

## 山地流域における流出過程のモデル化とその応用に関する研究

### 学位論文内容の要旨

近年の水需要の増大、河川の治水対策等の工学的諸問題に対処するためには、降雨とそれに伴う流出量を推定することが基本的かつ重要な役割を果たす。従来からこのような問題に対し、降雨流出モデルを用いた解析法が数多く提案されてきており、流出過程の物理的な特性を組み込みやすい分布定数系のモデルと、実用性を重視した集中定数系のモデルに大別される。近年では、計算機の発達とともに流域の物理的な流出機構を分布定数系のモデルに導入する試みが行われているが、物理的な意味の曖昧な有効雨量とそれに対応する流出量を対象としていることが多い。有効雨量を対象とした流出モデルでは、解析対象が曖昧になるばかりでなく、リアルタイムに流出量を推定できない、融雪流出の様に短い周期の流出波形では有効雨量そのものを推定することが困難になるといった実用上の問題を有している。このため、有効雨量の分離機構を流域の流出機構と物理現象に基づいていかに記述するか、そしてそれを実用的に利用度の高い集中定数系のモデルにどのようにして反映させるかが重要であると考えられる。

本研究では、以上のような観点に立ち、斜面域の卓越する小流出試験地を設置し、山地小流域における流出特性及び損失の機構を、流域の調査および2次元の不飽和浸透解析によって明らかにするとともに、これを含めた不飽和浸透理論を集中化することによって、有効雨量の分離を必要としない、流域の物理的な特性によってモデルパラメータを記述できる集中型の流出モデルを提案する。また、提案された集中型モデルを、一般的な有効雨量の分離方法の適用が困難で、かつ積雪地帯での必要性の高い融雪流出解析手法に応用するものである。

本研究は全5章から構成されている。以下、各章毎に本研究の概要を示す。

第1章では、本研究の目的とその方法が明らかにされている。

第2章では、流出の物理過程を踏まえたモデルを構築するための第一段階として、斜面域の卓越する試験流域における降雨流出現象及びその損失機構を流域の踏査と2次元不飽和浸透解析により検討する。まず、試験流域における踏査・掘削調査の結果から、解析の対象となる浸透流の発生領域とその特性を明らかにし、次に不飽和浸透解析に必要となる土壌の土壌水分特性・不飽和透水係数の測定結果を示している。最後に差分法による計算方法とその境界条件の妥当性を数値実験によって検討した後、試験流域の調

査結果を用いて不飽和浸透理論による解析を行い、洪水流出ハイドログラフの大半が土壌中の比較的浅い層からの流出によって構成されること、深層への流出成分は短期流出に直接関与していないことを示している。

第3章では、第2章で得られた試験流域の流出特性の中で、A層からB層への水分移動が短期流出では損失とみなしうることに注目して、2次元の不飽和浸透理論に損失を認める境界条件を与え、これを集中化することによって、損失を考慮できる貯留型流出モデルを構築している。

本章ではまず、浸透領域を1層のみとして、下層への浸透を認める境界条件を仮定し、この境界条件を与えた不飽和浸透理論と直列3段のタンクモデルで計算される流出量・損失量の比較からその適合度を検討している。さらに、それぞれの方法で計算される流出量を降雨毎に配分して有効雨量を推定する方法を示すとともに、この方法で推定された有効雨量とエントロピー法により計算される有効雨量との比較によって再度検討し、設定した境界条件の妥当性を検証している。最後に損失を認める境界条件を与えた2次元不飽和浸透理論を定常状態で損失量が小さいという条件の下で集中化し、損失を含めた貯留型流出モデルを提示する。また、提案した貯留型流出モデルを実流域に適用し、その適用条件についても検討している。

第4章では第3章で提案した貯留型流出モデルを一般的な有効雨量の分離法の適用が困難な融雪流出解析手法・融雪流出予測に応用する。融雪流出ではシステムの入力値となる融雪量の推定が重要であるため、融雪熱量の構成に基づく融雪モデルを構築する。次に、これを用いて流域融雪量を算定し、提案した貯留型流出モデルにより融雪流出量の推定を行い、融雪流出に利用する場合の適合性について述べている。更に、中期・短期の融雪流出予測を目的として気象予報から気温・日射量を推定する方法を示し、これを流出モデルの入力値とした1日～1週間先までの融雪流出予測手法を提案する。また、気温資料と流出量のみがリアルタイムに入手できるという条件の下で、システム方程式に貯留型の流出モデルの特性を組み入れたファジィ推論による融雪流出予測手法を提案している。

第5章は第2章から第4章までの結論をとりまとめている。

以上の研究により、流出解析で概念的に扱われてきた有効雨量の分離機構について、短期流出では流出量に直接関与しない難透水層への浸透量を損失量とみなすことによって、その特性を明らかにされた。そして、この損失量の特性を集中型の流出モデルに導入することにより、観測降雨を直接利用でき、かつ、流域の地形・土壌特性を考慮した流出解析法を提案することができた。また、本研究の第4章で検討された融雪流出解析および予測の方法は現実の流出予測に有用と考えられる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 陸 博  
副 査 教 授 板 倉 忠 興  
副 査 教 授 佐 伯 浩  
副 査 助 教 授 清 水 康 行

学 位 論 文 題 名

## 山地流域における流出過程のモデル化とその応用に関する研究

短期流出解析において、降雨量や流量の損失量の合理的な推定法は水文学の未解決問題の一つである。損失降雨量の考え方は、都市化された流域と植生で覆われた山地流域では基本的に異なる。いずれの流域においても、これまでの損失量の解析法は、観測雨量と観測流量に基づいてなされている。すなわち、観測雨量や観測流量資料が入手できない流域では利用できない欠点がある。本論文は、山地流域を対象にこれらの損失機構を明らかにし、降雨量の損失機構を内蔵する実用的な貯留型流出モデルを提案している。さらに、提案した貯留型流出モデルは、降雨流出解析のみならず融雪流出解析にも応用できることを示している。

本論文は全5章から構成されており、以下に各章で得られた主たる成果を示す。

第1章は、本論文の背景および目的と論文全体の構成について述べている。

第2章は、山地に設定した流出試験地における詳細な流出現象観測について述べている。まず、降雨量、試験地からの流出量、土壌中の水分量分布など観測値に基づき、解析の対象となる浸透流の発生領域とその特性を明らかにしている。すなわち、流出ハイドログラフの大半が土壌中の浅い層からの流出によって構成されることを見出している。次に、流出試験地の地質・土壌特性の調査結果に基づいて、流域土壌が透水性の異なる2層から構成されるものとして不飽和浸透解析を行い、観測流量を再現できることを確かめている。深層への流出成分は短期流出に直接関与しない損失流量と見なし得ることを明らかにしている。

第3章では、第2章で得られた成果に基づき、浸透領域を1層のみとして2次元の不飽和浸透理論に深層への浸透を認める境界条件を与え、流出量と損失流量を同時に推定することが可能な不飽和浸透モデルを提案している。ここで、新たに設定した境界条件は、観測雨量と流量を用いてタンクモデルやエントロピー法による損失流量と比較し、その妥当性を確認している。さらに、実用的な観点から、提案した不飽和浸透流モデルを集中化する手法を提示し、降雨量の損失機構を含む新しい貯留型の流出モデルを提案している。さらに、提案した流出モデルを北海道内の16河川流域に適用してその有効性を実証している。こ

ここで提案している貯留型流出モデルの全てのパラメータは、流域の地形・土壌特性より同定することができ、水文資料の入手できない流域でも利用可能であること示している。

第4章では、前章で提案した貯留型流出モデルを一般的な有効雨量の分離法の適用が困難な融雪流出解析・融雪流出予測に応用している。流出予測は長期予測と短期予測よりなっている。長期予測では週間天気予報情報を利用する手法を提案し、気温と天候の予測情報に基づいて、積雪の融雪に重要な要素である日射量を推定する手法を提案している。次に、提案した貯留型流出モデルにより融雪流出量の推定を行い、リードタイムが1日から1週間先までの融雪流出予測手法を提案している。著者の提案した長期融雪流出予測手法は、積雪面積率が50%を割る融雪後期では予測誤差が大きくなるものの融雪初期から融雪最盛期の発電ダムの運用に有用な情報を提供するものと思われる。後者の短期予測では、気温資料と流出量のみがリアルタイムに入手できるという条件の下で、システム方程式に提案した貯留型流出モデルの特性を組み入れたファジィ推論によるリードタイムが数時間までの融雪流出予測手法を提案し、流域の積雪量情報が十分に得られていない流域に適用できることを実流域で確認している。

第5章は結論であり、各章で得られた結果をまとめ、本論文を統括している。

これを要するに、筆者は、洪水流出解析においてこれまで概念的に扱われてきた損失量を短期的には流出量に直接関与しない深層への浸透量と見なすことにより、その特性を明らかにし、降雨量の損失機構を内蔵する実用的な貯留型の流出モデルを提案し、水文学の分野に貢献するところ大なるものがある。

よって筆者は、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。