

# シミュレーションによる乙石川流域の長期的な 地形変化に関する検討

## EXAMINATION OF LONG-TERM TOPOGRAPHICAL CHANGES IN THE OTOISHI RIVER BASIN BY SIMULATION

池見 洋明<sup>1</sup>・高橋 美桜<sup>2</sup>

Hiro IKEMI and Mio TAKAHASHI

<sup>1</sup> 日本文理大学工学部建築学科 (〒870-0397 大分県大分市一木 1727)

E-mail: ikemih@nbu.ac.jp

<sup>2</sup> 日本文理大学大学院工学研究科 (〒870-0397 大分県大分市一木 1727)

**Key Words:** Otoishi River basin, landform simulation, Landlab,

### 1. はじめに

福岡県朝倉市に位置する乙石川流域では平成 29 年の豪雨災害によって谷底平野が著しく侵食され、河道沿いに約 10m 幅の破碎帯を伴う断層露頭が確認された(朝日新聞デジタル, 2017.11.25)。池見ほか(2018)<sup>1</sup>では、災害時に公開された 1m 解像度のデジタル標高モデルを用いて地形解析をした結果、流域の右岸と左岸における地形量に差異を報告している。また崩壊面積率が 5%を超える流域では、流域地形と崩壊面積に相関が確認できるとした。この結果をふまえて、池見ほか(2018)<sup>2</sup>では左岸と右岸の支流の

シリカフラックスを分析し、左岸からの単位面積あたりの土砂供給量が右岸よりも多かったことを推定した。

山地流域規模の地形変化は、土石流や斜面崩壊などの短期的な地形変化に比べて、遥かに長い時間をかけて進行すると考えられている。本報告では、近年提案されている地形プロセスをベースとした解析技術を用いて、乙石川流域の長期的な地形シミュレーションを実施する。その結果から得られる地形の変化域と平成 29 年豪雨災害による崩壊状況を比較して、時間スケールの異なる地形変化の関係性について検討する。

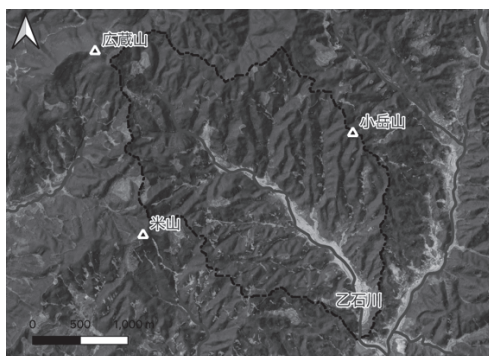


図-1 乙石川流域の災害後の空中写真(左)と地質分布(右)  
(空中写真は地理院タイル, 地質分布は産総研シームレス地質図よりそれぞれ引用した)

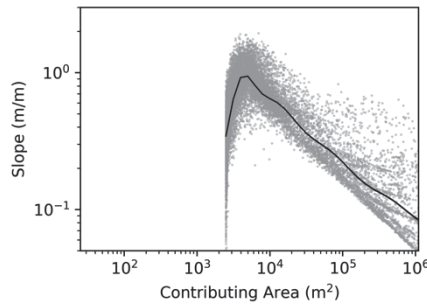
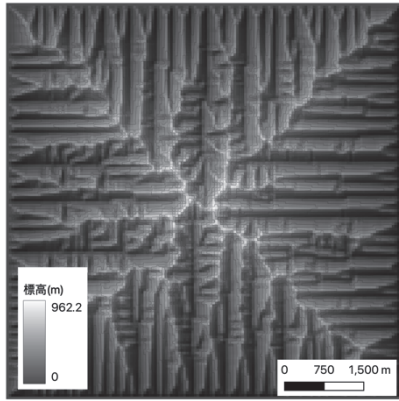


図-2 模擬地形（上）と流域面積と傾斜の関係（下）

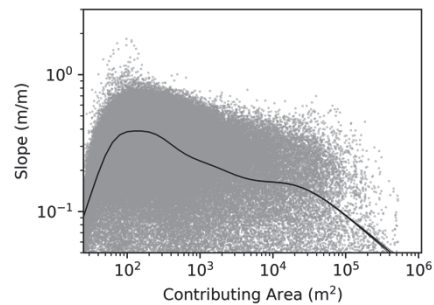
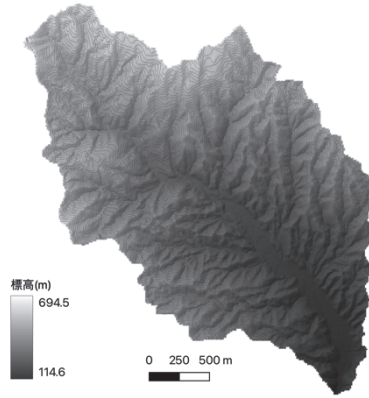


図-3 乙石川流域地形(上)と流域面積と傾斜の関係(下)

## 2. 乙石川流域の地形・地質

乙石川は赤谷川の右岸支流で北西-南東方向の河道をもち、三郡山地南部の広蔵山、小岳山、米山を分水嶺とする(図-1)。流域面積は5.9km<sup>2</sup>で、20以上の支流から構成されている。乙石川沿いに形成する谷底平野は、上流、中流、下流にある狭窄部によって、その広がり方が規制され、二つにくびれた特徴的な形状を呈している。地質は、主に中・古生代の結晶片岩が上流に、中生代花崗岩類が下流域に分布する。H29年豪雨災害では谷底平野での浸食により、乙石川上中流の狭窄部で新たに鉛直成分をもつ横ずれの断層が発見された(朝日新聞デジタル, 2017.11.25)。現地調査により、この断層は乙石川の河道方向と同じ、北西-南東の走向をもち、10m以上の破碎帯を伴っていることを確認した。

## 3. 地形シミュレーション手法の概要

### (1) Pythonコードの開発

長期的な地形形成のシミュレーションコードの開発には、オープンソースのLandlab<sup>3),4)</sup>を用いる。Landlabは数値地形モデルを構築するためのPythonベースのモデリングツールセットであり、地形学、

水文学、植生生態学、雪氷学、層序学などの地表のダイナミクスを定量化する分野や2Dグリッドベースの数値モデルを必要とする分野に適用できるとされている。Landlabはツールセットなので、その使用にはPythonコードの開発が必要となるが、Landlabパッケージの中には様々なPythonコードが例示されている。また開発環境にJupyter notebookが使用されているため、コードの判読も比較的容易である。本研究のコード開発は、その中の「Modeling Hillslopes and Channels with Landlab」をベースに行った。

開発するコードではPerron *et al.*(2009)<sup>5)</sup>などで提案されている以下の地形プロセスの基本式(1)を用いる。

$$\frac{\delta z}{\delta t} = U + D \cdot \nabla^2 z - K \cdot A^m \cdot \nabla z \quad (1)$$

ここで、 $z$ は地標高(L)、 $t$ は時間(T)、 $U$ は地殻の鉛直方向の変位、 $\nabla z$ は無次元の地形勾配(L<sup>-1</sup>)、 $\nabla^2 z$ は地形の凹凸を示すラプラシアン(L<sup>-1</sup>)、 $A$ は流出寄与域(L<sup>2</sup>)を示す。 $D, K, m$ はそれぞれ定数値であり、シミュレーションのモデルパラメータとなる。この中で $D$ は拡散係数のような単位(L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>)をもつ値で、斜

面プロセスの土砂移動に関わる比例定数,  $m$ ,  $K$ は河川プロセスの土砂移動に関わる定数である. このモデル式では、左辺の地標高の時間変化:  $\delta z/\delta t$  ( $LT^{-1}$ )を地殻の上下運動:  $U$ , 斜面プロセスによる土砂フラックスの式:  $D \cdot \nabla^2 z$ , 河川プロセスによる土砂フラックスの式:  $K \cdot A^m \cdot \nabla z$ で説明している. 斜面プロセスでは地形勾配に起因して土砂が移動し, 河川プロセスでの土砂移動は地形勾配と河川流量に起因することを示している. なお斜面プロセスの $\nabla^2 z$ 値は定義から凸が負, 凹が正となる.

図-2には解像度 50m で 150×150 グリッドのサイズで模擬した平地の地形をもとに 1000 ステップ計算した後の結果と (以下, 模擬地形), 各グリッドの流域面積 (Contributing Area) と傾斜 (Slope) の関係を両対数で示す. 図-3には国土地理院の基盤地図情報より入手した 5m 解像度のデジタル標高モデル (DEM)と, それから計算した流域面積と傾斜の関係を示す. なお散布図には分布の傾向を示すため, 一般化加法モデルによる回帰曲線(実線)を示す. 模擬地形に比べ乙石川流域地形モデルの空間解像度は 1/100 であるため最大傾斜を示す流域面積の値は異なるが, いずれの回帰曲線も最大傾斜を界にして流

域面積と傾斜の関係が変化する.

## (2) モデルパラメータの算出方法

$D, K, m$ のパラメータの決定は乙石川流域地形のDEM から計算される地形量の分布から求めることができる. 具体的には, まず地形は式(2)で示される地形の平衡状態にあるとする.

$$\frac{\delta z}{\delta t} = 0 \quad (2)$$

次に尾根(添字 $ht$ )での流域面積と傾斜の積は 0 に近づき ( $A^m \cdot \nabla z \approx 0$ ), その曲率は一定の値 $\nabla^2 z_{ht}$ に収束するとして, 式(1)から式(3)及び式(4)を導く. なお, これらの式の展開は Perron *et al.*<sup>5)</sup>の手法と同様であるため省略する. パラメータの算出過程も同手法と同じではあるが, 乙石川流域においても Perron *et al.*と同様に式(1)を仮定できることを示すため, 模擬地形と比較しながら概説する.

$$\frac{U}{D} = -\nabla^2 z_{ht} \quad (3)$$

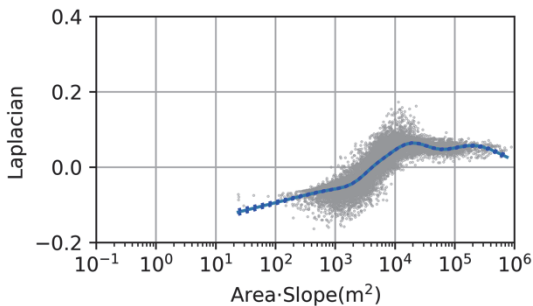


図-4 模擬地形の流域面積・傾斜と曲率

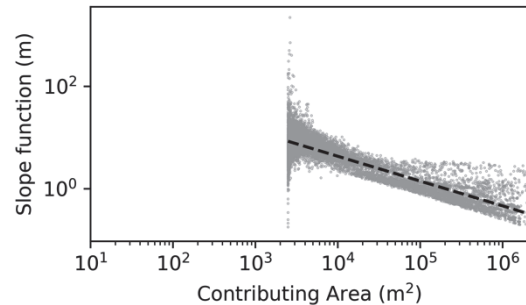


図-6 模擬地形の流域面積と $\nabla z/(\nabla^2 z - \nabla^2 z_{ht})$

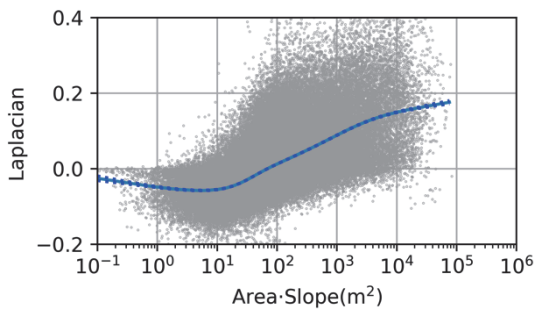


図-5 乙石川流域の流域面積・傾斜と曲率

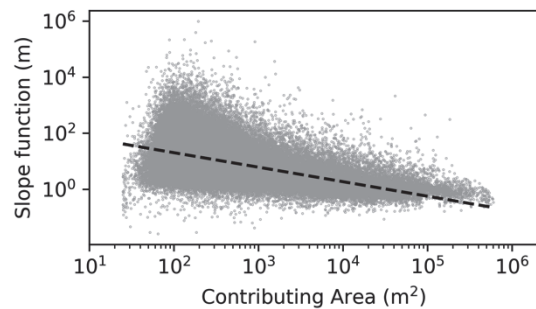


図-7 乙石川流域の流域面積と $\nabla z/(\nabla^2 z - \nabla^2 z_{ht})$

表-1 モデルパラメータ

流域名	相関係数	$\nabla^2 z_{ht}$	$D/K$	$m$
乙石川流域	-0.51	-0.02	220	0.51
模擬地形	-0.88	-0.13	370	0.48

$$\log \frac{\nabla z}{\nabla^2 z - \nabla^2 z_{ht}} = \log \frac{D}{K} - m \log A \quad (4)$$

図-4 は模擬地形, 図-5 に乙石川流域の  $A \cdot \nabla z$  (Area  $\cdot$  Slope) と  $\nabla^2 z$  (Laplacian) の関係を示す. 空間解像度の違いはあるが,  $A \cdot \nabla z$  が低い所で  $\nabla^2 z$  が負(凸), 高いところで正(凹)となる状況が両方の図で確認できる. パラメータの算出では, この散布図から一般化加法による回帰曲線(図中の太線)を求めて,  $A \cdot \nabla z$  が最小の  $\nabla^2 z$  値を抽出して尾根の曲率  $\nabla^2 z_{ht}$  とする.

次に, 求めた  $\nabla^2 z_{ht}$  から式(4)の左辺である  $\nabla z / (\nabla^2 z - \nabla^2 z_{ht})$  を計算する. 図-6 と 図-7 には模擬地形と乙石川流域地形の  $\nabla z / (\nabla^2 z - \nabla^2 z_{ht})$  (Slope function) と流域面積  $A$  (Contributing Area) を両対数で示す. 流域面積が小さいところで  $\nabla z / (\nabla^2 z - \nabla^2 z_{ht})$  値のばらつきは大きくなるが, 両図とも概ね同様な線形の相関が確認できる. この図の回帰分析(図中波線)によりパラメータ  $D/K, m$  を求めることができる.

#### 4. 乙石川流域の地形シミュレーション

##### (1) 乙石川流域のモデルパラメータ

3(2)節で説明した手法により乙石川流域地形で求めたモデルパラメータを表-1に示した. またパラメータの感度を確認するために, この乙石川流域地形のパラメータと模擬地形を用いて 1000 ステップのシミュレーションを実施した. 表-1には, そのシミュレーションによる地形から求めたパラメータも同時に示している. 両者は本来同じ値を示すはずである. しかし, その結果では,  $m$  値はほぼ同じ値を示したが, 模擬地形の尾根の曲率  $\nabla^2 z_{ht}$  は乙石川流域に比べて小さく,  $D/K$  はやや大きい値を示した.

シミュレーションでは  $D, K$  の絶対値と隆起量  $U$  の値が必要となる. 隆起量  $U$  については北部九州の花こう岩の  $^{10}\text{Be}$  による浸食量の見積り<sup>6)</sup>から  $U = 1 \times 10^{-4} \text{m/年}$  とした. また表-1 より  $\nabla^2 z_{ht} = -0.02$  であるため, 式(3)に基づく  $D = 5 \times 10^{-3}, K = 2.2 \times$

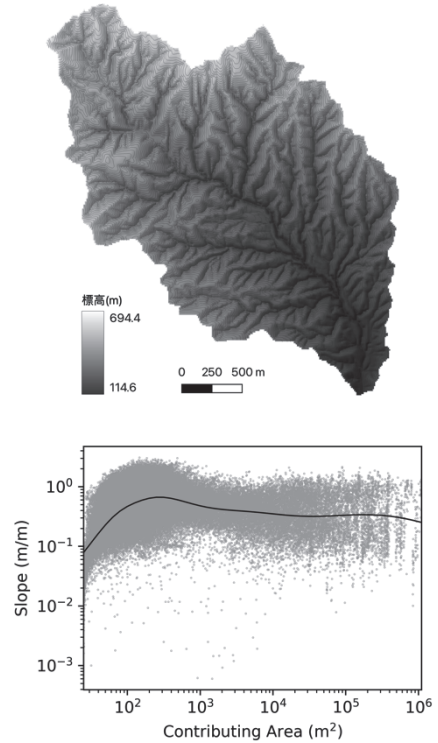


図-8 100 ステップ後の乙石川流域地形(上)と流域面積と傾斜の関係(下)

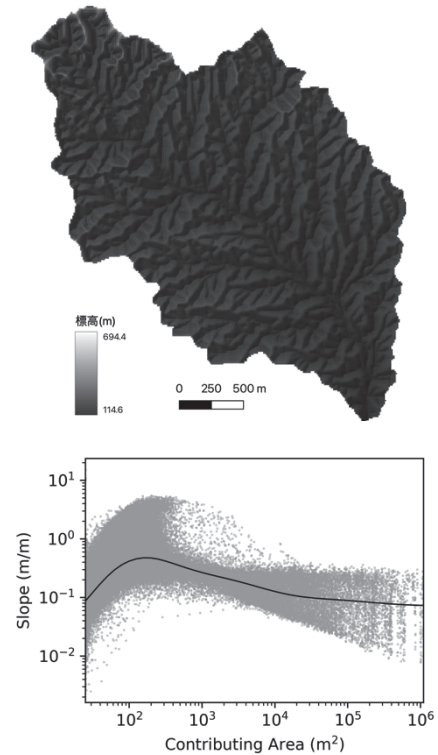


図-9 1000 ステップ後の乙石川流域地形(上)と流域面積と傾斜の関係(下)

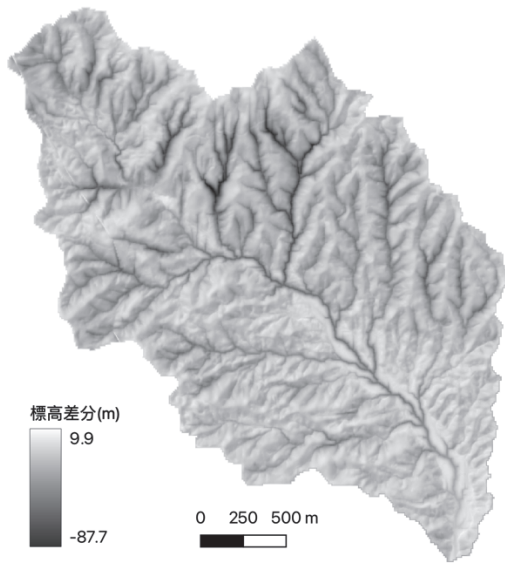


図-10 100 ステップ後の乙石川流域の地形差分

$10^{-5}$  と計算される。しかし、表-1 でのパラメータの比較から、シミュレーション結果はパラメータの精度よりも解析ステップの数に大きく依存することが考えられた。またパラメータのオーダーは Landlab の初期値と変わらないため、今回のシミュレーションは、 $K$  値に Landlab の初期値の  $K = 1 \times 10^{-5}$  を採用し、その値に  $D/K = 220$  を乗じた値を  $D$  として実施した。

## (2) シミュレーション結果

乙石川流域地形を初期値として実施したシミュレーション結果として、図-8 に 100 ステップ後の地形、図-9 に 1000 ステップ後の地形における流域面積と傾斜の関係を示した。なお 1 ステップは 1000 年として設定しているため、図-8 は 10 万年後、図-9 は 100 万年後ということになる。隆起量は、 $U = 1 \times 10^{-4}$  m/年であるため 1000 ステップ後は 100m の隆起が地形プロセスに加わったことになるが、いずれの結果においても流域内の最高標高は約 694m となり最大値に変化はない結果となった。しかし、図-3, 8, 9 の各標高モデルを比較すると南東の下流域から暗い色となっていくことや、特に図-9 の標高モデルでは 600m 以上の標高を示す明るい部分が北部の一部の尾根しか残っていないなどのことが確認できた。また、図-3 の標高モデルで確認できる乙石川沿いの谷底低地は図-8 及びそれ以降では明瞭ではなくなる結果となった。

図-3, 8, 9 の何れの散布図においても回帰曲線では、流域面積が  $10^2 \sim 10^3 \text{m}^2$  付近で流域面積と傾斜の

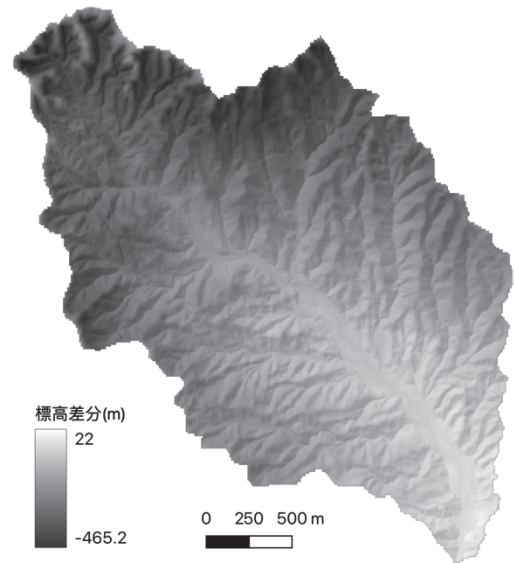


図-11 1000 ステップ後の乙石川流域の地形差分

関係が正から負の相関となる傾向は同じであった。また当然ではあるが、シミュレーション後の図-8, 9 の散布図は、図-3 に比べて点が回帰曲線付近に集まり、相関が高くなった。

## 5. シミュレーション地形との標高差分

図-10 と図-11 には、それぞれ 100 ステップ後、1000 ステップ後の地形(以下、シミュレーション地形)と現在の乙石川流域地形(以下、現地形)との標高差分を示した。シミュレーションによって標高が減少した場合はマイナスとなる。なお両図では比較のため、現地形の陰影起伏を背景に示している。図-10 の標高差分では現地形との関係は明瞭で、谷に向けて暗色となり、谷を中心として標高が低くなっていることがわかる。また流域中央を北西から南東に流下する乙石川に対して、右岸流域よりも左岸流域に分布する南北方向の谷は下刻傾向が著しく、最も低い-87.7m の値を示した。一方、図-11 では標高変化と現地形との関係は明確ではなくなり、面的に北西の上流域の標高が低下し、南東の下流域の標高が上昇している様子が確認できる。この時の差分の最低値は-465.2m となるが、右岸・左岸とは関係なく、流域境界での低下が著しい結果となった。

これらの結果をまとめると、地形変化の初期段階では、上流河川の侵食作用が卓越し、谷沿いに下刻が進む。加えて、乙石川流域地形では右岸流域よりも左岸流域に分布する南北方向の谷の下刻傾向が著しくなることを確認した。一方、時間の経過とともに

に、標高の高い上流域は面的に侵食される傾向となるが、下流域では侵食による標高の低下よりも定常的な隆起が相対的に優って、標高が面的に上昇すると考えられる。

## 6. 既往研究<sup>1),2)</sup>との比較

池見ほか<sup>1)</sup>では、山地斜面の崩壊と流域地形との地形プロセス的な関係を見出すため、Perron *et al.*<sup>5)</sup>の式により災害前の地形を解析し、求めたパラメータ  $D/K$  から山地斜面の崩壊の分布について検討した。地形解析の結果、左岸の地形は右岸に比べて流域面積と地形勾配との相関が強く、より流水の影響が強い地形を呈しているとした。また流域全体における  $D/K$  と崩壊面積率との相関分析では、相関係数  $R^2$  で 0.13 程度あるが、崩壊面積率が 5% を超える流域に限定すると相関係数  $R^2$  は 0.27 に上昇すると報告した。

池見ほか<sup>2)</sup>では、乙石川流域の各支流のシリカフラックスを分析した。その結果、右岸では、概ねシリカフラックスは安定しており、河川水を形成する地下水や中間流の混合、流れが安定的に行われているとした。一方、左岸は、各サブ流域での流れ、混合具合が多様であることを報告し、左岸では土砂移動が頻繁に発生していると考察した。

今回のシミュレーション結果である図-10 から、左岸流域の侵食量が右岸に比べて大きいことが想定された。この図は、地形変化の将来予測を示したものであるが、式(1)の性質から現在のポテンシャルが将来へと継続した結果と考えることができ、既往の研究と調和的であると言える。

一方、図-11 は、かなり未来的で非現実的な結果となった。これは設定した時間経過が長かったため、地形変化が広範囲に及んだためだと考えられる。近々の地形変化の将来予測をするには、シミュレーションのステップ時間や回数などが今後の検討課題となるであろう。また、今回はモデルパラメータの算出において、乙石川の河道で見つかった断層を考慮していない。隆起量の差など構造運動が、これまでの土砂供給にどのような影響を与えたか、これは、今後検討すべき課題だと考えている。

## 7. まとめ

本研究では、乙石川流域を対象地域として、Landlab ツールセットを使用した地形シミュレーションを実施した。その結果、乙石川流域では、乙石川の左岸流域は右岸に比べて、土砂生産のポテンシャルは高いことが示された。

謝辞: 本研究は JSPS 科研費 JP21K18407 挑戦的研究(萌芽)「地域の土砂災害ハザードを検出する地形形成の数値解析技術の創出」(代表: 池見) の助成を受けたものです。

### 参考文献

- 1) 池見洋明, 中西隆之介, 馬場亮, 岡島裕樹, 三谷泰浩: 平成 29 年九州北部豪雨災害による乙石川流域の崩壊・浸食・堆積の空間分布, 自然災害研究協議会西部地区部会報, 42, pp.71-75, 2018.
- 2) 池見洋明, 中西隆之介, 馬場亮, 肘井敬明, 岡島裕樹, 三谷泰浩, 日本応用地質学会九州支部九州北部豪雨災害 WG: 平成 29 年九州北部豪雨災害による乙石川流域の洪水堆積物とシリカフラックスの分布, 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2018
- 3) Hobley, D. E. J., Adams, J. M., Nudurupati, S. S., Hutton, E. W. H., Gasparini, N. M., Istanbuluoglu, E. and Tucker, G. E.: Creative computing with Landlab: an open-source toolkit for building, coupling, and exploring two-dimensional numerical models of Earth-surface dynamics, *Earth Surface Dynamics*, 5(1), p 21-46, 10.5194/esurf-5-21-2017, 2017.
- 4) Barnhart, K. R., Hutton, E. W. H., Tucker, G. E., Gasparini, N. M., Istanbuluoglu, E., Hobley, D. E. J., Lyons, N. J., Mouchene, M., Nudurupati, S. S., Adams, J. M., and Bandaragoda, C.: Short communication: Landlab v2.0: A software package for Earth surface dynamics, *Earth Surf. Dynam.*, 8(2), p 379-397, doi:10.5194/esurf-8-379-2020, 2020.
- 5) J.T. Perron, J.W. Kirchner & W.E. Dietrich: Formation of evenly spaced ridges and valleys, *Nature*, 460 (7254), pp: 502-505, 2009.
- 6) 池見洋明, Pachri Hendra, 國分(齋藤)陽子, 三谷泰浩, 黒木貴一: ベリリウム同位体を用いた山地流域の土砂動態に関する検討, 研究発表会講演論文集, 27, pp.101-102, 2015

(2022. 5. 30 受付)