

2019年台風19号による阿武隈川水系五福谷川における多量の土砂を含む洪水流の特徴

CHARACTERISTICS OF FLOOD FLOW WITH A LARGE AMOUNT OF SEDIMENT IN THE GOFUKUYA RIVER IN THE TYPHOON NO.19, 2019

原田大輔¹・江頭進治¹・柿沼太貴¹・南雲直子²・伊藤弘之¹

HARADA Daisuke, EGASHIRA Shinji, KAKINUMA Daiki, NAGUMO Naoko and ITO Hiroyuki

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター(ICCHARM)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²非会員 国立研究開発法人土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター(ICCHARM)
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

The present study aims to reveal the characteristics of flood flow with a large amount of fine sediment supply in the Gofukuya river in the disaster caused by Typhoon No.19, 2019. Since numerous landslides and debris flows occurred in the mountainous area of the Gofukuya river, a large amount of fine sediment was supplied and deposited at the plane area of the basin, that exacerbated the flood disaster. The present study proposes a method to evaluate the fine sediment runoff from the basin by considering the sediment erosion of the deposited sediment. The computed result of flood flow with fine sediment supply reproduces the flood hazards in terms of the thickness of sediment deposition and the sediment size distribution including the obvious longitudinal sediment sorting.

Key Words : food flow, sediment supply, flood hazard, fine sediment, Gofukuya river

1. はじめに

2019年の台風19号による災害では、東日本の広範囲で河川の氾濫が発生し、甚大な被害が発生した。中でも阿武隈川水系の内川流域（宮城県丸森町、流域面積約106km²）では山間部で多数の崩壊・土石流が発生し、山間部に立地する集落の孤立等が生じた。上流域で生産された土砂の一部は洪水流によって下流に流出し、下流の平野部での洪水流による被害を助長したと考えられる。著者らが現地調査を行ったところ、内川流域の中でも支流の五福谷川（流域面積約24km²）では特に土砂流出量が多く、下流の平野部には多量の土砂が厚く堆積していた。五福谷川が平野部を流下する区間は僅か2km程度であるが、この2kmの区間のうち上流側では氾濫域における河床材料の主体が粗砂である一方、下流側では氾濫域における河床材料の主体が微細砂であり、2km程度の区間において著しい縦断分級が生じている。

本研究では五福谷川に着目し、同様の中小河川における川づくりにとって有益な情報を得るために、現地調査

と数値計算によってこの土砂・洪水氾濫災害のメカニズムを明らかにすることを目的とする。既に述べたように五福谷川の災害の特徴は上流からの多量の土砂供給であることから、下流の平野部での洪水氾濫の計算においては、平野部の上流端における山間部からの土砂供給量を評価する必要がある。また、平野部における上下流での縦断分級が評価できることも重要である。本研究では五福谷川での災害の計算を通して、これらの現象を評価する方法を提案する。

2. 災害の概要

(1) 降雨及び出水の概況

2019年10月12日から13日にかけての総降雨量は、内川の上流に位置する筆甫観測所において594mmに達した。図-1に示すように対象流域の山間部では多数の崩壊・土石流が発生しており、とりわけ五福谷川の上流域の山間部では多数の場所で発生していることが分かる。土木学会水工学委員会の調査団の報告²⁾によると、速報値であ



図-1 対象流域の斜面崩壊・堆積分布図（赤く塗られている部分）（国土地理院の判読結果¹⁾に加筆）（図中の黒点線が五福谷川流域の範囲、詳細な流域界は文献³⁾を参照）

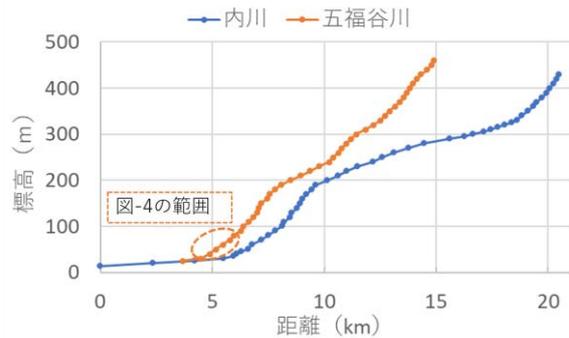


図-3 内川と五福谷川の縦断面図（2万5千分の1地形図より判読）



図-4 五福谷川の氾濫状況（2019年12月5日撮影）

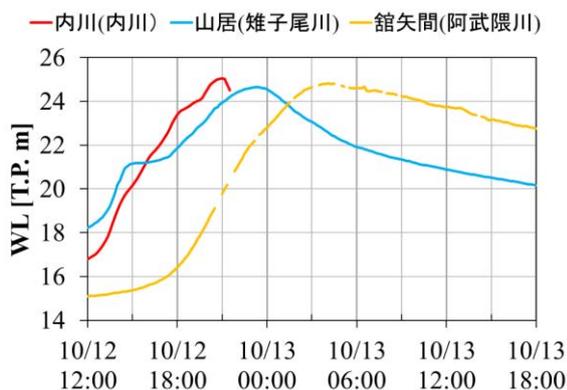


図-2 各観測所の水位（国土交通省水文水質データベース及び宮城県河川流域情報システムより）（データが連続していない部分は欠測）水位は各観測所の基準高を基にT.P.に変換している

るものの、流域面積に対する崩壊面積の割合は2%程度である。その崩壊密度は2017年の九州北部豪雨で甚大な被害が生じた赤谷川流域の半分程度であり、内川流域の他の支川と比較しても特に多くの崩壊が生じている。

各観測所における観測水位を図-2に示す。内川の水位計は五福谷川との合流部直下に位置するが、ピーク流量の観測後に欠測している。そのため内川の東隣に位置する雫子尾川（流域面積約66km²）の山居観測所のデータを併記している。また、館矢間観測所は内川及び雫子尾

川の合流点よりも上流側に位置する阿武隈川の観測所である。阿武隈川の出水のピークは内川のピーク水位が発生した凡そ7時間程度後に発生していることが分かる。

(2) 五福谷川の土砂・洪水氾濫

図-3には内川と五福谷川の縦断面図を示す。五福谷川の6km付近より上流側は山間部を流下し、その勾配は概ね1/20である。内川・五福谷川共に山間部から平野部に入ったところで急激に河床勾配が変化し、ここでの氾濫が顕著である。

図-4には五福谷川の谷の出口から平野部にかけての氾濫の状況を示す。谷の出口付近よりもやや下流側の河道が湾曲している箇所付近において破堤が生じており、ここから下流側に向けて土砂と洪水流が氾濫したと考えられる。なお、五福谷橋の橋梁には多量の流木が集積しており、流木の集積による水位上昇が破堤・氾濫を助長したと推察されている³⁾。

著者らは五福谷川の氾濫堆積物の河床材料について粒度分布の調査を行った。調査地点について図-5に示す。これらは五福谷川の右岸氾濫域で顕著な土砂堆積が見ら

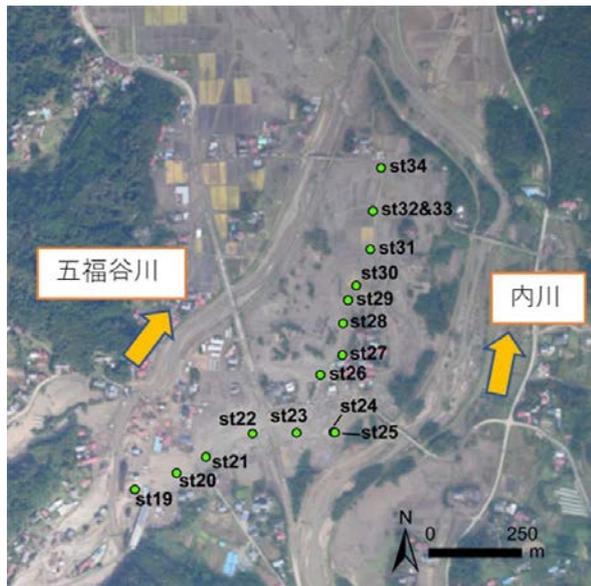


図-5 土砂の採取地点

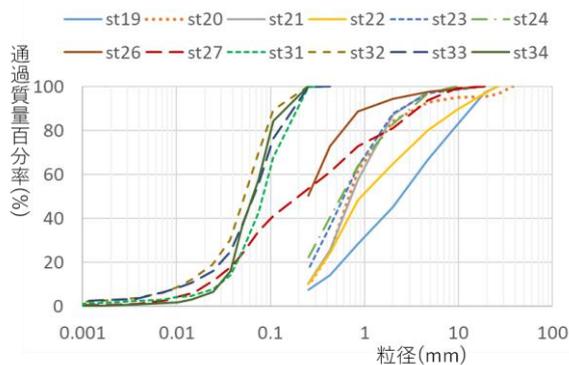


図-6 採取した河床材料の粒度分布 (線がほぼ重なるため図-5に示す採取地点のうち一部のデータを省略している。また、一部の試料は沈降分析を実施していないため線が途中で切れている。)

れた範囲である。各地点で河床表層の土砂を採取して持ち帰り、ふるい分け分析を行い、一部のサンプルに対しては沈降分析を行った。それらの結果を図-6に示す。これによれば、氾濫域の上流側では細礫～粗砂が堆積しているのに対して、下流側ではシルトが堆積しており、僅かな区間内で著しい縦断分級が生じていることが分かる。

なお、図-5の氾濫域には内川の左岸から氾濫した洪水流も流入しているが、その影響はここで調査対象とした区間ではさほど大きくないと著者らは考えている。その理由としては、この区間では五福谷川からの氾濫流の痕跡や土砂の氾濫痕跡が卓越しているためである。また、内川と五福谷川の合流点よりも下流側では、内川からの越水により大規模な落堀が見られる一方で、図-5の範囲内では内川の氾濫によるこうした大規模な落堀が見られない。また、内川左岸の氾濫地点の堤内地側には五福谷川から輸送された土砂が小規模なデルタを形成している

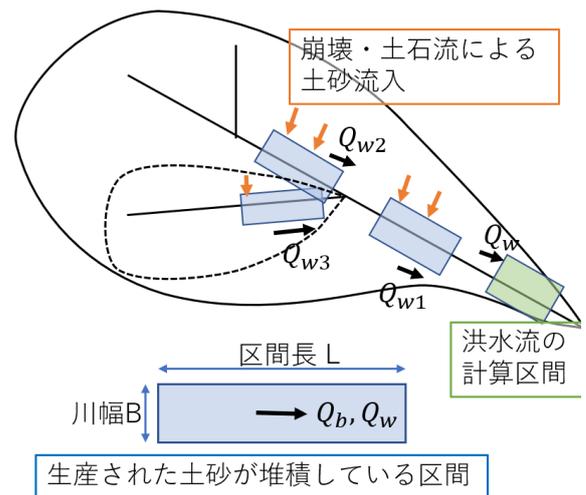


図-7 堆積土砂からの微細土砂の流出に関する模式図

ことから、内川の破堤氾濫の流れは弱く、単に湛水しているところに、五福谷川の多量の土砂を含んだ洪水氾濫水が流れ込んだものと思われる。

3. 数値解析

(1) 微細土砂流出量の評価

既に述べたように、五福谷川の上流では多数の崩壊・土石流が発生しており、河道に流入した土砂が洪水流によって輸送され、輸送された土砂が下流の氾濫域に堆積したと考えられる。とりわけ、氾濫域に多く堆積している細粒土砂について、計算区間へのその流入量を評価することが、洪水流の計算を行うにあたって重要である。その方法として、流域全体の水系網をモデル化する方法⁴⁾や、崩壊堆積土砂からの微細土砂流出量を推定し、これを足し合わせる方法⁵⁾などが提案されているが、ここではより簡便にこれらを推定する方法を検討する。

土石流は一般に勾配 $4^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 程度の範囲に堆積すると考えられ⁶⁾、ここでも崩壊・土石流に伴う生産土砂がそのような領域に堆積していることを想定する。これを一次堆積土砂と呼ぶことにし、これは堆積した段階では洪水による選別作用(水成作用)を受けていない。一次堆積土砂が洪水流による水成作用を受け、侵食されるのに伴い、そこに含まれる微細土砂が洪水流に取り込まれてウォッシュロードとして流出するものとする。ここでは、このプロセスを簡単に評価するために、この堆積土砂が図-7のように、長さ L 、幅 B の区間内に堆積しているとす。この場合、堆積土砂からの単位時間あたりの微細土砂の流出 Q_w は次式のように表される。

$$Q_w = -p_f c_* \frac{\partial z_b}{\partial t} BL \quad (1)$$

ここに、 c_* : 土砂濃度、 z_b : 河床高、 p_f : 一次堆積土砂

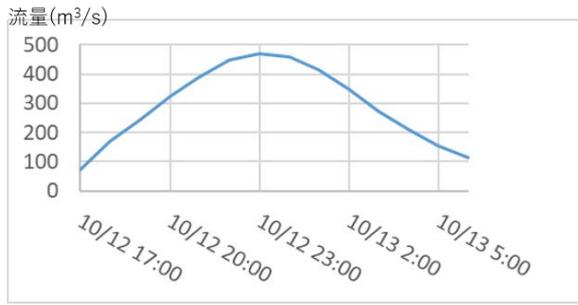


図-8 計算区間上流端で与えた流量

に含まれる微細土砂の存在率で、ここでは100 μ m以下の粒径を対象とする。

一方、式(1)の河床侵食 $\partial z_b / \partial t$ が掃流砂によって引き起こされるものとし、河道堆積物が侵食されると同時に、一次堆積土砂の間隙に存在する微細土砂がウォッシュロードとして流出するものとすれば、この区間から単位時間あたりにウォッシュロードとして流出する微細土砂量 Q_w は以下のように与えられる。

$$Q_w = p_f Q_{bj} \quad (2)$$

ここに、 Q_{bj} はその地点 j の水量を用いて評価される掃流砂量である。

五福谷川のように崩壊・土石流が流域の多くの場所で発生している場合には、図-7のように流域内の複数の河道に生産土砂が堆積している状況となる。このような場合に、流域を合流点を基準として分割して、合流点の上流側の河道 i から単位時間あたりに流出する微細土砂の量 Q_{wi} を算出し、これらを洪水伝播時間を考慮した上で足し合わせることで、計算区間に流入する微細土砂の総量 Q_w を算出することができる。

$$Q_w(t) = Q_{w1}(t - \tau_1) + Q_{w2}(t - \tau_2) + \dots + Q_{wn}(t - \tau_n) \quad (3)$$

$$Q_{wi} = p_{fi} Q_{bi}(t - \tau_i) \quad (4)$$

ここに、 p_{fi} ：地点 i の一次堆積土砂に含まれる微細土砂の存在率、 Q_{bi} ：地点 i の掃流砂量で、ハイドログラフから得られる流量を用いて算定、 τ_i ：地点 i から洪水流の計算区間上流端までの洪水伝播時間である。

(2) 計算条件

五福谷川の平野部分、概ね図-5に示す範囲において、平面二次元の洪水流解析を行った。解析にはiRIC-Nays2DH⁷⁾を一部改変したものをを用いている。

計算区間上流端で与える流量について、RRIモデル⁸⁾により地上雨量計のデータを用いて降雨流出計算を行い、これを与えた。ただし内川の水位計は出水中に欠測しているため、出水のピーク流量値は宮城県³⁾が算出した

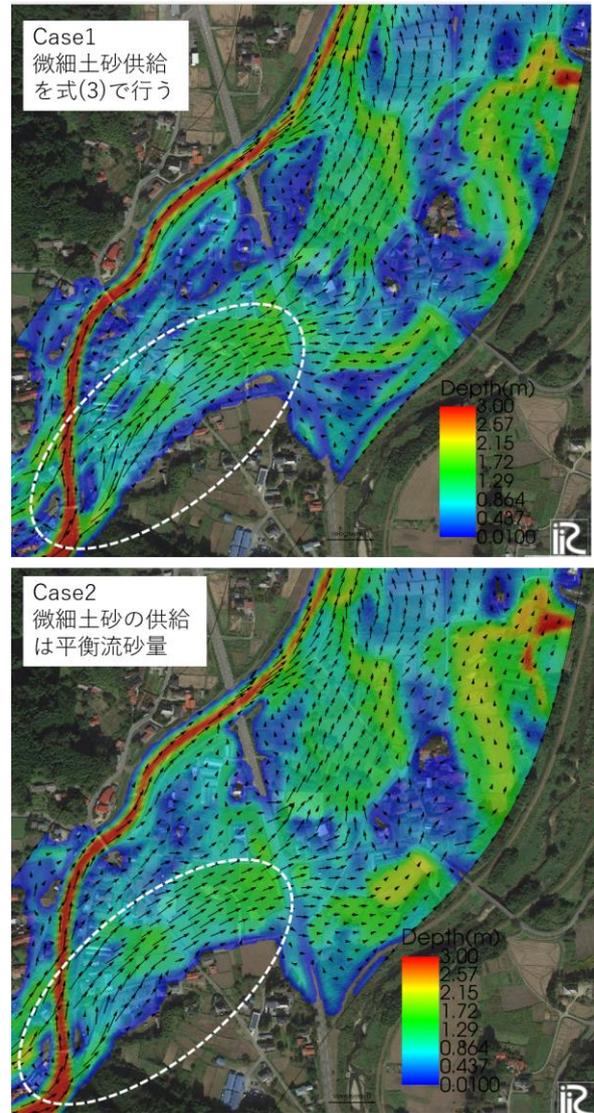


図-9 計算結果：ピーク流量時の水深コンター図及び流速ベクトル図

470(m³/s)とし、流出計算結果はピーク流量がこれに一致するようにしている(図-8参照)。

解析では掃流砂及び浮遊砂の計算を行い、河床変動計算を行っている。掃流砂量式として、計算対象区間で著しい縦断分級が生じていることから、掃流砂量が無次元掃流力の5/2乗に比例するため分級を評価しやすい江頭らの式⁹⁾を用いた。計算区間の上流端から流入するウォッシュロードについて、式(3)により算出し、100 μ m以下の粒径についてはこれを濃度の境界条件として与え、それより大きい粒径の浮遊砂濃度については平衡条件を与えている。ここで、式(3)中の $Q_w(t)$ は山地区間の下流端、北側の支流、南側の支流の三ヶ所で計算を行ったものを足し合わせている。なお、流域が小さいため洪水伝播時間 τ_i については無視する。

初期河床形状は、出水前の航空レーザー測量に基づく国土地理院基盤地図情報5mメッシュ数値標高モデル¹⁰⁾を

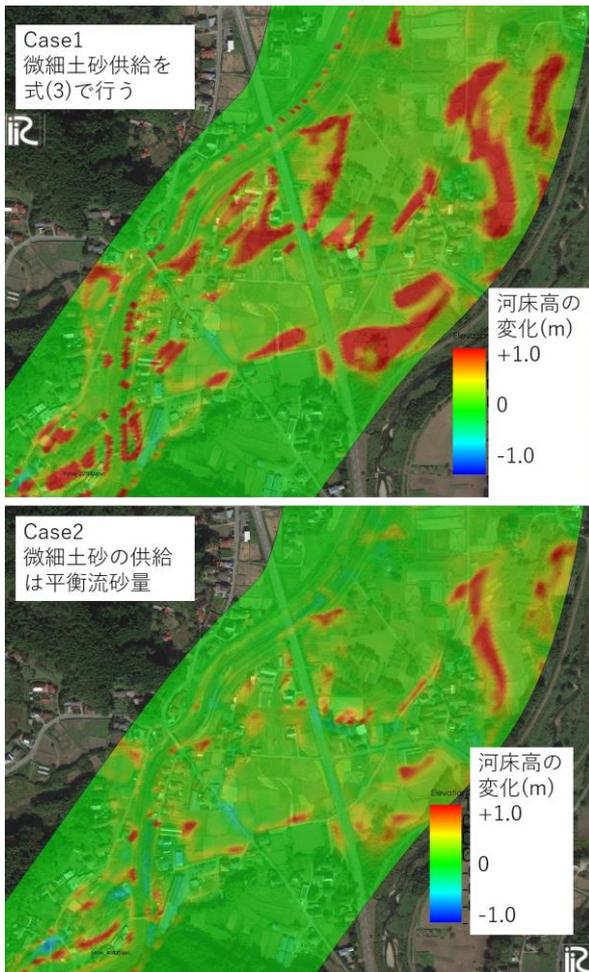


図-10 計算結果：計算開始前後での河床高の変化

用いて作成した。粗度係数は計算区間の全域で0.03とした。計算区間の初期河床材料は、図-6のst19の粒度分布を与えている。

4. 結果と考察

(1) 微細土砂流出量

計算区間に流入する微細土砂の量を式(3)により算出したところ、その総量は約15.4万 m^3 と算出された。一方で、土木学会調査団速報会の資料²⁾によると、五福谷川流域の崩壊面積は48万 m^2 であり、例えば崩壊地の堆積厚を1mとすれば、崩壊土砂の約3割が微細土砂として流出し、これが計算区間に流入したとして、洪水流の解析を行っている。この土砂流入の影響をみるために、ここでは微細土砂の流入を考慮する場合(Case1)と考慮しない場合(Case2)の2つのケースの計算を行い、比較する。なお、Case2では計算区間の上流端で平衡流砂量を与えている。

(2) 平面二次元解析の結果

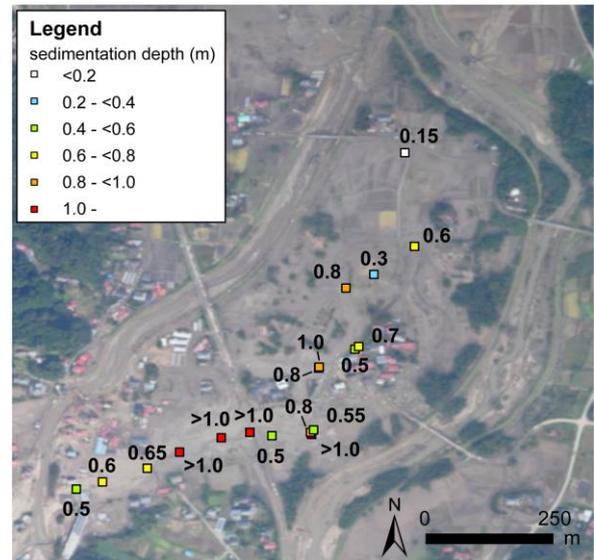


図-11 現地調査で計測した土砂堆積厚の分布

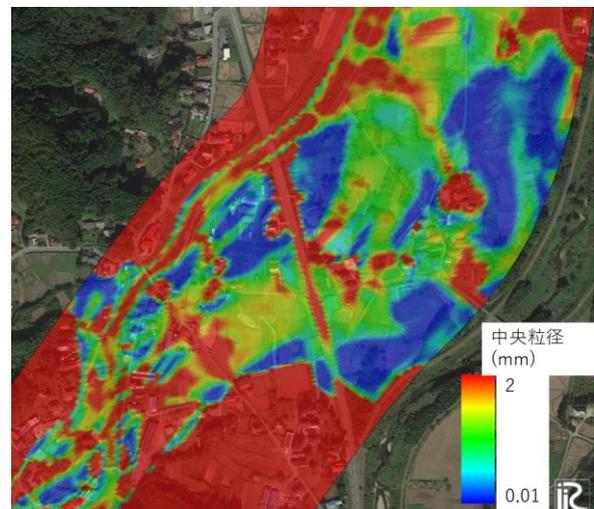


図-12 計算結果：表層土砂の中央粒径の空間分布 (Case1、計算終了時)

計算結果について、ピーク流量時の水位コンターを図-9に示す。図-9においては白点線で囲ってある部分の河道に近い箇所では五福谷川の氾濫・破堤が発生しており、ここから堤内地、五福谷川と内川に囲まれた部分に多量の流水と土砂が流入している。Case1とCase2とを比較すると、Case1では特に白点線で囲まれている部分において比較的強い流れが生じている。これは図-10に示す河床高の変化からも分かる通り、河道内に土砂が堆積した結果、河道の容量が減少しているためであり、そのことで破堤・氾濫がより顕著になっていることが分かる。

図-10に示す土砂堆積厚について、Case1とCase2とを比較すると、Case1では微細土砂の流入を考慮しているために多くの土砂が氾濫域に堆積していることが分かる。図-11は、著者らが現地調査を実施した際に検土杖を用いて堆積した土砂の厚さを計測したものである。場所に

よっては1m以上の厚さで土砂が堆積していることが分かる。図-10で赤く着色されている部分は1m以上の土砂堆積が計算されている場所であり、Case1の方がCase2よりは現地の堆積状況（図-10）に近いことが分かる。

氾濫域で顕著に見られた上下流での縦断分級について、計算結果がどの程度再現できているかを確認するために、図-12にはCase1の表層河床材料の粒度分布の空間分布を示している。図において、赤く着色されているところは中央粒径が2mm以上と計算されている領域であり、青く着色されているところは表層に極微細な土砂が堆積しているところである。図-12（計算結果、紙面の都合で中央粒径の空間分布のみ）と図-6（現地の状況）を比較すると、氾濫域の上流側（図の左下）で比較的粗く、下流側（図の右上）で比較的細くなっており、上下流での分級現象を概ね評価することができている。

5. 結論

2019年の台風19号による災害で甚大な被害を受けた宮城県の阿武隈川水系五福谷川における、多量の土砂を含む洪水流の特徴を明らかにすることを目的に、現地調査を行うと共に、洪水流の解析を行った。特に山地区間からの微細土砂の流出について、堆積土砂からの河床侵食に伴う微細土砂の流出量を評価する手法を新たに提案した。この方法により算出された微細土砂の量は、山地区間で生産された土砂の3割程度と推定され、この手法は概ね妥当であると考えられる。

洪水流解析を行った結果、計算区間に流入した土砂は氾濫域の広範囲に厚く堆積していた。河道に土砂が堆積したことにより、河道の容量は減少しており、そのことによって氾濫域への洪水流や土砂の流入が助長されていた。土砂の堆積厚について計算結果と実際の堆積厚を比較すると、計算結果は現地の堆積厚を概ね再現することができていると考えられる。また、氾濫域で顕著に観察された土砂の縦断分級は良好に再現できている。

謝辞：本研究の実施にあたり、JSPS科研費（課題番号:18K13842）の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土地理院：令和元年(2019年)台風19号に関する情報，<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/R1.taihuu19gou.html>
- 2) 土木学会水工学委員会：令和元年台風19号豪雨調査団 速報会資料「宮城県丸森町における流木災害の状況」，2019.
- 3) 宮城県：令和元年台風第19号により被災した河川管理施設等の技術検討会（第4回）説明資料，2020.
- 4) 原田大輔，江頭進治：ダム流域における流砂・河床変動の評価法に関する研究，河川技術論文集，第25巻，pp.711-716，2019.
- 5) 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), 74(4), I_925-I_930, 2018.
- 6) 江頭進治，松木敬：河道貯留土砂を対象とした流出土砂の予測法，水工学論文集，第44巻，pp.735-740，2000.
- 7) Shimizu, Y., Nelson, J., Amez Ferrel, K., Asahi, K., Giri, S., Inoue, T., Iwasaki, T., Jang, C.L., Kang, T., Kimura, I. and Kyuka, T. (2020). Advances in Computational Morphodynamics Using the International River Interface Cooperative (iRIC) Software. Earth Surface Processes and Landforms.
- 8) Sayama, Takahiro, et al. "Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin." Hydrological Sciences Journal 57.2, pp.298-312, 2012.
- 9) 江頭進治，宮本邦明，伊藤隆郭：掃流砂量に関する力学的解積，水工学論文集第41巻，pp.789-794，1997.
- 10) 国土地理院：基盤地図情報，<http://www.gsi.go.jp/kiban/>

(2020. 4. 2受付)