

降雨流出現象の不確実性に関する研究

Rainfall-runoff analysis considering uncertain conditions

北海道大学工学部環境社会工学科国土政策学コース 学生員 青木一眞 (Kazuma Aoki)

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

正員 成岱蔚 (Cheng Daiwei)

1. 背景と目的

近年大規模な洪水災害が頻発している。これらの被害を最小限に抑えるために、避難情報の発信、ダムの事前放流量の検討が必要である。その上で、流域における河川流量、水位を明らかにする降雨流出解析は現在にいたるまで多くの研究が行われている。たとえば木村(1961)は貯留関数法を提案した。貯留関数法は非線形の貯水池を考えた概念モデルであり、簡便であるにも関わらず洪水の再現性が高いことから1960年代以降多くの流域の治水計画で用いられてきた。また、一次元非定常の開水路の漸変流の連続式と運動量式から導出されるキネマティックウェーブモデルを用いた分布型降雨流出モデルの研究は盛んであり、様々な水文特性の空間的な分布を含めた検討が行われている。降雨流出現象は扱うスケールが大きく複雑なため、これまでにこのようなモデル化をした決定論的な流出解析が行われてきた。しかし対象とする流域ごとの地質、地形、土壌状態などによって流出量は大きく左右され、その複雑な流域の情報を正確に把握し、流出現象に反映させることは困難である。また、解析の入力値である降雨データは多種多様でありレーダ観測値、地上雨量計観測値、数値解析による予測値などがある。それぞれの降雨データに観測の誤差、予測の誤差、空間分解能の違いなどがあり、なにが真値かを定めることは不可能であり、自然現象に対する認識には限界があるといえる。

本研究では不確実な情報を扱う降雨流出現象において、確率的な概念を導入し、現象として起こりうる幅を定量的に評価する手法の提案を目指す。

2. 研究手法

2.1 流出計算手法

流出計算に単一斜面における降雨流出の基本式を適用する。山田(2003) (2)は単一斜面に対して幅広矩形断面を想定し、連続式と運動量を基礎式として導出し、(1)式に示す貯留型の降雨流出計算手法を示した。

$$\frac{dq}{dt} = a_0 q^\beta (r_e(t) - q) \quad (1)$$

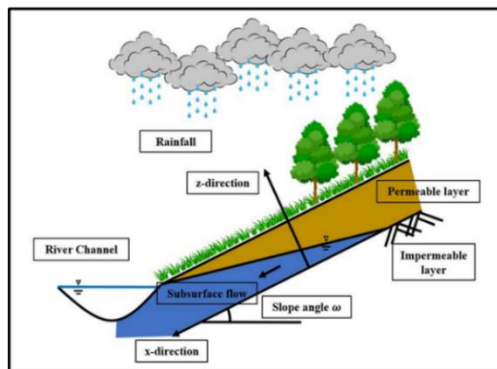
$$a_0 = (m+1) \left(\frac{\alpha}{L} \right)^{\frac{1}{m+1}}, \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (2)$$

ここで、 $q(t)$:流出高[mm/h]、 $r_e(t)$:有効降雨強度[mm/h]、 a_0, β :流出パラメータ、 α, m :流域特性を表すパラメータ、 L :流出寄与斜面長である。有効降雨強度は流出計算の入力値となる。降雨が土壌に浸透し表層土層に中間流として浸透して河道に流出する過程が表現されている(図1)。

また、計算の容易性や、洪水の再現性が高いことから河川計画に多用されている木村の貯留関数法と数学的に同型であるが、木村の貯留関数法は概念的な扱いを導入しているため流出パラメータの物理的意味を評価することが難しい。一方で単一斜面における降雨流出の基本式は不飽和浸透理論との比較により(3)の関係を導くことができる。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D \gamma^{-1} w^\gamma}, \quad m = \gamma - 1 \quad (3)$$

ここに、 i :斜面勾配、 D :表層土層厚[mm]、 γ :土壌の透水性を表す無次元パラメータ、 k_s :飽和透水係数、 w :有効空隙率で定義される事により、土壌、地形特性から流出パラメータを決定し降雨流出計算を行うことが可能である。



2.2 有効降雨

図1 単一斜面の模式図

式(1)に示した降雨流出の基本式は、降雨が中間流として土壌に浸透し、河道へ直接流出することを想定しているため、有効降雨を算定する必要がある。

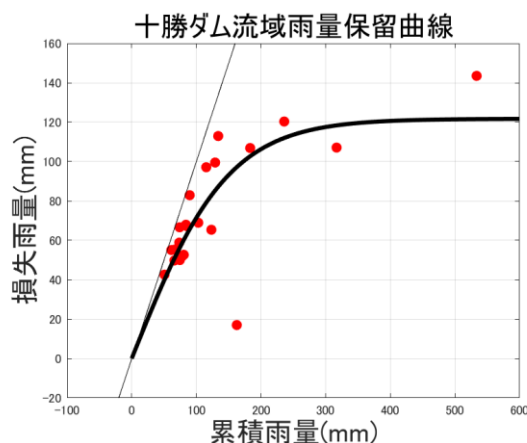


図2 十勝ダム流域における雨量損失曲線

山地における損失雨量 $F(R)$ は累積降雨量 R に対して図-2に示す関係が存在し、保水能の理論において損失雨量曲線は式(4)で表現することができる。

$$F(R) = a \tanh(bR) \quad (4)$$

a, b はそれぞれ累積雨量に対して損失雨量の関係を回帰するためのパラメータであり、累積雨量に応じて流出に寄与する有効降雨の割合を連続的に算出している。降雨イベント時の流域の土壌水分量の初期条件によって累積雨量が同じ降雨イベントでも損失雨量は大きく異なることが示される。

2.3 降雨の不確実性について

降雨量の観測はその手法ごとに不確実性が存在する。図3は鈴木・山田(2015)による北広島局から30キロメートル以内における2014年9月9日00:00(JST)より59時間のレーダ雨量1分値と地上雨量計(AMeDAS雨量1分値, MLIT10分値)の1時間総雨量の比較である。

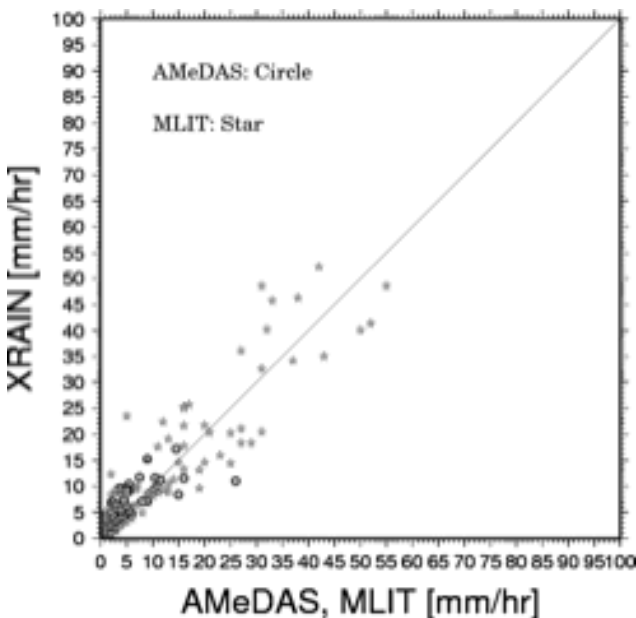


図3 レーダ解析と地上雨量計による雨量の比較

レーダ観測の精度は空間、時間解像度や、電波減衰による遠方の観測精度の減少などの影響がある。地上雨量計観測においては、流域に設置されている観測機器には限りがあることから、降雨の空間分布を示すことが難しい。またどちらにおいても機器の精度の問題がある。同じ降雨イベントでも観測によって降雨量にばらつきがあることが分かる。

2.4 不確実性の評価手法について

このような不確実な入力と出力の情報を評価する研究はこれまでに日野(1974)によるカルマンフィルタや立川(2011)による粒子フィルタなどが挙げられる。不確実性の評価手法として1つ目は不確実性の原因を追及し、それを取り除くことによって精度の向上を図ることである。物理的機構のより一層の解明によって観測、予測技術が発展すればさらに正確な解析が可能となる。しかし計算負荷の増大や、現実ではカオス現象による初期値の鋭敏性などに支配されているため決定的な解を出すには限界が存在する。もう一つの手法は山田・吉見ら(2015)

による確率微分方程式の概念を導入し、入力と出力の確率密度関数の関係を数学的に厳密に評価する手法である。解析に確率微分方程式を用いることで、物理的性質から時系列ごとの確率密度関数を求められる利点があるが、計算が不安定になりやすい欠点があるその他の手法としてはある程度の範囲にある初期値の集合(アンサンブル)を用意し、出力の集合を得るものである。決定論的な式が存在すれば適用することができ、幅広く応用できる。一般的にアンサンブル数が多いほど計算結果の精度が向上する。そのため多くのアンサンブル数が必要となり、それに伴って計算量が増大するという欠点が存在する。本研究では後者を中心に降雨流出現象における不確実性を評価する。

3. 解析結果

3.1 決定論的な降雨流出の解析

決定論的な降雨流出の解析の一例を図4に示す。対象とするイベントは十勝ダム集水域、2006年8月17日の降雨イベントである。出水イベントごとに最も観測値に沿うような流出パラメータの値は異なるため、事後的にパラメータを同定する必要がある。

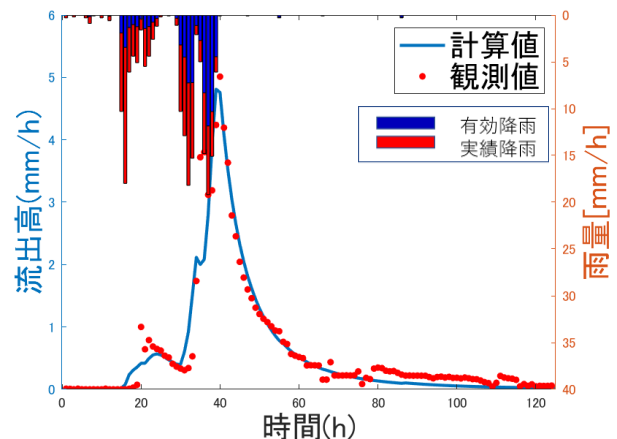


図4 十勝ダム流域における解析の一例

3.2 流出高に対する損失雨量の不確実性の影響

降雨が地下水流として流れ、直接流出に寄与しない損失雨量は、図5のように初期土壌水分量などの条件によって乾燥(図中青線)、平均(黒線)、湿潤(赤線)の3つのシナリオに分けられることが考えられる。流出パラメータの平均値を用い、それぞれ3つのシナリオにおいて有効降雨が十勝ダム集水域における2006年8月17日の降雨イベントの出水解析に与える影響を調べた。

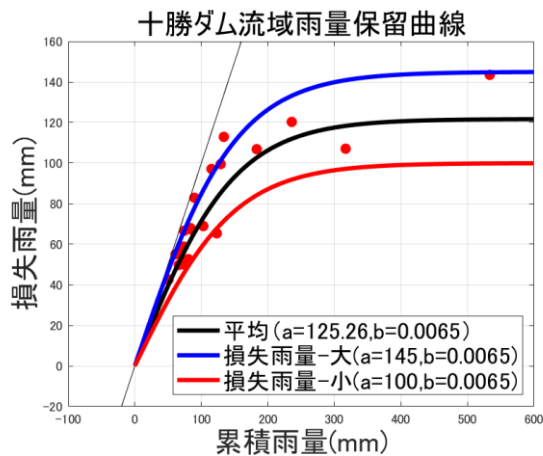


図5 3条件の雨量損失曲線

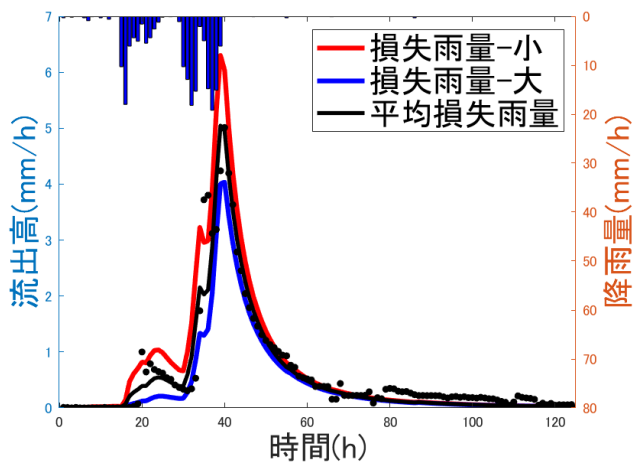


図6 初期土壌水分量が異なる条件における有効降雨が流出高に及ぼす影響

図6では損失雨量の大きい青線と赤線で、最初のピークの大きさ、立ち上がりの早さ、最大流出現象に大きな違いがあることがわかった。

3.3 流出パラメータによるアンサンブル計算

十勝ダム集水域における流出解析から同定された17の降雨イベントの流出パラメータを用いて2006年8月17日の降水イベントについてアンサンブル計算を行った。

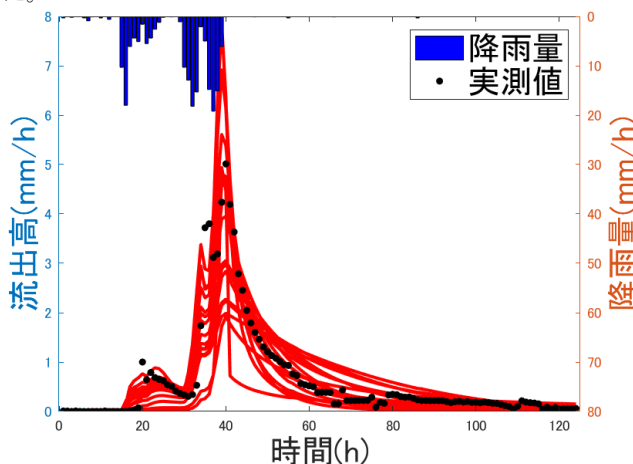


図7 流出パラメータによるアンサンブル計算

それぞれの降雨イベントによって同定されたパラメータは土壌の初期条件、累積降雨量、降雨量ハイトグラフ

の波形などの様々な影響を含んでおり、最も適合するパラメータの値が降雨イベントごとに異なること、またこれらのパラメータ値の違いが流出高に大きな影響を与えることが分かった。

4. 考察と今後の展望

降雨流出現象においてパラメータに大きな不確実性が存在しており、それは流域特性、初期条件に大きく影響されることが分かった。一方で降雨の情報の不確実性の評価にも課題がある。流出解析における入力値である雨量にも様々な測定、予測方法があり、それぞれ空間、時間分解能が異なる。降雨流出現象の予測は不確実な情報を用いており、その不確実さを反映した予測手法の研究が必要な事が分かった。

降水ナウキャストは、現時点のレーダ、アメダスなどの気象資料を基に降雨強度の空間分布を算出し、最短5分間隔の高頻度で数時間先程度の短時間の降雨強度の時間空間分布予測を行う事ができるシステムである。新たな降水域の発生を予測に反映することはできないが、降水域の単純な移動だけでなく地形の効果や直前の降水の変化をもとに降水域の変形や降雨強度の変化を予測することができる。気象庁で現在運用されている降水ナウキャストは決定論的な降水域の時間変化を表すものであり、時間が進むごとに計算のずれが大きくなる。短時間の降雨予測の不確実性を考慮し、今後時間発展ごとの降雨強度の確率分布を表現できる確率的降雨ナウキャストを流出解析の入力情報として用いることで、ある時点からどれほど流入量の不確実性が増大するか時間発展を考慮して検討する事ができると考えられる。今後はこのような観点で不確実性の時間発展を考慮した検討を行っていく。

5. 謝辞

本研究は国土交通省河川砂防技術研究開発、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム領域テーマC「統合的気候変動予測」JPMXD0717935561、科研費基盤研究(B)19H02241の助成を受けた。ここに謝意を記します。

6. 参考文献

- 1) 呉修一; 山田正. 既往概念流出モデルの理論的導出. 水文・水資源学会誌, 2009, 22.5: 386-400.
- 2) 鈴木章弘; 山田朋人. XバンドMPレーダと地上雨量計の降雨検知時間差を利用した降雨量の再推定. 土木学会論文集 G (環境), 2015, 71.5: I_257-I_262.
- 3) 椎葉充晴, 立川康人, 市川温. 水文水工計画学. 京都大学学術出版会. pp364-367. 2013
- 4) 日野幹雄. 水文流出系予測へのカルマン・フィルタ理論の適用. 土木学会論文報告集, 1974, 1974.221: 39-47.5
- 5) 立川康人, et al. 粒子フィルタを用いた河川水位の実時間予測手法の開発. 土木学会論文集 B1 (水工学), 2011, 67.4: I_511-I_516.
- 7) 吉見和紘; 山田正; 山田朋人. 確率微分方程式の導入による降雨流出過程における降雨の不確実性の評価. 土木学会論文集 B1 (水工学), 2015, 71.4: I_259-I_264.