

河川土砂還元を組み合わせた真名川ダム 弾力的管理試験「フラッシュ放流」

“FLUSHING FLOW” WITH SEDIMENT REPLENISHMENT UNDER THE TRIAL
OF FLEXIBLE OPERATION OF MANAGAWA DAM

坂本博文¹・谷崎 保²・角 哲也³

Hirofumi SAKAMOTO, Tamotsu TANIZAKI and Tetsuya SUMI

¹国土交通省 近畿地方整備局 九頭竜川ダム統合管理事務所 専門職 (〒912-0021福井県大野市中野29-28)

²国土交通省 近畿地方整備局 九頭竜川ダム統合管理事務所長(現:近畿地方整備局木津川上流河川事務所長)

³正会員 工博 京都大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒606-8501京都市左京区吉田本町)

For the purpose of recovering river dynamics to maintain fish habitats by artificially increasing flow discharge from dams, flushing flows have been introduced in downstream rivers under the flexible dam operation. This paper shows results of the field test of the flushing flow from Managawa Dam in November 15, 2004.

Water levels, flow velocities, water quality such as temperature, turbidity, suspended sediment concentration, movement of river bed materials and quantity of detached algae on river bed gravels were measured at several downstream points during the flushing flow. In this field test, sediment replenishment which supply sediment to downstream rivers by dumping 220m³ excavated sediment from Managawa reservoir alongside of downstream river. A peak discharge of 50m³/s in three hours has increased flow velocity and tractive force enough to move river bed gravels up to ca.50mm and supplied sediments have increased quantity of detached algae on river bed gravels which will be prefer for maintaining fish habitats.

Key Words : flexible dam operation, flushing flow, sediment replenishment, Managawa Dam

1. はじめに

昭和54年完成の真名川ダムでは福井県大野市を流れる真名川(図-1)の「アユの生息環境及び河川環境の改善」を目標とした弾力的管理試験を平成12年度より実施している。弾力的管理とは、洪水調節に支障を及ぼさない範囲で、洪水調節容量の一部に流水を貯留し、適切に放流することにより、ダム下流の河川環境の保全、改善を図ることであり、平成15年度には河床の攪乱を目的とするフラッシュ放流の効果的な実施方法を検討した。

掃流力が小さかった平成15年度実施のフラッシュ放流(30m³/s)¹⁾の試験結果を踏まえて、平成16年度は放流量を50m³/sに増量し、さらに近年注目される河川土砂還元(ダム貯水池内の堆砂採取および下流河川への運搬・置土)²⁾を組み合わせることによりフラッシュ放流の効果を増大させる可能性について検討した。

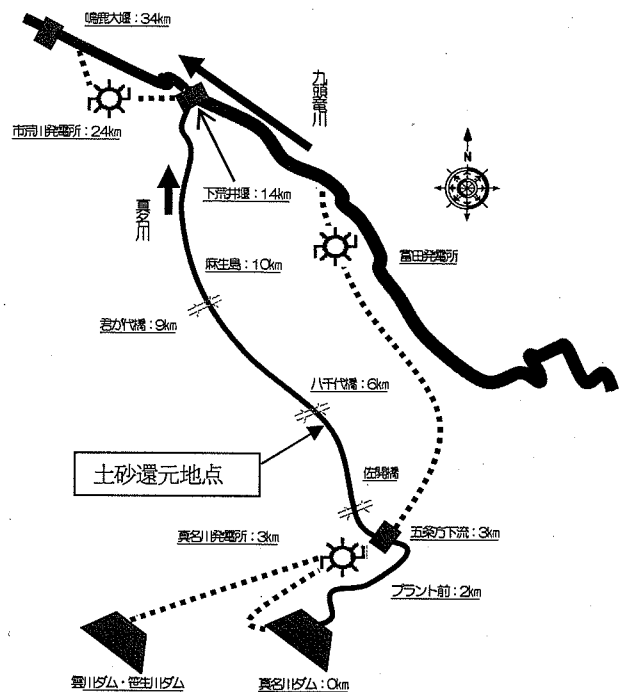


図-1 真名川ダムおよび調査対象下流河道

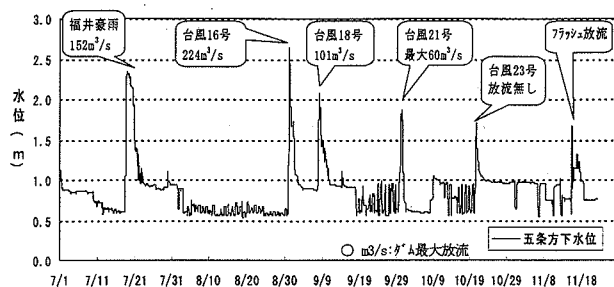


図-2 平成16年度の出水状況と水位変動(五条方)

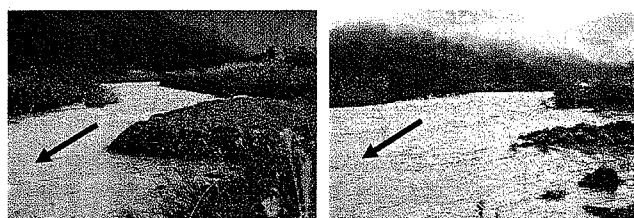


写真-1 土砂の仮置き状況(放流前/ピーク流量時)

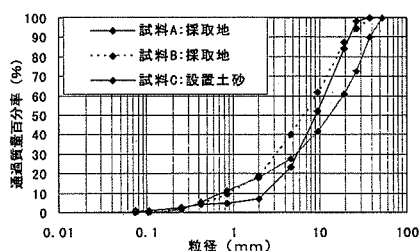


図-3 還元土砂の粒度分布

2. 試験概要

(1) 調査の概要

真名川ダムの下流では流況の安定(維持流量約 $2.69\text{m}^3/\text{s}$)によるシルトの堆積や付着藻類の剥離更新阻害が問題となっている。弾力的管理期間の7月からフラッシュ放流の実施のため貯留水を確保していたが、管理開始以来の最大流入量 $1,033\text{m}^3/\text{s}$ を記録した「H16年7月福井豪雨」初め、相次いで台風が来襲し(図-2)、これら出水によりダム湖が長期間濁ったため下流に対する影響を考慮して放流試験を延期した。本試験は台風23号により河床が攪乱された後、流況の安定が約1ヶ月継続し、放流水の濁度が約50度に低下した2004年11月15日に実施した。

フラッシュ放流のピーク流量は $50\text{m}^3/\text{s}$ 、ピーク継続時間は3時間である。土砂還元はダム貯水池上流河道から採取した約 220m^3 (幅 5m ×長さ 35m ×高さ 1.3m , $d_{50}=6\sim 13\text{mm}$, 図-3)をダム下流 6km 地点の八千代橋上流 500m に仮置きし、放流時に側岸侵食される形態で河道に土砂を供給した(写真1)。

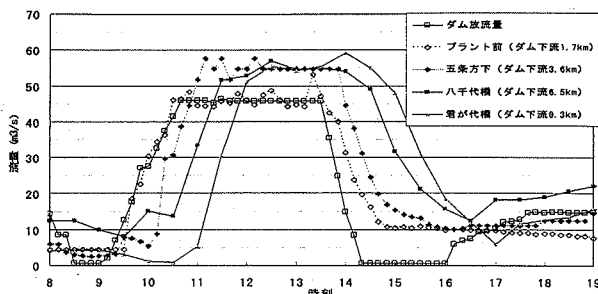


図-4 各地点の流量変化

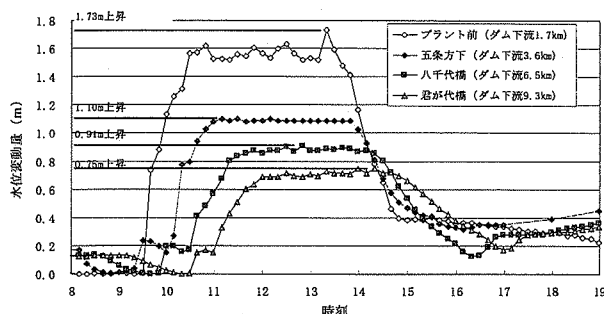


図-5 各地点における水位変動

下流河川のモニタリング項目は、水量(水位、表面流速)、水質(水温、濁度、SS、VSS(SS中の有機成分))、河床材料トラップ調査、付着藻類の剥離状況等である。

(2) 放流の概要

フラッシュ放流は急激な水位の上昇を避け、自然な流況に近い波形で午前9時から放流を開始、10時30分に最大放流量 $45\text{m}^3/\text{s}$ に増加させ、3時間継続のち、13時30分から減水させ、14時10分に放流を終了した。下流の五条方では、維持流量等を合わせて11時から約3時間最大 $54\text{m}^3/\text{s}$ が流下した他、八千代橋、君が代橋でも、ほぼ同程度のピーク波形が維持された(図-4)。

なお、放流は下荒井堰(11時50分)から発電水路を經由し、市荒川発電所(12時20分)で九頭竜川へ合流し、鳴鹿大堰(14時)まで到達した。また、この放流による最大の水位上昇量はプラント前 1.73m 、五条方下 1.10m 、八千代橋 0.91m 、君が代橋 0.75m であった(図-5)。

八千代橋、君が代橋における流速変化(流心)をH15年と比較して図-6、図-7に示す。ダムからの放流量を増加($30\rightarrow 50\text{m}^3/\text{s}$)させたことで、両地点ともに最大流速は増大(八千代橋($2.1\rightarrow 2.6\text{m}/\text{s}$))、君が代橋($1.4\rightarrow 2.3\text{m}/\text{s}$))し、ともに平常時(八千代橋($0.7\text{m}/\text{s}$))、君が代橋($0.6\text{m}/\text{s}$))を大きく上回った。特に、君が代橋における増加量が大きく、ピーク継続時間を固定し

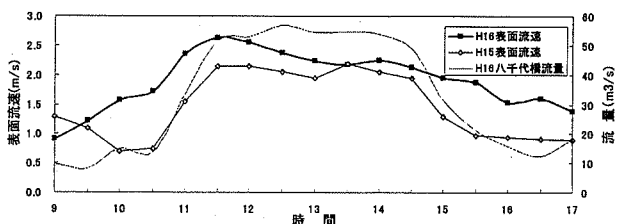


図-6 流心の流速変化 (八千代橋)

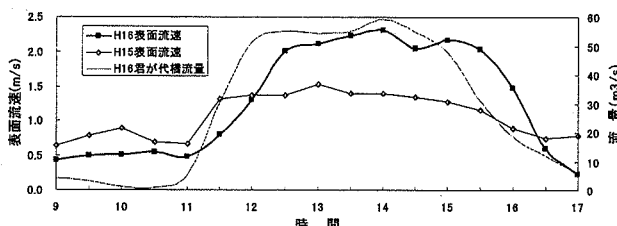


図-7 流心の流速変化 (君が代橋)

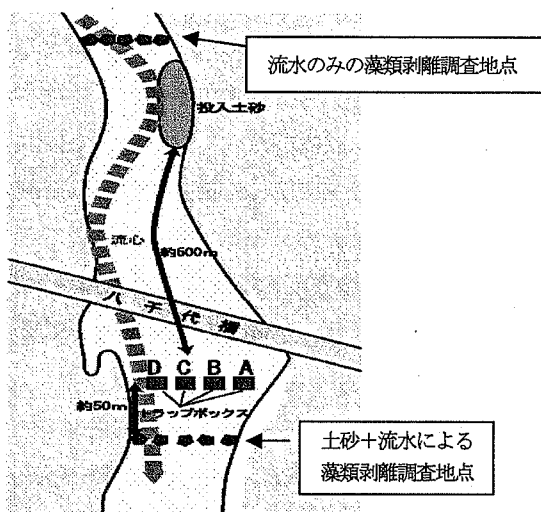


図-8 還元土砂による藻類剥離調査の位置

て放流量を増加させたことにより、流速の増加がより下流地点まで伝播したものと考えられる。

3. 調査結果および考察

(1) 還元土砂の侵食と流下状況

仮置きした土砂の放流前後の横断測量により、一部の大型を除いて還元土砂220m³の全てが流下したことを確認した。また、放流中は河川の濁りのため目視による確認は難しい状況であったが、付着藻類の剥離状況とトラップ調査等により還元土砂が下流調査地点を通過したものと推定した。

(2) 河床砂礫の移動

土砂還元地点下流の河床砂礫の移動を確認するため、

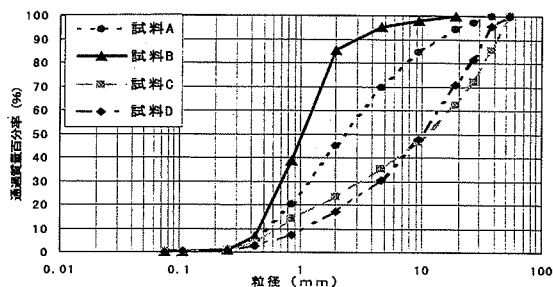


図-9 4箇所のトラップ土砂の粒度分布

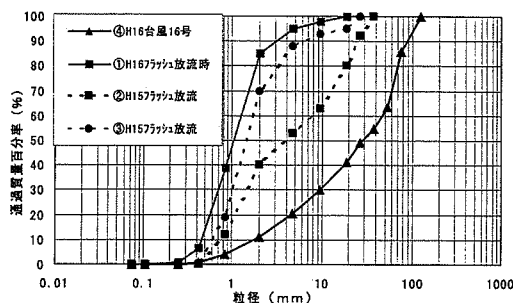


図-10 放流量別の河床砂礫の粒径加積曲線(地点B)

放流前に土砂還元地点より下流500m地点(図-8の八千代橋下流側)の河川横断方向4箇所(A~D)に砂礫トラップ用の箱(60cm×60cm×深さ30cm)を設置し、捕捉された河床砂礫の粒径を分析した(図-9)。これらによれば、河道の流心付近右岸側C~Dでは粗粒分が、やや緩流域となる左岸側B~Aでは細粒分が捕捉されている。

この4箇所の内、B地点においてはH15、16年の自然出水時においても同様にトラップ調査を実施している。まず、トラップ箱に捕捉された土砂量は、H15年が2.85kg(全体容量の1.4%)と少量であったのに対し、H16年は満載に近い状態であり、流砂が活発であったことが伺える。次に、これらイベントの違いによる粒径分布の比較を図-10に示す。H16年はH15年より細かな0.5mm~2mmの砂が大量に捕捉されている。これは、H16年の台風16号による自然出水時とも明らかに傾向が異なっている。これらの粒径は、従来、ダムによる流砂の遮断により現状の河道に不足していたものであり、500m上流に設置した図-3に示す還元土砂が当該地点を通過した際に捕捉されたと考えることができる。

(3) 流速分布と流下した河床材料の特性

トラップ箱を設置した河川横断箇所において浮子により計測した表面流速およびこれから求められる移動限界粒径を表-1に示す。一方、捕捉された河床材料の最大粒径からも掃流力を求め、さらにこれらの比率により

表-1 横断方向流速分布と流下する最大粒径

計測位置	トラップボックス位置 流速分布計測位置	左岸 ←					→ 右岸	
		1	2	A	B	C	D	5
流速分布から求めた最大粒径及び掃流力比率	流速値：実測値 (m/s)	1.03	1.61	—	1.81	1.97	2.12	
	最大粒径：計算値 (mm)	18.7	45.8	—	57.6	68.7	79.4	
	掃流力比率	0.27	0.67	—	0.84	1	1.16	
捕捉された河床材料の最大粒径から求めた掃流力比率	最大粒径：実測値 (mm)	—	37.5	19	53	53	—	
	ピーク時の水深 (m)	—	1.1	1	1.3	1.3	—	
	掃流力比率	—	0.71	0.36	1	1	—	

計測位置ごとの比較を行った。これによれば、A、C、Dの各トラップ箱に捕捉された河床材料は、流速分布から岩垣式で求められた移動限界粒径とほぼ一致し、また、横断方向の掃流力比率の傾向も両者でほぼ一致している。なお、B地点は、両側のA、C地点に比べて流れがやや遅く浮子が両側に引き寄せられて表面流速計測が難しかったが、これはB地点で捕捉された最大粒径が最も小さいことに反映されている。これらの河川横断箇所流速分布と藻類の剥離状況との関係を次に述べる。

(4) 附着藻類の剥離状況

土砂還元を組み合わせたフラッシュ放流の剥離効果を確認するため、図-8に示すように土砂還元地点の上流と下流地点で附着藻類の剥離状況を調査した。

調査方法は放流の前後に礫表面の附着藻類を10cm×10cmの大きさに採取する枠取り（コドラード）法により行った。放流前に周辺の河床より藻類の附着した礫を採取し、ひとつの礫に2つの試料枠を設定し、1試料の附着藻類を剥ぎ取った後、河道内に再配置し、放流後残りの1試料の附着藻類を剥ぎ取った。

河道内には上・下流とも流水幅が20mの区間に2m間隔で10個の礫を設置（左岸より付番）した。附着藻類の調査項目として有機物量、無機物量、クロロフィルa量、フェオ色素（フェオフィチン量）を分析した。

放流前後の土砂還元上流地点の附着物質量の減少率を表-2に示す。減少率とは放流前後に採取した附着藻類に

含まれる無機物量と有機物量の合計の減少率である。上流での流心部の減少率は礫5で83.6%、礫6で72.8%と大きく、流速の緩い左岸の岸辺の減少率は礫1で5.8%、右岸の礫7で8.7%と小さかった。

一方、土砂還元下流地点（表-3）では流心部の礫5～礫7で53.5%～88.9%と減少率は大きく、上流と逆に流速が緩やかで、細砂が多く捕捉されたトラップ箱A～B付近の礫1～3においても51.9%～72.7%と減少率は大きかった。注目されるのは、流速の緩い岸辺の減少率であり、左岸の礫1で51.9%、右岸の礫8で19.1%といずれも下流側の剥離が大きかった。

土砂還元地点の上下流における礫の附着物質の平均減少率は上流で31.4%（表-2）、下流で53.3%（表-3）であり、流水のみの上流側に対し土砂供給後の下流側の方が藻類の剥離効果は21.9%多い結果となった。下流では上流のように流心だけでなく、浅く流れの緩い箇所を含めた河道全域で附着物質量の減少率が大きく、投入した土砂が附着藻類の剥離効果を増進させたものと考えられる。なお、同様に調査したクロロフィルaの減少率は上流で36%、下流で45%であり、流砂による藻類の剥離増進効果も確認された。

附着藻類に含まれる灰分率（無機物量の割合）の変化を表-4に示す。附着藻類に含まれる灰分率が60%以上になるとアユの肥満度が低下するといわれている³⁾。放流後の灰分率の減少は、H15の30m³/sの場合0.4%の微増、H16の50m³/sの場合は流水のみの上流で2%の減少、土砂供給の下流では9%の大幅減少となった。これより流量の増量（30→50m³/s）に比べ、土砂供給がアユの餌環境の改善により効果が有ることが確認された。さらに、剥離後の附着藻類の生育による灰分率の減少により、アユの餌質の向上が期待できることから、夏場の試験で確認したい。

表-2 土砂還元上流地点における附着物質量の変化

項目	礫番号	1		2		3		4		5		6		7		上流側合計	
		事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後
無機物量		472	416	778	1,132	900	494	470	368	708	86	1,098	310	500	478	4,926	3,284
有機物量		132	153	178	235	147	100	299	324	193	62	281	65	98	68	1,328	1,008
附着物質計 (mg/100cm ²)		604	569	956	1,367	1,047	594	769	692	901	148	1,379	375	598	546	6,254	4,292
附着物質の減少率		5.8%		-43.0%		43.2%		10.1%		83.6%		72.8%		8.7%		31.4%	

表-4 附着藻類の灰分率の変化

	H15	H16 上流	H16 下流
放流量(m ³ /s)	30	50	50
フラッシュ放流前(%)	74.0	78	82
フラッシュ放流後(%)	74.4	76	73
放流15日後(%)	72.6	未調査	

表-3 土砂還元下流地点における附着物質量の変化

項目	礫番号	1		2		3		4		5		6		7		8		下流側合計	
		事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後	事前	事後
無機物量		1,802	784	540	144	812	216	556	612	802	348	1,090	100	832	236	678	514	7,112	2,954
有機物量		331	242	186	112	108	35	157	180	146	93	278	52	115	184	157	161	1,476	1,060
附着物質計 (mg/100cm ²)		2,133	1,026	726	256	920	251	713	792	948	441	1,368	152	947	420	835	675	8,588	4,014
附着物質の減少率		51.9%		64.8%		72.7%		-11.1%		53.5%		88.9%		55.6%		19.1%		53.3%	

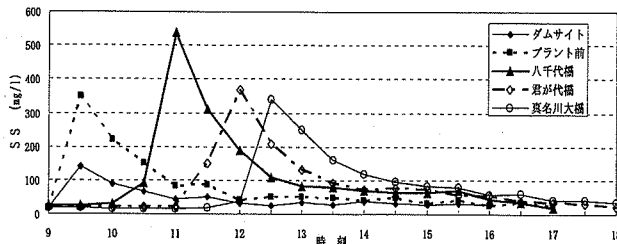


図-11 フラッシュ放流中のSS濃度の変化

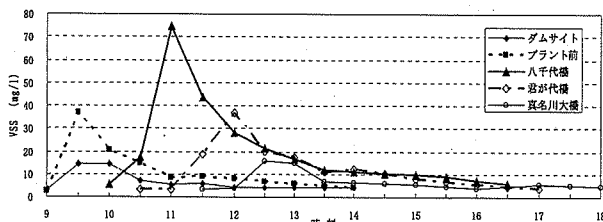


図-12 フラッシュ放流中のVSSの変化

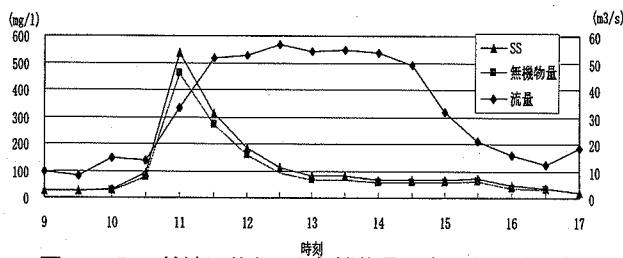


図-13 フラッシュ放流に伴うSSと無機物量の変化(八千代橋)

(5) フラッシュ放流中の水質の変化

a) 下流河川でのSS、VSSの変化

フラッシュ放流中の真名川下流5地点のSS濃度の変化を図-11に示す。ダム直下のダムサイトでは副ダムに堆積していた物質を流掃したことでSSは130mg/Lに上昇し、3時間後にはダムの放流水のSS濃度30mg/Lに戻った。土砂還元地点下流の八千代橋において全体のピーク値530mg/Lを示し、下流の君が代橋では370mg/Lに減少した。各地点ともSS濃度が上昇した時間は概ね4時間程度で、その後速やかに減少し、真名川下流にはフラッシュ放流による影響は残らないこと確認した。同じくVSS (SS中の有機物) の発生状況を図-12に示す。ピーク値はSSと同じく八千代橋で最も高い73mg/Lとなった。

ピーク値を示した八千代橋における放流中のSS濃度、無機物量 (SSからVSSを除いた質量) の変化を図-13に示す。SS濃度、無機物量のピークはともに流量の立ち上がり時に発生しており、これまでのフラッシュ放流に関する既往の知見とも一致している。

b) フラッシュ放流によるSSフラックス

各地点で計測されたSS濃度から推定されたSSフラック

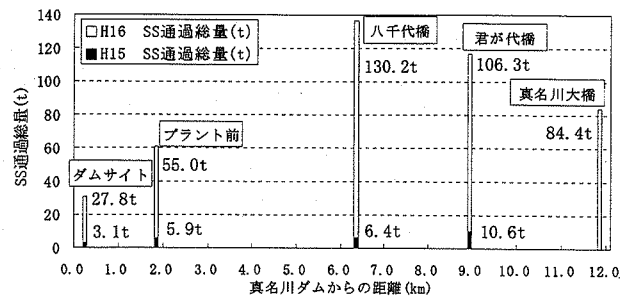


図-14 各地点を通過したSSの総量

ス (総量 = 流量 × SS濃度) を図-14に示す。また、H15 (30m³/s)におけるSSフラックスも同時に示すが、H15年に比べてH16は10倍以上に増加している。増加した理由として、台風などの出水によるダム放流水の濁り (①)、出水後における河床内の微細土砂の堆積量の増加 (②)、流量増によるフラッシュ効果の増大 (③)、さらには土砂還元の効果 {還元土砂そのものに微細土砂が含まれる (④)、砂礫が通過することでフラッシュ効果が増大する (⑤)} 等が考えられる。

H16のSSフラックスを上流から追跡すると、まずダムから約28tのSS (シルト) を含んだ水が放流され (①の効果)、2.0km下流のプラント前では約2倍に増加しており、この増加分は河床から巻き上がったものである。増加量がH15年よりもかなり多いのは、②と③の効果によると考えられる。次に、プラント前～八千代橋間は、H15年では増加量が小さかったが、H16年では約130tに大幅に増加した。この間に土砂還元地点が存在するために、この増加量には②と③に加えて④と⑤の効果が加わっていると考えられる。

ここで、④の効果を把握するために、以下のような概算を行った。

- i) 還元土砂に含まれる0.2mm以下の微細土砂の割合は1%程度 (図-3) であり、土砂量220m³、土粒子密度2.65t/m³、空隙率0.55とすれば約2.6tとなる。
- ii) 設置した土砂220m³が50m³/sの流水に1時間さらされた場合を想定し、2mm以下の細粒土砂20cm³を18Lの水に混合させた検体を分析した結果、20cm³の土砂中から発生したSS成分は830mgであった。設置土砂のうちの2mm以下の細粒土砂は約18%の約40m³であり、これから生成されるSS成分は約1.6tとなる。

以上より、いずれの結果でも2t程度が④の効果と考え

表-5 放流前後の水深、水面幅、流速

	八千代橋(ダム下流6.5km)		君が代橋(ダム下流9.3km)	
	放流前	流量ピーク時	放流前	流量ピーク時
時間	9時	12時	10時30分	14時
水深(m)	0.917	1.711	0.554	1.298
水面幅(m)	19.35	40.53	26.53	63.26
表面流速(m/s)	0.9	2.6	0.552	2.32

られ、プラント前～八千代橋間の増加量の数%程度に留まっており、それ以外は②、③および⑤となる。H15年の同区間におけるごくわずかな増加量(5.9→6.4t)およびH16年のダムサイト～プラント前間の増加量と比べると飛躍的な増加であり、⑤の効果がかなり発揮されたものと考えられる。

一方、ダム下流9.6 km地点の君が代橋での通過量は逆に106.3 tに減少している。H15年では八千代橋～君が代橋間においてもSS増加が確認されており、実際に八千代橋・君が代橋両地点の水理量を比較すると表-5のようになる。

ピーク時での河道の水面幅は八千代橋では40.53m、君が代橋では63.26mと広がるが、表面流速は八千代橋で2.6m/s、君が代橋で2.32m/sと付着藻類が剥離更新するために必要な流速70～130cm/s⁴⁾以上を十分に確保できている。君が代橋でSS成分が減少している理由として、河床のアーマー化により移動する砂礫が少ないこと、八千代橋で還元した土砂のうち、掃流状態で移動する砂礫成分はこの放流時間の中では到達せずに掃流効果の増大にはつながらなかったこと、および八千代橋を通過したSS成分が途中で植生等にトラップされるなどして減少したことなどが考えられる。

4. 結論と今後の課題

真名川ダムの弾力的管理試験について、平成16年に実施した土砂還元を組み合わせたフラッシュ放流について検討した。得られた主要な結論を以下に示す。

(1) フラッシュ放流による効果を判定するための指標として、流速の増大、河床を構成する代表的な礫の移動、魚類の餌環境の改善(礫上の付着藻類、および付着物中の灰分量の減少)などがあげられる。今回の試験で得られた以下の各調査結果より、50m³/sの放流に加えて、土砂還元が効果的であることが明らかとなった。

(2) 50m³/s(ピーク継続3時間)の放流により、下流の主

要調査地点では水深上昇0.75～0.91m、最大流速2.3～2.6m/s(平常時0.6～0.7m/s)を記録し、現地河床を構成する最大粒径50mm程度の礫までを移動させる効果をもたらした。30m³/sとの比較では、最大流速の増加よりも流速増加の影響区間の拡大に効果が見られた。

(3) 還元土砂220m³は主に流量立ち上がり時に側岸侵食の形態で流出し、500m下流地点において自然出水時では見られない0.5mm～2mmの砂が大量に捕捉され、当該地点まで到達したことが確認された。

(4) 土砂還元地点の上下流で、礫の付着物質の減少率を比較した結果、流水のみよりも流砂が加わった下流の方が多結果となった。これは、流砂により、浅く流れの緩い箇所を含めた河道全域で付着物質が減少した結果であり、礫上に堆積したシルトなどの掃流がより促進されることも確認された。

(5) 放流ピーク時には最大530mg/LのSS濃度を示したが、各地点ともSS濃度の上昇は概ね4時間程度でその後速やかに減少し、真名川下流にはフラッシュ放流による影響は残らないことが確認された。

(6) 下流各地点のSSフラックス(総量=流量×SS濃度)の変化より、土砂還元区間でのSSフラックスの増加が著しく、砂礫が通過することでフラッシュ効果がより増大したものと推定される。

今後の課題としては、アユの活動が活発な時期に実施すること、土砂還元を含めて異なる流量でのフラッシュ効果の再確認を行うこと、異なる地点での土砂還元の効果を確認することなどが想定される。これら検討を踏まえて効率的なフラッシュ放流のピーク流量、ピーク継続時間、放流頻度、土砂還元の考え方等を確立したい。

本試験は真名川ダム弾力的管理検討委員会(委員長:京都大学助教授 角哲也)及び関係機関の御協力により試験が実施できたものである。ここに記して関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 坂本博文, 岡部浩司: 2003年真名川ダムにおける弾力的管理試験「フラッシュ放流」, ダム技術, No. 223 2005
- 2) 岡野眞久, 菊井幹男, 石田裕哉, 角 哲也: ダム貯水池堆砂とそのダム下流河川還元についての研究, 河川技術論文集, Vol. 10, pp. 191-196, 2004
- 3) 漁業公害調査報告書(ダム等河川工作物設置による漁業への影響調査), 1986, 水産庁
- 4) 箱石 憲昭: 水流による藻類に剥離に関する実験的研究, ダム技術, No. 173, 2001

(2005. 4. 7 受付)