

博士（工 学）馬 場 仁 志

学 位 論 文 題 名

損失を考慮した貯留関数型流出モデルおよび  
浸透と蒸発散を組み合わせた二段貯留関数型流出モデル  
の開発と応用に関する研究

学位論文内容の要旨

比較的簡単な構造式によって降雨流出現象を表現できる貯留関数法は、計算の容易さと河川計画上の技術基準として採用された経緯から、我が国においては広く一般的に用いられており、関数形およびモデルパラメータの設定手法などに関して様々な研究と提案が行われてきた。

貯留関数法を実際の流出解析に適用する際には、従来の一般的手法では、流出率の算定などにより有効雨量を計算し、これをインプットとして与えている。流出率の算定には直接流出量と基底流出量の分離操作が必要だが、流出成分の分離手法によっては、直接流出高も微妙に異なるデータとなり、流出解析の結果にも影響を及ぼす。また、解析期間の選択が解析結果にも影響する。リアルタイムの解析が困難であることも、流出率を用いた計算手法の問題点である。

本論文は、上記の問題点を解決するために、流出率や初期損失雨量を導入した有効雨量の算出を行わず、観測雨量および観測流出高を直接用いる流出解析手法を開発した。また、解析期間に左右されない貯留関数モデルを構築することにより、リアルタイムの解析にも適した方法とした。

具体的には、降雨・流出の非線形性と二価性を表現した貯留関数を基礎にして、損失項を導入した貯留関数に発展させ、ハイドログラフの再現性が良好であることを確認した。さらに、このモデルを北海道内の石狩川を中心とした既往洪水データに適用し、最適モデル定数を用いて貯留関数法の総合化を行った。また、同じモデルを河道モデルにも適用可能な貯留関数法として提案し、雨竜川および後志利別川の実流域に適用して、モデルの有効性を検証した。

提案貯留関数法は Kinematic wave 法の解と等価なモデルに集中化されているので、モデル定数の物理的意味が明確である。洪水時に見られる貯留量と流量の二価性は、非線形貯留方程式で直接表現されているので、遅れ時間を必要としない。洪水河道追跡用の貯留方程式は、流域での流出解析に用いた貯留方程式と構造上同一であるため、理解がしやすく、数値計算も容易である。したがって、分割流域数が多く、河道延長が長くなても、流域流出・河道追跡計算を迅速に行うことができる。

従来の貯留関数法では、入力として、有効雨量を必要とするため、データの前処理に多くの時間を要した。しかも、直接流出成分と基底流出成分の分離作業を自動的に行うこと

が困難である。現実問題として、分離法が確定していないために、この分離作業に主観的要素がかなり入ってくる。そこで、この難点を避けるために、貯留関数法に損失メカニズムを取り入れ、観測雨量と観測流量を直接用いる流出計算手法を採用する。その結果、貯留関数モデル自身に損失雨量を表すパラメータを含めることができるので、その損失雨量パラメータの自動最適化が可能となる。また、従来の方法と異なり、主観的判断が取り除かれる。

流域モデルでの流出計算に必要な2つの貯留係数を流域面積と平均雨量強度の関数で表す。このとき、その関数に含まれる2つの未知定数は、どの分割流域においても一定値をとるものと仮定する。その結果、流域モデルの未知定数は、損失雨量パラメータを加えて、3個だけとなる。この数は分割流域数と分割河道数に依存しない。

河道モデルにも、Kinematic wave 法の解と等価な貯留関数法を用いる。このモデルは6個の定数を持つが、これらの定数は上流端での流入ハイドログラフの形状、河道長および対象河道区間での流下断面積と流量の関係式が与えられると、一義的に求められる。したがって、河道追跡モデルには未知定数はない。

提案した手法は基本高水の検討に有効なだけでなく、降雨、流出および損失の水文諸量の算定を通して、水文素過程や流域特性の定量的評価に発展させることも可能であると考えられる。

上記のモデルは、洪水解析において優れた特徴を示す一方で、ハイドログラフの減水部分や低水流出を含む長期的な流出の再現に対し、上記モデルの適用には更なる改良の余地を残している。その原因是、損失量をパラメタライズしている点に起因する。損失量を決定する損失係数が、従来の流出解析法で表現してきた流出率と一定の関係にあることを示したが、このことの意味は、損失量の中身をブラックボックスのままにして、パラメータの逐次最適化により計算可能としたものであり、事前の水文資料の統計的解析による調整と同様となる。

そこで、より厳密に流域流出現象の物理的モデリングを行うために、損失量を流域蒸発散量と浸透損失量からなる物理量としてモデル化し、閉じた流域水収支モデルを構築した。具体的には、貯留機構を表面流出に関する部分と地下水流出に関する部分に分けるとともに、浸透により流域内に供給された成分は、地表と植物の葉面からの蒸発散によって放出される成分と地下水流出を経て河川に復帰する成分、および最終的に河川流出に出てこない損失成分とに分かれて消費される。このうち地下水流出は、地下を経由する浸透流による現象であることから、浸透モデルに従う貯留関数を用いた。

モデルの構築は、先に開発した「損失項を導入した貯留関数モデル」を一段目のタンクとし、一段目からの損失を二段目のタンクに貯留して再度表面流に復帰するものを地下水流出としてモデル化した。二段目タンクからの損失は、表面に戻ることのない深層地下水への浸透損失と、地表面および植生を通じた蒸発散によって構成した。蒸発散量は気象モデルから理論的に導かれる値として導入した。なお、樹木等による遮断蒸発については一段目に導入した。

その結果、洪水流出の再現性に優れている損失項を導入した一段型貯留関数モデルの特徴を受け継ぎながら、さらに再現性が向上し、同時にいくつかの利点を生み出した。主なポイントを整理すると次のようになる。

- (1) 貯留計算を二段で行いながらも、少ないパラメータで流出機構を再現することができる。
- (2) 長期流出資料に対する流出解析に有利であり、洪水期－非洪水期の連続した解析

が可能。

(3) パラメータの安定性が向上したため、実時間洪水予測に有利である。

(4) 表面流出と地下水流出との分離を容易に計算できる。

また、葉面積指数 LAI については、植生群落の活性度により変化するパラメータであるが、本研究においては一定値を用いた。植生指標と蒸発散量との関係は他の研究で明らかになりつつあり、リモートセンシングから LAI を推定することもできる。本論文で提案したモデルは、LAI を介して地被状態の季節変化あるいは長期的変化に対応した計算が可能な形式を備えており、応用範囲が広げられる。

最適化パラメータについては、北海道東部の網走川等 4 河川で本モデルにより求められた値と、石狩川の洪水資料から得られた一段型貯留関数モデルの総合化パラメータを比較した結果、網走川等 4 河川の解析結果は総合化の分布範囲に収まっており、表面流出に対する貯留関数モデルのパラメータとして総合化した式は、流域の違いによらず共通に適用できる。

さらに本論文では、上記によって開発した貯留関数モデルの応用研究 3 件を記述した。

このうち、「地下水流出の分離計算」では、浸透と蒸発散を組み合わせた二段貯留関数型流出モデルを用いて、成分分離 AR 法と同様に表面流出と地下水流出の分離計算が行えることを示すとともに、美々川の地下水流出が、豊富な地下水貯留によって、複数年にわたり長期的に安定した水供給がもたらされていることを説明した。また、地下水流出に関する貯留高の計算値から地下水位の予測計算が可能であることを示した。

「アイスジャムが発生する河川の流出解析」では、アイスジャムの影響で水文観測が行えず、流量記録が得られていない河川における流量の推定を、浸透と蒸発散を組み合わせた二段貯留関数型流出モデルによって推定し、アイスジャムの発生から解消にいたる期間の河川の流出現象を説明した。

最後に、「融雪出水特性の経年変化分析」では、損失を考慮した貯留関数型流出モデルを用いて、近年の融雪期における流出特性の経年的な変化を分析した。その結果、融雪ボテンシャルに対する有効融雪率が減少あるいは融雪期を通じて平坦につぶれてきている傾向を把握した。一方では、流出システムにおける一時流出成分の割合が増加しつつあることも示した。このため、トータルで観測される流出高には、融雪期の流出形態の変化が現れにくくなっている。有効融雪率の変化は、最近 30 年間で、尻別川で 37%，忠別川で 29%，豊平川で 28% の減少となっている。

# 学位論文審査の要旨

主　查　教　授　藤　田　睦　博  
副　查　教　授　佐　伯　浩  
副　查　教　授　長谷川　和　義

## 学　位　論　文　題　名

### 損失を考慮した貯留関数型流出モデルおよび 浸透と蒸発散を組み合わせた二段貯留関数型流出モデル の開発と応用に関する研究

平成9年12月に河川法が改正され、河川整備基本方針の策定が全国の1級河川109水系において急ピッチに進められている。特に、工事実施基本計画で既に定められている基本高水や計画高水流量配分などに関して、社会状況の変化を踏まえて、その内容の検証を行うのが策定計画の主要課題である。このような環境下で従来の流出計算手法を再検討し、問題点を洗い直し、より実用的で、かつ、合理的な流出モデルの再構築は河川技術者の使命であった。本研究は、このような背景のもとになされたものである。

本論文は、5章より構成されている。

第1章は、序論で研究の背景と目的を説明している。ここで、著者は、新しく構築する流出モデルの必要事項として、次の3点を指摘している。

- (1) 降雨～流出現象の物理過程の表現性に優れ、かつ、実用的なモデルであること。
- (2) 損失雨量や有効雨量の分離などの「事前処理」を必要としないモデルであること。
- (3) モデルパラメータに普遍性のあること。

上述の必要事項を満足する流出モデルとして、貯留関数型モデルが最適であることを示している。降雨流出現象の力学過程を記述している各種の分布定数系の流出モデルを集中化することによって、全てが貯留関数型流出モデルに置換されることを指摘し、物理過程の表現性に優れ、かつ、実用的な流出モデルとして貯留関数型流出モデルの利点を列挙している。さらに、分布定数系の流出モデルを集中化するにともない、パラメータ数が減少するとともにモデルパラメータも集約化され、流域特性の把握に有利であることを指摘している。

第2章では、山地流域を対象にkinematic wave式を基本式として、これを集中化した貯留関数型流出モデルに降雨量の損失項を導入したモデルを提案している。このモデルは、3個の未知パラメータを含む極めて簡単な式である。このモデルを石狩川水系28流域、12ダム流域、道東の4河川水系(網走川、常呂川、湧別川、渚滑川)の22流域、後志利別川水系2流域の計64流域の256出水資料を用いて最適定数を解析

している。解析の結果、流出量の再現計算結果が良好であることを示すとともに、モデルパラメータの総合化に極めて重要な関係式を導出している。すなわち、2個のパラメータ  $K_1, K_2$  に関して、 $K_1$ ～流域面積関係および  $K_1 \sim K_2$  関係が kinematic wave 式を集中化した理論式に一致していることを確かめている。また、損失降雨量に関するパラメータに関しては、流出率と直接流出高と総流出高の比によって説明できること明らかにしている。さらに、このモデルを市街化の著しい北広島市の輪厚川流域に適用し、パラメータ  $K_1, K_2$  が、都市化の進展に伴い減少することを見出している。パラメータ  $K_1$  が降雨量と流出量の重心時間差、 $K_2$  が流出量の2次モーメントに関与する理論解析結果と符合した結果が得られた。すなわち、都市化にともない流出量の遅れが短くなり、かつ、ハイドログラフが短時間に集中する傾向も提案した貯留関数型モデルが検知できることを示している。

また、解析の対象流域が大きくなるとサブ流域における流出解析と河道における洪水追跡が必要になる。河道モデルにも、kinematic wave 法を集中化した貯留関数法を利用できることを示している。

第3章では、第2章で得られた損失降雨量に関するパラメータの物理的意味について考察し、浸透および蒸発散を組み合わせた2段貯留型流出モデルを提案している。すなわち、降雨量の損失を、蒸発散、深層への浸透に分離し、表面流出と地下水流出を計算できるモデルを提案している。蒸発散量の算定に関しては植生の葉面指数(LAI)を考慮した式を用いている。

提案している2段貯留型流出モデルは、5個のパラメータを持っているが、第2章で使用した実流域の降雨量と流量資料を用いてパラメータの最適化を行い、第2章で得られた結果よりはるかに良好なパラメータの総合化が可能であること示している。さらに、地下水の観測資料の豊富な美々川植苗流域に提案しているモデルを適用し、地下水位の観測結果と本手法から得られる地下水水流が密接に関係していることを明らかにし、モデルの物理的意味を検証している。蒸発散量をモデルに組み入れたことによって、数カ月にわたる長期間の再現流出計算を行い良好な結果を得ている。2段貯留型流出モデルと河道における貯留関数を併用することにより、石狩川流域のような大流域の流出量も迅速に解析できるようになり、本手法は現在進められている石狩川の河川整備基本方針の基本高水の検証解析に利用されている。

第4章は、融雪流出の解析にも2段中流型流出モデルが適用できることを示している。特に忠別側、尻別川などのようにアイスジャムが発生する河川では、アイスジャムの影響で水文観測が行えず、流量記録が得られていない河川における流量の推定を、浸透と蒸発散を組み合わせた二段貯留関数型流出モデルによって推定し、アイスジャムの発生から解消にいたる期間の河川の流出現象を説明できることを示している。

第5章は、本研究で得られた成果を要約している。

これを要するに、著者は実流域における長短期の流出解析手法に関して多くの新知見を得たもので、水文学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。