

# 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

DISTRIBUTIONS OF FLOOD SEDIMENTS AND SILICA FLUXES

IN THE OTOISHI RIVER BASIN

RELATED TO THE 2017 NORTHERN KYUSHU HEAVEY RAIN DISASTER

池見 洋明<sup>1</sup>・中西 隆之介<sup>2</sup>・馬場 亮<sup>2</sup>・肘井 敬明<sup>3</sup>・岡島 裕樹<sup>1</sup>・三谷 泰浩<sup>1</sup>

日本応用地質学会九州支部九州北部豪雨災害ワーキンググループ

H. IKEMI, R. NAKANISHI, A. BABA, T. HIJII, Y. OKAJIMA, Y. MITANI,

and the working group of the JSEG Kyushu branch for 2017 Northern Kyushu Disaster

<sup>1</sup>九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: ikemi.hiro.017@m.kyushu-u.ac.jp

<sup>2</sup>九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

<sup>3</sup>(株)九州地質コンサルタント (〒812-0874 福岡県福岡市博多区光丘町 2 丁目 3-21)

**Key Words:** heavy rain disaster, flood sediment, silica flux, weathering, hillslope failure

## 1. はじめに

平成29年7月に発生した記録的な豪雨により乙石川流域で大量の土砂や流木が発生した。災害後の状況から、河道は堆積物で埋没し、開放された河川は谷底平野を縦横に広がり、河岸浸食とさらなる土砂や流木の堆積を引き起こしたと思われる。

本研究では、乙石川流域で堆積した堆積物の状況および本・支流からのシリカフラックスの分布について報告する。そして、これらの結果と流域地形や山地斜面の崩壊分布を比較し、当該流域の土砂動態について検討する。

河川のシリカフラックスは、水-岩石反応だけで説明できるとされ<sup>1)</sup>、長期的な岩石の風化程度の指標として用いられる場合が多い<sup>2)</sup>など。しかし、土壌中のシリカは、水との反応で、容易に溶出することから、電気伝導度とともに、降雨による山地溪流の流量の時間的変化など短期的な水文現象の検討に用いられた事例もある<sup>3)</sup>。



図-1 災害後の乙石川流域の空中写真  
(地理院地図より引用)

## 2. 乙石川流域の地形・地質

図-1 で示す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。流域面積が 5.9km<sup>2</sup>で、20

以上の支流とその流域（以下、サブ流域）から構成されている。このサブ流域は規則的な方向性を持ち、北西-南東の本流に対し、左岸では南北、右岸で東西方向を示している。また、乙石川沿いに形成する谷底平野は、上部、中部、下部にある狭窄部によって、その広がり規制され、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。中生代花崗岩体は、北部九州において、脊振山体、三郡山体など広範囲に分布する。同岩体は格子状の谷地形の発達を空中写真で確認できるほど発達し、特に福岡と佐賀の境界に位置する脊振山体では顕著である。これはバソリス頂部付近で発達する冷却に伴う格子状の亀裂<sup>4)</sup>、あるいは同地域で確認されている南北や北西方向の活構造<sup>5)</sup>に由来するものと推定されている。乙石川流域の谷地形の規則的な分布も同様な理由によるものと推定される。

今回、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（以下、乙石川断層）<sup>6)</sup>。乙石川断層は乙石川の河道方向と同じ、北西-南東の走向を持ち、10m以上の破碎帯を伴うことが明らかとなっている。このことは、谷底平野の特徴的な地形が地質構造的因子によって形成された可能性も示唆している。

乙石川断層の北には西山断層帯の嘉麻峠-小石原断層が分布し、乙石川が合流する赤谷川沿いには、北東-南西の右横ずれ断層の杷木断層が分布する。杷木断層の最新活動時期は5,500年前と報告され<sup>7)</sup>、乙石川と赤谷川の合流点では乙石川の河道が上流に向かって右にずれていることが確認できる。今回発見された乙石川断層の活動時期は明らかではないが、その履歴は同地区の復興において、重要な要件のひとつになるものと思われる。

以上のように、バソリスが山体を形成し、風化・浸食が断層や亀裂により規制され地形形成がなされている山地流域で、今回の豪雨災害が発生した。

### 3. 現地調査および溶存シリカ測定

乙石川流域では、これまでに2017/7/23, 8/2, 9/3, 11/15および12/7-8の計5回の調査を実施した。このなかで、土砂災害の概要把握、洪水堆積物の詳細調査および水文調査を行った。

堆積物調査では、堆積物の記載、厚さの計測を行った。水文調査は、降雨が少なくなる11月と12月の渇水期に実施し、河川流量の計測と河川水のシリ

カ含有量測定用のサンプリングを行った。流量計測は希釈法もしくは容器法にて行った。

溶存シリカの測定は、河川水サンプルを持ち帰った後、直ちに0.45 $\mu$ mのフィルターで懸濁物をろ過し、モリブデン黄法による比色法にて測定した。

## 4. 結果

### (1) 浸食状況と洪水堆積物の特徴

乙石川流域への堆積物調査は2017年8月、9月、11月に行った。以下には調査した箇所のうち特徴的な所について説明する。なお11月には重機により堆積物が大幅に移動されていたため、浸食断面および洪水堆積物の特徴は8月、9月の調査結果にもとづいている。

写真-1は松末小学校近くの乙石川左岸の状況である。河岸が浸食をうけ、地下の埋設管が露出している状況を確認できる。浸食された河岸断面では、下位から、やや締まった厚さ1mのシルト質礫層と同じく1mのシルト質砂層があり、その上位に植生を挟んでゆるい30cmの砂層が堆積する。植生より下位の礫層や砂層は過去の堆積物が浸食によって露出したものである。下位の礫層は巨レキから中レキを含み、無構造である。構成する礫は花崗岩も含むが、板状の結晶片岩の礫が目立つ。中位の砂層は、礫層との境界付近で平行葉理が確認でき、また中央部に厚さ数センチの中礫を主体とした礫層を挟む。植生の上に分布している砂層は、調査者の足下と同じもので、今回の災害による堆積物である。主に石英、長石の砂・細礫で構成され、雲母を含む、いわゆるマサであるが、粘土分は少なく、その上をしっかりと歩行できる程度である。また、中礫程度の結晶片岩からなる板状の礫列がマサを覆うように分布する箇所が随所で確認できた。

写真-2は松末小学校から180m上流の右岸の浸食状況である。断面左側には風化した褐色の花崗岩が水面から30cm程度まであり、上位には1m程度のシルト質礫層が分布する。さらに、その上位には1.5mのシルト質砂層が分布する。写真の右に行くほど、花崗岩は白色で厚くなり、礫層はその分布によって消滅する。また途中、砂層と花崗岩の境界にパイピングと思われる孔があり、その下部では、洗われた礫とガリーが確認できた。

写真-3は、写真-2から365m上流の石詰地区左岸の浸食断面である。古い石垣と思われる礫列の上位に無構造の巨礫を含むシルト質砂層が厚さ1mで分布する。さらに、その上位に新しい砂層が20cmの厚



写真-1 松末小学校付近の堆積物と河岸浸食  
(2017/8/2 撮影)



写真-5 中礫の層を挟む砂質の洪水堆積物  
(2017/8/2撮影)



写真-2 下流域右岸の河岸浸食の状況  
(2017/9/3 撮影)



写真-6 乙石川の濁水中を片岩礫が転動して流れている状況  
(2017/8/2撮影)



写真-3 河岸浸食で現れた古い石垣の上位に堆積する古い巨礫交じりの砂層 (2017/9/3撮影)



写真-4 今回の土石流堆積物と表層に分布する大礫から巨礫の列と流木 (2017/9/3撮影)

さで分布する。この新しい砂層は現在の石垣の下部においても地表面を覆うように分布しており、ここでも結晶片岩の中礫が一部に集積するように重なっている様子が確認できた。

写真-4は写真-3の1km 上流の右岸であり、花崗岩の斜面が崩壊し、崩壊面では複数のガリーが確認できる。その下には今回の堆積物が分布する。無構造で巨礫を含むシルト質の堆積物であり、表層には、大礫から巨礫の列が確認できる。

写真-5は、今回の洪水堆積物の断面である。乙石川流域の至る所で確認できたもので、斜面崩壊に伴う崩積土や土石流堆積物を供給源として、水流により運搬され、堆積したものと考えられる。砂・細礫の堆積物に数センチ大の中礫の挟みが複数確認でき、表層は板状の中礫で被覆 (paving) されているのが特徴的に観察される。粘土は少なく、乾燥するともろく、崩れやすい。

写真-6 は、写真-5 付近の 8 月の濁水化した河川の様子である。濁水の中の暗色のものは結晶片岩の礫であり、水流により転動し、一部は集積している状況が確認できた。おそらく水中では、シートフロー状に砂・細礫のマサが移動し、滑らかになった河床を数センチ大の中礫から大礫が転動している状況であり、写真-5 の堆積状況が再現されていると思わ

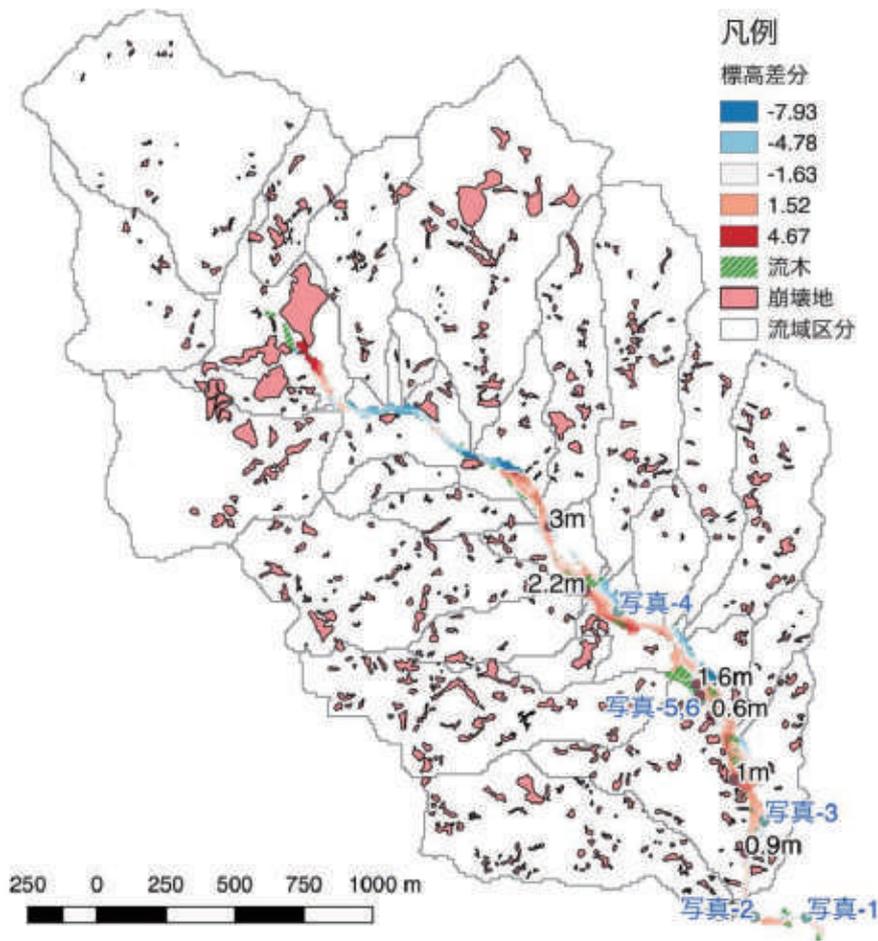


図-2 山地斜面の崩壊分布と谷底平野の浸食・堆積状況（池見ほか<sup>8)</sup>に堆積厚さと写真箇所を加筆）

れる。なお各写真箇所は図-2 に青字で示した。

## (2) 堆積物の厚さ計測

堆積物の厚さ計測は、重機による河道掘削が開始された直後の9月において、7ヶ所で計測できた。その結果、最大3mの堆積物の厚さを得ている。

計測箇所と堆積厚さは図-2 にまとめて示している（図中黒字）。厚さは一様ではなく、谷地形の狭窄部より上流側で堆積物の厚さが大きくなる傾向を示した。基本的には、写真-5のような礫層を挟み、砂・細礫層から構成される堆積物が多数であった。その中で写真-4の北では、無構造で、中礫から大礫を包含するシルト質の堆積物が確認できた。ここは、支流との合流地点であり、厚さ40cmの洪水堆積物の上位に1.8mの厚さの無構造の堆積物が分布していた。崩壊と土石流が時間差をおいて発生したものと思われる。

今回の調査で計測した堆積物の厚さ分布は、全て下流域で行ったものである。これは、9月の段階では、平野に堆積した土砂が依然として多く、厚さを計測できる場所が限られていたことや、その後の道

路等の復旧によって、再度の堆積物調査や検証が困難となったためである。

図-2は池見ほか<sup>8)</sup>で報告した山地斜面の崩壊箇所の分布と谷底平野の堆積状況をまとめたものである。この中で、堆積は10万m<sup>3</sup>に対して、浸食量はその2倍以上の23万m<sup>3</sup>という値を報告した。

## (3) 河川流量と溶存シリカ濃度

11月の調査は9支流、12月は21支流および4ヶ所の本流の河川流量および溶存シリカ濃度の測定を行った。河川流量(単位面積あたりの日流量)は平均で、11月は2.4mm/day、12月は本流、支流とも2.1mm/dayの値となった。福岡県朝倉のアメダスによると2017年10月～12月の月降水量は各々295.5mm、22.5mm、17.0mmとなっており、降雨量に応じて河川流量も減少したことがわかる。

一方、溶存シリカ濃度の平均では、11月、12月ともに支流は290μmol/Lを示し、12月の本流は280μmol/Lと変化がなかった。なお北部九州の花崗岩や片岩からなる他の流域でも、流量に比べ、溶存シリカ濃度はあまり変化しない傾向にある。

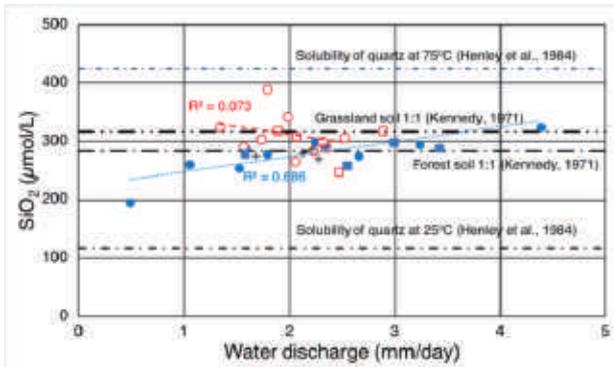


図-3 支流および本流の流量と溶存シリカ濃度の関係(図-3, 4の記号は, 右岸が白抜き口○, 左岸は塗り潰し■●で示し, 11月の測定データは四角口■, 12月は円○●で表している)

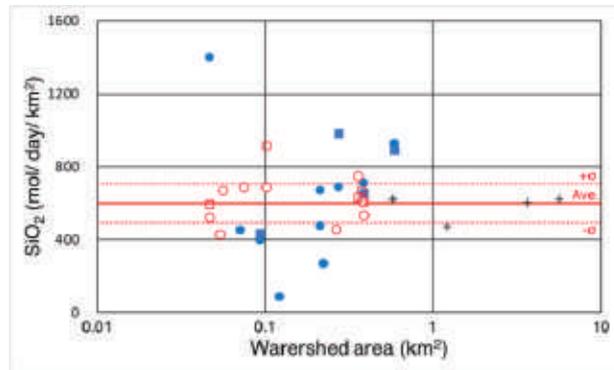


図-4 右・左支流および本流の流域面積とシリカフラックスの関係

図-3 にはサブ流域ごとの河川流量(mm/day)と溶存シリカ濃度( $\mu\text{mol/L}$ )の関係を示した。右岸が白抜きの記号, 左岸は塗り潰し記号で示した。また, 11月の測定データを四角で, 12月を円で示した。本流はプラス記号で示した。流量(単位面積あたりの流量)は, 右岸で1 mm/day から3 mm/dayの幅であるのに対し, 左岸は0.5 mm/day から4.5 mm/dayと広いレンジを示した。溶存シリカ濃度は, 概ね $250\mu\text{mol/L}$  から $350\mu\text{mol/L}$ のレンジを示すが, 右岸では濃度が高い試料, 左岸では濃度が低い試料がそれぞれ確認できた。また12月の測定データにおける相関係数 $R^2$ を計算すると, 左岸の流量と溶存シリカの濃度に高い相関が確認できた。

図-4 は各サブ流域の面積( $\text{km}^2$ )と流量と濃度で計算したシリカフラックス( $\text{mol/day/km}^2$ )の関係を示した。右岸のシリカフラックスは, 流域面積に関係なく幅の狭いレンジを示すのに対して, 左岸のシリカフラックスは幅広いレンジを示し, 特に流域面積が小さい流域でばらつきが大きくなる結果を示した。図中には右岸支流の12月測定値の平均値 $\pm\sigma$ 値を示した。本流のシリカフラックス(+ )は概ね, この範囲にプロットされた。

## 5. 崩壊分布とシリカフラックスの関係

池見ほか<sup>8)</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>9)</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, 左岸の地形ほど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。この結果は, 乙石川流域では左岸と右岸で地形が異なり, 地形と崩壊面積に定量的な関係があることを示している。

本調査による観察結果から, 乙石川沿いの谷底平野で堆積した堆積物は, 山地斜面の崩壊で初次的に発生した土石ではなく, 多くが流水によって運ばれた砂と礫であった。また河岸が浸食された箇所では, 過去の土石流と考えられる堆積物が多く確認できた。これらの結果は, 乙石川流域の各サブ流域には, 今回発生した土砂に加え, 過去に発生した土砂が蓄積されており, 流水により排出しつづけていることを示唆している。

図-3 で示したシリカ濃度の変化幅は, 多様な水の混合で説明できる。同図には水-岩石反応や土壌からの溶出で想定される溶存シリカ濃度を示している。水-岩石反応でのシリカの溶出は温度に依存し,  $25^\circ\text{C}$ で石英と水が化学的な平衡状態にある場合, 溶存シリカ濃度は $200\mu\text{mol/L}$ 以下を示す。 $75^\circ\text{C}$ で石英と平衡状態になると $400\mu\text{mol/L}$ 以上になる<sup>10)</sup>。 $25^\circ\text{C}$ は一般的な地下水,  $75^\circ\text{C}$ は温泉水が想定される。一方, 低い温度でも土壌からは容易にシリカが溶出し,  $300\mu\text{mol/L}$ 程度の値を示すことが報告されている<sup>3)</sup>。山地斜面表層を流れる中間流的な地下水がこれに相当すると考えられる。

図-4のシリカフラックスの変動は, これら多様な水の流れや混合状況を示していると考えられる。右岸では, 温泉水などの混合により, ややシリカ濃度の高い河川水が観測されたが, 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考えられる。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示している。

左岸は, 崩壊面積率が高く, 地形も流水の影響を強く受けた地形を呈している。低いシリカ濃度の河川水が確認され, シリカフラックスが大きく変動す

る。これらの結果から、仮説として、左岸では土砂移動が頻繁に発生していることが考えられる。頻繁な土砂移動の結果、各サブ流域の河道の土砂分布等が不均質になり、流量が少なく、地下水流が主体的となる河川水から、斜面や河道に土砂が多く、そこを流れる中間流が主体的となる河川まで、様々な状況が生じているものと推定できる。

## 6. まとめ

本研究では、乙石川流域で堆積した堆積物の状況および本・支流からのシリカフラックスの分布を調査した。さらに、この調査結果と流域地形や山地斜面の崩壊分布を比較して、山地溪流からの土砂動態および溪流のシリカフラックスの意義について検討した。

その結果、乙石川流域では、土石流堆積物があまり確認できず、多くの堆積物は、流水によって二次的に移動した砂礫であることが明らかとなった。水文調査では、溶存シリカ濃度および河川流量において、左岸で幅広いレンジを確認した。池見ほか<sup>8)</sup>で報告した乙石川流域での左岸と右岸の地形の違いと崩壊との関係を考慮すると、右岸よりも左岸からの単位面積あたりの土砂供給量が多かったことが推定された。山地溪流のシリカフラックスは、地形解析との組み合わせにより、流域における土砂状況を評価する指標として有効であることが示唆される。

**謝辞**：本研究は JSPS 科研費 JP17K01228 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) H.D. Holland: The chemistry of the atmosphere and oceans, John Wiley & Sons Inc., 369p, 1978.
- 2) K. Maher & C.P. Chamberlain: Hydrologic Regulation of Chemical Weathering and the Geologic Carbon Cycle, *Science*, 343, pp.1502-1504, 2014.
- 3) V.C. Kennedy: Silica variation in stream water with time and discharge in *Nonequilibrium systems in natural water chemistry*, Advances in chemistry series 106, American Chemical Society, Washington, DC, pp.94-130, 1971.
- 4) R.J. Chorley, S.A. Schumm, D.E. Sugden: *Geomorphology*, Methuen & Co. Ltd., London, 605p, 1985.
- 5) 九州活構造研究会: 九州の活構造, 東京大学出版会, 562p, 1989.
- 6) 堤浩之, 吉岡敏和, 向井理史, 堀川滋雄, 村田和則: 西山断層帯嘉麻峠区間の変位地形と第四紀後期の活動性, *活断層研究*, 45, pp.21-35, 2016.
- 7) 矢田純, 矢野健二, 山本茂雄, 細矢卓志: 【速報】平成 29 年 7 月九州北部豪雨災害 乙石川断層(仮称)に伴う断層破砕帯と多量の土砂流出の地質的素因の可能性, <http://www.jseg.or.jp/kyushu/#disasterreport>, 2017 (2017.12.6 閲覧)
- 8) 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.
- 9) J.T. Perron, J.W. Kirchner & W.E. Dietrich: Formation of evenly spaced ridges and valleys, *Nature*, 460 (7254), pp: 502-505, 2009.
- 10) R.W. Henley, A.H. Truesdell, P.B. Barton, Jr.J.A. Whitney: Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems, *Reviews in economic geology* 1, 267p, 1984.

(2018. 5. 18 受付)