

荒瀬ダム撤去事業における 堆積土砂・浮遊土砂の動態に関する研究

SEDIMENT RELEASE AND DEPOSITION PROPERTIES IN THE KUMAGAWA RIVER ASSOCIATED WITH THE ARASE DAM REMOVAL PROJECT

大槻順朗¹・伊豫岡宏樹²・二瓶泰雄³

Kazuaki OHTSUKI, Hiroki IYOOKA and Yasuo NIHEI

¹正会員 博（工） 前 東京理科大学助教 理工学部土木工学科（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）
（現 土木研究所 自然共生研究センター 専門研究員）

²正会員 博（工） 福岡大学助教 工学部社会デザイン工学科（〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-13-1）

³正会員 博（工） 東京理科大学教授 理工学部土木工学科（〒278-8510 千葉県野田市山崎2641）

Sediment release and deposition due to a dam removal were investigated in the Arase Dam, Kumagawa River, Japan. In the first year of dam removal, about 26% of trapped sediment were washed away and it formed new sand bar and riffle on the downstream of dam but the sediment release were sharply decreased in the second year (>3% of total). The river bed stability seems to be affected by the dominant gravel and cobble size sediment and rock framework effect at the rapid which existed before dam construction. In terms of impact on suspended sediment supply, we could not monitor significant changes assumed by the dam removal. The dam removal properties were compared at the point of relation between sediment size and actual tractive force and it showed that sediment size treated in the Arase dam relatively large and it made difference of resilience for the unusual sediment supply.

Key Words : dam removal, sediment erosion, sediment deposition, suspended sediment, Arase dam, Kumagawa River

1. はじめに

国内外の河川においてダム等横断構造物による流砂系への影響を改善するための土砂還元施策が実施されている。国内では、取扱う土砂量が数千 m^3 程度の置土が主であり、数万 m^3 を超える事例は少ない。ダム撤去の先進国である米国でも小規模の事例が大多数であるが、2006年ごろからは10万 m^3 あるいは100万 m^3 オーダーの多量の土砂を扱う事業が実施されている¹⁾⁴⁾。今後、ダム等河川横断構造物の撤去や改良については、環境施策としてだけでなく、老朽化する構造物のマネジメントの観点も含め増加すると見込まれる。事業の合理的な管理や評価のためには、土砂の流出量や影響範囲を見積もることが求められるが、特に、10万 m^3 超の大規模土砂還元については事例が少なく、経験的な知見が十分でない。

そのような中、土砂量62万 m^3 を扱う本格的ダム撤去事業が球磨川・荒瀬ダムにおいて進められている。本事業は2010年に事業開始、2015年にはダム堤体右岸側半分が撤去され、みお筋の連続性が回復するとともに、6月の出水期には約18万 m^3 の砂礫土砂が旧ダム貯水池からダム

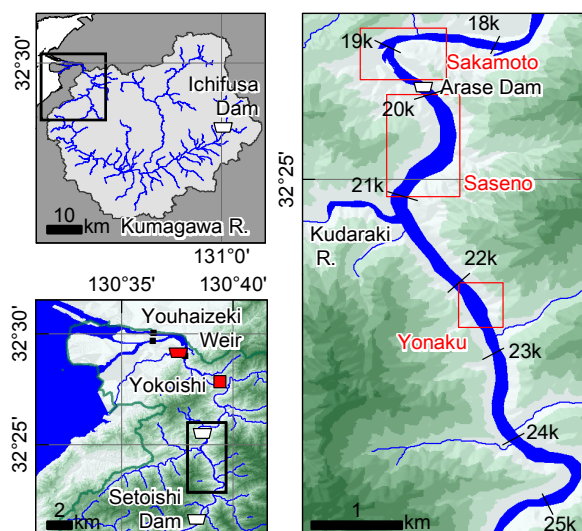


図-1 研究対象地位置図

下流へと流出した（大槻ら⁵⁾、以下前報）。これにより、旧ダム貯水池ではダム建設前の状態に近い流路や瀬淵が出現し、ダム下流には新たな砂州が形成され、伏流水として砂州で濾過された清澄な水を湛えるワンド状水域ができるなど⁶⁾、事業により河川環境上好ましい効果が現

れている。一方、土砂還元策の一般論として、施策前の流況・河床状態に対し、異質な粒径の土砂を大量に投入するため非定常性が特に強まることや対象地の河床状況において流砂現象が複雑であることなどにより、現在の河床変動予測技術では必ずしも予測は簡単ではない。対象とする土砂量が多くなればその傾向もより強くなる。今後は、様々な条件にも対応できる河床変動予測手法の確立が求められるが、それと並行し、事例から還元後の土砂輸送現象を理解し、管理・評価に向けた経験的な知見を得ることが必要となる。

本研究では、前報⁵⁾に続き、継続的モニタリング結果をもとに、本ダム撤去に関わる土砂動態について得られた知見を述べる。次に、本事例と同程度の土砂量を扱う海外のダム撤去事例および国内の置土実験の事例を比較し、河道の特性と対比しながら位置づけることで、今後の土砂還元施策に寄与する知見を抽出する。

2. 研究手法

(1) 研究サイト

本研究の研究対象である荒瀬ダムは、熊本県南部の1級河川球磨川の河口から19.9km、河床勾配1/300-1/1000程度の穿入蛇行部に位置し（図-1）、河床は概ね砂礫で構成されている。荒瀬ダムの上流約9kmには瀬戸石ダムがあり、ダム下流には遥拝堰（河口から9km）等の堰がある。本研究では、ダム下流（坂本：19.0～19.9km）、ダム直上流（佐瀬野：19.9～21.0km）、ダム上流の流水回復区間（与奈久：21.9～22.5km）の区間に分けて調査分析を行った。

荒瀬ダム下流の横石観測所における流量ハイドログラフを図-2に示す。2015年の堤体右岸側撤去後、2015/3/19の小出水による仮締切流失によりダム上下流の流水の連続性が回復し、一部の土砂が流出、その後、同年6/3の約3000m³/secの出水が撤去後初の大規模出水となり、多量の土砂が流下しダム下流に堆積した。堆積した土砂については、管理上の観点から、冬季に平水面より上部が掘削された。撤去後2年目となる2016年においては、2015年に比べほぼ同規模の出水規模となり、ピーク流量は最大で3500m³/sec程度であった。

(2) モニタリング

地形測量：ダム近傍の主に砂州上において河床高のRTK-GNSS測量を行った。また、UAVによる低空航空写真撮影（相対高度200m）を実施し、上述の測量結果を参照点として写真データにSfM（Structure from Motion）解析を施し、対象区間の地形モデルを作成した。調査は前報⁵⁾と合わせて4回実施した。調査によって得られた情報と熊本県企業局公開の測量成果情報⁷⁾を合わせ、ダム撤去後の経年的な地形変化を分析した。調査時期については、図-2の下図に示している。

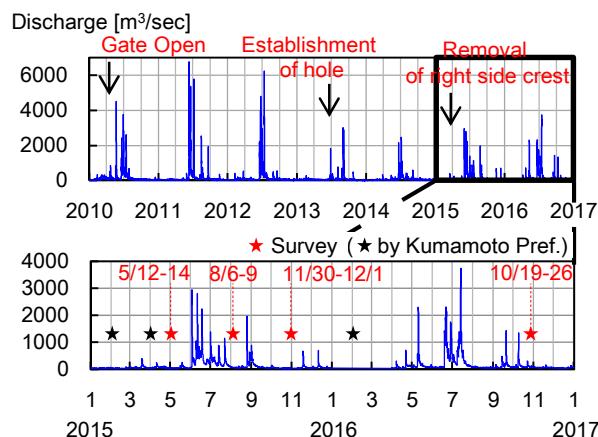


図-2 荒瀬ダム撤去期間中の流量変動（横石）および事業期間中の主なイベント（上）と調査日（下）

SSモニタリング：荒瀬ダム撤去に伴う浮遊土砂の輸送動態の観測のため、遥拝堰観測地点（図-1）において、2011年8月から2016年11月にかけて光学式濁度計を用い濁度連続観測を行った。この間、2012年の出水期には濁水採取・分析を行い、濁度とSSと相関を調査した⁸⁾。後述のSS値はこの相関式に基づいている。

(3) 大規模土砂還元策の相互比較

荒瀬ダム撤去事業を河道特性の観点から位置づける目的で、当該事業同様、取り扱う土砂量が10万～100万m³オーダーの米国のダム撤去事業の事例（5ケース）⁹⁻¹⁵⁾と徳島県那珂川・長安ロダムにおける置土事例¹⁶⁾を取り上げ、文献から河川の水力量、土砂量・粒径等に関する情報を抽出した。特に、河川の掃流力と粒径の関係性に着目し、河床勾配、ダム（河道）幅、流量（事業以後の最大流量）より、等流条件で無次元掃流力が0.05となるときの粒径（移動限界粒径： d_c ）を求めた。

3. 荒瀬ダム近傍における地形変化

荒瀬ダム上下流における侵食・堆積動態を概観するため、図-3に平水時における水位縦断分布を観測時ごとに示す。あわせて図-4には空中写真に砂州上の地盤高の計測結果を、図-5には代表的な測線における断面図を示す。

ダム下流（坂本）での変化を見ると、2015年の出水期明けに土砂堆積に伴い水位面が1～1.5m上昇している。その後砂州が人為的に掘削され、水位面が若干低下したが、2016年10月には再び上昇しており、この期間の出水により新たに土砂が堆積したことが分かる。2016年10月の平水面から、ダム下流の土砂堆積はダムから1.3km下流にまで到達していると考えられ、図-4の平面図より、2015年に出現した砂州により、右岸側から左岸側へ流路が横断する瀬、砂州の背後にはワンド状の水域が確認でき、2016年にも多少変形しているが同様に確認できる。

ダム直上の佐瀬野地区においては、2015年の出水期後に平水位が大きく低下するとともに、ダム撤去以前にも

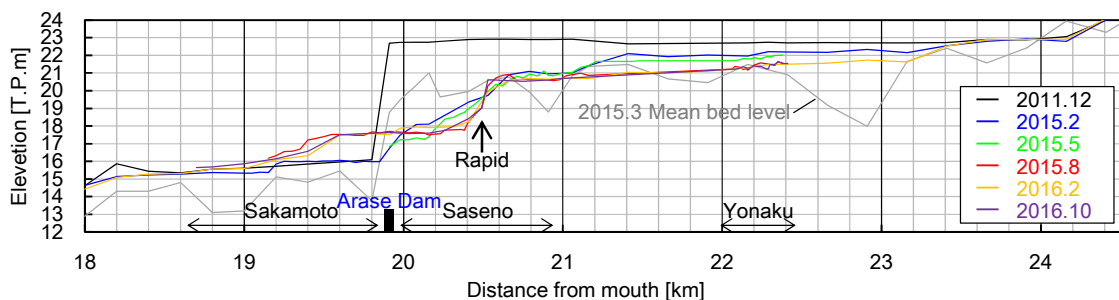
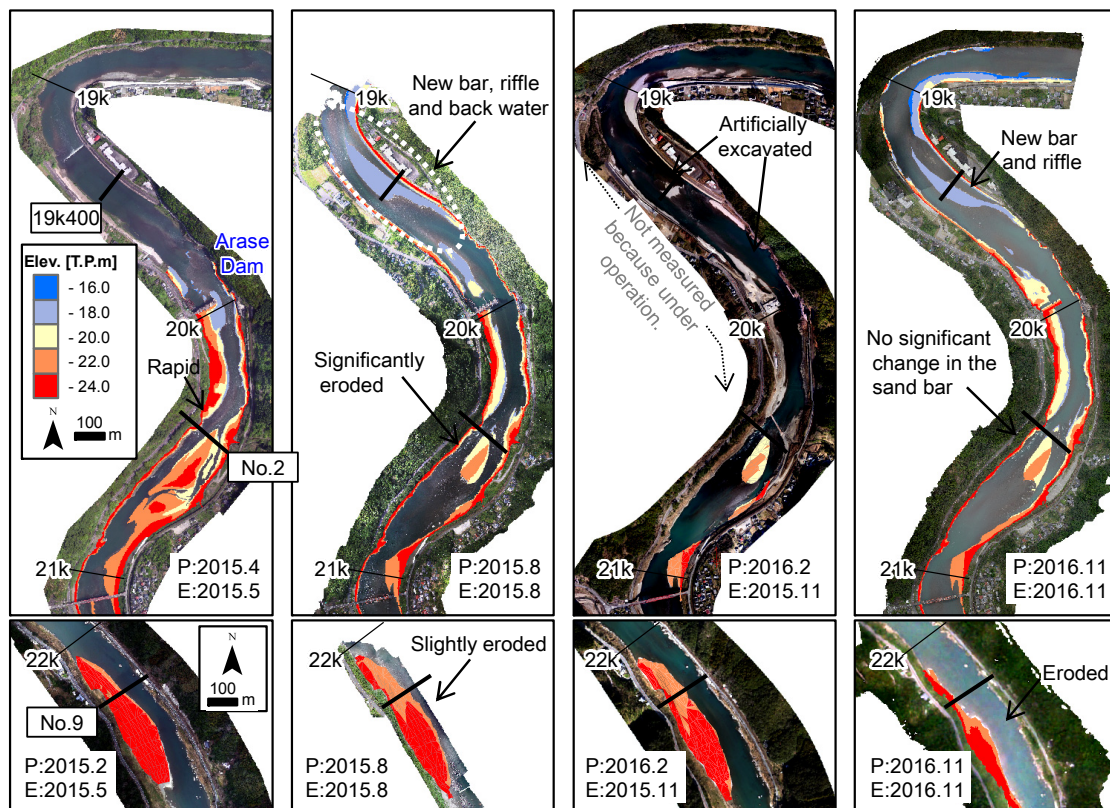


図-3 荒瀬ダム上下流における平水時の水位縦断分布の時間変化



* P and E indicate month that aerial photo was taken and elevation was measured, respectively.

図-4 荒瀬ダム上下流における航空写真と砂州地盤高の分布

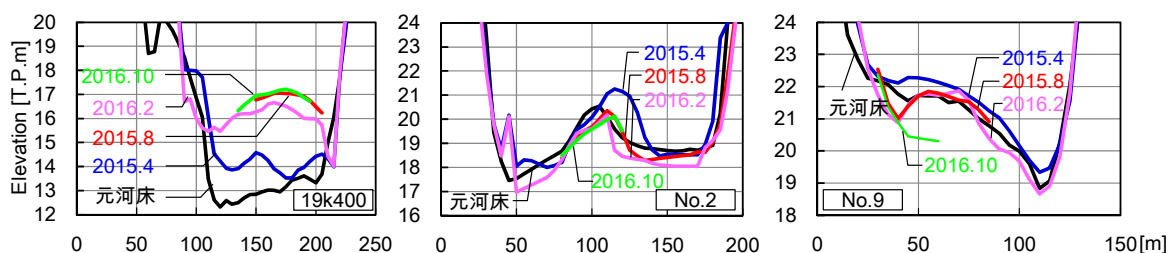


図-5 荒瀬ダム上下流における横断面形状の変化

あった早瀬が、平水面が急激に変化する遷移点 (knick point) として現れている。しかしながら、2016年の出水期前後での変化は乏しく、図-4、図-5の平面図、断面図を見ても、早瀬上流の砂州形状、高さに大きな変化がない。海外のダム撤去事例においては、knick pointが上流^{14),15)}もしくは下流へ¹⁰⁾移動しながら河床勾配が連続的になり、堆砂域全体の侵食が進行するケースが多い。本対象地では、遷移点は巨石で構成される早瀬であり、侵食に対して強く抵抗している。その結果、その上流側砂州の侵食も抑制され、堆積土砂のダム下流への流出量が低

減したひとつの要因となっていると考えられる。

上流の与奈久地区では、2015年まで平水面は段階的に低下しているが、2016年出水前後にはそれほど低下していない。しかしながら、図-4の平面図、図-5の横断面図でみると、2015年より2016年におけるほうが砂州の侵食が顕著であり、河床侵食の上流への伝搬が、下流の佐瀬野地区から1年遅れて生じていることがわかる。

佐瀬野、与奈久地区の水面上の砂州の地形測量結果を用いて2016年の出水期前後の土砂流出量を推定したところ、およそ2.3万 m^3 (撤去前堆積量のおよそ3%) となっ

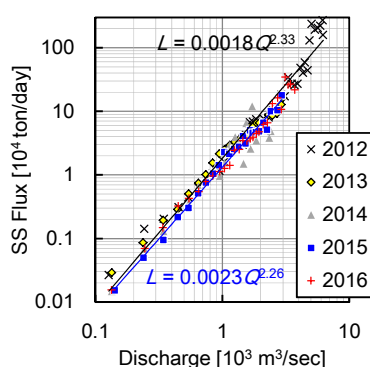


図-6 遥拝堰観測地点における流量と浮遊土砂輸送量の関係

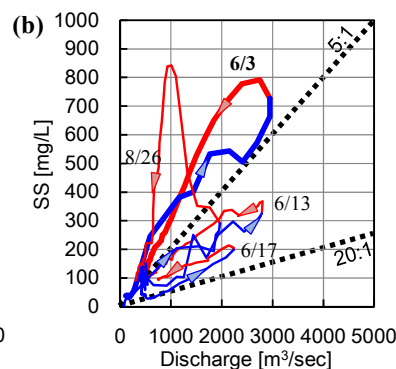
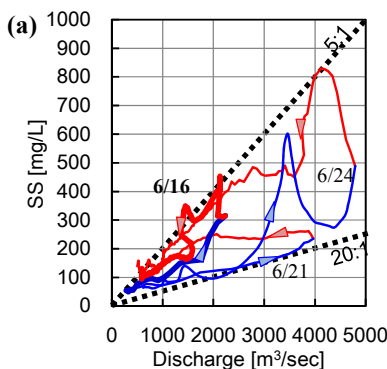


図-7 遥拝堰観測地点における流量-SSカーブ
(a)2012年, (b)2015年

た。影響範囲全体を網羅していないが、河道地形の変化が小さいことや、ダム下流に出現した砂州のボリュームと同程度であることから、全体としての流出量もこの程度であると推察される。この量は撤去1年目において流出した量（17.7万 m^3 ）の1割程度である。

4. 荒瀬ダム撤去前後における浮遊土砂流出動態

図-6に、観測各年における観測流量・濁度データに基づく流量 Q と浮遊土砂輸送量 L の関係（ L - Q 関係）を示す。ここでは、既往研究⁸⁾と同様に低水時のデータの偏りを均すため、流量区分ごとに平均処理を行ったデータに対し回帰線を求めている。これより、ダム撤去1年目である2015年の観測結果については、他の年と比較して顕著な差異は見られなかった。近似線のべき乗の係数は2012年と2015年でそれぞれ2.33および2.26であり、2015年が流量に対し浮遊土砂輸送量が特段大きいとは言えない。

次に、出水別の挙動について流量とSS（Suspended Sediment）濃度の関係を図-7に示す。ここでは、2012年と2015年の中規模（2000～4000 m^3/sec 程度）出水時のデータを示しており、青線が増水期、赤線が減水期を表し、太線で描かれたものはその年の第一出水（ここでは500 m^3/sec 以上）であることを示す。これより、遥拝堰においては、増水期に比べ減水期のほうが流量に対するSS濃度が高い反時計回りのループになっており、それは2015年でも同様であること、第一出水時には、他の出水に比べ相対的にSSが高いファーストフラッシュ現象が生じることが知られるが⁹⁾、2015年の第一出水については、2012年における挙動範囲（1:5～1:20の範囲）から外れ、よりその傾向が強く現れていることから、ダム撤去による土砂流出の影響が生じている可能性が示唆される。一方、その後の出水においては、概ね2012年の挙動範囲に収まっており、明確な高濃度の傾向は見られない。

以上より、下流に流下した浮遊土砂に関しては、ダム撤去による土砂流下の影響は、出水規模の大小の影響よりも相対的に小さかったと考えられる。これは荒瀬ダム旧湛水域に存置された土砂からあらかじめ細粒分が除去

され、後述（図-8）のように砂礫が主成分であったことが主な要因として考えられる。これに対し、細粒分が卓越する米国のダム撤去では、SSの最大濃度が数万¹¹⁾から数十万^{12), 13)}mg/Lに達する場合も見られている。

5. 各地のダム撤去等土砂還元施策との比較

荒瀬ダム撤去事業の位置づけのため米国のダム撤去事例等を規模、工法、水理条件の観点から整理した（表-1）。取り扱われた主な土砂の粒度構成を図-8に示す。主な撤去に関する相違点について述べる。まず工法については、短い期間で堤体を撤去する工法（Rapid）と数年に渡り段階的に堤体を切り下げる工法（Staged）がある¹⁾。荒瀬ダムは、2010年のゲートの全開放、2013年の水位低下装置敷設により貯水池水位は段階的に下げられたが、本格的な土砂流出は生じなかったためRapidとした。また、米国のダム撤去では、下流への影響の懸念が小さい場合や、撤去の目的として魚類の回遊のための河川の連続性の回復に重点が置かれる場合が多く、費用対効果の観点から、事前に堆積土砂を掘削、調整することなくそのまま流下させることが多い。そのため、扱う土砂の粒度は相対的に細かなものが多い。一方、国内の荒瀬ダムや長安口ダムの置土事例では、下流への環境上の影響に配慮し、濁りを発生させる細粒分は扱われず、Gravel(<64mm)が主体であり、実際にはCobble(<256mm)レベルの粒径も多く含まれている⁷⁾。現場の水理条件については、国内外とも河床勾配は概ね1/100～1/300であるが、流量は国内の事例のほうが大きい。ただし、流速や移動限界粒径で比較するとそれほど差はない。

ダム撤去事例における土砂排出速度を概観するため、各事例における累積土砂排出率の経時変化を図-9に示す。この図では、撤去の形式により色を（Rapid：青、Staged：赤）、土砂の粒度別に線種を変えて（実線：粘性土、長破線：砂礫、破線：砂）表示している。これより、いずれのケースにおいても、初期に侵食速度が大きく、その後速度が低下している。撤去の工法としてはStaged式に比べRapid式のほうが、粘土シルトよりも砂の

表-1 各地のダム撤去および置土事例の状況

	Arase	Elwha	Glins Canyon	Condit	Marmot	Stronach	Nagayasu-guchi
Location	Kumagawa R. Kumamoto, JP	Elwha R. WA, US	Elwha R. WA, US	White Salmon R. WA, US	Sandy R. OR, US	Pine R. MI, US	Nakagawa R. Tokushima, JP
Year	2012	2011	2012	2011	2007	1996-2003	2009
Style	Rapid and pre-excavated	Rapid	Staged	Rapid (Breaching)	Rapid (Breaching)	Staged	Sediment replenishment
Sediment size	Sand & Cobble	Silt & Sand	Sand & Gravel	Sand & Gravel	Sand & Gravel	Gravel	Gravel
Dam height [m] width [m]	15 211	32 55	64 57	38 144	14 59	4 71	- 162
Sediment volume [10^3m^3]	626	4,900	16,000	1,700	730	789	159
Watershed area [km^2]	1,721	816	635	1,000	1,300	686	539
Sediment release in 1st year [%] [10^3m^3]	24 150	19 930	1 170	72 1300	48 350	3 95	75 120
Length of influence (Course fine) [km]	1 - 2 20 ??	13 < 13 <	12 21 <	5 < 5 <	6 40?	- -	3.5 - 2.5 -
Mean flow [m^3/s]	71	42	42	32	38	8.1	30
Peak flow after project [m^3/s]	3015	215	215	421	231	41.6	5750
Bed slope [m/m]	1/250	1/152	1/113	1/111	1/125	1/625	1/300
Uniform flow depth; h_0 [m]	3.75	1.48	1.33	1.13	1.40	0.73	6.83
Velocity for h_0 [m]	3.82	2.64	2.84	2.58	2.80	0.81	5.20
u_*^2 [cm^2/sec^2]	1471	957	1156	1001	1098	114	2234
Critical grain size [cm]	18.2	11.8	14.3	12.4	13.6	1.4	27.6
Reference	5), 6), 7), 8)	9), 10), 11), 12)	9), 10), 11), 12)	13)	14)	15)	16)

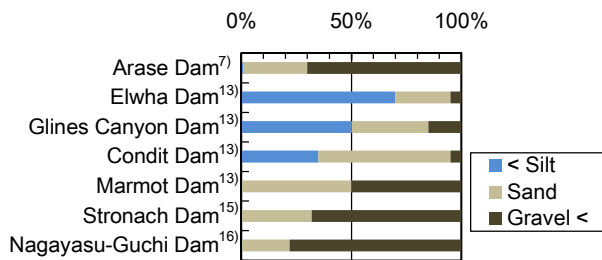


図-8 各土砂還元事業において取り扱われた代表的な土砂の粒度構成

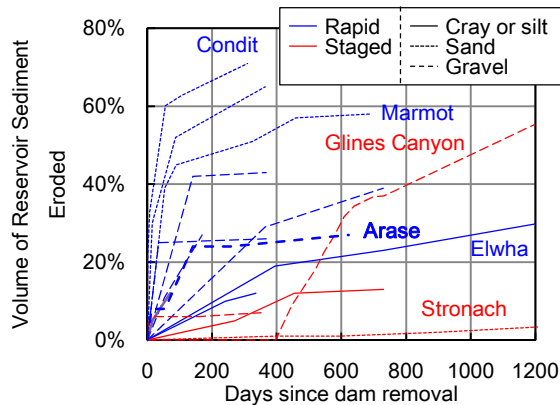


図-9 各ダム事業における土砂流出割合の経時変化 (文献¹⁾⁴⁾ に追記, 粒度区分は¹⁾に従う)

ほうが、累積流出率が大きくなる傾向にある。主成分が砂であれば平水時の流量でも容易に輸送される一方、粘性土が含まれると側方侵食抵抗が高く、みお筋に沿った溝状の流路が形成され、侵食を受けなかった部分はテラス状の地形として取り残される¹⁰⁾。この程度が最終的な排出量に影響している。一方、砂より粗い砂礫で構成される荒瀬ダムでは、1年目には比較的速度い侵食速度を呈するが、2年目までの累積流出率は30%弱にとどまり、粘性土主体のElwhaダムと同程度である。これは、土粒子のサイズによる輸送抵抗の高さと、前述のような石礫の構造化による侵食抵抗性の増加が相互に影響していると考えられる。

各事例における発生掃流力と取り扱われる粒径との関

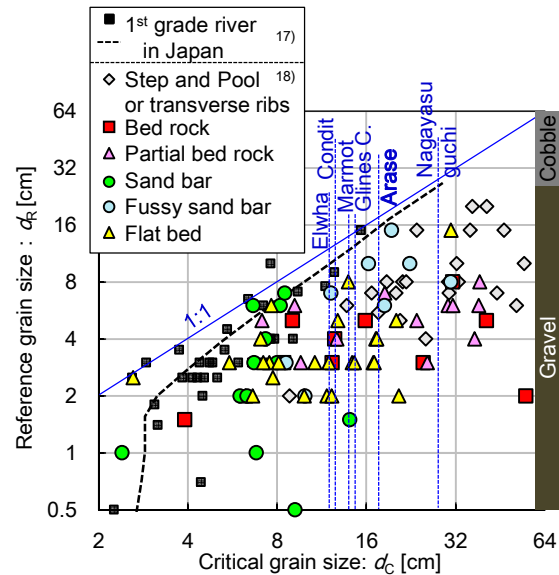


図-10 ダム撤去等事例における移動限界粒径と代表粒径および実河川において発生する河床形態の関係

係を見るため、移動限界粒径 d_c と代表粒径 d_r の相関図を図-10に示す。この図では、表-1の算出された各事例の d_c を縦青線で示し、図中のプロットおよび黒線は、実河川における調査分析結果¹⁷⁾、¹⁸⁾を引用しており、 d_c は、一級河川では年平均最大流量、中小河川では1年確率降雨強度に対する推定流量から求められており、概ね両者は同じ確率規模に対応している。これらの結果からは、 d_c がおおむね6~8cm程度で砂州 (Sand bar)、16cm以上ではStep-Poolまたは礫列 (Transverse ribs) 形態をとり、その中間では残存する土砂の代表粒径が小さいと平坦河床 (Flat bed) となり、大きいと遷移領域的な不明瞭な砂州 (Fuzzy sand bar) 形態となる傾向が見える。この図より、今回取り上げた事例では、流量規模は異なるが、 d_c は概ね10~20cmの間にあり、不明瞭な砂州やStep-Poolが生じる領域に位置している。一方で、各事業で扱われた土砂の粒径と対応して見ると、荒瀬ダムでは実河川に見られる代表粒径と同程度に大きい、米国のダム撤去事例では実河川で見られる粒径よりかなり小さい。米国

Elwhaダムの撤去においては、1年目におよそ30万 m^3 と多量の細粒土砂が、川幅50m程度の小河川に流下した。その結果、下流の河床は埋没し、一旦は瀬淵などの河床縦断構造が失われたが、その後の出水を受け、細粒分が再洗掘を起こし、元の縦断構造が回復してきている^{11), 12)}。一方、荒瀬ダムにおいては、流出土砂の粒径が河川の掃流力状態から見て、河川においてみられる河床代表粒径程度かそれ以上に大きいものも含まれていた。そのため、ダム下流に流出した土砂により発生した砂州の再変形の程度は米国の事例と比べると相対的に移動しにくい。このようなことから、扱う土砂の粒径と発生する掃流力の関係により、土砂流出の影響の大きさや期間の長さ、復元の程度が大きく異なることが想定される。

6. 結論

本研究では、荒瀬ダム撤去事業に関わる継続的な現地観測結果により、ダム近傍における土砂動態を明らかにした。ダム撤去1年目には、主にダムから上流2kmの範囲が侵食されダム下流に砂州が形成されたが、2年目には、ダム上流からの土砂流出は大きく減少した（撤去前堆積量の約3%）。侵食の抑制には、石礫河川の河床安定性が寄与している。侵食の範囲は、2年後には上流4kmの与奈久地区付近にまで伝搬した。

ダム下流における濁度・SS観測の結果、ダム撤去によるSSの増加は撤去1年目の第一出水に僅かに見られた程度であり、洪水の規模による影響のほうが大きく、土砂濃度も海外事例と比較し低かった。

荒瀬ダム撤去事業と海外の事例を比較したところ、移動限界粒径では各事例に大差ないが、扱われる土砂の粒径は海外の事例では非常に小さく、荒瀬ダム等日本の事例では河床の代表粒径になりうる程度に大きい。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究（A）（課題番号：15640452、研究代表者：鬼倉徳雄）の一部を使用した。熊本県企業局および国土交通省八代河川国道事務所には貴重なデータを提供していただいた。現地観測には、東京理科大学理工学部水理研究室、福岡大学工学部水圏システム工学研究室学生諸氏に大変お世話になった。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Grant, G. E., Lewis, S. L.: The Remains of the Dam: What Have We Learned from 15 Years of US Dam Removals?, In Engineering Geology for Society and Territory-Volume 3 Springer International Publishing, pp 31-35, 2015.
- 2) Sawaske, S. R., Freyberg, D. L.: A comparison of past small dam removals in highly sediment-impacted systems in the US Geomorphology 151, 50-58, Vol. , pp., 2012
- 3) Magirl, C. S., Connolly, P. J., Coffin, B., Duda, J. J., Draut, A. E.: Sediment management strategies associated with dam removal in the State of Washington, In 2nd Joint Federal Interagency Conference, 2010.
- 4) O'Connor, J. E., Duda, J. J., Grant, G. E.: 1000 dams down and counting, Science, Vol. 348(6234), pp.496-497, 2015.
- 5) 大槻順朗, 伊豫岡宏樹, 二瓶泰雄, 吉森佑介, 中村俊介, 鬼倉徳雄: 荒瀬ダム撤去後の堆積土砂の流出・堆積状況, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 72(4), pp.I_853-I_858, 2016.
- 6) 小林草平, 角哲也, 竹門康弘: ダム撤去後に下流に形成した砂州の生物生息場機能, 河川技術論文集, Vol. 22, pp.463-468, 2016.
- 7) 熊本県企業局: 荒瀬ダム撤去室HP (荒瀬ダム撤去フォローアップ専門委員会・委員会資料), <http://www.arasedamtekkyo.hinokuni-net.jp/index.htm>.
- 8) 大槻順朗, 川崎貴志, 二瓶泰雄, 鬼倉徳雄: 出水時球磨川における粒径別浮遊土砂輸送特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69(4), pp.I_1063-I_1068, 2013.
- 9) Warrick, J. A., Bountry, J. A., East, A. E., Magirl, C. S., Randle, T. J., ... Duda, J. J.: Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: source-to-sink sediment budget and synthesis, Geomorphology, Vol. 246, pp.729-750, 2015..
- 10) Randle, T. J., Bountry, J. A., Ritchie, A., Wille, K.: Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: Erosion of 5reservoir sediment, Geomorphology, Vol. 246, pp.709-728, 2015.
- 11) East, A. E., Pess, G. R., Bountry, J. A., Magirl, C. S., Ritchie, A. C., Logan, J. B., ... Liermann, M. C.: Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA: River channel and floodplain geomorphic change, Geomorphology, Vol. 228, pp.765-786, 2015.
- 12) Morgan, J. A., Nelson, P. A.: Hydro-and morphodynamics of riffle-pool sequences in the middle Elwha River, Washington, USA, In River Flow 2016, pp.1212-1216, 2016.
- 13) Wilcox, A. C., O'Connor, J. E., Major, J. J.: Rapid reservoir erosion, hyperconcentrated flow, and downstream deposition triggered by breaching of 38 m tall Condit Dam, White Salmon River, Washington, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Vol. 119(6), pp.1376-1394, 2014.
- 14) Major, J., O'Connor, J., Podolak, C., Keith, M., Spicer, K., Wallick, J. R., ... & Grant, G.: Evolving fluvial response of the Sandy River, Oregon, following removal of Marmot Dam: 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, 2010.
- 15) Burroughs, B. A., Hayes, D. B., Klomp, K. D., Hansen, J. F., Mistak, J.: Effects of Stronach dam removal on fluvial geomorphology in the Pine River, Michigan, United States, Geomorphology, Vol. 110(3), pp.96-107, 2009.
- 16) 武蔵由育, 志宇知誠, 山下正浩, 竹林洋史, 湯城豊勝, 鎌田磨人, ... 中田泰輔: 置土された土砂の流下過程の数値解析モデルの構築と実河川における適用, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 67(4), pp.I_817-I_822, 2011.
- 17) 山本晃一: 沖積河川: 構造と動態, 技報堂出版, 2010.
- 18) 大石哲也, 高岡広樹, 原田守啓, 萱場祐一: 中小河川改修時の川幅設定が河道の景観に与える影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 70(4), pp.I_997-I_1002, 2014.

(2017. 4. 3受付)