



京都大学防災研究所

Disaster Prevention Research Institute

Kyoto University

一般共同研究

2022G-04

洪水中の斜面表面集中モニタリングによる 高精度洪水予測モデリングの実現

令和 6 年 5 月

代表者：田中 智大

京都大学大学院工学研究科（現・防災研究所）

所内担当者：山口 弘誠

気象・水象災害研究部門

洪水中の斜面表面集中モニタリングによる高精度洪水予測モデリングの実現

研究代表者：田中 智大（京都大学大学院工学研究科（現・防災研究所））

研究期間：令和 4 年 4 月 1 日 ～ 令和 6 年 3 月 31 日

1. 研究目的と実施体制

1.1 研究目的

洪水予測に用いる降雨流出モデルは概念型モデルと物理型モデルに分類される。河川流域の大部分を急峻な森林斜面が占める日本では、地形勾配に沿って雨水が河川へと流出する様子を斜面側方流として表現したキネマティックウェーブモデルに基づく降雨流出解析が物理型モデルとして広く使われている。この種の降雨流出モデルでは、豪雨時に雨水が山腹斜面上の表土層中を流れ、表土層が飽和したときに飽和表面流が発生すると仮定している。しかしながら、この降雨流出過程を支配する表土層に関するパラメータを現地の土壌試験で得ることは容易ではないため、実際には下流の河川流量の観測データに合うようにパラメータを同定するのが一般的である。

流域内の1地点もしくは高々数地点での河川流量データは流域全体の森林土壌パラメータを同定するには本質的に情報が限られており、合理的なモデル構造であっても複数のパラメータの組み合わせが同様の河川流量を再現する等結果性が生じる。その結果、同定事例とは規模の異なる洪水を再現できないパラメータセット（局所解）に陥る可能性がある。もしくは、モデル構造の不完全性によって規模の異なる洪水を再現できないモデルであるにも関わらず同定事例（および限られた検証事例）に適合するためにモデルの改善が容易でない可能性がある。

この課題を解決するため、河川流量以外の観測データを活用する手法が模索されてきた。例えば、降雨時に雨水の流出経路に依存するシリカや酸素同位体等の環境トレーサの観測を行い、トレーサの流出を表現するモデリングの検討が行われてきた。また、山腹斜面上で土壌水分観測を行い、流出モデル内部で計算される土壌水分量の参考値とする研究等が模索されてきた。これらの観測手法は流域の内部状態に関する定量的な情報を提供する一方、観測地点での局所性の影響を大きく受ける方法であり、

そこで、流域内部の情報を面的に得る方法の1つとして、本研究ではタイムラプスカメラを用いて山腹斜面を撮影する方法の適用可能性について検討する。タイムラプスカメラの主な用途は定点撮影による野生動物の生息密度推定や長期間の地研変化であるが、洪水期間を含む夏季の間に撮影を行うことによって、上述の物理型降雨流出モデルが表現する飽和表面流がどの範囲にどのような条件でどの程度発生しているのかを明らかにし、河川流量に基づく降雨流出モデリングを高度化することを目的とする。

1.2 実施体制

本研究は以下の参加者によって、2022年4月から2024年3月までの2年間実施した。

代表・分担等	氏名	所属・職位等
研究代表者	田中 智大	京都大学大学院工学研究科・助教（現 京都大学防災研究所・准教授）
所内担当者 研究分担者	山口 弘誠	京都大学防災研究所・准教授
研究分担者	萬 和明	京都大学防災研究所・准教授
研究分担者	佐藤 嘉展	愛媛大学大学院農学研究科・准教授
研究分担者	高瀬 恵次	石川県立大学生物資源環境学部・客員教授
研究分担者	小森 直人	京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・技術職員
学生参加者	Choi Seonjun	京都大学大学院工学研究科・修士課程

2. 対象流域と観測方法

本研究の対象流域は、木津川流域上流に位置する信楽試験流域（滋賀県甲賀市）である。信楽試験地は気象タワーによる大気観測と地上水文観測によって長期的な流域水熱収支を明らかにする目的で設置された、流域面積が24.2 ha、標高255～420m、平均斜面勾配19.6° の試験流域である（萬ら、2016）。本試験流域では、現在でも継続的に気象変数および河川流量（図1中の青点）が観測されている。降水量は転倒ます式の地上雨量計、河川流量は三角堰で10分ごとに観測されており、本研究では1時間平均値にアップスケールして降雨流出計算に使用した。本研究では気象タワー付近の山腹斜面（図1の斜面T）2か所を含む複数の斜面（図1の斜面AおよびB）にタイムラプスカメラを設置し、

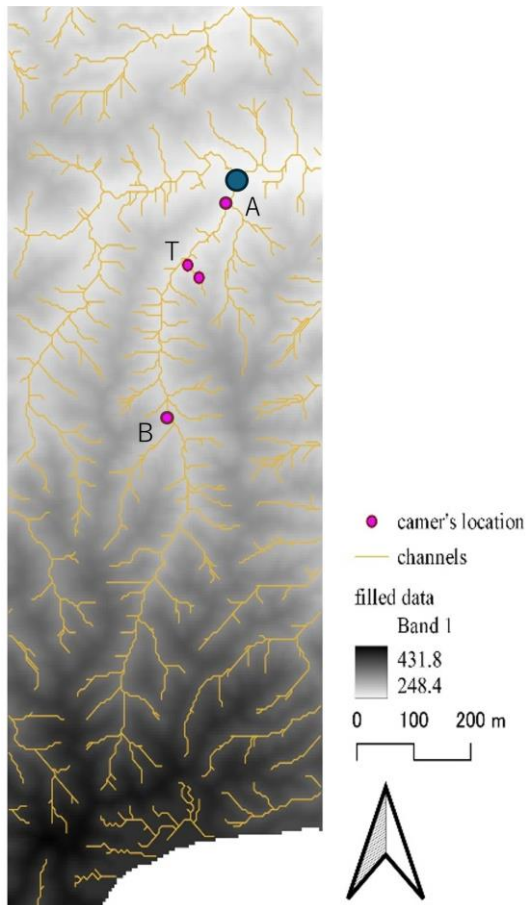


図1. 対象流域図（黄色は洪水時の水みちおよび河道，青丸は流量堰，赤丸はタイムラプスカメラの位置を表す）。

2022年および2023年の夏季（6月～10月）に定点観測を実施した。インターバルは10分で夜間は赤外モードで撮影することによって夜間でも表面流を認識できる状態で撮影を行った。

3. 地表面流の観測結果

撮影結果の一例として、2022年8月16日～18日に発生した豪雨時の斜面Tでの2台のタイムラプスカメラによる表面流の撮影結果を図2に示す。本事例では一雨雨量110mmを観測した。下流部では2日程度に渡って表面流が観測されており、小さな河川のような様子であった。中流部ではより短い期間に急速に流れが発達する様子が確認された。一方、本事例を含めてすべての事例で同斜面より集水面積の小さな斜面AおよびBでは表面流は発生しなかった。このことから、ある程度大きな集水をもつ水みち（信楽試験流域では約 2,250 m² 以上）で表面流が発生することが示唆された。ただし、今回の降水量より大きな豪雨が発生した場合にはそれ以外の斜面でも表

面流が発生する可能性はある。

この事例では下流部と中流部の両方に表面流が発生しているが、下流部のみ表面流が発生した事例も多く見られた。そこで、下流部のみに表面流が発生した事例と中流部でも表面流が発生した事例における一雨雨量の箱ひげ図を図3に示す。両者の降水量には明瞭な違い見られ、降水規模が小さい場合には下流部のみで表面流が発生する様子が確認された。

4. 降雨流出モデルの概要とモデルパラメータの同定・検証方法

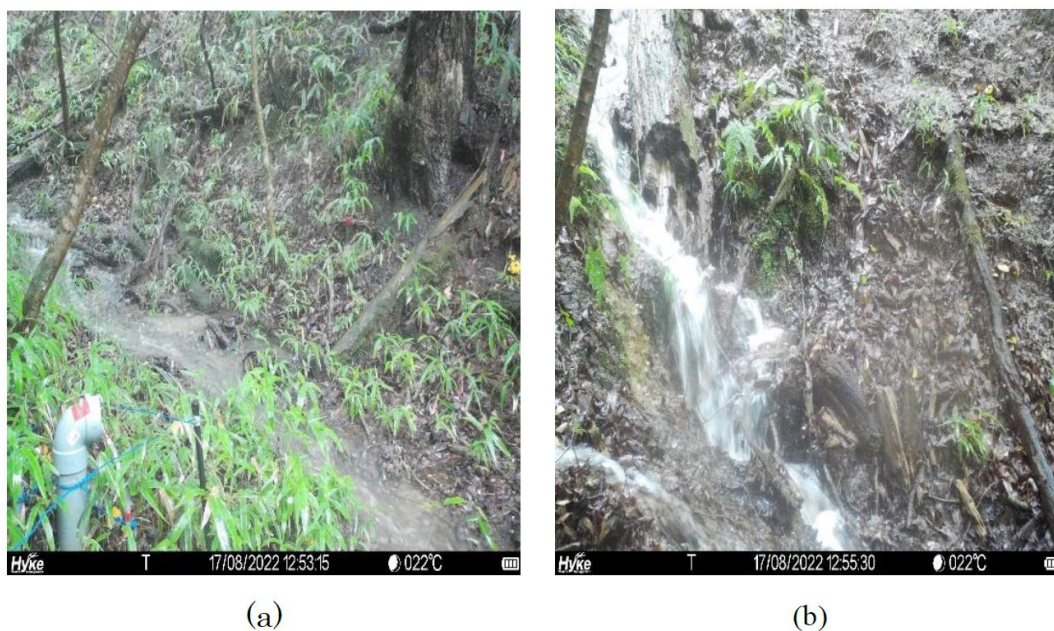


図 2. 気象タワー傍の水みちの (a) 下流部および (b) 中流部に設置したタイムラプスカメラによる 2022 年 8 月の豪雨時の表面流の撮影結果.

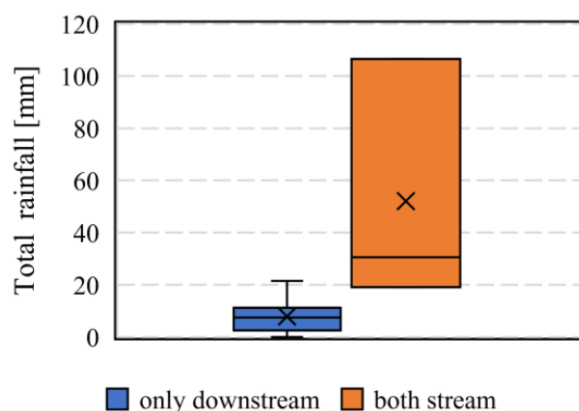


図 3. 2022 年に発生した降水事例において、(青) 下流のカメラのみ、および (橙) 下流および中流の両方のカメラで表面流が発生した事例での一雨雨量の比較.

地表面流の観測結果を反映できる降雨流出モデルとして、本研究では立川ら (2004) が開発したキネマティックウェーブモデルに基づく分布型降雨流出モデル 1K-DHM (Tanaka and Tachikawa, 2015) を用いる. 1K-DHM はセル分布型モデルであり、集水面積が閾値を超過するセルを河道、閾値以下のセルを斜面として河道にはキネマティックウェーブモデルを、斜面セルには以下の地中流をダルシー則で表現したキネマティックウェーブを用いる.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (1)$$

$$q = \begin{cases} d_c i \left(\frac{h}{d_c} \right)^\beta k_c & (h \leq d_c) \\ d_c i k_a / \beta + k_a i (h - d_c) & (d_c \leq h \leq d_a) \\ d_c i k_a / \beta + k_a i (h - d_c) + \frac{\sqrt{i}}{n} (h - d_a)^\alpha & (d_a < h) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 h は水深、 q は単位幅流量、 r は降雨強度を表す。 d_c は不飽和層の空隙に対応する厚さ、 β は不飽和度に応じた不飽和透水係数の低減度合いを表すパラメータ、 k_a は飽和透水係数、 k_c は不飽和層の飽和透水係数、 d_a はA層の空隙に対応する厚さ、 k_a はA層の飽和透水係数であり $k_a = k_c \beta$ とする。 n と i は地表面におけるマンニングの粗度係数と斜面勾配をそれぞれ表す。以上から、斜面要素では d_c 、 β 、 k_a 、 n 、 i の5つのパラメータによって流出形態が決まる。

対象地点での河川流量の観測値と上式に基づく計算値が合致するように5つのパラメータを同定する。観測流量の時系列全体の再現性を評価するため、Nash指標を評価関数に用い、Nash指標が最大となるように大域的パラメータ探索法であるSCE-UA法 (Duan et al., 1994) によって数理的にパラメータを最適化する。このとき、パラメータの自由度が高く複数のパラメータの組み合わせが観測流量を再現できる等結果性 (Equifinality) がたびたび生じる。その結果、規模の異なる他の洪水事例を再現できる適切なパラメータの特定が困難となっている。本研究は、下流の河川流量の観測値に加えて、上流の森林斜面における表面流発生に関するデータを用いることで拘束条件を増やしてより適切な土壌パラメータの特定を試みる。

式 (2) において、第3式、すなわち $d_a > h$ のときにモデル上、表面流が発生したことになる。そこで、タイムラプスカメラを用いて洪水期間中に表面流が発生した期間を特定し、1K-DHMの計算結果から撮影地点において $d_a > h$ となった期間と比較した。河川流域全体を対象とした1K-DHMによる降雨流出計算は空間分解能が約1 km、すなわち1つのセルの面積が約1 km²であり、表面流を撮影している斜面を解像することができない。本研究では、国土地理院の5 m分解能の数値標高モデルからQGISの水文解析によって作成した5 m分解能の水文地形データを用いて5 m分解能の1K-DHMを構築した。

構築した。図1は同地形データに基づいて作成した流域図であり、タイムラプスカメラを設置した斜面（黄色）を適切に表現していることを確認した。

5. 地表面流データを用いた降雨流出モデルの検証

2022年8月の事例に対して上述のSCE-UA法を用いて数理的最適化を行う過程で、6種類のパラメータセットが同様のNash指標を示すことがわかった。そこで、これらのパラメータセットおよび手動で同定した7つのパラメータセットを分析した。これらのうち3つのパラメータによる計算流量を図4 (a)に示す。どのパラメータセットによる結果も洪水ピーク流量と流量低減のタイミングをよく再現しており、Nash指標はそれぞれ0.51～0.63と大きく変わらなかった。一方で、同パラメータセット群における流量流積関係式（図4 (b)）を見ると、同じ水深（土壤水分量）に対応する斜面流出量が大きく異なることがわかる。これはまさに、異なる流出特性を示す土壌パラメータの組が下流地点で見ると同様の洪水波形を示す等結果性を示している。

どのパラメータも集水面積の小さい斜面A、Bでは表面流が発生せず、この点では表面流の観測状況と整合的であった。斜面Tではどのパラメータセットも表面流が発生し、

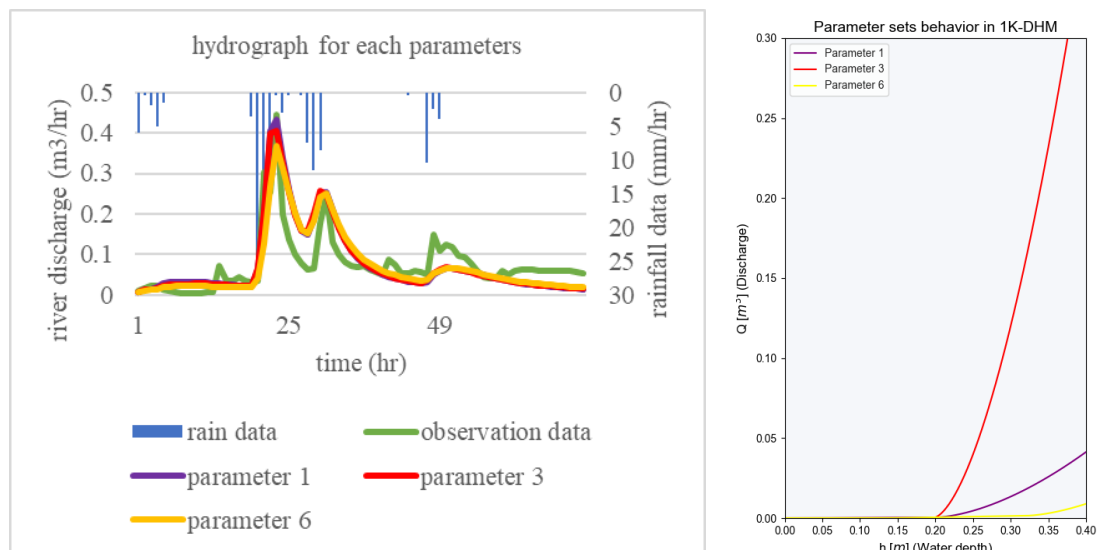


図4. 2022年8月の豪雨事例における (a) 三角堰での観測流量（緑）と同様のハイドログラフを示す3種類のパラメータセット（1, 3, 6）による計算結果および (b) 流量流積関係式。

パラメータセット1, 3, 6の3種類で表面流が発生した期間はそれぞれ下流地点で1,160分, 2,050分, 910分, 中流地点で880分, 1,060分, 560分であった。タイムラプスカメラで撮影された表面流の発生期間は下流地点で2,590分, 中流地点で2,710分であり, 観測流量と表面流の両方において最も整合的なパラメータはパラメータセット3であることが示唆された。

6. 結論と今後の展望

本研究では, 洪水予測に必要な不可欠な森林斜面流域の洪水時に降雨流出モデリングについて, 河川流量等の従来の観測情報に加えて新たな面的情報を加えることでモデル構造やパラメータ設定を高度化することを目的とした。面的な情報として, 本研究ではタイムラプスカメラを斜面上に設置することで山腹斜面上の地表面流の発生状況をモニタリングした。その結果, 降雨流出モデルで表現される飽和地表面流が集水面積の大きな水みちでのみ発生すること, 飽和地表面流の発生条件が一雨雨量と強く関連することがわかった。

地表面流の撮影によって得られた知見を基に, 降雨流出モデルの土壌パラメータに見られる等結果性を解消することを目的として, 観測流量ハイドログラフを再現する複数のパラメータセットに対して地表面流の発生時間を比較した。その結果, ハイドログラフを同程度に表現するパラメータ間でも地表面流の発生状況は大きく異なり, 異なる流出機構でハイドログラフが表現されることが確認できた。また, 地表面流と下流のハイドログラフの両方を再現するパラメータが得られることがわかった。今後は, 本研究の枠組みをより多くの事例に適用して, 豪雨時の雨水流出経路の知見に根差した降雨流出モデルを開発していく予定である。

7. 参考文献

- 立川康人, 永谷 言, 寶 馨 : 飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, pp. 7-12, vol. 48, 2004.
- 萬和明, 前野彰仁, 今井伸太郎, 市川温, 立川康人, 戎信宏, 高瀬恵次, 佐藤嘉展, 山口弘誠, 中北英一. (2016). 信楽森林流域を対象とした現地観測ならびに数値モデルによる土壌水分の動態把握に関する基礎的研究. 水文・水資源学会研究発表会要旨集 水文・水資源学会 2016 年度研究発表会, p. 84.

Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158, 265–284.

T. Tanaka, Y. Tachikawa: Testing the applicability of a kinematic wave-based distributed hydrologic model in two climatically contrasting catchments, *Hydrological Sciences Journal*, 60(7-8), pp. 1361-1373, 2015, DOI:10.1080/02626667.2014.967693.

8. 成果発表

Choi Seonjun, Tomohiro Tanaka, Kazuaki Yorozu, Kosei Yamaguchi, Yasuto Tachikawa: Surface flow monitoring on mountainous hill slope catchment for physically-based flash flood modeling, *Proceedings of 2023 Annual Conference, Japan Society of Hydrology and Water Resources/Japanese Association of Hydrological Sciences*, PP-1-1-15, 2023/9.

田中智大: 分布型降雨流出モデルの高度化に向けた山地試験流域における地表面流撮影と降雨流出解析, 第 11 回 ISPU セミナー, 石川県政しいのき迎賓館セミナールーム A, 2024/3.