

2013年度・河川技術に関するシンポジウム
OS: 「危機管理の実務に供する洪水予測技術」記録

2013年6月6日 16:00~18:20

オーガナイザー：椿涼太（広島大学），内藤正彦（国土交通省）

OS「危機管理の実務に供する洪水予測技術」では，セッション企画の概要説明の後に，セッション前半では異なる立場からなる5名の発表者による洪水予測に関する技術開発や実務に関する話題提供が行われた．セッション後半では，前半の話題提供者に1名がパネラーとして加わって，洪水予測が抱える問題点の洗い出しなどを目的としたパネルディスカッションを行った．以下に，それぞれの発表・議論の概要を示す．

OS 趣旨説明（国土交通省 内藤正彦）

流域における防災・減災に関わる河川技術について，本年度の河川技術シンポジウムでの発表課題を踏まえつつ，以下のように整理することができる．

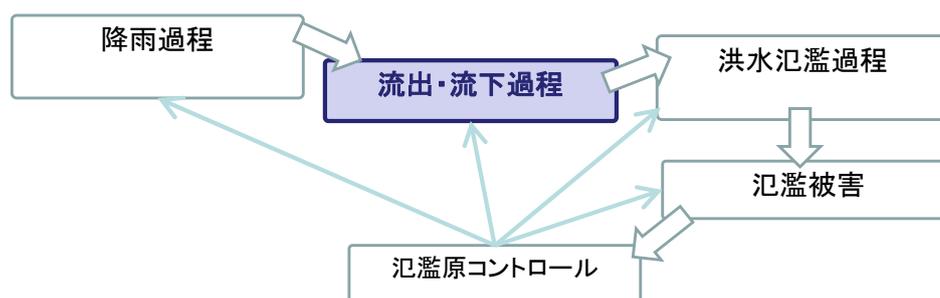


図1 流域における防災・減災に関わる河川技術

本オーガナイズドセッションでは，上の図における「(洪水の) 流出・流下過程」に着目し，特定課題の一つである「危機管理の実務に供する洪水予測技術」について議論を進める．

河川管理の実務から見てみると，洪水予測は

1. 河川整備の計画・設計を行うための（リアルタイムではない）水位・流量の予測（推計）
 2. 実際の洪水発生時の予警報や水防・防災対応のための（リアルタイムの）水位・流量の予測
- の2つに分類できる．実務においてある時期まで1.の洪水予測に重点が置かれてきたこともあって，計画に用いる洪水予測技術の延長上で2.のリアルタイム予測技術開発が行われてきた．一方で，同じ洪水予測といっても，1.と2.ではそもそも与条件や結果に求められる要件が異なっている．そのため，技術的に相違があっても仕方のないものであるが，これまで1.と2.ではそれぞれ独立して最適の技術や解析モデルを用いることには，必ずしもなっていなかった．

洪水予測技術は，学術的には既に蓄積の多い、新しさのない領域といった印象があるかもしれないが，本セッションでは，リアルタイムの洪水予測技術について実務に供するという視点から改めて見直して

いく。

話題提供

・「粒子フィルタを用いた水位・流量予測について」京都大学 立川康人

洪水の水位予測手法については大きく上下流の水位の関連を用いた手法と流出解析手法をベースとした方法に分けられる。後者は HQ 曲線，予測降雨，流出モデル，河道流追跡モデルなどの技術を組み合わせたものである。

流出解析法をベースとした技術では，解析モデルは流域のそれぞれの地点で保水量などの状態量をもっており，入力値や境界条件などに応じて状態量が時間変化する。状態量の初期状態の推定がうまくできていないと，降雨予測の精度が良く，高度な流出モデルを用いたとしても流出予測結果は良くなる。そこで，計算値と観測値を用いてもっともらしい（初期）状態量を推定する手法をフィルタリングあるいはデータ同化と呼び，リアルタイム洪水予測を行う上で重要な技術となっている。

同化技術の一つであるカルマンフィルタを用いた実時間予測手法では，状態方程式の線形化を行うとともに状態量の期待値とその推定誤差の分散共分散行列の更新を行っていく。その他の同化技術として粒子フィルタがある。この方法では，一つのモデルを一つの粒子と考え，多数のモデルを平行して計算し，その結果のばらつき具合から状態量の確率分布を算定する。従って，カルマンフィルタのように状態量の期待値や推定誤差の分散共分散行列を解析的に解く必要がなく，応用場面が広がっている。

淀川水系桂川流域の約 16km の河道区間を対象とした 1 次元河道流追跡モデルによる水位予測の事例を紹介する。粗度係数および流入流量に乗ずる補正係数を固定した場合，観測地点の水位と計算結果の水位は 2m ほど差がみられる。粒子フィルタを用いて係数の不確定性を考慮しながら水位予測を行うと，観測値と良く適合するようになる。計算の過程において，粗度係数や流量係数の期待値と分散の時間変化が算定される。

桂川の約 2.5km の河道区間を対象として平面 2 次元モデルによる洪水流計算の事例を紹介する。河道の粗度係数などを逐次同定していくことで，実現に近い洪水伝搬を再現でき，計算結果から水位流量曲線も合わせて推定することができた。X バンド MP レーダを用いた洪水予測におけるデータ同化事例も紹介する。レーダ雨量をそのまま流出モデルに与えても，計算された流量ハイドログラフは観測値と大きく異なる場合がある。流出モデルパラメータおよびレーダ観測データを雨量換算する際のパラメータを，同化技術を用いて調整していくと，流量ハイドログラフの再現精度が大幅に向上した。

分布型流出解析モデル WEP と粒子フィルタを用いた洪水予測の高度化を行った。同化を行わない計算では洪水波形の二山目を過小評価しているが，同化をすることで全体的な流量ハイドログラフの再現性が向上した。気象庁による気象予測のアンサンブルデータを用いた流出予測についても事例紹介する。CommonMP について実時間で予測計算に必要な機能の強化が図られている。

実時間水位予測の精度向上のための技術課題として

1. 実測データとシミュレーション手法を組み合わせ，観測範囲外にも適用できる水位流量曲線の作成技術の開発。
2. 観測水位情報を用いて，洪水追跡モデルのパラメータと境界条件を逐次推定する技術の開発。

3. 時々刻々得られる観測水位情報を用いて、所定の時間内に流出モデルや洪水追跡モデルの状態量、モデルパラメータ、境界条件を逐次推定し、数時間先の水位を予測する技術の開発。

以上の三点が挙げられる。

・「直轄河川の洪水予測の現状」京大防災研 吉谷純一

直轄河川での洪水予測システムは、

1. 予測対象地点ごとにシステムを構築する
2. 同一地点に対して複数の手法で予測することが多い
3. 受注したコンサルタントの所有システム（モデル）が基本的に利用される
4. 平成 22 年前後に構築・更新したシステムが多い。（古くても平成 10 年頃に稼働開始している）

という特徴がある。

平成 20 年ごろから平成 24 年度までの、計 653 件の洪水予測事例の精度を概略検討した結果を示す。集計したデータは平成 23 年および平成 24 年が多数を占める。それぞれの予測された水位波形と実測値とのずれを経験的な評価基準で採点し、分類すると満点の 120 点に近い部分にピークを持つが、より精度の低い部分にも薄く広がった分布を示す。

精度の低い事例は、予測に対して何らかの不具合が生じている事例といえる。平成 23 年度の出水では分析対象のうち約一割は不具合と分類された。推定される要因としては

1. モデル同定が不十分である
2. フィードバックが適切に働いていない
3. 計算プログラムの不具合

の可能性があげられる。フィードバック技術については、制御工学分野で発展したカルマンフィルターなどの技術が利用されている。制御工学では、フィードバックが必要性に応じて古典的制御から現代制御理論に進展し、両者を使い分ける技術体系がある程度整理されているが、これに比べると、洪水予測分野におけるフィードバックや同化技術の展開方法に関する体系化が十分ではない。その結果、例えば、モデル同定を十分にせず新たなフィードバック技術の導入のみで予測精度を向上させようとするような事例を許す場面が生じる要因になっていると考えられる。

・「分布型洪水予測システムの点検」三井共同建設コンサルタント株式会社 四位和彦

三井共同建設コンサルタント社で洪水予測システムを導入した 23 河川での事例について精度や稼働状況を点検・検証した。稼働状況の分析では、入力データを取得するサーバとの接続がネックになり遅延などが生じる事例が確認された。雨量の比較（レーダ雨量、気象庁解析雨量、地上観測値など）では相違がみられ、雨量の違いが洪水予測結果に大きく影響することが確認された。観測雨量の精度が向上することでフィードバックによる調整の分量が減っていく可能性がある。十分に更新されていない HQ 式を使わざるを得ない状況があるが、そのことも洪水予測精度を低下させる要因となる。河道網の地点別の傾向としては、本川の基準地点に比べると、その上流や支川では観測とのずれが大きい事例がみられる。これは、基準地点での再現精度を確保するために、上流・支川での波形を調整していること

も影響している。ダム放流の操作を予測することが難しい事例があり、そのことでダム下流の洪水予測の再現性を確保する障害となっている事例がみられた。融雪洪水と降雨出水が組み合わせられた春期の出水事例において、融雪出水の評価が困難であるために全体的な波形の再現性の確保が困難である事例もみられた。このように洪水予測精度を低下させる要因にはさまざまな理由がある。

・「ニューラルネットワークモデルによる洪水予測」八千代エンジニアリング株式会社 竹村仁志

ニューラルネットワークモデルでは、雨量から評価地点の水位を直接算定するため、貯留関数法などの流出解析モデルを用いて洪水予測を行い場合に生じる、モデル係数の決定や HQ 式の精度に起因する誤差の影響を回避することができる。

ここで用いているニューラルネットワークモデルは、入力層・中間層・出力層からなるモデルであり、それぞれのボックスを、重み付けを調整しながら関連づけていく。モデルが構築されれば、計算負荷は小さく、中間層の効果により出水現象の非線形性を評価することができる。モデル構築(学習)の際に、洪水波形のどのような範囲をどのような基準で評価していくかを調整することで、予測の性質を調整することができる。洪水予測の目的に合わせて学習を行うことが重要である。

ニューラルネットワークモデルの課題としては、未経験の洪水規模への対応と、大幅な河道改修等による流況変化への対応があげられる。このような学習データの存在していない事例も実運用では対処していく必要があり、基本的に流出計算モデルと併用して運用していく。相模川の城山ダム下流区間の洪水予測では、ダムへの流入流量の予測に流出計算モデルとニューラルネットワークモデルを併用して、安定性と予測精度の両立を図った。

阿武隈川・名取川ではニューラルネットワーク単独で洪水予測を行っている。大規模洪水を対象にモデル構築を行うと、小規模出水を過大評価する傾向が認められた。この経験を踏まえ、洪水規模毎に複数のモデルを構築し、状況に応じてモデルを切り換えることで対応を図っている。データの存在しない大規模な出水については、実績洪水を引き延ばしたモデル洪水を用いた学習を行っている。

・「地方自治体から見た洪水予測について」横浜市 谷口丞

人為的エラー、立場による意識の違い、組織構造などの面から洪水予測とその精度を見ていきたい。洪水予測のための技術は進歩しているはずであるが、現場では精度が確保できていない事例が多く見られている。現場で十分な性能が発揮できていない要因として、技術以外の要素も影響していると考えられ、以下6項目に分けて検討してみたい。

1. 必要性・緊急性が徐々になくなっている？

そういうわけではない。一方で、現場レベルで見ると洪水予測の精度が十分ではないという事例もある。精度が良くないと、洪水予測モデルの必要性・緊急性を地方自治体が感じられないということになり、洪水予測モデルを高精度化する動機付けがなくなることをつながっているかもしれない。

2. 洪水予測の活用によって危機管理の実務が効率化するのか？

現状では、河川の水位や洪水予報と水防活動の態勢が関連づけられている。洪水予測の出力と具体的な水防活動などの危機管理の実務がどうリンクするかということはクリアになっていないのが現状である。基本的に、リスクを判断する情報が増えることは危機管理上好ましいことであり、精度向上が期待される。

3. 地方自治体と河川管理者の信頼関係

地方自治体の保有する河川の情報について、様々な研究機関からデータ提供の問い合わせが来る。データには補足説明が必要なものもあり、そのためにはデータを利用した分析の目的や結果などのコミュニケーションが必要である。十分なコミュニケーションを行う事が、洪水分析に用いるデータの正確さにつながり、分析結果の確かさにもつながってくる可能性がある。

4. 地方自治体と河川管理者の意思疎通

一口に洪水予測といっても、その目的や精度の基準は立場によって異なっている。その点が必ずしも認識されていないこと、および目的や精度のすりあわせがなされていないことが、地方自治体として洪水予測を利用する一つの障害になっているかもしれない。

5. 責任の所在が不明

洪水予測結果に基づいて、避難勧告などをおこなったり、排水を行う場合に、責任の所在が曖昧な場面がある。たとえば排水ポンプの運用は下水道管理者が行うことになるが、ポンプを動かしたり、止めたりすることによる波及的な被害が生じた場合の責任はどこにあるのかが不明確である。洪水予測モデルの使い方や使ったことによる責任が曖昧なことが、洪水予測モデルの開発目的が絞り込めていない要因にもなっているかもしれない。逆に責任を明確化することで、利用する立場から洪水予測モデル開発について積極的な発言や要望ができるようになってくる。

6. 危機管理の現場では、河川技術者は少ない

地方自治体における危機管理では消防組織や区役所総務課が主体であり、これらの組織で河川技術者は少ない。洪水予測について、危機管理の現場の組織が使いやすい・理解しやすいアウトプットを工夫し、現場からの意見をフィードバックしていくことも重要である。

まとめると、洪水予測を行う上で技術以外のファクターにも目を向けていくことが必要である。これは自治体によっても異なる部分があるが、実務に資する洪水予測を実現する上で現場との信頼関係を築きしっかりと意思疎通を図ることも大切である。

以上

2013 年度・河川技術に関するシンポジウム
OS: 「危機管理の実務に供する洪水予測技術」記録

2013 年 6 月 6 日 16:00~18:20

オーガナイザー：椿涼太（広島大学），内藤正彦（国土交通省）

パネルディスカッション

○パネラー

立川 康人：京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

吉谷 純一：京都大学 防災研究所（前 国土技術政策総合研究所）

四位 和彦：三井共同建設コンサルタント株式会社

竹村 仁志：八千代エンジニアリング株式会社

谷口 丞：横浜市 道路局河川部河川計画課

小俣 篤：国土交通省 水管理・国土保全局河川保全企画室

○ファシリテータ

小林 健一郎：神戸大学都市安全研究センター

以下，本オーガナイズドセッションのパネルディスカッションにおける議論を整理して概要を記す。

Q：技術面から見て洪水予測が当たらない原因はどのようなところにあるのか？

・洪水規模・流域特性・降雨特性などにより洪水現象は異なってくる。洪水現象の相違により，洪水予測のしやすさも大きく変わる。例えば，小さい出水では降水のなかで流域に貯まる割合が大きく，災害を引き起こすような大規模な洪水では降水の大半が流出する。そのため，洪水の規模が大きいほど，モデル構造の違いへの依存性は小さく，予測結果は，降雨観測・予測の精度に規定され，比較的予測結果が観測値とよく適合することが多い。一方で，大きな出水について流量の観測がなく HQ 関係の実測もあまりないため，HQ 曲線を外挿することによる不確実性が生じる。

・流量を基点として考えると，河道内での抵抗，洪水中の河床波の変化や植生の変形なども含めた非定常性などの現象が十分モデル化できておらず，それ故 HQ 関係を水理学的に算定できていない。

・分布型モデルを利用する場合には，流域パラメータの空間分布を設定する必要があるが，その設定方法は確立されていないことも問題である。その点に関しては，資金や観測態勢により解消されるものというよりは，技術的なブレークスルーが必要なのではないかと感じる。降雨分布の設定については XRAIN の導入などにより大幅に改善されつつある。

・以前は現場の技術職員が経験的に洪水予測をおこなっていた。それがコンピュータモデルに置き換わってきているが，そのモデルに置き換わる際に，従来の技術の伝承がなされていたとは言い難く，そのことが当たらない予測がでる遠因になっている。

Q: 洪水予測が当たるようになるためにどのようなことが必要か？

- ・まずは洪水予測技術について関心を持って欲しい。そのことは予測精度を上げることにつながり、その結果として洪水予測モデルが現場で役立つことを期待する。
- ・基本的なモデルをしっかり構築・同定していくことが重要である。フィルタリングなどのオンライン技術は、しっかりした基本モデルの存在を前提として機能するものである。また、河川計画に用いる流出モデルをそのまま実時間予測に用いることが難しい場合があることに注意する必要がある。たとえば、貯留関数を実時間予測に展開することを考えるならば、 Rsa というパラメータの設定や基底流量の分離などをリアルタイムに調整していく必要がある。洪水予測のようなリアルタイムに運用していく場合の、このような Rsa や基底流量分離などの各モデルの調整法については十分整理されていない面がある。
- ・分布型モデルの精度を確保する上では、増水している期間だけでなく、出水の直前の状態をうまく評価していくことが重要である。

○河道内の洪水伝搬の非定常性について

- ・河川技術者がしっかり HQ 関係を説明できる必要がある。一方で、現在までに河川工学で蓄積されてきた様々な知識もあり、これを活かして河道内の非定常性の現象論を進めることはできるはずだ。
- ・過去の出水の観測データを活かすことと、1次元、2次元の不定流計算なども利用していくも一つの方法である。そこに、植生の効果なども適切に取り込んでいく必要がある。
- ・基礎研究で検討対象となることが多い平衡状態の土砂水理と、実際の洪水流の非定常流れとは異なる部分がある。さらに洪水予測というアプリケーションを考える場合、計算時間が限られている。洪水中には河道内での現象について、直感や現場の経験と学術をつなげることが重要ではないか。また現場の感覚を学術が合理的に説明していく必要がある。

Q: 洪水予測としては将来が合えばよいはずであるが、データ同化によって（過去に相当する）初期値から合わせていくことの意味はどのようなところにあるのか。

- ・ある程度広い流域の中には観測がない地点も存在する。現時点からだけでなく、時間を遡って同化していくことの効果の一つとして、ある程度の期間全体で予測値と観測値が整合することによって、観測値がない場所も含めて全体的な整合性・再現性が確保されていると推察できる点がある。
- ・ある地点での特定時刻の予報が重要であるという場合には必ずしもこのような方法をとる必要はない。観測値を使って予測精度を上げていくということを考えた場合に、流出過程の空間分布を解像するというより、時間的に連続した流出過程のモデル化に時系列的な観測値が組み合わされるという仕組みがポイントである。

Q: 河川計画のための流出解析と、水防に使う洪水予測は異なるものでもよい。洪水予測に要求されることは何か？

- ・分布型と集中型の違いというよりは時間的余裕の違いが大きいのではないかと。

・河道計画のための流出解析の目的は（将来の）洪水規模を合理的に見積もることである。そのための洪水流出では信頼性は問われるが精度が問われるわけではない。一方で、洪水予測では様々な出水イベントのそれぞれに対する再現性・精度が要求される。

・洪水予測の技術開発について、リードタイムを確保するというだけでなく、現場で困っていることがこれまで十分に共有されておらず、現場からの要求が技術開発につながっていなかった面があるかもしれない。

・直轄河川については、堤防の越流・破堤を予測することが目的となる。その際には水位が重要であって、流量は直接必要ない。

Q: 洪水予報のアウトプットとしては水位が重要である。水位を直接観測することは技術的にやりやすくなっているはずである。水位観測をさらに活かして洪水予測を行っていくことが考えられるのではないか。

・実時間の予測は観測とセットであり、観測値が増えることは好ましい。どこでどれくらい計ればよいかという事は、これまである程度経験的には把握・設定されているが、洪水予測への同化などの利用という観点からの整理は十分されていない。

Q: 小さな流域などでは観測点が無い場合もある。小さな流域についてどれくらいまで洪水予測ができるのか？また洪水予測を行うために要求される最低限の観測態勢というものはあるのか？

・小さい流域で観測が無い場合については、その下流の観測がある場所で再現性を確認することとなる。下流での再現性があれば、上流もある程度は妥当であろうと推察できる。雨の分布はレーダーでとれるようになってきており、小流域であっても最低限レーダー雨量により対応できるはずであるが、地上の雨量観測点はあった方が望ましい。

・洪水予報について言えば流域スケールによって方法論は異なる。洪水予測でも流域スケールに応じて流出モデルがある程度使い分けられてきている。都市化した流域と背後に森林を要する流域などでも洪水予測技術は異なってくるはずである。一方で、都道府県の観測態勢も充実してきており、上流域・支川の洪水予測を行うための条件が整いつつある。

○条件や目的の整理の必要性

・洪水予報における“当たる”ということが十分に定義されておらず、また定義が関係主体で十分共有されていないことが現在の混乱の一因であるかもしれない。

・水防法の改正もあり、今後、洪水予測の利用場面・利用目的が増えてくるはずであり、さまざまな主体との情報交換をして、洪水予測の目的するところをすりあわせていく必要がある。

・特に現実的に“当たる”ことを考える際に、許容できるずれとそのずれの方向を考慮することが重要である。

・避難という観点では市町村長が対応することになるので、市町村長の意見を聞くことが必要であろう。

・直轄河川については破堤などを予測することが必要である。水位だけでなく浸透などのファクターも

考えなければ行けない。

・流域規模，河川特性，降雨特性などによっても当たりやすさは変わって来るはずであり，その分析を進めることも精度向上に有効と考える．こういう条件のもとにこういう検討をする，という議論の前提条件を明確に区分することが技術的検討をクリアにすることにつながる．

Q：洪水予測モデルの設計や開発において，学から行政へ意見を言う場面は割合多いように感じるか，産（民）から官や学の人に意見を言いにくいかもしれない．このようなコミュニケーションの非対称性が，予測技術の発展を妨げているということもあるのではないか？

- ・これまで官は産の納入したものをただ受け取ってきたという面があるかもしれない．
- ・洪水予測の精度向上は，個々のコンサルタント所有のシステムを利用している現状を踏まえると，現場の技術者だけ，あるいは国の研究機関だけでできるものではない．業界全体として一丸となって洪水予測技術の蓄積・伝承を図っていくべきと考える．
- ・産・官・学のコミュニケーションツールとして河川部会が役割を果たしていくべきである．