

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏 名 (ふりがな)		所 属		役 職
	中津川 誠 (なかつがわ まこと)		室蘭工業大学 くらし環境系領域		教授
②研究 テーマ	名称	流域貯留量を考慮した洪水予測手法の汎用性向上の研究			
	政策 領域	[分野] 水防技術分野	融合 技術		
		[公募課題] 洪水予測技術の研究開発			
③研究経費 (単位:万円)	平成25年度	平成26年度			総 合 計
※端数切り捨て。	447	589			1,036
④研究者氏名					
氏 名		所属・役職 (※平成27年3月31日現在)			
白谷 友秀		一般財団法人 日本気象協会・主任技師			
⑤研究の目的・目標					
<p>先行降雨が多い場合や2山洪水の2山目あるいは融雪期には、少量の降雨であっても予想をはるかに超える大規模な出水に至るケースや、無降雨が継続した後では、まとまった雨が降ったとしてもさほど流出しないケースが見られる。すなわち、流域の湿潤状態が流出現象に大きく関与しており、このことを考慮しなければ不偏性のある予測精度が得られないと考える。しかしながら現在現業化されている洪水予測システムでは、特定のケースのみの降雨～流出関係に基づいてモデルパラメータが設定されているため、たとえ同一流域であっても異なる事例をあてはめると精度が悪化することがある。</p> <p>そこで本研究では、流域の湿潤を表す「流域貯留量」に応じた流出率の導入によって再現性の向上および予測精度の向上を図ることを目的とする。流域貯留量はタンクモデルでいうタンク内の残留水のイメージであり、流域の降雨・流出関係のみならず、降積雪、融雪、蒸発散も含む長期的な水循環プロセスに則って定量化される必要がある。流域貯留量で概念化される土壌水分量と降雨量(+融雪量)によって流出率が随時変化し、流出量が普遍的に再現・予測できることを目指すものである。</p> <p>以上の研究目標の中で今年度は、流域貯留量を取り入れた流出モデルの検討、および、それを用いた流出量の再現・予測を実施した。</p>					

⑥研究成果

(はじめに)

今年度は、流域の湿潤状態を概念的に表わす流域貯留量（タンクモデルのタンク内残留水量：図1参照）と、降雨量（+融雪量）を基に流出率が随時変化するモデルを開発した。これを、既往洪水に適用し、再現性、予測精度を検討した。具体的には次の手順で検討を進めた。

まず、初期水分量と累加雨量を基に流出率を算出する式（以下、流出率算定式と呼ぶ）に対し、「長期水循環モデル」によって推算した洪水開始前日の流域貯留量を初期水分量として与え、さらに洪水開始時の降雨量を与えることで各流域の流出率を推定した。河川事務所等で運用されている3種類の洪水予測モデルに対し、流出率算定式を介して流域貯留量を取り入れたモデルを開発した。このモデルを、16流域を対象に、降雨に起因する洪水、また、融雪を伴う洪水に適用し、計121事例の再現計算をとおしてモデルの有効性を検討した。

次に、以上で作成した流出モデルを用い、再現計算で対象にした流域の中で、7流域28事例を対象に、洪水予測計算を行った。予測計算は、観測雨量を与えた場合と、気象庁が配信する予測雨量（融雪量を含む）を与えた場合の二通りについて実施した。流出モデルには、上述した河川事務所にて使用されている3種類の流出モデルと本研究で開発した3種類のモデルの計6種類を用い、各モデルからの予測結果を比較した。

(現行の流出モデル)

主に北海道開発局の現業部門で用いられている洪水流出計算モデルは、星ら¹⁾が提案した「一般化貯留関数モデル」、「1段タンク型貯留関数モデル」及び「2段タンク型貯留関数モデル」の3つである。これらを以下「現行モデル」と称し、図2に基本式を記す。

現行モデルは流出過程の非線形性を比較的簡単な構造式で表すことができ、河川の洪水予測や洪水時のダム操作のための貯水池流入予測に用いられている。また、1段タンク型貯留関数モデルや2段タンク型貯留関数モデルは、有効雨量を必要とせず、観測雨量をそのまま使用できるという特徴があり、流出解析の前処理として必要とされていた基底流量の分離作業や流出率を決めるといった作業を必要としない。しかしながら、現行モデルではパラメータの設定を事例ごとに行うことは難しく、事例が変わると精度が悪化する場合がある。また、北海道内では近年の気候変動による夏季の大雨洪水の増加や、融雪期の予想をはるかに超える大規模な出水に至るケースが続出している。このような洪水流出

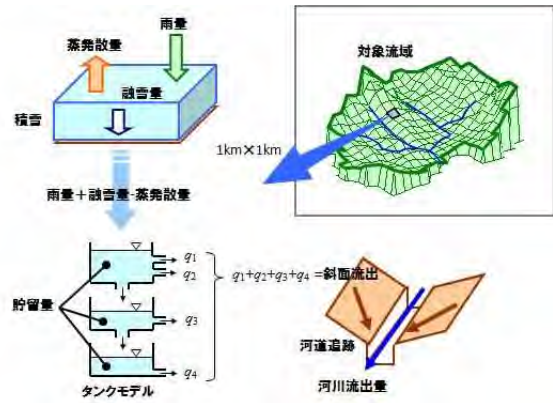
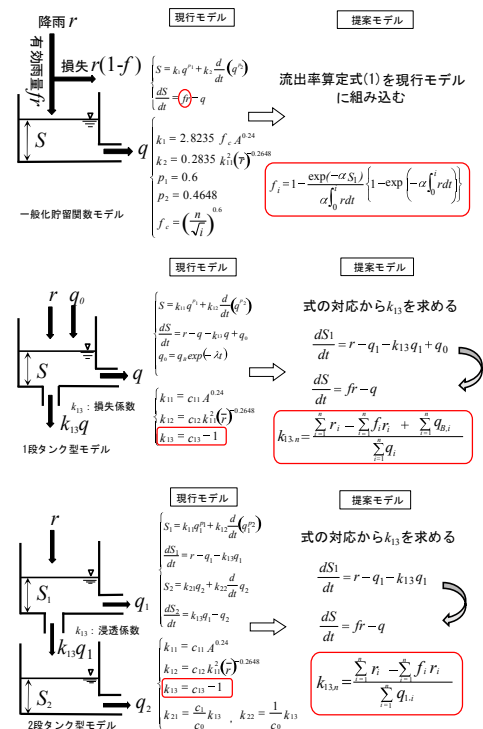


図1 流域貯留量の推定イメージ



ここで、 S : 貯留高(mm), S_1 : 1段タンク貯留量(mm/h), S_2 : 2段タンク貯留量(mm/h), q : 観測流出高(mm/h), q_0 : 基底流出高(mm/h), q_2 : 初期流出高(mm/h), q_1 : 表面流出高(mm/h), q_2 : 中間・地下水流出高(mm/h), r : 観測雨量(mm/h), \bar{r} : 平均有効雨量強度(mm/h), f : 流出率, n : 等価粗度($s/m^{1/3}$), i : 平均斜面勾配, A : 流域面積(km^2), $k_1, k_2, k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_2, p_1, p_2$: モデルパラメータ, c_{11}, c_{12}, c_{13} : モデル定数, c_0, c_1 : 定数, λ : 減衰係数

図2 現行モデルと提案モデルの相違

⑥研究成果（つづき）

計算の再現性を向上するには単に洪水時の降雨と流出の関係のみならず長期水循環を考慮した土壌の湿潤度を評価できるモデルが必要と考える。

（流域貯留量を考慮した流出モデル：提案モデル）

山田ら²⁾は、次式に示す流域の保水能を考慮した流出率の算定方法を提案している。この方法では、初期水分量と累加雨量から流出率が算出される。

$$f_i = 1 - \frac{\exp(-\alpha S_1)}{\alpha \int_0^i r dt} \left\{ 1 - \exp\left(-\alpha \int_0^i r dt\right) \right\}$$

ここで、 f_i は降雨開始*i*時間後の流出率、 S_1 は降雨開始前日の流域貯留量（1段目タンクの貯留高）（mm）、 r は雨量強度(mm/h)である。また、 α はパラメータ(1/mm)で、ハイドログラフの再現性から流域毎に与えられる。なお、ここでの初期水分量は表層土壌を対象にしていることから、本研究では初期貯留量 S_1 には表層土壌に対応するものとして1段目タンクの貯留高を与えた。

ここでは現業レベルでの汎用性を鑑み、導入実績のある以下の3つの現行モデルに流出率算定式を組み込むことで流域貯留量を考慮したモデルを提案した（図2）。新たに流域貯留量を導入した流出モデル（以下、提案モデル）の内容を以下に示す。

- (1) 一般化貯留関数モデル：提案モデルでは、基本式の流出率 f に流出率算定式で算定される時間毎に変化する流出率を使用する。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようになる。
- (2) 1段タンク型貯留関数モデル：提案モデルでは刻々と変化する流出率 f を損失係数 k_{13} に換算して浸透効果を変化させる。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようになる。
- (3) 2段タンク型貯留関数モデル：提案モデルでは刻々と変化する流出率 f を浸透係数 k_{13} に換算して浸透効果を変化させる。これにより土壌の湿潤状態の変化を考慮できるようになる。

（対象流域・事例）

対象流域は、北海道流域を基本とし本州1流域を含めた全16流域とした（図3）。この16流域において、降雨に起因する洪水、また、融雪洪水を選定し、合計121の事例を対象に、再現計算を実施した。

（再現性の検証）

現行モデルと提案モデルによる流出再現の比較を行った（図4）。精度評価指数はNash-Sutcliffe指数（以下、NS係数）、ピーク流量相対誤差（以下、Jpe）の2つを用い、それぞれを次式で求めた。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{oave})^2}, \quad Jpe = |q_{op} - q_{cp}| / q_{op}$$

ここで、 q_{oi} は降雨開始*i*時間後の観測流出量（m³/s）、 q_{ci} は降雨開始*i*時間後の計算流出量（m³/s）、 q_{oave} は観測流出量平均（m³/s）、 q_{op} は観測ピーク流出量（m³/s）、 q_{cp} は計算流出量（m³/s）、 N は総降雨時間数である。

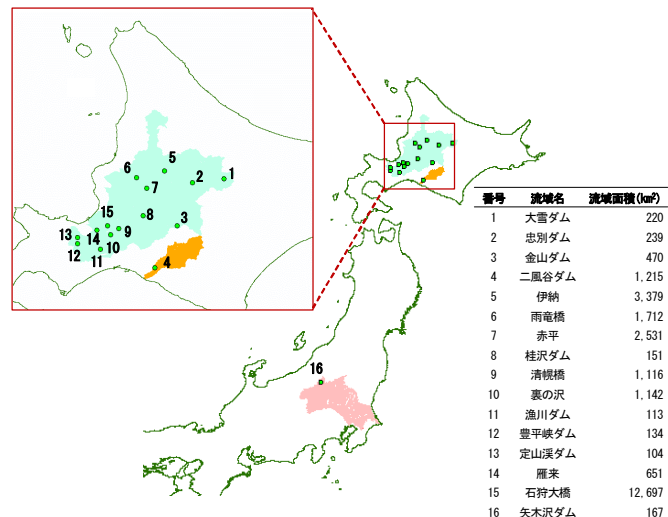


図3 対象流域

⑥研究成果 (つづき)

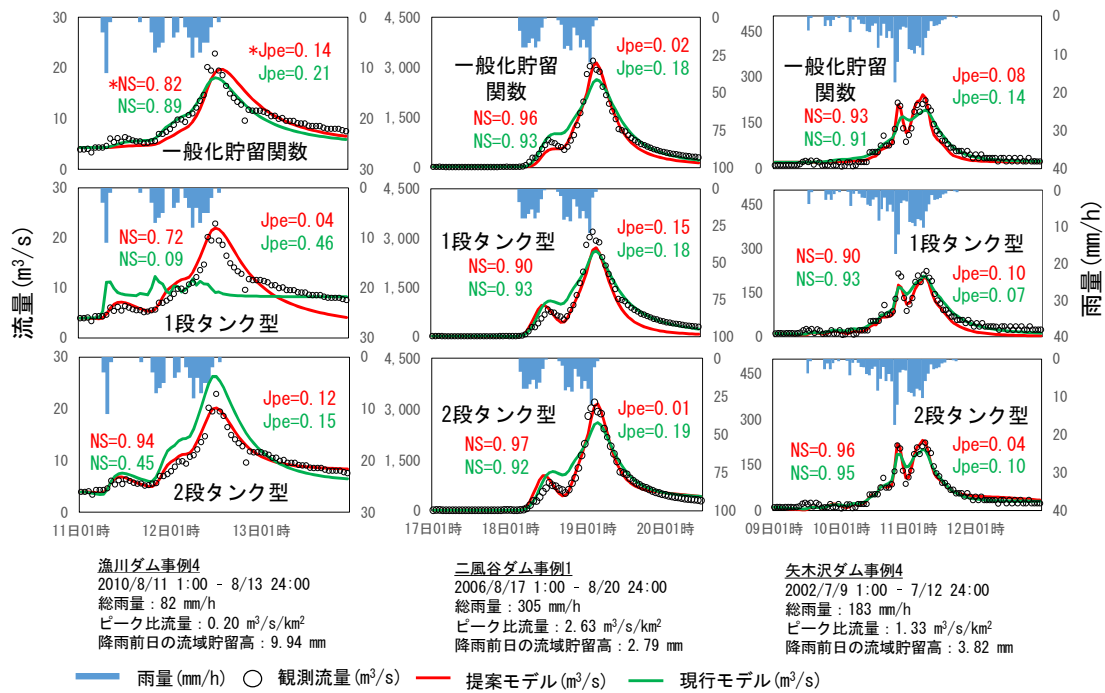


図4 現行モデルと提案モデルの再現結果

図4より漁川ダム事例4では、1段タンク型タンク型貯留関数モデルにおいて提案モデルは現行モデルよりも精度が向上していることが分かる。また、2段タンク型貯留関数モデルにおいては現行モデルの過大評価に比べ適切なピーク流量値が算定されている。また、二風谷ダム事例1では全モデルにおいて現行モデルの過小評価を改善できているとともに、ピーク流量への立ち上がりの再現精度も向上した。唯一の本州事例である矢木沢ダムでも、ピーク比流量が比較的大きな事例4において2山目のピーク流量や立ち上がりを精度良く再現できている。

(提案モデルの考察)

提案モデルの最大の特徴は、流域貯留量を考慮していることである。図5に示すように同一流域において洪水前日の流域貯留量が小さい事例と大きい事例を比較し、ピーク流量時の立ち上がりに着目すると、洪水前日の流域貯留量が小さい場合には、現行モデルよりも遅く立ち上がり、大きい場合には、現行モデルよりも早く立ち上がっている。特に先行雨量が多い場合、すなわち土壌が湿潤している場合に安全側の評価が可能であることを示している。

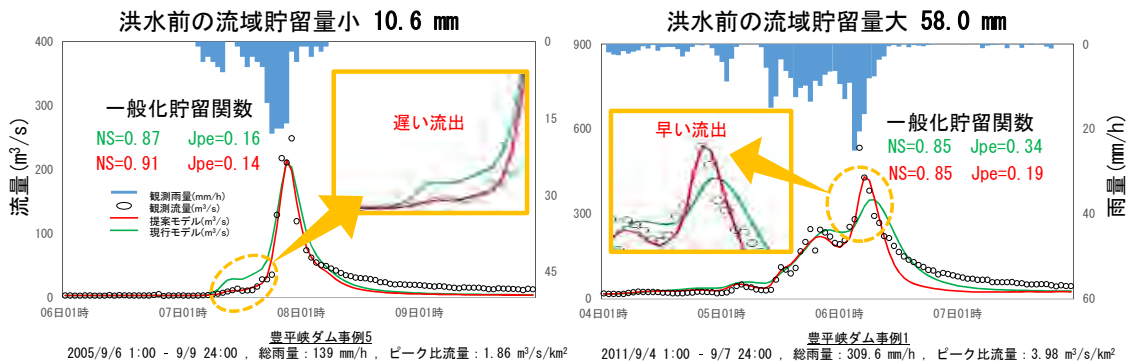


図5 同一流域における洪水前流域貯留量の大小事例比較

⑥研究成果（つづき）

（洪水予測への適用）

以上で提案した流出モデルを用いて洪水予測計算を行い、提案モデルの有効性を検討した。

予測計算は、実測雨量を用いた場合と気象庁から配信される予測データを用いた場合の2種類について行った。予測データには、気象庁予の「降水短時間予報」と「MSM（メソ数値予報モデル）」を用いた。なお、MSMは融雪量の算出に用いた。計算に際しては、流出モデルにカルマン・フィルター³⁾を導入し、計算値および流出モデルパラメータを実測流量で逐次補正を行った。

図6は一般化貯留関数モデルを用いて二風谷ダムの2006年8月洪水を予測した例である。実測雨量を用いた予測結果によると、2山めの流量の立ち上がりの部分において、改良モデルの優位性が認められた。なお、予測雨量を用いた場合には、予測雨量の影響が大きく、現行モデルと改良モデルによる予測値の差は明瞭ではなかった。

図7は、実測雨量を用いた予測を基に、予測リードタイムと予測誤差（RMSE：平均二乗誤差の平方根）を整理したものである。ここに示した二風谷ダムの例では、流域貯留量を考慮した一般化貯留関数モデルの誤差が最も小さいことが分かった。他の流域も同様の比較を行った結果、7流域中6流域において、提案モデルのRMSEが最小になり、流域貯留量を考慮することの効果が見られた。

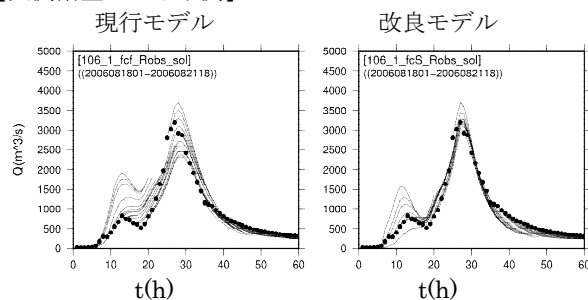
（おわりに）

流域の湿潤状態を加味した貯留関数モデルを検討し、再現性、予測精度を検証した。その結果、出水規模の大きな洪水の再現性、予測精度において、その効果が見られた。

【参考文献】

- 1) (財)北海道河川防災研究センター・研究所：実践流出解析ゼミ 講義テキスト編，第4回，第12回，2006。
- 2) 山田正，山崎幸二：流域における保水能の分布が流出に与える影響について，第27回水理講演会論文集，pp. 385-392，1983。
- 3) [監修] 国土交通省・北海道開発局建設部河川管理課，[編集・発行] (財)北海道河川防災研究センター・研究所：「実時間洪水予測システム理論」解説書，396p.，2004。
- 4) 口澤寿，中津川誠，水・熱収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散量の推定，北海道開発土木研究所月報，No. 588，pp. 19-38，2002。

【実測雨量による予測】



【予測雨量による予測】

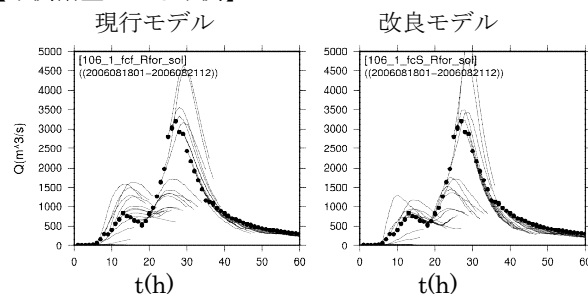


図6 一般化貯留関数モデルによる洪水予測結果
流域：二風谷ダム，予測期間：2006年8月18日～21日。●：実測流量，灰色の実線：予測流量。

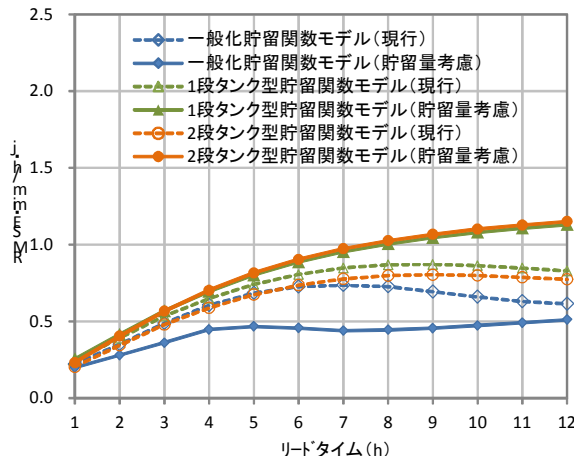


図7 予測誤差（RMSE）と予測リードタイムの関係（二風谷ダム）

⑦研究成果の発表状況

- これまでに発表した代表的な論文
「流域貯留量を考慮した現業用洪水予測手法の改良」, 河川技術論文集, 第20号, pp. 311-336, 2014.
「流域水循環に基づく貯留量を考慮した洪水予測計算の研究」, 平成26年度土木学会北海道支部論文報告集, 第71号, 2015.
- 国際会議、学会等における発表状況
国内：原著論文による発表1件, 紙上発表0件, 口頭発表2件
国外：なし
- 主要雑誌・新聞等への成果発表
室蘭工業大学 未来をひらく技術と研究, 出版社：北海道新聞社
- 研究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
積雪寒冷地用の融雪流出予測についても研究内容に含まれていることから, 国土交通省・北海道開発局の洪水予測システムへの導入を目指し, 担当者との情報交換を積極的に行っている。
- 企業とのタイアップ状況
(一財) 気象協会とタイアップすることで, 気象予測情報の河川管理者への円滑な提供体制及び要求される予測精度を気象・河川両分野で共有して調査研究を推進できるようなスキームとしている。また, 調査研究面のみならず今後の現業化も意識して気象情報の提供や精度向上へのフィードバックの在り方も検討していきたい。
- 特許など、知的財産権の取得状況
なし

⑧研究成果の社会への情報発信

なし

⑨表彰、受領歴

なし

⑩研究の今後の課題・展望等

(一財) 気象協会内で現在稼働している洪水予測システムに, 2年間の本研究成果の導入を検討している。その稼働状況をみつつ, 国や都道府県の洪水予測システムへの導入を図るべく運用レベルの実用化に向けた試験・検討を進めていきたい。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

本研究で用いた3種類の貯留関数法は, いずれも, 北海道開発局の洪水予測において運用されている手法である。また, 本研究によって検証された長期水循環モデルは, 北海道開発局所管の5ダムにおいて積雪量推定に活用され, その推定値は春先のダム運用において利用されている。さらに, 融雪計算手法は洪水予測システムへの導入に向けて検討が進められている。

本研究の知見に基づく洪水予測のあり方を北海道開発局の洪水予測担当者に紹介し, 意識向上に役立てている。