3.1.2の技術検討の内容を実践する上で何が今足りないか？という観点から、課題および論点を整理し、2.3.2以降の内容につなげることとする。

#### ●河川整備の手段の拡充の展望

手段拡充は表-II.2.3.1.1においてはI+、I++、I+++にあたり、その可能性と限界の把握は、逆に手段拡充の必要性を具体的に認識させることにつながり、気候変動適応のための新たな技術展開につながっていく。この後の2.3.2では、河道設計・管理とダムからのアプローチについて、技術検討の現状と展望を述べることとする。

#### ●設計以上の外力を受けた治水施設（群）の（システムとしての）機能発揮・喪失状況に対する理解増進と必要な対応策の検討

従来よりも大きな外力が治水施設に作用し、ある場合には設計上の外力を上回ってしまうことが気候変動によって現気候下以上に起こりやすくなる状況を考えざるを得ない。したがって、適応策を考えるに際して、施設の「壊れ方」と「機能維持→喪失の過程」を理解し、それを表現する技術が求められる。ここでは、防災・減災施設群のシステムとしての総合的な機能発揮・喪失に関わる挙動を分析することも大事な課題になる。そして、このような検討は、「被害の起こり方のコントロール」の施策積み上げのために必須である。この後の2.3.3では、河川水系において堤防からの氾濫（破堤氾濫を含む）に着目し、堤防のシステムとしての氾濫防止機能の喪失状況を踏まえた氾濫と被害の起こり方のシナリオ設定法について検討した内容を述べる。また、ダムの洪水調節についても、設計以上の外力を受けた場合の挙動についての検討の要点を述べる。

#### ●被害の起こり方のコントロール（緩和、靱性の付与）というアプローチの実践法

2.3.1.2の主題であった「被害の起こり方のコントロール」については、概念レベルの重要性については論を俟たないものの、それをどのように実践するかについては、まだ多くの検討が必要である。本課題は、気候変動影響にかかわらず本質的に重要なものであるが、気候変動がもたらす外力増が否応なしにこのアプローチの強化を促進させる明確な因子になっており、また、このアプローチが適応策検討全般に関わってくる。この後の2.3.4では、氾濫のさせ方をコントロールするというアプローチを実践する上での要件と論点の整理を行い、さらに2.3.5では、それも包含して、超過洪水を伴う氾濫を取り込んだ包括策を具体化するための道筋と課題について述べる。

#### ●不確実性への対応

外力増やその治水施策への影響度が少なからず不確実性を伴うことは、気候変動適応の特質を代表するものと言える。このことが適応策検討にもたらす意味は複雑であるが、後悔が生じる構図の単純な説明例を持ち出し、議論の若干の整理を試みたい。

図-II.2.3.1.6は、図-II.2.1.3.28のうち、河川整備労力の変化率だけを抜き出して、豪雨変化率との関係を模式的に表示したものである。豪雨変化率の予測には幅が設定されている。ここで、豪雨予測幅の中央値を選んで、それに対応する整備労力の増分を加えるという適応策を実施したとする（図中の○印）。その後、気候変動が起こり、実際の豪雨量変化率が大きい側に振れたとすると、○の右側の赤点線のゾーンで示される「もっとやっておくべきだったと悟る」後悔や、同じく○の右側の黄二重線のゾーンで示される「ちょっとした労力増をケチったことのツケの大きさを悟る」後悔が生じ得る。逆に、実際の豪雨量変化率が小さい側に振れたとすると、○の左側の緑二重線で示される「やりすぎて無駄だったと悟る」後悔が生じ得る。前二者の後悔を避けようとする、○の設定位置を予測幅の右方にずら



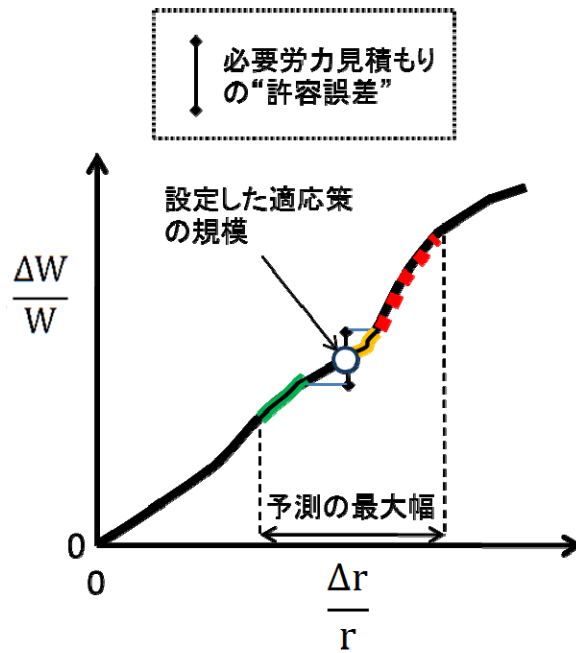


図-Ⅱ.2.3.1.6 予測の幅により“後悔”が生じる構図の説明例

すことになるが、その場合、三番目の後悔が生じる可能性が増大してしまう。

不確実性への対処法として、・気候変動の出方がはっきりした時点で適応策を講じる、・適応策を将来時点で実施することが種々の点で高コストを伴う、あるいは時間を要しすぎて適応に間に合わないことが考えられる場合については、そうしたことが生じにくくする事前措置を予め施しておく、というアプローチが当然有力となる。たとえば、2.2.3.3で紹介したドイツにおける適応策の考え方がこれに当たる。このような方針が実効的となるためには、事前措置のコストを（適応策本体に比較して）小さくできること、気候変動を探知してからのアクションで間に合うことの担保、気候変動を的確に探知できること、が要件となる。このうち3番目については、日本の治水目標水準のようにある程度大きな豪雨（したがって低頻度）が対象になっている場合に、たとえば、観測されたデータから低頻度事象の生起の変化を適応策が間に合うタイミングで探知できるのか？という技術課題に突き当たる。ここが、同じ気候変動でも平均的パターンの変化を扱う場合との本質的な違いと言える。

以上に述べたような不確実性への対応に関する論点と課題を、この後の2.3.6でさらに整理する。



## 2.3.2 河川整備手段の拡充の展望

### 2.3.2.1 河道設計・管理からのアプローチ

河道流過能力の積極的な拡大を、環境機能の向上、河道維持管理の軽減を考慮しつつ図っていく河道設計・管理の方法を検討する際には、基本的に以下のことが重要になると考えられる。

- 河道の形状・変化の仕方を司る「仕組み」を踏まえた河道設計法。
- 目先の河道応答、それを包含する、より巨視的な現象を見据えた河道設計法。
- 実現すべき「河道形状」を具体的に示せる河道設計法。
- その先の河道管理を考慮した河道設計法。
- いわゆる「二極化した河道」を再度平坦化する設計で行けるのか？ 河積拡大を行う際の拡幅と掘り下げの依存度比をどう決めるか？ など、実際的な技術判断を直截に下せる河道設計法。

これらに関する論点を、図-Ⅱ.2.3.2.1に示す3つの側面から以下に整理する。

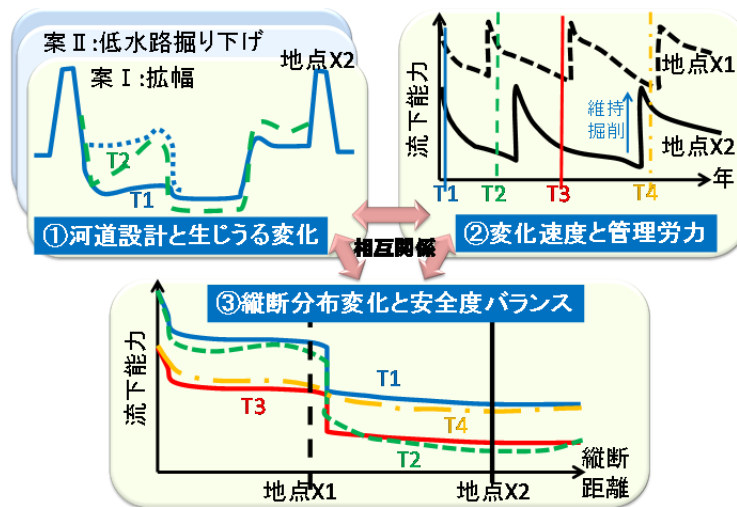


図-Ⅱ.2.3.2.1 河道設計・管理手法の向上に関わる3つの側面

#### a) 論点①：河道設計と（それにしたがって整備された河道に）生じうる変化

- 「安定河道」の工学的な意味：そのコンセプトは河道設計にどのように役立つのか？
  - そのものの定義は？ 自然河川が自己形成する河道？ 変化が小さい河道？ 形状変更してもまた元に戻る河道？
  - 治水で重視される計画規模の大出水時における「安全」と同義なのか？
  - それだけでないとしたら、他に意味があるのか？ 例えば、それを基準形状(テンプレート)として、現況や設計した河道との差異(ズレの大きさと場所)を調べることで、生じうる地形変化パターンとその進行速度が定式化できる、など。
- 「河道形成流量」：平均年最大流量など代表水理量で河道は設計できるのか？
  - 川幅、砂州形態、局所洗掘深、河道の安定性(改修前後の摩擦速度の変化)などの観点からそれぞれ考えるべき流量があるのか？
- 「土砂供給量」を明示的に河道設計に組み込む必要はないのか？
  - 河道縦断勾配と河床粒径がその代替指標として役立っていた？
  - しかし、縦断形状と河床材料が有意に変化する状況も生じており、その場合、代替指標の有効性は薄れる？
- 「河道横断形状」を保ったまま掘り下げれば、その河道も安定か？

- 河道構成材料（地表と地下）が、鉛直方向に一様かどうかがキーポイント。
- 河道横断面図に、横断形状を表す「線」だけでなく、その地質構成を表す「色分け」も示すことが重要。
- ただし、それを河道設計に生かす技術が未熟。特に、未固結、軟岩が露出する場合。
- 掘り下げること、大出水時にこれまで経験のない大きい水深（流速）が作用するが、その場合にも「安定」かの技術判断が必要となる可能性。

#### b) 論点②：変化速度と管理労力

- どこまで河積を大きくできるか？ それを決める条件の一つとして「河積を維持」できるかが重要
  - マクロには、「再堆積の速度 vs 維持管理に費やせる労力」のバランスが主要な判断要素。
  - 論点①と関連：堆積速度を小さくできる（「安定」した）河道設計が重要な所以がここにある。
  - 大洪水時（洪水中）に生じうる堆積で河積が不足しないことも大事な要件。
- 現実的な点検・判断・対策のスキームで管理できる河道を設計すること
  - 再堆積量(河積減)がごく軽微と見なせるほど頻繁に維持掘削するのは、実務的には必ずしも容易ではない。
  - 次の維持掘削実施までの期間内に堆積しうる分だけ、あらかじめ河積を大きめに確保しておくという「河積マージン確保」の考え方が必要になるのではないか？
  - この「量」を河床変動計算で推計し、維持管理の実行可能性判断と、河道形状の設定に反映することを、河道設計項目として取りこむべきではないか？
- 樹木繁茂など粗度管理も上記の河積の議論と同様に設計に取り込むこと
  - 伐採後の樹木繁茂の進行速度（樹高、群落面積などの増加速度）が直接的に設計に関わるパラメータ。
  - これらが河道形状、洪水による攪乱、伐採時の工夫（例えば抜根）によってどの程度変わらうか？の知見を蓄えて設計に反映することが重要。
- 掘削・伐採の頻度・範囲を決める際には、環境への影響（正負の両面で）を評価すること。
  - 保全箇所を直接改変せざるを得ない影響と、反面、洪水の代替として攪乱を生じさせる好影響の両面から評価することが大事。
- 上記のような、より精密に管理を考慮する河積増が、結果的に所定の流下能力の確実な保持だけでなく、 $+\alpha$ の結果を持ち得、これが良い側面だけとは限らない場合もあることへの配慮（論点③につづく）。

#### c) 論点③：縦断分布変化と安全度バランス

- 流下能力の縦断分布（上下流バランス）をどのように設定すれば、現況の実力（HWL以下で流せる洪水の規模）や計画規模を超える洪水時の氾濫被害を低減できるか？
  - 氾濫生起特性を組み込んだ河道計画のあり方を検討する場合、主テーマの1つになっていく可能性。
- その上で、論点②の河道変化速度を織り込んだ、より精密な河道設計・管理の下で、さらに、水系全体として氾濫被害リスクを大きくしない賢い管理手法を設定しておくことが重要となるかもしれないが、このような「複雑な」管理が実務として実施可能か？
  - 変化速度大かつ維持管理実施頻度小だと、管理のための河積マージンを大きく設定する必要がある。この場合、結果として、河道管理実施と洪水生起のタイミングによっては、上下流のバランスに大きなズレをもたらす可能性が出てくる。
  - とすれば、変化速度を小さくし、適度な管理頻度にすることが、上下流バランスの取りやす

さを確保する上で重要ということになる。

- この観点で、追求すべき管理法が論点①の河道設計とも結びついてくる可能性が出てくる。
- 河床変動計算・樹木繁茂推計を、上記のような氾濫生起特性を組み込んだ河道設計において反映させる方法
  - この目的での各計算の精度・確度を見極めた上で、どのような検討手順とするか？ バランスのズレ方をどのように推計するか？
- 計画・設計→維持管理への受け渡し
  - どこに詰め切れなかったことがあるか？を明確にし、その改善のためにすべきことを管理に受け渡す。その結果を改めて計画・設計に返す。
  - このサイクル（PDCA 型管理）で改善していく仕組みを本格化させる。

### 2.3.2.2 予測雨量を活用したダムによる洪水調節操作手法の高度化

今後気候変動に伴って豪雨の規模が増大すると、ダムの治水施設としての役割・重要性はますます高まると考えられる。しかし、既存ダムにおいて豪雨の規模が増大化すると、現状の容量配分や規則に基づいて操作を行う限り、各ダムの計画で想定している規模以上の豪雨が発生するとダムはある段階から流入量=放流量のただし書き操作を行うことになり、治水効果が見込んでいたものから減じる。そこでダムによる治水機能の向上を考えようとした時に、新規ダムを建設することは選択肢ではあるが、ダムサイトとして適切な場所が徐々に減っていることおよび財政的制約を抱えているため、容易ではない。そうすると、既存のダムにおいて洪水調節能力を高めることも考えていく必要がある。既存ダムの洪水調節能力を向上させる手段は、「洪水調節操作手法の高度化」および「既設ダムの再開発」の大きく二つに分類される。さらに近年の「洪水調節操作手法の高度化」に関する検討は予測雨量の活用したものが主となっていることから、ここでは「予測雨量を活用したダムによる洪水調節操作手法の高度化」および「既設ダムの再開発」について述べる。

なお、このうち前者については、1.1.5においてアンサンブル予測雨量を用いる方法の研究成果を詳述した。ここでは、それも含め、他の研究・調査等の情報もレビューしながら、この技術の展望と課題を述べることに重点を置く。

ダムにおける出水時の操作を一般的な実施過程に従って段階的に分類すると、図-Ⅱ.2.3.2.2に示すように1) すりつけ操作、2) 水位維持操作、3) 洪水調節操作、4) 異常洪水時操作（ただし書き操作）、5) 後期放流操作、6) 予備放流・事前放流操作に分類される。各操作におけるポイントや課題などはダム技術センターおよび鳥居の文献を参考にしていきたい（（財）ダム技術センター2005a、鳥居2012）。現在までに行われている予測雨量を活用したダム洪水調節に関する代表的な研究・取り組みとして、5)後期放流操作における利用と6)予備放流・事前放流操作における利用があり、ここでは、1.1.5に示した国総研の研究にも触れながら、検討状況を全体的に整理しつつ今後の課題について述べる。

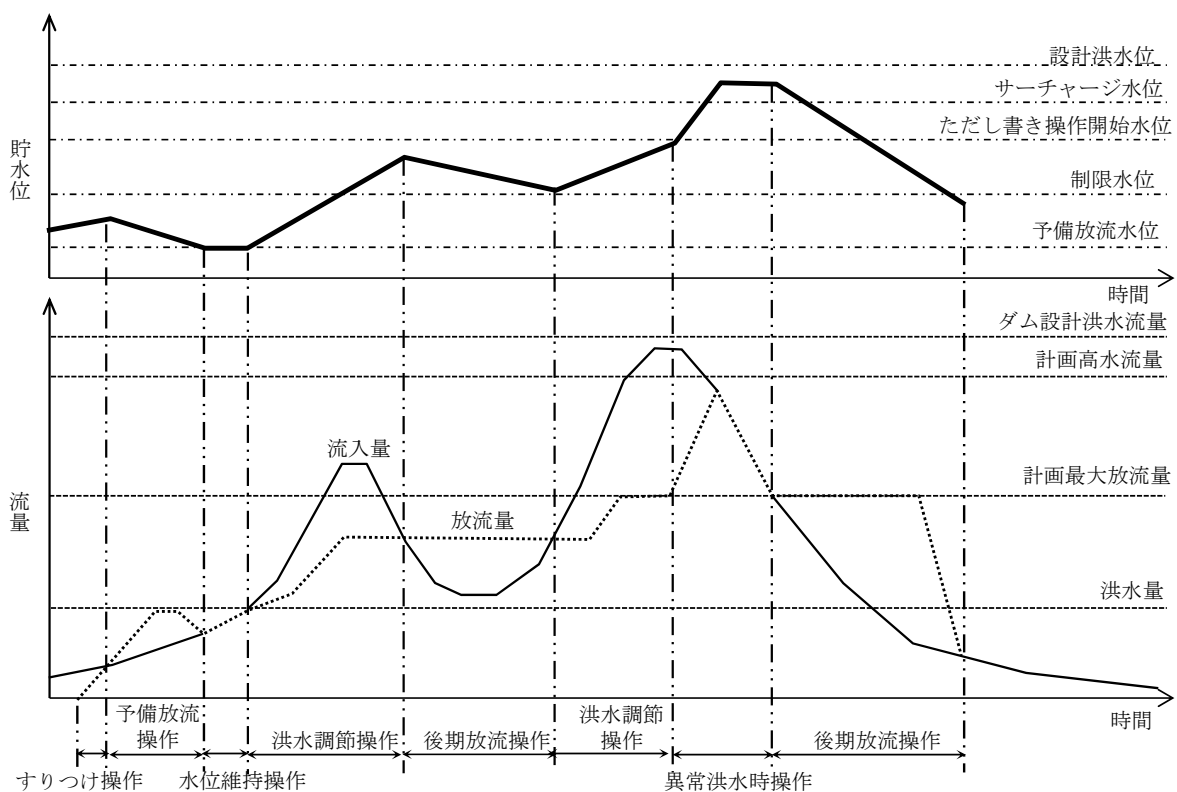


図-Ⅱ.2.3.2.2 出水時のダム操作の流れ(予備放流方式の場合)((財)ダム技術センター2005a)

#### a) 事前放流における予測雨量活用に関する研究事例

最初に、予測雨量を活用した事前放流に関する研究事例について紹介する。事前放流におけるポイントは、これから迎える洪水に対して可能な限り容量を開けるために現時点で貯留されている利水容量を洪水前に放流し、放流した利水容量は洪水によって確実に回復させなければいけないことである。利水容量を放流したが、洪水の規模が小さいまたは洪水が実際には発生しなかったために利水容量が回復しない場合、利水の共同事業者に対して支障を与えることとなり、このような事態は避けなければならない。このように、事前放流操作は確実に回復するが見込まれる利水容量を放流することが基本であるが、現状の予測雨量の精度が事前放流を実施するための十分な精度には至っていないため、現在までに行われている事前放流は回数や規模の面において限定的である。そのような背景の中、秋葉ら、戸谷ら、下坂ら、腰塚らは流入量特性を活用した事前放流量決定手法を提案している（秋葉ら2004、戸谷ら2006、下坂ら2009、腰塚ら2006）。その手法では、過去の洪水データから低減開始時の流入量（または累積降雨量）とそれ以降の総流入量を把握し、実際に洪水が発生した時にその時点の流入量を基にしてその後の総流入量を推定し、その分の利水容量を事前放流するものである。これにより、利水側に支障を来すことなくダム洪水調節容量を洪水時に一時的に増加させることができるようになる。上記手法は当初は予測雨量を利用しないで、実測雨量および実測流量からその後の総流入量を推定していたが、北田らはその手法に予測雨量として気象庁の降水短時間予報（30分間隔で発表される、6時間先までの1時間雨量）を組み合わせた事前放流量のシミュレーションを実施している（北田ら2010）。そこでは、予測雨量を組み合わせた事前放流シミュレーションの事例として草木ダムの2007年9月台風9号を対象にシミュレーションを実施している。その結果、現行操作規則ではただし書き操作に入ってしまうのに対し、予測雨量を組み合わせた流入量特性を活用した事前放流操作を行う手法では、ダム貯水池への流入がピークを迎える前に十分な事前放流を行い、空き容量を大幅に増大させて洪水を迎えることでただし書き操作を回避することができた（図-II.2.3.2.3）。また、洪水終了後には利水容量も回復している。今後、事例数を増やすこと操作規則との整合等を検討することが望まれる。

#### b) 後期放流操作における予測雨量の活用事例

上述の流入量特性を活用した事前放流操作手法はまだ研究段階である一方で、5)後期放流操作においては実際に予測雨量を活用してダムの操作を実施した実績が開始している。ダムにおいて後期放流操作に入る段階であっても、流域の雨の偏在性によっては下流の流量は支流域からの流出の影響を受けて安全性が低い場合が考えられる。このような場合、後期放流操作時に放流量を規定されている流量よりも少ない放流量とすることで下流の安全性を高めることができると考えられる。そのためには洪水後期において、今後ダムに流入すると考えられる流入量が現在のダム空き容量と比較して小さいことを把握して操作を行う必要がある。この操作を行うために予測雨量に求められる精度は、洪水後期における降り終わりの雨量やタイミングに関する精度となる。鳥居(2012)は、気象庁の予測雨量として2007年11月まで運用されていたRSMや現在運用されているMSMについてダム流域について予測精度の検証を行った結果について、MSMの精度がRSMと比較して高いことや、降雨の降り終わりにおいて降り終わりのタイミングや降雨波形について精度が高いことをいくつかの出水事例について紹介している。この「降雨の降り終わりについて精度が高い。」という特性を利用してダムの後期放流操作において規則操作よりもより効果的な洪水調節を実施している事例が既に存在するのでそれを紹介する。

中国地方整備局の平成22年7月13日から14日にかけて発生した洪水では、八田原ダム流域において約180mmの雨量が観測され、「適応操作」を実施した（国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所2010）。「適応操作」とは、下流河川の状況及び今後の洪水の見通し並びにダムの貯留状況等を条件として、下流河川の洪水被害を軽減するため更にダムに貯留する水量を多くする操作であり、この「今後の洪水の

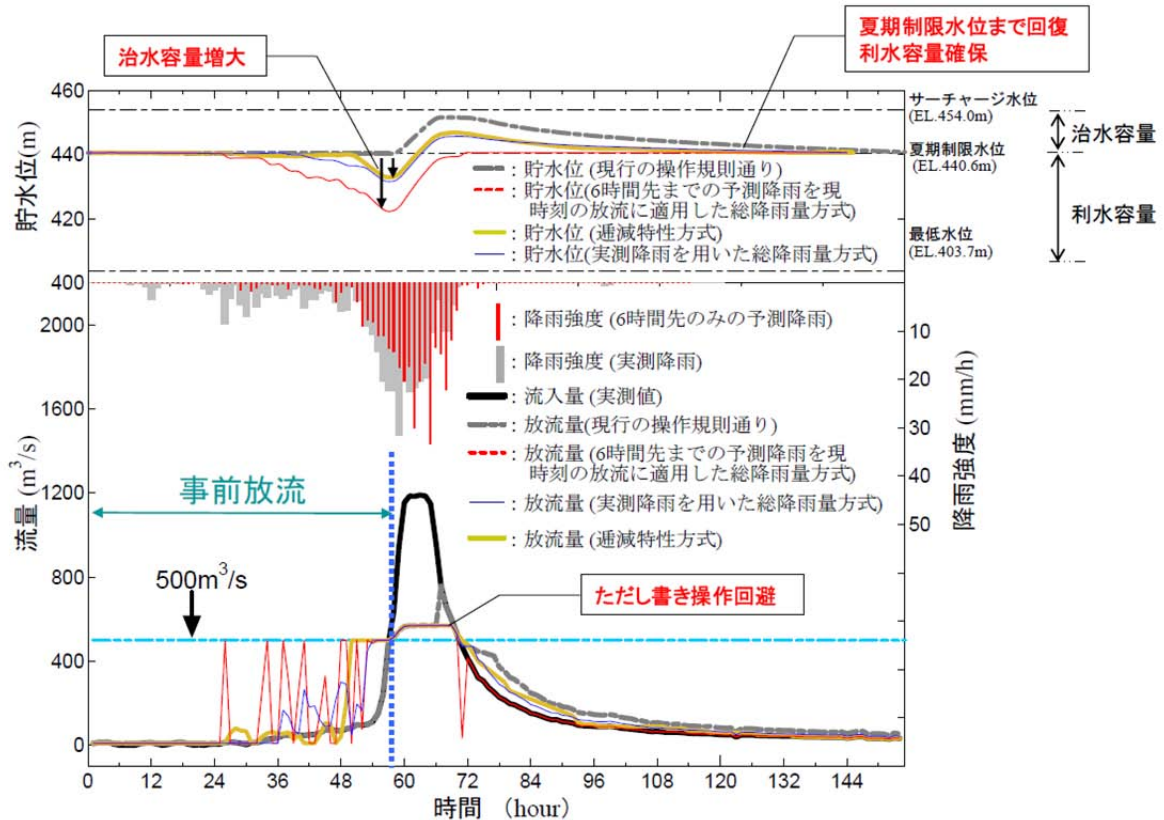


図-Ⅱ.2.3.2.3 6時間先までの降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列（北田ら2010）

見通し」という部分において予測雨量が活用されており、予測雨量を用いて以降のダム流入量を予測し、放流量を決定している。この洪水では、ピーク以降においてはダムの空き容量と比較して予測される雨量が小さいため、規則操作よりも放流量を小さくする（オーバーカット）ことにより、ダムからの放流量を最大約 $138\text{m}^3/\text{s}$ 低減させることに成功した。この操作によって流入量と放流量の差は約 $282\text{m}^3/\text{s}$ となり、下流の目崎地点において約 $55\text{cm}$ の水位低下に成功した（図-Ⅱ.2.3.2.4）。

また、東北地方整備局の三春ダムにおいてもほぼ同様の操作が平成23年9月の台風15号に伴う洪水において実施された。この時、三春ダム下流の阿久津地点で計画高水位を上回り、破堤等の重大な被害が想定されたため、降雨予測およびダムの空き容量を勘案し、全量カットによる洪水調節が実施された。三春ダムの洪水調節によって阿久津地点で約 $0.5\text{m}$ の水位を低減させる効果があったと考えられ、この時通常の規則操作に従って操作した場合は約 $0.35\text{m}$ の水位低減効果があったと考えられる。すなわち、全量カットによる効果は約 $0.15\text{m}$ の水位低減効果であったと考えられる（図-Ⅱ.2.3.2.5）（国土交通省東北地方整備局2011）。



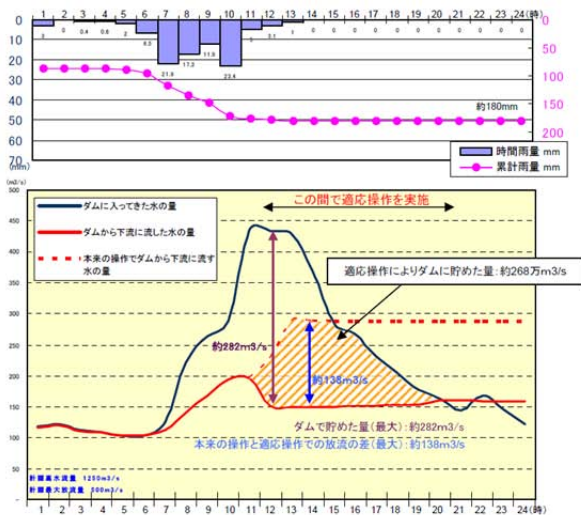


図-Ⅱ.2.3.2.4 八田原ダムにおける洪水調節による治水効果 (H22.7洪水) (国土交通省中国地方整備局 八田原ダム管理所2010)

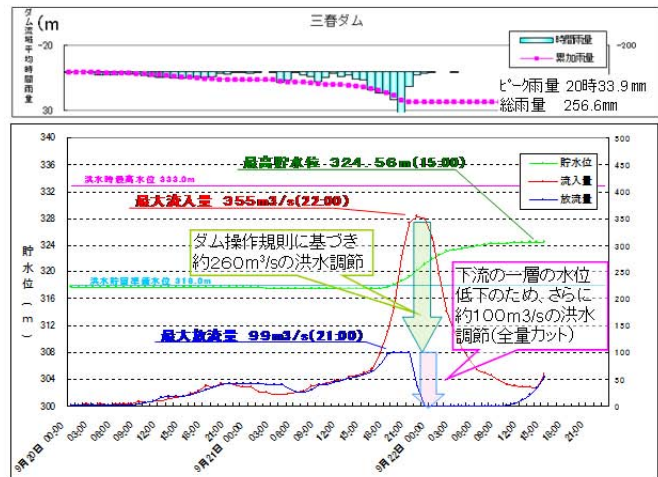


図-Ⅱ.2.3.2.5 三春ダムにおける洪水調節による治水効果 (H23.9洪水) (国土交通省東北地方整備局2011)

### c) 予測雨量の不確実性を考慮したダム洪水調節操作

先述した流出量特性を活用した事前放流量は、基本的には予測雨量への依存性を極力低下させつつも治水に効果的かつ利水に支障をきたさないことを指向した手法である。また、洪水後期のオーバーカットについては、予測雨量への依存性自体は低くはないが、予測雨量の精度が十分に高い降り終わりに的を絞って予測雨量を活用する方法である。流入量特性を活用した事前放流操作においては、事前放流を実施することで洪水調節容量を一時的に増やすことができるものの流入量が洪水調節開始流量を超えた後は規則操作に従うため、ダムにとって大規模な出水に対して効果を発揮するが、流域で大きな出水ではあるが、ダムにとってはそれほど大規模ではない洪水などに対しては規則操作と比較して放流量を下げることができず、下流の安全性を高めることはできない。また、洪水後期のオーバーカットにおいても基本的にはダム地点におけるピークが過ぎた後の操作であるため、下流の安全性を高めるという点でその効果はまだ限定的である。ここでは、「下流の安全性を高めるための操作」という観点に立ち、ダム地点において効果的な洪水調節を行うための予測雨量活用方法について考える。

規則操作よりも効果的にダム地点において洪水調節を行い下流の安全性を高めるためには、洪水の全体規模が把握した上で洪水終了時に洪水調節容量を100%使い切れるような最適放流量を決定することが求められる。そのためには洪水の全体規模をおおよそ把握することができる予測雨量の精度が要求される。現在気象庁から提供されているダム洪水調節に使える予測雨量情報は、GSM84時間予測またはMSM33時間予測である。GSM84時間については、予測先行時間は長いものの空間解像度20kmメッシュと荒いため、特に強い降雨に対して精度が十分ではない。またMSM33時間予測は解像度が5kmメッシュとGSMと比べて細かいものの、先行時間が33時間でありダムの洪水調節において洪水の全体が見通せるほどの先行時間ではない。

また予測先行時間とは別に予測精度の問題がある。ダム管理者は予測雨量の精度が気象予測技術の進歩により日々改善されるのを目の当たりにして、「いつかは予測の誤差がゼロになるのではないか」という期待を抱くものと考えられる。しかし、洪水毎に誤差の傾向が異なっており、予測誤差がゼロになるのは困難であると考えられる。1.1.5においても記したとおり、今後とも予測の精度は向上するものの誤差はゼロにはならないと考え、その立場に立って予測雨量の誤差を想定した洪水調節操作方法を考



えるべきである。そのための手法としてアンサンブル予測雨量を活用したダム洪水調節方法について1.1.5においてその事例を紹介した。そこでは蓮ダムの平成23年台風6号、12号、15号の洪水調節計算事例を紹介し、アンサンブル予測雨量を活用することで、その時の予測の幅に応じて下流のピーク流量を最小にすると予想される最適放流量を機械的に求めることができることを示した。併せてGSM84時間予測を境界値として計算されたアンサンブル予測雨量（WRFを利用）は、84時間先においても一定の精度を有していることがわかり、ダム洪水調節にとって有益な情報を提供しうることを示した。台風6号および15号については規則操作よりも効果的な洪水調節が行えることを示したが、12号についてはGSM84時間予測において洪水の二山目を完全に見逃してしまうため、アンサンブル予測雨量に基づく操作では規則操作よりも下流のピーク流量を増加させてしまう結果となった。これはGSM84時間予測において、台風の進路速度を過大に予測していたため、それを境界値として計算したアンサンブル予測においても実際よりも早く雨が降り止むと予測していたことに起因する。このように、アンサンブル予測雨量の精度は境界値の予測精度に大きく影響を受けるため、実用化に向けては検討事例数を増やすことで課題を整理することが必要である。また、現状ではアンサンブル予測計算に時間がかかるためリアルタイムでの運用に向けた課題整理も行う必要がある。

### 2.3.2.3 既設ダムの再編や再開発の効果

#### a) ダム再開発の必要性

近代的な設計理論に基づくダム建設の歴史を振り返ってみると、明治から大正時代にかけては発電のみのダムが中心であり、さらに第二次大戦の戦前及び戦後の十数年間は、洪水調節と発電を目的としたダムが多い。その後、昭和30年代後半から現在に至るまでは洪水調節、水道用水、工業用水の供給を目的とするダムが数多く建設された。

これらのダムは、いずれも各時代の社会的要請に基づき建設されたものであり、ダム計画にあたっては、目的に合った構造及び形式を選択し、地形・地質及び社会的条件から最も開発効率の高いダムが建設されている。

しかし、ダム竣工後において、その後の社会的要請の変化に伴い、洪水調節機能の増強や、水道用水や工業用水の供給量の増加及び発電機能の増大などの要請が生じ、これらの要請に対応するため貯水池容量を増大し、流水を有効に利用するためにダムの再開発が必要とされた例も多々ある。

また、ダム建設の進展とともに、地形・地質の条件に恵まれたダムサイトは減少してきている。一方、ダム技術の進展は目覚ましく、例えば、ダム建設当時には不可能であった基盤地盤改良が、最近の土木技術によると可能となり、既設ダムのダム高さより十分高いダムの建設が可能となる場合もあり得る。このような場合、新しいダムサイトに新規にダムを建設するよりも、既設ダムを改築する方がより開発効率が高くなることがある。

さらに、我が国は、近年急速な高齢化が進行しており社会資本への投資余力が減少してきていることや近年の自然環境保全に対する社会的要望の高まりから、新規にダムを建設することが困難になってきている。このため、将来の治水・利水の需要に対応するため、貴重な社会資本ストックである既設ダムを効率的に利用することが求められる状況が生じている。気候変動に伴う豪雨の激甚化に備え、既存ダムの洪水調節機能を向上させることを考えると、2.3.2.2で述べたような予測雨量の利用を含めたダムの高度化だけでなく、ダムの再開発による機能向上も選択肢の一つとなる。

以上述べたように、社会的な状況の変化及びダムの設計・施工技術の進展が相まってダム再開発の要望が高まってきている。ここでは、現在実施中のダム再開発事例について、特に治水面に焦点を絞って紹介する。

## b) ダム再開発の種類および現在実施中のダム再開発事例

既設ダムの再開発は、基本的には2つの通りがある。

### 1) 貯水池容量を増大させる方法（ダム技術センター2005b）

### 2) 現行の貯水池の運用を変更する方法

1)の具体的な方法としては、①ダムの嵩上げ、②貯水池の掘削、③取水設備、放流設備の改良、④容量の再配分がある。2)については、取水設備、放流設備の新設あるいは改造による貯水池運用を変更する方法、あるいは貯水池容量の再配分による貯水池の運用を変更する方法が挙げられる。ここで運用とは、2.3.2.2で述べたような操作の高度化は含まないものとする。上記①～④の内容についてはダム技術センター（2005b）を参考にいただき、ここでは現在進行中の治水機能向上に関わるダム再開発の事例として、①津軽ダム、②鹿野川ダムおよび③鶴田ダムの事例を紹介する。

#### ① 津軽ダム（ダム嵩上げ）

津軽ダムの建設が予定されている岩木川は、青森・秋田両県境に位置する世界自然遺産白神山地の雁森岳（標高987m）に源を発し、流域面積2,540km<sup>2</sup>、流路延長102kmの一級河川である。大正7年に直轄事業となり暫時下流部から河川改修工事が実施されてきたが、その後度重なる水害に見舞われ1次、2次と改修計画は変遷し、昭和35年には目屋ダムが完成した。目屋ダムが完成していたものの、度重なる計画規模を上回る洪水の発生を受けた。完成から48年の間に、目屋ダムの計画高水流量500m<sup>3</sup>/sを上回る洪水が21回発生し、たびたび洪水被害が発生した（図-Ⅱ.2.3.2.6）。

このような状況の中で津軽ダムは、当初昭和48年3月の岩木川水系工事実施基本計画の第1次改定における目屋ダムの洪水調節ルールの変更（ゲート改造等）によるものと位置づけられていたものである。その後、旧建設省及び青森県において、ゲート改造、ダム嵩上げ、上流ダムとのシリーズ化等、第1次改定に基づいた検討を行った結果、既設ダムを再開発することが、治水・利水計画上の必要容量を確保でき、地形地質上からも基礎地盤が良好で特に問題がなく建設可能であり、技術的・社会的・経済的にも有利であると判断されたことから、現目屋ダム地点に新たに建設される計画となった。津軽ダムは、高さ97.2m、堤頂長342mの規模で築造され、総貯水容量140,900,000m<sup>3</sup>

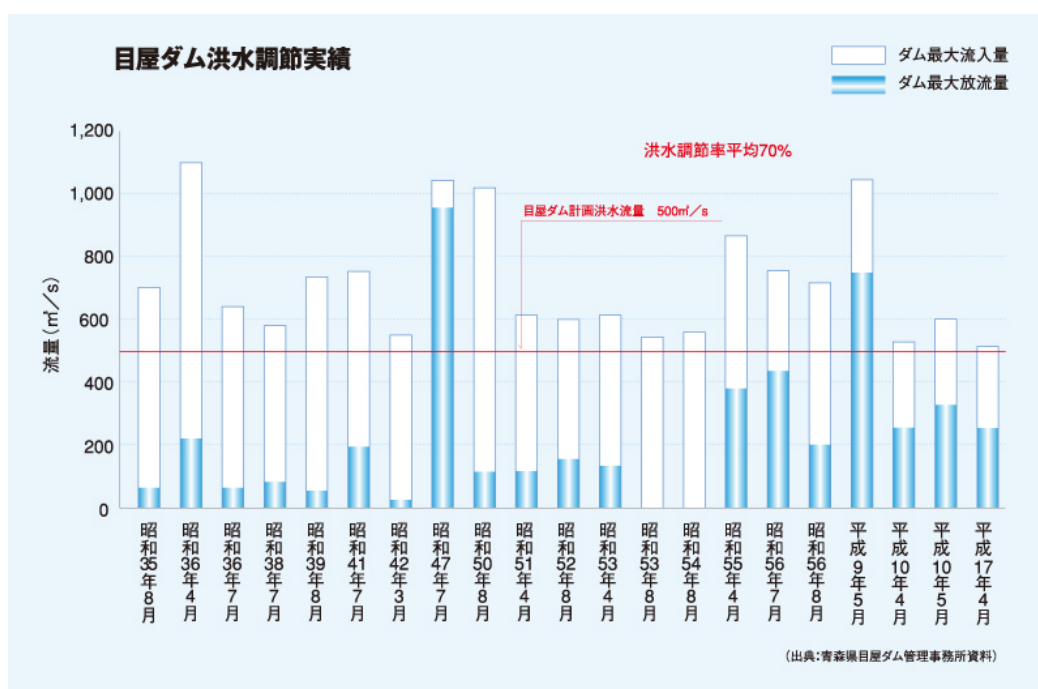


図-Ⅱ.2.3.2.6 目屋ダムの洪水調節実績（国土交通省津軽ダム工事事務所）

### ダム比較断面図

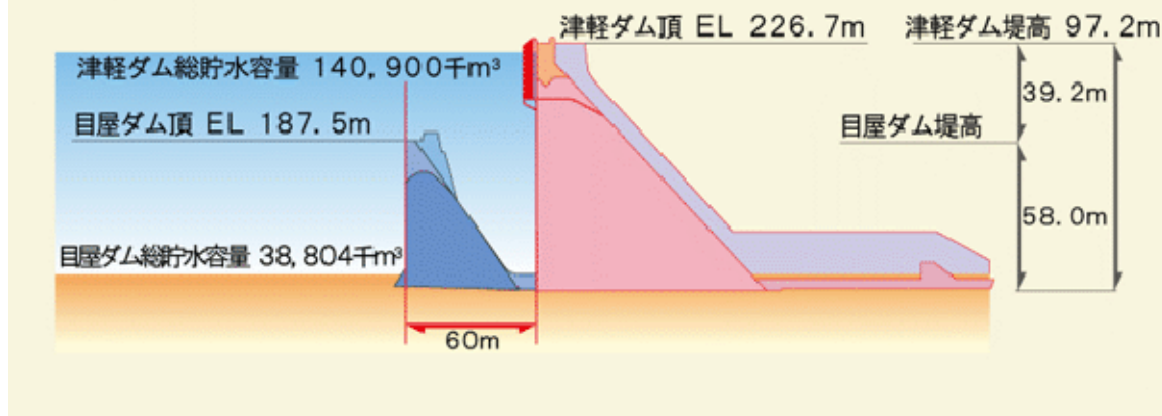


図-Ⅱ.2.3.2.7 目屋ダムと津軽ダムの比較（国土交通省津軽ダム工事事務所）

表-Ⅱ.2.3.2.1 目屋ダムと津軽ダムの比較（国土交通省津軽ダム工事事務所）

	目屋ダム	津軽ダム	比較
型式	重力式コンクリートダム	重力式コンクリートダム	
目的	洪水調節、かんがい、発電	洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい、水道、工業用水道、発電	
堤高	58.0 m	97.2 m	1.7倍
堤頂長	170.0 m	342.0 m	2.0倍
堤体積	118,050 m <sup>3</sup>	717,000 m <sup>3</sup>	6.0倍
総貯水容量	38,804,000 m <sup>3</sup>	140,900,000 m <sup>3</sup>	3.6倍
有効貯水容量	33,000,000 m <sup>3</sup>	127,200,000 m <sup>3</sup>	3.9倍
集水面積	172.0 km <sup>2</sup>	172.0 km <sup>2</sup>	
湛水面積	2.1 km <sup>2</sup>	5.1 km <sup>2</sup>	2.4倍
完成年月	昭和35年3月	平成28年度（予定）	

（うち、洪水調節容量50,000,000m<sup>3</sup>）の貯水池を設けた多目的ダムであり、洪水調節についてはダム地点の計画高水流量3,100m<sup>3</sup>/sのうち、2,940m<sup>3</sup>/sの洪水調節を行い岩木川沿岸の洪水被害の低減を図ることとなっている。図-Ⅱ.2.3.2.7および表-Ⅱ.2.3.2.1より、津軽ダムの洪水調節機能は目屋ダムよりも大幅に増強されていることが分かる。

#### ② 鹿野川ダム（容量再配分、および放流設備の改良）

鹿野川ダムは、肱川水系肱川の愛媛県大洲市肱川町山鳥坂地先に、洪水調節、発電を目的に高さ61m、総貯水容量48,200,000m<sup>3</sup>、有効貯水容量36,200,000m<sup>3</sup>の重力式コンクリートダムとして昭和34年に建設された。しかしながら、肱川流域では近年において激特事業が採択された平成7年7月洪水をはじめ、平成16年8月、平成23年9月などに甚大な被害が発生した。特に平成16年の戦後2番目の規模となる台風16号の大洪水では、浸水家屋914戸、氾濫面積853haの被害が発生し、地域住民からの早急な治水対策が強く望まれている。このような背景から鹿野川ダムは平成16年に策定された肱川水系河川整備計画に基づき、ダムの治水機能の増強、流水の正常な機能の維持、ならびに貯水池および放流水の水質改善を目的とした改造事業を行っている。特に治水について

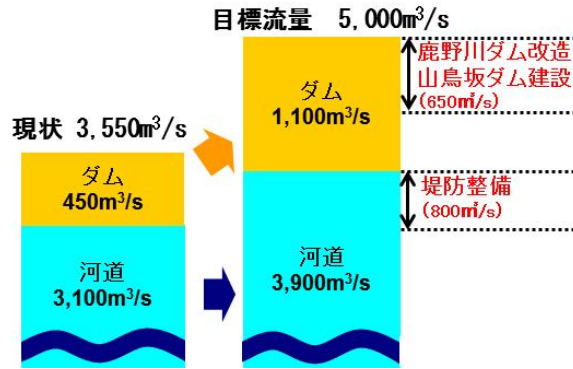


図-Ⅱ.2.3.2.8 河川整備計画における目標流量への対策イメージ (吉岡2013)

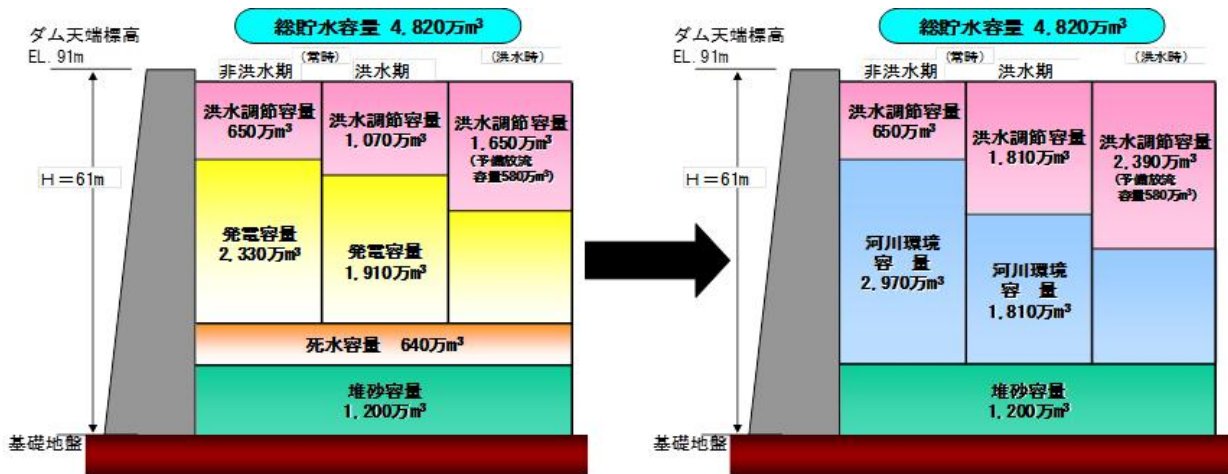


図-Ⅱ.2.3.2.9 鹿野川ダム容量変更配分図 (吉岡2013)

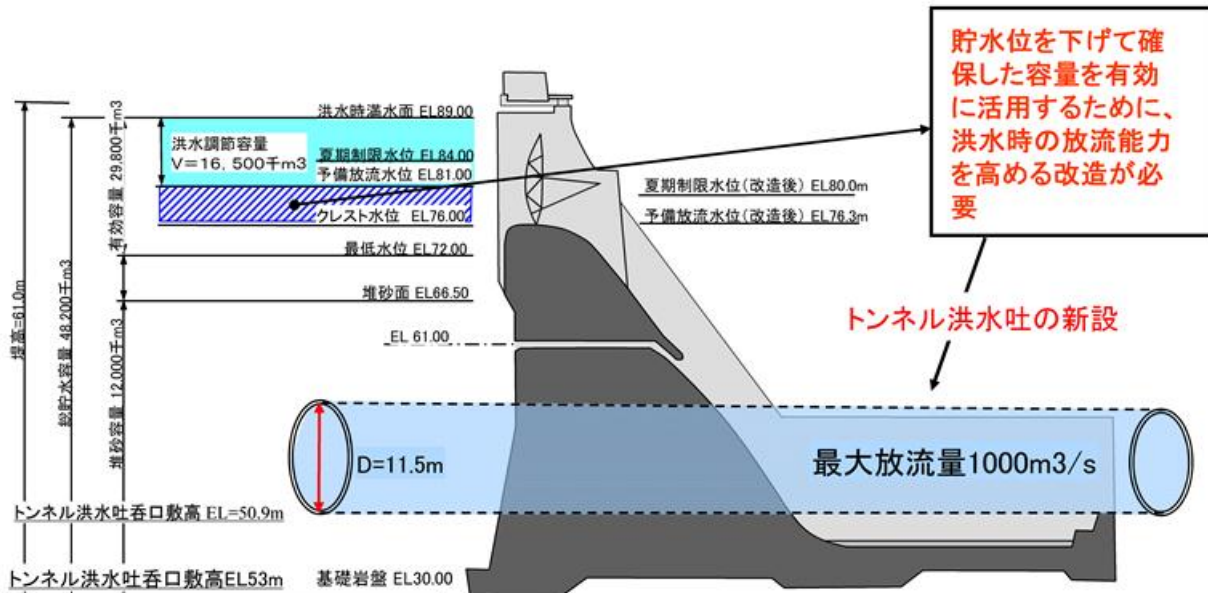


図-Ⅱ.2.3.2.10 トンネル洪水吐き配置図 (イメージ) (吉岡2013)

は大洲地点における戦後最大洪水5,000<sup>m³</sup>/sに対して既設ダム及び鹿野川ダム改造、山鳥坂ダムの建設で、1,100<sup>m³</sup>/sの調節を行い、肱川下流全川に渡り洪水位の低下を図ることとなっている(図

-II.2.3.2.8)。

鹿野川ダムの治水機能を増強するためダムの貯水容量を再編し、発電容量、死水容量を廃止し一部を洪水調節容量に振り替え、併せて洪水調節の開始水位を下げることにより洪水調節容量を現在の約1.4倍に増強することとしている(図-II.2.3.2.9)。しかし、鹿野川ダム天端に設置されている既設の洪水用ゲート(クレストゲート)では、洪水調節を開始する水位まで下げても現在の放流設備では放流能力が小さいため、洪水調節容量増強の効果を発揮できない。そこで、トンネル洪水吐きを新設することにより放流能力を上げ、洪水調節容量の効果的な活用を図っている(図-II.2.3.2.10)。トンネル洪水吐きは、トンネル部の延長約457m、トンネル内径11.5m(標準部)、放流能力約1,000m<sup>3</sup>/s(最大)の規模である。

### ③ 鶴田ダム(容量の再配分、および放流設備改良)

川内川は熊本、宮崎、鹿児島県の3県を貫流して薩摩灘へ注ぐ幹線流路延長137km、流域面積1,600km<sup>2</sup>の一級河川であり、鶴田ダムは川内川のほぼ中央、河口から約51kmに位置する昭和41年に完成した洪水調節と発電を目的としたダムである。この川内川流域では、平成18年7月19日から23日にかけて記録的な豪雨に見舞われ、特に宮崎県えびの市の西ノ野雨量観測所では、この5日間だけで全国平均の年間総雨量の70%、鹿児島市の年間総雨量の50%に相当する1,165mmという雨量が観測された。河口から約38kmに位置する鹿児島県さつま町の宮之城水位観測所では、計画高水位を2.92mも超過し、11.66mに達した。この既往最大の洪水により川内川流域全体の3市2町において浸水家屋2,347戸におよぶ甚大な被害が発生した。鶴田ダムは、この洪水において東京ドーム約60個分に相当する7,500万m<sup>3</sup>の洪水を貯留し、下流の河川に流れる水の量を少なくして洪水被害を軽減させた。具体的には、上述の宮之城水位観測所で洪水調節を行わなかった場合と比較して、最高水位を1.3m低下させ、最高水位に達する時間を約4時間遅らせる効果を発揮した。水害直後は鶴田ダムに対する批判的な意見もあったが、最終的には地元から「鶴田ダムの洪水調節容量を増やして、治水機能を強化してほしい」という要望が出され、平成19年度より鶴田ダム再開発事業に着手した。

今回の再開発事業は、洪水期の発電容量(250万m<sup>3</sup>)と死水容量(2,050万m<sup>3</sup>)の合計2,300万m<sup>3</sup>を洪水調節容量に振り替えることにより洪水期の洪水調節容量を最大7,500万m<sup>3</sup>から最大9,800万m<sup>3</sup>に増量する(図-II.2.3.2.11)。そのためには洪水期の貯水位を大幅に低下させる必要があり、最低水位を現在の標高130mから標高115.6mへ14.4m低下させる。最低水位の低下に伴い現在の放流施設では洪水調節のための放流能力が不足するので、現在の放流施設より低い位置の右岸側に放流施設(コンジットゲート3門)を増設して放流能力の増強を図る。また、これに伴い減勢工を増設する(図-II.2.3.2.12)。



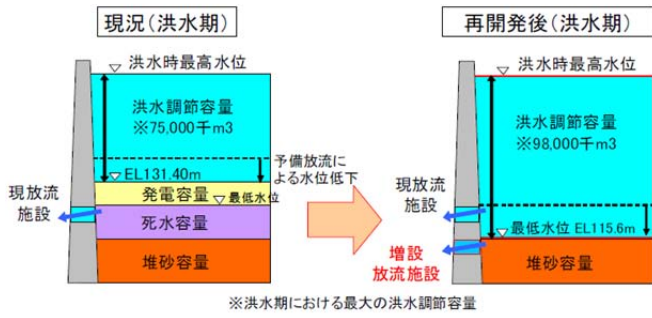


図-Ⅱ.2.3.2.11 再開発事業による容量と放流施設の変更イメージ(国土交通省川内川河川事務所)

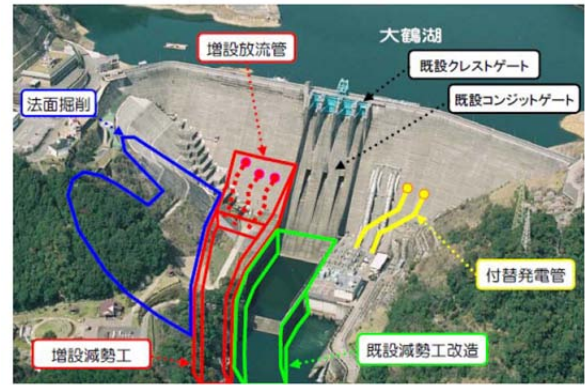


図-Ⅱ.2.3.2.12 再開発事業の全体イメージ図(国土交通省川内川河川事務所)

## 2.3.3 設計以上の外力を受けた治水施設（群）の機能発揮・喪失に関する検討

### 2.3.3.1 有堤河川の氾濫事象に着目した検討

ここでは、まず2.3.3.1～2.3.3.5までで、標記のように、堤防を持つ河川において、HWLを越える超過外力に対応する大規模洪水が生起し、河川外への氾濫を防ぐという堤防の基幹的機能が喪失していく状況を対象にした検討を行う。なお、2.3.3.6において、ダム洪水調節に関する整理も行う。

有堤河川の氾濫事象を取り上げることがなぜ重要か？については、以下の事項を上げることができる。

- ・ 氾濫リスク低減（適応策）には、2.3.1.2で述べ、また図-II.2.3.1.3に例示したような視点がある。
- ・ これを具体化していく上で、河道、堤防等の所定の対応能力を超える洪水を受けた際（超過外力）に起こりうる氾濫被害を推算できるようにしておくことが不可欠である。
- ・ 同一の洪水に対しても、技術的観点から生じうる複数の氾濫生起シナリオを想定でき、結果として被害状況が異なること、そのような被害を変えうる要因を「洪水防御システム」の特性として理解することが重要である。

これらを踏まえ、以降2.3.3.5まで、堤防を対象に超過外力による機能喪失の表現（フラジリティ・カーブ的な考え方の導入；後ほど説明）とそれに基づく氾濫生起シナリオ設定を中心課題に据えて、実際の河川流域に適用して被害推算を試み、その有効性を検討する。さらに「洪水防御システム」の特性を把握するための見方（着眼点）についても検討していく。

### 2.3.3.2 氾濫リスクの試算手法

#### a) 試算手順

本研究で用いた試算手順は図-II.2.3.3.1に示すとおりである。

- ①任意の確率雨量に対する流出解析から流量を得る。
- ②それを対象河川区域の上流端や合流支川に与えて河川水位を次元不定流により算定。
- ③所定の条件に達した箇所を氾濫発生候補地点とし、その組み合わせが異なる複数の氾濫発生シナリオを設定。
- ④それぞれについて氾濫解析・被害推計を行う。

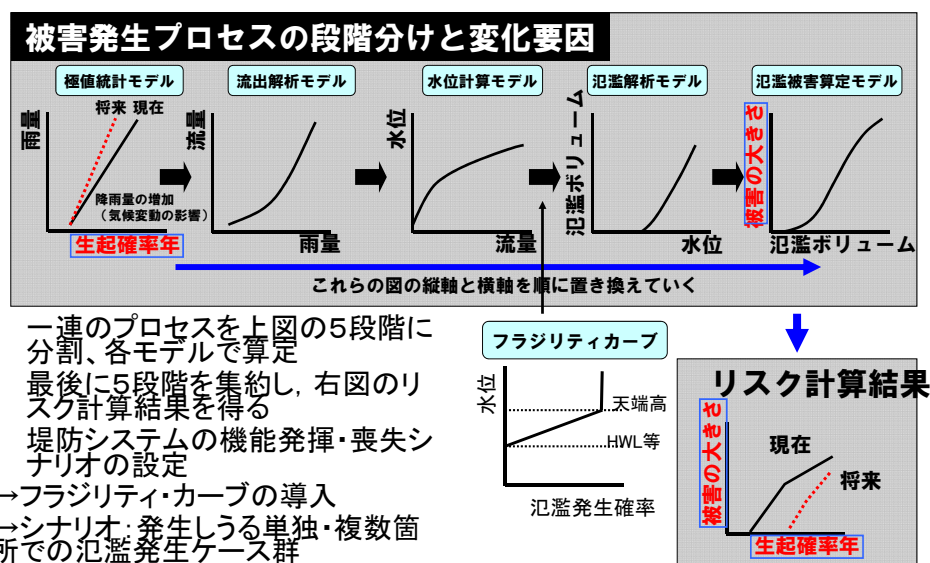


図-II.2.3.3.1 氾濫リスク試算の全体フレーム



## b) 氾濫発生の候補地点の選定

氾濫発生条件は、下記の考え方に基づいて設定した。

- 越水の発生またはそれに至る前に破堤する可能性があると考えられる地点を候補地点とする
- 越水については、土堤は越水に対して構造的にそもそも弱く、そのため越水させないことによって機能確保するの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すると設定する。
- 越水に至る前の破堤の発生条件は、本研究では以下の考え方に基づいて設定する。
  - 堤防に関する技術基準類等に基づいて、現時点の堤防で機能が十全と判断できる「最高水位」を設定。これを越えた箇所から氾濫発生の候補地点を選定する。
  - 機能が十全とは判定できない水位状況下となっても、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破堤を免れた場合などがある。
  - 現時点の技術水準のもとで十全と判定するために含ませる安全性の付加分（安全率）を持たせいが、それが結果的に上記のような氾濫を防ぐ方向に働いたとも考えられる。しかし、裏返せば所定の安全性を担保できない状態であって、現状の技術ではどこで破堤してもおかしくない条件であったと考えられる。
  - 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破堤する箇所やタイミングを言い当てることは、まず不可能である。ただしそうした技術的検討や実績から、水位が高くその継続時間が長いほど、破堤に至る可能性が高まると考えてよいであろう。
  - これらの特性を踏まえて、本検討では図-Ⅱ.2.3.3.2 中の左上に示すように水位との関係として破堤発生確率を与えることとする。これはフラジリティ・カーブの考え方を試行的に導入したことに当たる。
  - 越水が生じるとまず確実に破堤が生じること（破堤確率は1と見なせる）、また所定の安全性を満たす水位以下ではまず破堤が生じないこと（破堤確率は0と見なせる）という2点を押さえた上で、この二点間をどのような曲線形状（関係式）とするかという問題に帰着する。
  - これについては、個々の堤防の地質構造や補強等を反映して設定することが好ましく、そのため土質・地盤工学的な技術に基づいた算定を試みているところである。また、こうした演繹的なアプローチに加え、実洪水時の実績データ（変状の有無と外力条件）の統計処理から推定するアプローチも試みている。これらはまだ途上であり、今回の中間報告では反映するに至っていない。
  - そこで、本件検討ではまず2点間を直線で結ぶ線形式で与えることとして、フラジリティ・カーブ導入による氾濫発生シナリオ設定の有用性と限界について検討することとした。カーブの与え方による氾濫リスク算定結果への影響については、今後の検討課題とする。
- 同一の氾濫ブロックに氾濫することとなる一連の堤防区間ごとに代表1カ所を選定し、その箇所で図-Ⅱ.2.3.3.2 中の左上に示すフラジリティ・カーブを設定した。氾濫発生の候補地点はこれら代表箇所から選択する方式を採用した。

ここで提示している手法は、見かけ上は、信頼性解析の道具となっているフラジリティ・カーブを用いているが、本質的には「氾濫生起シナリオをもれなく捕捉し、そのことで、ある豪雨規模において起こり得る最悪の氾濫被害の想定をカバーできるようにする」ためのものであり、その意味から「氾濫生起シナリオ設定手法」と位置づけている。したがって現時点では、すぐ後に説明する方法を組み合わせで導かれる「氾濫・被害発生の確率分布」に相当する情報に工学的に精緻な意味があるわけではなく、それを仔細に分析・活用することよりも、減災方策の検討にとって重要な特徴を大きく捉えることが適切と考えている。

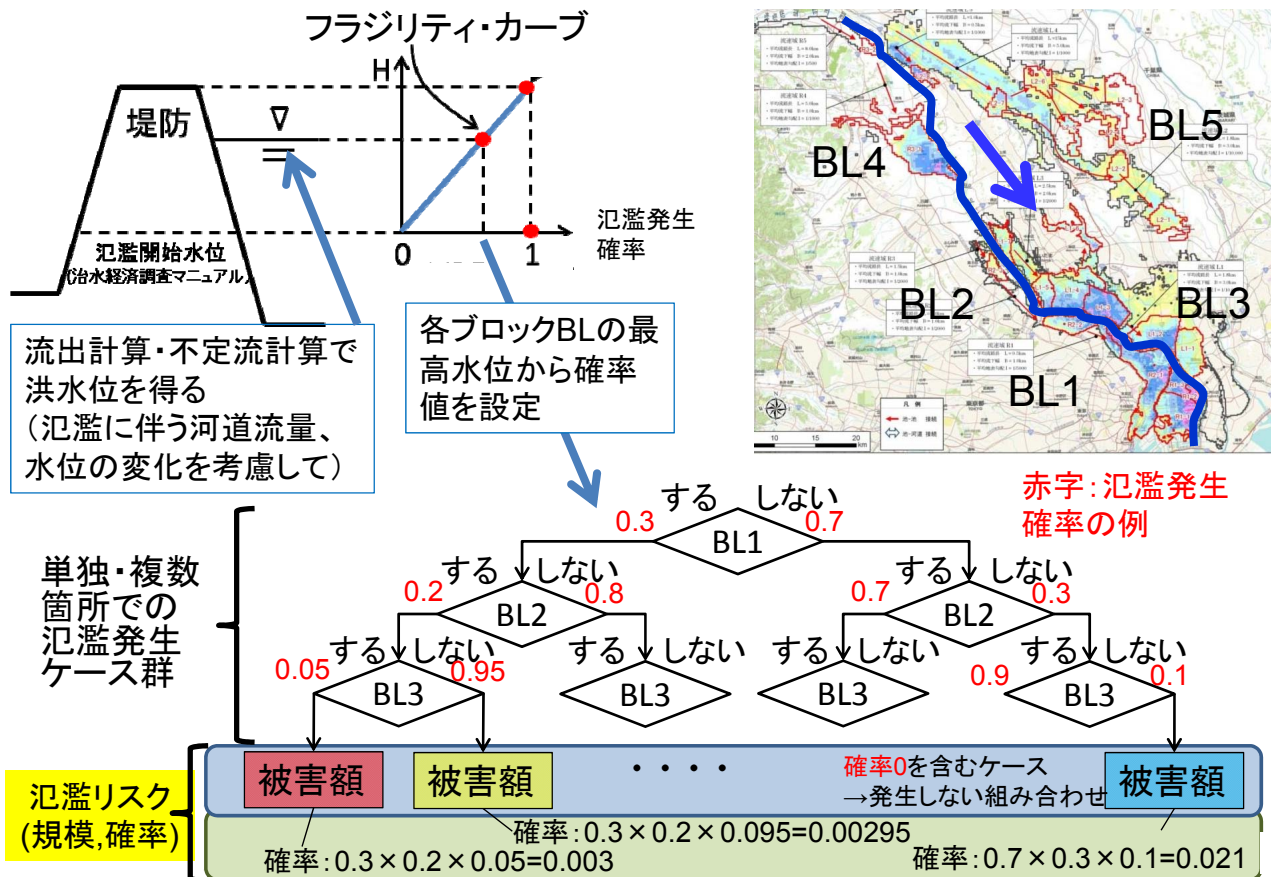


図-Ⅱ.2.3.3.2 試算における氾濫生起事象の表現法

c) 氾濫発生シナリオの設定

- b)に示した手法では、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での破堤氾濫するケースが、水位に応じて発生しうるか判定され、被害推計の対象ケースとして機械的に選定できる特長がある。
- すなわち、図-Ⅱ.2.3.3.2に示すように各ケースの発生確率は各ブロックの破堤確率の積として算定でき、その値が0の場合は生じ得ないケースとして算定対象から除くことになる。
- 氾濫発生シナリオは、発生確率が0より大きい全ケースとして設定される。また確率値から、それらケースの相対的な発生しやすさを知ることができる。
- ある同一の確率規模の降水量に対して、すべてのケースで氾濫被害を算定することで、生じうる被害額の範囲とその発生確率が計算でき、例えば、そのうち相対的に被害が大きいケース群とそれらに共通する氾濫ブロックを知ることができる。ある程度の単純化を導入したが、こうした実態に肉薄できる検討が可能であることが、このアプローチの強みである。

d) 氾濫量、被害額、人的被害の算定方法

図-Ⅱ.2.3.3.1に示した各手順の計算は、以下の方法・条件のもとで実施した。

① 確率年と降水量の関係

各水系の河川計画で用いられている降雨継続時間の年最大値を統計処理して年発生確率との関係を得た。超過確率分布としては、極値分布であるグンベル分布、平方根指数型最大値分布および一般化局地分布を用いることとし、SLSC値により適合度を評価し、最も高い適合性を示した分布を採用した。また、降雨量の時空間分布は、既往観測の分布を降水量に応じて引き延ばし・縮めて与えることとした。今回は、河川整備方針に示された計画高水流量に最も近い流量値となる分布を採用した。

## ②流量の算定

河川計画検討の実務で用いられてきた流出計算手法とパラメータ等を使用した。ダムなど洪水調節施設は、現況で供用されているものを対象として、運用規則に則った洪水調整をモデル化している。

## ③河道内・氾濫ブロック内の水位などの算定

現況河道を対象として、河川水位を一次元不定流計算により算定している。その際、破堤地点では、本間の堰公式によって河川水位と堤内水位によって河川からの流入出流量を算定している。堤内水位は、各氾濫ブロックを「池」として扱うポンドモデルを適用しており、氾濫ブロックの地形測量結果から、水平湛水を仮定して水位と湛水量との関係を得て、先の流入出流量に応じて湛水位を算定した。したがって、破堤地点と湛水域が離れている場合、その間の氾濫流の流下する区間の水深等の算定を行っていない。これは被害推算を行う上で必要な湛水状況に関する情報が不足することとなる。そこで次の④で説明するように、流下区間の被害推算には破堤地点での最大流入量を用いる簡略化を行った。

氾濫解析にはポンドモデルを用いる簡略化を行ったが、氾濫に伴う河道内流量の増減、また破堤地点での水位低下による水位縦断分布の変化は不定流計算に反映されている。そのため、ある地点での破堤発生に伴う水位変化の結果として、他地点で破堤確率（フラジリティ・カーブによる）や氾濫水量（本間の積公式による）が変わる効果については、計算に取り込むことができていない。

## ④氾濫被害の推算

本研究では、氾濫被害として浸水による直接的な経済被害額と死者数を取り上げることとした。経済被害については最大湛水深とその場での資産額に応じて算定する治水経済要綱の手法を用いている。死者数は、最大湛水深とその場の人口に応じて算定する手法を適用している。基本的に氾濫ブロックの各地点の最大湛水深を算定するには、非定常平面流解析を行う必要がある。しかし、今回は非常に多くの氾濫ケースの計算を行う必要があり、すべて非定常平面流解析を行うことは本研究に投入できる経済的・人的資源をもっては不可能であった。そこで、目的とする精度を確保しつつ、より計算負荷の小さい現実的な手法としてポンドモデルを採用した。そこで、被害推算では下記のような手法を採用した。

- まず、各氾濫ブロックの1カ所のみで破堤する条件で、非定常平面二次元の氾濫流解析を実施し、上記の手法で被害額と死者数を算定する。
- 氾濫ブロック内を湛水域と流下域に区分し、湛水域内の総氾濫被害は最大浸水深との関係として、また流下域内については破堤地点における最大流入流量との関係として整理するという方法を採用する。
- 上記の関係をを用いて、③のポンドモデルによる浸水深と流入流量から各領域の被害額を得て、その総和として各ブロックの被害推計を行なう。

表-Ⅱ.2.3.3.1  
対象とした20水系

河川 No.	計画降雨	
	時間	降雨量
01	48	325
02	48	252
03	48	228
04	12	165
05	72	548
06	48	499
07	48	405
08	48	498
09	48	368
10	24	323
11	12	383
12	24	376
13	12	381
14	48	269
15	48	442
16	48	256
17	48	217
18	48	363
19	12	357
20	48	615

### 2.3.3.3 被害状況の試算結果

#### a) 対象水系

2.3.3.2 に示した手順・手法の計算を実施するのに必要なデータ一式が揃っている国管理水系から、下記の要件を考慮して表-Ⅱ.2.3.3.1 に示す20水系を選定した。

- 対象河道区間の上流での氾濫に起因する対象区間への流量低減が限定的と考えられる水系（具体には、V字谷や狭い谷底平野を流下する河道など地形的な性状から選定）。
- 人口集積地が対象河道区間の中の上流または下流側に位置するかが水系によって異なるが、そのどちらか一方に偏らないように配慮。

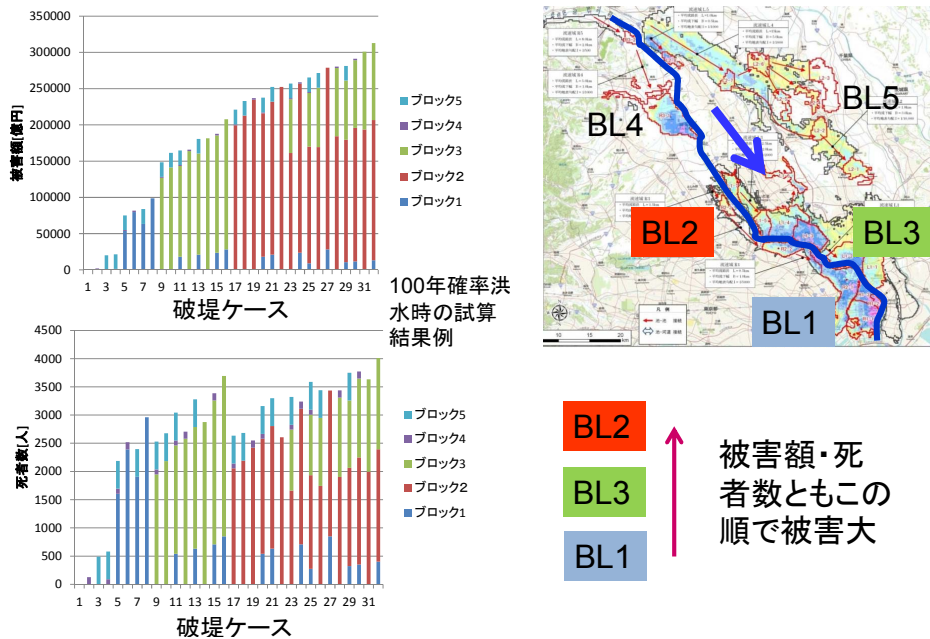


図-Ⅱ.2.3.3.3 得られる情報の説明（基本事項）

b) リスク分析結果として得られる情報

- 図-Ⅱ.2.3.3.3 に一例を示すように、任意の確率年について、氾濫発生シナリオに含まれる総ケース数だけの氾濫被害額、死者数が算定される。
- 併せて各ケースの発生確率も算定されるので、これと被害額・死者数を組み合わせることで、図-Ⅱ.2.3.3.4 に一例を示すように、各被害の超過確率分布図を作成することができる。
- 図-Ⅱ.2.3.3.4 から、各確率年での被害の最大値、期待値、最小値が得られるので、これらを確率年との関係として整理することで図-Ⅱ.2.3.3.5 が作成できる。
- 図-Ⅱ.2.3.3.5 には、フラジリティ・カーブに換えて、河川水位が氾濫開始水位に達した時点で氾濫するとして算定した被害額を併記した。この氾濫発生条件ではケースは一つに定まるが、そのケースは必ずしも被害が最大となるケースと一致しない。つまり、個々の氾濫ブロックごとで見ると氾濫被害が最も生じやすい条件であっても、複数の氾濫ブロックの被害総和の観点では最大値を必ず押さえられる条件とは限らない。
- フラジリティ・カーブを用いるアプローチは、多様な破堤ケースを計算対象とするという煩雑さがある反面、氾濫被害が最大となるケースを機械的に抽出できるところに特長がある。
- 20 河川について算定した被害額（期待値）と確率年の関係を図-Ⅱ.2.3.3.6 に示す。この結果から対象水系は①～③に区分できる。①は大都市部を貫流する河川である。
  - ① 確率年 100 年で 10,000 億円オーダー以上となる河川
  - ② 確率年 100 年で 10,000 億円オーダー以下となる河川
  - ③ 被害額が確率規模によらず概ね一定している河川

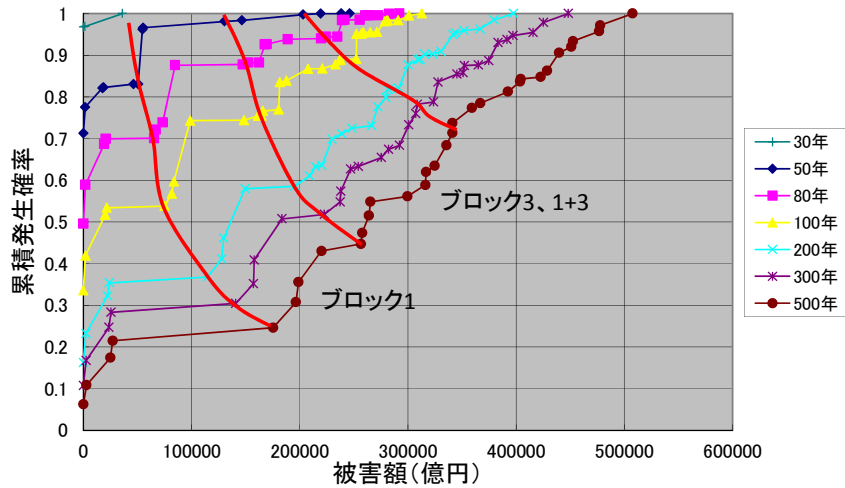


図-Ⅱ.2.3.3.4 得られる情報の説明 (ある豪雨により発生する被害についての超過確率分布図)

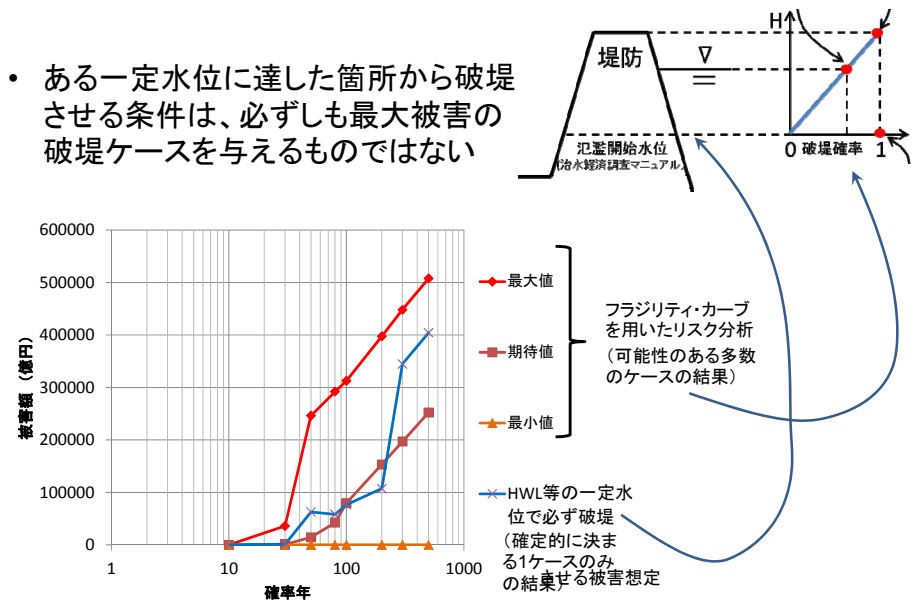


図-3.3.3.5 得られる情報の説明 (被害の最大値、期待値、最小値と豪雨確率年との関係)

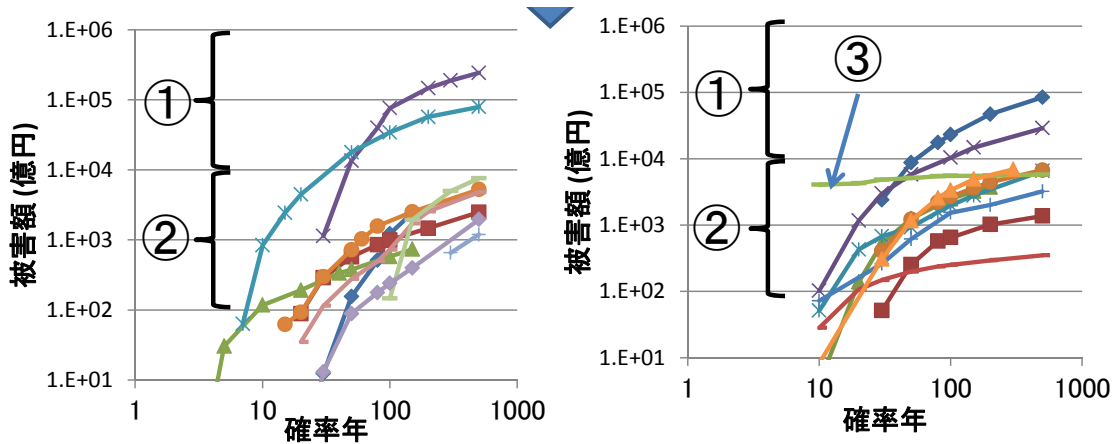


図-Ⅱ.2.3.3.6 対象とした20水系についての被害額期待値と豪雨確率年との関係



### c) 気候変動に伴う氾濫被害の増加倍率の試算

後期 GCM20 での降雨倍率  $\alpha$  (=【将来気候下の降水量】 / 【現在気候下での降水量】) を用いて、各河川の整備方針で目標とした確率規模の出水による被害を推算した結果を図-Ⅱ.2.3.3.7 に示す (河道条件は現況)。被害倍率  $\delta$  は【将来気候下の被害額・死者数】 / 【現在気候下での被害額・死者数】として算定している。被害額・死者数としては、上記 b) で示したうちの期待値を用いた。降雨倍率 1.12 倍に対し、全水系平均で約 2 倍程度の被害となる結果を得た。

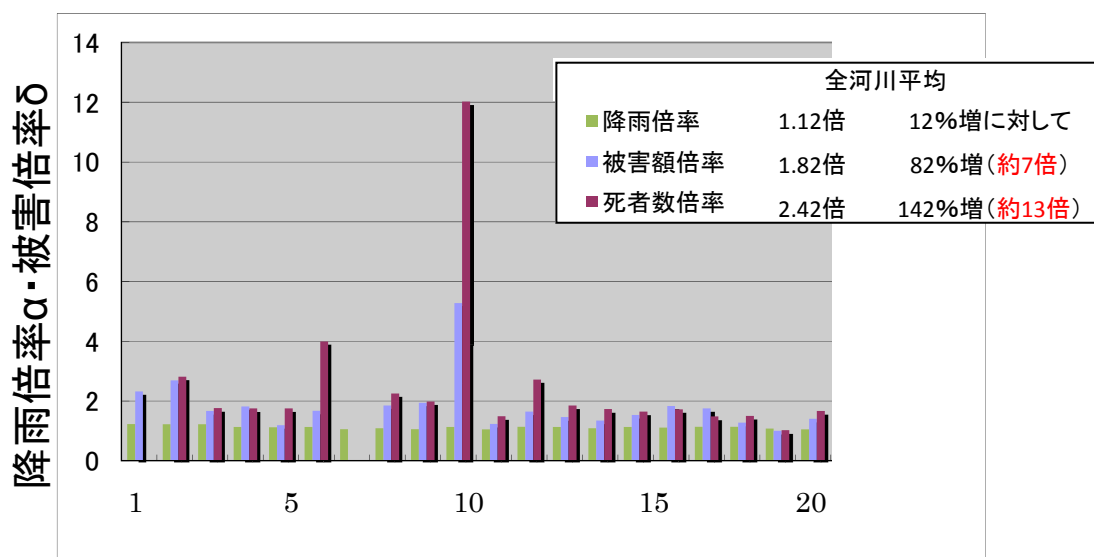


図-Ⅱ.2.3.3.7 気候変動に伴う被害増加状況の試算

### 2.3.3.4 洪水流・堤防システムの挙動および被害状況

「洪水防御システム」の挙動と被害状況の関連性を把握するための着眼点として、本中間報告段階の議論という位置づけで、下記 i) ~ v) を提示してみる。

#### i) 豪雨確率規模 T と被害期待値・最大最・最小値の関係 (図-Ⅱ.2.3.3.8 参照)

洪水規模の増加に伴う被害の増え方に着目すると、4 パターンに分類できそうである。

パターン A :  $\log T$  に概ね比例して被害最大値・期待値が増加。

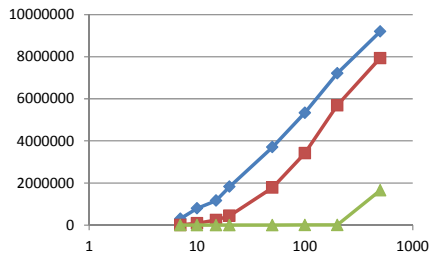
パターン A' : 被害最大値が不連続的に急増する箇所がある。

パターン B : 被害最小値も  $\log T$  に概ね比例して増加する。そのため最大と最小の差の開きが少ない、または狭まる。

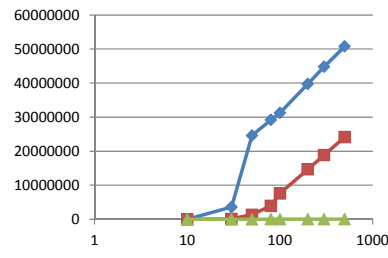
パターン C : T によらず概ね被害が同程度と見なせる (例えば 10 年確率出水でも 100 年確率出水と同程度の期待値、最大・最小値となる)。

#### ii) 被害規模と氾濫ブロックの対応関係 (図-Ⅱ.2.3.3.9 参照)

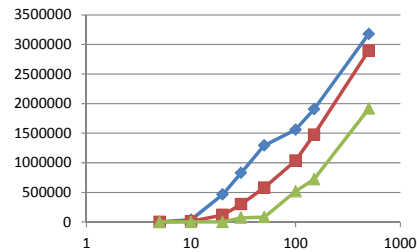
任意の確率年の出水ごとに、被害規模が最大または相対的に大きいケース群に共通している氾濫ブロックを把握する。これにより、被害の大きさを左右する氾濫ブロックを特定でき、また、そのブロックでの氾濫発生の確率 (確率年を任意に特定した場合の条件付き確率) を把握することができる。



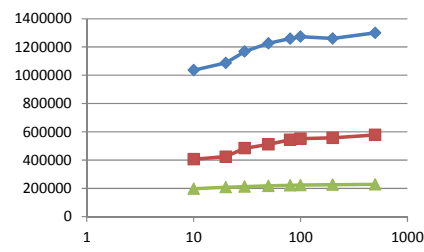
パターンA: logTに概ね比例して被害最大・期待値が増加



パターンA': 被害最大値が不連続的に急増する箇所がある



パターンB: 被害最小値もlogTに概ね比例して増加。そのため最大と最小の差の開きが少ない、または狭まる。



パターンC: Tによらず概ね被害が同程度と見なせる(例えば10年確率出水でも100年確率出水と同程度の期待値、最大・最小値となる)

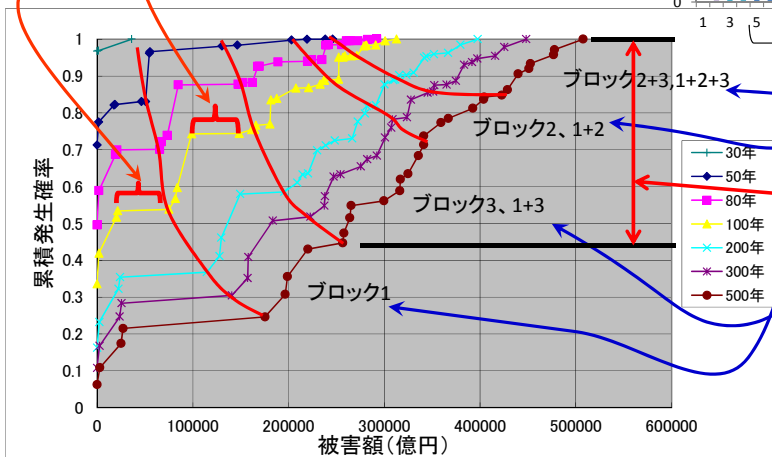
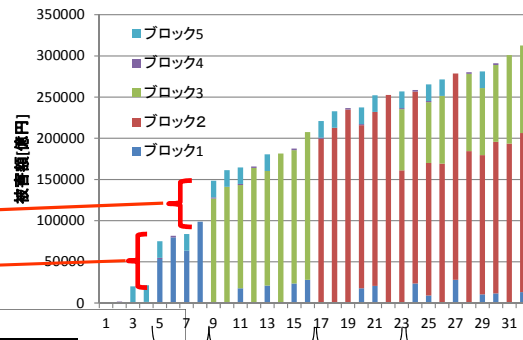
図-Ⅱ.2.3.3.8 氾濫被害の特徴をつかむ着眼点1: 豪雨確率規模と被害期待値・最大値・最小値との関係

この河川の場合、ブロック2,3の破堤を含むケース群の被害額・発生確率が相対的に大きい

→ 下流型

被害の急増

→ 氾濫ブロック組み合わせの変わり目



この破堤ケース群の発生確率

死者数も同様に分類し、河川をタイプ分け

図-Ⅱ.2.3.3.9 氾濫被害の特徴をつかむ着眼点2: 被害規模と氾濫ブロックの対応関係



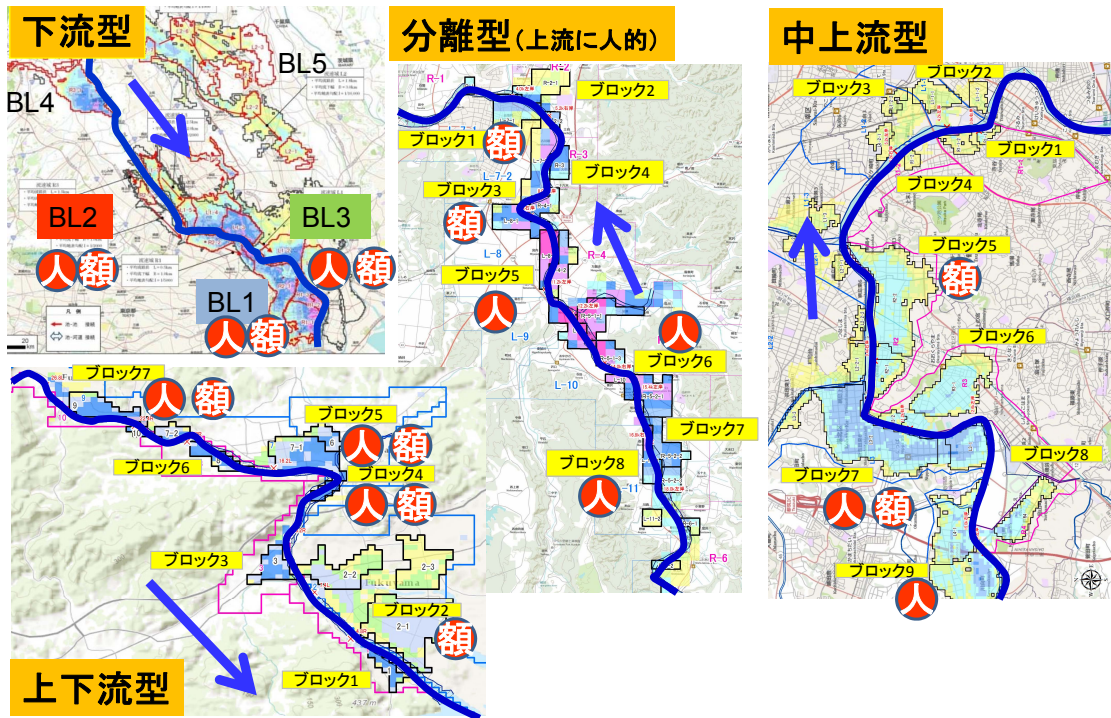


図-Ⅱ.2.3.3.10 氾濫被害の特徴をつかむ着眼点3：全体の被害規模を左右する氾濫ブロックの配置

iii) 被害規模を左右する氾濫ブロックの分布型（図-Ⅱ.2.3.3.10 参照）

上記 ii) においてブロックが特定できた場合、そのブロックが対象河道区間の上下流のどこに位置するかに着目し、次の5つの分布型に分類する：下流型、中上流型、上下流型、分離型（上流に人的、下流に経済的被害が大きなブロックが位置する型）。ここでのポイントは、洪水により影響を受ける資産・人口の空間分布特性を把握することである。

iv) 上下流ブロックでの氾濫発生時の相互作用（図-Ⅱ.2.3.3.11）

上記 iii) の分布型に即して上下流に河道区間を2分し、上流側のブロック群での氾濫発生によって、下流側のブロック群における氾濫被害が低減するか否か、さらにその結果として流域全体の総被害が減じるか否かに着目して、以下の5タイプに分類する。

タイプ1：下流ブロックの被害減が上流ブロックでの被害増を上回るため、総額としては減となるタイプ

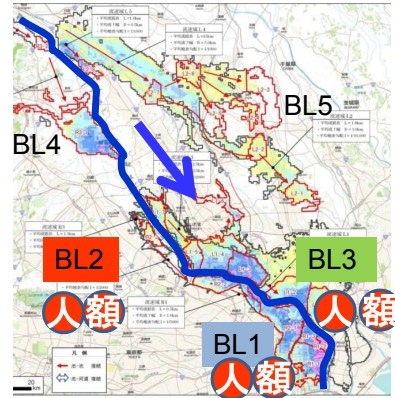
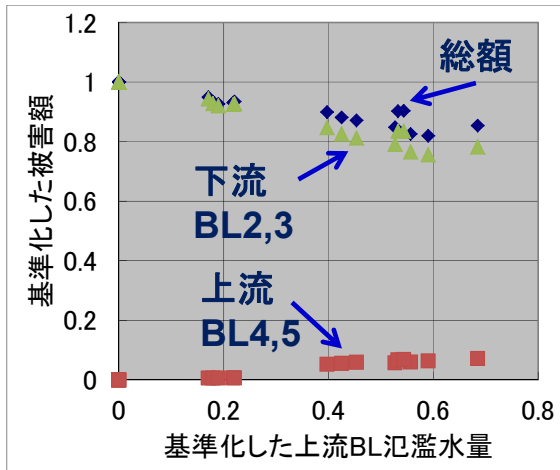
タイプ2：総額ほぼ変化なし（上下流ブロック群の被害分担が変化する場合のみ）

タイプ3：上流ブロックでの被害減より下流ブロックの被害増が上回るため総額増となるタイプ

タイプ4：上流ブロックでの氾濫に関わらず下流ブロックの被害は減少せず概ね一定であり、上流ブロックでの氾濫被害増のみが生じるため、総額が増となるタイプ

タイプ5：上流ブロック群での氾濫の生じ方で、総額が増減どちらにもなり得るタイプ

ここでのポイントは、上下流双方のブロックで氾濫が生じるような過酷な状況となる超過出水時において、ブロック間の被害分担による総被害の増減の仕方を把握することである。

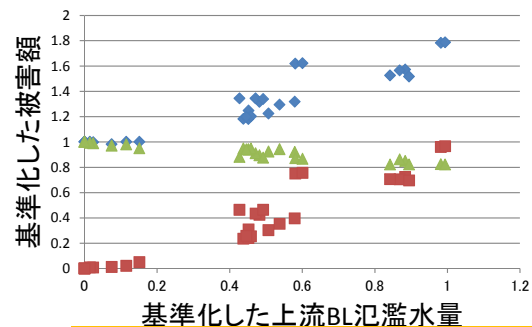
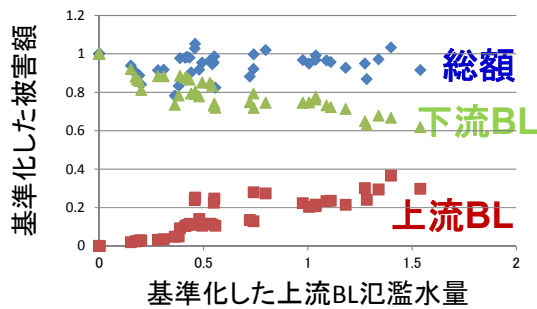


上流BL4,5が氾濫なしの条件での被害額を1とした場合、4,5で氾濫水量の増加に伴う各BLの被害額の増減を調べる

縦軸 = (各ブロック被害額) / (総被害額BL4,5氾濫なしのケース)

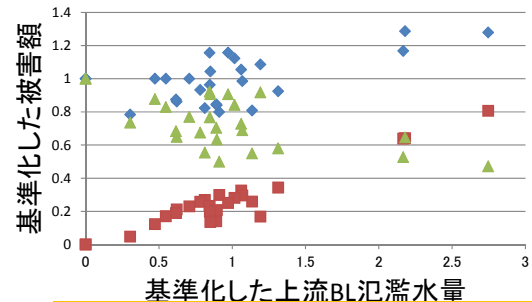
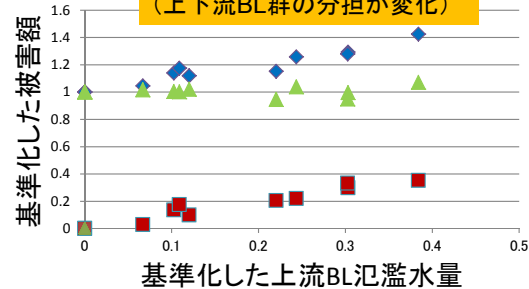
横軸 = (BL4,5の氾濫水量) / (総氾濫水量BL4,5氾濫なしのケース)

上図の例: 上流BL4,5で氾濫 → 下流BLの被害減が上流BLの被害増を上回るため、総額としては減になるタイプ (タイプ1)



タイプ2: 総額ほぼ変化なし (上下流BL群の分担が変化)

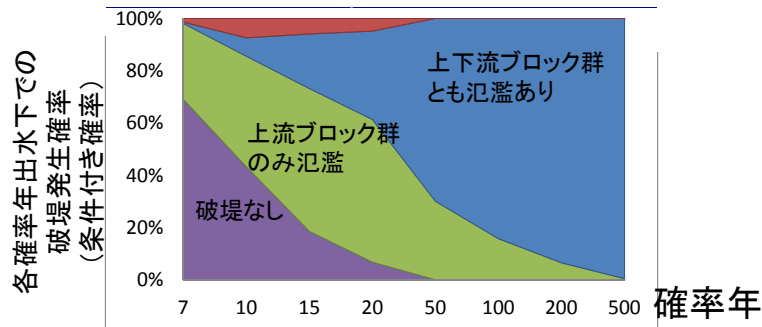
タイプ3: 上流減 > 下流増のため総額増



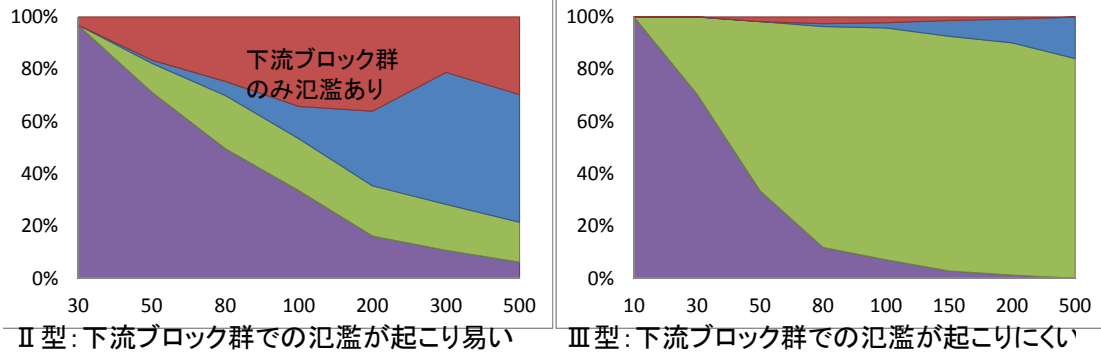
タイプ4: 下流変化なしで上流増のため総額増 (上流氾濫被害の分、総額も増になる)

タイプ5: 上流BLの氾濫の仕方でも総額が増減どちらにもなり得る

図-Ⅱ.2.3.3.11 氾濫被害の特徴をつかむ着眼点4: 上下流ブロックでの氾濫発生時の相互作用 (上; タイプ1、下; タイプ2~5)



I 型: 確率規模増に伴い上流のみ氾濫→上下流氾濫に主モードが移る



II 型: 下流ブロック群での氾濫が起りやすい

III 型: 下流ブロック群での氾濫が起りにくい

図-Ⅱ.2.3.3.12 氾濫被害の特徴をつかむ着眼点5：上下流ブロックの組み合わせ別の氾濫発生確率

v) 上下流ブロックの組み合わせ別の氾濫発生確率 (図-Ⅱ.2.3.3.12 参照)

上記iv)と同様に河道を上下流に2区分し、氾濫の有無の4通りの組み合わせ(上流のみ氾濫、下流のみ氾濫、上下流両方とも氾濫、氾濫なし)について発生確率を算定し、相対的にどの組み合わせが発生しやすいか(確率年を任意に特定した場合の条件付き確率)により以下の3つの型に分類

I 型: 確率規模増に伴い上流のみ氾濫→上下流氾濫に主モードが移る

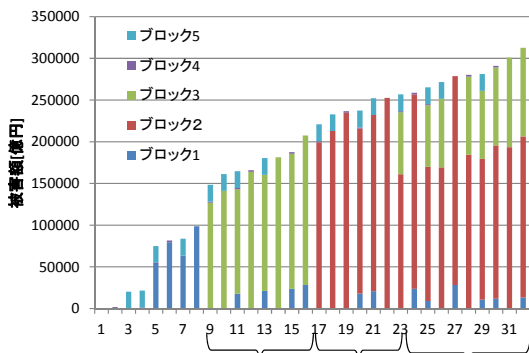
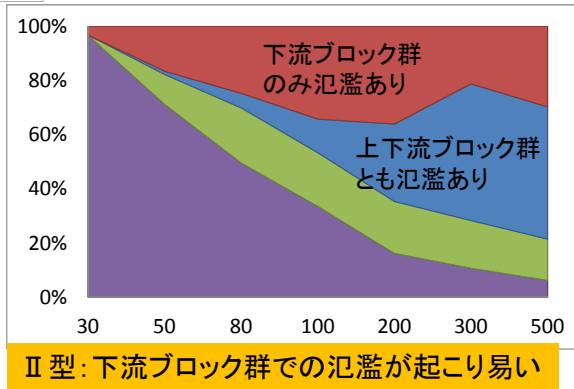
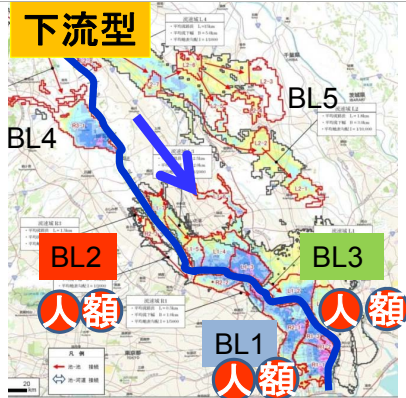
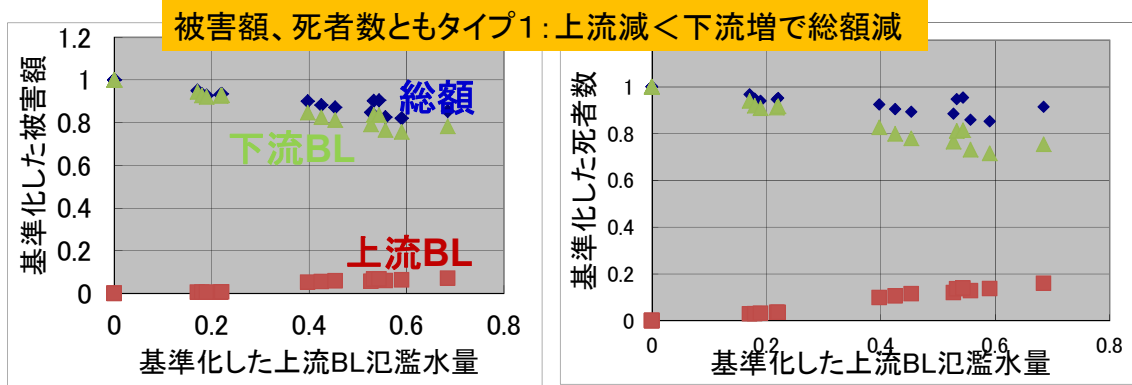
II 型: 下流ブロック群での「氾濫が起りやすい」

III 型: 下流ブロック群での「氾濫が起りにくい」

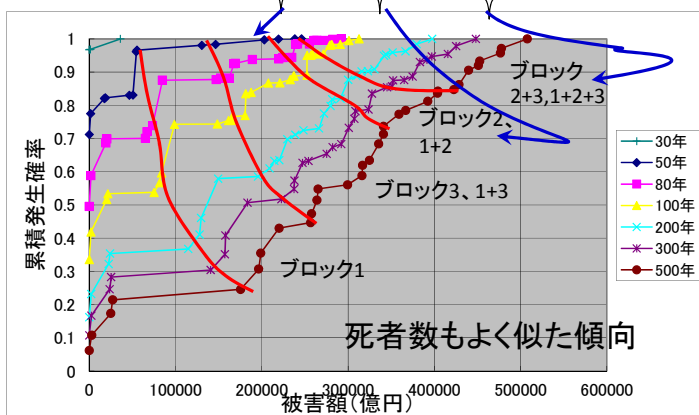
ここでのポイントは、iii)で述べた分布型と照らし合わせることで、被害が相対的に大きいブロックへの氾濫が発生する可能性を把握できることである(例えば、下流型であり、かつII型に分類された流域は、ある確率規模の出水に対する全氾濫発生ケースのうち、下流に位置する被害の大きなブロックへの氾濫が生じるケースの割合が多い→この意味で「氾濫による被害が大きくなりやすい」)。

### 2.3.3.5 5つの着眼点を応用した検討事例

以上に示した5つの着眼点を組み合わせて行った氾濫被害発生の特徴分析の事例を、3水系について示す(図-Ⅱ.2.3.3.13~Ⅱ.2.3.3.15参照)。



- 下流ブロック1,2,3の氾濫発生確率を抑えるのは被害減に効果的(特にブロック2,3)
- 万が一氾濫する場合でも、上流ブロック氾濫ありでは結果的に総被害減となりうる
- その程度は最大2割



**パターンA'：被害最大値が不連続的に急増する箇所がある**

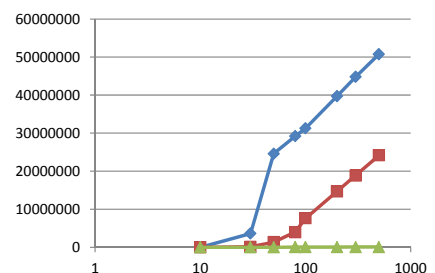
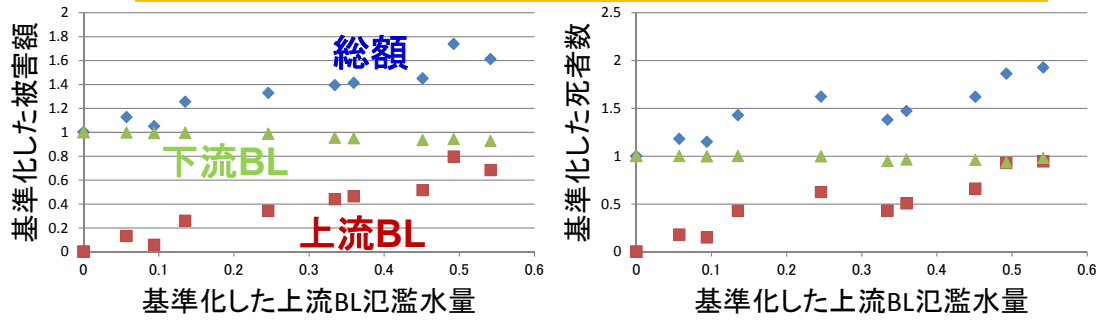


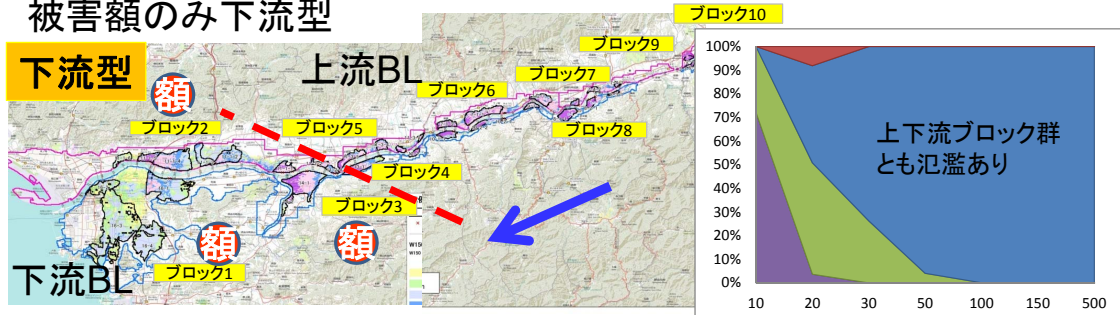
図-Ⅱ.2.3.3.13 氾濫被害発生の特徴分析：事例1-下流型A



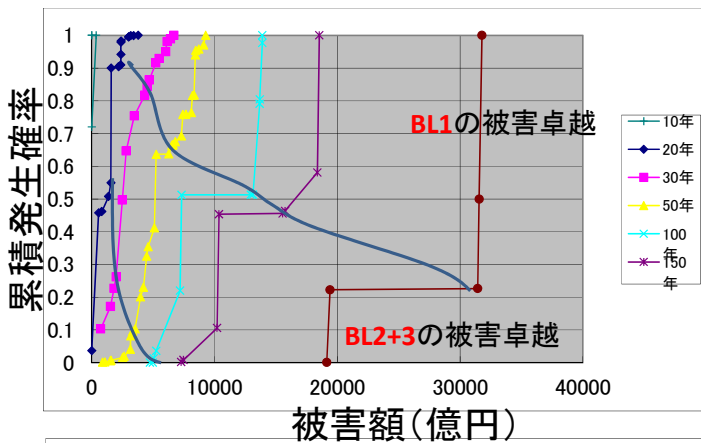
被害額・死者数ともタイプ4(下流変化なしで上流増のため総額増)



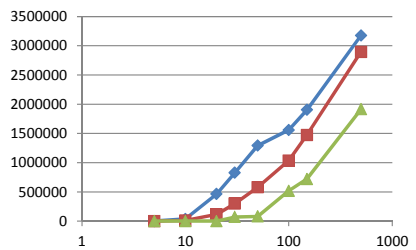
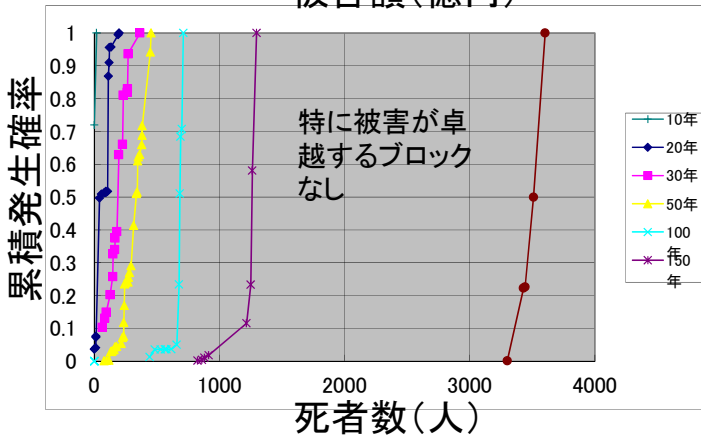
被害額のみ下流型



I型: 確率規模増に伴い氾濫主モードが変わる

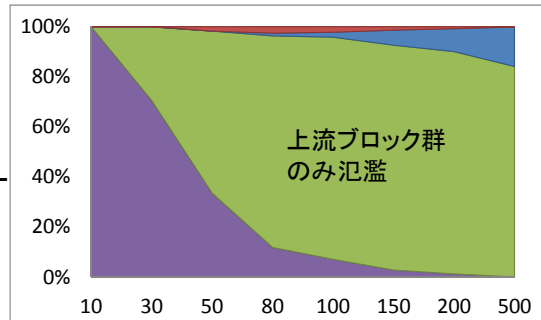
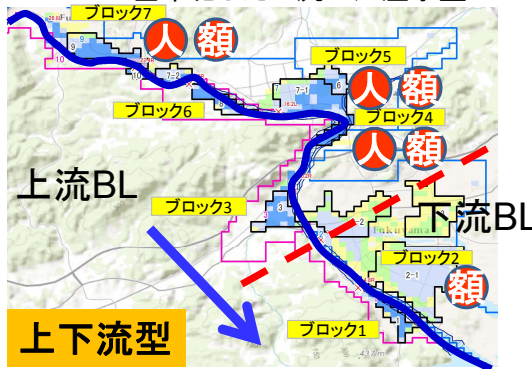
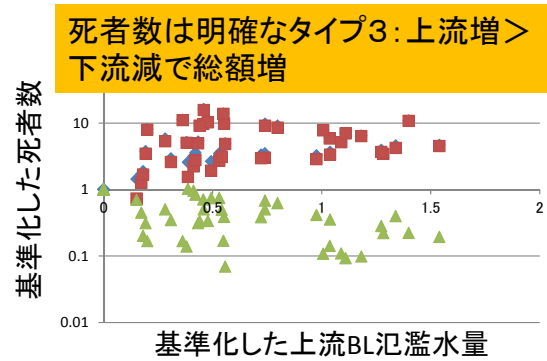
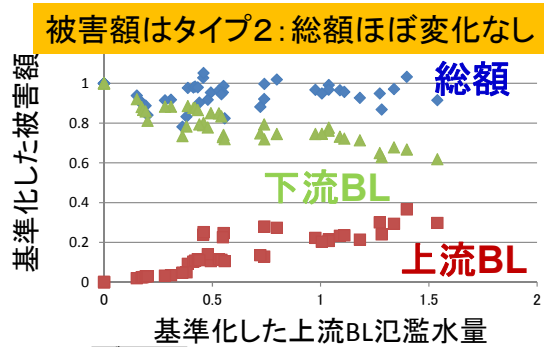


- 下流ブロック1,2,3の氾濫発生減が被害額減に効果的
- 上流BLの氾濫発生はそのまま総被害増につながり、下流BLの被害減の効果なし
- 流下能力向上が被害減に有効(整備水準の低い河川)



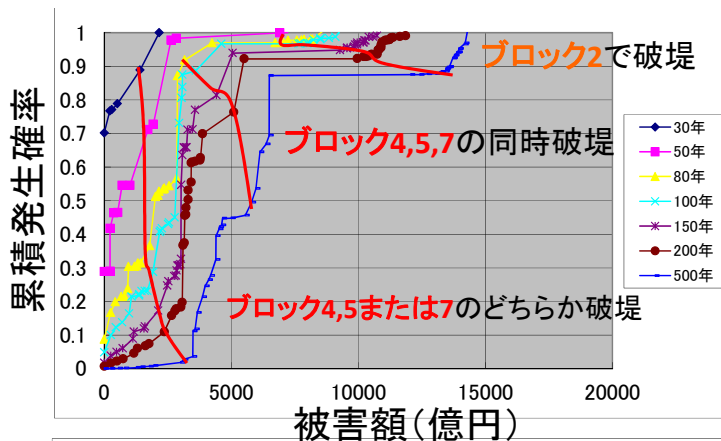
パターンB: 被害最小値もlogTに概ね比例して増加。

図-Ⅱ.2.3.3.14 氾濫被害発生の特徴分析: 事例2-下流型B

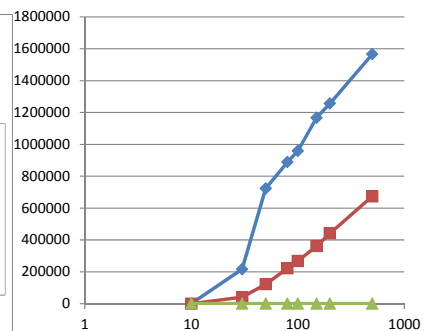
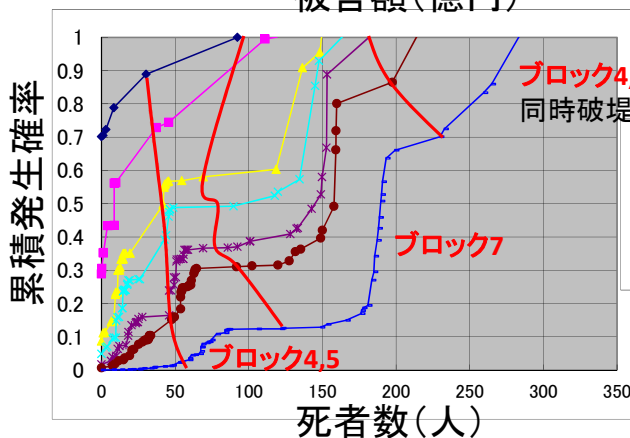


パターンA: 被害最大値が不連続的に急増する箇所がある

Ⅲ型: 下流ブロック群での氾濫が起こりにくい



- 上流ブロック4,5,7の氾濫発生減は特に死者数減につながる
- 被害額減のためには下流ブロック2の氾濫発生減が効果的
- 被害額と死者数: 上下流バランスをどう取るか??



パターンA: logTに概ね比例して被害最大・期待値が増加

図-Ⅱ.2.3.3.15 氾濫被害発生の特徴分析: 事例3-上下流型

### 2.3.3.6 ダムの洪水調節

気候変動に伴って世界的に豪雨が強大化する可能性については、現在までに IPCC レポートやその他の研究において多く指摘されている（例えば IPCC2007）。日本国内に対象とし、将来において豪雨の規模が増大する可能性を示唆する既往研究もある（和田ら 2005、柏井ら 2008）。このように豪雨の降り方が変化するとダムの洪水調節操作にも影響を与える可能性がある。例えば佐山らは、今後の地球温暖化を考慮した場合の淀川流域における洪水流量の増加、ダム操作への影響について、気象庁の地域気候モデル RCM20 のデータを用いて分布型流出モデルにより検討を行っており、例えば日吉ダムにおいては計画規模を越えるような超過洪水頻度が多くなる将来気候においてただし書き操作回数が現在気候と比較して増加することを示している（佐山ら 2008）。同様の検討結果は森らの研究からも得られている（森ら 2008）。このように洪水の規模やただし書き操作回数が増加することは、下流の安全性低下に関わる。

また、洪水時の流量増加に伴いダムの構造に影響を及ぼす可能性がある。ダムはサーチャージ水位の決定の対象となった洪水以上の洪水に対しても、ダム自身が破壊に至らないような安全な対策を講じて、著しい付加的な被害を付近に与えないように設置しなくてはならない。この場合に対象となる洪水は、フィルダムの堤体のように、ダムの堤体からの越流が堤体の致命的な破壊につながるという見地からすれば、ダム地点で工学上発生すると考えられる最大の規模の洪水を考えなくてはならない。河川管理施設等構造令では、このダムの保安上対象とする洪水の流量を、「ダム設計洪水流量」と定義し、ダムの洪水吐きはこの流量を安全に流下させる放流能力を持つように設計される。（財）国土技術研究センター1978）。ここでは、現在までに行われている気候変動とダム設計洪水流量の関係に関する既往検討について紹介する。

河川管理施設等構造令において、コンクリートダムのダム設計洪水流量は、

- ① 200年に1回の割合で発生するものと予想される流量
- ② 当該地点において発生した最大の洪水流量
- ③ 当該ダムに係わる流域と水象もしくは気象が類似する流域のそれぞれにおいて発生した最大の洪水に係わる水象もしくは気象の観測の結果に照らして当該地点に発生するおそれがあると認められる洪水の流量

のうち、いずれか最大の流量を採用することと規定されている。また、堤体構造が越流に弱いフィルダムにあっては、コンクリートダムのダム設計洪水流量の 1.2 倍の流量をもって、フィルダムのダム設計洪水流量としている。ここで、①は生起確率に基づくもの、②は生起実績、③は周辺地域の観測値からの推定に基づくものであり、特に③に記載されている「当該地点に発生するおそれがあると認められる洪水の流量」の表現は、可能最大洪水流量の概念に対応し、実際の算定には地域別比流量図（クリーガ一曲線）が用いられる（土木研究所 1976）。実際のダム設計洪水流量は、地域別比流量曲線により決定されるものが多い（柏井 2010）。

地球温暖化により洪水が大規模化した場合、洪水流量が増えることとなる。極端現象予測チームでは、気象研究所の MRI-AGCM の出力結果を用いて将来における 200 年確率流量の変化を計算した（極端現象予測チーム 2012）。結果の一例として、21 世紀末において中日本地域では 200 年確率流量が現在の 1.19 倍になると試算しており（図・II.2.3.3.16）、構造物の設計基準に用いられている河川流量が変化する可能性があるとしている。

このように、気候変動により豪雨の規模が大きくなると、ダム設計洪水流量についても大きくなる可能性が指摘されており、その場合には洪水吐き放流能力の増強等の検討が必要となつてこよう。今後とも大規模洪水時の洪水流量の変化について注意深く経過観察する必要がある。



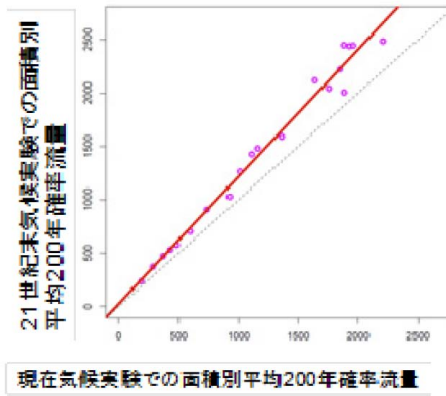


図-II. 2. 3. 3. 16 面積別の年最大 200 年確率流量の現在気候と将来気候の比較  
(極端現象予測チーム 2012)

## 2.3.4 災害の起こり方のコントロールというアプローチの強化—氾濫を考慮した治水施策について

### 2.3.4.1 背景・目的

従来、河道改修、洪水調節施設の整備などの治水対策を整備してきたが、依然として整備率は低く、また治水対策への投資も減少し続ける状況にあるとともに、将来は気候変動による外力の増加とそれに伴う治水安全度の低下が想定されている。

こうした状況を踏まえ、これまでの計画において目標としてきた流量に対し、河道改修や洪水調節施設の整備等を基本とする「河川で安全を確保する治水施策」で対処することに加え、増加する外力に対し「流域における対策で安全を確保する治水施策」を重層的に行うべきであるとの提言（水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方）が、平成20年に社会資本整備審議会にてなされている。

流域全体の被害を最小化することは、治水施策の重要な目標の1つであるが、それに加えて、遊水機能の維持・確保などの氾濫を考慮した流域治水施策の場合、氾濫によって損失を受ける者（地域）と氾濫によって被害軽減便益を受ける者（地域）との衡平をどのように調整し、合意形成を図っていくかということが極めて重要となる。

そこで、流域全体の被害最小化と合意形成が両立した、氾濫を考慮した治水施策手法の確立に向け、1.1.1で示した既存事例の調査結果やモデル河川における遊水機能の分析・評価結果を元に、施策実施に必要な条件の整理と今後に向けた論点の整理を行った。

### 2.3.4.2 施策実施条件の整理

本施策を実施する上での条件を抽出するため、期待される治水効果や地域の認識等の観点から、1.1.1で示した各事例の特徴を整理すると、表-Ⅱ.2.3.4.1のとおりとなる。この表を踏まえ、本施策実施のための条件を以下のとおり整理した。

- ①他に比べ有意に氾濫しやすい場所を特定できること。
- ②その場所が氾濫すると、下流域または流域全体の被害が相当程度減少すること。
- ③氾濫を考慮する地域の理解が相当程度得られること。
- ④施策の総合性・実効性が保たれること。

①②については、氾濫を許容する地域を特定し、その場所における遊水機能を分析し、下流及び流域全体における被害軽減効果を分析・評価するために必要な基本的条件として位置づけられる。現状としては、①については地形や堤防の整備状況や過去の浸水実績状況から明らかに越水（溢水）氾濫しやすい場所か否か、②については再度災害防止等の観点から、外力条件や氾濫許容条件を設定し、それに基づく被害額の計算（又は概略的な見積り）を実施し、施策による被害軽減効果を評価している例が多い。

③については、流域全体の合意形成を図るために必要な基本的条件として位置づけられる。本条件における「相当程度」とは、施策の実施・維持に著しい支障が生じないレベルとして本稿では設定する。現状としては、予算の制約（暫定的な対応）、被害頻度の相対比較（現状よりは悪くならない）、地域内の利害衡平（農地は浸水させるが宅地は浸水させない）などを理由として、相当程度の理解を得ている例が多い。

④については、河川管理者と河川管理者以外の関係部局（自治体の都市計画部局、建築部局、農政部局等）と継続的かつ実効的な連携・協力・調整を行っていくために必要な基本的条件として位置づけられる。現状としては、各個別法令に基づく調整等に留まっている事例が主流ではあるが、一部では、施策実施主体間の連携等を図る体制整備（連絡会の設置）や、規制内容を条例化することにより施策実施主体の具体的な役割・責任分担の明確化を図っている事例もある。

表-Ⅱ.2.3.4.1 各事例の特徴整理

事例	対象地域の概要	期待される治水効果	地域の認識	関係部局との調整等
桜川 (北太田・君島地区)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 浸水常襲地区</li> <li>● 無堤区間を存置</li> <li>● 市街化調整区域、農振農用地区域</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 下流(土浦市街地)に対する被害軽減効果</li> <li>● 流域全体の被害軽減効果</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 暫定的な対応という理解</li> <li>● 宅地浸水は輪中堤で防御</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 計画策定時に関係部局を含めた連絡会を設置</li> <li>● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める</li> </ul>
桜川 (岩瀬地区)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 浸水常襲地区</li> <li>● 水田を防災調整池とみなす</li> <li>● 市街化調整区域、農振農用地区域</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 防災調節池整備と同等の被害軽減効果</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現状より水田の収穫量が減収にならない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める</li> </ul>
天野川 (岩脇・西円寺地区)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 浸水常襲地区</li> <li>● 越流堤を存置</li> <li>● 市街化調整区域、農振農用地区域</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 越流堤下流の岩脇地区に対する被害軽減効果</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水田を浸水させる代わりに、集落地区の浸水危険性を軽減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める</li> </ul>
小貝川 (藤代地区)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 浸水常襲地区</li> <li>● 主として市街化調整区域</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地区全体に対する被害軽減効果</li> <li>● 避難路の機能強化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地域内の現状の浸水リスクバランスを維持</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 関係部局が現行法令に基づいて、開発抑制に努める</li> </ul>
建築物の浸水対策に関する条例 (草津市)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 浸水想定区域図に基づいて設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 建築物の浸水対策強化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 今後予想される浸水頻度、浸水規模の増加への予防対策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 河川管理者が浸水想定区域図の関連データを提供</li> <li>● 現行法令に対する上乗せ・横出し規制として関係部局が実施</li> </ul>
雨水流出抑制施設の設置等に関する条例 (埼玉県)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 浸水想定図に基づいて設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 開発行為などにおける雨水流出抑制施設の設置等の義務づけ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 突発的・局地的な集中豪雨増加への予防対策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 河川管理者が浸水想定区域図の関連データを提供</li> <li>● 関係部局が行う行政指導の内容を明確化</li> </ul>
土砂等による土地の埋立等の規制に関する条例 (沼津市)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 市街化調整区域に基づいて設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境保全のための土地埋立・盛土の規制</li> <li>● 副次的な効果として、遊水機能保全を期待</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 農地荒廃化、土砂流出による環境悪化への防止策</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 現行法令に対する上乗せ・横出し規制として関係部局が実施</li> </ul>

### 2.3.4.3 今後に向けた論点整理

2.3.4.2において施策実施条件を整理したが、これらの条件についての合致判断を行うための分析・評価手法のレベルアップはもちろんのこと、条件が満たされない場合には、条件を満たすための方法論についても、本施策を進める上では議論を深めていくべきと考える。このような視点も含めて、本研究を進める上で、今後さらに議論すべき論点について以下に整理する。

#### (1) 分析・評価手法に関する論点

##### ➤ 破堤現象の取扱いについて

- ✓ 現状では、破堤現象の定量的な評価手法が確立されていないため、「有意に氾濫しやすい場所」の特定については、越水（溢水）氾濫のみによる有意性の評価に留まらざるを得ない。しかし、破堤氾濫も含めた有意性の評価が可能となれば、より適正な場所の選定が可能になる。
- ✓ したがって、2.3.3の研究成果を活用しつつ、破堤現象も含めた場所特定に関する有意性の評価手法が必要ではないか。

##### ➤ 外力設定について

- ✓ 治水施策として望ましいのは、様々な降雨規模・波形の洪水に対して、被害軽減効果を発揮することである。しかし、本施策においては、ダムのような人為的操作を伴わないため、被害軽減効果を発揮する外力条件は限られたものにならざるを得ない。
- ✓ したがって、超過洪水や気候変動への不確実性などに対しても、本施策が「相当程度」の被害軽減効果を有することが可能かどうか（どの程度の施策柔軟性を有するかどうか）を判断するために、複数の外力条件による評価もあわせて実施することが必要ではないか。

#### (2) 条件を満たすための方法に関する論点

##### ➤ 条件③について

- ✓ 水害常襲地域ではない地域を氾濫許容地域とした場合及び現状よりも増加した氾濫リスクを許容する場合、地域において施策実施の理解を得ることは、かなりの困難が想定される。
- ✓ 一方、増加したリスクに見合う何らかの対応策（リスク増に対する相殺策）により、利害平衡が保たれれば、地域の理解度向上に寄与するものと考えられる。
- ✓ したがって、条件②による評価結果を活用しつつ、氾濫許容に対する対応策として、例えば、被害補償や水害保険等の影響緩和策の適用性について検討することが必要ではないか。

##### ➤ 条件④について

- ✓ 現状では、各個別法のもと、都市部局等の関係部局が主体的な施策実施者となっており、河川管理者は、関係部局との連携調整の場の主催、対象流域の氾濫範囲や湛水深等のデータ提供が主な役割となっている。
- ✓ 仮に、流域治水に対する十分な合意形成が事前になされたとしても、想定外の氾濫範囲、浸水深になった場合、被害を受けた住民は、何らかの被害者意識を抱くことになり、場合によっては訴訟に発展してしまうことも想定され、その結果、河川管理者・関係部局と住民間の信頼関係の喪失に加え、河川管理者と関係部局の行政責任や連携調整の合理性が問われることになり、本施策の実施が困難な状況になってしまう。
- ✓ したがって、連携の強化、施策実施のインセンティブを高める観点から、河川管理者と関係部局間の役割分担、責任範囲を明確化する枠組み（法令、条例等）について、検討することが必要ではないか。

以上、氾濫を考慮した治水施策手法の確立に向けて、施策実施条件の整理と今後に向けた論点の整理を行ったが、まだ、概念的かつ定性的な整理に留まっているとともに、各条件の評価結果を最終的にどのような形で総合的な評価（施策評価）に結びつけるかについては、まだ道筋が見えていない。今後も、引き続き事例分析・評価の積み重ね、手法の理論化・実体化に向けた検討が必要である。

## 2.3.5 超過洪水を伴う氾濫を取り込んだ包括策を具体化するための道筋と課題

### 2.3.5.1 防災対策の転換

東日本大震災では大規模な津波が発生し、東北地方の太平洋沿岸が未曾有の被害を受けた。釜石沖に設置された世界最大規模の防波堤が破壊されたように、各地で堤防等防災施設が倒壊し、自然外力の前には防災施設の機能に限界があることが改めて認識された。

このような状況を踏まえて、社会資本整備審議会（2011）では、「地域ごとの特性を踏まえ、ハード・ソフトの施策を柔軟に組み合わせ、総動員させる「多重防御」の発想による津波防災・減災対策」等を図ることを趣旨とした津波防災まちづくりが緊急提言された。これを契機に、首都直下地震や南海・東南海トラフ沖地震等に直面している我が国の防災のあり方として、あらゆる規模の外力を想定し、防災施設を含む地域の構造や危機管理対策等を総合的に整備することが重要となっている。地域における多重防御の具体的な対策例やその主体は概ね表-Ⅱ.2.3.5.1の通りである。

表-Ⅱ.2.3.5.1 防災の多重化

防災の要素	具体的対策例	主体
防災施設	河川施設、海岸施設の整備等	行政
地域・都市の構造	都市計画、建築規制、道路整備等	行政・民間
危機管理	避難勧告、避難誘導、災害予測・防災情報等	行政・民間
危機管理（社会システム）	水防活動、自主防災組織、災害弱者の支援、ボランティア等	地域社会
自主防災	危険地域からの移動、住居の耐水化、保険、学習等	個人・企業

これまで我が国では自然災害に対する対策について国等の行政機関が中心となり、施設整備を中心とした対策や危機管理体制の整備が進められてきた。しかし、施設対策については、今日維持管理費の増大や財政の逼迫の中で、全国的な整備水準の向上を図るのは困難となっている。また危機管理対策は「人命の保護」には効果的であるものの、資産や社会・経済への影響を防ぐには限界がある。現在毎年のように大きな水害が発生し、さらに今後気候変動による降雨、潮位等自然外力の増大とそれに伴う洪水、高潮、土砂災害といった災害の激化に、多くの人命や資産・社会機能が直面している状況においては、地域・都市さらには国土全体の構造の変化も含めた多重防御が重要と考えられる。

東日本大震災の被災地のように大きな被害を受けた地域においては、復興段階において地域の構造を大規模に転換することは比較的容易であるが（釜石市 2012）、既成の地域・都市において既存のストックを移転等するためには、個人の自主的な行動が重要となる。また、そのような行動が総体として災害に強い地域構造に向う仕組みを整備することにより、徐々に国土の強靱化を図らざるを得ないと考えられる。なお、我が国は水害だけでなく地震・土砂災害等様々な自然災害に見舞われる条件下にあり、本来あらゆる災害形態を考慮する必要があるが、ここでは、気候変動により激化が予想される水害を対象に中長期的観点から流域内の適応策について論述する。

### 2.3.5.2 気候変動に対する適応策

上記を踏まえ、気候変動に対しては以下の適応策が考えられる。

#### a)個人の安全な立地選択、自主対策のインセンティブ形成

- ・個人責任原則の厳格化
- ・リスク情報の公表
- ・災害リスクをベースとした土地利用等制度の強化・包括化



b)防災地域づくり、防災国土づくりの骨格（グランドデザイン）の提示

- ・多重防御地域の防災力評価手法の開発
- ・人口減少社会における将来のコミュニティのあり方
- ・防災と環境保全の一体化
- ・グランドデザインの実効性確保

c)危機管理能力の向上

- ・重要地域を守るための地域間のリスク移転

以下、それぞれについて述べていく。

a)個人の安全な立地選択、自主対策のインセンティブ形成

我が国ではこれまで、防災は行政の役割という意識が強く、個々の主体が防災に取り組みためのインセンティブが小さい傾向があった。しかし、防災施設の機能には明らかに限界があり、また地球温暖化による降雨規模の増大や海面上昇等が進行する中では、今後、個人が防災意識を高め危険地域から撤退する等の防災対策を推進するためのインセンティブの形成が重要である。そのためには下記の事項が重要と考えられる。

1)個人責任原則の厳格化

我が国では市民が行政主導の防災対策に依存し自助努力を怠るといった体質から抜けきれていないことが指摘されている（日本学術会議社会環境工学研究連絡委員会自然災害工学専門委員会 1999）。自主防災を促すためには「自己責任」の原則を明確にする必要がある。社会として「生命・財産を守る」ことにおける自己責任原則を明確化することにより、個人の防災意識や責任感が高まる。ただしその一方で、自己責任として押しつけるだけでなく、災害リスク情報の提供や災害に関する情報の分析等に関する能力の向上を図ること等により、個人の適切な選択を支援する仕組み作りが必要である。

2)リスク情報の公表

個人を取り巻く水害の危険性に関しては、これまで治水安全度やハザードマップという形で情報が提供されてきた。しかし、治水安全度については「安全が確保される確率は分かるが、低頻度の大規模な水害が発生した場合に、どのような事態が生じるのか」ということについて何ら情報を提示していない。またハザードマップも基本的に「計画降雨が発生した場合に起こりえる最大浸水深」を示すもので、最大浸水深が発生する確率はどの程度か、また計画降雨規模以上の大雨が発生した場合にどのような浸水が発生するのか等について情報を提示していない。このため、住民をはじめとする情報の受け手としては危険性を理解し難いため、自主的な防災行動に結びつきにくい側面がある。個々の主体が自己責任の下、適切な防災対策を選択できるためには、各主体の視点からのリスク情報が重要である。リスクとはあらゆる事象について、生じる被害の規模・特性とその発生確率の組み合わせを総合化した指標であり、以下のような特性を有する。

- 同一の災害事象に対して各主体（例えば個人、地域社会、全世界等）の立場からの情報を提示することが可能である。例えば、個人の立場からはその個人や企業が保有するリスクが重要であり、政府の立場からは地域、国等が直面するリスクが重要である。
- 個別事象毎の評価が可能であり、必ずしも金銭換算が必要でないため、幅広い事象の考察が可能である。例えば、死亡リスク、財産損失のリスク、通信停止リスク等の観点からリスクを評価することができ、またこれらを多面的に評価することも可能である。
- 事象の発生確率と同様に、将来のCO<sub>2</sub>排出量、社会構造等の不確実性を取り込むことが可能である。（ただし、不確実性の確率分布の設定が必要）一方で、リスクの算出過程は事象の発生確率やハザードから被害への因果関係等において必ずしも十分科学的なものではなく、少なからず仮

定やシナリオが入らざるを得ない。社会全体の意識変化を促すためには、このリスク指標に十分な信頼性や説得力が必要と考えられるが、計算に使用したデータ、計算方法、使用した仮定等を明らかにするとともに、評価の過程で住民参加等を図ることにより、一定の信頼性を確保することは可能と考えられる。社会でリスク指標を共有することにより、自分を取り巻くリスクと受忍リスクの比較、対策効果と費用等を比較し、適切な対策を選択・実施が可能になると考えられる（図-Ⅱ.2.3.5.1 参照（Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Netherlands' Rijkswaterstaat, United Kingdom Environment Agency, and United States Army Corps of Engineers 2011））。



図-Ⅱ.2.3.5.1 個人リスクと受忍リスクの比較

### 3) 災害リスクをベースとした土地利用等制度の包括化

災害リスク情報の提示だけでなく、この情報をベースに土地利用規制や保険料率の設定、自主的な防災対策への助成等一貫した政策を整備することにより、個人の防災に対するインセンティブが一層強まると考えられる。表-Ⅱ.2.3.5.2 は主要先進国の事例であるが、水害対策の体系が災害リスクをベースとして整備・実施されている（国土交通省国土政策研究所 2011）。

我が国の土地利用政策は都市計画法を中心に実施されてきたが、総合治水流域等の特別なケースを除いては都市計画には基本的に浸水リスクが考慮されてきておらず、水害に強い都市づくりを推進するものとはなっていない。建築基準法においては「条例で出水等による危険の著しい地域を災害危険区域として指定し、災害危険区域内における住宅建築規制等を定めることができる」としている（第39条）ものの、出水に関しての指定は少ないのが現状である（大塚 2006）。土砂災害に関する指定区域は多いことを考慮すると、水害に対しては堤防の決壊メカニズムが未解明であること等から、特に危険性の高いエリアの特定や危険度の評価が困難であること、治水安全度等従来の指標では影響範囲が広域にわたることが原因の一つと考えられる。近年、津波被災地の復興地域において浸水想定に基づく土地利用・建築規制が導入されるようになってきているが、その他の地域においては水害の軽減に対してほとんど寄与してこなかった実態がある。今後水害リスクを指標とした政策の強化が求められる。

災害による財産の喪失や生活の困窮等を軽減するためには、保険によるリスク移転が重要となる。我が国では水害に特化した保険商品は無く、住宅保険に組み込まれ、その水害保険に関わる料率は一定又は明らかでないのが一般的である。これは水害危険地域の住民による逆選択の危険性があるとともに、安全な地域への立地・危険地域からの撤退へのインセンティブ形成にはならない。リスク評価に当たってのコストや全国民の公平性の確保が問題になるのであれば、米国や英国のように政府による一律の基準に基づいたリスク評価を導入することの検討が必要となろう。

表-Ⅱ.2.3.5.2 主要先進国のリスク情報による洪水保険、土地利用政策等の事例

国名	保険制度	土地利用規制等
米国	<ul style="list-style-type: none"> <li>・FEMA（連邦危機管理局）がNFIP（全米洪水保険）を所管。</li> <li>・自治体が洪水危険度調査、洪水リスクマップの作成、氾濫源管理をFEMAの基準で行うことがNFIP参加条件となる。</li> <li>・リスクに応じた保険料率の設定。</li> <li>・新規開発には実効料率、既存住宅には補助料率を適用。</li> <li>・洪水軽減策に応じた割引料率（CRS）制度。</li> <li>・災害義援金の受け取りについて、NFIP参加が資格となる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最下階の床面高さ規制。</li> <li>・リスクマップ上のSFHAでの開発を規制。</li> <li>・SFHA（特別洪水危険地帯）での開発に対する政府資金援助、銀行貸付等はNFIP加入が条件となる。</li> </ul>
英国	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EA（環境政策執行機関）がNaFRA（全国洪水リスク調査）を実施、作成された洪水マップをもとに、保険会社各社が保険料率を設定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・EAが作成した洪水マップをもとに、政府の都市・地域計画PPS25が作成され、RSS（地域空間方針）、LDF（地域開発フレームワーク）に反映。</li> <li>・LPA（地方計画庁）がEAの指導のもとSFRA（EAの洪水マップに詳細な堤防地形等考慮）、SFRAの結果がLDF/LDD（地域開発文書）に反映され、これにより開発許認可が行われる。</li> </ul>
フランス	<ul style="list-style-type: none"> <li>・民間保険会社に自然災害保険が義務づけ。</li> <li>・PPR（土地利用計画）に従わないものは保険解除。</li> <li>・PPRを策定し、リスク軽減策を行っていない地域に対しては、住宅保険の免責金額がスライド的に増加。</li> <li>・自然災害に関わる保険料率は政府が一律に設定、また政府からの無制限の損失補償が有る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・知事がPPR（土地利用計画）を作成。3段階のリスク度、インフラ・都市化の状況から指定地域と規制を定める。</li> <li>・土地利用規制に伴う居住地移転に対する財政補償制度。</li> </ul>

また、これらの対策は個々に機能するだけでなく、同一のリスク指標をベースに整合性を確保し、「被災者住宅再建支援条例」等被災に対するコミュニティの維持を目的とした義援金制度等（福岡2005）とも調整・包括化することでより強いインセンティブを形成すると考えられる。

#### b) 防災地域づくり、防災国土づくりの骨格（ランドデザイン）の作成・提示

a)で述べた社会的なインセンティブ形成を、強靱な国土づくりに集約させるためには、土地利用政

策等のベースとなるグランドデザインが必要である。このグランドデザインの作成・実効にあたっては以下の課題がある。

#### 1)多重防御地域の防災力評価手法の開発

地域構造・社会システム等の面から多重防御化された地域について、あらゆる規模・特性を有する自然外力に対しての応答や被害程度を推計し、防災力を評価できる手法の開発が必要である。

#### 2)人口減少社会における将来のコミュニティのあり方

人口減少や少子・高齢化が進む中、各地域ではコミュニティ維持のための努力をしているが、これらは危険地域からの撤退等をはじめとする適応策とは相反する側面を有する。また、厳しい財政下において防災施設やその他インフラ等の整備・更新・維持管理についても「選択と集中」の議論がされている。このように将来の国土のあり方については様々なトレードオフが存在しており、将来の自然災害外力、人口、経済、食料自給率等を総合的に考慮した国家規模での新たなコミュニティの枠組みの提示と、これに対する社会的な合意形成が必要と考えられる。

#### 3)防災と環境保全の一体化

湿地や砂浜等の自然地形は多様な生態系を育む一方で、貯留機能や消波機能等の自然のバリアーをなり得る。また貴重な自然環境を保全するためには自然外力の軽減も重要である。また、都市構造としては自然外力の回避と併せて、省エネ・利便性向上等を図るためのコンパクト化が重要であると考えられる。

#### 4)グランドデザインの実効性の確保

計画的な国土構造の転換のためには、国土→圏域→都市・地方の階層で土地利用のあり方を具体化し、それを誘導する規制や助成制度の整備が必要である。

### c)危機管理能力の向上

#### 1)重要地域を守るための地域間のリスク移転

危機管理能力の向上は「人命の保護」に高い効果を有する他、比較的短期間で効果を発揮することが可能である。我が国では自治体単位で災害に対する危機管理が進められてきており、現在も地域単位で災害弱者への援護、防災情報の速やかで確実な配信、自主防災組織等地域防災力の強化等が検討されているところである。しかし、気候変動に伴う自然外力の増大等が予想される中、より広域的な観点での危機管理体制の整備が求められる。

また、我が国では政治・経済等の国家中枢機能が都心に一極集中しているとともに、大流域を抱えた河川が首都圏を流下しており、カスリーン台風時に発生したような未曾有の洪水が発生した場合には、最悪のケースとして国家機能の停止という事態が予想される。国家としての視点からはこのような事態はあらゆる規模の災害外力に対して回避すべきである。確実に即効性のある対策としては、首都圏で大雨が発生した際に、首都圏の外縁部で洪水氾濫を誘発させ、都心に甚大な被害が及ばない仕組みを構築することが考えられる。しかし、このような人為的なリスクの転嫁については、「どの程度の補償等措置とセットなら社会的に許容されるか」、「どのような仕組みで意志決定を行うか」等多くの課題を有する。

## 2.3.6 不確実性への対応

### 2.3.6.1 不確実性の種類

不確実性あるいは不確かさという言葉は、一般には、はっきりしない、これから起こることが確実ではないという意味で用いられる。不確実性は、統計学などで学術用語としても用いられるが、分野により異なった意味で用いられている。米国科学評議会は、不確実性を以下の通り3つに大別している(NRC, 2013)。

- (a) 統計的変動と不均質性（偶然性あるいは外因性の不確実性）
- (b) モデルとパラメータの不確実性（認識的な不確実性）
- (c) 深い不確実性（deep uncertainty の仮訳）

“統計的変動と不均質性”は、年降水量が年により大きいこともあれば小さいこともあるような自然の変動、土中の地点が異なれば透水係数も大きく異なるような不均質性に起因する不確実性である。この不確実性、即ち、“統計的変動と不均質性”は、システムが本来有する特性であるため、データを多く集めても、減少することはありえないが、多くのデータにより統計値をより正確に知ることができる。分野によっては、これを不確実性には含めず、変動などと呼ぶことがある。

“モデルとパラメータの不確実性”は、対象とするシステムの理解が十分でない場合、理解していても意図的に簡略化あるいは無視した場合、データ不足でパラメータを正確に設定できない場合、データは十分にあってもモデル構造の簡略化やその他の仮定に起因する影響がある場合等である。この種の不確実性は、システムの理解を深める研究で減少させることが可能である。

“深い不確実性”は、当面の研究では減少させることが期待できない不確実性であり、システムが理解できていない場合や、理解されていてもその特徴を記述できる方法がない場合に見られる種類の不確実性である。例えば、医薬品等由来化学物質の中には環境や人体への影響が全く理解されていないものが多数ある。また、洪水流量の把握は、理解されていても記述方法がない例である。流量は平均流速と横断面積の積というシステムは既知である。しかし、洪水に変動する横断面積は通常の体制では観測不可能のため、観測された洪水流量値にはこの種の不確実性が存在する。

分野によっては不確実性に含めないように、“統計的変動と不均質性”はそれ以外の種類の不確実性と区別して考えるべきである。GCMによる将来の極端現象の変化、例えば超過確率 1/100 の日降雨量の将来変化の不確実性には、“統計的変動と不均質性”とそれ以外の不確実性が混在している。GCMによる高々25年間の未来のシミュレーション結果から超過確率 1/100 値を予測することはデータ不足（サンプリング）による不確実性であり、データを増やせばこの種の予測の不確実性は減少する。一方、将来予測結果には GCM の構造やパラメータ設定値が適切でないことによる不確実性も内包している。“統計的変動と不均質性”ではデータを増やせばその統計値をより正確に知ることができるが、モデルとパラメータの不確実性は、モデルランを増やしてその予測結果の平均値を示しても、これは統計的変動とは言えないので平均値が真値に近づいていくと限らない。すべてのモデルが系統誤差を持つことも考えられる。複数のモデルによる予測の信頼度の判断はシステムの理解に基づき行われなければならない。

なお、不確実性の英語は **uncertainty** であるが、不確定性も英語では **uncertainty** である。不確定は、量子力学のように不確実性と同じ意味で用いられる場合もあれば、複数の可能性があり一つに絞りきれないような多義性という意味で用いられる場合もある。

### 2.3.6.2 不確実性の取り扱い事例

水工分野では、降雨量や水位等の外力は大きな自然変動を示すため、古くから確率に基づく施設設計や計画が行われてきた。施設設計や計画に必要な外力は、所定の安全度または超過確率に相当する外力

を、過去観測されたデータを用いた水文統計解析から求め、設定される。解析に用いることが可能な品質の過去データの期間は、通常、数十年程度であり、超過確率 1/100 のような極値を推定するには期間が非常に短いため、利用可能なデータは最大限利用するのが一般的である。このように短期間の過去データから“統計的変動と不均質性”を分析するのは困難であるため、水文統計解析の研究は“モデルとパラメータの不確実性”の低減に努力が払われてきた。この知見を活かし、所定の超過確率に相当する外力推定値は、“モデルとパラメータの不確実性”としてその幅が示すことができ、計画に関する意思決定の参考としている。計画の意思決定は、利用可能な過去データから推定される頻度分布情報に加え、他の様々な事実や推測を加味し、総合的に行われる（泊 2012）。他の様々な事実や推測とは、例えば、史実、古水文学的推測や過去災害をもたらした台風の進路が少しずれていたときの降雨の推測等である。“統計的変動と不均質性”は、水文統計解析では分析できないので、実務的には総合的判断の中で考慮していると言える。

IPCC 第4次評価報告書では、不確実性を主に「値の不確実性」と「構造の不確実性」の二種類に分類し、評価結果の「確信度」(confidence)を、モデル、解析あるいはある意見の正しさについての、専門家の判断に基づく不確実性の程度としている（IPCC 2007）。

### 2.3.6.3 不確実性への対処

“統計的変動と不均質性”由来の不確実性は、対象とする事象が生起する確率分布を求めることができるため、対策案の費用便益分析へ広く利用されている。費用便益分析は、対策案による被害低下量の期待値という単一の尺度に集約される。期待値は、起こりうる外力の範囲で積分して求められるため、小さい外力も大きい外力も発生確率に応じて重要視していることに相当する。

無知に由来する深い不確実性、即ち、事象の生起確率が不明な場合、期待値の計算はできないため、起こりうる事象シナリオ別（例えば、予報的中、予報はずれ）の結果を見ながら、目的や必要性に応じた尺度で対処方法を決めることが行われている。不確実な情報下での対策案の選択に関する意思決定は、経営戦略の意思決定論や気象予報の経済価値を研究する分野で研究されている。その代表的な行動基準は、以下の3つである（立平 1999）。

- (1) ミニマックス損失
- (2) ミニミン損失
- (3) ミニマックス・リグレット

ミニマックス損失とは、最大規模の損失が発生する対策案に着目し、それを最小化する対策を選択する考えであり、リスクをできるだけ避けようという防御型の行動基準である。

ミニミン損失とは、事象シナリオの中での最小損失を最小化する対策を選択する考えであり、攻撃的な行動規範である。うまくいけば損失を最小限にできるものの、大きな損失が発生することもある。

ミニマックス・リグレットとは、選択した対策がはずれた場合の後悔（リグレット）の最大値に着目し、それが最小の対策を選択する行動基準である。後悔は、他の対策案を選んでいれば損失はもっと小さかったらという感情を、両者の損失額の差として表現する。前の2つの中間的な行動規範である。

どの行動基準が適当かは意思決定者の考え次第であるが、住宅の火災保険のように、苦勞して購入した住宅は失いたくないという意識が働く場合はミニマックス行動規範をとることが多い等の傾向はある程度把握されている。

起こりうる事象シナリオは、予報的中かはずれといったあるなしの2シナリオに限らず、工場生産計画における景気シナリオで回復、現状維持、悪化といった3シナリオを設定するように、複数設定することもある。国や銀行の経営健全性、電気製品部品の耐久性、ITシステムの堅牢性等を試験する健全性試験（ストレス・テスト）において、外力シナリオの範囲の設定が重要になる。ストレスは、定格ある



いは通常時の外力以上であり、発生の可能性があり、設計で想定した環境と異なる環境とすることが基本であるが、可否の判断に使うストレスをどこまで大きく設定するかは課題となっている場合が多い。

生起確率が分かる場合は期待値の利用という 1 種類の方法が一般的であるのに対し、生起確率が不明な場合、防御型（リスク回避的）、攻撃型（リスク選好的）、あるいはその中間という方針を選択し、それに応じた行動基準が示されている。生起確率が分かる場合の意思決定においても、「最も適切」とか「もっとも好ましい」とする基準は必ずしも期待値で判断されない。そのため、結果の好ましさの尺度である効用という概念が導入される場合がある。治水経済調査におけるリスクプレミアムは効用の例である（国土交通省河川局 2005）。しかし、社会全体で効用を定量的に把握するのは簡単ではないため、意思決定に反映されるには至っていない。

#### 2.3.6.4 総合減災システム

あらゆる自然災害における防災施設や減災システムの計画は、総合減災システムと呼ばれる概念の下で個々に計画されるべきとされている（河田 2001）。特に、限られた資源の制約下で、構造物と非構造物による対策を組み合わせる被害軽減を真に実現させようとするとき重要となる概念である。総合減災システムは、図-Ⅱ.2.3.6.1 に示すように、受容リスクに相当する外力までは構造物で被害を防ぎ、それを超える外力（超過外力）に対しては構造物と非構造物によりできるだけ被害を抑制する考えである。無被害に抑えるための施設設計は、受容リスクに相当し、対策が可能となる上限の外力は受忍リスクに相当する。

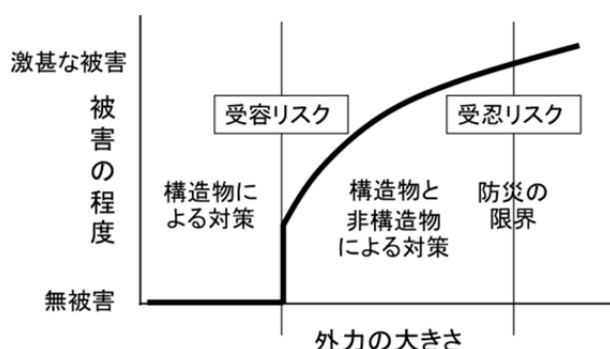


図-Ⅱ.2.3.6.1 総合減災システムの概念（河田(2001)を元に修正)

治水対策での総合減災システムにおける被害曲線の不確実性の考え方を平成24年度国土技術政策総合研究所講演会（藤田 2012）より抜粋する。当該適応策が目標とした外力の実際の出現が予測からずれたときに（特に大きい方に）、どのような被害が生じるかという視点で議論されている。たとえば、気候変動影響は、想定被害～豪雨生起の超過確率年の関係を表す曲線が  $\Delta T$  分左にずれることを意味する（図-Ⅱ.2.3.6.2 参照）。ここで、この曲線の立ち上がりが急であれば（図中のⅠ）、気候変動影響による被害増大の程度、河川整備に関わる適応策の投入量が結果として過小だったことによる被害増大の程度のどちらも大きくなる。このよう場合には、少々無駄になる可能性があっても、予測幅の中でより安全側の外力増想定が選択される方向が考えられる。以上のことは、また、想定被害～豪雨生起の超過確率年の曲線の立ち上がりが緩いことが（図中のⅡ）、換言すれば、施設群の設計外力を超えても被害が徐々にしか増えない構造あるいはシステムを具備していることが、不確実性への対処にも有利となることを示しており、重要なポイントである。

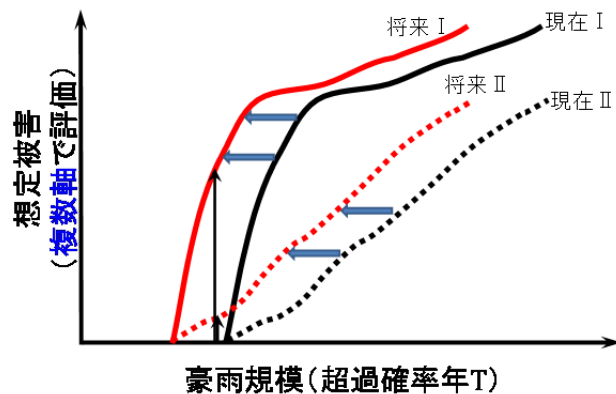


図-Ⅱ.2.3.6.2 被害～豪雨規模関係における気候変動影響（藤田(2012)より引用）  
 ※関係を表す曲線の立ち上がり方の違いが何をもちたらすかの説明。上向き矢印は被害の代表比較。

### 2.3.6.5 順応的管理

順応的管理とは、生態系の保全や自然再生において始められた不確実性を伴う対象を取り扱うためのマネジメント手法であり、アダプティブ・マネジメントまたは適応的管理と呼ばれることもある。例えば、野生生物保護管理の対象は、(1) 基本的な情報が得られない不確実な系であり、(2) 絶えず変動し得る非定常系であり、(3) 境界がはっきりしない解放系である。そのため、当初の予測がはずれる事態が起こり得ることを、あらかじめ管理システムに組み込み、継続的にモニタリングを行いながらその結果に合わせて対応を変えるフィードバック管理（順応性）が必須となる（EIC ネット）。

水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）（社整審 2008）では、「気候変化の予測等に不確実性がある中で適応策を検討するため、今後の観測データや知見の蓄積に応じてロードマップを修正していく順応的なアプローチを採用する。」としている。

このように、深い不確実性への順応的対応となる野生生物保護では、モニタリングが即フィードバックされるマネジメントとなるが、水災害分野ではモニタリングにより当初行った予測を修正し、ロードマップ（実行計画）に反映させるマネジメントとなる。

### 2.3.6.6 水文モニタリングのあり方

#### a) モニタリングの方法

気象現象のモニタリングは気象観測結果を用いて、気候変動監視レポートやIPCC報告書として定期的にまとめられている。

水文と関連する環境のモニタリングは、気候変動と人為的な影響の検知の目的で、古くからおこなわれている。ユネスコのあるプロジェクト報告書が推奨するモニタリング手法は、(1) ビジル・ネットワーク、(2) 水文ベンチマーク、(3) リモートセンシング、(4) 砂漠化モニタリング、(5) 古水文学手法の5つの大別されている（Hardley 1985）。ビジル・ネットワークと水文ベンチマークは共に、人間の寿命を超える長期間でのモニタリングを前提として、前者は流域環境の変化を定期的に測量し、流量等のモニタリングを行うもので、後者はその参照としてできるだけ流域環境が変化しない場所での流量等のモニタリングを行うものである。気候変化の影響のモニタリングは、水文ベンチマークの目的と一致する。米国地質調査所は水文ベンチマークに対し、以下の要件を満たすことを求めている（Cobb and Biesecker 1971）。

1. 現在、人工貯留、調節、分派施設が現在なく、将来もない。

2. 地下水がポンプ取水により影響を受けない。
3. 流量・水質や降雨の様々パターンの観測に適した条件を満たす。
4. 家畜、野生生物や山火事等の特別な自然変化の可能性が小さい。

リモートセンシングと砂漠化モニタリングは、土地被覆変化の継続的監視である。古水文学手法観測開始以前の洪水等を堆積物や年輪の痕跡から推定する方法であり、谷底平野等で過去数百年前までに発生した大洪水の水位が推測できる場合があり、稀にしか発生しない極値の推定に寄与する場合がある。

日本における水文モニタリングは、主に計画と管理目的で設置された既存の観測所データを分析して行っている。その基本方針は、水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）（社整審 2008）が、「気候変化による影響のモニタリングの強化」において「各流域や沿岸域において調査・観測してきた雨量、水位、流量、潮位、波高、水質、流出土砂量、河道形状、生物、被災状況等のデータを活かして、関係機関と連携のもとに気候変化に伴う外力の変化をモニタリングすべきである。」としている。これを受けて、水文変化を分析する統一的手法「水災害分野における気候変化のモニタリングデータ整理等に係る要綱（案）」を定め、各地方整備局等がモニター結果を分析している。また、平成24年度版河川砂防技術基準調査編は、第2章水文観測 8.3 気候変化による水理・水文条件の検知・把握のための観測にて、モニター専用目的の観測所を設置する必要はないこと、（既存観測所から）継続性・連続性の確保、人為的影響のない場所での観測を選定することを述べている。

#### b) 変化検知の分析上の課題

過去の水文観測データから気候変化の影響を検知するとき、以下の点に留意する必要がある。

- 観測誤差や自然の変動より大きい変化でないと検知できない。これは統計学の検定で評価できる。
- 人為的影響度をモデルで推定し除去することが可能だが、推定誤差が大きく気候変化の影響を検知できない場合がある。貯水池操作のように流量そのもののデータがある場合、推定誤差は一般的に小さいと考えられるが、土地被覆変化等の流域環境変化の影響予測は一般的に大きな誤差を伴う。
- 地点データだと観測精度は比較的良いが、変動が大きく気候変化の影響を検知しづらくなり、代表性の問題もある一方で、流域平均値を用いると変動が小さくなり気候変化の影響を検知しやすくなるが流域平均の際の誤差が加わり精度が低下する。

また、過去の水文観測データから稀にしか発生しない極値の生起確率変化を検知するときの留意点は以下のようなものである。

- 短い観測期間データから稀な極値生起確率を予測するときの不確実性
- 地球温暖化ではない自然の変化の影響

例えば、50年間の極値データから、リターンピリオド100年の水量を予測するのは外挿予測であり、外挿範囲が大きいほど予測値は大きな不確実性を伴う。この種の不確実性を減らすためには、データ量（観測期間）を増やすか、極値が発生する統計的なシステムをより良く理解し予測をより正確に行う方法の2つしかない。データ量を増やすには、流量観測解析以前の気象情報である再解析データと大気モデルと流出モデルを用いて流量の極値を再現する、あるいは古水文学的手法で過去数百年から数千年前からの極値を推定する等であるが、いずれもごく限られた条件でしか利用できない実用レベルにはない技術である。

仮に、長期間の過去データが利用できる場合、極値の変化を検知するには有利であるが、長期間であるがゆえに数十年から数百年？のオーダでの自然の気候変化が観測データセットに含まれるこ

とになる。水文統計解析の適用は、扱うデータが定常であること、即ち、時系列データが時間と共に変化しないことが前提となるが、長期間では必ず自然の変化が顕著になり定常性が成り立たなくなる。そのため、たとえ古水文学的手法で長期間の過去データが得られたとしても、極値の生起確率推定の不確実性は減ることはないとの主張がある (Klemes 1993)。

将来の気候変化により定常性が“死に” (Stationarity is dead.)、これまで計画手法で用いてきた水文統計手法が使えなくなるので気候変化に適応した手法開発が必要という意見がある。その一方で、気候が定常であったことはなく、それを承知で統計手法を大きな問題なしに利用できてきたのだから、新たな手法がないと今後の計画ができないということはないという意見もある (Olsen ら 2010、竹内 2010)。

## 参考文献

- 秋葉雅章、腰塚雄太、宮本守、戸谷英雄、佐藤直良、山田正 2004：流出特性に応じたダム放流量の決定方法とその洪水水位低減効果に関する研究、河川技術論文集 第10巻、pp.89-94
- 大塚路子 2006：最近の水害の状況と対策－中小河川の破堤水害と都市水害を中心に－、調査と情報第544号、2006年6月
- 柏井条介、土屋修一、石神孝之 2008：気候変動による豪雨時の降雨量変化予測－GCM20による評価を中心に－、国土技術政策総合研究所資料、第462号
- 柏井条介 2010：ダムの水理設計(3)－必要な基礎知識と水理設計条件(3)－、ダム技術、No.285、pp.14-25
- 釜石市 2012：釜石市災害危険区域建築条例（素案）、2012年4月
- 河田恵昭 2001：巨大災害の様相とその対応策の考え方、地学雑誌、110(6)、924-930.
- 気候変動に関する政府間パネル（IPCC） 2007：気候変動に関する政府間パネル第1作業部会により受諾された報告書、  
[http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc\\_ar4\\_wg1\\_ts\\_Jpn.pdf](http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/ipcc_ar4_wg1_ts_Jpn.pdf)
- 北田悠星、菊地慶、岡部真人、山田正 2010：気象庁の降水短時間予報を用いて既存のダムの洪水調節機能を向上させる手法の提案、水工学論文集、第54巻、pp.523-528
- 極端現象予測チーム 2012：文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム平成23年度成果報告書、pp.202-203
- 建設省土木研究所河川部都市河川研究室 1997：氾濫許容型治水について、土木研究所資料、第3521号
- （財）国土技術研究センター 1978：改定 解説・河川管理施設等構造令、pp.13
- 国土交通省河川局 2005：治水経済調査マニュアル（案）、  
[http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/seisaku\\_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf)
- 国土交通省国土交通政策研究所 2011：水害に備えた社会システムに関する研究、国土交通政策研究第98号、2011年3月
- 国土交通省社会資本整備審議会（社整審） 2008：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申）、平成20年6月.
- 国土交通省川内川河川事務所：鶴田ダム再開発事業の概要、  
<http://www.qsr.mlit.go.jp/sendai/tsuruta-damu/pdf/gaiyou.pdf>
- 国土交通省中国地方整備局八田原ダム管理所 2010：平成22年7月14日～14日出水（梅雨前線）における八田原ダムの洪水調節効果について、平成22年7月15日
- 国土交通省津軽ダム工事事務所：[http://www.thr.mlit.go.jp/tugaru/dam/dam\\_baton\\_03.html](http://www.thr.mlit.go.jp/tugaru/dam/dam_baton_03.html)
- 国土交通省東北地方整備局 2011：台風15号による阿武隈川上流等の出水速報について、平成23年9月23日
- 腰塚雄太、下坂将史、戸谷英雄、山田正 2006：確率予報を用いた事前放流量の決定手法に関する研究、第33回土木学会関東支部技術研究発表会
- 佐山敬洋、立川康人、寶馨、増田亜美加、鈴木琢也 2008：地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価、水文・水資源学会誌、第21巻、4号、pp.296-313
- 下坂将史、呉修一、山田正、吉川秀夫 2009：既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案、土木学会論文集 B、Vol.66 No.2、pp.106-122
- 社会資本整備審議会・交通政策審議会交通体系分科会計画部会 2011：津波防災まちづくりの考え方、2011年7月

- 竹内邦良 2010. : 連邦水関係機関共催「非定常性、水文頻度解析、水マネジメント」ワークショップ参加報告, 河川 2010-2月号, 90-96.
- 立平良三 1999: 気象予報による意思決定, 東京堂出版.
- (財) ダム技術センター 2005a : 多目的ダムの建設、第7巻管理編、pp.78-83
- (財) ダム技術センター 2005b : 多目的ダムの建設、第5巻設計II編、pp.230-231
- 土木研究所 1976 : 全国ダム地点地域別比流量図、土木研究所資料、第1247号
- 泊宏 2012. : 河川計画立案手法の現状と今後の展望, 2012年度(第48回)水工学に関する夏期研修会, 土木学会, 平成24年8月27日.
- 戸谷英雄、秋葉雅章、宮本守、山田正、吉川秀夫 2006 : ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案 土木学会論文集 B Vol.62 No.1、pp.27-40
- 鳥居謙一 2012 : ダム管理の高度化に向けて、土木学会水工学に関する夏期研修会講義集
- 日本学術会議社会環境工学研究連絡委員会自然災害工学専門委員会 1999 : 災害に強い社会をつくるために、社会環境工学研究連絡委員会自然災害工学専門委員会報告、1999年4月
- 福崎博孝 2005 : 自然災害の被災者救済とわが国の法制度～被災者生活再建支援法の成立を中心として～、2005 予防時報
- 藤田光一 2012. : 水災害分野における現場からの気候変動適応～現象の苛烈化と不確実性に立ち向かうための河川技術の方向～、平成24年度 国土技術政策総合研究所講演会講演集、国総研資料第699号、77-94.
- 森英祐、浜口俊雄、小尻利治、田中賢治 2008 : ダム貯水池を含む流域水資源分布の地球温暖化影響評価に関する研究、平成20年度土木学会関西支部年次学術講演会、pp.II-59
- 吉岡修一 2013: 鹿野川ダム改造事業「トンネル洪水吐き」、四国技報、第12巻24号、pp.28-31
- 和田一範、村瀬勝彦、富澤洋介 2005 : 地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究、土木学会論文集 No.796、II-72、pp.23-37
- Cobb, Ernest D.; Biesecker, J. E. 1971: The national hydrologic bench-mark network, USGS Circular: 460-D.
- EIC ネット[環境用語集], <http://www.eic.or.jp/ecoterm/>
- Hadley, R.F. 1985.: Long-term monitoring of natural and man-made changes in the hydrological regime and related ecological environments, Technical Documents in Hydrology, IHP-II Project A.3.1, UNESCO.
- IPCC 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- Japanese Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Netherlands' Rijkswaterstaat, United Kingdom Environment Agency, and United States Army Corps of Engineers 2011 : Flood Risk Management Approaches As Being Practiced in Japan, Netherlands, United Kingdom, and United States, IWR Report No. 2011-R-08
- Klemes, V. 1993: Probability of hydrometeorological events – a different approach, Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts (proceedings of the Yokohama Symposium), July 1993, IAHS Publ. No.213.
- National Research Council (NRC) 2013: *Environmental Decisions in the Face of Uncertainty*. Washington D.C., National Academy Press.
- Olsen, J. Rolf, Julie Kiang and Reagan Waskom, (editors). 2010.: Workshop on Nonstationarity,



Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management. Colorado Water Institute Information Series No. 109. [www.cwi.colostate.edu](http://www.cwi.colostate.edu)