

# 出水時球磨川における粒径別浮遊土砂輸送特性

## NON-UNIFORM SUSPENDED-SEDIMENT TRANSPORT IN KUMAGAWA RIVER UNDER FLOODING CONDITIONS

大槻順朗<sup>1</sup>・川崎貴志<sup>2</sup>・二瓶泰雄<sup>3</sup>・鬼倉徳雄<sup>4</sup>

Kazuaki OTSUKI, Takashi KAWASAKI, Yasuo NIHEI and Norio ONIKURA

<sup>1</sup>正会員 博 (工) 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)<sup>2</sup>学生員 学 (工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程 (同上)<sup>3</sup>正会員 博 (工) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (同上)<sup>4</sup>非会員 博 (農) 九州大学大学院助教 農学研究院附属水産実験所  
(〒811-3304 福岡県福津市津屋崎4-46-24)

SS Flux, particle size distribution and organic matter ratio under flooding conditions were investigated in the Kumagawa River in which dam removal operating will be conducted for the first time in Japan. The results showed 99% of SS were categorized into silt or clay and median diameter of particles had a tendency to be smaller than that of other rivers. The results of non-uniform sediment rating curve ( $L=aQ^b$ ) analysis indicated that the coefficient  $b$  were closely dependent on particle size. Total SS transports into the estuary were estimated  $179 \times 10^4$  ton from April, 2010 to July, 2012 and small silt (23.6~5.07 $\mu$ m) element had the best contribution.

**Key Words :** *non-uniform suspended-solid transport, sediment rating curve, dam removal, flood, Kumagawa River*

### 1. はじめに

地球温暖化に伴う水災害・渇水リスクの向上や原発停止に伴う電力不足解消への要請に対応するために、治水・利水・発電機能を備えるダムは見直されつつある。しかしながら、ダムは治水・利水を通じ人間活動に多大な恩恵をもたらしてきた一方で、土砂・生物移動に代表される河川環境の連続性を分断するため、ダム周辺のみならず、上下流河川や周辺海岸に大きな環境変化をもたらしている<sup>1)</sup>。このような土砂輸送障害の対策として、排砂バイパスや排砂ゲート操作、置き土という河川への土砂還元策が実施・検証されてきたが<sup>2)</sup>、最も抜本的な対策と言えるのは「ダム撤去」である。このダム撤去に関しては、欧米における先進事例が多くあるが<sup>3)~5)</sup>、我が国では実施されておらず、河川条件が大きく異なる欧米での知見が我が国に適用できるかは不明である。

そのような中、我が国初のダム撤去事業が熊本県球磨川の河口から20km地点に位置する荒瀬ダムで行われることが2009年度に決まった<sup>6)</sup>。その後、2010年4月よりダムゲート操作は停止され、ゲートは常時全開状態となっており、2012年度後半には、ダム堤体の水位低下設備設置等の本格的な撤去工事が実施されることになっている。今回のダム撤去事業の最大の特徴は、荒瀬ダムが河口・

海域に比較的近いことであり、ダム撤去の効果が、河口干潟・沿岸環境に素早く現れることが予想される。既に、ダムゲート全開後の干潟の砂質化等の報告もなされている<sup>7)</sup>。

このような荒瀬ダム撤去による環境回復効果を把握するためには、ダムの下流河川や河口干潟、沿岸域にわたる水底質環境や生態系に及ぼす影響に関する総合的環境モニタリングをダム撤去前から実施する必要がある。このため、著者ら<sup>8)</sup> (以下、前報と呼ぶ) は、2011年度より、荒瀬ダムの上・下流部における浮遊土砂 (SS) ・DOの連続調査や球磨川上・下流部、河口、沿岸域にわたる底質環境調査を実施している。その一部の成果として、2004年以降では大規模出水に伴いSS輸送量が大きくなっており、結果として、河口干潟や沿岸域の砂質化が生じていることが明らかとなった。しかしながら、出水時における浮遊土砂の粒径分布や有機物・無機物の割合、それらの輸送状況は不明であった。

前報に引き続いて荒瀬ダム上下流地点におけるSSモニタリングを継続したところ、2012年6、7月に複数の大規模出水の観測を行うことに成功した。これらの結果に基づいて、本研究では、出水時における球磨川のSSの質 (粒径分布や有機物・無機物の割合) を明らかにするとともに、これらの輸送特性を把握することを試みる。また、

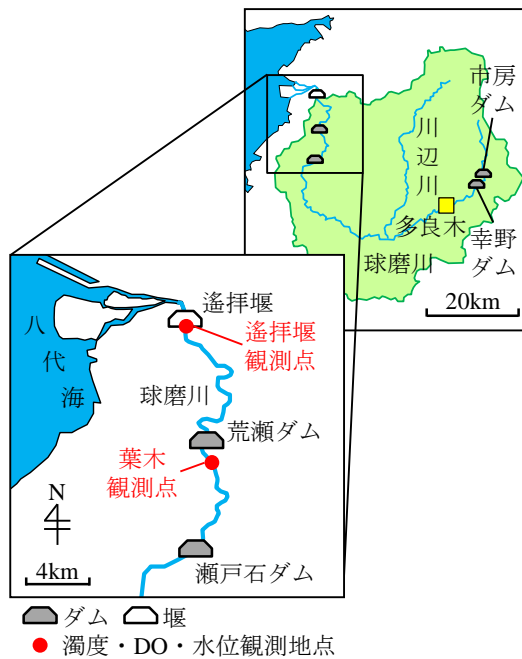


図-1 観測地点

表-1 球磨川流域におけるダム諸元

	市房 ダム	幸野 ダム	瀬戸石 ダム	荒瀬 ダム
完成年	1959年	1959年	1958年	1955年
目的	治水 灌漑 発電	灌漑 発電	発電	発電
貯水容量 [万m <sup>3</sup> ]	4020	32.6	993	1013.7
堆砂量 [万m <sup>3</sup> ]	399	1.7	73.2	87.6
堆砂率 [%]	78.2%	5.4%	9.5%	11.4%

これまで検討例が皆無に等しい、粒径別浮遊土砂輸送量Lに関するL-Q関係(Q:流量)を検討する。

## 2. 現地観測の概要

### (1) 球磨川流域の概要<sup>9)</sup>

本研究対象とする球磨川は、図-1に示すように、延長流路115km、流域面積1,880km<sup>2</sup>の一級河川であり、流域面積では九州3番目の河川である。球磨川は、干潟面積4,085haを有する八代海に注いでおり、干潟形成に大きく寄与している。球磨川流域における土地利用特性は、山林76.3%、水田10.2%、畑4.7%、市街地5.7%、その他3.1%となっており、山林が流域の大部分を占めている。また、中流部・球磨盆地や下流部・八代平野を除いて平地部分が少なく、急峻な地形となっている。球磨川の河床勾配は、上流部では1/200~1/600、中流部では1/300~1/1000、下流部では1/7000である。

球磨川流域には、表-1に示すように、上流から市房ダ

表-2 各地点の測器設置状況

使用機器	ダム上流 (葉木)	ダム下流 (遙拝堰)
濁度計	2011/8/8~現在	2011/8/8~現在
溶存 酸素計	2011/8/8~11/21	2011/8/8~11/21
水位計	2012/5/8~7/10	2012/5/8~現在
自動 採水器	-	2011/8/8~現在
		2012/5/9~7/2

ム、幸野ダム、瀬戸石ダム、荒瀬ダムの4つダムが設置されており、上記のダムにおける各々の堆砂量は2008年現在399, 1.7, 73.2, 87.6万m<sup>3</sup>である。荒瀬ダムの堆砂量は4つのダムの中で2番目に大きく、ダム撤去に伴い下流への土砂供給量は向上するものと見られる。

この荒瀬ダムは、発電目的に建設された重力式コンクリートダムであり、前述したように2010年2月に撤去方針が決定した<sup>9)</sup>。その後、ダム撤去に向けて2010年4月よりダムゲートが常時全開され、2012年9月より撤去工事の第1段階としてダム堤体の水位低下設備設置や洪水吐ゲートの撤去等の工事が開始された。ダム撤去工事は全体で6段階に分けられ、2017年度までかけてダム撤去を完了する予定である<sup>10)</sup>。

### (2) 現地観測概要

球磨川における浮遊土砂・物質輸送特性の実態解明と荒瀬ダム撤去影響把握を目的として、図-1に示すように、荒瀬ダム上流の葉木(ダム堤体より1km上流)と下流の遙拝堰(同11km下流)において、濁度とDO、水位の連続計測を行っている。ここでは、濁度計測には光学式濁度計(Compact-CLWもしくはINFINITY-Turbi)を、DO計測にワイパー付き溶存酸素濃度計(Compact-DOW、共にJFEアドバンテック(株)製)、水位計測には自記式水位計(U-20 Water Level Logger、Onset社製)をそれぞれ各地点の側岸部に設置している。各観測地点における測器設置状況と観測期間は表-2に示す通りである。なお、断面内の一点のみの計測値の代表性に疑問があるが、著者らの検討<sup>11)</sup>では低水路内でのSS横断変化に有意な差が見られなかったため、ここでは一点の計測値をそのまま用いる。また、出水時におけるSSの量や質を把握するために、遙拝堰において自動採水器(6712型ウォーターサンプラー、Teledyne ISCO社製)を上記機器の脇に設置した。設置期間中には、4つの出水イベント(①2012/6/16~18、②6/21~23、③6/24~27、④7/2)が発生し、概ね1時間間隔で1Lの採水を行っており、トータルで80個のサンプル水を取得した。採水サンプルについて、まず、全サンプルについて、多項目水質計(WQC-24、東亜ディーケーケー(株)製)により濁度、電気伝導度等を分析し、一部のサンプルについて、SSと強熱減量IL、浮遊土

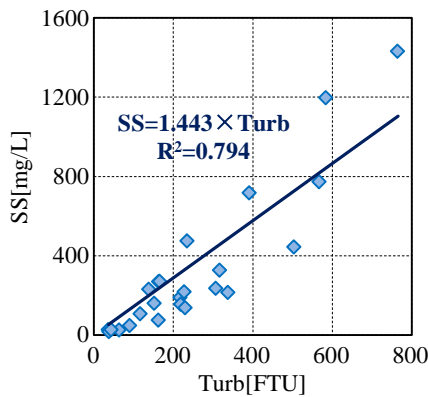


図-2 SSと濁度 *Turb*の相関関係

砂粒径分布を分析した。各項目の分析方法としては、SSにはガラス繊維濾紙法を用いて、サンプル水を濾過し、その後乾燥した濾紙の質量を計測して算出した<sup>12)</sup>。SS中に含まれる有機物量は、上記の濾紙を550～600℃で加熱し、加熱前後の質量差から強熱減量ILを求めた<sup>12)</sup>。粒径分析にはレーザー回折式粒度分布測定装置(SALD-3100, 島津製作所(株)製)を用いた。

### (3) データ解析

上記の観測結果より、荒瀬ダム上流(葉木)と下流(遙拝堰)における粒径別SS輸送量を把握する。流量に関しては、前報と同様である。SSについては、採水サンプルの分析により得られたSSと現場設置された光学式濁度計の計測値を用いて、濁度とSSの相関関係を検討したところ、図-2に示すように、 $SS[mg/L]=1.443 \times 濁度[FTU]$ という相関式が得られた。濁度からSS変換時の係数が小さいことから、浮遊土砂の粒径が小さいことが推測される<sup>13)</sup>。上式を用いて、濁度の連続計測結果をSSに変換し、SSと流量 $Q$ によりSS輸送量 $L$ を求める。これらの結果を用いて、SS全体に関する $L-Q$ 式( $L=aQ^b$ ;  $a, b$ は係数)を前報と同様に作成するとともに、粒径別SSに対する $L-Q$ 式も作成し、粒径別SS輸送特性の把握を行う。

## 3. 結果と考察

### (1) 出水時におけるSS・DOの連続観測結果

2012年梅雨期における出水状況と出水時におけるSSとDOの時間変化を見るために、多良木雨量観測所(国交省、河口から84km、図-1)における日雨量及びダム上下流に設けられた観測地点における流量とSS、DOの時系列変化を図-3に示す。ここでは、2012/6/15～7/10を対象とし、計4回の出水イベントが生じている。また、SSには、濁度計の計測値から図-2の相関式より変換したものをを用いる。これより、出水イベント①～④における累計雨量は、各々193、138、223、155mmである。また、ダム下流部の流量ピークは、イベント①～④においてそれ

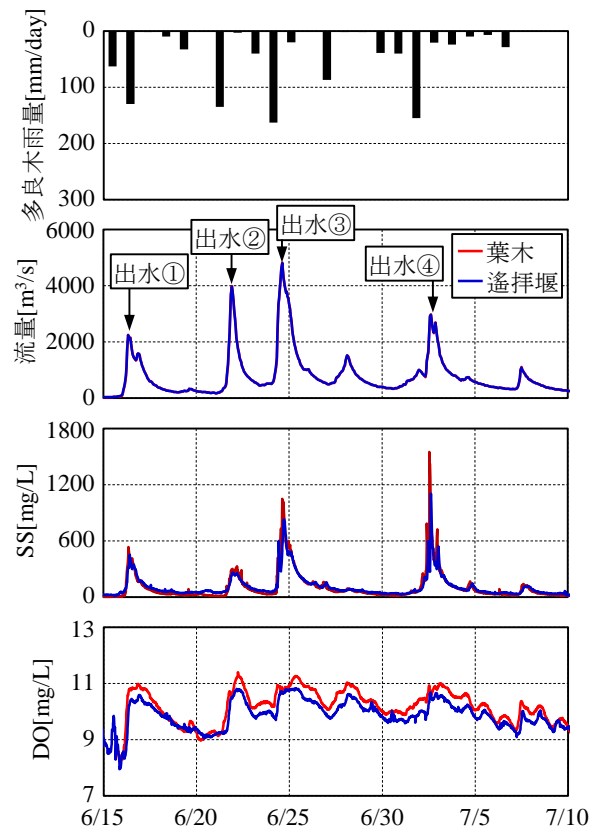


図-3 2012年出水時における雨量と流量、SS、DOの時系列変化(雨量のみ多良木雨量観測所(国交省))

ぞれ2235、3967、4793、2960[m³/s]となり、イベント③がこの期間最大の流量を記録している。また、ダム上流(葉木)とダム下流(遙拝堰)の流量は前報と同じくほぼ同じである。一方、SSやDOについては、ダム上下流部において類似した変動パターンが見られるが、SSとDO共に、ダム上流(葉木)の方がやや大きい。また、出水時のDOはいずれも高濃度であり、多量の有機物を含むダム堆積物の流出に伴うDO低下現象は前報同様に確認されていない。

### (2) 出水中の浮遊土砂粒径分布・強熱減量の特徴

出水時におけるSSの質を確認するために、出水イベント①における流量と浮遊土砂の中央粒径 $D_{50}$ 、SS及び揮発性浮遊物質VSS(Volatile Suspended Solid)の時間変化を図-4に示す。ここで、VSSは有機物から構成されるSSを表し、分析されたSSと強熱減量ILの積から算出している。また、図中のSSは濁度の連続計測結果からSSに変換したものであり、VSSは分析結果である。図中の結果は、ダム上流(葉木)の結果はSSのみであり、ダム下流(遙拝堰)の結果は流量も含めて全項目について示されている。まず、SSについては、ダム上流地点と下流地点では、上流地点の方がSSは大きく、両者のSSピークはずれており、下流地点のSSピークは上流地点のSSや流量ピークよりも遅れている。一方、浮遊土砂の中央粒

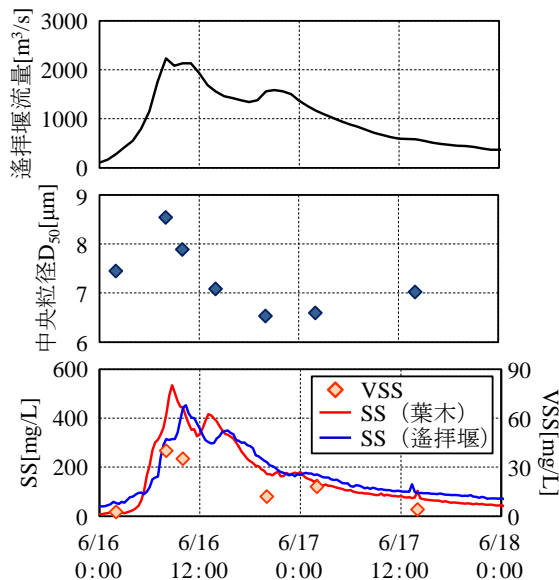


図-4 出水イベント①における流量、 $D_{50}$ 、SS、VSSの時系列変化 (全項目：ダム下流、SSのみ：上流地点)

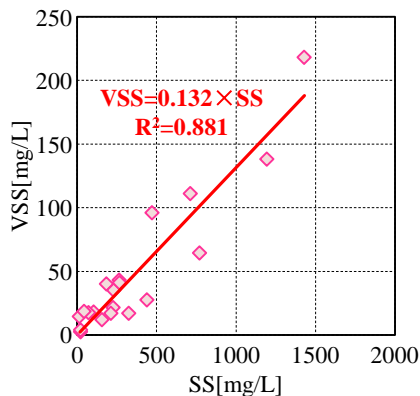


図-5 SSとVSSの相関関係

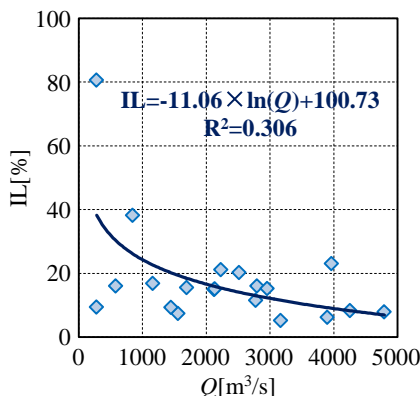


図-6 強熱減量ILと流量Qの相関図

径 $D_{50}$ やVSSのピークは流量ピークとは一致するものの、SSピークよりも若干早めに現れている。しかしながら、大局的な変動パターンは、 $D_{50}$ やVSSは、SS、流量共に類似している。また、 $D_{50}$ は、洪水全体で全て $10\mu\text{m}$ 以下となっており、他の河川<sup>14)</sup>と比べて十分小さい。

このVSSの特徴を見るために、全出水イベント時にお

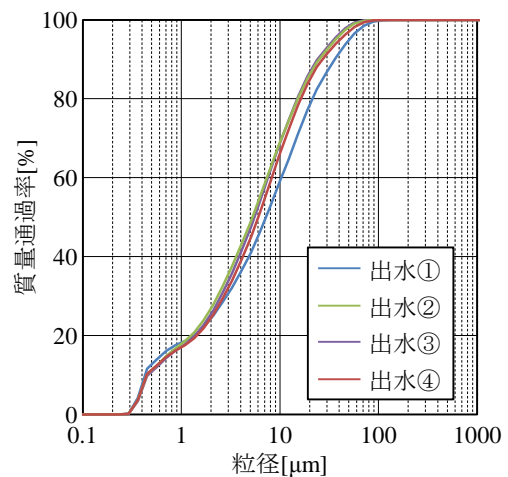


図-7 各出水イベントにおける粒径分布

けるSSとVSSの相関関係を図-5に示す。これを見ると、両者は概ね線形関係となっており、その比例係数より、球磨川では、SS中の有機物の割合は平均的に13.2%となっていることが伺える。ただし、図-4のように、SSとVSSのピーク位置が異なるなど、VSSが出水状況により変化する可能性がある。そこで、強熱減量ILと流量Qの相関関係を図-6に示す。これより、全般的には強熱減量ILは流量増加に伴って減少しており、強熱減量ILの流量依存性が存在していることが分かる。これは、出水が生じる高流量時では流域からの土砂生産が活発となり、無機物成分が増加するためであり、高流量時には10%を下回る強熱減量が観測されている。

次に、各出水イベント時における浮遊土砂の粒径分布を図-7に示す。ここでは、各イベント時における分析結果を単純平均した結果である。これより、出水イベント①においてやや粒径が大きいが、残りの3つのイベント時の結果はほぼ一致している。これらの中央粒径 $D_{50}$ は、イベント①では $7.3\mu\text{m}$ 、その他のイベントでは $5.6\sim 6.1\mu\text{m}$ となっている。このように出水イベント①において浮遊土砂の粒径が全体的に大きい理由としては、このイベント①が2012年初めての出水であり、非洪水期に河川内に堆積した土砂が一気に流送されたため、他のイベントと異なる粒径群の土砂が含まれていたものと考えられる。

また、後述する粒径別SS輸送量評価に用いる粒径区分は、粒径によって環境インパクトが異なることを考慮して中砂( $801\sim 214\mu\text{m}$ )、細砂( $213\sim 71\mu\text{m}$ )、シルト大( $71\sim 23.6\mu\text{m}$ )、シルト小( $23.6\sim 5.07\mu\text{m}$ )、粘土大( $5.07\sim 2.63\mu\text{m}$ )、粘土小( $2.63\sim 0.05\mu\text{m}$ )の計6種類としている。全出水イベントで平均された粒径分布から、この粒径区分毎の割合を求めると、中砂0%、細砂0.61%、シルト大12.1%、シルト小41.8%、粘土大15.3%、粘土小30.2%となった。これより、シルトと粘土の和の割合は99.4%を占め、出水時に球磨川下流域で輸送されるSSのほとんどはシルト以下の粒径で構成されていることが分かる。



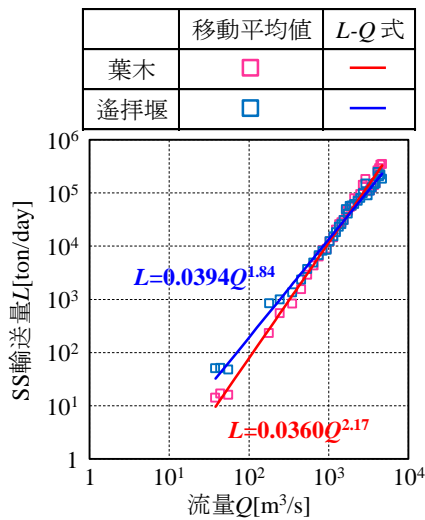


図-8 ダム上流（葉木）とダム下流（遙拝堰）におけるSS輸送量  $L$  と流量  $Q$  の相関関係（移動平均値を採用）

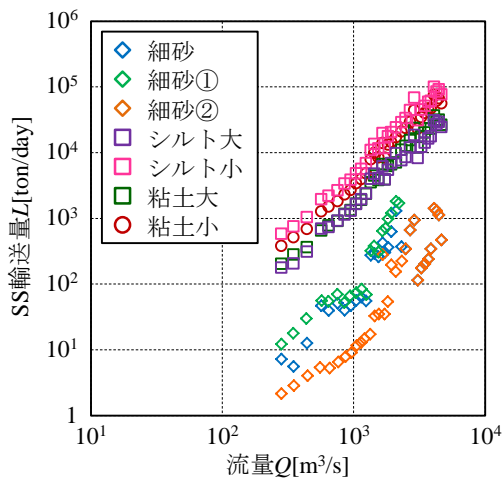
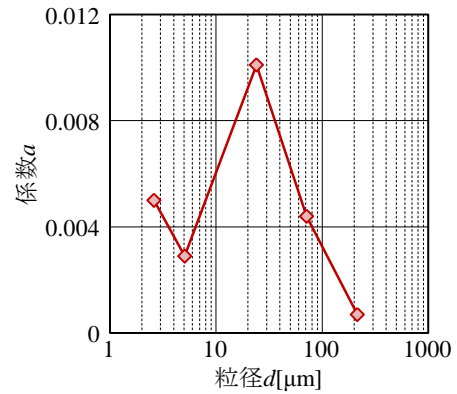


図-9 粒径別 SS 輸送量  $L$  と流量  $Q$  の相関関係（移動平均値を採用）

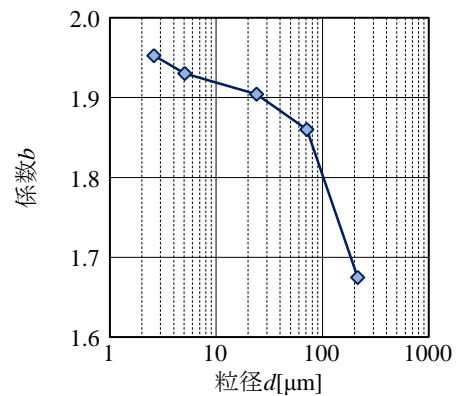
### (3) $L$ - $Q$ 関係

これらの結果に基づいて、SS輸送量  $L$  と流量  $Q$  の相関関係を検討する。まず、ダム上・下流地点における  $L$ - $Q$  関係をまとめたものを図-8 に示す。ここでは、両地点の生データのばらつきを減らすために、ある流量範囲の移動平均操作<sup>15)</sup>を行った結果のみを表示している。これを見ると、低水時ではダム下流の  $L$  の方がダム上流地点よりも大きいものの、高流量時ではその大小関係が逆転している。このことは、地点毎に得られた  $L$ - $Q$  式の係数  $a$ 、 $b$  を見ても分かる。すなわち、低水時では、ダム下流地点の SS が大きくなっており、このことは図-3 から確認される。一方、出水時では、SS の大小関係が変わり、ダム上流地点の SS の方が大きく、ダムサイトにおいて出水時に輸送される SS の一部がトラップされていることが示唆された。

次に、粒径別 SS に関する  $L$ - $Q$  関係を検討した結果を図



(a) 係数  $a$



(b) 係数  $b$

図-10 粒径別  $L$ - $Q$  式の係数と粒径  $d$  の相関図（各粒径区での粒径  $d$  は最大値を採用）

-9に示す。ここでの粒径区分は前節で述べたものである。なお、本研究のデータでは、中砂は計測されなかったため、中砂  $L$ - $Q$  式は作成されていない。また、図-8 と同じく、 $L$ - $Q$  データとして全出水イベント時の生データに対して施された移動平均値を採用している。これを見ると、前述した粒径区分毎の比率に対応して、粒径別 SS における  $L$ - $Q$  関係の大小関係が概ね構成されているものと思われる。なお、ここでは、細砂以外の区分に関しては、イベント間で  $L$ - $Q$  関係の差は見られなかったが、細砂に関しては、イベント①とその他のイベントで異なる  $L$ - $Q$  関係となった。これは、図-7 に示したように、イベント①と他のイベントでは異なる粒径分布となり、特に、細砂の割合が相対的に大きな変化となっていたためである。

これら粒径別 SS に対して  $L$ - $Q$  式を適用したところ、得られた係数  $a$ 、 $b$  の粒径  $d$  依存性を図-10 に示す。ここでの横軸は各粒径区分の最大値を便宜的に選定している。これより、係数  $a$  ではシルト小の時に最大となっているのに対して、粒径が大きくなると係数  $b$  は小さくなる傾向が見られる。これより、平水時においてもシルト小が多く輸送されていると共に、係数  $b$  より、小粒径ほど流量依存性が大きいことが示唆された。なお、係数  $a$  の流量依存性については興味深い結果が得られているが、そ

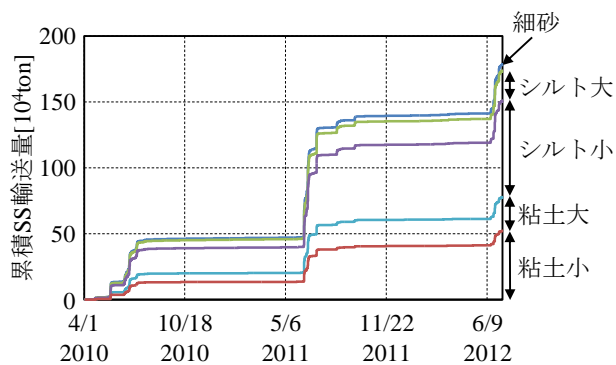


図-11 ダムゲート全開後における累積粒径別 SS 輸送量の時間変化

の要因は不明であり、今後検討する。

#### (4) 粒径別 SS 輸送量

上記の粒径別 SS に関する移動平均  $L-Q$  式を用いて、荒瀬ダムのゲートが常時開放された 2010 年 4 月から 2012 年 7 月 10 日現在まで粒径別累積 SS 輸送量を算出した結果をそれぞれ図-11 に示す。これを見ると、ゲート開放後から現在までのダム下流（遙拝堰）における全粒径の累積 SS 輸送量の合計値は 179 万 ton であった。また、粒径別の累積 SS 輸送量を見ると、細砂 4.8 万 ton、シルト大 22.8 万 ton、シルト小 73.1 万 ton、粘土大 25.5 万 ton、粘土小 52.2 万 ton であった。SS 輸送量が最大であったのはシルト小であり、シルト小 > 粘土小 > 粘土大 > シルト大 > 細砂の順番となった。

同様に、ダム上流（葉木）における総 SS 輸送量を上記と同じ期間に求めたところ、上流地点の方が下流地点よりも 18 万 ton（約 10%）上回った。このダム上流（葉木）からダム下流（遙拝堰）までに流入する支川の流域面積（110km<sup>2</sup>）はダム下流地点における流域面積の約 6% に相当し、この支川からの土砂供給も想定される。そのためゲート開放後も荒瀬ダムに SS がトラップされていると考えられる。また、SS 中の有機物 VSS の量を把握するために、SS と VSS 関係式を用いて累積 VSS 輸送量を算出したところ、23.8 万 ton であった。これより、全 SS 輸送量の約 87% が無機物で構成されており、海域へ供給される SS の大部分が無機物であることが示された。

#### 4. 結論

本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- (1) 出水時における SS と DO は共に、ダム上流（葉木）の方がダム下流（遙拝堰）よりやや大きく、出水時の DO はいずれも高濃度であり、多量の有機物を含むダム堆積物の流出に伴う DO 低下現象は確認されなかった。
- (2) 出水時における浮遊土砂の中央粒径  $D_{50}$  は概ね 10 $\mu$ m 以下であり、99% がシルト以下であり、この粒径サイズは

非常に小さい。

(3) 粒径別 SS に対する  $L-Q$  式を算出し、その係数  $b$  について粒径依存性があることが示唆された。

(4) ゲート開放後から現在までのダム下流（遙拝堰）における全 SS の累積輸送量の合計値は 179 万 ton であった。この SS 輸送に対する粒径別 SS の寄与は、シルト小 73.1 万 ton > 粘土小 52.2 万 ton > 粘土大 25.5 万 ton > シルト大 22.8 万 ton > 細砂 4.8 万 ton の順番となり、シルト小の成分が顕著であることが示された。

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 (B)（課題番号:24310174 研究代表者：鬼倉徳雄）の一部を使用した。現地観測の実施や水質分析には、東京理科大学理工学部土木工学科水理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する。

#### 参考文献

- 1) 宇野木早苗：内湾の環境や漁業に与えるダムの影響，海の研究，Vol.13, No.3, pp.301-314, 2004.
- 2) 大矢通弘，角哲也，嘉門雅史：ダム堆砂の河川還元材利用における環境影響，ダム工学，Vol.14, No.1, pp.4-19.
- 3) N. L. Poff and D. D. Hart: How dams vary and why it matters for the emerging science of dam Removal, *BioScience*, Vol.52, No.8, pp.659-668, 2002.
- 4) 科学・経済・環境のためのハインツセンター（青山己織訳）：ダム撤去，岩波書店，pp.69-75, 2004.
- 5) 保屋野初子：長野の「脱ダム」なぜ？，築地書館，pp.7-10, 2001.
- 6) 熊本県企業局：荒瀬ダムの今後の対応（撤去方針）について（H22.2.3：知事発言），pp.1-5, 2010.
- 7) つる詳子：日本初のダム撤去の現場からの報告 荒瀬ダムのこの1年—2010年存続から撤去決定，そしてゲート全開—，不知火海・球磨川流域圏学会誌，Vol.5, No.1, pp.21-29, 2011.
- 8) 大槻順朗，北村直也，二瓶泰雄，石賀裕明，皆川朋子，島谷幸宏：荒瀬ダム撤去影響評価に向けた球磨川及び河口干潟の土砂輸送・堆積特性の把握，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68, No.2, pp.L1071-L1075, 2012.
- 9) 国土交通省河川局：球磨川水系河川整備基本方針，pp.1-14, 2007.
- 10) 熊本県企業局：荒瀬ダム撤去計画（案）概要版，pp.1-17, 2010.
- 11) 二瓶泰雄，植田雅康，木水啓：江戸川における土砂濃度の横断・鉛直分布特性と土砂輸送量算定法の検討，水工学論文集，Vol.50, pp.937-942, 2006.
- 12) （社）日本下水道協会：下水試験方法上巻—1997年版—，297p, 1997.
- 13) 横山勝英：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察，土木学会論文集，No.698/II-58, pp.93-98, 2002.
- 14) 重田京助，二瓶泰雄，坂井文子，大塚慧：東京湾主要流入河川における浮遊土砂輸送特性に関する基礎的検討，水工学論文集，Vol.52, pp.913-918, 2008.
- 15) 田中健太郎・二瓶泰雄：SS モニタリングネットワークに基づく東京湾への浮遊土砂供給特性の把握，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.67, No.4, pp.L1327-L1332, 2011.

(2012. 9. 30 受付)