博士（工 学） 田 中 岳

学 位 論 文 題 名

降雨流出系の周波数応答特性と確率応答特性に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

1章では，本研究が行われた背景と研究目的について述べている．周知のように，流出モデルは，分布型定数系モデルと集中型定数系モデルとに大別される．これまでに，分布型定数系モデルのKinematic Waveモデルや不飽和浸透流式を集中化して，いくつかの貯留型流出モデルが提案され，貯留高と流出高の関係を表す貯留方程式の評価法が新たな問題となってきた．これまでの評価法には，基礎式とした分布型定数系モデルと集中化して得られた貯留型流出モデルに対し，

(A) 降雨量を決定論的関数として計算された流出量を比較して，その適合度を判定する手法

(B) 降雨量を確率過程として流出量の二乗平均誤差まで比較して，その適合度を判定する手法

がある．評価法(B)において平均降雨量に対して平均流出量を考えると，評価法(A)と同等な意味を持つ．これらの評価法を一般化することが，本論文の目的の一つである．流出モデルには，Kinematic Waveモデルと，これを集中化して得られる貯留型流出モデル(モデルF, モデルP, モデルH)を採用した．

2章では，降雨量の基本的特性について述べている．流出モデルの入力である(連続的)降雨量$r(t)$の特性は，推定された流出量$q(t)$(流出高$q_h(t)$)の特性に影響を与える．(連続的)降雨量$r(t)$を確率変数とし，流出量(流出高)の確率特性(1~4次モーメント)を推定するためには，$r(t)$の2~4次のキュームラント関数が必要となる．通常，入手可能な降雨量データとは，(連続的)降雨量$r(t)$を離散化して得られる(観測)降雨量$r_{d,i}$((離散的)降雨量$r_d(t)$)を意味する．そこで，洪水を引き起こすような実際の(観測)降雨量$r_{d,i}$((離散的)降雨量$r_d(t)$)の特性に基づいて，(連続的)降雨量$r(t)$の2~4次のキュームラント関数を推定した．推定されたキュームラント関数の妥当性については，4章で検討している．

3章では，1章で述べた評価法(A)の欠点を補正するため，線形物理システムに適用される周波数応答法を非線形流出システムに応用し，流出モデルのゲイン特性を与える理論式を導出している．各流出モデルのゲイン特性が得られたので，降雨波形に依存せずに流出量の適合度を判定できる．斜面流出にManning型の表面流($p=p_1=0.6$)を適用する場合，モデルHのゲイン特性が，Kinematic Waveモデルのそれに最も類似していることが

明らかとなった．さらに，計算流出量の特性に影響を与える(観測)降雨量$r_{d,i}$((離散的)降雨量$r_d(t)$)の時間間隔Δtを定量的に評価する手法を提案するため，拡張された周波数応答法を用いて，(連続的)降雨量$r(t)$の離散化過程および全システム(離散化過程と流出モデルからなる直列低域フィルター)のゲイン特性を示す領域を与えた．

3章で与えた各流出モデルのゲイン特性は，降雨量が定常確率過程の場合にも流出量$q(t)$(流出高$q_h(t)$)の特性(分散)を評価することができる．しかし，非定常性や持続性を持った降雨量に対しては，流出量(流出高)の確率特性を十分に評価(確率密度関数の推定)できない．4,5章では，降雨量の確率特性が既知の条件(下記の(i),(ii))のもと，降雨流出系の確率応答特性について検討した．これは，時間の関数として流出量(流出高)の1~4次モーメントを導出し，確率密度関数の推定を可能とするもので，評価法(B)をさらに一般化したものでもある．

(i)　降雨量が互いに独立な確率変数の場合(ρ=0)

(ii)　降雨量が互いに従属する確率変数の場合($\rho \neq 0$)

4章では，線形流出系($p=p_1=p_2=1$)について，時間変化する流出量$q(t)$(流出高$q_h(t)$)の確率特性(1~4次モーメント)を理論的に与えた．さらに，降雨量をランダム・ステップ関数$r_d(t)$として計算流出量(流出高)の確率特性を求め，流出量(流出高)の確率特性と比較することで，(観測)降雨量$r_{d,i}$の持続性を考慮して推定された(連続的)降雨量$r(t)$の2~4次のキュームラント関数(2章)の妥当性が示された．また，(観測)降雨量$r_{d,i}$の相関係数ρの値が，流出量(流出高)の2~4次モーメントに影響を与えることを理論的に示した．

5章では，確率応答法を実流域に適用することを踏まえ，非線形流出系を用いて，時間変化する流出量$q(t)$(流出高$q_h(t)$)の1~4次モーメントを与える理論式を導出した．(i)の場合($\rho \neq 0$)に推定された流出量(流出高)の確率特性は，$\rho \to 0$とすることで，(ii)の場合(ρ=0)に推定された確率特性と一致する．また，$p=p_1=p_2=1$とすることで，線形流出系を用いて推定された確率特性をも与える．つまり，5章で導出した理論式は，(観測)降雨量$r_{d,i}$の時間的な独立性・持続性に関わらず，また，流出系の線形性・非線形性に関わらず，適用範囲の広い理論式を提案したことになる．4章と同様に，(観測)降雨量$r_{d,i}$の分散が一定でも，(観測)降雨量$r_{d,i}$の持続性の評価(相関係数ρの値)によって，流出量(流出高)の確率特性が異なることが明らかとなった．さらに，平均降雨量が，流出量(流出高)の2~4次モーメントに関与していることが示された．流出量(流出高)の1~4次モーメントが得られると，確率分布の推定と確率密度関数のパラメータの決定，および推定された流出量(流出高)の信頼区間の算定が可能となる．三角形降雨波形入力のもと，平均流出量のピーク時刻での確率分布は，ガンマ分布もしくは対数正規分布となることが示された．降雨量の確率特性が与えられると，流出量(流出高)の確率特性が推定できるため，本論文が，洪水防御計画の基本となる計画流量の算定にも寄与できるものと考えられる．

6章は，本論文のまとめを述べている．

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

降雨流出系の周波数応答特性と確率応答特性に関する基礎的研究

山地流域を対象とした降雨～流出モデルは、分布定数系モデルと集中定数系モデルに大別できる。歴史的に見るならば、これらのモデルは、それぞれ独立に開発されてきた。1980年代になると、分布定数系モデルの集中化に関する研究が進み、分布定数系モデルと集中定数系モデルの対応関係が明らかになった。一方、集中化手法の差異によって数多くの貯留型の流出モデルが提案され、流出モデルの評価法に関する研究が必要になった。すなわち、実流域における流出解析計算では、計算の容易な集中定数系の流出モデルが採用される場合が多く、流域特性に対応した貯留型流出モデルを採用する必要があったからである。従来の評価法の多くは、決定論的な手法に基づいてなされており、また、確率論的な手法を採用している場合でも、降雨量の非定常性や持続性を無視した簡易な方法が採られていた。本研究は、流出モデルの評価法の一般化を目的に、その周波数特性と確率応答特性に着目し、非線形流出系にまで適用できるゲイン特性と降雨量の非定常性や持続性をも考量した流出量の確率密度関数を求める手法を提案している。

本論文は、6章より構成されている。

第1章は、序論で研究の背景と研究目的を論じている。

第2章は、降雨量の離散化過程について論じている。すなわち、観測降雨量は、時間的に連続関数と定義される実降雨量を特定の平均化時間Δt毎に離散化された量であり、平均化時間Δtが1時間以内の観測雨量の平均値からの偏差が、1次の自己回帰過程で近似できることを示している。次いで、降雨量の離散化過程を表す積分方程式を解いて、実降雨量である時間的に連続降雨量の2～4次のキュームラント関数を理論的に得ている。

第3章は、各種の流出モデルの周波数応答を求める手法を提案している。周波数応答法は、本来、線形系を対象に開発された手法であるが、ここでは、非線形流出モデルにまで拡張できることを示し、「等価周波数応答法」を提案している。これは、制御系における記述関数を用いた等価伝達関数の概

念を流出系に初めて適用したものである。分布定数系流出モデルとしてKinematic Wave モデルを採用し、このモデルを集中化して得られた代表的な3種類の貯留型流出モデルのゲイン特性を比較し、流出モデルを評価する手法を示している。この結果、流出特性、特に、流出系の非線形性の程度を表す貯留型流出モデルでは貯留指数、kinematic wave モデルでは、kinematic wave 定数によってゲイン特性が異なることを明らかにしている。

第4章は、第2章で得られた降雨量の平均値及び2～4のキュームラント関数を用いて、線形流出系を対象に流出量の1～4次モーメントを求めるための理論式を提案している。また、得られた流出量の1～4次モーメントよりその確率密度関数を得る手法を検討している。さらに、降雨量をランダムステップ関数とした流出系のシミュレーションで、流出量の2～4次モーメントに降雨量の平均化時間毎に波状特性が生じることを理論的に明らかにしている。

第5章は、第4章の理論を非線形系にまで拡張したものである。kinematic waveモデルでは、平均降雨量の到達時間時に2～4次モーメントが最大値をとり、到達時間の概念が確率応答にも重要な概念であること示している。貯留型流出モデルでは、本来、到達時間の概念が含まれていないが、kinematic waveモデルを集中化して得られた3種類の貯留型流出モデルでも同時刻に2～4次モーメントが最大値をとること明らかにしている。また、降雨量の持続性に関して、この分散を一定のもとに自己回帰係数を変化させると、回帰係数の増加とともに流出量の2～4次モーメントが増加し、降雨量の持続性が流出量の確率応答に極めて重要な要素であること示している。また、流出モデルの非線形性のパラメータである貯留指数の減少やkinematic wave定数が増加(非線形性が増加)すると、流出量の2～4次モーメントが増加することを明らかにしている。さらに、平均降雨量の大小およびその波形が、流出量の2～4次モーメントの大きさとその形状に強く影響すること明らかにしている。最後に，平均流出量が最大になる時刻のその確率密度関数は、ガンマ分布ないし対数正規分布で近似できることを示し，従来、経験的に得られていたピーク流量の確率分布を理論的に説明している。

第6章は、各章の結論をまとめている。

これを要するに、著者は、山地流域の流出解析について多くの新知見を得たものであり、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。