

学位論文題名

Lumping Process Based on Unsaturated  
Infiltration Flow Theory

(不飽和浸透流理論の集中化に関する研究)

学位論文内容の要旨

本邦の山岳地のように植生に覆われ、山腹に空隙に富む表層土が発達している地域では、流域に降った雨は、表層土内に浸透して河道に流出している。この流出過程は不飽和浸透流理論で説明される。一方、この不飽和浸透流式を実際の流出解析に適用しようとする、独立変数が時間「 $T$ 」、山腹斜面方向の距離「 $X$ 」、鉛直方向の距離「 $Y$ 」の3個の独立変数を持つ不飽和浸透流式を考えても、地形に関するパラメータが3個、地質に関するパラメータが5個の合計8個のパラメータを与えなければ、降雨から流量を計算できない。さらに、流域内では地質が均一でないことを考慮すると、流域を数多くのサブ流域に分割して各サブ流域の流出量を合成して全流域の流量を求めなければならない。また、不飽和浸透流式は強い非線形方程式で数値計算法によってその解を求めなければならない、多大な計算時間を要する。このような理由で、物理的には山腹斜面での流出過程が不飽和浸透流理論で説明できることが知られていても、実際の流出解析にこの理論を直接応用することが困難であった。

本論文は、基礎不飽和浸透流式を「 $Y$ 」方向に積分し、さらに、「 $X$ 」に積分して不飽和浸透流式の特性を保存しながら独立変数の数を減らす、いわゆる、基礎式の集中化過程について述べたものである。さらに、本論文の成果は山腹斜面からの流出量を簡便に計算できるだけでなく、現在、全国的な規模で設置されている気象レーダから得られる降雨情報を用いた流出解析と結び付けることができる。気象レーダは面的な降雨情報を与えるので、必然的に流域を小さなサブ流域に分割して流出量を求め、これらのサブ流域からの流出を合成して流域全体の流量を計算せざるを得ない。当然のことであるが、サブ流域での流出モデルは、計算時間が短く、かつ、サブ流域の特性を表現できるモデルが要求されている。この意味で、本論文で得られた結果は、適切なサブ流域の流出モデルを提供しているものと考えられる。

本論文は、6章より構成されている。

第1章は、序論で研究の背景および目的を述べている。

第2章は、飽和・不飽和浸透流理論を実際の流出解析に利用する際の問題点を述べている。すなわち、これまでこの理論を用いた実際の流出計算に用いた場合、山腹斜面方向の飽和透水係数を鉛直方向のそれに比較して10~100倍程度にしないと観測流量に一致しないと言われている。この理由として地層の方向や地層内の動植物による山腹斜面方向の空隙などが挙げられている。いずれも定性的な説明であるので、不飽和浸透流の室内実験によってこれを確かめた。実験は、長さ5m、幅30cmの水路にけい砂を40cmの厚さに

敷きならし、水路の上に設置した降雨発生器より種々の降雨強度を与えた。水路末端で砂層からの流出量を測定するとともに、砂層内に合計21個のテンシオメータを埋設してサクションを計測した。また、別途に実験に用いたけい砂の土壌特性(飽和および不飽和透水係数、体積含水率～サクション)を求めている。サクションが水路末端の境界で急変しないという従来の境界条件式では、けい砂の土壌特性試験より得られた飽和透水係数を用いた計算では、観測された流量を説明できないことを確かめている。また、不飽和浸透流の室内実験結果であっても、水路方向の透水係数を10倍程度にしないと計算値と実験値が一致しないことを指摘している。実験結果より、水路末端における境界条件として新たに「水路方向の流量フラックスが急変しない」という条件を与えると上述の矛盾点を解決できることを示している。

第3章は、不飽和浸透流式の数値計算法について述べている。周知のように不飽和浸透流式は強い非線形方程式で、従来クランク・ニコルソンの繰返し計算法によって数値解が求められていた。この計算法では十分な精度の数値解を得られないことを指摘して、新たに改良した数値計算法を提案している。従来の手法に比較して、計算時間が短く、かつ、精度も良いことを示している。また、不飽和浸透流式には与えるパラメータ数が多く、以後の解析のための無次元浸透流式を提案している。これにより、従来、8個のパラメータを持っていた不飽和浸透流式が、4個のパラメータを持つ無次元方程式に変換された。

第4章は、不飽和浸透流の集中化過程を述べている。ここでは、浸透流層内の諸量の鉛直方向の平均値を用いることにより、不飽和浸透流式の独立変数を一つだけ減らしている。得られた不飽和浸透流式をセミ集中化不飽和浸透流と呼ぶことにする。この操作によって、計算される流量が集中化前の不飽和浸透流式で求められる流量とどの程度一致するかについて、3章で得られた4つのパラメータの組み合わせについて200ケースの数値計算例で検討した。この結果、4つのパラメータを関数とする補正係数を提案している。

第5章は、さらに、4章で得られたセミ集中化不飽和浸透流式を斜面方向に積分して、独立変数が時間だけの不飽和浸透流式を得ている。ここで得られた結果は、式の形が従来実流域で流出解析に用いられている貯留関数法と類似しているが、その内容は大きく異なっている。すなわち、従来の貯留関数法が過去の降雨量とその流出量を用いてパラメータ同定しているのに対して、流域の地形、地質特性が与えられるとパラメータを決定できる。

第6章は、論文の成果を要約している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 睦 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

## Lumping Process Based on Unsaturated Infiltration Flow Theory

(不飽和浸透流理論の集中化に関する研究)

近年の気象レーダの整備にともない分布型の流出モデルの開発が要請されている。すなわち、サブ流域の流出モデルに関して、サブ流域の地形・地質特性をモデル内に取り込むことができ、かつ、流出計算時間の短いモデル開発が求められている。流出モデル構築の際の上述の二つの要件は、分布型の流出モデルのみならず他の流出モデルでも必要な基本的な要件である。分布型流出モデルでは非常に多くのサブ流域からの流出量を計算しなければならず、よりこの二つの要件が強調されている。

一方、植生に覆われた山岳地ではその山腹に空隙に富む表層土が発達し、流域に降った雨は、表層土内に浸透して河道に流出している。この流出過程は理論的には不飽和浸透流理論で説明される。しかしこの不飽和浸透流式を実際の流出解析に適用しようとする、与えるべきパラメータの数が多く、かつ、流出計算に多大の時間を要して実用的な流出解析手法として難点があった。

本論文は、実用的なサブ流域の流出モデルの開発を目的にしている。上述の流出モデル構築の際の、基本的な要件の一つである「流域の地形・地質特性を評価できる」モデルとして「不飽和浸透流理論」に着目している。また、他の要件である「流出計算の短い」モデルに関しては、分布定数系の流出モデルを集中定数系の流出モデルに置換することにより、二つの要件を同時に満たす流出モデルを開発している。

本論文は、6章より構成されている。

第1章は、序論で研究の背景および目的を述べている。

第2章は、飽和・不飽和浸透流理論を実際の流出解析に利用する際の問題点を詳細に検討している。この結果、以下に示す二つの問題点を指摘している。

- (1) 山腹斜面末端における境界条件式
- (2) この理論を用いた実際の流出計算に用いた場合、山腹斜面方向の飽和透水係数を

鉛直方向のそれに比較して10～100倍程度にしないと観測流量に一致しないこと。

次に、これらの問題点を確かめるためにけい砂を用いた不飽和浸透流の室内実験を行っている。実験は、長さ5m、幅30cmの水路にけい砂を40cmの厚さに敷きならし、水路の上に設置した降雨発生器より種々の降雨強度を与えた。水路末端で砂層からの流出量を測定するとともに、砂層内に合計21個のテンシオメータを埋設してサクションを計測した。また、別途に実験に用いたけい砂の土壌特性(飽和および不飽和透水係数、体積含水率～サクション)を求めている。

実験結果より、上述の二つの問題点は独立したものではなく、新たな境界条件式「水路方向の流量フラックスが斜面末端で急変しない」を設定することにより同時に解決できることを示している。

第3章は、不飽和浸透流式の新たな数値計算法を提案している。基礎方程式を保存系にの差分方程式に書き換えることにより、計算精度を高め、かつ、計算時間を短縮できることを示している。

次に、今後の理論解析の基礎式となる無次元浸透流式を提案している。これにより、従来、8個のパラメータを持っていた不飽和浸透流式が、4個のパラメータを持つ無次元量で記述できることを示している。

第4章は、不飽和浸透流の集中化の手法を述べている。ここでは、浸透流層内の諸量の鉛直方向の平均値を用いることにより、不飽和浸透流式の独立変数を一つだけ減らした半集中化不飽和浸透流を提案している。また、元方程式と新たに提案している半集中化不飽和浸透流式から得られる流出量の誤差について検討を加えている。3章で得られた4つの無次元量を関数とする補正係数を提案し、その効果を確かめている。

第5章は、4章で得られた半集中化不飽和浸透流式より集中定数系流出モデルとしての不飽和浸透流式を誘導している。この結果、従来より実流域で流出解析に用いられている貯留関数法の貯留係数、貯留指数の物理的な意義を明らかにしている。

第6章は、論文の成果を要約している。

これを要するに、著者は、山岳地域の流出に関して不飽和浸透流理論に基づく実用的流出モデルを提案したものであり、水文学に対して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あるものと認める。