

博士(工学) 早川 博

学位論文題名

流域の地形構造を考慮した降雨流出系の確率応答と流域
スケールに関する研究

学位論文内容の要旨

流域の降雨一流出現象は、入力である降雨の時間的・空間的変動と、降雨を流量に変換する場である流域の地形や地質、植生等の場の特性量の空間的変動に強く支配される現象である。近年、水文観測も技術革新が進み、建設省のレーダー雨量計は全国を網羅し、その情報が容易に入手できる状況にある。また、流域に関する情報も国土数値情報などの地理情報システムの整備と衛星リモートセンシング技術の進歩に伴い、詳細な情報が入手可能である。したがって、流出解析においても、このような情報を有効に利用するためには、分布型流出モデルが望まれている。

分布型流出モデルは、流域の降雨や場の特性量の空間変動に対応して流域を分割し、解析するモデルである。ここで従来から問題になってきたのが、「どの程度の流域サイズまで流域を分割して解析すべきなのか」、「その判断基準は何か」、ということが未解決の問題として残されていた。したがって、本研究では分布型流出モデルにおける最適な流域スケールを解明することを最終的な目的においている。

流域スケールを考える上で、降雨の受け皿である流域の地質条件や植生等の特性量の空間スケールが判断基準の一つになる。流域はマクロ的にみると支流単位で流域の特性が異なり、支流域をミクロ的にみるとことによって、流域の特性量が均質(homogeneous)と考えられる空間スケールが見えて来る。流出モデルは流域の場の特性が均質であることが望まれているので、この空間スケールが流域スケールの候補の一つになる。

流出の入力である降雨も、雨域の大きさやその移動速度、降雨強度などの空間スケールと降雨強度の時間的な変動である時間スケールが、流域スケールを考える上で重要な要因である。流出解析の前提として、降雨は流域一様であることを仮定することが多く、分布型流出モデルのサブ流域は少なくともこの降雨の空間スケールより小さくなる。

また、流域を構成しているサブ流域の大きさは、一般にその流域の河道網の粗密さと相反する関係にある。つまり、サブ流域のサイズが大きくなると河道網構造は粗になり、逆にサイズが小さくなると河道網構造は複雑になる。流出現象と対比させて考えると、サブ流域における降雨から流量への変換過程と、河道網による集水・合成過程のバランスが判断のキーポイントになる。従来の流域スケールに関する多くの研究は、流域を降雨一流出変換系システムとみなした場合、時間領域において流出現象を捉えたものである。これに対し、本研究は降雨の時間変動に対する流出の応答を、これまでの流出解析であまり扱われることのなかった周波数領域での流出応答に着目している。流域は降雨の高周波の変動成分を除去して低周波の成分だけを通す低域フィルターと考えられるので、本研究はこの流域システムの周波数応答特性からみた流域スケールを検討している。

本論文は、5章から構成されている。以下に各章の概要を説明する。

第1章は本研究の背景、目的と構成について述べている。

第2章では、リンクーマグニチュード方式の河道網理論を導入して、個々の流域、あるいは

は縮尺によって異なる流域地形構造を定量化している。まず、数値標高データを用いて擬似的な河道網を作成し、その河道網の地形量解析を行うまでの解析手法を示している。擬河道網は地形図と異なり、任意の縮尺の河道網を解析できるという利点がある。本章では、擬河道網の問題点を指摘し、改良した擬河道網作成手法を提案している。次に、この擬河道網の地形量解析から、流域地形量の確率分布特性を明らかにし、流出現象に重要であるサブ流域の流域面積とリンク長、サブ流域から流域末端までの流路長の確率構造を定量化している。最後に、流域の集水過程を担う河道網構造の定量化のため、流出解析に有用な河道網構造の確率関数が提案されている。したがって、河道網理論の利点は、個々の流域の地形構造を逐一計測することなしに、流域スケールの変化に対する流域地形量を推定できることにあり、流域地形構造の一般的な特性の議論が可能である。

第3章では、第2章で定量化した流域地形構造の流出解析への適用である。流域地形量の確率変動特性が流出現象に与える影響を評価するため、降雨-流出変換系のシステム方程式である流出モデルの流出パラメータが、確率変動する場合の流出量の確率応答特性を理論的に導く手法を示している。まず、降雨を変換する場であるサブ流域の地形量が確率変動する場合のサブ流域からの流出量の確率応答を導いている。具体的には、星の貯留関数法を流出モデルに採用し、貯留係数が確率変動する場合の流出量の4次モーメントまでの確率統計量を理論的に誘導している。次に河道網パターンが確率変動する場合の流域末端での流出量の確率変動を理論的に誘導し、降雨流出現象における流域の地形構造の違いの影響を定量的に評価している。

第4章では、降雨一流出現象における流域スケールと流出特性に関して検討している。流出解析で問題となる流出モデルの最適な流域スケールを与える基準として、流域と降雨の場の特性から規定される流域スケールを最初に検討している。すなわち、降雨の受け皿である流域の場の特性量のスケール、例えば地質や地形が均質であるとみなすことのできる流域のサイズを国土数値情報から導き、次に、入力である降雨が定常でかつ一様である空間スケールをレーダー雨量計の観測データから導いている。一方、流域は降雨を流出量に変換するブラックボックス的なシステムとも考えられるので、流域地形量が確率変動する流域システムの周波数応答特性を求める手法を示し、流域を低域フィルターとみなして流域スケールとの関係を明らかにしている。更に、この手法を実流域に適用し、その結果から降雨流出システムに望まれる流域スケールを判断する考え方を示している。

流出モデルの最適な流域サイズは流域の場の特性からは約 $5(\text{km}^2)$ 、降雨の雨域特性から流域サイズの上限が約 $35(\text{km}^2)$ 、流域システムの周波数応答特性から得られた流域サイズは1時間降雨データを用いた場合、約 $6(\text{km}^2)$ であった。したがって、分布型流出モデルの最適な流域サイズは、流域場あるいは周波数応答特性から判断された $5 \sim 6 (\text{km}^2)$ になる。

第5章は各章の結論をまとめたものである。

以上、本研究では従来から課題として残されていた分布型流出モデルの最適な流域スケールの判断基準として、新たに降雨流出変換系システムの周波数応答特性による方法を提案している。すなわち、流域末端の流出量は連続する3つのフィルターからの出力と考えられる。一つは降雨の離散化によるフィルターであり、残り二つは流域のサブ流域によるフィルターと河道網によるフィルターである。流域末端の流出量はこの3つのフィルターのバランスによって決定されることが示された。したがって、河道網理論を適用することによって、本研究は分布型流出モデルにおける一般的な流域スケールの指針を与えるものである。

学位論文審査の要旨

主査 教授 藤田 瞳 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

流域の地形構造を考慮した降雨流出系の確率応答と流域スケールに関する研究

近年、建設省のレーダー雨量計、国土数値情報などの地理情報システムの整備、あるいは、衛星リモートセンシング技術の進歩に伴い、詳細な降雨量、地形・地質情報が入手可能になってきている。これに伴い、このような情報を有効に利用できる分布型流出モデルの開発が望まれている。分布型流出モデルでは、スケール問題とその判断基準が未解決の問題として残されている。本論文は、これらの未解決の問題を考察している。

本論文は、5章から構成されている。

第1章は、本研究の背景と目的と構成について述べている。

第2章では、リンクマグニチュード方式に基づく河道網理論を導入し、河道網の連結構造を確率論的に解析している。先ず、従来の数値標高データを用いる擬河道網作成法の問題点を指摘し、新たに改良した擬河道網作成手法を提案している。次に、この擬河道網の地形量解析から流域地形量の確率分布特性を明らかにし、分布型流出モデルで重要なサブ流域の面積、リンク長、更に、サブ流域から流域末端までの河道長の確率構造を明らかにしている。

第3章では、第2章で定量化した流域地形構造を流出解析へ適用するための手法を検討している。流域地形量を考量した流出モデルは分布定数系のモデルにならざるを得ないが、実用的な観点からは集中定数系の流出モデルが適当であることを指摘し、分布定数型の流出モデルを集中化した2次の貯留型モデルを利用する手法を提案している。流域の地形に関する特性量が貯留係数を介して基礎式に導入でき、地形特性量が確率変数として与えられると基礎式は確率微分方程式となることを指摘し、流出量の1～4次モーメントを理論的に誘導している。更に、河道網パターンが確率的に変動する場合について流域末端での流出量の確率応答を理論的に誘導し、降雨流出現象における流域の地形構造の違いの影響を定量的に評価している。

第4章では、降雨場と流域場が均一と見なせる空間スケールについて検討している。降雨場の空間スケールに関しては、北海道開発局の道東レーダー雨量計(PPIレーダ)の計測データを解析し、平均降雨強度、降雨の継続時間および降雨の波形数の3つの特性量がほぼ均一と見なせる空間スケールは、 35 km^2 程度であることを指摘している。更に、流域場に関しては国土数

値情報を用いて解析している。北海道内の20流域を対象に、地形に関しては15分類、表層地質に関しては11分類して地形・地質がほぼ均一と見なせるスケールが、 $5\sim6\text{km}^2$ であることを見いだしている。以上の結果を総合して、サブ流域の最大の面積スケールは、 $5\sim6\text{km}^2$ 程度であることを指摘している。次に、サブ流域は降雨量を流量に変換する場であり、河道はサブ流域からの流出量を合成・運搬する場で、これら2つの場はいずれも低域フィルターとしての特性を有していることに着目し、非線形系までも拡張したゲイン特性を求めている。線形系のゲイン特性とは異なり、入力である降雨強度がゲイン特性に影響することを理論的に明らかにしている。第2章で得られたサブ流域場と河道場の確率特性を考慮して、2つの場の平均ゲイン特性を等値することによって、解析の対象とする流域面積が与えられたときサブ流域の平均面積を推定する手法を提案している。この手法を実流域に適用して良好な結果を得ている。

第5章は、本論文で得られた結論をまとめている。

以上のように本論文は、分布型の流出モデルの構築に関して多くの新知見を得ており、水文学の進歩に寄与するところ大である。

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。