

降雨の空間的集中度が流出モデルの予測精度の安定性に及ぼす影響 Influence of Spatial Rainfall Distribution on Stability of Runoff Prediction Accuracy

○谷口雅明・工藤亮治・近森秀高

TANIGUCHI Masaaki*, KUDO Ryoji*, CHIKAMORI Hidetaka*

1. はじめに ロバストな洪水予測システムを構築するためには、予測精度に影響を及ぼす要因の検討が必要であり、ここでは流出モデルのパラメータの設定に着目した。本研究では同じ出水において降雨の空間的集中度のみを変えた模擬降雨を用いて、集中型・分布型流出モデルのパラメータ同定と流出解析を行い、降雨の空間的集中度が流出モデルの予測精度の安定性に及ぼす影響、すなわちパラメータの汎化性能を分析した。

2. 対象流域・解析資料 岡山県の吉井川水系の上流部に位置する苦田ダム流域（流域面積 217.4km²）において、2006 年から 2021 年に観測されたピーク比流量 1m³/s/km² 以上の 12 出水を対象とし、標高データ、時間単位のダム流入量および解析雨量を用いて解析を行った。

3. 流出モデル 流出モデルには長短期流出両用モデル（LST モデル）（角屋・永井、1988）の第 1 段タンクを採用し、集中型モデル、分布型モデルとして利用した。なお、分布型では斜面や河道グリッドの区別は行わず、パラメータは流域内で一様とした。

4. 解析手法 降雨の空間的集中度の影響のみを対象として議論するために、総降雨量や降雨時系列、流域平均降雨量を変化させず、降雨の空間的集中度を段階的に変化させた模擬降雨を以下の式（立川ら、2003）により作成した。

$$R_{s,j} = R_j^n \frac{\sum_{i=1}^m R_i^n}{\sum_{i=1}^m R_i^n}$$

ここに、 $R_{s,j}$ ：グリッド j の模擬降雨強度 (mm/h)、 R_j 、 R_i ：グリッド j および i の解析雨量の降雨強度 (mm/h)、 m ：総グリッド数である。式の中の n により降雨の空間的集中度を変化させることができ、

本研究では $n = 0.25, 0.50, \dots, 1.75$ の 7 通りの模擬降雨イベントを各出水において作成した。作成した降雨の空間分布の例を図 1 に示す。 $n = 1.00$ は実測の解析雨量値を示し、 n が小さいほど空間的に一様な降雨が、 n が大きいほど空間的に集中した降雨が発生していることが確認できる。次に、作成した模擬降雨を別途準備した分布型流出モデルに入力して空間的集中度を反映させた模擬洪水を作成した。つまり、1 洪水につき 7 通りに空間的集中度を変えた模擬洪水を作成したことになる（図 2）。

そして、作成した模擬洪水に対し、集中型・分布型の LST モデルのパラメータを同定した。

以下では同定に用いた模擬洪水の空間的集中度を n_{opt} とする。続いて、任意の空間的集中度 n_{val} の模擬降雨 $R_{s,n_{val}}$ を入力とし、上記 7 通りのパラメータ $P_{n_{opt}}$ を用いた流出解析を行い、7

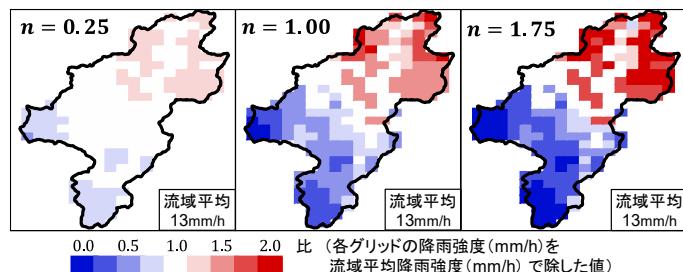


図 1 模擬降雨の作成例 (Flood5 の流域平均降雨強度が最大時の降雨)
Examples of Synthetic rainfall

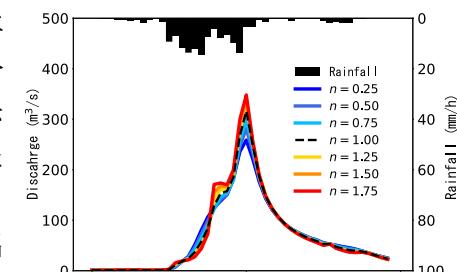


図 2 模擬洪水のハイドログラフの変化
Example of a Synthetic Flood

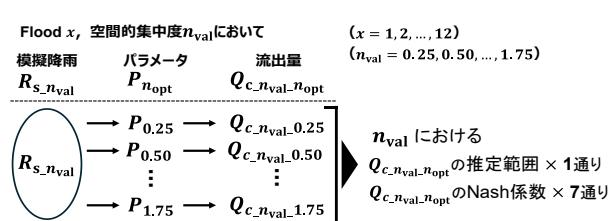


図 3 解析手順
Schematic diagram of numerical experiment

通りの流出量 $Q_{c,n_{val},n_{opt}}$ を求めた (図 3). さらに, この 7 通りの流出量 $Q_{c,n_{val},n_{opt}}$ から推定範囲 (流出量の最大値と最小値の差) および Nash 係数を求め, すべての空間的集中度 n_{val} でこの作業を繰り返した. これらの結果を空間的集中度 n_{val} において集中型と分布型で比較し, 降雨の空間的集中度が流出予測の精度の安定性に及ぼす影響を分析した.

5. 結果・考察 図 4 に空間的集中度 $n_{val} = 1.75$ の模擬降雨を入力とした流出解析における流出量の推定範囲の例を示す. 図より, 分布型 (DST) は集中型 (LMP) と比べて推定範囲が小さく, 特に流出量のピーク付近ではその傾向が強くみられた. そこで, 図 5 にピーク流出量の推定範囲を示す. 図より, すべての空間的集中度 n_{val} において, 分布型は集中型と比べてピーク流出量の推定範囲が小さいことが分かる. また, 空間的集中度 n_{val} が高くなるほど, 模擬洪水 (Synthetic Flood) のピーク流出量は増加することが確認できる. この模擬洪水のピーク流出量の変化に対して, 流域平均降雨量を入力する集中型は空間情報を適用できないため, ピーク流出量の推定範囲が一定である. 一方で, 分布型は空間分布型の入力降雨により降雨の空間的集中度を反映できるため, ピーク流出量の推定範囲が模擬洪水のピーク流出量に追従するように変化する. 次に, 空間的集中度 n_{val} の模擬洪水に対する再現精度を定量的に評価するため, Nash 係数を求めた. Nash 係数は上限 1.00 に近いほど, 流出モデルの再現精度が高いことを示す指標である. 図 6 に, 各空間的集中度 n_{val} (横軸) における 7 通りの空間的集中度 n_{opt} の Nash 係数の分布を示す. 図より集中型では再現精度の大きな低下が確認できる. 再現精度の低下は, 入力模擬降雨と模擬降雨で同定したパラメータの空間的集中度が真逆の性質の際に顕著となっており (例えば $n_{val} = 0.25$ の入力降雨に対してパラメータ $P_{1.75}$ を用いた場合など), 集中型では同定に用いられた空間的集中度 n_{opt} と流出解析に用いられた入力模擬降雨の空間的集中度 n_{val} の差が大きいほど再現精度が低下した. 集中型は空間情報を持つ降雨を適用できないため, 同定に用いられた空間的集中度の模擬洪水に対して過剰適合が起こり, 汎化性能が低いパラメータが同定され再現精度が大きく低下したと考える. 一方で, 同図より分布型は集中型に比べて, どの空間的集中度 n_{val} でも再現精度が維持されることが確認できる. 分布型は解析雨量を適用することで降雨の空間的集中度を反映できるため, 降雨の空間的集中度の変化に影響を受けにくい (つまり汎化性能の高い) パラメータが同定され, 同定に用いられなかった空間的集中度の模擬降雨を入力として流出解析を行った場合にも再現精度が維持されたと考えられる. 以上より, ダム流域 (山地流域) のような土地利用が單一流域においても, 集中型モデルを分布適用した洪水予測システムとすることで安定した予測精度が期待できる.

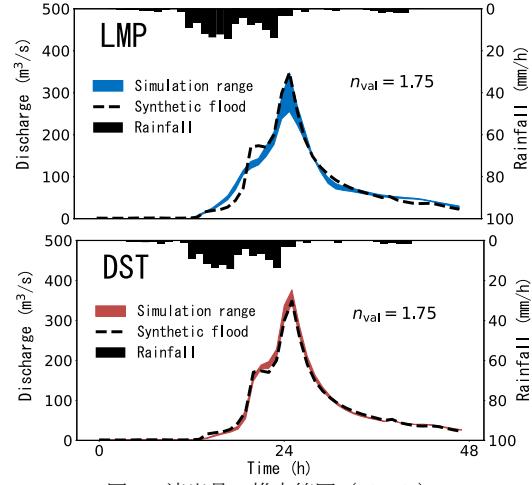


図 4 流出量の推定範囲 (Flood5)
Simulation range by multi-parameter simulation

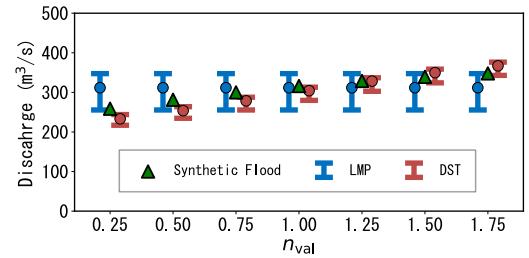


図 5 ピーク流出量の推定範囲 (Flood5)
Simulation range of peak runoff

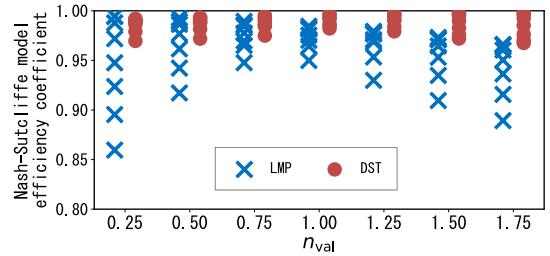


図 6 Nash 係数の分布 (Flood5)
Evaluation of simulation accuracy (Nash-Sutcliffe efficiency)

図より集中型では再現精度の大きな低下が確認できる. 再現精度の低下は, 入力模擬降雨と模擬降雨で同定したパラメータの空間的集中度が真逆の性質の際に顕著となっており (例えば $n_{val} = 0.25$ の入力降雨に対してパラメータ $P_{1.75}$ を用いた場合など), 集中型では同定に用いられた空間的集中度 n_{opt} と流出解析に用いられた入力模擬降雨の空間的集中度 n_{val} の差が大きいほど再現精度が低下した. 集中型は空間情報を持つ降雨を適用できないため, 同定に用いられた空間的集中度の模擬洪水に対して過剰適合が起こり, 汎化性能が低いパラメータが同定され再現精度が大きく低下したと考える. 一方で, 同図より分布型は集中型に比べて, どの空間的集中度 n_{val} でも再現精度が維持されることが確認できる. 分布型は解析雨量を適用することで降雨の空間的集中度を反映できるため, 降雨の空間的集中度の変化に影響を受けにくい (つまり汎化性能の高い) パラメータが同定され, 同定に用いられなかった空間的集中度の模擬降雨を入力として流出解析を行った場合にも再現精度が維持されたと考えられる. 以上より, ダム流域 (山地流域) のような土地利用が單一流域においても, 集中型モデルを分布適用した洪水予測システムとすることで安定した予測精度が期待できる.