

平成29年九州北部豪雨を外力とした赤谷川流域の地表面流と洪水氾濫流のダイナミック解析

NUMERICAL SIMULATIONS OF OVERLAND AND FLOOD-INUNDATION FLOWS USING DYNAMIC MODEL IN AKATANI RIVER BASIN DURING KYUSHU-HOKUBU HEAVY RAIN IN 2017

重枝末玲¹・秋山壽一郎²・王 少博³・平井大己⁴・勝原亮介³

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA, Shaobo WANG,
Daiki HIRAI and Ryosuke KATSUHARA

¹正会員 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 九州工業大学名誉教授 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学府建設社会工学専攻博士前期課程 (同上)

⁴非会員 元九州工業大学 工学部建設社会工学科 (同上)

Numerical simulations of overland and flood-inundation flows in Akatani river basin during Kyushu-hokubu heavy rain in 2017 were performed by dynamic model. The model is based on two-dimensional shallow water equations with mass sinks due to infiltration processes. The Green-Ampt method is used for estimation of infiltration rate and cumulative infiltration volume. The model was also verified against observed flood marker and maximum inundation area. It showed that the proposed model can reproduce it with reasonable accuracy. The effects of infiltration and terrain change due to sediment on the flood-inundation process was also examined based on the numerical results.

Key Words : Numerical model, dynamic overland and flood inundation flow model, infiltration, terrain change, the Akatani river, Kyushu-hokubu heavy rain in 2017

1. はじめに

近年, 想定を超えた豪雨による水災害が頻発している¹⁾²⁾. 近年の水災害の特徴は, 中山間地を貫流する中小河川流域で水・土砂・流木などの複合災害が発生している点にあり, このような中小河川における危機管理対策の策定は喫緊の課題である³⁾.

中山間地の中小河川では, 一般に, 国が管理する大河川に比べ整備が遅れているため, 治水施設による治水安全度は低く, 大河川以上に危機管理対策が重要になる. また, 水文観測(河川水位, 河川流量)に関するデータは少なく, 近年の豪雨災害を受け, 危機管理のための水位計の設置が緊急に進められている³⁾ものの, 洪水到達時間が短いことから, 避難のためのリードタイムを確保する水位設定, 水位計の適切な設置位置のあり方にも課題が残る. そのため, レーダ雨量や地上雨量計による降雨量が, 流域全体での危機管理の判断を行うための唯一の

情報と考えられる. 降雨量に基づく危機管理対策には, 豪雨時に起こりうる斜面崩壊・土石流・洪水氾濫の現象をあらかじめ把握し, 流域レベルでの複合災害リスクの評価・分析することが重要となる. そのためには, 降雨量の時空間分布から, ①流域から河道への降雨流出, ②河道での洪水流および氾濫原での氾濫流の挙動, ③斜面崩壊から土石流～掃流状集合流動～掃流砂・浮遊砂と遷移する流域から河道・氾濫原への土砂移動, ④斜面から河道への流木の流入, 河道・氾濫原での輸送・堆積や構造物による捕捉の一連の現象を把握する技術が不可欠となる.

近年では, 上記の観点から, 水・土砂・流木を伴う洪水氾濫現象を予測する技術開発⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾が積極的に行われており, 各現象を対象にした予測やそれらを統合した技術が開発されている. しかし, そのためには, 水文学, 河川工学, 地盤工学, 砂防工学等に関する幅広い技術を統合する必要があることから, 上記のような一連の現象を予測できるまでには至っていないのが実状である. 著

者らは、降雨を外力として、流域レベルでの表面流の挙動をダイナミック平面2次元モデルで取り扱う、降雨流出・洪水氾濫ダイナミック解析モデルを構築し、同モデルが赤谷川流域の痕跡水位や最大浸水域を再現できることを示した⁹⁾。同モデルをベースモデルとし、上記の③や④の現象の取り扱いを組み込むことができれば、降雨量から、斜面崩壊、土石流や泥流、流木、河道・河床変動を伴う洪水氾濫の一連の現象を予測できるツールになると考えられる。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、降雨外力から、水・土砂・流木の挙動を予測し、危機管理対策の策定に供する数値モデルの開発を最終的な目的としている。ここでは、著者らが開発した降雨流出・洪水氾濫ダイナミック解析モデル⁹⁾に、雨水の土壌への浸透を新たに組み込み、平成29年7月九州北部豪雨時の赤谷川流域を対象に、同モデルを用いた降雨流出・洪水氾濫ダイナミック解析を実施し、同モデルの再現性、土壌への浸透、土砂堆積が浸水域や浸水プロセスに及ぼす影響を検討した。

2. 降雨流出・洪水氾濫ダイナミック解析モデルの概要

降雨流出・洪水氾濫ダイナミックモデルは、流域の地表面流、河道の洪水流、氾濫原の氾濫流をダイナミックモデルで取り扱うモデルであり、著者らの開発したSA-FUF-2DFモデルに河道内構造物の簡易的な取り扱いを組み込んだ数値モデルをベース^{10),11)}としている。本研究では、雨水の土壌への浸透に関する取り扱いを、同モデルに新たに組み込んだ。

基礎方程式は、式(1)に示す降雨による流域への流入流量、土壌への雨水の浸透流量を連続の式に考慮した2次元浅水流方程式である。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} = \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2 \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = (h, uh, vh)^T; \mathbf{E} = (uh, u^2h + 1/2 gh^2, uvh)^T;$$

$$\mathbf{F} = (vh, vuh, v^2h + 1/2 gh^2)^T; \mathbf{S}_2 = (q_r - f_i, 0, 0);$$

$$\mathbf{S}_1 = (0, gh(S_{ox} - S_{Lx} - S_{fx}) - F_x, gh(S_{oy} - S_{Ly} - S_{fy}) - F_y)$$

ここに、 $\mathbf{U}$: 保存量ベクトル、 $\mathbf{E}$, $\mathbf{F}$: x , y 方向の流束ベクトル、 $\mathbf{S}_1$: 河床・エネルギー損失・摩擦勾配ベクトル、 $\mathbf{S}_2$: 発生項ベクトル、 h : 水深、 u , v : x , y 方向の流速、 g : 重力加速度、 q_r : 単位面積当りの流入流量、 f_i : 土壌への単位面積当りの浸透流量、 S_{ox} , S_{oy} : x , y 方向の河床勾配($=-\partial z_b/\partial x$, $-\partial z_b/\partial y$)、 S_{Lx} , S_{Ly} : x , y 方向のエネルギー損失勾配、 S_{fx} , S_{fy} : x , y 方向の摩擦勾配、 F_x , F_y : 計算メッシュ内に樹木などの物体群が含まれる場合に付加される x , y 方向の流体力項、 z_b : 河床位である。摩擦勾配についてはManningの式で、河道内の橋脚や堰などによるエネルギー損失については参考文献^{10),11)}と同様な方法で算定する。

単位面積当りの流入流量 q_r は式(2)より、土壌への単位



図-1 赤谷川流域の概要

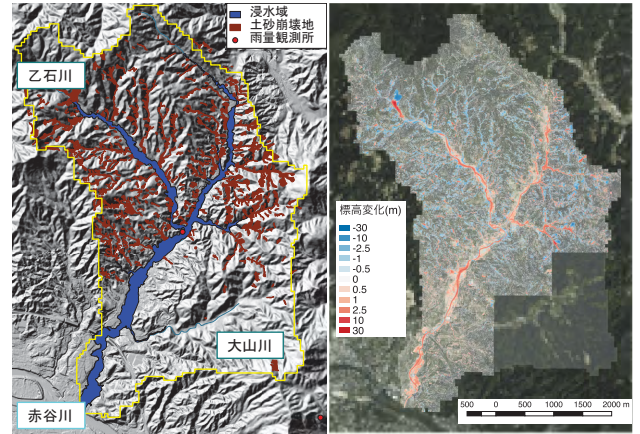


図-2 浸水域と土砂崩壊地

図-3 被災前後の標高差

面積当りの浸透流量 f_i は式(3)より算定した。

$$q_r = f \cdot R \cdot 3.6 \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$f_i = \begin{cases} q_r(t) & \text{if } q_r(t) \leq f_p(t) \\ f_p(t) & \text{if } q_r(t) > f_p(t) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 f : 流出係数、 R : 降雨強度(mm/h)、 f_p : 浸透能(m/s)である。流出係数 f は、土壌の浸透を考慮しない場合には、土地利用に応じた値¹²⁾を、土壌への浸透を考慮する場合には、 $f=1.0$ を与えた。浸透能 f_p は、式(4)のGreen-Ampt式¹³⁾より算定した。

$$f_p = \{ F(t + \Delta t) - F(t) \} / \Delta t \quad (4)$$

$$F(t + \Delta t) - F(t) - \Psi_f \Delta \theta \ln \left(\frac{F(t + \Delta t) + \Psi_f \Delta \theta}{F(t) + \Psi_f \Delta \theta} \right) = K \Delta t$$

ここに、 $F(t)$: 時刻 t での累加浸透量(m)、 K : 飽和透水係数(m/s)、 Ψ_f : 濡れ前線付近での土壌吸引圧(m)、 $\Delta \theta$: 空隙率と初期体積含水率の差($\phi - \theta_I$)、 ϕ : 土壌の空隙率、 θ_I : 初期の体積含水率である。なお、土壌には見かけの土層厚 H_g を設定し、累加浸透量 F が土層厚 H_g を超えた場合には $f_p=0$ とした。

数値解析手法には、有限体積法と流束差分法を用いた。水のあるwet状態から水の無いdry状態あるいはその逆となるような斜面で負の水深が発生した場合には、計算が発散しないように、河床・エネルギー損失勾配・摩擦勾配ベクトルに対して補正するような処理が施されている。数値解析法の詳細については参考文献⁹⁾を参照されたい。

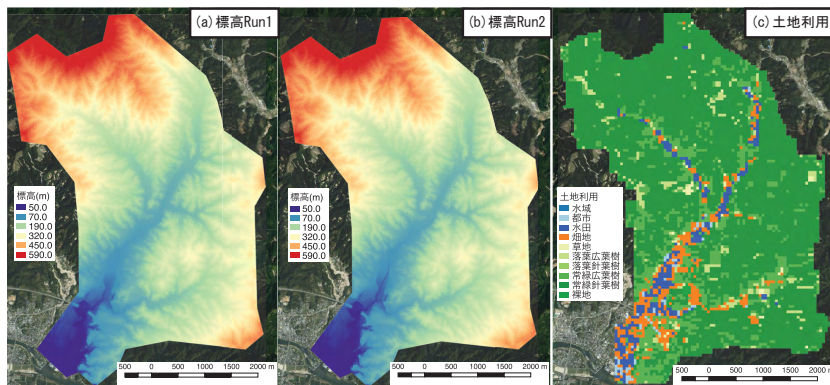


図-4 解析に用いた標高と土地利用

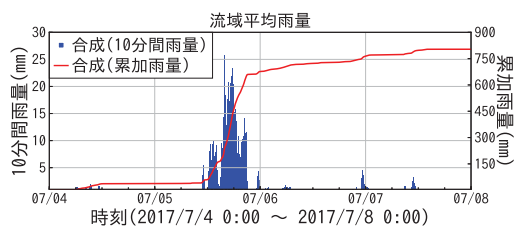


図-5 流域平均10分間雨量ハイトグラフ

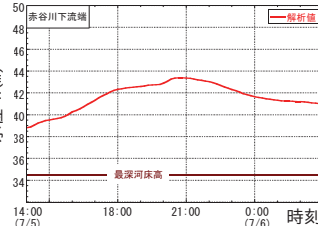


図-6 下流端水位ハイトログラフ

表-1 土地利用と粗度および流出係数

土地利用分類	粗度係数n	流出係数f
水域	0.025	1
都市	0.04	0.9
水田	0.025	0.7
畑地	0.025	0.6
草地	0.03	0.6
落葉広葉樹	0.06	0.7
落葉針葉樹	0.06	0.7
常緑広葉樹	0.06	0.7
常緑針葉樹	0.06	0.7
裸地	0.03	0.7

表-2 Green Ampt式のパラメータ

飽和透水係数K(m/s)	1.0×10^{-6}
濡れ前線付近での 土壌吸引圧 Ψ_f (m)	0.4
土壌の空けき率と 初期体積含水率の差 $\Delta\theta$	0.4
みかけの土層厚 H_g (m)	0.4

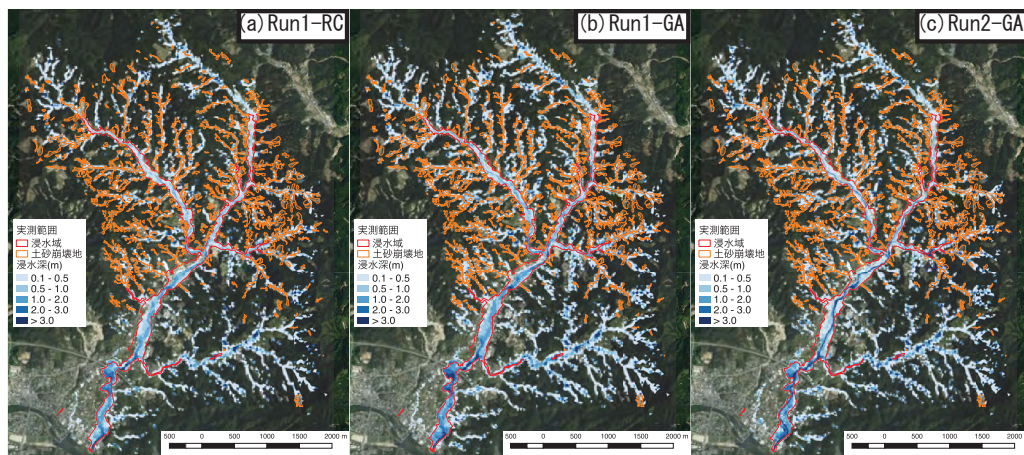


図-7 解析最大浸水深と実測浸水域との比較

3. 赤谷川流域への適用

(1) 赤谷川流域と平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害での被害の概要

赤谷川流域の概要を図-1に示す。赤谷川は、筑後川の50.7km地点で合流する延長15.0kmの支川である。赤谷川の流域面積は20.1km²であり、その土地利用は、山林88%、畑・丘陵・放牧地・公園7%、水田4%、宅地1%である。なお、同図の背景には、国土地理院の全国最新写真（シームレス）¹⁴⁾を用いた。

平成29年7月九州北部豪雨では、赤谷川流域で大量の土砂や流木による河道埋塞に伴う流水被害が生じた¹⁾。図-2に、同流域の浸水域および土砂崩壊地¹⁵⁾を、図-3に、平成29年7月豪雨災害前後に計測された1mメッシュのLPデータによる標高差を示す。図-3では、被災後に土砂が崩落した場合には負の値、堆積した場合には正の値となる。なお、大山川周辺の標高については、被災後のデータしか入手できなかったため、同一のデータを使用して

いる。これより、土砂の崩落や洗掘は、(1)乙石川流域で多く発生していること、(2)次に赤谷川流域上流域で発生していること、(3)乙石川・赤谷川に沿って標高が上昇していることから、流域から生じた土砂は、河道に沿って堆積したこと、特に、乙石川との合流点より下流の赤谷川で土砂堆積が顕著であること、などが確認できる。なお、図-2、3の背景には、それぞれ国土地理院の陰影起伏図¹⁴⁾、全国最新写真（シームレス）¹⁴⁾を用いた。

(2) 解析条件の概要

被災後の標高を用いた解析をRun1、被災前の標高を用いた解析をRun2とし、地形変化と土壌への雨水の浸透の影響を検討する目的で、土壌への雨水の浸透を流出係数で取り扱った解析Run1-RCとGreen-Ampt式で取り扱った解析Run1、2-GAを実施した。解析対象時刻は、平成29年7月5日7時から6日6時とした。標高には、平成29年7月豪雨災害前後に計測された1mメッシュのLPデータを、土地利用データにはALOS2¹⁵⁾を用いた。図-4に、解析に用いた標高と土地利用を示す。なお、これらの図

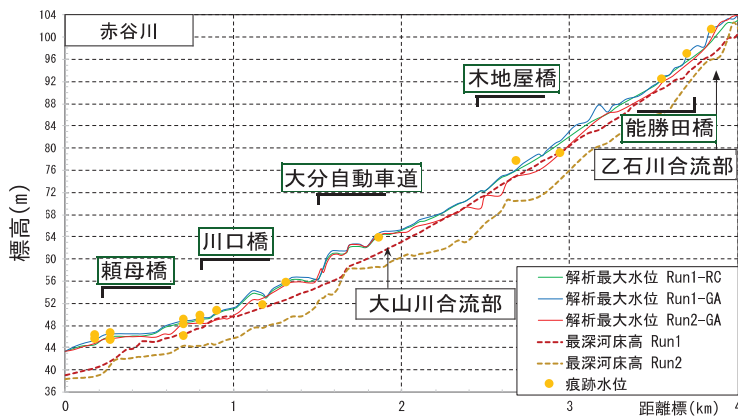


図-8 解析最大水位と痕跡水位との比較

の背景には、国土地理院の全国最新写真（シームレス）¹⁴⁾を用いた。粗度係数は、土地利用に応じて表-1のように与えた。Run1-RCでは、流出係数を土地利用に応じて表-1のように与え、Run1, 2-GAでは、降雨の土壌への浸透は土地利用が山地の場合にのみ考慮し、Green-Ampt式のパラメータを表-2のように設定した。なお、本解析では土質等に応じてパラメータを変化させておらず、一律の値を用いている。土質に応じたパラメータ設定については、今後の課題である。

本豪雨災害は、局地的な短時間の集中豪雨が要因であるため、降雨外力には、国土交通省が運用・管理するXRAIN¹⁷⁾を、ダイナミックウィンドウ法¹⁸⁾により流域内の雨量観測所の実績降雨に基づき補正したレーダ雨量を用いた。ダイナミックウィンドウ法は、地上雨量とその観測地点に重なるセルのレーダ雨量との比を計算し、このレーダと地上雨量との比を重み付きで内挿した後、各セルのレーダ雨量に掛け合わせることで、レーダ雨量を補正する方法である。また、レーダ雨量の各セルに対して、最も隣接しているアメダス雨量観測所の月別歴代1位の10分間雨量に+5mmしたものを雨量限界値とし、補正值がこの雨量限界値を超えた場合、雨量限界値に置き換える処理を行った¹⁹⁾。図-5に、解析に用いた赤谷川流域の48時間雨量と流域平均雨量を示す。解析の初期条件はドライ条件(水深・流速0)とした。下流端水位については、1次元河道ネットワークモデルによる分布型流出・1次元洪水流解析¹⁹⁾より得られた図-6の筑後川本川との合流点での水位ハイドログラフを与えた。

(3) 結果と考察

図-7に、Run1-RC, Run1, 2-GAの解析最大浸水深と実測浸水域¹⁾の比較を、図-8に、赤谷川下流から乙石川合流点までの最深河床高の変化、Run1-RC, Run1, 2-GAの解析最大水位と痕跡水位¹⁾との比較を、図-9に、赤谷川下流でのRun1-RC, Run1, 2-GAの流量ハイドログラフの解析結果の比較を示す。なお、図-7中には土砂崩壊地もあわせて示している。また、解析結果の背景には、国土地理院の全国最新写真（シームレス）¹⁴⁾あるいは陰影起伏図¹⁴⁾を用いた。

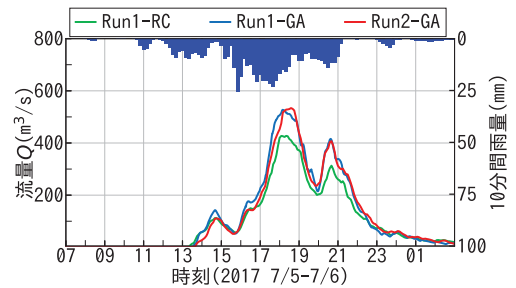


図-9 流量ハイドログラフの比較

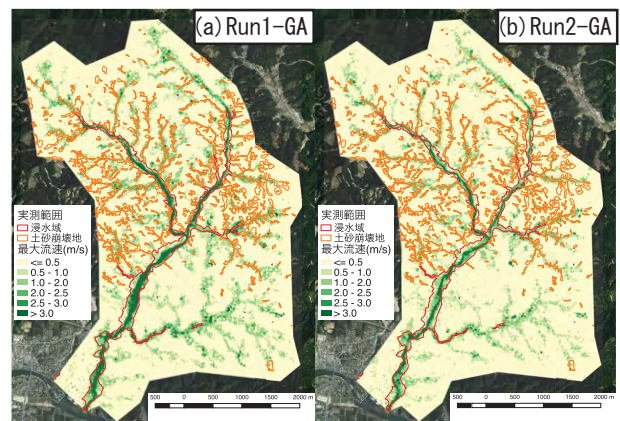


図-10 Run1とRun2-GAの流速の最大値

まず、土壌への雨水の浸透の影響を検討する目的で、被災後の標高データを用い、降雨の土壌への浸透を流出係数で取り扱ったRun1-RCとGreen Ampt式で取り扱ったRun1-GAの解析結果とを比較した。図-7, 8から、(1) Run1-GA, Run1-RCのいずれも最大浸水域や痕跡水位を再現していること、(2) Run1-GAは、Run1-RCに比べ、最大浸水深および水位を若干ではあるが大きく評価していること、(3) その差は、乙石川との合流部周辺で顕著であること、などが確認できる。また、図-9から、(4) Run1-GAは、Run1-RCと波形は同様となるが、ピーク流量が大きくなること、(5) そのピーク流量は、Run1-GAで526m³/s、Run1-RCは426m³/s、ピーク発生時刻は18時ごろであること、などが確認できる。筑後川右岸流域河川・砂防復旧技術検討委員会報告書¹⁾では、合理式に基づきピーク流量は520m³/sと推定されており、Run1-GAでは同程度の値となった。Run1-RCとGAの解析結果の差は、10分間雨量が20mmを超える時間帯から発生していることから、Run1-RCでは流出係数で一定の雨量を損失させ続けるのに対し、Run1-GAでは雨量に応じて浸透能 f_p が変化するため、土壌に浸透できなかった雨水が表面流となって流下し、Run1-GAの流量が増加したと考えられる。ただし、本解析では土壌流の中間流を考慮しておらず、その影響が不明であるため、今後、中間流を考慮した解析モデルを構築し、その影響を明らかにする必要がある。

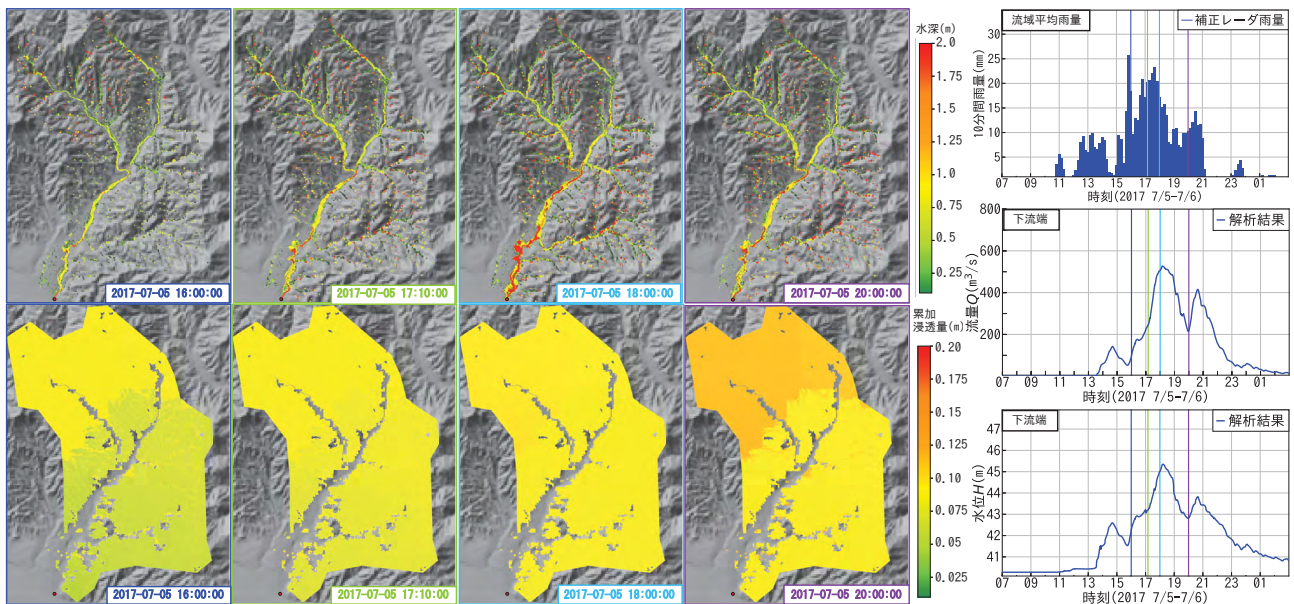


図-11 Run1-GAの水深と累加浸透量 F の経時変化

次に、地形変化の影響を検討する目的で、降雨の土壌への浸透をGreen-Ampt式で取り扱い、被災後の標高データを用いたRun1-GAと被災前の標高データを用いたRun2-GAの解析結果とを比較した。図-7から、(1)当然のことながら、Run1-GAの最大浸水深は、河道が土砂で埋塞されていないRun2-RCに比べ、氾濫原で大きくなること、一方で、Run2-RCでは河道で大きくなること、(2)赤谷川流域は谷底平野であり地形に沿って氾濫流が流れるため、浸水深には違いがあるものの、最大浸水域については両者には大きな違いはないこと、などが確認できる。図-8から、(3)Run1-GAは、Run2-GAに比べ地形変化により水位を大きく評価していること、(4)一方で大山川合流部の1.8km～2km付近では、Run1、2-GAの水位には大きな差が生じておらず、同区間は狭窄部に対応することから、河道縦断変化より平面形状が水位上昇に影響を及ぼしていること、図-9から、(5)ピーク流量は概ね一致するが、Run1-GAは、Run2-GAに比べピーク発生時刻が30分程度早いこと、などが確認できる。図-10に、Run1-GAとRun2-GAの流速の最大値を示す。これより、被災前の地形を用いたRun2-GAでは、最大流速が旧河道に集中しているのに対して、Run1-GAでは氾濫原まで流速の高い領域が拡大していることが確認できる。このように、土砂が河道埋塞することで、流速の高い範囲が氾濫原へ拡大することで、家屋被害を拡大させたと考えられる。

最後に、Run1-GAの解析結果に基づき、雨水の挙動と土壌水分状況について検討した。図-11に、Run1-GAの水深と累加浸透量 F の経時変化を示す。なお、図中には赤谷川流域の流域平均雨量と下流での流量・水位ハイドログラフも示している。これより、豪雨による雨水が赤谷川を流下するプロセスと土壌の水分状況は、次の通りであったと考えられる。(1)同流域では12時ごろから豪雨となる。(2)16時ごろに10分間雨量25mmを超える豪雨が発生した後、赤谷川の流量は急激に上昇する。その時刻

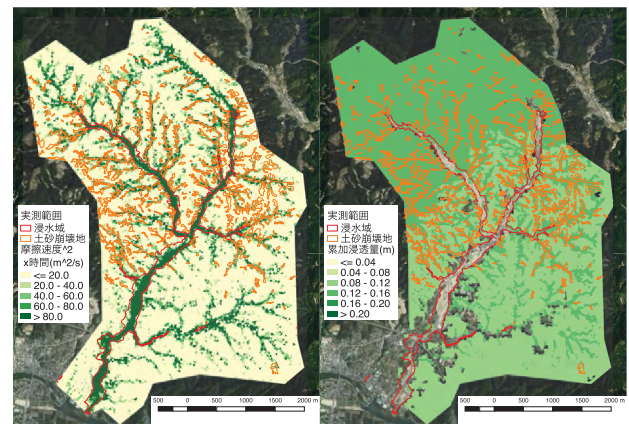


図-12 摩擦速度の2乗の時間積分値(左)と累加浸透量(右)

では、累加浸透量は赤谷川・乙石川上流域で大きく0.1m程度となる。(3)17時10分ごろには流域全体で雨水が赤谷川へと流下し、18時ごろに赤谷川下流の流量はピークを迎える。その時刻では、累加浸透量 F は赤谷川・乙石川重流域周辺で大きく0.15m程度となる。(4)その後、赤谷川は減水し、20時ごろの豪雨で一時増水するが、その後、少雨となり減水する。上記の(3)は、17時には赤谷川に近づけなかった²⁾ことなどの報道と一致しており、その妥当性が窺える。図-12に、Run1-GAの摩擦速度の2乗の時間積分値と7月5日23時の累加浸透量 F を示す。同時刻は雨が一時降り止む時間帯である。また、摩擦速度の2乗の時間積分値は底面に作用するせん断力の力積を表しており、値が大きいほど、他の領域に比べ高い底面せん断力が長時間継続したことを示す。図中には浸水域および土砂崩落地も合わせて示している。これらより、摩擦速度の2乗の時間積分値と累加浸透量は、土砂崩落地で大きくなる傾向にあること、などがわかる。このことから、土砂崩落地では、土壌には多くの水分が含まれているとともに、流れによる比較的大きなせん断力が長時間作用していたと考えられる。このことは、今後、実験等の検証

が必要となるが、本解析法が、土壌水分の状況と土壌が受けるせん断力を評価でき、この情報を用いることで、土砂崩落地の予測につながると考えられる。この点については、本モデルへの土壌中の水流や土砂輸送の導入も含め、今後のさらなる検討が必要である。

4. おわりに

本研究では、雨水の土壌への浸透を考慮した降雨流出・洪水氾濫ダイナミック解析モデルを平成29年7月九州北部豪雨時の赤谷川流域を適用し、同モデルの再現性、土壌への浸透、土砂堆積が浸水域や浸水プロセスに及ぼす影響を検討した。その結果、(1)同モデルが、痕跡水位、実測浸水域を再現できること、(2)浸透能の経時変化を考慮した解析は、考慮しない解析に比べ、土壌に浸透できなかった雨水が表面流となって流下するため、ピーク流量が大きくなるが、発生時間は大きく変化しないこと、(3)被災前の標高を用いた解析は、痕跡水位を過小評価しており、支川の大山川よりも上流側で堆積土砂の影響が大きいこと、(4)ピーク流量は、被災前後の標高には関係なく同程度であること、(5)より詳細なプロセスの把握には、土壌中の流れや土砂輸送を考慮する必要があること、などが確認された。

謝辞：本研究を実施するに当たり、国土交通省九州地方整備局河川部、文部科学省の委託事業により開発・運用されているデータ統合・解析システム(DIAS)からデータの提供を受けた。科学研究費特別研究促進費(課題番号：17K20140、研究代表者：秋山壽一郎)の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：梅雨前線に伴う平成29年7月5日出水について(第3報), http://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/bousai_kasen03.pdf, 2017(参照 2019/03/19)。
- 2) 国土交通省：平成30年7月豪雨における被害等の概要, http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/daikibokouikigouu/1/pdf/daikibokouikigouu_01_s2.pdf, 2018(参照 2019/03/19)。
- 3) 国土交通省：中小河川緊急治水対策プロジェクト, http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo03_hh_000933.html, 2017(参照 2019/03/19)。
- 4) 佐山敬洋：九州北部豪雨被災域の降雨流出特性と観測情報のない中小河川流域における洪水予測, 平成29年7月九州北部豪雨災害に関する総合的研究報告書, pp.59-pp.67, 2018。
- 5) 山崎 祐介, 江頭 進治, 南雲 直子：豪雨時における土砂流出量の推定法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_931-I_936, 2018。

- 6) 江頭進治, 原田大輔, 南雲直子, 山崎祐介, 萬矢敦啓：崩壊・土石流による堆積土砂に着目した微細砂の流出予測法-2017 年 7 月九州北部豪雨災害時の赤谷川を対象として-, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_925-I_930, 2018。
- 7) 原田大輔, 江頭進治：流砂・流木を伴う洪水流の解析-2017 年7月 九州北部豪雨による赤谷川洪水を対象として-, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_937-I_942, 2018。
- 8) 鈴木拓郎, 内田太郎, 岡本 敦：土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究, 砂防学会誌, 第66巻, 2号, pp.21-30, 2013。
- 9) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 王少博, 勝原亮介：赤谷川流域を対象にしたダイナミック降雨流出・洪水氾濫解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_697-I_702, 2018。
- 10) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 大久保剛貴, 中木翔也：河川横断構造物の簡易的な取り扱いを組み込んだ平面2次元洪水流モデルの構築, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I_1423-I_1428, 2017。
- 11) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 大久保剛貴, 中木翔也：橋梁を簡易的に考慮した山国川流域の洪水氾濫解析, 河川技術論文集, 第23巻, pp.13-18, 2017。
- 12) 国土交通省：河川砂防技術基準調査編, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/pdf/00.pdf, 2012。
- 13) Green, W. H. And Ampt, G. A.: Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils, *Journal of Agricultural Science*, Vol.4, pp.1-24, 1911。
- 14) 国土地理院：地理院タイル一覧, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>, 2019。
- 15) 国土地理院：<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, 2017。
- 16) JAXA：高解像度土地利用土地被覆図ホームページ, http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/jlulc_jpn.htm, 1997。
- 17) DIAS：<http://www.diasjp.net/service/xrain/>, 2017(参照 2019/03/19)。
- 18) 山口高志, 北川明, 小野寺直, 高水克哉, 幸弘美：レーダ雨量計の精度向上について, 河川情報研究, No.1, pp.91-104, 1993。
- 19) 山田隆徳, 宮武真一, 小池仁治, 安部俊司, 小淵孝志, 今村英智, 柴卓：部外雨量データの収集と利用について-他機関観測データ収集・高度利用装置の概要-, 測候時報, 第78巻, pp.141-161, 2011。
- 20) 重枝末玲, 秋山壽一郎, 中木翔也, 勝原亮介, 大久保剛貴：平成29年7月九州北部豪雨時の筑後川右岸流域を対象にした分布型流出・1次元河道網洪水流解析, 河川技術論文集, 第24巻, pp.445-450, 2018。
- 21) 毎日新聞：<https://mainichi.jp/>, 2017。

(2019. 4. 2受付)