

降雨の空間分布が集中型流出モデルのパラメータに与える影響

Study on Impact of Spatial Distribution of Rainfall Intensity on Parameters of Lumped Rainfall-Runoff Model

刈谷成希*・工藤亮治*・近森秀高*

*岡山大学環境生命科学研究所 (〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1)

KARIYA Shigeki*, KUDO Ryoji*, CHIKAMORI Hidetaka*

*Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University
(3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama, 700-8530)

Abstract

The uncertainty in real-time flood forecasting system by using hydrological models are caused by 1) forecasted rainfall as an input to the models, 2) hydrological model structure, 3) setting model parameters, and 4) initial conditions of forecasting model. In this study, we examined the influence on parameter setting for a lumped rainfall-runoff model caused by the differences in the characteristics of spatial distribution of rainfall intensity. First, synthetic rainfall events that have the same mean areal rainfall but different spatial concentration of rainfall intensity were generated base on radar rainfall data. The generated rainfall data, then, were input to a distributed rainfall-runoff model to investigate the changes of flood peak discharges due to differences in spatial variability of rainfall. In addition, in order to examine the changes in parameters of a lumped rainfall-runoff model, we calibrated the parameters of a lumped model to the synthetic flood events generated through input the synthetic rainfall data to distributed runoff model. Our simulations showed that the larger flood peak discharges occurred with spatial concentration of rainfall being stronger, and that the parameters of the model changed depending on the spatial concentration of rainfall intensity. The results in this study implies that since spatial distribution of rainfall has significant influence on the calibration, parameter setting in consideration of rainfall characteristic is necessary to develop more robust flood forecasting system.

Key words: parameter uncertainty of hydrological models, spatial distribution of rainfall, synthetic rainfall, distributed hydrological model, lumped hydrological model

要 旨

本研究では、流域平均降雨量は変えずに降雨強度の空間分布のみが異なる複数ケースの模擬降雨を作成し、これを分布型流出モデルに入力することで降雨の空間分布が洪水ピーク流量に与える影響を分析した。また、分布型モデルより算出された計算値を模擬洪水と見なし、これを対象に集中型流出モデルのパラメータ同定することで降雨の空間的集中度の違いが集中型モデルのパラメータに与える影響を分析した。その結果、流域平均降雨量が同じでも局地的に強い降雨が発生しているケースほど、ピーク流量が増加することを示した。また、降雨の空間的集中度の違いに応じて集中型モデルのパラメータ値が変化することを示した。このことから、集中型流出モデルのパラメータを同定する際は、降雨の空間分布などの特性を考慮することが必要と考えられる。

キーワード: 水文モデルのパラメータの不確実性, 降雨の空間分布, 模擬降雨, 分布型流出モデル, 集中型流出モデル

1. はじめに

水文モデルによる流出予測精度に影響を及ぼす不確実性の発生要因には、1) 水文モデルへの入力である気象予報値(降雨予測値)、2) 水文モデルの構造、3) 水文モデルのパラメータの設定、4) 予測開始時点のモデルの初期条件などが挙げられ(佐山ら, 2005)、予測精度の向上にはこれらの不確実性の特性を明らかにする必要がある。これまで、モデル構造による流出予測の不確実性に関しては集中型流出

モデル，分布型流出モデルの両者でいくつかの研究があるが（佐山ら，2005；安達ら，2006 など），本研究では集中型モデルのパラメータ設定の不確実性に着目した．集中型モデルは構築が容易で計算負荷も小さいため実時間流出予測という観点では実用上有用なモデルと考えられるが，予測システムの構築という点では出水ごとにパラメータが変動するという問題があり，流域固有のパラメータの設定に課題が残されている．

集中型モデルのパラメータが出水ごとに変動する理由の一つとして，本研究ではモデルへの入力となる降雨データの影響，特に降雨の空間分布に着目し，この降雨の空間分布が集中型モデルのパラメータに与える影響について検討した．

2. 対象流域および解析資料

対象流域は，岡山三大河川の一つである吉井川水系の上流部に位置する吉田ダム流域（流域面積 217.4 km²）である（Fig. 1）．流域の大部分は山地であり，標高は 210～1,250 m の範囲である．

対象出水は，2006 から 2018 年に吉田ダムで観測されたピーク比流量 1.0 m³s⁻¹km² 以上の出水から，降雨強度の空間分布のばらつきが大きい 3 出水を対象とした（Table 1）．

解析資料には同出水期間中の時間単位のダム流入量およびレーダーアメダス解析雨量（空間解像度 1 km. 以下，レーダー雨量）を用いた．前者は国土交通省が公開している水文水質データベースから，後者は気象庁から入手した．また，流域内の標高データには国土数値情報が提供している標準 3 次メッシュ（およそ 1 km×1 km）を用いた．

3. 解析の概要と方法

3.1 解析目的および概要

集中型流出モデルは対象流域を一つの単位として流出計算を行うため，入力には流域平均降雨量となる．しかし，実際の大雨には局地的な強い降雨を伴うものもあれば流域内で一様の降雨となるものもあり，流域平均降雨量が同程度の降雨であってもその空間的特性は多様である．このような降雨の空間特性の違いが，流域平均値を入力とする集中型流出モデルのパラメータに及ぼす影響を把握することは，より高精度な流出予測を行う上で重要となる．そこで，本研究では降雨の空間分布と集中型流出モデルのパラメータとの関係につ

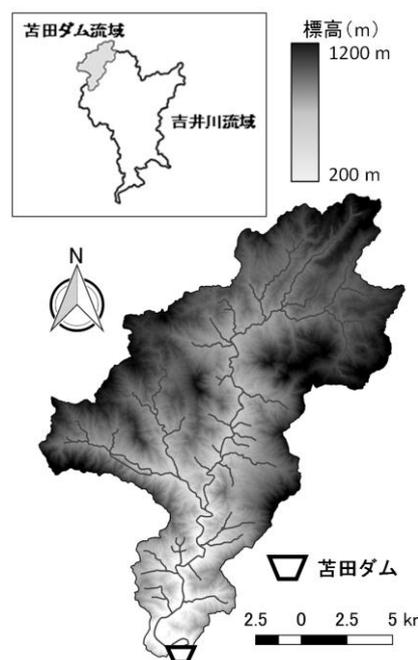


Fig. 1 吉田ダム流域の概要図

Table 1 対象出水一覧

出水 No.	出水期間			日数	総流域平均降雨量 (mm)	総流出高 (mm)	ピーク流量 (m ³ /s)	ピーク比流量 (m ³ s ⁻¹ km ²)
	年	開始	終了					
1	2006	7/15	7/21	7	266.6	166.1	525.3	2.4
2	2011	5/29	5/31	3	156.0	97.5	342.7	1.6
3	2017	8/7	8/8	2	142.7	53.8	317.4	1.5

いて検討を行った。

異なる降雨イベント同士の比較では、出水ごとに総降雨量や降雨時系列、降雨イベント開始時点の流域の乾湿条件（先行降雨履歴）などが異なるため、純粋に降雨の空間分布のみを対象とした議論は困難である。そこで、ある特定の降雨イベントをベースとして、総降雨量や降雨時系列、流域平均降雨量などを変化させずに降雨の空間分布だけを変えた模擬降雨を分布型モデルに入力することで模擬洪水を作成し、これを対象出水とすることで解析を行った。解析内容は、まずレーダーアメダス解析雨量を用いて、対象とする3出水それぞれで、各時間ステップの流域平均降雨量は変化させずに降雨の空間的な集中度のみを変化させた模擬降雨イベントを複数パターン作成し、この一連の模擬降雨を分布型モデルに入力することで、降雨の空間分布が洪水ピーク流量に与える影響を分析した。次に、模擬降雨イベントを分布型モデルに入力することで得られた計算流量を模擬的な洪水イベントとし、この模擬洪水に対して集中型流出モデルのパラメータを同定することで、降雨強度の空間分布が集中型モデルのパラメータに与える影響を吟味した。

3.2 模擬降雨イベントの作成

解析に必要な模擬降雨イベントの作成には1 km グリッドのレーダー雨量を用いた。作成方法には立川ら（2003）によって提案された手法を用いており、手順を以下に示す。

- (1) 各グリッドの降雨強度 R を時間ステップ（本研究では1h）ごとに n 乗する。
- (2) 各時間ステップの n 乗前のレーダー雨量による流域平均値 R_{ave} と n 乗後の流域平均値 R^n_{ave} とが等しくなるような係数を乗じて補正する。

上記の手順を式で表すと以下のようなになる。

$$R'_j = R_j^n \frac{R_{ave}}{R^n_{ave}} = R_j^n \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{\sum_{i=1}^m R_i^n} \quad (1)$$

ここに、 R'_j ：グリッド j の模擬降雨強度（mm/h）、 m ：総グリッド数。

空間分布のばらつきの大小は n の値の大小によって変化させることができ、本研究では、 $n = 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00$ の8ケースを採用した。なお、 $n = 1.00$ というのはレーダー雨量値に等しい降雨の空間分布であることを意味する。

作成した模擬降雨イベントについて、各対象出水の流域平均降雨量が最大時の降雨強度の空間分布をFig. 2に示す。Fig. 2 (a), (d), (g)は降雨強度を0.25乗して作成したケースであり、降雨の空間分布のばらつきが小さく、流域内で一様の降雨となっていることが確認できる。一方、Fig. 2 (c), (f), (i)は2.0乗して作成したケースであり、降雨の空間分布のばらつきが強化され、空間的な集中度の高い降雨が生じていることが確認できる。

4. モデルの概要と構築

4.1 流出モデル

本研究では、流出モデルに長短期流出両用モデル（Long- and Short- Term model ; LST モデル）（角屋・永井, 1988）の第1段タンクを用いた。LSTモデルの第1段タンクはFig. 3に示すように、上層と下層に分かれており、上層と下層の水分移動を表現するための浸透孔が設けられている。上層、下層タンクの連続式は次式で表される。

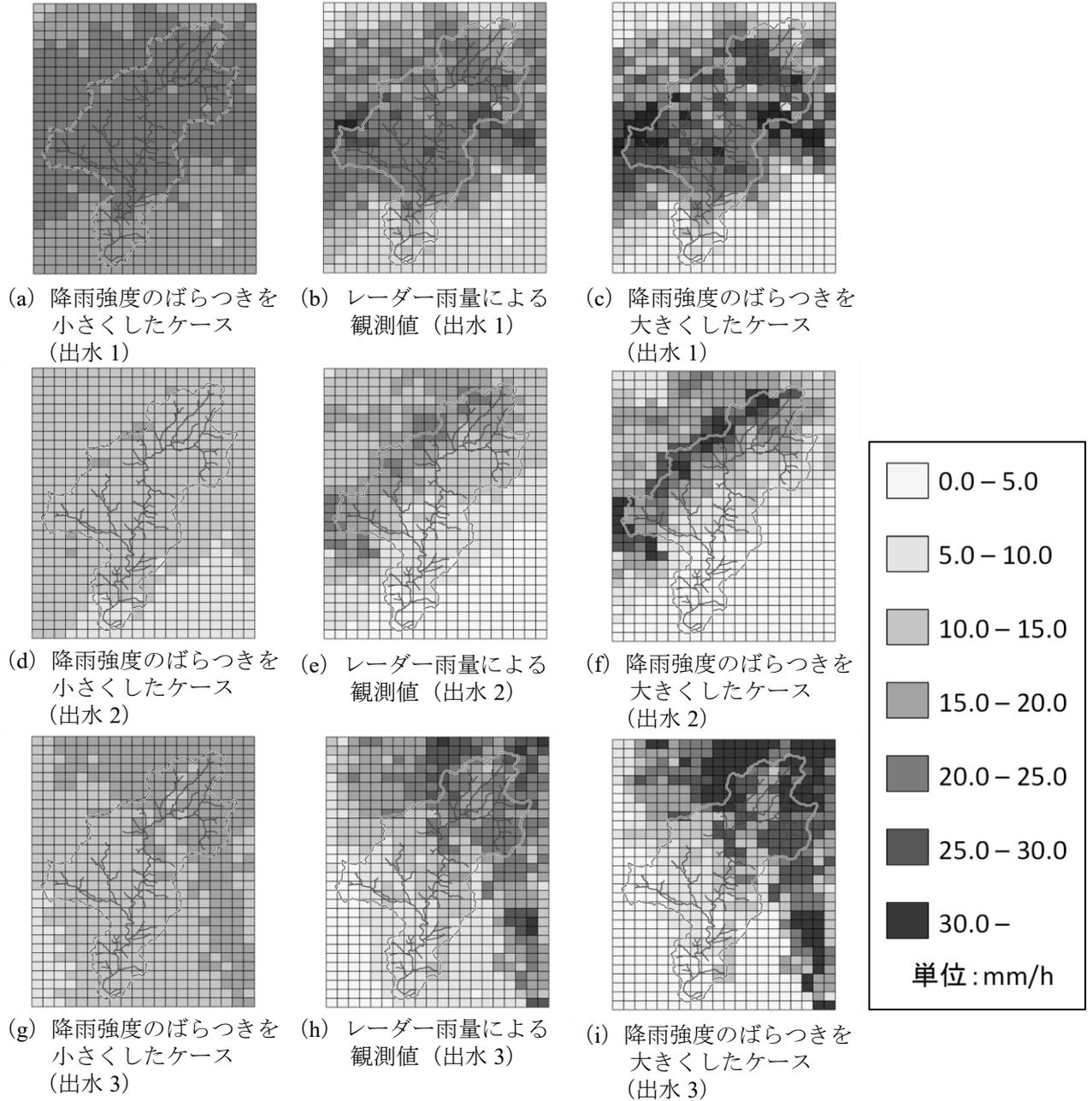


Fig. 2 流域平均降雨量が最大時の降雨強度の空間分布
 ((a), (d), (g) は観測値を 0.25 乗して作成. (c), (f), (i) は観測値を 2.0 乗して作成.)

$$\frac{dS_1}{dt} = r - E_1 - f - Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = f - Q_3 - g_1 \quad (3)$$

ここに、 S_1, S_2 : 貯留量、 t : 時間、 r : 流域平均雨量、 E_1 : 蒸発散強度、 f : 浸入強度、 Q_1, Q_2, Q_3 : 流出量、 g_1 : 第 2 段タンクへの供給強度である。なお、 Q_1 は表面流出、 Q_2 は速い中間流出、 Q_3 は遅い中間流出を想定しており、タンクからの流量 Q は流出成分の和より求まる。 Q, g_1 はそれぞれ次式から求まる。ただし、 Q_1 および Q_2 は貯留量が孔の高さ Z を超える場合のみ流出があるものとする。

$$Q_1 = a_1(S_1 - Z_1)^m, \quad m = \frac{5}{3} \quad (4)$$

$$Q_2 = a_2 S_1 \quad (5)$$

$$Q_3 = a_3 (S_2 - Z_3), \quad g_1 = b_2 S_2 \quad (6)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

ここに、 a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 : 定数, Z_1, Z_2, Z_3 : 流出孔高さ. 表面流は Manning 則に従うものとして $m = 5/3$ を採用している.

4.2 LST モデルの集中適用および分布適用

本研究では、集中型流出モデルおよび分布型流出モデルともに LST モデルを用いており、それぞれ「LST モデルの集中適用」および「LST モデルの分布適用」とした.

LST モデルの集中適用は、従来の集中型流出モデルと同様に、流域平均降雨を入力値として流域下流端の流量 Q を求める. LST モデルの第 1 段タンクにおける未知パラメータは、流出孔の係数 $a_1 \sim a_3$, 浸透孔の係数 $b_1 \sim b_2$, 流出孔の高さ $Z_1 \sim Z_3$, 初期貯留量 $S_1^0 \sim S_2^0$ の合計 10 個である. なお、計算開始時点では表面流出および速い中間流出は発生していないものと仮定し、計算開始時点での実測流出高 q_0 (mm/h) を用いることで S_1^0 および S_2^0 は以下のように求まる.

$$S_1^0 = 0.0 \quad (8)$$

$$S_2^0 = \frac{q_0}{a_3} + Z_3 \quad (9)$$

以上より、未知パラメータは 8 個となるが、集中型流出モデルでは遅れ時間 T_l も必要となるため、合計 9 個のパラメータ同定を行う. なお、集中適用における計算時間間隔 Δt は 1 h とする. また、流域平均雨量はレーダー雨量を流域内で平均化した雨量を用いた.

LST モデルの分布適用では、流域をグリッドに分割し、各グリッドに LST モデルの第 1 段タンクを適用することで分布型流出モデルとした. 同モデルではレーダー雨量を各グリッドに入力し、各グリッドからの流出を落水線を基に流域下流端まで追跡することで流量を算出する (Fig. 4). 本研究では、レーダー雨量の空間解像能に合わせて流域を 1 km グリッドに分割し、1 km メッシュの標高データを用いて最急勾配法により落水線を作成した. LST モデルの分布適用によるグリッド間の流入出は Fig. 4 に示すように、上流タンクからの流出成分が下流タンクの流入成分となることで受け渡しが行われる. なお、一般的な分布型流出モデルとは異なり、斜面グリッドや河道グリッドの区別は一切せずに流域内の全グリッドで一様のパラメータとしている. モデルのパラメータは遅れ時間 T_l を考慮する必要が無く同定対象から除外されるが、初期貯留量 S_2^0 が同定対象に加えられるため合計 9 個のパラメータ同定を行う必要が

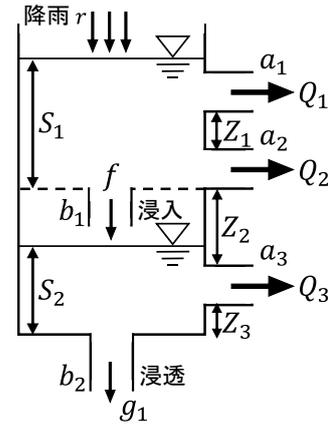


Fig. 3 長短期流出両用モデル (第 1 段タンク)

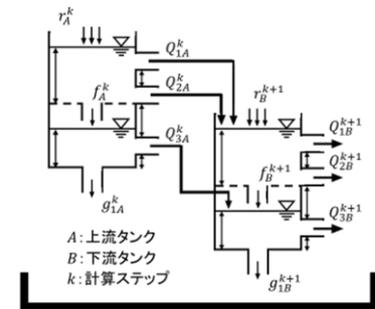


Fig. 4 長短期流出両用モデルの分布適用概念図

ある。また、分布適用における計算時間間隔 Δt は 100 秒とする。

モデルのパラメータ同定は、集中適用および分布適用ともに平方平均二乗誤差 (RMSE) を目的関数とし、差分進化法 (Differential Evolution ; DE) (Storn, 1996) を用いて出水ごとに行った。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{cal} - Q_{obs})^2} \quad (10)$$

ここに、 N : データ数, Q_{obs} : 苦田ダムの観測流入量 (m^3/s), Q_{cal} : 計算流入量 (m^3/s)。

4.3 LST モデルによる実測洪水の再現結果

同定したパラメータを用いた LST モデルの集中適用および分布適用による洪水の再現結果を Fig.5 に示す。両モデルともに再現性は良好であった。RMSE (m^3/s) は 3 出水の平均値が集中適用で $13.07 m^3/s$, 分布適用で $15.56 m^3/s$ となった。このことから、個別洪水の再現性にモデル間での違いはほとんどなく集中適用および分布適用による再現性は定量的にみても問題はないと判断した。

5. 解析結果および考察

5.1 降雨の空間分布が洪水ピーク流量に与える影響

3.2 で作成した一連の模擬降雨を分布適用した LST モデルに入力して得られた流量を Fig. 6 に示す。なお、モデルのパラメータは 3.2 で同定した値を用いた。Fig. 6 は横軸 (時間) の幅をピークを含む 24 時間、縦軸 (流量) の幅をピークを含む $300 m^3/s$ で固定し、ピーク付近を拡大したヒドログラフである。全 8 ケースのうち $n = 0.50, 1.00, 1.50, 2.00$ の 4 ケースを例に示している。同図より、降雨の空間的なばらつきが小さい $n = 0.50$ の場合にピーク流量が小さくなっており、降雨の空間的な集中度が大きく (n が大きく) なるほどピーク流量が大きくなる傾向がみられた。このことは、時間降雨量の流域平均値が同じでも空間内に局地的な降雨があるケースでは洪水ピーク流量が大きくなることを示している。

なお、降雨の空間分布の違いによってピーク流量に変化は生じたものの、モデルに入力した時間降雨量の流域平均値は全ケースで同値であるため総流量に大きな変化はなかった。

5.2 降雨の空間分布が集中型流出モデルのパラメータに与える影響

5.1 で分布型モデルにより算出した模擬洪水に対し、集中適用した LST モデルのパラメータ同定を行

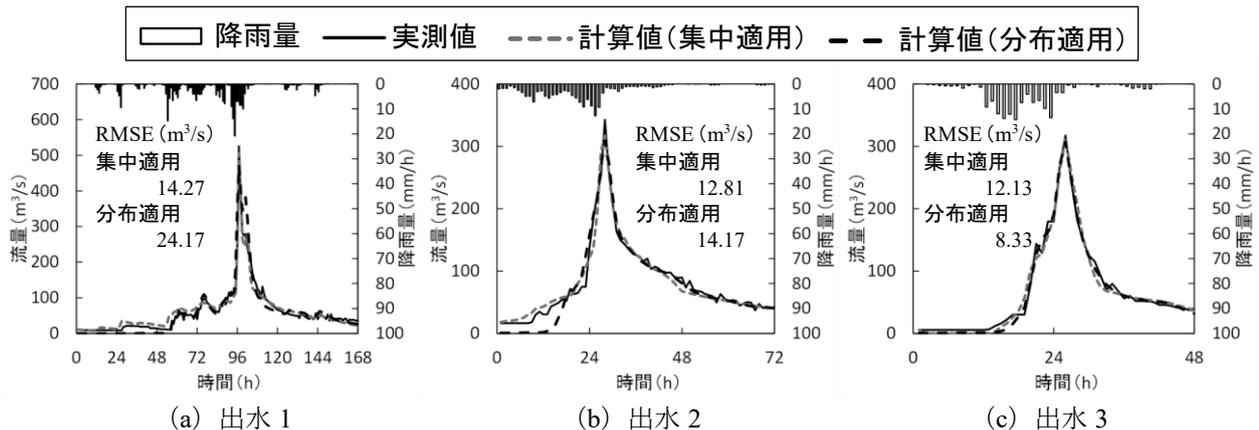


Fig. 5 長短期流出両用モデルによる洪水の再現結果

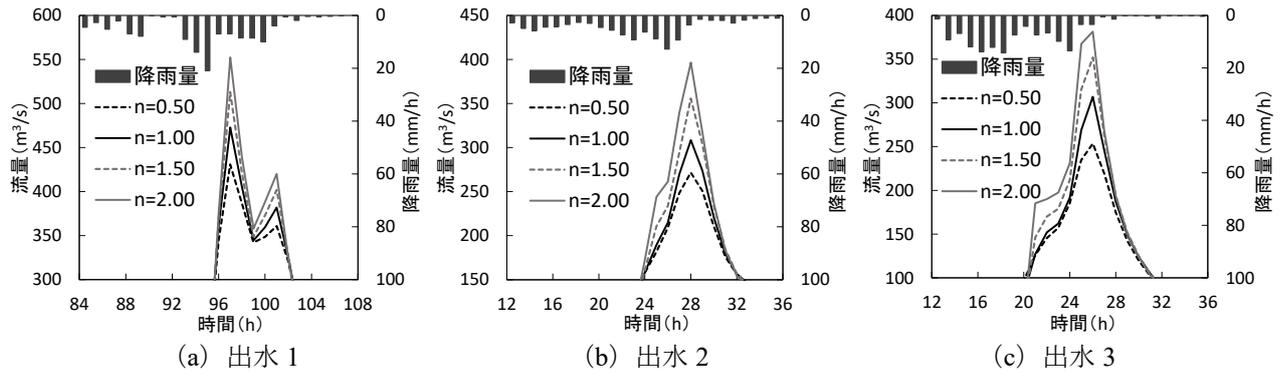


Fig. 6 降雨の空間分布の違いによる流量の変化

った結果について、同定されたパラメータの変化を Fig. 7 に、同定されたパラメータを用いて模擬洪水を LST モデルの集中適用で再現した際の流出成分を Fig. 8 に示す。パラメータの同定は、実測洪水の再現と同様に RMSE ((10) 式) を目的関数とし、差分進化法を用いてケースごとに行った。Fig. 7 は各ケースにおけるパラメータ値を全ケースの平均値で除した値を示している。Fig. 8 の破線はパラメータ同定対象の模擬洪水である。同図には同定パラメータで模擬洪水を再現した際の流出成分 Q_1 , Q_2 , Q_3 を示しており、積み重ねた面グラフの外縁は (7) 式から分かるように計算流量のハイドログラフとなる。

Fig. 7 のパラメータ変化について流出孔のパラメータである $a_1 \sim a_3$ をみると、全出水において a_3 はケース間で大きな差は見られないのに対し、降雨の空間分布のばらつきが大きく (n が大きく) なるにつれ a_1 は大きくなる。 a_2 は出水によって傾向が異なっており、出水 1 と 2 では降雨の空間分布のばらつきが大きく (n が大きく) なるにつれて小さくなり、出水 3 では $n = 1.75$ および 2.00 のケースで大きくなった。上層から下層への浸入孔のパラメータ b_1 は、全出水において降雨の空間分布のばらつきが大きいケース ($n = 1.75$ 以上) で小さくなる傾向を示した。流出孔高さのパラメータである z_1 は出水によって変化の程度に差はみられるが、 $n = 1.25$ 以上で大きく、 $n = 1.00$ 以下で小さくなる傾向がみられた。

Fig. 8 をみると、模擬洪水を示す破線と流出成分を示す面グラフの外縁が全てのケースにおいて概ね一致しており、同定パラメータを用いれば LST モデルの集中適用でピークが異なる洪水も十分に再現できていることが分かる。流出成分をみると、出水 1 と 2 において低水部を表現している Q_3 が各ケースでほとんど変化しないのに対し、降雨の空間的な集中度が高いケースほど Q_1 は増加、 Q_2 は減少しており、ケースによって高水部の流出成分が変化していることが分かる。特に降雨の空間的な集中度が最も高い $n = 2.00$ では高水部のほとんどを Q_1 で表現している。出水 3 は、降雨の空間的な集中度が高くなるにつ

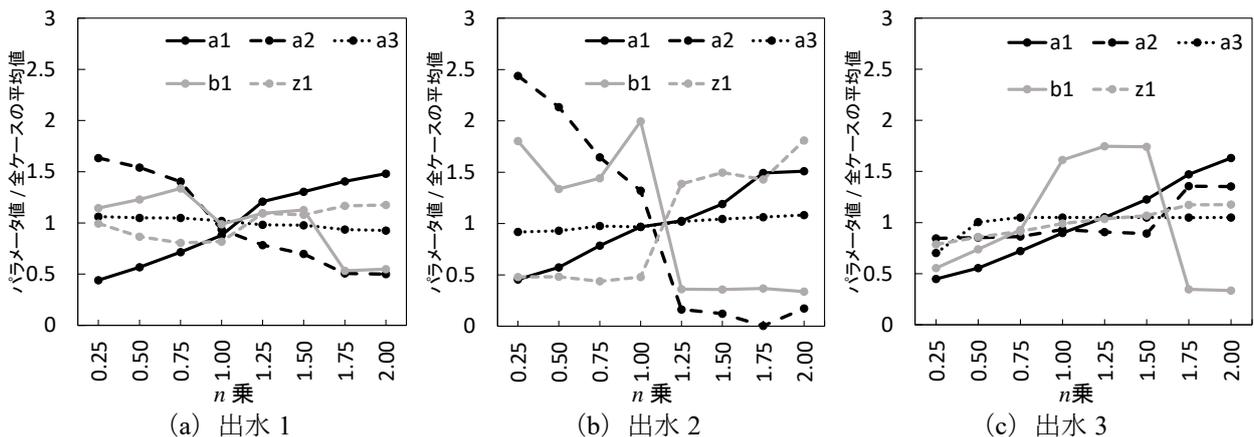


Fig. 7 降雨の空間分布の違いによるパラメータの変化

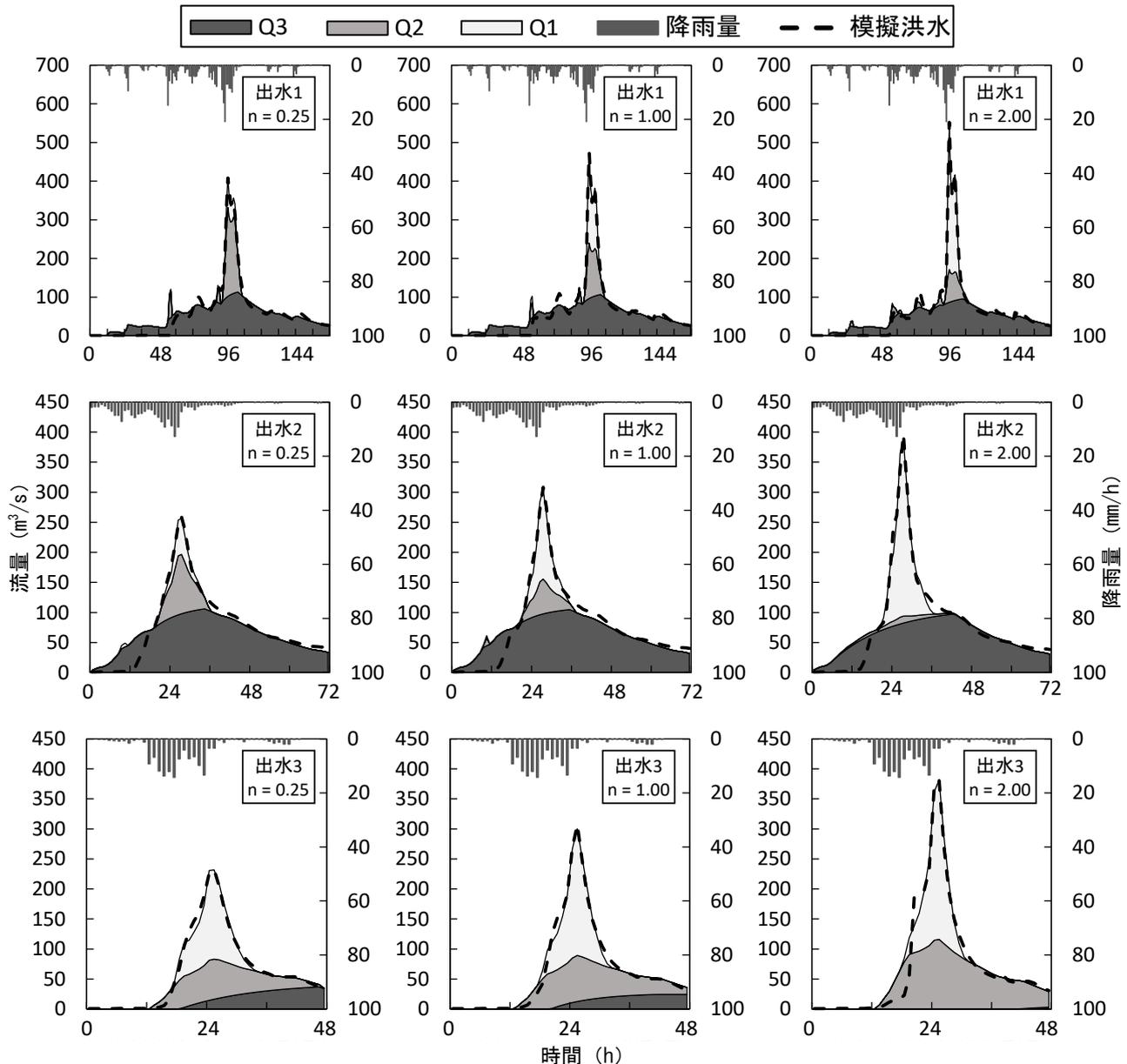


Fig. 8 降雨の空間分布の違いによる流出成分の比較

れて Q_3 が減少し、その分を Q_2 が補う形で増加しており、他の2出水とは低水部の流出形態が異なった。しかし、高水部については他の2出水と同様に、降雨の空間的な集中度が高くなるにつれ Q_1 が増加した。これら流出成分が示した傾向はパラメータ $a_1 \sim a_3$ および b_1 が示した傾向と同様である。また、Fig. 8からは降雨の空間分布のばらつきが大きくなるほどヒドログラフの高水部の形状が細くなるという特徴もみられた。以上より、時間降雨量の流域平均値は変化せずとも、降雨強度の空間分布の違いに応じて集中型流出モデルのパラメータが変化していることが確認できた。

5.3 考察

降雨の空間的な集中度が高まるのに応じて Q_1 を増加させるようにパラメータ a_1 , a_2 , b_1 が変化した理由として、降雨強度の不足が挙げられる。Fig. 8で示したように降雨の空間的な集中度が高いほど流域平均降雨量が同値でもピーク流量が大きくなるのに対し、集中型モデルではどのケースでも同じ流域平

均降雨量が入力される．そのため，流域内に局地的な強い強度の降雨が発生しているケース ($n = 1.25$ 以上) において，ピーク流量に対し流域平均化した降雨強度が不足し， Q_1 を増加させるパラメータセットを選択することでピーク流量に対応していると考えられる．これは，今回対象としたいずれの出水でも共通した傾向であった．

また， n によって Z_1 が変化する傾向については， n が大きくなるほどハイドログラフの高水部が細くなる（流出時間が集中化する）ことに影響を受けていると推察される．(4)式より，流出孔高さである Z_1 は Q_1 の発生を制御するパラメータである．この Z_1 が大きくなることは Q_1 の発生を抑制することとなり， b_1 が小さくなることと相まって S_1 がある程度大きくなるまで表面流の発生を抑制し， Z_1 を超えたときに一気に Q_1 として流出させることで，高水部の流出時間の短縮化およびピーク流量の増加に対応するように Z_1 が調整されたと考えられる．

以上のことは，集中型モデルでは降雨の空間分布がどのようなケースでもパラメータ値を大きく変化させることで流量を再現することができる反面，降雨の空間特性に応じて異なる性質のパラメータセットが選択される可能性があることを示している．そのため，流域固有のパラメータ設定が必要である実時間洪水予測などに集中型流出モデルを用いる場合には，対象出水の降雨の空間分布などを考慮してパラメータを設定する必要があると考えられる．

6. おわりに

本研究では，時間降雨量の流域平均値は変化させずに降雨強度の空間的集中度のみが異なる複数ケースの模擬降雨イベントを作成し，降雨の空間分布の違いが洪水ピーク流量および集中型流出モデルのパラメータに与える影響について分析した．得られた結果は以下のようなものである．

- 1) 模擬降雨を分布型流出モデルに入力して得られた計算流量を全ケースで比較した結果，流域平均降雨量は同じであっても，流域内に局地的な強い降雨があるようなケースではピーク流量が大きくなる傾向があることを示した．
- 2) 分布型流出モデルに模擬降雨を入力して得られた計算流量に対し，集中型流出モデルのパラメータ同定を行った．その結果，同定されたパラメータおよび集中型流出モデルからの流出成分の比較より，集中型流出モデルのパラメータが降雨の空間的集中度に応じて変化することが確認できた．このことから，降雨の空間分布により同定されるパラメータセットの性質が異なる可能性が示された．

以上の結果より，集中型流出モデルにおいて実時間洪水予測などで必要となる流域固有のパラメータ設定を行う際には，対象出水の選定を行う上で降雨の空間分布などの特性を考慮する必要があると考えられる．今後は，同様の模擬降雨を用いて，降雨の空間分布の違いが分布型流出モデルのパラメータに与える影響について検討する．

謝辞：本研究は，内閣府官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) 「ほ場水位予測による応急対応促進・田んぼダムにおける湛水深及び浸水範囲予測と水管理システムの開発 (代表者：北川 巖)」の一部として実施した．ここに記して感謝の意を表す．

引用文献

安達雅人・田中丸治哉・多田明夫 (2006) : GLUE による流出モデルの不確実性評価に関する研究，農業土木

- 学会水文・水環境研究部会誌, 19, pp.114-127
- 角屋睦・永井明博 (1988) : 長短期流出両用モデルの永源寺ダム流域への適用と考察, 農業土木学会論文集, 1988 (137), pp.71-78.
- 国土交通省 (2008) : 国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (確認日 : 2019.10.29)
- 国土交通省 (2002) : 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/> (確認日 : 2019.10.29)
- 国土交通省国土政策局国土情報課 (1988) : 5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査, <http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/inspect.html> (確認日 : 2019.10.31)
- 佐山敬洋・立川康人・寶馨 (2005) : 流出モデルの不確実性評価手法とそのモデル選択への適用, 土木学会論文集, 2005 (789), pp.1-13
- 椎葉充晴・立川康人・市川温 (2013) : 水文学・水工計画学, 京都大学学術出版会, 182p.
- Storn, R. (1996) : On the usage of differential evolution for function optimization, NAFIPS'1996, pp.519-523.
- 立川康人・永谷言・寶馨 (2003) : 分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価, 京都大学防災研究所年報 第 46 号 B-2.