

# 降雨流出過程における降雨の損失機構の不確実性評価に関する研究

## The effect of rainfall loss uncertainty on rainfall-runoff process

18N3100036J 渡邊 瑞貴 (河川・水文研究室)  
Mizuki WATENABE / River Engineering and Hydrology Lab.

**Key Words :** water holding capacity, uncertainty, rainfall, rainfall loss, Fokker-Planck equation

### 1. はじめに

国土の 60 %以上を急峻な山地が占める日本で国土を保全するためには、土石流や地すべりなど山地流域の急激な水・土砂流出機構を解明していく必要がある。気候変動により、「強い降雨現象の頻度が増す可能性は非常に高く、洪水の危険性を増加させる (環境省<sup>1)</sup>, (2018)」と予測されていることから、大雨に対する水・土砂流出機構の理解と予測の重要性は増している。しかし、降雨流出機構において、未だに理解が不十分な部分が存在していることから、治水計画を議論するうえで喫緊の課題であるともされる。そのため、降雨流出過程の解明にあたり、不確実性評価手法を導入することが求められる。

本研究で扱う降雨流出過程には、大別して2つの不確実な要素が内在すると考えられる。まず、観測降雨量の時空間分布、次に観測データの不足である。一般に、水文学的研究で用いられる降雨強度の多くは雨量計を用いた観測によって得られるが、雨量計の空間分布の密度には認識の限界が存在する。近年の X バンド MP レーダ網の発達に伴い、降雨の時空間分布は、従来に比べてより詳細に捉えられるようになったものの、矢本<sup>2)</sup>はその精度には 10~20%の不確実性が存在するとの結果を示した。また、現実には土壌特性データ、土壌水分データの不足、観測データとモデリングの空間スケールの相違等、降雨量や降雨強度の観測に伴う不確実性は幾重にも存在するのである。そして上記の問題のほぼすべてが雨量を実際の値よりも過小評価することに注意する必要がある。我々は降雨を洪水災害の第一要因として適切に評価しなければならない。このような点から、本質的な流出問題の解決に至っていない点が多々存在する。

既存の研究において、過去の一雨総雨量とこれに対応する総損失雨量の関係から得られる損失雨量曲線から保水能分布理論による有効降雨強度の推定手法が提案されている。なお、山地流域における一雨総雨量と損失雨量との関係は Tanh 型の曲線で高い精度で近似できることが図のように示されている。例えば、呉<sup>3)</sup>は、提案した貯留関数法に保水能理論を取り入れ、流出寄与域の定量的評価を行い、降雨流出の非線形性が流域特性に強く依存することを示した。しかしながら、上記の保

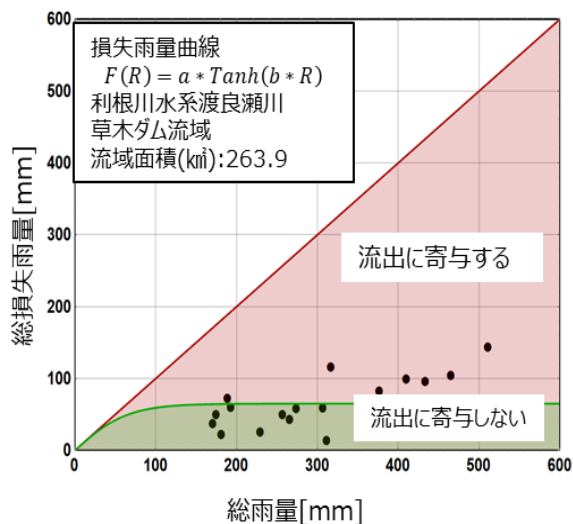


図-1 草木ダム流域における一雨の総雨量と総損失雨量の関係

水能理論は決定論的視点に立脚した理論であり、損失雨量曲線そのものの不確実性は考慮していない。図-1に示した点は損失雨量曲線の周りに分布しており、損失雨量曲線そのものの不確実性を理論に取り入れる必要があるといえよう。従って、本研究では吉見<sup>4)</sup>、成<sup>5)</sup>が構築した不確実性評価手法に基づき、損失雨量曲線そのものの不確実性を考慮した理論の導出を行った。さらに、山地流域を対象とし、損失雨量曲線を構成するパラメータに不確実性を与えて流出解析を行い、損失機構の不確実性が河川流量の不確実性に与える影響を分析した。

### 2. 適用流域とデータ

損失雨量と総雨量の算定に用いた対象とした流域は図-2に示したように、我が国の36流域において、河川の上流部に位置する多目的ダムを対象地点とした。各対象の流域面積は103.6km<sup>2</sup>~635.2km<sup>2</sup>の範囲のものである。対象地点の水文データは国土交通省が管理する国土交通省水文水質データベースにおいて公開されている10年間(2002~2011年)の洪水期(6~10月)における時間降雨量とダム湖への時間流入データである。全国106ヶ所の山地流域のデータを分析したところ、そのうち36流域において連続的な降雨量及び流入データが存在し

ており、これらの流域を研究対象とした。

Intan<sup>®</sup>は、我が国における16都道府県47流域のダム流域の損失雨量曲線を3種類に分類している。損失雨量曲線が線形でかつ、総雨量のうち8割近くが流出に寄与するものが3流域、Tanh型の曲線を描くものが26流域、強い雨の傾向を持つTanh型の曲線を描くものを7流域であった。

本研究では、Intanによる損失雨量曲線の分類においてTanh型の曲線を描く、以下の2流域を対象とした。まず、利根川本川最上流部に位置する二瀬ダム流域における時間雨量とダム流入量を用いた。流域面積は170.6 km<sup>2</sup>である。前述した流域の分類の中でも強い降雨強度を観測する流域である。そして、二瀬ダムと流域面積が似た石狩川水系小樽内川に位置する定山溪ダム流域を扱った。流域面積は103.6 km<sup>2</sup>である。

### 3. 手法

降雨の損失機構における不確実性評価について、本研究では信頼区間と予測区間の2つの考え方を示す。まず、信頼区間の場合、二瀬ダム流域および定山溪ダム流域の総降雨量と損失雨量の関係を算出し、降雨イベントに最も適合するような損失雨量曲線のパラメータ $a$ と $b$ を算出した。図-3は損失雨量曲線パラメータの信頼区間を考慮した場合の矢木沢ダム及び矢木沢ダム流域を含む周辺流域の雨量と損失の関係である。損失雨量曲線について、信頼係数5~95%を考慮し、得られたパラメータ $a$ と $b$ を用いて、有効降雨についてアンサンブル計算を行い、流域平均降雨のピーク時の有効降雨の分布、流域のピーク時流量の分布を調べた。損失雨量曲線の信頼区間を考慮した場合の二瀬ダム流域の総雨量と総損失雨量の関係を図-4に示す。

次に、予測区間の場合には、損失量曲線周辺に分布する降雨イベントを総雨量に従って4個ずつ分類し、各標準偏差を求めた。これを36流域で実行し、総雨量と標準偏差の関係を分析する。信頼区間で出した手法と予測区間で導出した解析結果を比較し、適切な評価手法を提案する。

#### (1)有効降雨の算定における保水能理論の概要

流域は様々な特性を持つ表土層に覆われている。ある1つの特性を持った表土層によって構成された斜面では、累積降雨量はその土壌特性によって決まるある値に達するまでは雨水は土壌の毛細管力に支えられることで保水されたり、表土の窪地に貯留することで、直接流出には寄与しない。この問題を考えるために直接流出として出てこない量、つまり、流域全体で損失する量を考える。総降雨量と損失雨量の平均近似曲線を

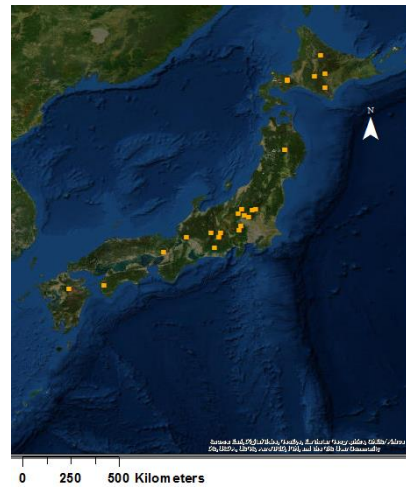


図-2 調査対象とした多目的ダム 36 流域の地理的分布

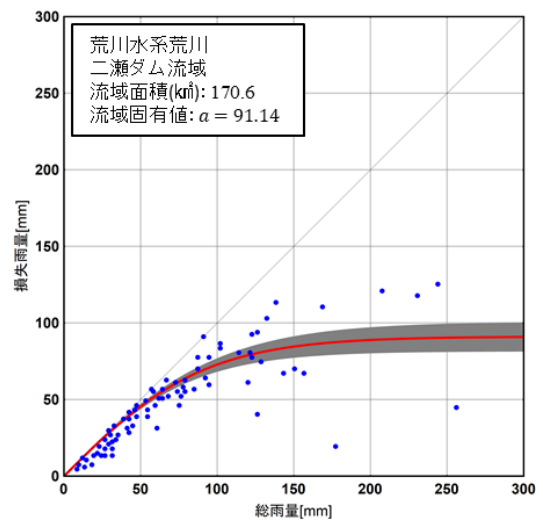


図-3 二瀬ダム流域における損失雨量曲線の信頼区間を考慮した場合の総雨量と総損失雨量の関係

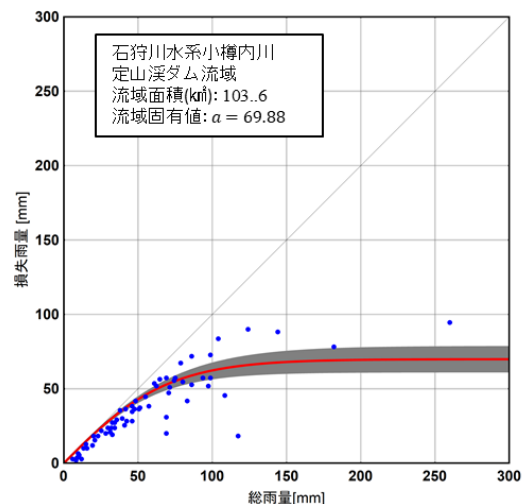


図-4 定山溪ダム流域における損失雨量曲線の信頼区間を考慮した場合の総雨量と総損失雨量の関係

(1)式で表す.

$$F(R) = a \tanh(bR) \quad (1)$$

ここに,  $R$ :総降雨量[mm],  $F(R)$ :損失雨量[mm],  $a, b$ :流域固有のパラメータである. 有効降雨の算定法は従来より複数の方法が提案されてるが, 実流域において過去多くの降雨時間のデータから総降雨量 $R$ -損失雨量 $Q_f$ の曲線 $Q_f=F(R)$ を描くことができるものとし, 本研究では山田<sup>3)</sup>が提案した保水能を用いた一般式(2)を用いる.

$$u(t) = \left(1 - \frac{\partial F}{\partial R}\right) r(t) \quad (2)$$

ここに,  $u(t)$ :有効降雨量[mm]である.

## (2)降雨流出過程における不確実性理論の概要

山田<sup>7)</sup>は, 単一斜面に対して幅広矩形断面を想定し, 連続式と運動則を基礎式として, (3)式に示す貯留型の降雨流出計算手法を示している.

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (3)$$

ここに,  $q_*(t)$ は流出高[mm/h]である.  $r(t)$ は有効降雨強度[mm/h]である. また,

$$a_0 = (m+1) \left(\frac{\alpha}{L}\right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (4)$$

である. ここに,  $L$ は流出寄与斜面長[m]であり,  $\alpha, m$ は流域特性を表すパラメータとして,

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^\gamma}, \quad m = \gamma - 1 \quad (5)$$

で与えられる.

## 4. 結果と考察

図-3および図-4は, 損失雨量曲線の信頼区間を考慮した場合の総雨量と総損失雨量の関係である. 信頼係数95%としたときの降雨イベントを覆うようにアンサンブル計算を行った. 概形に関しては大きな違いは見られなかった.

図-5は, 各対象流域における総雨量と標準偏差の関係を表している. 図は50mmから150mmにかけて値が集中していた. 総雨量の増加に伴い, 標準偏差にも増加する傾向が見られた. この図から, 以下2つの仮定を示す.

$$\sigma = aR \quad (6)$$

二瀬ダム流域の場合に $a = 0.154$ , 定山溪ダム流域の場合に $a = 0.159$ という結果が得られた.

$$\sigma = a \tanh(R/a) \quad (7)$$

ここに,  $\sigma$ :標準偏差[mm],  $a, b$ :有効降雨の標準偏差におけるパラメータである. 二瀬ダム流域の場合に $a = 12.45$ , 定山溪ダム流域の場合に $a = 9.13$ という結果が得られた.

式(6)および式(7)に基づいて, 予測区間を考慮した総

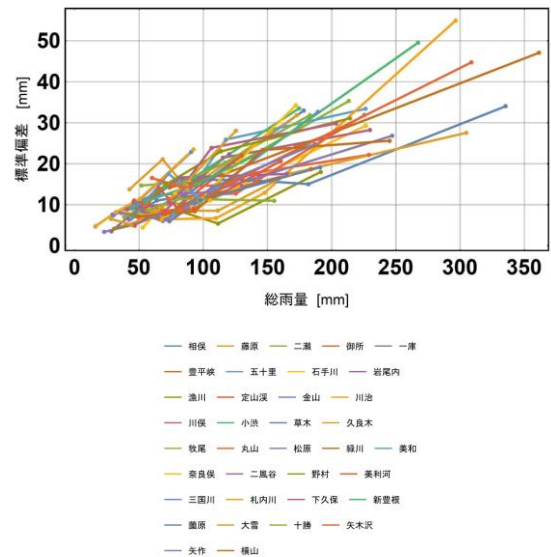


図-5 各対象流域における総雨量と標準偏差の関係

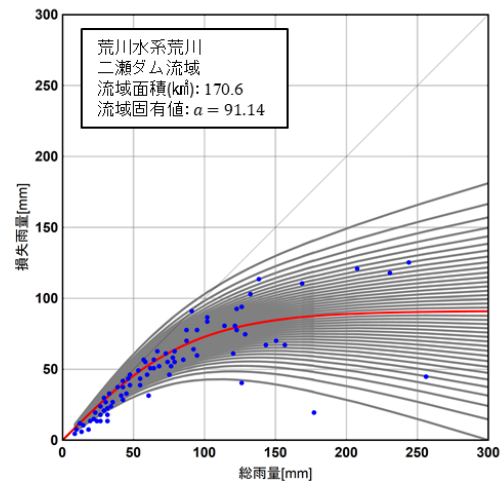


図-6 二瀬ダム流域における損失雨量曲線の予測区間を標準偏差の線形性に従った総雨量と損失雨量の関係

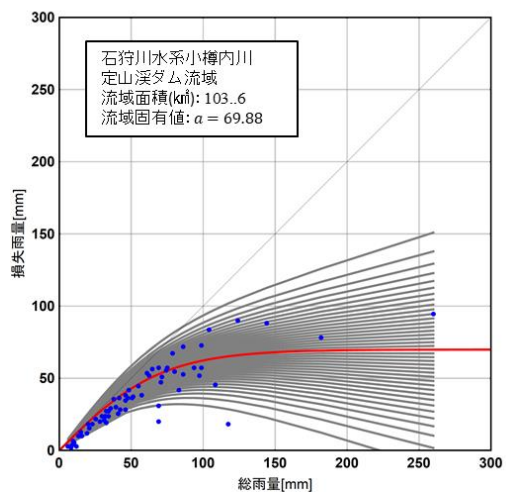


図-7 定山溪ダム流域における損失雨量曲線の予測区間を標準偏差の線形性に従った総雨量と損失雨量の関係

雨量と損失雨量の関係を図-6、図-7、図-8、図-9に示した。信頼区間、予測区間ともに区間幅を5~95%かつ0.5刻みとした。うち、図-6および図-7は、標準偏差が総雨量の増加に伴い、式(6)に従った損失雨量曲線である。図-8、および図-9は、総雨量の増加に伴い、Tanh曲線に従った広がりを示した。損失雨量曲線の算出にあたり、本研究では、前節で示した式(1)のパラメータ $b$ を $1/a$ とした。なぜなら、 $a$ と $b$ を独立した関係にすると、総雨量と損失雨量の値がほぼ等しい場合に45°線を越えることがあるためである。それでも、図に示すように、両者ともに45°線を越えている。したがって、標準偏差に関しては、信頼区間および予測区間を考慮した損失雨量曲線と比較するには現段階では適切でないと考えられる。

図-6および図-7の解の形を見ると、標準偏差が線形的に増加する場合、予測区間は裾広がりにより幅が増加していくことがわかる。一方で、標準偏差をTanh型の曲線で表現した場合、平均値に乗するような流域固有のパラメータを提案できるとも考えられる。しかし、幅を一定に表すことは不確実性を評価するには適切でない。つまり、本研究で仮定した標準偏差は線形的に考慮する方が不確実性評価にあたっては適切である。

## 5. まとめ

本研究ではダム流域の雨量と損失関係の分析を行い、算出した有効降雨を用いた流出解析を行うことで損失機構の不確実性が河川流量に与える影響を分析した。本研究の結果より得られた知見を以下に詳述する。

- 全国のダム流域には大きく分けて3つの流出タイプが存在し、本研究では、特に多く分布する2つの流出タイプを取り上げ、流出特性を分析した。
- 標準偏差に共通した特徴に基づいて仮定した標準偏差の式は、実流域に適しているとは断定できない。しかし、より多くの流域データを取得できれば、具体的な標準偏差と総雨量の関係式を導出できると考えられる。そのためには、図-6、図-7、図-8、図-9に示した結果を用いた流出計算結果からFokker-Planck方程式を用いて実測流量との詳細な比較をすべきである。
- 標準偏差において、各流域はともに共通した増加傾向が見られた。このことから、流域に内在する不確実性は必ずしも飽和によるものだけではないことがわかる。保水能に関する既往研究では飽和状態や岩盤による非線形性に着目して議論していたが、本研究は両者に限らず議論を展開できるとも考えられる。

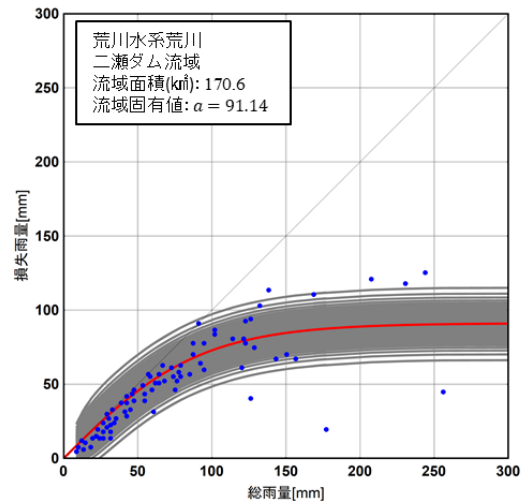


図-8 二瀬ダム流域における損失雨量曲線の予測区間を標準偏差のTanh曲線に従った総雨量と損失雨量の関係

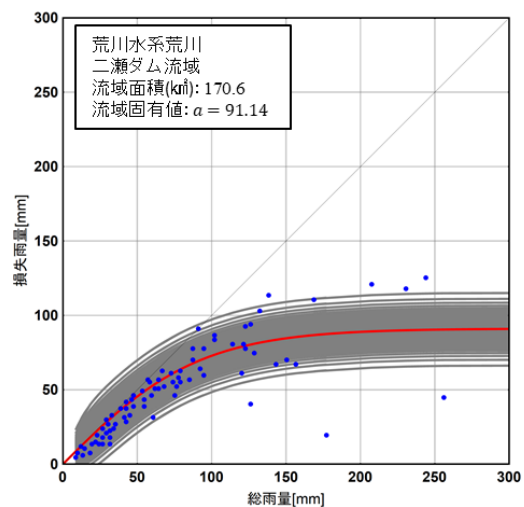


図-9 定山溪ダム流域における損失雨量曲線の予測区間を標準偏差のTanh曲線に従った総雨量と損失雨量の関係

## 参考文献

- 1) 環境省, 気候変動の観測・予測および影響評価統合レポート 2018, 日本の気候変動とその影響, 2018.
- 2) 呉修一, 降雨流出の普遍的適用にむけた物理的アプローチ, 大学院研究年報理工学研究科編, 第38号 pp.105-138, 2008.
- 3) 矢本貴俊, 降雨の空間分布が河川流量に与える影響に関する研究, 大学院研究年報 理工学研究科編, 第38号 pp.105-138, 2017.
- 4) 吉見和紘, 確率過程論を導入した降雨流出過程における不確実性評価に関する研究. 中央大学理工学研究所論文集, 18, 9-14.2016.
- 5) 成岱蔚. "確率過程論に基づく不確実性を有する物理システムの予測に関する研究——降雨流出過程への応用——." 大学院研究年報 理工学研究科編 47 (2017).
- 6) I.Supraba, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), Vol. 70, No. 4, I\_169-I\_174, 2014.
- 7) 山田正, 山地流出の非線形性に関する研究, 土木学会水工学論文集, 第47巻, pp.259-264, 2003.