

石狩川上流及び天塩川における 分布型洪水予測について

旭川開発建設部 治水課 ○本田 浩貴
梅川 正寛
入交 泰文

従来の洪水予測システムは集中型モデルによる流出モデルがほとんどであったが、近年の局所的集中豪雨の発生や国土数値情報等の基礎データの整備等に伴い、高精度な流出予測が可能な分布型モデルの適用が進められている。本報告では、洪水予測の高度化に向けた、石狩川上流及び天塩川を対象にした洪水予測システムの検討・構築状況及び今後の導入に向けた課題について報告するものである。

キーワード：防災、自然災害、危機管理、洪水予測

1. はじめに

従来の洪水予測システムは、流域分割が大きく、貯留関数法・タンクモデルなど物理過程を省略・単純化した集中型モデルがほとんどであった。旭川開発建設部においても、一般化貯留関数モデル（改良型）、1段タンク型貯留関数モデル、2段タンク型貯留関数モデルの3つの集中型モデルの洪水予測システムを構築済みであり、運用を図っている。しかし、近年は従来のシステムでは予測精度の低い局所的集中豪雨の発生が多くなってきており、出水時の対応に苦慮しているところである。また、計算機器の処理能力向上や国土数値情報等の土地利用や地形・地質等の基礎データの整備に伴い、高精度な流出予測が期待できる分布型モデルの適用が各地で進められている。

本報告は、洪水予測の高度化のために石狩川上流水系・天塩川水系を対象に構築している、分布型洪水予測システムについて、そのモデル概要及び導入に向けた課題について報告するものである。

2. 近年の降雨状況及び予測精度

近年、地球温暖化によるものと懸念される局地的な集中豪雨による被害が全国各地で発生している。北海道においても線状降水帯の発生に伴う豪雨が発生しており、旭川開発建設部管内で平成22年8月23日～24日にかけて発生した豪雨では、上川管内東川町で道道が決壊するなどの甚大な被害が発生している。（図-1）

局所的豪雨は、地上雨量観測所で観測されない場合があり、洪水予測計算上実績降雨が無降雨として取り扱われ、正確な洪水予測が出来ない問題がある。

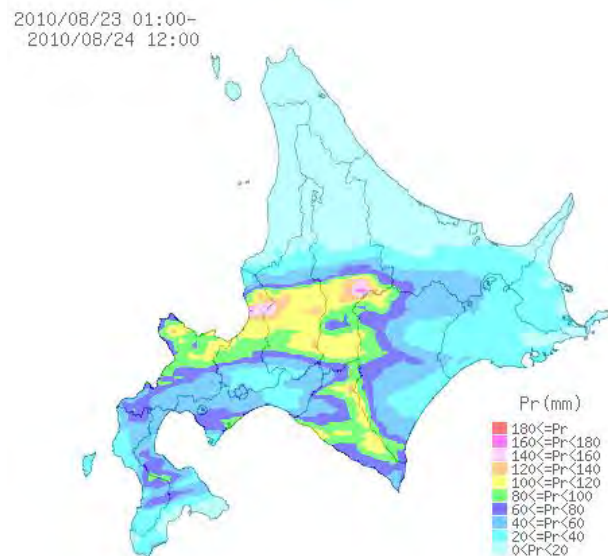


図-1 解析雨量図（平成22年8月23日1時～24日12時）

また、平成22年8月洪水の石狩川水系美瑛川西神楽水位観測所地点における実績水位と水位予測の結果では、パラメータ調整後の結果でもピーク前後の再現が難しく、集中豪雨の降雨特性を把握出来ていない状況である。（図-2）

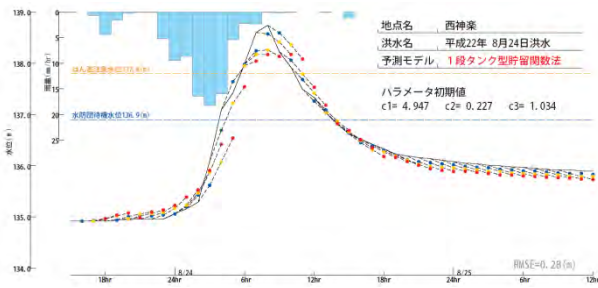


図-2 西神楽地点ハイドログラフと既存の集中型洪水予測システム予測値（平成22年8月24日洪水）

3. 分布型流出モデルの概要

分布型流出モデルの構築にあたり、地形データの作成、流出モデル、積雪・融雪モデル、ダム放流量予測モデルの構築を行った。

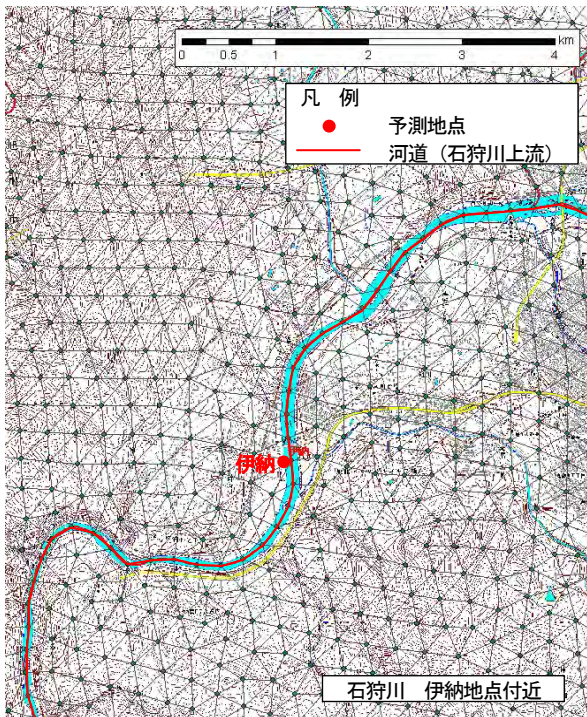
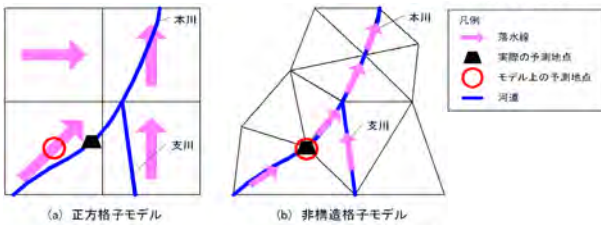


図-3 非構造格子による地形・河道の表現

(1) 地形データ作成

分布型流出モデルは有限要素法による計算を行うものであり、解析領域全体を有限個の部分領域に分割する必要があります。本報告では複雑形状への適応性に優れた三角形格子を用いる非構造格子（メッシュ）を用いた。三角

形格子のメッシュ分割には多大な労力を要するため、非構造格子を分割する手法の一つである「修正デローニ分割法」を実現するプログラムを用いて分割を行った。なお、河道の幾何形状を格子に反映させるため、河道を分割のブレークラインとして、三角形要素の辺となるように分割を行った。（図-3）

なお、地形データのうち、標高データは基盤地図情報の10mメッシュ及び当部で作成した航空レーザ測量による5mメッシュのデータを用いた。また、土地利用データについては、国土数値情報土地利用細分メッシュデータ（100mメッシュ）を用いた。

(2) 分布型流出モデル

山地斜面において地面に到達する降水（降雨あるいは融雪）の流出過程の概念図を図-4に示す。

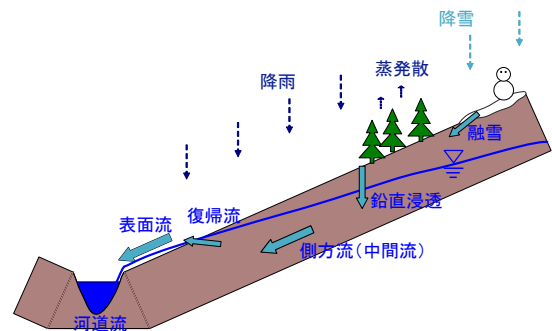


図-4 流出過程概念図

本流出解析モデルはこのような流出過程を忠実に反映し、地表面、表層土壌及び河道を解析対象としてそれぞれモデル化した。モデルの基本的な構成要素は①不飽和鉛直浸透、②表面の流出（2次元）、③飽和側方流（2次元）、④河道流出（流下方向1次元）となっている。モデルの具体的な仕様を以下に示す。

- ・ 有効降雨（蒸発や樹幹遮断といった損失を減じた降雨量）を地表面に供給する。
- ・ 浸透能を越える降雨は、地表流へ供給させる。
- ・ 地表より浸透した降雨は、不飽和鉛直浸透流として表土層中を降下する。
- ・ 鉛直浸透により基盤へと達した水は、基盤上に表層帯水層を形成する。帯水層中の水は飽和側方流として2次元的に流動する。
- ・ 表層が飽和して地下水面が地表に達した場合は、復帰流として地表面へ湧出させる。表面流モデルは、計算負荷を軽減し、実用上の解析精度を損なわない Diffusion Waveモデルを用いる。
- ・ 河道に流れ込む表面流は、1次元河道流への入力項として河道に供給する。河道流モデルについては、物理現象に忠実な Dynamic Waveモデルを用いる。

以上の要素により構成した分布型流出モデルの概念図を図-5に、流出解析計算の手順を図-6に示す。

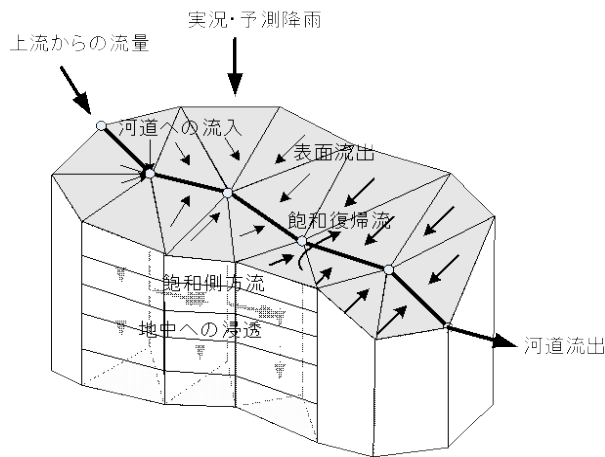


図-5 分布型流出モデル概念図

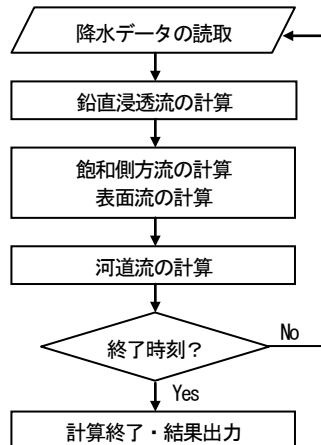


図-6 流出解析計算の手順

(3) 積雪・融雪モデル

積雪期、融雪期の洪水予測を行う際に、積雪・融雪の影響による下流流量の変化を考慮する必要がある。

土木研究所で開発した予測方法をベースに、積雪期、融雪期を通じて積雪深、融雪量を非構造格子の各メッシュにおいて算定できる分布型積雪・融雪モデルを構築し、積雪・融雪モデルより計算された融雪水量（降雨の場合は降雨量）を、地表面到達水量として分布型流出モデルに入力する。（図-7）

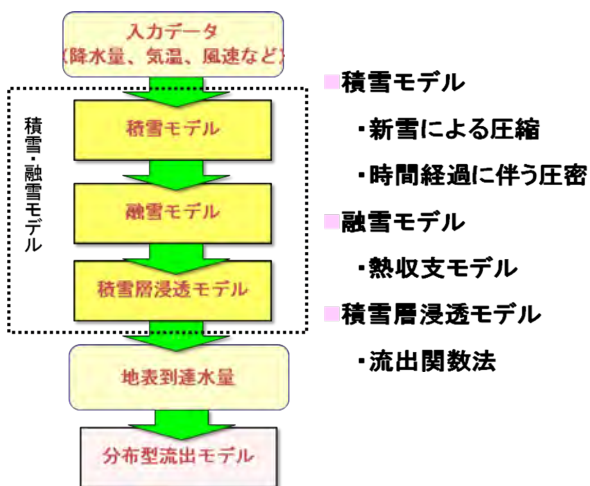


図-7 積雪・融雪モデルの構成

(4) ダム放流予測モデル

分布型モデルによる洪水予測を行うに当たっては、ダムによる洪水調節の影響を考慮し、将来数時間のダムの放流量を精度よく予測する必要がある。

洪水予測におけるダムの放流量予測は、各ダムの操作規則に則り算定するのが一般的である。ただし、洪水時のダム操作は、予備放流やただし書き操作などの複雑な操作が管理者により適切に実施されるため、放流量を予測することが難しい。このため、オンラインで取得できる実測の全流入量、貯水位及び全放流量を用いて、ダムの水位 - 容量関係から貯水位の時間変化を求め、予測貯水位より放流量を算定する手法について検討した。

分布型洪水予測モデルにおけるダム放流量予測の計算手順を図-8に示す。

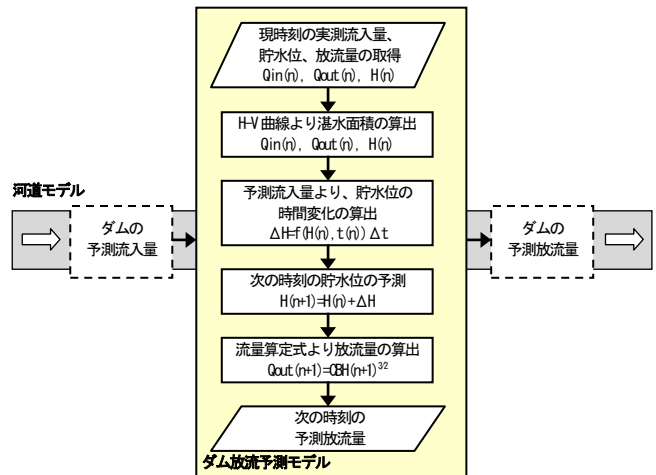


図-8 洪水予測におけるダム放流量予測の計算手順

ダム放流量予測は、分布型モデルの一部分である河道流モデルより算出したダムの予測流入量から、ダムの流量係数を用いて予測放流量を算出する。ダムの流量係数は、オンラインで取得するダムの実測データ及びダムの水位容量の関係から求めた。

(5) モデル定数設定

一次設定として一般値を用いたモデル定数での計算結果は実現象に対して流量が過大であったり、ピーク生起時刻がずれていたりするので、以下①～④のモデル定数について調整を行った。

なお、設定した透水係数の面的な分布については、都市域における水循環系の定量化手法を参考に、土地利用データからメッシュごとに設定した。

- ① 鉛直透水係数：鉛直方向の透水性を表し、値が小さいほど表面流が卓越する。流域内の不飽和特性により洪水流出過程は異なると考えられるが、明確な値は不明である。鉛直透水係数を変化させて各地点での洪水予測精度を検証する必要がある。
- ② 水平透水係数：飽和側方流の流れやすさを示すパラ

メータであり、面的な透水係数は土地利用により変化する。砂質地盤では鉛直透水係数の2~10倍であるといわれる。

- ③ 間隙率：透水係数と組合せて土層の浸透能力を代表するパラメータである。間隙率が大きいほど土層の貯留効果が高く期待できる。
- ④ 表面流の等価粗度及び河道粗度：粗度が大きいほど、表面流出及び河道流出のスピードが遅くなり、流量ピークの生起時刻が遅くなる。

上記に示す調整を行った結果におけるモデル定数を表-1に、観測流量と計算流量は図-9, 10に示す。

表-1 モデル定数設定

対象流域	石狩川上流	天塩川上流
透水係数 (鉛直方向)	1×10^{-2} (cm/s)	3×10^{-3} (cm/s)
透水係数 (水平方向)	2×10^{-1} (cm/s)	3×10^{-2} (cm/s)
間隙率	0.7	0.4
河道粗度	0.05	0.02~0.055 (河川毎に設定)

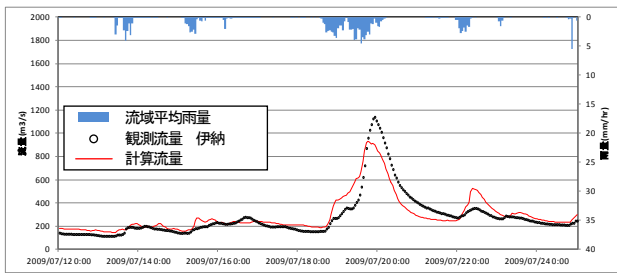


図-9 観測流量と計算流量 (石狩川伊納地点)

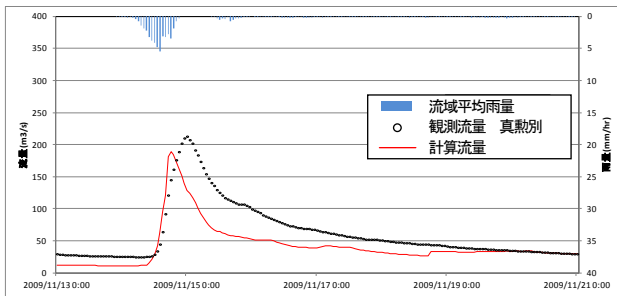


図-10 観測流量と計算流量 (天塩川真敷別地点)

(6) フィードバック手法

洪水予測システムでは様々な要因により予測と実績とに誤差が生じる。誤差が生じる要因としては、1.予測雨量の誤差、2.流出過程のモデル化における近似誤差、3.モデルパラメータの誤差、4.観測精度やH-Q式精度による観測流量誤差などが挙げられる。従って洪水予測の精度向上のためには、予測と実績との乖離を補正するフィードバックの適用が有効である。

高精度なキャリブレーションを行ったモデルでも、全ての箇所に誤差要因が残っていると考えられる。分布型モデルとなれば、分布している各要素にどのようにフィードバックをかけるかを合理的に決定することは困難で

ある。このような状況において、本報告では適切な精度が確保されるフィードバック手法を採用することが必要である。

一般的なフィードバック手法を表-2に整理する。

表-2 フィードバック手法の分類

①定数固定現時刻合わせ (土壌水分率補正)	過去数時間分の観測流量から、現時刻の土壌水分率を逆算して求め、予測計算をスタートする。
②定数固定現時刻合わせ (流量比による比率移動)	過去数時間分の実績予測流量と観測流量との比率を求め、予測計算の結果に同比率の逆数を乗じる。
③定数変動方式 (流量比による比率移動)	過去数時間の降雨・流量データからモデルパラメータの一部を逆算し、それを用いて現時刻を予測し、それと実測流量との比率を求め、予測計算の結果に同比率の逆数を乗じる。
④定数変動方式 (土壌水分率補正)	過去数時間の降雨・流量データからモデルパラメータの一部を逆算し、更に土壌水分率も逆算して予測計算をスタートする。

①の手法では土壌水分量を逐次補正するため、予測と実績が大きく乖離してしまった場合にも精度の高い補正が可能であると考えられる。一方、分布型モデルの各メッシュに対してどの様に補正をかけるかが難しく、またモデルの状態量を頻繁に変更することはモデルが不安定になりやすいという欠点がある。

②の手法は予測結果に補正をかけるだけであり、モデル内の状態量やパラメータには一切手を加えない。ある程度精度の高いモデルが構築されている場合は、十分なフィードバック効果と高い計算安定性が得られる。

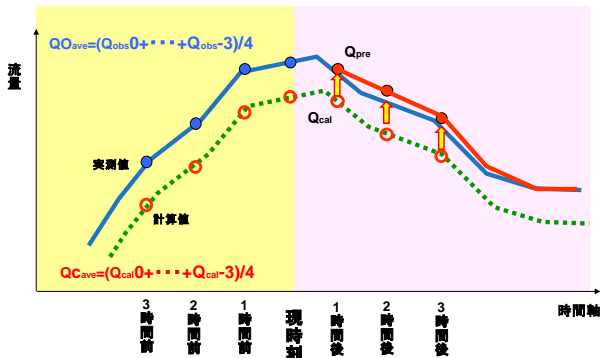
③④の手法ではモデルパラメータの逐次補正を行うため、予測の大きな乖離にも対応できると考えられるが、精度がまだ不十分である予測雨量の誤差までモデルパラメータで合わせようとしてしまうため、モデルが不安定になりやすい。

本報告では既にある程度精度の高いモデルが構築されている。従ってモデルの状態量やパラメータをむやみに変更することは、かえってモデルの不安定性を増す可能性があるため好ましくないと考えられる。

以上により、本システムでは「②定数固定現時刻合わせ (流量比による比率移動)」によるフィードバック手法を採用した。

なお、フィードバックは一般的に計算流量を対象とするが、補正された流量を水位に変換する際に、H-Q式による誤差が生じる可能性があるため、H-Q変換済みの計算水位を対象とした水位フィードバック手法を検討した。1,2,3,4,5時間前までの値より算出した補正率を用い補正結果のRMSE値により、最も精度が良く、最も手法が簡便になる1時間前までの値を用いた補正率を採用した。

補正イメージを図-11に示す。



補正率(f) = 実測値 / 計算値 → 予測値 = 計算値 × 補正率(f)

図-11 誤差率による定数固定現時刻合わせ

(7) 学習モデル

フィードバックは現時点の洪水予測結果の補正には有効となるが、過去の洪水の精度に関する履歴を学習したものではない。また、今後起こりうる降雨パターンの変化に対応するためには、未知なる洪水に対しても適切なフィードバック精度を維持することが必要である。こうした要件から、洪水予測システムでは運用を通じて経験する洪水履歴の学習を行い、自動的に予測精度の維持・向上を図ることが求められる。予測システムによる学習を実施するためには、洪水のたびに予測結果と実測とのズレをチェックし、より精度の高いフィードバック経路を再構築していく必要がある。

ニューラルネットワークでは、経験した洪水履歴を教師データとした学習を効果的に行うことが可能である。

本報告では、流出再現計算結果を学習対象として、フィードバックモデルの基本となるニューラルネットワーク学習モデルを構築した。ネットワークの学習対象は現時刻の補正係数（計算結果と観測結果の誤差率）とし、非線形な関数近似能力に優れたバックプロパゲーションを用いた。

フィードバックのイメージ図を図-12に示す。

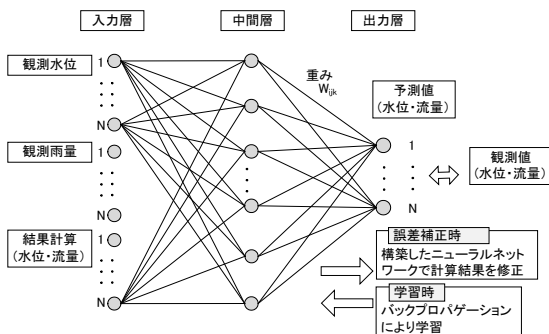


図-12 予測結果と観測によるフィードバック

4. 今後の課題

これまで、石狩川上流水系及び天塩川水系における分布型洪水予測システムの概要について説明してきたが、現在、これらの検討結果からシステム開発を実施中である。

今後は、構築したシステムを実際に稼働し、実績洪水を踏まえたオンラインシステムとしての検証を進め、精度向上を図っていく予定である。

以下に、今後の具体的な課題についていくつか示す。

(1) オンライン予測によるキャリブレーション

本報告で構築したモデルは、過去の実績降雨を用いてモデル検証を行っている。実際の洪水予測システムの運用は、複数のレーダ予測雨量等を用いて、データ遅延や欠測処理を考慮しながらリアルタイムで実行される。このように実際に運用される予測システムとしての精度検証が必要であり、合わせてパラメータの一部再チューニングが必要となる。実際に取得されるであろうデータを用い、モデルの精度向上を踏まえた洪水予測システムの精度向上を検討する必要がある。

また、本報告では流域一律のパラメータとしているが、分布型のシステム特性を踏まえ、今後は空間的な設定に向け、検討する必要がある。

(2) 融雪洪水の予測精度の向上

融雪洪水では、積雪が降雨により融解し、地表面上を流下する現象であるが、融雪洪水の予測精度向上では標高別の面的な積雪分布の推定や気象データの予測も精度向上には不可欠となる。しかしながら、現在のシステムでは気象データの予測が配信されていないため、今後は気象データの予測配信が必要である。

(3) 計算能力と精度のバランス

石狩川や天塩川のように大きな流域の場合は、データ通信や計算機能力がボトルネックとなり実計算時間が長くなる可能性もあるため、計算能力と精度のバランスがとれたシステム構築に留意する必要がある。

最後に、分布型の洪水予測システムは、検討途上のシステムである。今後は上記の課題やこれまでの集中型による知見も踏まえ、より高度な予測が可能となるよう引き続き検討を進めていきたい。