

ダム機能を考慮した下流域の洪水氾濫対策のためのシミュレーション・システムの開発

片田敏孝¹・桑沢敬行²

¹正会員 群馬大学大学院教授 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

E-mail:t-katada@ce.gunma-u.ac.jp

²正会員 (株) IDA社会技術研究所 (〒370-0862 群馬県高崎市片岡町3-1-6)

本研究では、ダムによる洪水調節の効率化と洪水時におけるダム下流域の危機管理の検討支援を目的としたシミュレーションシステムを構築した。本システムは、ダム上流の降雨を与件として、ダムによる洪水調節を考慮した河川の増水や河川氾濫などの洪水現象、また、河川流域の住民に対する放流警報や避難勧告の伝達、住民による避難行動などの社会的な対応、そしてこれらの状況に基づく洪水被害の発生状況を表現することができる。また、本システムは、シミュレーションの状況をアニメーションの形式で表現する機能を有しており、ダムや洪水に関する知識を持たない人を対象にダムの洪水調節機能や洪水時における適切な対応行動について説明するリスク・コミュニケーションツールとしても利用することができる。

Key Words: simulation, dam, flood control, excessive flood, risk management, risk communication

1. はじめに

地球の温暖化による気候変動の影響により、集中豪雨の増加が予測されている¹⁾。また、洪水調節機能を持つダムにおいては、計画規模を超える洪水の発生を受けて「ただし書き操作」に移行せざるを得ない状況となる事例も多々見られるようになってきている²⁾。このような異常洪水時においては、ダム下流の河川においても支川等からの流入が増加し、相当の流量量となっていると想定されることから、ただし書き操作が実施されることとなれば、河川が氾濫する危険性は著しく高まる。したがって、近年の洪水発生に関する傾向を踏まえるならば、ダム下流域において人的被害を発生させないためのダムの運用方法や下流域の危機管理を検討することの重要性は高いと言える。

国土交通省河川局が平成13年に設置した「新しい時代のダム管理を考える研究会」の報告³⁾では、より安全に効率的にダムを運営していくことを目的として、ダムに関する情報提供の改善を主眼に、洪水時においては、放流警報や情報提供の方法を改善することで下流の被害軽減を図ること、また平常時においては、ダムの効果や操作規則に関する情報を発信することでダムに対する理解促進を図るなどの方針が出されている。また、平成16年にまとめられた総合的な豪雨災害対策についての緊急提

言⁴⁾では、ダムの運用に関して、洪水時の情報伝達の改善や事前放流などの洪水調節方法の高度化が提言されている。このようなダムに関する既往の洪水対策の検討結果を概観すると、その内容は、1.洪水時におけるダムからの情報提供の改善、2.平常時におけるダムの理解促進、3.ダムによる洪水調節の高度化という三点に集約することができる。また、ダムによる洪水調節の影響を直接受けるダム直下に位置する地域については、住民に対して避難を指示する権限を持つ市町村とダム管理者が連携して住民避難を検討していくことも洪水被害の低減に向けた有効な手段と考えられる。

本研究では、以上のような考えを背景に、洪水時におけるダム運用の効率化とダム下流域の危機管理の検討支援を目的としたシミュレーションシステム（以下、本システムと呼ぶ）を構築した。本システムは、降雨波形を与件として、降雨の流出やダムによる洪水調節、そして下流河川の増水や氾濫といった洪水に関する現象、また放流警報や自治体からの避難勧告の伝達、住民の避難行動といった洪水時における社会的な対応行動、そしてこれらの状況に基づく被害の発生状況を表現することができる。したがって、本システムは、下流河川の洪水氾濫や沿岸地域の被害規模を評価指標として、効率的なダムの操作方法、放流時における警報伝達、そして住民避難などを検討するなど、ダムや下流域を対象とした洪水時

の危機管理の検討を支援するツールとして利用できる。また、本システムは、計算結果をアニメーションの形式で視覚的に表現する機能を持つことから、専門的な知識を持たない一般の人を対象にダムによる洪水調節や洪水時における適切な対応行動について説明するなど、ダムや洪水に関する理解促進を目的としたリスク・コミュニケーションツールとしても利用できる。本論文では、ダムとその下流域の危機管理に対する本システムの有用性やシミュレーションモデルの構成について述べるとともに、ダムによる洪水調節や下流域における避難情報の伝達に関する分析事例、そして、リスク・コミュニケーションツールとしての機能について述べることにより、本システムの意義や活用方法の具体について示す。

2. 洪水時のダム下流域の危機管理におけるシミュレーションシステムの有用性

異常洪水が発生し、ただし書き操作が実施されるような事態においても、下流域の被害を抑制するためのダムの運用方法が検討されている。また、洪水による人的被害の低減に着目すると、住民の洪水やダムに対する意識改善や理解促進も重要な課題として挙げられる。本章では、これら二点についての現状や課題について整理し、それぞれに対する本システムの有用性について考察する。

(1) 下流域の洪水被害を意識したダムによる洪水調節

一般的な洪水調節機能を持つダムにおいては、下流河川の整備状況に合わせた放流計画が定められていることから、計画規模の範囲内の洪水であれば、下流において被害が生じる危険性は少ない。しかし、異常洪水時には、ダム堤体からの越流により、洪水調節が不能となる事態を避けるために「ただし書き操作」が実施される。そして、このただし書き操作時には、計画規模を上回る放流が行われることから下流河川において氾濫の危険性が高まる。

このようなただし書き操作による下流域の洪水被害の抑制を目的として、今村⁵⁾は、水位放流方式と呼ばれる洪水調節方式を提案している。この方式は、ダム放流による下流の水位上昇速度をただし書き操作の制約条件に加えること、またその時点の流入量や貯水池の空き容量から放流開始のタイミングや放流量を決定することによって、下流域に対する放流の影響を抑制する。また、裏戸⁶⁾は、V~R法と呼ばれる調節方式を提案している。この方式は、予測される総流入量とダムの空き容量を逐次比較しながら放流率を決定していく方式であり、ダムの治水容量の有効活用を目的としている。そして、竹下⁷⁾は、これらの洪水調節方式を実運用されているダム

に適用し、その効果について検証している。また、一定規模の洪水が予測される場合に利水容量にまで及んだ放流を洪水発生前や流入量のピーク前に実施し、洪水時のダム容量を増加させるための検討も多くなされている⁸⁾。また、実際のダムの運用においては、洪水時におけるダム管理者の機転により下流域の被害を低減させた事例がある。特に平成17年9月に九州から関東にかけて甚大な被害をもたらした台風14号に際しては、早明浦ダムにおいて、洪水末期においても下流の水位を考慮して放流量を制御し、下流域における被害を抑えた例や、野村ダムや市房ダムにおいて、事前放流を実施することでただし書き操作への移行を回避したなど、多くの報告がなされている⁹⁾。

下流域の洪水被害を意識したダムによる洪水調節の効率化に関しては、以上のような様々な検討や実運用における事例が存在している。しかし、管理者独自の判断に基づく操作によって、下流域の被害が拡大したり利水に悪影響を与えてしまった場合には、管理者の責任が問われることから、実際の洪水調節の多くにおいて、運用規程から外れた操作を実施することは避けられる傾向にある。加えて、洪水調節時は逼迫した状況におかれることから、これまでに検討されていない操作を臨機に対応することは困難であると考えられる。したがって、前段のような事例がさらに増加するためには、想定される種々の事態への対応策について十分な事前検討を行い、個々のダムや流域の特性を考慮して運用規定の改善を図るなどの対応が必要である。

(2) ダムや洪水に対する住民理解の必要性

河川を利用する住民の洪水やダムに対する知識不足が、洪水時における適切な対応行動を妨げ、場合によっては人的被害の発生を誘発するという問題がある。平成11年8月に起こった玄倉川の水難事故は、この問題に関する象徴的な事故である。熱帯低気圧の大雨による洪水の発生を危惧した玄倉ダムや通報を受けた警察が、ダム下流の中州でキャンプしていた人達に対して、河川の増水の警告や避難の勧告を行った。しかし、再三に渡る勧告にも関わらず、十数名が中州に居続け、結果として13名が濁流に飲み込まれるという惨事となった¹⁰⁾。この時、被害にあった人達が警告を受入れずに避難しなかった要因は多々考えられるが、避難を勧告された時点で自分たちが置かれている状況や今後予測される事態の危険性を正しく認識できていれば、事前に避難した他の人達と同様な行動が取れていたかもしれない。このような問題は、一時的な河川利用者に限らず、河川流域に住む人達に対しても当てはまる問題であり、洪水時において避難勧告が出されたにも関わらず、住民の避難が低調であったという事例も報告されている¹¹⁾。

玄倉川の例を含めて、避難を勧告されても住民が避難しない問題は、勧告者が持つ危機感と住民の抱く危機感の間に乖離が生じていることが要因として考えられる¹¹⁾。洪水時において住民が適切に避難するためには、避難に関する情報が伝達される事に加えて、情報を受け取った住民自身が、そのような情報が出された背景となる現在の状況や今後予想される事態、そして避難しない場合に起こりうる被害を正しくイメージできる能力を持つ必要がある。そして、このためには、雨や河川、ダムなど洪水に関連した知識を有している必要があるだろう。特にダムに関して言えば、現時点においてわが国では、2,500基以上が運用されており¹²⁾、身近な河川工作物と言えるが、実際の機能や運用方法については十分な理解が得られていないという問題がある。事実、玄倉川の例では、後日事故が起きた原因について様々な意見が出されたが、玄倉ダムが洪水調節機能を持たない発電用の小規模ダムであり、洪水を抑える能力を持たないこと、またそのままでは堤体からの越流によりダムが崩壊するという最悪の事態が危惧されたという説明がなされたにも関わらず、ダム操作に対する批判的な意見が出された¹³⁾。この例のように、異常洪水時においてダム下流域に洪水被害が生じた過去の例をみると、ダムによる放流が被害の原因として捉えられてしまう場合が多い。勿論、管理者側に過失が認められる場合もあるが、住民のダムに対する理解不足や誤解によるものと考えられる事例も少なくない。このような現状を勘案すると、洪水時における人的被害の抑制やそのための治水事業を推進する上で、ダムや洪水に対する正しい理解の促進を図ることは重要な課題であると言える。

(3) ダムによる洪水調節の効率化と下流域の危機管理におけるシミュレーションシステムの有用性

本節では、前節で提示したダムに関する問題それぞれに対する本システムの有用性について示す。

a) 洪水調節の効率化と下流域の危機管理における活用

下流域における被害低減までを考慮したダム運用の改善を促進するためには、複雑な洪水時のダム運用の検討を支援するための仕組みが必要である。本研究では、この問題に資するツールとして、ダムによる洪水調節を考慮した洪水現象に関する一連の状況や、洪水時における社会的な対応を総合的に表現するシミュレーションシステムが有用であると考えた。このような機能を持つシステムを用いることによって、洪水時におけるダム操作や下流域に対する警報の伝達、自治体との連携といった種々の問題を、下流域における具体的な被害規模を評価指標として検討することが可能となる。

シミュレーションによりダムによる洪水調節の下流域への影響を検討している既往研究には、佐山ら^{14),15)}によ

る淀川流域を対象とした分布型流出予測システムによるダム群の効果検証に関する研究やSaavedra et al.¹⁶⁾による利根川水系を対象とした研究などがある。これらの研究が、流域に対するダムによる洪水調節の効果を評価することを主要な目的としていることに対して、本研究は、ダムによる洪水調節を考慮した下流域の危機管理の検討を目的としている点が異なる。このため本システムでは、異常洪水時におけるダム放流の影響を直に受け易いダム直下の沿岸地域を対象範囲に定め、ダム放流による影響を河川水位で表現したり、氾濫域までを把握することを可能としている。また、流域の住民や情報伝達、避難施設を表現することで、人的被害や物的被害までを考慮した検討を可能としている。

また、ダムによる洪水調節方法の効率化を目的とした研究としては、流出特性に基づくダムの前期放流を提案している秋葉ら¹⁷⁾の研究や、前述した今井⁵⁾や裏戸⁹⁾による洪水調節方法の効率化に関する研究がある。本研究は、このような洪水調節の改善を目的とした研究による成果を具体的なダムに対して適応した場合の効果やその影響を考慮した危機管理について検討することが目的となる。なお、実際にダムを運用するダム統管理事務所などでは、ダムの運用に関する情報収集、予測、計画、操作等を実施しており、降雨や河川の現況を表示するシステムや降雨予測やダムへの流出を予測するシステム、そしてこれらの情報に応じてダム操作を最適化するためのシステムなどが運用されている^{18),19)}。ただし、一般にダムの運用は、流域全体の流量調節を目的として実施されており、これらのシステムは、本研究の対象とするようなダム直下の洪水氾濫や流域の危機管理の検討を目的とするものではない。

b) ダムや洪水に関する理解促進における有用性

特にダム下流域においては、周辺の降雨状況のみによる洪水状況の判断が困難な場合があるため、洪水時における適切な対応行動を実施するには、河川のみならず、降雨やダムによる洪水調節、また支川からの流入など、河川洪水に係る種々の要因やその相互関係についても理解している必要がある。本研究では、このような問題に対しても、降雨の開始からダム下流域において水害が発生するまでに係る各種現象を総合的に取り扱うシミュレーションシステムが有用であると考えている。このような仕組みを用いることにより、降雨量の増加によって河川に洪水が発生することやその時間的な遅れ、洪水規模に応じたダムによる洪水調節、そして、ダムからの警報の発令やその後の河川水位の変化など、ダム下流域における洪水現象やその際の適切な対応について理解するために必要な種々の事象を具体的に説明することができる。

また、住民に対するダムの洪水調節やその効果の説明方法に着目すると、一般的にダム地点における洪水流量

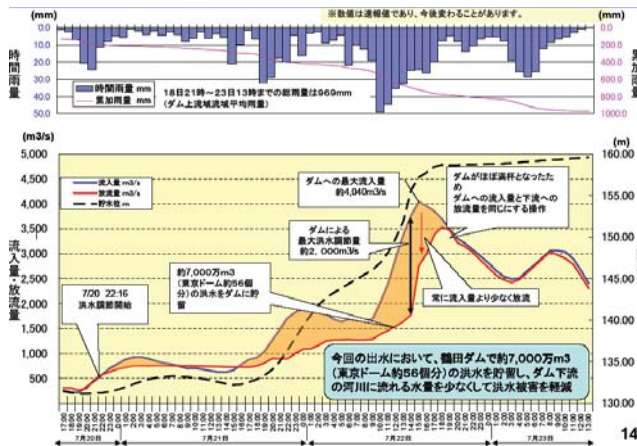


図-1 一般的な洪水調節結果の説明図²⁰⁾

や河川の特定点における水位の時系列的な変化をグラフや数値で示し、ダムが機能しなかった場合と比較する形で、洪水ピークの遅延や河川水位の違い、洪水流量の違いなどが説明される場合が多い(図-1参照)。確かに、ダムの流出入量を示した図を見ることによって、最大流入量や貯水量、放流量などを数値で把握することができる。また、河川水位のグラフを見れば、ダムの洪水調節によってある地点の河川水位が何cm低下したのかを把握することができる。しかし、専門的な知識を持たない人が、このような数値から最も関心のある自宅やその周辺地域への影響について、ダムによる効果を明確にイメージすることは困難である。より効果的にダムの役割や効果に関する情報を提供するためには、ダムや河川の状態を数値だけではなく模式的に表現したり、時間に係る効果を示すために時系列的なアニメーションを利用したり、洪水の状況を河川氾濫や被害状況にまで及んで表現するなど、見る人が直観的にイメージしやすい方法を用いる必要があるだろう。

3. シミュレーションシステムの構築

(1) シミュレーションモデルの構成

本システムで利用するシミュレーションモデルの構成とモデル間の情報の流れを図-2に示す。

まず、ダムの機能を含む洪水現象については、集水域に降った雨がダムや河川に流出する状況を示す流出モデル、ダムによる洪水調節の状況を表現するダムモデル、ダムからの放流などに基づいて河川の水位や流量の変化を表現する河川モデル、そして河川が氾濫した場合の堤内地の浸水状況を表現する氾濫モデルで構成される。

次に、洪水時におけるダム下流域の社会的な対応については、ダムからの放流警報や自治体からの避難勧告などの災害情報が住民に伝達される様子を表現する情報伝達モデルと、災害情報の取得などをきっかけとして住民

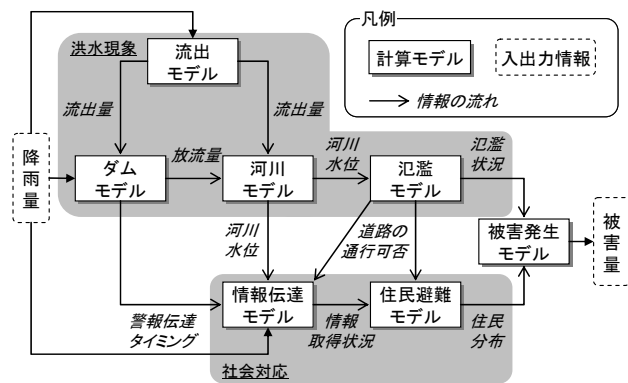


図-2 シミュレーションモデルの構成

が避難場所に向けて避難する様子を表現する住民避難モデルで構成される。なお、災害情報の伝達や住民の避難行動は、洪水や氾濫の進展状況に影響を受けるため、洪水現象を表現するモデル群の結果を随時参照する。

最後に、洪水氾濫による被害の発生状況を表現するために、洪水氾濫と住民や建物分布から人的・物的被害の発生状況を表現する被害発生モデルが組込まれている。

以上のように、本システムは、降雨を初期条件として、ダムによる洪水調節を考慮した洪水や氾濫の状況を表現するとともに、その際の下流域の社会的な対応状況を表現し、被害の発生状況までを表現する総合的な構成となっている。なお、本システムは、シミュレーションモデル間の関係を簡潔に表現するため、オブジェクト指向プログラム言語を用いて単体のプログラムとして構築している。プログラム内では、ミリ秒単位で更新する時刻を基準に、各モデルの表現内容に応じて他のモデルの出力を参照したり、状態を変更したりすることによって挙動を表現しており、個々のモデルの挙動によってシミュレーション全体が表現される構成となっている。また、プログラムの開発は、Microsoft Visual C++ 2005を用い、シミュレーションの計算は、Windows PCにより行った。

(2) シミュレーションモデルの概要

本節では、図-2に示した各シミュレーションモデルの概要について示す。なお、ダムによる洪水調節を表現するダムモデルについては、次節で述べる。

a) 流出モデル

本モデルは、流域面積や基底流量など流域の特性を示すパラメータに応じて、与件である時間毎の降雨量から、経過時間ごとのダムや河川への降雨の流出量を出力する。計算手法としては、木村²¹⁾による一価関数を利用した貯留関数法を用いている。また、土壌への浸透を考慮するため、一次流出率を用いて流出域と浸透域を区別し、流出域においては全降雨量、浸透域については、飽和雨量を超えた降雨量によって流出量を計算している。

b) 河川モデル

流出モデルやダムモデルから出力される流出量や放流量を上流端の境界条件として、また任意に設定する水位を下流端の境界条件として河道内の水位や流量の時系列的な変化を表現する。本システムでは、雨の降り出しから洪水が発生するタイミングやダムの操作開始からの氾濫までのタイミングなどを把握するため、計算手法としては一次元の不定計算²²⁾を用いており、モデルの構築には、任意の間隔における河川断面に関する情報が必要となる。また、河川の対象区間に支川が流入している場合、支川の規模に応じて、流出モデルによる支川への流出量をそのまま本川の計算に用いるか、河道を表現するモデルに支川の情報を組み込むか判断する。

c) 氾濫モデル

破堤や溢水などによって、堤内地に流入した氾濫流の挙動を直交座標系の二次元不定流計算²²⁾によって表現する。なお、本モデルにより計算される氾濫状況は、住民の避難状況と合わせて評価することから、10m程度の細かい計算格子を利用する必要がある。このため、本モデルの構築には、地形や粗度に関する情報も同様な精度のデータが必要となるが、これには航空レーザ測量による標高値や航空写真などが基礎データとして利用できる。

氾濫流量は、河川モデルによって出力される氾濫箇所への河川水位と堤内地の水位から越流公式を用いて堤内地への氾濫量を算出する。なお、ダム直下の河川は、河床勾配が大きく流速が速い場合が多いため、必要に応じて氾濫流量を補正する必要がある²³⁾。また、氾濫の開始タイミングは、河川モデルによる水位と堤防高などを比較することによって定める。

d) 情報伝達モデル

放流に基づく警報や自治体からの避難勧告などの災害情報がダムの警報伝達施設や自治体が管理する防災行政無線、広報車、そしてマスメディアなどを通じて住民に伝達される状況表現する。また、住民間の口頭伝達などによってこれらの情報が拡まる様子を表現するため、個々の住民による情報伝達行動についても表現する。本モデルでは、筆者らが既往研究において構築した編ネットモデルを利用した住民の情報伝達行動の表現を基本に、防災行政無線などの情報伝達メディアによる伝達状況を考慮した災害情報伝達シミュレーションモデル^{24),25)}を用いている。

情報の伝達開始タイミングは、ダムモデルによって設定される警報の伝達タイミングや行政が避難勧告を発令するタイミングに基づく。なお、行政による避難勧告の発令タイミングは、ダムモデルや河川モデルの出力を参照することで、ダム管理所から伝達される放流操作に関する通知や降雨、河川水位などを基準とすることを想定している。

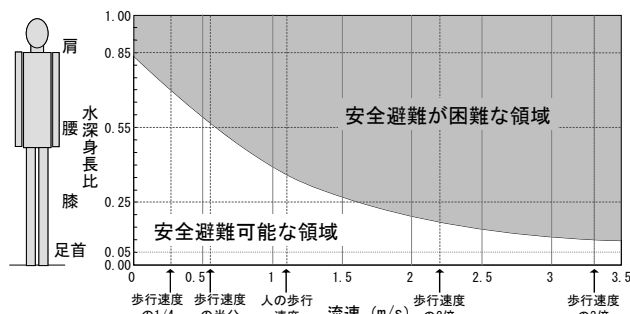


図-3 流体力による避難困難度の判定モデル²⁸⁾

e) 住民避難モデル

住民による避難行動について道路を表現するリンクと交差点を表現するノードで構成されるネットワークデータを利用して表現する。避難先や経路は、A*法²⁶⁾により求めた自宅から最も近い避難場所とその場所までの最短経路を利用する。避難中は、避難開始からの経過時間と避難速度に応じて避難位置の変化を表現する。また、避難者の浸水状況に応じて避難速度を減少させている²⁷⁾。

なお、避難者の避難開始タイミングは、情報伝達モデルによって表現される避難勧告などの取得タイミングを基準として、避難の準備に費やす時間などを加算した時刻に設定する。また、10秒毎に氾濫モデルにより出力される浸水状況を確認し、避難者が進入するリンクが冠水していた場合、ネットワークから該当リンクを除外し、避難者の避難先や避難経路を再設定する処理を行うことで、浸水状況に応じて避難経路や場所を変更しながら避難する様子を表現している²⁷⁾。

f) 被害モデル

洪水氾濫に基づく人的・物的被害の発生状況を算出するモデルである。洪水による人的被害は、発生形態が多様であり、氾濫状況から一意に犠牲者の発生を判定することは困難であることから、本研究では、自力避難が困難となり何らかの救助を要する住民を示す「要救助者」の発生数を人的被害を評価するための代理指標として用いる。自力避難の可否は、10秒毎に住民避難モデルから取得される住民分布と氾濫モデルによる浸水状況を比較し、須賀ら²⁸⁾の式により水深身長比と流速を用いて判定する(図-3参照)。また、物的被害としては、浸水深別の建物数を出力するとともに、流体力から家屋倒壊の可能性について判定する佐藤ら²⁹⁾の式を利用して、被害が及ぶ可能性のある建物数を算出している。

(3) ダムモデルの概要

ダムモデルは、ダムによる洪水調節と下流域に対して警報や通知が発信されるタイミングを表現する。

a) ダムによる洪水調節の表現

ダムによる洪水調節を表現するモデルにおいて、放流量は、流入量や貯水位を変数とする関数から直接求めら

れることが一般的であり、ゲートの開閉状況まで表現されるものは少ない^{7),8),14)}。しかし、本システムは、具体的なダム の操作方法までを検討対象とすること、ダムに関する専門的な知識を持たない人に対して分かりやすくダムの機能などを説明することを目的としていることなどの理由から、より実際の手順に沿った形でダムの動作を具体的に表現する必要があると考え、ダム の状況に応じたゲート操作を表現し、その結果として放流量が定まるモデルを構築した。

ダムによる洪水調節を表現する処理は、ダムの「状態更新処理」と「操作処理」で構成される。まず、状態更新処理では、ダム の貯水位や貯水量の変化やゲートの動作といった物理的な状態の変化を表現する。貯水位や貯水量は、貯水量と貯水位の対応表（HQテーブル）や貯水位とゲート開度と放流量の関係表（HAQテーブル）といったダム の貯水池やゲートの特性を示す値を用いて算定する。具体的には、現在の貯水量からHQテーブルを用いて貯水位を算出し、貯水位とゲート開度からHAQテーブルを用いて放流量を求める。そして、流出モデルの結果から取得したダムへの流入量と計算した放流量から現状の貯水量の変化を求める。また、状態更新処理では、計算時点において後述する操作処理で設定されたゲートの目標開度に現在のゲート開度が達していない場合、ゲートの開閉速度に応じて開度を更新する処理を行う。なお、本処理は、前計算ステップにおける貯水量を今回の放流量の計算に用いるために、1秒間隔など十分細かい間隔を設定する。

次に、操作処理では、ダム の状況に応じたゲート操作を表現する。ダムによる洪水調節は、1.洪水警戒体制、2.洪水調節操作、3.ただし書き操作、4.洪水調節後操作といった複数の操作段階に分けることができる¹⁴⁾。また、予備放流などを実施するダム の場合は、洪水調節操作の前に予備放流や事前放流を行う。本モデルでは、基本的に処理時点におけるダムへの降雨量や流入量、そして貯水位を基準として、ダム の操作規則や操作細則（以下、運用規程と呼ぶ）に則って洪水調節の操作段階の遷移を表現するとともに、各段階において定められたゲート開度や放流量を目標にゲート操作を表現する。

次章に示すシナリオ分析の対象とした相俣ダムでは、総降水量が40mmを上回った段階で、洪水警戒体制となり、ダムへの流入量が洪水流量に達すると、洪水調節操作体制に移行する（図-4のC）。そして、貯水位がただし書き操作開始水位に達し、さらに洪水時満水位に達する傾向にある場合（E）は、ただし書き操作に移行し、放流量と流入量が等しくなった時点（F）で、洪水調節後の操作に移る。また、各段階においては、貯水位が洪水期制限水位を超えてから放流量が計画最大放流量に達するまで（B→D）は、ゲートからの放流が自然越流と

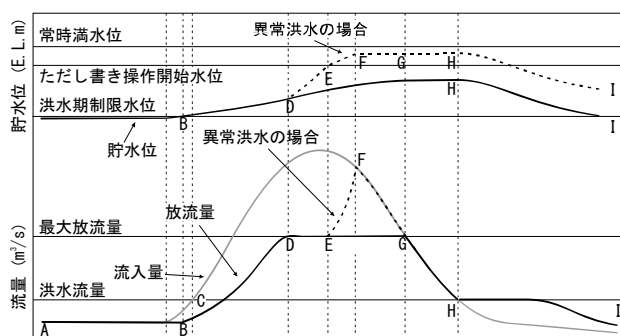


図-4 ダムモデルによる洪水調節操作の表現イメージ

なるよう貯水位と同じ高さにゲートの開度を設定する。また、放流量が計画最大放流量に達した後は、目標放流量を計画最大放流量に固定する（D→E）。そして、ただし書き操作に移行した場合は、運用規程に定められるただし書き操作時の水位と放流量の対応表に則って目標放流量を定める（E→F）。また、洪水調節終了後の操作時においては、流入量と同量を放流することで貯水位の増加を避け（F→H）、流入量が洪水流量に達した後は、貯水位が洪水期制限水位に低下するまで目標放流量を洪水流量に固定する（H→I）。なお、操作目標が放流量で与えられる場合は、HAQテーブルを用いて目標開度に変換する。また、運用規程には、放流により下流の急激な水位変化を避けるために一回のゲート操作による放流量の最大変化量が定められているため、状況に応じて目標放流量を調整する。そして、ゲート操作処理は、10分などダム の運用規程に定められた操作間隔毎に実施する。

b) 下流域への警報などの発信タイミングの表現

洪水調節の操作段階の切り替わりやただし書き操作への移行などに対して警報が発信されるタイミングを算定する。このタイミングを利用することによって、たとえば「ただし書き開始から30分後に自治体が避難勧告を発令する」などのダム操作に応じた住民への避難情報の伝達シナリオを表現することが可能となる。なお、住民の情報の取得状況は、情報伝達モデルによって表現される。

(4) システムの入出力情報と適用範囲

本研究では、洪水調節機能を持つダムやその下流域を対象とした表-1に示すような項目の検討に本システムを適用することができると考えている。

本システムを構成する各シミュレーションモデルは、表-2に示す入力条件と表-3に示した他のモデルによる出力結果を利用し、全体としてダムとその下流域における洪水時の状況を表現する。表-2の太字で示した項目は、シナリオ分析において検討目的に応じた政策変数として利用することが想定される項目を示したものであり、目的に合わせてこれらの条件を変化させたシミュレーショ

表-1 本システムを用いた検討対象項目

モデル	ダムの影響を考慮した検討対象項目
ダム	下流域の被害最小化に向けたダム運用の効率化 ・ダム操作の効率化 ・下流域への警報タイミング ・下流自治体との連携
河川氾濫	ダムの影響を考慮した地域計画の高度化 ・河川整備計画 ・土地利用計画
情報伝達 住民避難	ダムの影響を考慮した地域防災計画の高度化 ・情報伝達計画 ・避難誘導計画
全体	ダムを対象としたリスク・コミュニケーション ・洪水時・警報時の適切な対応行動の理解 ・ダムに対する誤解の解消

表-2 シミュレーションの入力条件

モデル	入力情報
流出	流出計算パラメータ, 降雨波形
ダム	貯水位-貯水量対応, 貯水位-開度-放流量対応, ゲート緒元 (敷高, 開閉速度, 最大開度), 警報伝達施設配置, 各種基準値 (操作, 警報), ただし書き操作時の水位-開度対応
河川	横断形状, 粗度, 氾濫条件
氾濫	堤内地地形, 堤内地粗度
情報伝達	住民分布, 建物分布, 道路網, 避難勧告基準, 防災行政無線配置, 広報車巡回経路,
住民避難	避難率, 避難開始条件, 避難速度, 避難施設配置, 避難施設収容能力

表-3 シミュレーションからの主な出力情報

モデル	出力結果
流出	流出量変化
ダム	放流量変化, 警報発令・通知タイミング
河川	水位変化, 流量変化, 氾濫タイミング
氾濫	氾濫流量, 氾濫域, 浸水深, 流体力
情報伝達	情報取得者, 情報取得タイミング
住民避難	避難者数, 避難者分布, 避難完了時間
被害	人的被害量, 家屋被害量

ンを実施し、その結果から設定した政策変数が他のモデルに与える影響や最終的な被害に与える影響などを把握することによって各種検討を進めることとなる。

なお、表-1に示したダムを対象としたリスク・コミュニケーションについては、各モデルと被害の関係だけではなく、洪水現象やその中でのダムの機能、そして下流域における社会的な対応や被害の発生状況など、シミュレーションにより表現される状況の全貌を示すことが有効であると考えている。このためには、一般の住民などを対象に、本システムによる計算結果を分かりやすく説明する必要があると考えており、本研究では、この課題を達成することを目的とした機能も開発している（5章参照）。

表-4 流出モデルの計算条件³⁰⁾

No.※	K	P	T ₁	A	A _{mv}	Q _b	R _{sa}	F ₁	F _{sa}
1	51.8	0.284	0.45	110.8	101.7	7.1	38.0	0.5	1.0
2	55.1	0.320	0.00	80.9	54.8	5.2	27.1	0.5	1.0

K, P: モデル定数 T₁: 遅れ時間(hour) A: 流域面積(km²) A_{mv}: 有効面積(km²)
Q_b: 基底流量(m³/s) R_{sa}: 飽和雨量(mm) F₁: 一時流出率 F_{sa}: 飽和流出率
※No.1 相俣ダムに対する流出, No.2 須川川から赤谷川に対する流出

表-5 ダムモデルの基本条件³¹⁾

分類	項目	値
洪水調節	洪水調節方式	自然調節・一定量
	洪水調節容量	9.4×10 ⁶ m ³
水位	設計洪水位	565.5 m
	洪水時満水位	565.0 m
	ただし書き操作開始水位	562.9 m
	洪水期制限水位	553.5 m
流量	計画高水流量	650.0 m ³ /s
	計画最大放流量	330.0 m ³ /s
	洪水調節開始流量	200.0 m ³ /s
ゲート	ゲート数	ローラーゲート2門
	ゲート開閉速度	0.4 m/分
	ゲート敷高	553.0 m
	ゲート最大開閉量	0.5 m/回
その他	ゲート最大開度	14.0 m
	更新間隔	1.0 秒
	操作間隔	10.0 分

表-6 基本計算条件

分類	項目	設定値
河川	粗度係数	一律 0.043 ³²⁾
氾濫	粗度係数	農地, 宅地, 道路, 山林別に設定 ³³⁾
	人口, 世帯数	8,426人, 2,806世帯
住民	避難タイミング	避難情報取得後1時間 ³⁴⁾
	歩行速度	1.6 km/h ³⁴⁾
屋外 拡声器	配置	現状再現 (図-5参照)
	音声範囲, 聴取率	250 m, 30%
広報車	台数, 音声範囲, 聴取率, 速度	1台, 100 m, 40%, 20 km/h
	巡回経路	沿岸道路 (図-5参照)
	避難場所	配置

4. シミュレーション分析

本章では、実際に運用されているダムとその下流域を対象に本システムを適用し、シミュレーション分析を実施した結果について示す。

(1) 分析対象地域と基本条件

分析対象としたのは、群馬県利根郡みなかみ町に位置する相俣ダムとダムから利根川と合流する地点までの赤谷川沿岸の約11.6kmにわたる地域である (図-5参照)。

シミュレーションを実施するにあたり設定した基本的な条件を表-4、表-5、表-6にまとめる。なお、表-4、表

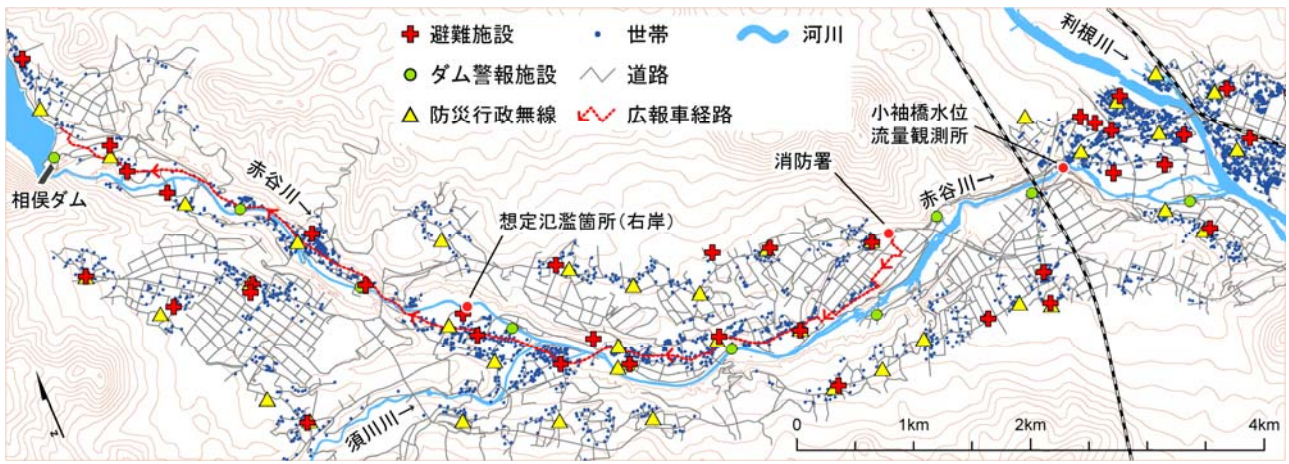


図-5 分析対象地域

-5に示した値の多くは、相俣ダムを管理する国土交通省関東地方整備局利根川ダム統合管理事務所より提供を受けた資料^{30),31)}を参考に設定したものである。

まず、対象範囲とした赤谷川の区間には、途中須川川が流入していることから、流出モデルには表-4に示す二種類のパラメータセットを設定し、上流域からダムに対する流出量と須川川から赤谷川に対する流出量を計算することとした。ダムモデルの基本条件としては、表-5に示す値を設定し、現状のダムによる洪水調節を再現するようにした。なお、相俣ダムには、放流施設として二門のクレストゲートが整備されているが、今回の計算では二門のゲートが同様に動作する状況を表現することとした。河川モデルの上流側の境界条件としては、ダムからの放流量を用い、上流から約4.9kmの地点の計算断面において、流出モデルによって算出された須川川からの流出量を横流入量として加えることとした。また、河川粗度は過去の検討結果³²⁾を参考に0.043と設定した。

次に、情報伝達、住民避難モデルの条件として、みなかみ町が公表している平成19年の人口を平成12年の国勢調査による人口統計を参考に字ごとに按分し、電子住宅地図より把握した家屋上に布置することで、対象地域の人口分布を再現した。そして、各住民は、他地域における過去の水害時の避難実態³⁴⁾を参考に、避難情報の取得から避難判断や準備行動などに一時間を費やした後に避難を開始することとし、自宅から最も近い避難場所に向けて徒歩で避難することとした。また、防災行政無線の屋外拡声器や避難施設については、みなかみ町の地域防災計画書などを参考に現状の配置を設定し、広報車には、下流の消防署を起点として上流に向けて沿岸を通る経路を設定した(図-5参照)。

(2) 洪水現象を対象とした再現性の検証

シミュレーションによる洪水現象の再現性を過去の実績と比較することにより検証する。検証対象とした降雨は、相俣ダムにおける既往最大の洪水をもたらした平成

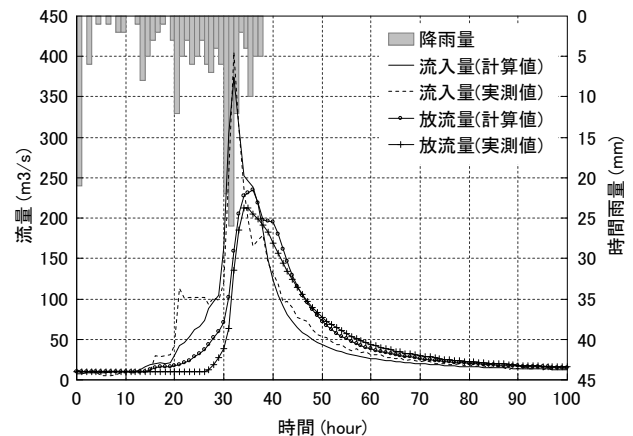


図-6 流入量とダムからの放流量の時系列変化

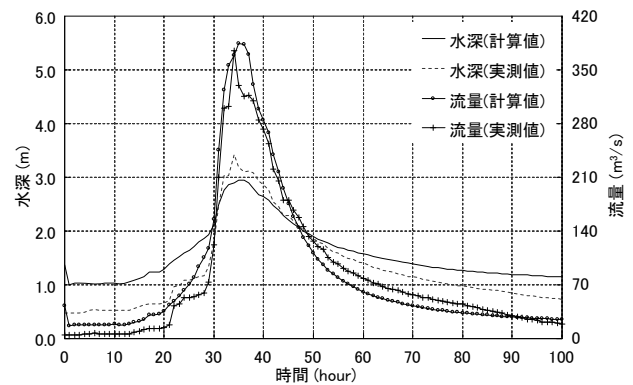


図-7 ダム下流地点における水深と流量の時系列変化

14年7月の台風6号による降雨(最多時間雨量: 26.0mm, 流域平均総雨量: 258.0 mm, 図-6参照)である。

図-6は、時間雨量と共にダムに対する流入量とダムからの放流量の計算値と実測値を示した図である。計算による流入量のピークは実測値と比較して小さい値となっているが、流入量の増減量やその変化タイミングなど全体的な傾向が再現されているのが分かる。また、放流量については、立ち上がり部と減少部にみられる流入量の差異によって実測値から外れている箇所があるが、全体的な傾向としては大きな差はみられない。

また、図-7は、ダムから約10.0km下流に位置する小袖橋水位流量観測所(図-5参照)における流量と水深につ

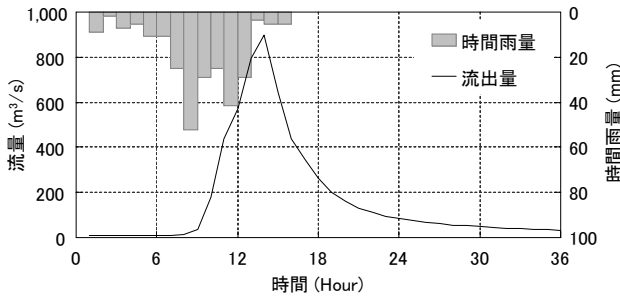


図-8 降雨シナリオ (平成10年9月洪水×1.8)

表-7 洪水調節シナリオパターン

No.	内容
1	運用規程通りの操作
2	最大放流量を増加させた場合 (330m³/s → 350 m³/s)
3	初期水位を低下させた場合 (553.5m → 553.0m)
4	V~R法 ⁶⁾ を適用した場合 (b=1.35)
5	ダムによる洪水調節なし

いて、計算値と実測値を比較したものである。この図によると、計算開始時刻よりも以前の影響を受けていると考えられる洪水ピークの立ち上がり以前の部分を除いては、水深、流量ともに立ち上がりのタイミングや規模について再現されていることが分かる。

過去に大規模な洪水が発生していないため、計画最大放流量を放流した場合などの検証が不足しているが、検証の範囲においては、本モデルにより洪水の発生タイミングやその規模について再現されることが確認された。

(3) 洪水調節方法の改善による下流域への影響

a) シミュレーションシナリオ

異常洪水を想定した分析を実施するため、降雨シナリオとして相俣ダムにおいて平成10年9月の台風5号による雨量を1.8倍に引き延ばした降雨(図-8参照)を利用し、ダムによる洪水調節方法の変更が下流域にもたらす影響を分析する。なお、1.8倍の降雨を用いたのは、それ以上の降雨を想定した場合、洪水の規模が卓越してしまい、各種洪水調節の改善効果が明確に現れないためである。

想定するシナリオは、運用規程通りの洪水調節を実施した場合(No.1)、下流域において被害が発生しない程度に計画最大放流量を増加させた場合(No.2)、事前放流などの実施を想定し、初期水位を低下させた場合(No.3)、V~R法⁶⁾を適用した場合(No.4)、そしてダムによる洪水調節が行われなかった場合(No.5)の5パターンである(表-7参照)。

なお、V~R法(No.4)において対象とするダムや洪水に応じて設定するパラメータ(b)は、当該ダムと想定降雨において効果が明確に得られた1.35に設定した。また、想定氾濫箇所は、対象河道において比較的流下能力が低い箇所の中から、氾濫域に家屋が存在し、住民避難が必要となる箇所として、図-5に示した箇所の右岸を

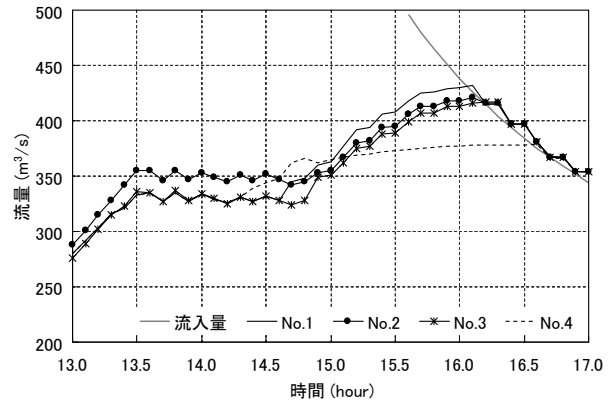


図-9 ダムからの放流曲線

表-8 シミュレーション結果

No.	最大放流量(m³/s)	容量使用率(%)	最高水位(m)	氾濫流量(10³m³)	氾濫面積(10³m²)	浸水建物(戸)
1	431.8	95.0	4.37	3.7	59.6	29
	421.4	94.8	4.35	-	-	-
2	-10.4	-0.2	-0.02	-	-	-
	417.0	94.6	4.30	-	-	-
3	-14.8	-0.4	-0.07	-	-	-
	378.5	95.8	4.13	-	-	-
4	-53.3	+0.8	-0.24	-	-	-
	914.6*	-	6.12	152.9	118.7	79
5	+482.8	-	+1.75	+149.2	+59.1	+50

上段：計算値 下段：No.1を基準とした変化量 *最大流出量 -氾濫無し

選択し、該当箇所における水位が地盤高を超えた時点から溢水による氾濫が開始することとした。また、計算の簡略化のため、設定した氾濫箇所以外からの越流や溢水は発生しない状況を想定した。

b) 分析結果

計算によるダムからの放流量の時系列的な変化を図-9に示す。また、各シナリオパターンによる結果の概要を表-8にまとめる。まず、図-9からNo.1からNo.4までの放流量の変化をみると、ただし書き操作開始前の放流量、ただし書き操作に入るタイミング、ただし書き操作による放流量の変化傾向、最大放流量などがそれぞれのパターンで異なっていることが分かる。そして、特にV~R法を採用したNo.4の結果が他と大きく異なっていることが分かる。次に、表-8から計算結果を具体的な値で比較すると、No.1でみられた河川氾濫が、No.2からNo.4のいずれのパターンにおいても見られないことが分かる。しかし、No.2、No.3の結果に着目すると、No.1と比較した場合の想定氾濫箇所における最高水位の低下は数cm程度であり、何らかの影響により水位が上昇した場合は、氾濫の可能性が高いことが分かる。また、No.4の結果に着目すると、No.1と比較して、最大放流量が53.3m³/s減少していること、また、治水容量使用率が95.8%であり、他のパターンよりも治水容量を有効に利用していること、そして、想定氾濫箇所における水位は、24cm低減することが分かる。なお、No.1とダムによる洪水調節を考慮

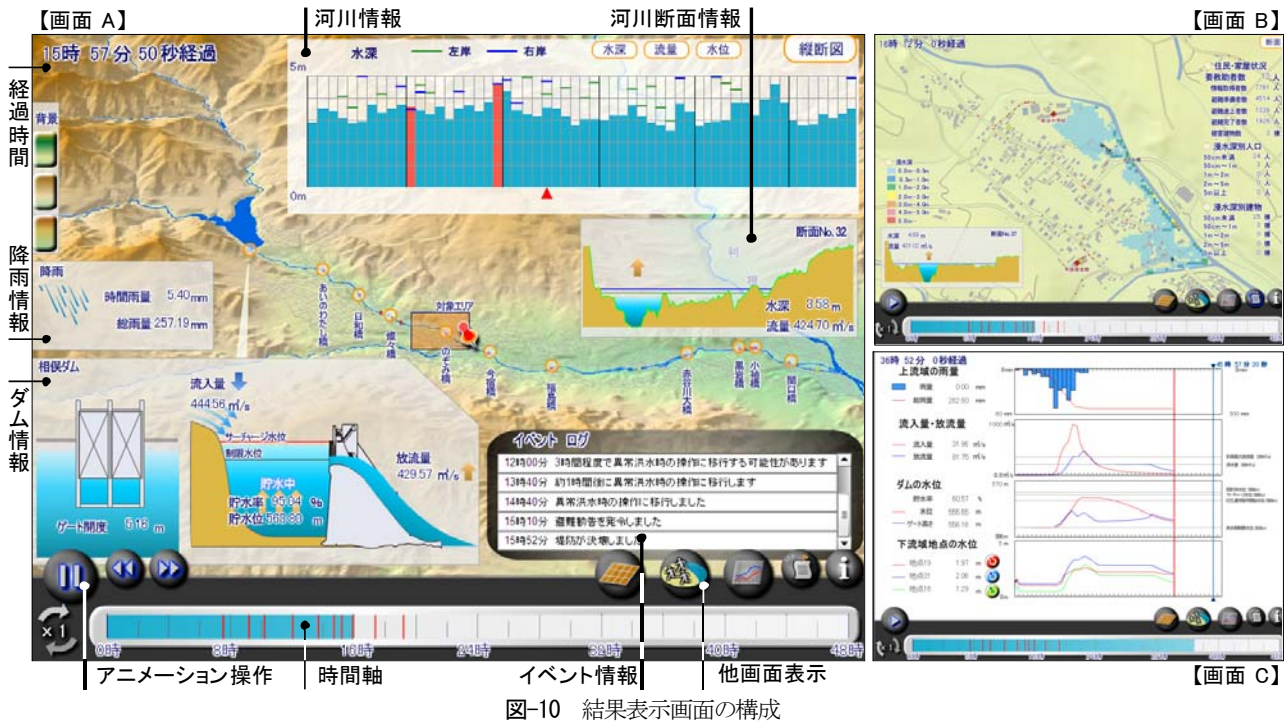


図-10 結果表示画面の構成

していないNo.5の比較からダムの洪水調節による洪水や被害の抑制効果をみると、最大放流量で482.8m³/s、氾濫流量で148.5km³/s、氾濫面積では59.5km²、そして浸水建物は、50戸減少することが把握できる。

(4) ダムからの通知に基づく避難誘導の検討

a) シミュレーションシナリオ

ただし書き操作が実施される場合、一般的にダム管理者から関連機関に対して、操作開始が予測される時点や開始時点において状況が通知される。ここでは、自治体から沿岸住民に対する避難情報の伝達や住民避難、そして人的被害の発生までを考慮することにより、ダム管理者からの通知に基づく避難情報の発令タイミングを検討する。想定するシナリオは、まず自治体の対応が遅れた場合を想定し、ただし書き操作の開始通知を受けてから30分後に避難勧告を発令した場合 (No.6)、次に、ただし書きの開始通知と同時に発令した場合 (No.7)、そして、ただし書き操作移行の約一時間前に行われる事前通知を受けた30分後に発令した場合 (No.8) の3パターンである (表-9参照)。また、その他の条件として、ダムの操作シナリオは、運用規程通りの操作 (No.1)、降雨シナリオは、図-8に示す降雨を利用することとした。なお、今回の計算ではダム警報施設からの情報伝達は考慮していない。また、情報伝達モデルの計算に乱数を用いることによる結果のばらつきを考慮するため、同条件で10回のシミュレーションを実施した結果の平均値を計算結果として用いている。

b) 分析結果

表-9からシナリオパターンごとの要救助者数について

表-9 避難勧告シナリオパターンと計算結果

No.	ダム操作	避難勧告タイミング	要救助者数
6	通常操作	ただし書き操作開始から30分後	35.7人
7		ただし書き操作開始直後	5.1人
8		ただし書き操作の事前通知から30分後	0.6人

みると、避難勧告の発令が遅れた場合 (No.6) は35.7人、ただし書き操作開始と同時に避難勧告が発令された場合 (No.7) は5.1人、そして、ただし書き操作の事前通知から30分後に避難勧告を発令した場合 (No.8) は0.6人となっている。これらの結果から、今回想定した条件においては、ただし書き操作への移行に関する通知を基準として避難勧告の発令を判断した場合、避難情報の伝達が遅れ、人的被害が発生する危険性が高いこと、そして、被害をより低減するためには、ただし書き操作へ移行する前の段階に行われる通知を基準として避難情報の伝達を判断する必要があると言える。

5. ダムを対象としたリスク・コミュニケーションのための支援機能

本章では、ダムを対象としたリスク・コミュニケーションを支援するために構築した機能について述べる。

本機能は、シミュレーションの計算条件やその結果として出力された種々の状況をアニメーションの形式で視覚的にわかりやすく表現するものである³⁵⁾。図-10は、この機能によりシミュレーションの状況を表示した画面

表-10 各画面の表現内容

画面	項目	表現内容・機能
A	経過時間	シミュレーション開始からの経過時間
	降雨情報	時間雨量, 総雨量
	ダム情報	ゲート開度, 流入量, 放流量, 貯水位, 貯水量, 貯水率
	河川情報	断面別の水深, 流量, 水位, 堤防高
	河川断面情報	河川断面図, 水深, 流量, 堤防高
	イベント情報	放流開始, 避難勧告等のイベント発生状況
	アニメーション操作	再生 / 一時停止, 再生速度変更
	時間軸	現在の再生位置, イベント発生時刻, 再生位置の変更
	他画面表示	表示画面の切替
B	情報取得状況, 避難状況, 氾濫域, 浸水深, 浸水被害発生状況	
C	各種値の時系列変化グラフ (降雨量, ダムの流入量・流出量, ダム水位, ゲート高, 河川水深)	

を示している。なお、この図では、本来同じ大きさで個別に表示される三種類の画面（画面A、画面B、画面C）を一枚の図に合成して表示している。各画面で表現される内容を表-10にまとめる。

まず、画面Aでは、降雨とダム、そして河道の状況が表現されている。ダムに係る情報としては、流出入量やダムの貯水位、洪水時満水位に対する貯水率に加えて、ゲート開度が表示されており、洪水調節の各段階におけるゲート操作の状況についても把握できる。なお、図-10に示される通り、これらの情報は模式的にダムなどのイメージを利用して表現されており、ダムに関する知識を持たない人であっても、感覚的に状況を把握できるよう工夫している。また、河川に関する情報としては、計算断面毎の堤防高に併せて流量や水位が表示されており、時間と共に水位等が変化する様子が表現される。また、水位の情報は、河川の任意の地点を選択することで、横断面図を背景に表示することもできる。本画面では、これらの情報を参照することによって、降雨が増加するにつれて洪水が発生する様子やダムによって河川の流量が調節される様子、またダムの放流によって河川が時間経過とともに増水していく様子を把握することができる。

次に、画面Bでは、想定氾濫箇所などを設定した検討対象地点の地図を背景として、住民に対して避難情報が伝達される様子や情報を受けた住民が避難する様子、そして河川が氾濫した場合は、その範囲や水深が表現される。また、この画面には、氾濫による要救助者や浸水家屋数など、計算された被害規模が数字で表示される。

最後に、画面Cでは、画面Aで表現されていた降雨やダム、河川の情報が時系列的なグラフとして表示される。このグラフを利用して、時間的な結果の変動やダムや河川など要素間の影響構造をより詳細に把握できる。

なお、本機能では、条件の異なる二種類のシミュレーション結果を一つの画面の中で同時並列で表示すること

表-11 ダムによる洪水調節の説明項目例

No.	説明内容	説明の概要
1	ダムによる洪水の抑制	通常の洪水に対するダムの洪水調節効果の説明。ダムが存在しないと小規模の降雨でも洪水が発生し、河川氾濫の危険性が高まる。
2	最大放流量の設定	下流河川の整備状況に合わせて、ダムの放流量には最大値が定まっており、通常は下流河川が氾濫するような放流は実施しない。
3	ダムの限界とただし書き操作	異常洪水時は、ダムが満水となり洪水調節が不能となる可能性がある。このような事態を避けるため、ただし書き操作が実施される。
4	異常洪水時におけるダムの効果	ただし書き操作によって最大放流量を超えて放流される場合においても、浸水の範囲や深さが抑制されることや、氾濫タイミングが遅延されるなどの効果がみられる。

表-12 洪水調節の説明に用いるシミュレーションシナリオ例

No.	想定洪水	シナリオ 1*	シナリオ 2*
1	小規模	ダムなし	通常操作
		洪水被害あり	被害なし
2	大規模	最大放流量調節なし	通常操作
		洪水被害あり	被害なし
3	異常洪水	ただし書き操作なし	通常操作
		水位が設計高水位を超過	被害あり
4	異常洪水	ダムなし	通常操作
		大規模な洪水被害発生	被害あり

※上段：ダムの有無または操作シナリオ 下段：結果の概要

も可能であり、設定条件によるダム操作の違いや河川水位や流量の差異、河川氾濫など各種イベントが発生するタイミングの違い、氾濫域など被害を受ける範囲の違い、そして、人的・物的被害量の違いなどを視覚的に表現することができる。

本システムは、以上の機能を持つことから、住民に対してダムの有無を比較した場合の洪水の発生状況を示したり、住民の避難タイミングを変化させたシナリオを示したりすることによって、ダムによる洪水調節の効果や避難勧告時における迅速な避難の重要性を視覚的にわかりやすく説明することができる。具体的には、ダムによる洪水調節の方法や効果に関する表-11に示す項目を説明する場合は、表-12に示すような洪水やダム操作のシナリオに基づく二種類のシナリオによる結果を比較しながら説明することとなる。また、このような機能は、洪水調節方法の改善による効果や影響について把握するなど、ダムの効率的な運用方法を検討する際にも有用であると考えている。なお、このアニメーションは、インターネットを通して配信することも可能であり、計算結果を広く一般に公開することも可能である³⁵⁾。

6. おわりに

本研究では、ダムによる洪水調節の効率化と洪水時に

おけるダム下流域の危機管理を支援することを目的として、ダムとその下流域を対象とした総合的なシミュレーションシステムを構築した。本システムは、ダムによる洪水調節を考慮した降雨から河川氾濫までの一連の洪水現象や洪水時における社会的な対応行動、そして洪水被害の発生状況を表現することが可能であり、洪水時におけるダム運用の効率化やダム下流域の危機管理を支援するツールとして利用することができる。また、本システムは、シミュレーションの結果をアニメーションの形式で表現する機能を有することから、ダムや洪水に関する知識を持たない人を対象として、ダムによる洪水調節機能や洪水時における適切な対応行動について説明するリスク・コミュニケーションツールとして利用することも想定している。

なお、通常ダムは、水系の中下流域における洪水調節を目標として整備されるものであり、本システムにより本来の目的を検討したり、説明したりするためには、今回の事例よりも広範囲を対象にする必要がある。また、範囲を拡大する場合、モデルで表現するダムや河川以外からの流出量が無視できなくなるなどの問題が生じることから、分布型流出モデル^{14),16)}を導入するなどの対応を検討している。また、本研究においては、本システムのリスク・コミュニケーションツールとしての機能について示しているものの、実際の有用性については検証できていない。今後は、ダム下流域の住民などを対象に実際に活用し、ダムや洪水に関する理解や意識の変化を把握することで、効果を検証していく予定である。

謝辞：本研究で用いた雨量データ、ダムの操作規則などは、国土交通省関東地方整備局利根川ダム統合管理事務所から提供して頂いた。また、河川モデルや氾濫モデルの構築においては、(株)IDA社会技術研究所の細井教平氏、群馬大学大学院博士後期課程の本間基寛氏に協力して頂いた。また、細井氏には、アニメーションの作成においても協力を頂いた。そして、国土交通省中部地方整備局新丸山ダム工事事務所の木村秀治副所長からは、ダムの運用に関するアドバイスを頂いた。ここに記してこれらの方々に謝意を表す。なお、本研究は、平成19年度科学研究費補助金・基盤研究(A)【課題名：災害に強い地域社会の形成技術に関する総合的研究 課題番号:19206055 研究代表：片田敏孝】の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) IPCC: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Working Group II Report to the Fourth Assessment Report of the IPCC, 2007.
- 2) 久保田勝：ダムによる洪水調節の現状と課題：土木学会平成18年度全国大会研究討論会 研-11 資料, 2006.

- 3) 国土交通省河川局：新しい時代のダム管理のあり方, 新しい時代のダム管理を考える研究会報告, 2001.
- 4) 国土交通省河川局：総合的な豪雨災害対策についての緊急提言, 豪雨災害対策総合政策委員会, 2004.
- 5) 今村瑞穂：ダム貯水池による洪水調節の合理化に関する2, 3の考察, ダム工学, Vol.8, No.2, pp.102-116, 1998.
- 6) 裏戸勉：ダムによる洪水調節方法の合理化について, 松江工業高等専門学校研究紀要, Vol.理工編36, pp.37-44, 2001.
- 7) 竹下清, 菊池英明, 齋藤源, 末次忠司：異常洪水に対する洪水調節方式の改善に関する検討, 平成18年度ダム水源地環境技術研究所 所報, pp.50-56, 2006.
- 8) 例えば, 戸谷英雄, 秋葉雅章, 宮本守, 山田正, 吉川秀夫：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, 2006.
- 9) ダム・堰危機管理業務顕彰委員会事務局：平成17年度 ダム・堰危機管理業務顕彰結果 参考資料, 2005.
- 10) 朝日新聞：1999年9月14日朝刊 「まさか」重奏の悲劇 13人奪った玄倉川事故から1カ月(検証), 3社会, 1999.
- 11) 片田敏孝, 児玉真, 浅田純作：東海豪雨災害における住民の情報取得と避難行動に関する研究, 河川技術論文集, 第7巻, pp.155-160, 2001.
- 12) 財団法人 日本ダム協会：ダム便覧2008, 2008.
- 13) 朝日新聞：1999年8月21日朝刊 オピニオン 上流ダム側の行動にも疑問(声) 【名古屋】, 1999.
- 14) 佐山敬洋, 立川康人, 寶馨, 市川温：広域分布型流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価, 土木学会論文集, No.803/II-73, pp.13-27, 2005.
- 15) 佐山敬洋, 菅野浩樹, 立川康人, 寶馨：ダム操作過程を導入した広域分布型流出予測システムによる淀川流域の治水安全度評価, 水工学論文集, 第50巻, pp.601-606, 2006.
- 16) Saavedra, O., Koike, T. and Yang, D.: Application of a distributed hydrological model coupled with dam operation for flood control purposes, Annual Journal of Hydraulic Engineering, Vol.50, pp.61-66, 2006.
- 17) 秋葉雅章, 腰塚雄太, 宮本守, 戸谷英雄, 佐藤直良, 山田正：流出特性に応じたダム放流量の決定手法とその洪水水位低減効果に関する研究, 河川技術に関する論文集, 第10巻, pp.89-94, 2004.
- 18) 国土交通省関東地方整備局利根川ダム統合管理事務所：業務のあらまし, 2005.
- 19) 国土交通省近畿地方整備局淀川ダム統合管理事務所：淀川水系流水管理システム, 2000.
- 20) 国土交通省九州地方整備局鶴田ダム管理所：平成18年7月下旬 九州南部の豪雨災害と対応状況, 2006.
- 21) 木村俊晃：貯留関数法(II), 土木技術資料, 4巻1号, pp.41-51, 1962.
- 22) 土木学会：水理公式集 [平成11年度版], 1999.

- 23) 国土交通省北陸地方整備局：急流河川における浸水想定区域検討の手引き，2003.
- 24) 片田敏孝，及川康，田中隆司：災害時における住民への情報伝達シミュレーションモデルの開発，土木学会論文集，No.625/IV-44，pp.1-13，1999.
- 25) 片田敏孝，桑沢敬行：津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発，土木学会論文集D，Vol.62，No.3，pp.250-261，2006.
- 26) Hart, P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B.: A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, Vol.4, No.2, pp.100-107, 1968.
- 27) 桑沢敬行，片田敏孝，及川康，児玉真：洪水を対象とした災害総合シナリオ・シミュレータの開発とその防災教育への適用，土木学会論文集D，Vol.64，No.3，pp.354-366，2008.
- 28) 須賀堯三，上阪恒雄，吉田高樹，浜口憲一郎，陳志軒：水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する研究，水工学論文集，39巻，pp.879-882，1995.
- 29) 佐藤智，今村文彦，首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について -8610号台風による吉田川の場合-，第33回水理講演会論文集，pp.331-336，1989.
- 30) 国土交通省関東地方整備局利根川ダム統合管理事務所：平成3年度洪水予測システム改良検討業務 報告書，1992.
- 31) 国土交通省関東地方整備局利根川ダム統合管理事務所：利根川水系赤谷川相俣ダム操作規則（案），1995.
- 32) 国土交通省関東地方整備局利根川ダム統合管理事務所：平成15年度利根川上流部疎通能力等検討業務 概要報告書，2006.
- 33) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp.356-360，1998.
- 34) 建設省土木研究所河川部都市河川研究室：土木研究所資料 関川水害時の避難行動分析，1998.
- 35) 群馬大学大学院社会環境デザイン工学専攻災害社会工学研究室：洪水時における効率的なダム運用と下流域の危機管理のためのシミュレーションシステム デモ版，<http://dsel.ce.gunma-u.ac.jp/modules/research0/index.php?id=38>，2008.

(2008. 9. 3 受付)

DEVELOPMENT OF SIMULATION SYSTEM FOR FLOOD CONTROL THAT CONSIDERS DAM EFFECT IN DOWNSTREAM AREA

Toshitaka KATADA and Noriyuki KUWASAWA

In this research, we developed the simulation system for improvement of flood control and risk management in downstream areas of dam. This system calculates flood phenomena such as rising and overflow of the river in consideration of rainfall and flood control dam. In addition, this system simulates social action at the time of floods such as warning dissemination and evacuation behavior. And, the damage resulting from the flood can be evaluated on the basis of these results. Furthermore, because of its visual presentation, this system is used to educate the general public; in some sense, this system can be considered as a risk communication tool.