

真名川ダム弾力的管理試験における「フラッシュ放流」の計画と効果の評価手法について

PLANNING AND EVALUATION METHOD FOR “FLUSHING FLOW” UNDER THE TRIAL OF FLEXIBLE OPERATION OF MANAGAWA DAM

坂本博文¹・中村甚一²・角 哲也³・浅見和弘⁴

Hirofumi SAKAMOTO, Jinichi NAKAMURA, Tetsuya SUMI and Kazuhiro AZAMI

- 1国土交通省 近畿地方整備局 九頭竜川がらみ統合管理事務所 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 九頭竜川がらみ統合管理事務所 所長 (” ”)
- 3正会員 博士(工) 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)
- 4応用地質株式会社 応用生態工学研究所 (〒331-8688福島県田村郡三春町大字西方字石畑275)

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 discusses planning and evaluation method of the operation through results of the field test on Managawa Dam from 2003 through 2005.

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 have been measured at several downstream points during the various magnitudes of flushing flows. In these field tests, effects of sediment replenishment which supply sediment to downstream rivers by damping some excavated sediment alongside of downstream river have been also investigated.

Through these studies, a peak discharge of 50m³/s in more than two hours at least once in each season is recommended for future operation. Sediment replenishment on downstream river reaches where there is lack of movable sediments is also effective to enhance these flushing flows.

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

1. はじめに

真名川ダムの下流では、流況の安定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。そこで、当ダムでは河川環境の改善、魚類の生息環境の改善を目標に、平成15年から3か年に渡って4回のフラッシュ放流試験を計画し、放流による効果の予測手法とその環境改善効果の評価手法の確立を目指して試験を実施してきた。その結果、フラッシュ放流30m³/s¹⁾では効果は少なく、同50m³/s²⁾に土砂還元を組み合わせることで効果が発現することを確認した。以下、フラッシュ放流の流量は真名川を流下する河川流量で表す。なお、ダムからの放流量は河川維持流量等5 m³/sを除いた流量である。

本研究では、真名川ダムにおけるフラッシュ放流の意義、期待された効果とその結果、環境改善効果の評価手法に向けて得られた知見及び実施により得られた下流河川への安全性の対応について考察を行う。なお、ここでは、貯水池上流部から土砂を採取しダム下流へ還元することを土砂還元、ダム下流の河川敷等にある土砂を流れやすいよう流路に移動させることを土砂投入と呼ぶことにする。

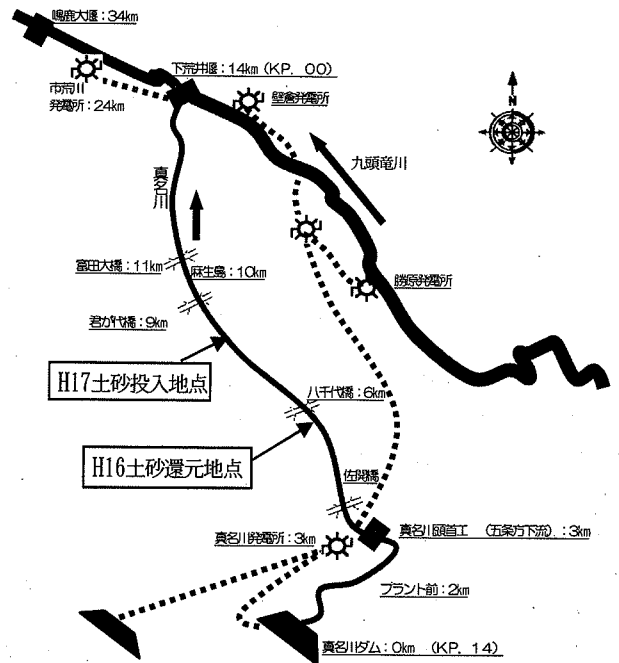


図-1 真名川ダムおよび調査対象下流河川

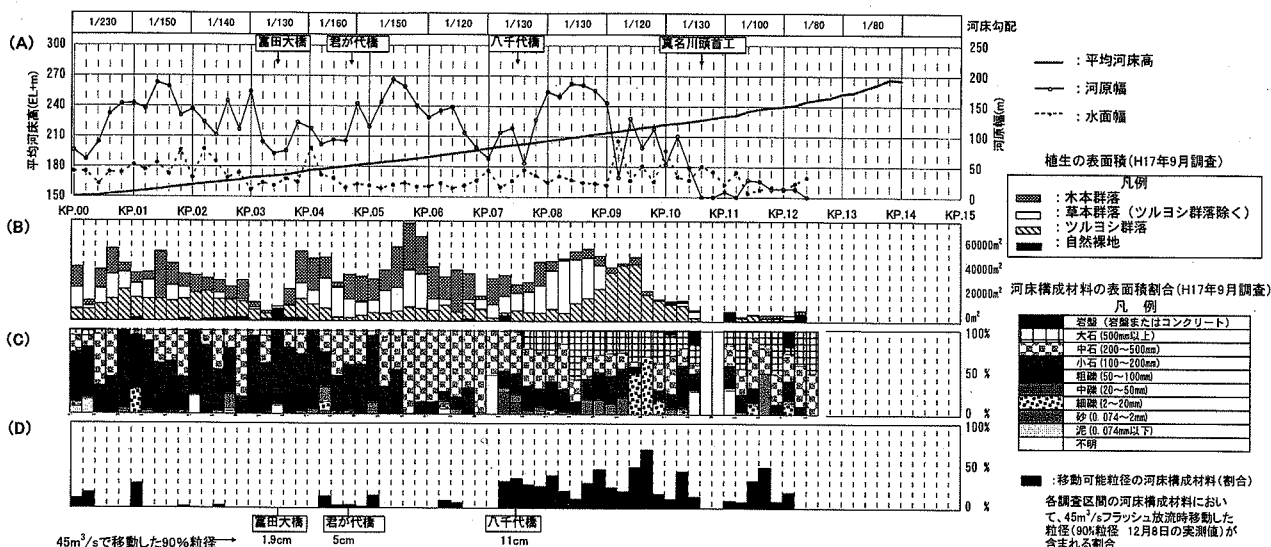


図-2 真名川ダム下流河川の状況

2. 真名川ダム下流河川の状況

真名川ダムの下流河川である真名川の状況(図-2)は、現地踏査によると、ダム下流の溪谷を過ぎた真名川頭首工下流より河床勾配が緩くなり河原が広がる(A)が、河原の多くが木本群落、ツルヨシ群落に覆われる(B)。また、八千代橋より下流側から木本群落が優占され、自然裸地は富田大橋付近などごくわずかであった(B)。河道のいたるところで、低水路が固定され、緩やかな水際線が減少していると推察された。河床構成材料は、全体的に粗礫・中礫が少なく、君が代橋より上流は中石以上の材料で概ね7割以上を占めているが、君が代橋より下流は中石が減り、小石の割合が多くなった(C)。また、後述のように八千代橋下流ではフラッシュ放流で移動可能な河床構成材料の粒径の割合は少ない状況であった(D)。

3. フラッシュ放流試験の計画と目標

真名川ダムでは表-1に示すように、H17.8までに3回の放流を実施しており、H17.12に向けたフラッシュ放流の計画を策定するために以下の整理を行った。

(1) 実施計画策定

フラッシュ放流の計画においては、放流波形(ピーク流量、継続時間、増水・減水カーブなど)、放流頻度および放流時期の設定が重要となる。流量が大きくなるほど効果は期待されるが、より大きな水量の確保が求められることと、下流河川の安全性の確保や関係機関との調整が必要となることから、より難度が高くなる。真名川ダムにおいては、試験計画の策定、実施、結果の評価を関係者とともに議論し合意を得ながら進めるためにダム・河川管理者、地元自治体、消防、交通機関、発電事業者、漁業協同組合、土地改良区などから構成される「真名川ダム弾力的管理検討委員会」を組織している。

表-1 真名川ダムで実施したフラッシュ放流

期日	河川流量	土砂の有無
平成15年9月30日	30m³/s	—
平成16年11月15日	50m³/s	約220m³ (貯水池上流端より八千代橋上流に還元)
平成17年8月2日	30m³/s	—
平成17年12月8日	45m³/s	約200m³ (君が代橋上流の河道陸地部の掘削・投入)

この中では、放流時期に関する漁業協同組合との調整や放流量に関する発電事業者との調整が特に重要となる。

(2) 放流頻度

フラッシュ放流はダム調節によって減少した自然の攪乱機会を回復させることが目的となる。その際には、ダム地点の自然流況を推定する必要がある。真名川ダムの10年間(1994-2003年)の流入量50m³/s以上の出水イベントごとの流況変化(ダム流入量を自然流況と仮定した場合のダム放流量との比較)を図-3、4に示す。流入量ベースで評価される出水頻度は、100m³/s以上が1.5回/年、50m³/s以上が7.5回/年程度であるのに対して、ダムの流量調節により、真名川ダムからの放流量が低下しており、流況変化が非常に大きいことが確認される。期別では、出水期は流入量と同等な放流量が確保されている場合も散見されるが、特に非出水期の出水では放流量が10m³/s程度まで低下している場合が多い。

真名川ダムのフラッシュ放流の目標流量は、下流の河床材料の移動などと合わせて検討することになるが、ダム地点の流況変化の観点から考えれば、この年間5~10回程度以上発生する中規模出水を出水・非出水の期別ごとに最低1回以上回復させることが一つの目標となる。

(3) 波形の設定

a) ピーク流量

目標とする中規模出水のピーク流量について、図-3、

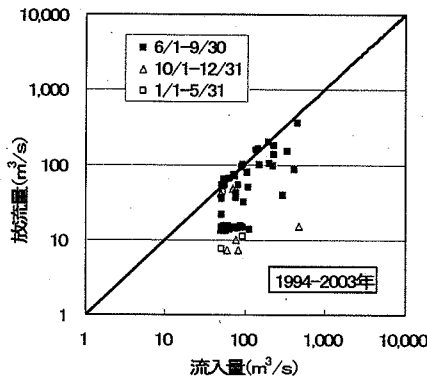


図-3 真名川ダム流況変化図

4の流況整理結果および表-1に示すH17.8までの試験結果を参考に約50m³/sを設定した(比流量0.224m³/s/km²=(50m³/s)/集水面積223.7km²)。50m³/s以上の放流については、九頭竜川本川の下荒井堰からの越流に対する安全性の対応が必要になるため、ここでは検討対象外とした。下荒井堰は全流入量の内、最大80m³/s以下は発電取水され、逆に最大80m³/s以上の場合は超過分が九頭竜川本川へ越流する機能を有するダムである(図-1)。

b) ピーク継続時間

放流により河床を十分に攪乱させるためにはある程度の流量継続時間が必要である。また、下流河道では流量波形が次第に変形して効果が低下することが懸念される。そこで、九頭竜川本川合流までの区間に所定のピーク波形が伝播することを目標に、H15、H16は3時間、H17.8は2時間30分、H17.12はより水量の少ない2時間で設定した。

c) 放流量の増減速度

下流河川では夏場にアユの釣り客等の河川内利用者が予想され、フラッシュ放流においては、急激な水位上昇と下流の九頭竜川合流後の水位変動に対する安全性、さらに急激な水際線の後退による魚類の逃げ遅れも考慮したダムからの放流量の増水・減水のルールを確立する必要がある。フラッシュ放流は晴天時も実施されることから、通常の洪水放流時(5m³/s/10分)よりもより慎重な操作が求められ、真名川では真名川頭首工下流の放流制限(30分間の水位上昇量を0.3m以下)内に治めることを目標に、放流開始から30分までの下流放流制限量を2m³/s/10分、30分以降の放流増水時と減水時については過去3回の試験実績から3m³/s/10分を基本とした。

(4) 土砂投入

真名川ダム下流では土砂補給が可能な残流支川が少なく、河床が粗粒化している。フラッシュ放流による付着藻類の剥離更新を促すためには、移動可能な河床材料が存在することが重要であり、H16.11には真名川ダム貯水池上流部から土砂を採取して、八千代橋上流に220m³土砂還元し、顕著な剥離更新の促進効果が確認された。その後、H17.8.2の30m³/sフラッシュ放流(土砂供給なし)において、八千代橋上流、君が代橋、富田大橋で

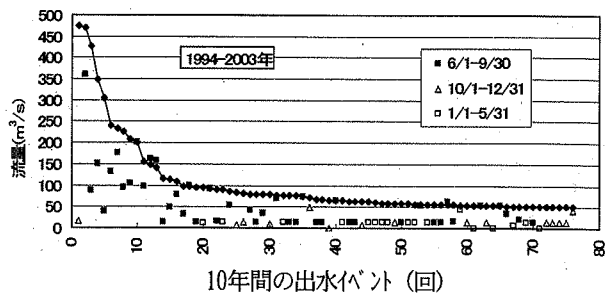


図-4 出水イベントごとの流入量(◆)と放流量の関係

表-2 トラップ箱に捕捉された礫の重量と礫径

放流年月	[流量(m³/s)]		H17.8 [30]		H17.9 [180]		H17.12 [45]	
	KP		重量(kg)	粒径(mm)	重量(kg)	粒径(mm)	重量(kg)	粒径(mm)
八千代橋上流	8.2	早瀬	67	27			25	60
"	8.2	平瀬	69	42			59	43
八千代橋	7.5	早瀬	1	9			46	52
八千代橋	7.5	平瀬	68	60			64	110
君が代土砂上流	5.3	早瀬					28	75
"	5.3	平瀬					63	43
君が代土砂下流	5.2	早瀬	0				59	38
"	5.2	平瀬	0				27	40
君が代橋	4.7	早瀬	0		71	103	0.3	50
"	4.7	平瀬	0		102	107	34	17
富田大橋	3.5	早瀬	0.017	12	76	50	0.4	11
"	3.5	平瀬	0.087	38	67	90	14	19

40cm×40cm×深さ30cmの河床材料トラップ箱を各地点河川の横断方向に2箇所設置して、増水時の河床材料の移動状況を調査した。その結果、八千代橋上流ではトラップ箱がほぼ満杯となる砂礫(67kg程度)が捕捉されたが、下流の君が代橋では全く捕捉されず、富田大橋もごく僅かであった。以上より、八千代橋より下流は30m³/s出水で移動する砂礫が少ないと推察された(表-2)。そこで、H17.12の放流においては、この下流区間を対象として土砂供給を行うこととした。当該区間は図-2に示すように低水路が固定され、緩やかな水際線が減少している。そこで今回は、貯水池上流の堆積土砂を下流河川へ還元するのではなく、河川の生態系機能の向上のために、緩やかな水際線の再生も目的として設定し、河川敷を一部掘削して土砂を採取し投入することとした。

4. H17年12月実施フラッシュ放流の試験概要

ここでは、土砂投入を組み合わせたH17年12月実施フラッシュ放流の試験概要を示す。ピーク流量は45m³/s、ピーク継続時間は2時間である。土砂投入地点は、これまでの調査で明らかとなった河床に移動可能粒径が少ない君が代橋より600m上流を選定した。土砂量はH16とほぼ同等の200m³とし、放流時に流水によって側岸浸食される形態とした(写真-1)。投入した土砂は0.4mm以下の細粒土砂は少ないが、d50=9.5mmで礫分が多く、H16年とほぼ同様(d50=6~13mm)であった。(図-5)。

(1) 調査の概要

下流河川のモニタリング項目は、水理量(水位、表面流速)、水質(SS、VSS(SS中の有機成分))、河床材料ト

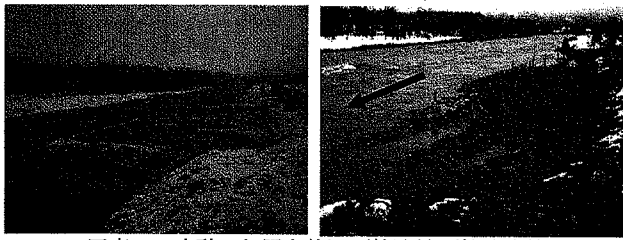


写真-1 土砂の仮置き状況 (放流前/放流直後)

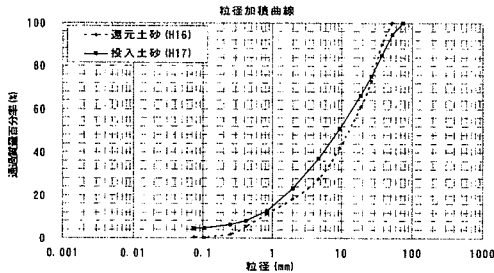


図-5 投入土砂の粒度分布

ラップ調査、付着藻類の剥離状況等である。土砂投入地点の上下流でのモニタリング位置を図-6に示す。付着藻類の調査は放流の前後に礫の表面を10cm×10cmの大きさで採取する杵取り(コドラード)法により行った。サンプル数は、1地点あたり各々H15年は5、H16年は8、H17年12月は5-6で、クロロフィルa量を分析した。

また、ダム下流河川の縦断的な河床砂礫の移動を確認するため、河床材料トラップ箱を6地点に設置し捕捉された河床砂礫の粒径を分析した(表-2)。

(2) 放流の概要

フラッシュ放流は午前9時から開始し、11時30分に最大放流量40m³/sに増加させ、2時間継続ののち13時30分から減水させ、15時30分に終了した。下流の真名川頭首工では、維持流量等を合わせて12時前から約2時間最大45m³/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-7)。なお、放流水は下荒井堰(12時30分)から発電水路を経由し、市荒川発電所放流口から本川(13時00分)へ合流した。

5. 試験結果および考察

次に、H17年12月実施フラッシュ放流の試験結果を整理し、過去の放流試験結果と比較することにより、真名川ダムにおけるフラッシュ放流実施のあり方について考察を行う。

(1) 河床砂礫の移動

土砂の流下状況は置土した土砂の放流前後の横断測量により、投入土砂200m³のうち約110m³が流下したことを確認した。次に、トラップ箱については、表-2に示すようにいずれの地点においても土砂が捕捉され、H17. 8の30m³/s放流でほとんど補足されなかった君が代橋で34kg、富田大橋地点14kgの礫が捕捉された。8月実施の30 m³/s放流で捕捉されず、12月実施で捕捉された

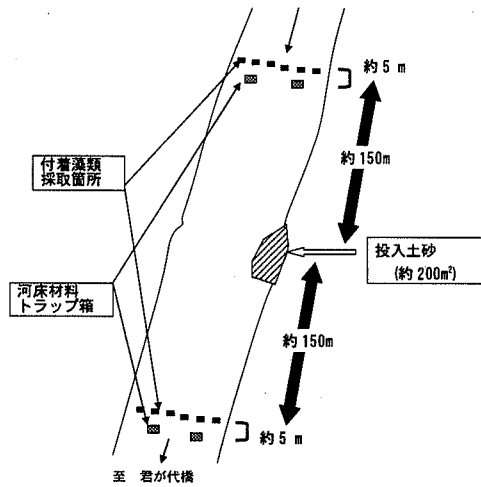


図-6 土砂投入地点上下流のモニタリング位置

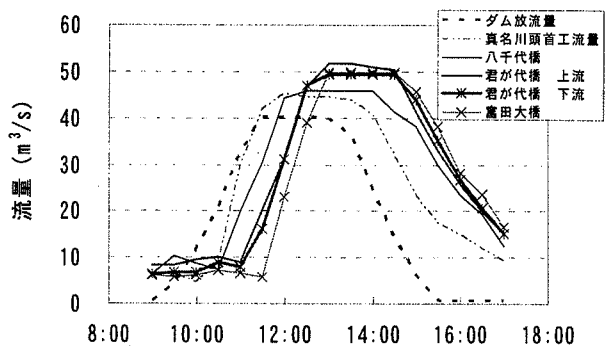


図-7 各地点の流量変化

のは、今回の土砂投入およびフラッシュ放流量の増加の効果に加えて、9月の台風14号による180 m³/sのダム放流により礫が移動した影響が考えられる。いずれにしても、君が代橋地点においても十分な礫移動が確認されたことで、真名川下流区間においても河床の攪乱効果が発揮されたものと考えられる。

図-2(D)の欄外下には、H17年12月45m³/sで捕捉されたd90の粒径を記載したが、それより小さい粒径は45m³/sで移動可能であり、(D)には(C)の河床構成材料の表面積のうちd90より小さい粒径の占める割合を示した。八千代橋上流は移動可能な砂礫が数キロにわたり存在するが、八千代橋下流には逆に移動可能な砂礫が少ない状況であり、今回の放流に際して、八千代橋より下流に土砂を投入したことは妥当であったと言える。

(2) フラッシュ放流中の水質の変化

a) 下流河川のSS、VSSの変化

フラッシュ放流による八千代橋、君が代橋土砂上流および下流3地点のSS濃度、無機物量の変化を図-8に示す。各地点とも同程度のピーク値であるが、君が代橋下流では土砂投入地点上流に比べSS濃度のピーク時間が長く、礫の流下によって河床からのシルトの巻き上げが増大し、かつ効果が継続したことが考えられる。

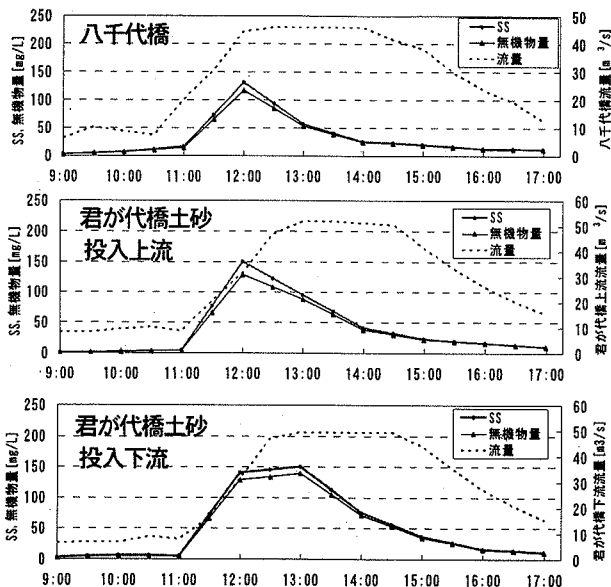


図-8 フラッシュ放流に伴うSSと無機物量の変化

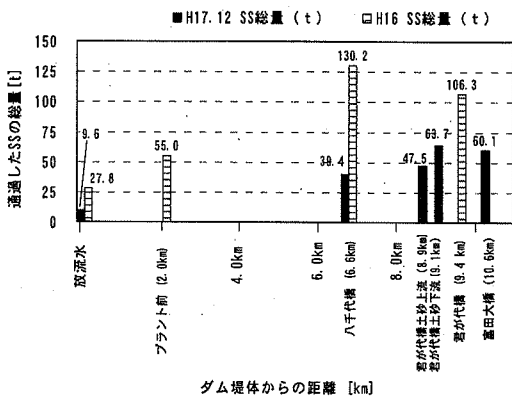


図-9 各地点を通過したSSの総量

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フラックス (総量=流量×SS濃度) の変化を図-9に示す。H16は土砂還元地点直下の八千代橋が最大値を示し、H17も土砂投入地点直下の君が代橋土砂下流地点が最大値を示した。君が代橋土砂上流47.5tと土砂下流63.7tの増量約16tは、土砂投入による河床からのシルトの巻き上げの効果と考えられる。なお、投入土砂そのものに含まれる微細土砂も別途水質調査により検討しているが、シルトの巻き上げ量に比べると少ない量であった。

(3) 付着藻類の剥離の状況

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、過去4回のフラッシュ放流と付着藻類の剥離状況を整理した(図-10)。図にはフラッシュ放流中の流速の最大値(▲)を示したが、H15, 17年は表面流速の計測のため、「建設省河川砂防技術基準(案)同解説」に従って0.88を乗じて補正を行っている。

4回分のデータのある八千代橋において付着藻類の剥離効果を比較すると、H15年はフラッシュ放流前のクロ

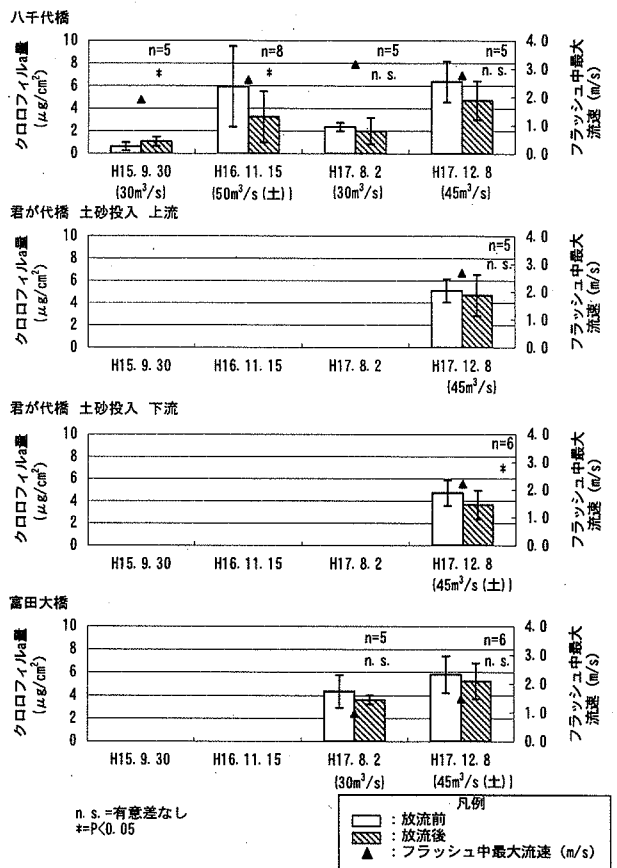


図-10 過去4回のフラッシュ放流と付着藻類の剥離

検定は、Wilcoxonの符号順位検定による。各フラッシュ放流量の後の(土)は、上流部に土砂を設置したことを示す。

ロフィル量が元々少なく顕著な効果が見られなかったが、H16年は放流前に藻類が繁茂していたこと、土砂還元も相乗したことから剥離が進み、統計的にも有意な差が認められ(Wilcoxon $p < 0.05$)、減少率は45%であった。

坂本ら(2005)は、H16年の土砂還元を伴う $50\text{m}^3/\text{s}$ 放流に関して、付着物質の減少率は土砂の下流の方が多く、土砂還元の効果が顕著であったと報告している。H17.12はフラッシュ放流前後の統計的な有意差はないものの、減少率は26%とある程度の剥離効果が得られている。H16の最大流速は 2.6m/s 、H17.12は 2.75m/s 、また放流前のクロロフィル量も大差がないが、H16の方の剥離が進んだのはH16は上流で土砂還元を行っており、土砂下流量が多かったことなどが考えられる。

一方、君が代橋ではH17.12における土砂投入上流地点は最大流速 2.67m/s 、土砂下流は 2.20m/s であるが、土砂投入地点上流の減少率8%に対し下流は23%であり、下流は統計的にも有意な減少が認められ(Wilcoxon $p < 0.05$)た。既に述べたように真名川下流区間は移動可能な砂礫が少ない状況であり、投入土砂による付着藻類の剥離効果が確認された。

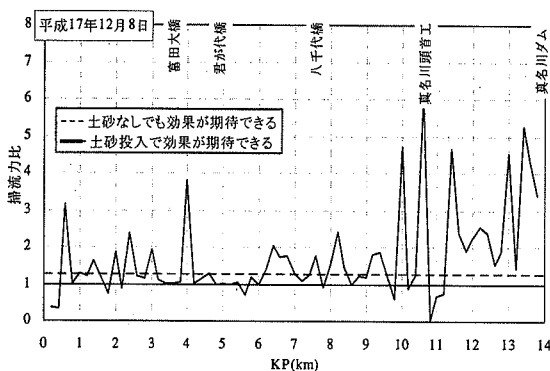


図-11 不定流解析による45m³/s放流時の掃流力比

(4) 流量波形

a) ピーク流量および継続時間

平成15～17年度に行われたフラッシュ放流試験からピーク流量およびピーク継続時間について評価する。河床構成材料の移動について、30m³/s放流では八千代橋より下流の土砂の捕捉は少ないが、45m³/s放流ではいずれの地点においても土砂が捕捉され、土砂投入のない君が代橋土砂投入上流でも多くの砂礫が捕捉された。付着藻類の剥離・更新が顕著であったのは、H16の50m³/s放流とH17の45m³/s放流のいずれも土砂還元・土砂投入箇所の下直下であった。これら区間で付着藻類の剥離が顕著であったことから、投入土砂および河床材料の移動が藻類の剥離更新に効果があることを示している。

ピーク流量や土砂設置について、掃流力を基に比較検討する。H17.12の45m³/s放流を不定流解析で同定した場合の最大掃流力比を図-11に示す(君が代橋土砂投入箇所下流の掃流力を1とする)。効果の大きかった君が代橋土砂投入箇所下流と掃流力が同等以上である箇所は8割程度であり、土砂投入のフラッシュ放流により環境改善が期待できる。以上のことから藻類の剥離更新に効果が期待できるピーク流量は土砂有りで50m³/s程度と考えられる。ピーク継続時間については、ダム直下に対して真名川下流でのピーク流量継続時間はいずれも3割程度の減少であり、最短のH17.12のピーク流量時間2時間で設定することも可能であることが確認できた。

b) 真名川の水位上昇・下降に伴う安全性確保

H17.12の放流では、真名川頭首工下流の水位上昇を下流放流制限(30分間の水位上昇量を0.3m以下)内に治めることを目標に放流初期30分の放流増水量を2m³/s/10分で操作したが、下流の八千代橋で僅かながら下流放流制限を満足できなかった。この対応として、今後は放流開始から1時間程度経過するまでは1m³/s/10分で増加させる波形に設定し下流河道の安全性を確保したい。また、減水時の魚類の逃げ遅れは確認できなかったことから放流減水量3m³/s/10分は妥当と考えられる。

c) 九頭竜川の水位変動に対する安全性の確保

フラッシュ放流は真名川を流下し、下荒井堰上流で

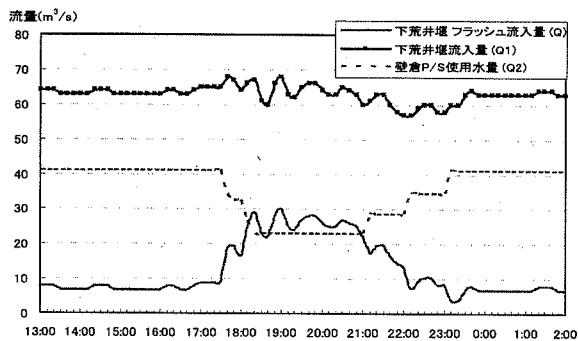


図-12 フラッシュ放流時の下荒井堰付近の流量変動

九頭竜川本川に流入する(図-1)。この放流水による本川の水位変動をできるだけ少なくするために、真名川を流下したフラッシュ放流Q(最大30m³/s)が下荒井堰に流入する時間帯に、発電事業者との調整により九頭竜川本川から下荒井堰に流入する流量Q2を最大約40→最小約20 m³/sに減少させる操作を行った。H17.8.2に実施した流量調整結果を図-12に示すが、下荒井堰の流入量(Q1=Q+Q2)の1時間当たりの流量変動量は最大8m³/s/hrと安定した流量変化を保つことが出来た。夏場の昼の時間帯にフラッシュ放流を行う場合には、九頭竜川本川における安全性確保のために、このようなピーク流量と放流タイミングに関する発電事業者との調整が必要となる。

6. 今後の課題

これまでの試験により、最大50m³/sを2時間継続させるフラッシュ放流を概ね出水・非出水期ごとに1回以上実施することを目標とすればいいことが明らかとなった。さらに、このフラッシュ放流をより効果的とするために、河道内の移動可能な礫を調査し、必要に応じて土砂還元または土砂投入を行うことが望まれる。

今後の課題としては、季節ごと、また河川縦断ごとの河道内の環境変化を継続的にモニタリングし、その効果を放流履歴とともに検討していくことが重要である。放流には、融雪出水、洪水期制限水位への水位低下に伴う出水、弾力的管理による放流、台風の自然出水等があり、これらの出水に土砂投入を効果的に組み合わせ、一年を通した最も効果的な河川環境改善の方法および実施工程を確立したい。

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)およ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る。

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) 坂本博文, 谷崎 保, 角 哲也: 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」, 河川技術論文集, Vol. 11, pp. 273-278, 2005

(2006.4.6受付)