

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04360

研究課題名（和文）降雨流出系の確率応答解析に立脚した洪水予測システムの合理的な構築方法に関する研究

研究課題名（英文）Rational construction method of flood forecasting system based on stochastic response of rainfall-runoff system

研究代表者

田中 岳（Tanaka, Gaku）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：90333632

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、洪水予測システムとして貯留型流出モデルを採用し、降雨強度、モデルパラメータ、初期流出高を既知の確率変数として、時間変化する流出高の確率特性を理論的に推定可能な微分方程式を提案し、その妥当性をシミュレーション法に基づき示した。その結果として、流域面積に関わるパラメータの分散が洪水の到達時間近傍で、また、降雨強度の分散はその値に比例する形で、それぞれ流出高の分散を変化させることが示された。今後実施予定の物理的なシステムの確率応答解析の結果と本研究結果との比較を通して、貯留型流出モデルが適用可能な流域面積など、流出モデルの集中化の妥当性を評価、議論することが可能になると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

河川整備が行き届かない地方では、財政、人材の課題から利便性を第一に洪水予測システムに流出現象を概念的に記述した集中型のモデルが組み込まれる傾向にある。この集中型のモデルには適用可能な流域面積やモデルパラメータの物理的意味付けなど、未解決の基礎的な問題が含まれている。本研究の成果として得られた貯留型流出モデル（集中型のモデル）の確率特性は、今後実施予定の物理的なモデルの確率応答解析の結果との比較を通して、上記の問題解決を可能にするものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Using the storage function runoff model as a flood forecasting system, we proposed a differential equation that can theoretically estimate the stochastic characteristics of discharge with rainfall intensity, two model parameters, and initial discharge as known random variables, and showed its validity based on simulation methods. The results show that the variance of parameters related to watershed area affects the variance of discharge around the flood arrival time, and the variance of rainfall intensity affects the variance of discharge in proportion to its value. The stochastic properties of the runoff model obtained in this study, through comparison with the results of stochastic response analysis of the physical model, lead to the solution of problems related to the lumping process of the runoff model.

研究分野：水工学

キーワード：流出モデル 確率応答 集中化

1. 研究開始当初の背景

洪水被害は河川整備が行き届かない地方で拡大しているが、その地方では主として、財政、人材確保の課題から利便性を第一に洪水予測システムを選択せざるを得ない状況にある。このため、現業のシステムには流出現象を概念的に記述した集中型のモデル(貯留型流出モデル)が組み込まれる傾向にある。然しながら、概念モデルには、これを適用できる流域面積や、モデルのパラメータの物理的意味付けなど、未だ解明されていない基礎的な問題を抱えている。

これまでに、降雨量の予測値から流出量を推定する様々な洪水予測システムが提案されてきた。それらは、以下のように大別される。

- A) 流域を斜面と河道網に分割し、その各々に分布型の物理モデルを採用
- B) 流域をサブ流域と河道網に分割し、サブ流域に集中型の概念モデル、河道流れに物理モデルを用いて流出現象を記述
- C) システム B と同様に流域をサブ流域と河道網に分割しているが、サブ流域にも河道流れにも概念モデルを用いて流出現象を記述
- D) 一つ概念モデルを用いて流域全体の流出現象を記述

なお、サブ流域とは二斜面一河道から成る単位流域が複数配置され、それらが河道網によって連結された流域のことである。これらのシステムの特徴を概括すると、流出特性の解釈としては、A から D の順に物理的から概念的なものになる。また同時に、流出量の推定にかかる計算コストも低減される。このような特徴は、河川管理の実際において、B、C や D の洪水予測システムが採用されることに繋がっている。しかしこの場合、上記のように、どのような流域面積に対して、どのような概念モデルを採用すべきかと言った、流出モデルの集中化とその妥当性の評価に関わる未解決の基礎的な問題が含まれている。

流出モデルの集中化とは、物理モデルの基礎式を空間方向に積分し、概念モデルを導出することである。例えば、星ら①は Kinematic Wave モデルから、また高木ら②は飽和不飽和浸透流モデルから、異なるタイプの貯留方程式(概念モデル)を得ている。この集中化の過程は、決定論的に表された同一の降雨量の平均値を条件に、異なる流出量の平均値(1次モーメント)が求まると言う形で、確率論的にも解釈できる。この立場を取ると、集中化の妥当性は流出量の平均値に基づく評価となる。高棹ら③は、これをモンテカルロ・シミュレーションから推定される流出量の分散値(2次モーメント)の比較にまで発展させ、更に応募者らは、降雨量を確率論的に定式化した上で流出量の確率特性(1~4次モーメント)とその確率密度関数を推定し、それらに基づき集中化の妥当性を評価する方法を提案した。これは、高棹ら③の成果を一般化した方法(図-1)と言える。

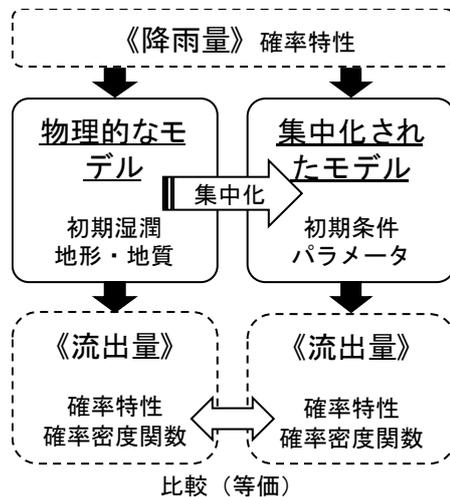


図-1 物理モデルと概念モデルの比較

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景を踏まえ、概念モデルの適用に関わる未解決問題を明らかにするとともに、地方の中小河川流域を対象として降雨流出系の不確実性が流出予測に与える影響も定量化ができる洪水予測システムを開発するための研究基盤を確立させる。これは、背景で述べた実務面での利便性が高い B、C や D の洪水予測システムの妥当性を流出モデルの確率応答解析に基づき評価し、合理的にシステムを決定することにも繋がる。

3. 研究の方法

一般に降雨量は確率的に変動するため、流出現象は本質的には確率過程に属することになる。降雨量その他、地形・地質特性、初期の湿潤状態にも不確実性があり、これらもまた確率変数とみなされる。実現象としては、これら全てを確率変数として、それらが、背景で述べた A の洪水予測システム(物理モデル)を伝播することになる。また、このシステム A を集中化した B、C や D では、上記の確率変数の特性がモデル・パラメータに集約され、これを介して流出量の確率特性に反映される。本研究では、はじめに、システム D (システム A の比較対象)の確率特性を理論的に導くことを目指すこととした。なお、その結果として構築される洪水予測システムは、システム構成の理論的枠組みが明白であるため、実際の洪水予測業務に携わる河川管理者が負う流域住民への説明責任や、予測業務そのものに含まれた課題の解決の面で、高い利便性をもつものと考えられる。

(1) 洪水予測システム

貯留型流出モデル(システム D)には、貯留高 s と流出高 q の関係を記述する貯留方程式の違いから、幾つかのタイプがある。本研究では、貯留高 s と流出高 q の二価性の実際を良く表現す

ると考えられる星ら①のモデルを採用する(式(1):連続式;式(2):貯留方程式. r : 降雨強度; k_1, k_2, p_1, p_2 : モデル・パラメータ).

$$ds/dt + q = r \quad (1)$$

$$s = k_1 q^{p_1} + k_2 (dq^{p_2}/dt) \quad (2)$$

(2) 流出モデルの確率応答特性(流出高の確率特性)の推定
 前述のように, 降雨量その他, 地形・地質特性, 初期の湿潤状態にも不確実性があるため, これらもまた確率変数とみなされる. 本研究では, (1)で述べた洪水予測システム D (貯留型流出モデル)の降雨強度(降雨量), 地形・地質特性に関わるモデル・パラメータ k_1 と k_2 , 初期の湿潤状態の影響を受ける初期流出高, これら全てを確率変数として, 流出モデルからの流出高の確率特性を理論的に推定する. ここでは, 上記の式(1)と式(2)から貯留高 s を消去した後, 各確率変数を平均値とそれからの偏差(例えば, パラメータ k_1 は平均値 \bar{k}_1 と偏差 \bar{k}_1 との和)で表し, 更に指数型(q^{p_1} と q^{p_2})の確率変数に Bras ら④の近似式を用いて, 各確率変数が互いに独立な条件の下で期待値演算を行う. その結果として, 流出高 q の確率特性, ここではその平均値 \bar{q} や分散値 μ_{q_2} (2次モーメント)の時間変化を求めるための微分方程式が導出される. なお, 図-2は, 上記の式(1)と式(2)を, 直接, モンテカルロ・シミュレーションで求めた流出高の確率特性(黒色)と, 本研究で提案した微分方程式の解(赤色)を, 複数の計算条件(パラメータ k_1 を平均値 \bar{k}_1 とその変動係数 C_{k_1} を変化)で比較したものである. 両者の良好な一致が示すように, 提案式の妥当性が示されたといえる(その詳細については, 後日, 学会誌等にて公表を予定している).

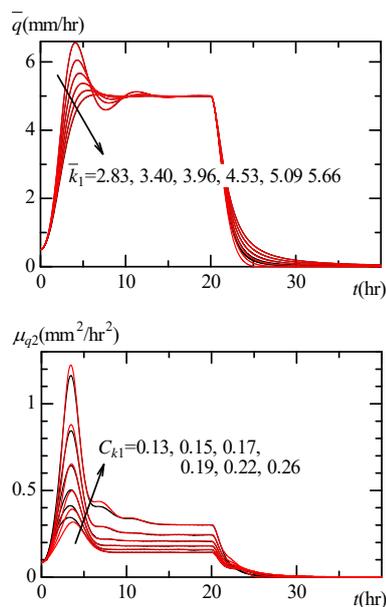


図-2 シミュレーション結果との比較
 上図: 流出高の平均値; 下図: 流出高の分散値. 赤色: 提案式; 黒色: シミュレーション結果

4. 研究成果

図-3の a)はパラメータ k_1 の分散 μ_{k_1} , 同 b)はパラメータ k_2 の分散 μ_{k_2} , また同 c)は降雨強度 r の分散 μ_{r_2} が, 流出高 q の分散 μ_{q_2} に与える影響を示している. パラメータ k_1 の確率特性は洪水の到達時間近傍で, また, 降雨強度 r の確率特性はその値(分散 μ_{r_2})に比例する形で, それぞれ流出高 q の分散 μ_{q_2} を変化させる. その一方で, パラメータ k_2 の確率特性の流出高 q の分散 μ_{q_2} の時間変化に与える影響範囲は限定される. これは, 貯留方程式(式(2))に示されるように, 流出高 q の時間変化量(dq^{p_2}/dt)に, パラメータ k_2 が寄与するためと考えられる.

本研究では, 洪水予測システム D として貯留型流出モデルを採用し, 降雨強度, モデル・パラメータ k_1 と k_2 , 初期流出高を確率変数として, 流出高の時間変化する確率特性を理論的に推定する方法を提案した. 然しながら, システム A や B, C と言った, より物理的なシステムの確率応答解析はこれからである. 今後は, それらを実施し, その結果と本研究成果との比較を通して, 集中化する際の流域面積に関する制限を検討する予定である.

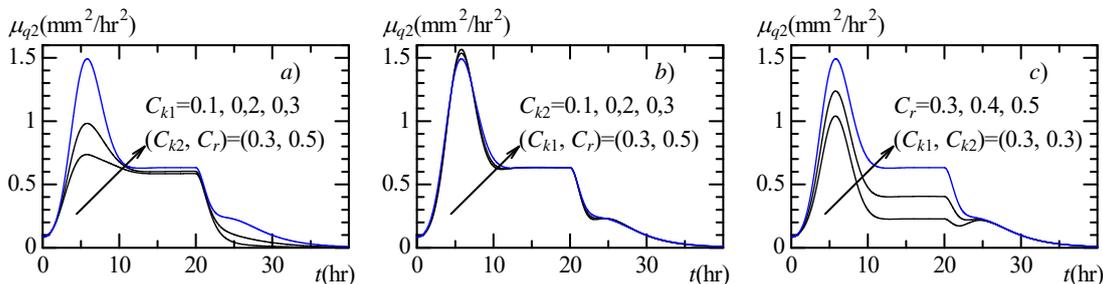


図-3 流出高の分散の特性

a) k_1 の変動係数 C_{k_1} の影響; b) k_2 の変動係数 C_{k_2} の影響; c) r (降雨強度)の変動係数 C_r の影響

<引用文献>

- ① 星清, 山岡勲: 雨水流法と貯留関数法との相互関係, 第26回水理講演会論文報告集, pp. 273-278 (1982)
- ② 高木不折, 松林宇一郎: 流域内での流出特性の平均化過程と流出モデル, 土木学会論文報告集, 第312号, pp. 73-81 (1981)
- ③ 高棹琢馬, 宝馨, 楠橋康広: 洪水流出モデルの確率過程の評価に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第28号 B-2, pp. 221-235 (1985)
- ④ Bras, R. L. and Georgakakos, K. P.: Real Time Nonlinear Filtering Techniques in Streamflow Forecasting -A Statistical Linearization Approach-, Third International Symposium on Stochastic Hydraulics, pp. 95-105 (1980)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中澤博登, 田中岳
2. 発表標題 拡散方程式の逆解析に関する基礎的研究
3. 学会等名 令和4年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------