大山川における付着藻類の剥離に必要な フラッシュ放流規模に関する現地実験 ～水力発電用取水堰（大山川ダム）について～

APPROPRIATE FLUSHING FROM INTAKE DAM (OHYAMAGAWA DAM) FOR HYDROELECTRIC POWER PLANTS TO DETACH ATTACHED ALGAE IN THE OHYAMA RIVER

矢野真一郎¹・原川将人²・黄偉³・林琳⁴・小松利光⁵

Shinichiro YANO, Masato HAKAKAWA, Huang WEI, Lin LIN and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院環境社会部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

²学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻（同上）

³工博 中国水利水電科学研究院（A-1 Fuxing Road, Haidian District, 100038 Beijing, CHINA）

⁴工修 TOTO株式会社（〒802-8601 北九州市小倉北区中島2-1-1）

⁵フェロー 工博 九州大学大学院特命教授 工学研究院環境社会部門（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

Ohyamagawa Dam is an intake weir for two hydroelectric power plants along the upper Chikugo River, so-called the Ohyama River. After 2002, environmental flow regime has been changed from 1.5m³/s to 4.5m³/s in summer (April-September) and 1.8m³/s in winter for river restoration under regulated condition by dams. But, this improvement of environmental flow regime was not considered to give a satisfactory condition for the river environment. Thus, in 2011 we attempted artificial flushing experiments from the dam to improve it by detaching attached algae on the riverbed material as a possible countermeasure. In-situ measurement for hydraulic conditions and attached algae sampling were conducted during the flushing experiment. As a result of this research, flushing discharge of 40m³/s is the minimum appropriate discharge for the Ohyama River under the realistic restriction.

Key Words: attached algae, Chikugo River, flushing, hydroelectric dam

1. はじめに

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故に伴い、我が国の一般世論は脱原発と再生可能エネルギーへの支持が大きくなっている。再生可能エネルギーのうち最もシェアが大きいのが水力発電であり、2011年度実績では全発電量の9.0%(863億kWh)、発電容量は水力全体で19.2% (4,842万kW)であった¹⁾。一方、他の新エネルギーは、発電量で1.4%、発電容量で0.2%とわずかである¹⁾。このように水力発電は電力源として無視できず、安定性と環境性(CO₂を排出しないという意味)にも優れ、かつ純国産でありエネルギー安全保障面でもメリットがある。よって、今後の電気エネルギー政策上、水力発電の持続的な利用は重要課題といえる。

水力発電の持続的利用を考える上で、考慮されるべきこととして、①出水などの災害への脆弱性対策、②水車

や発電機などの施設改良による発電容量増量、③維持流量の放流やダムの未利用落差を用いた発電の実施²⁾、④ダムの堆砂容量を解放することによる発電容量増量、などに加えて、⑤河川環境への悪影響を緩和することがあげられる。このうち⑤については、流況改善による緩和策が考えられる。一般水力発電のうち流れ込み式(水路式)やダム水路式では、ダム式のようにダム堤体直下で放流しないため、発電用水を取水口から離れた下流域に流している。よって、その区間が減水区間(または無水区間)となり河川環境の劣化が起こっていた。これに対する対策として、1988年に国により通達された「発電水利権の期間更新時における河川維持流量の確保について」、いわゆる「発電ガイドライン」により、一定の維持流量(取水地点集水面積に対する比流量で0.1～0.3m³/s/100km²)を減水・無水区間に戻すことが義務づけられた。しかし、放流後の調査では無水状態からは改善が見られるが、さらに流量を増やすことやフラッシュ放

流を導入することなどの必要性が指摘されている³⁾。

これまで、フラッシュ放流の事例は我が国だけでも数多く存在している^{4)~10)}。近年のものでは、例えば、赤松⁸⁾は室内実験と宮ヶ瀬ダムでのフラッシュ放流による現地実験ならびに数値シミュレーションから、粒径5～10mm程度の砂礫が混入していることが糸状藻類の強制剥離に有効であることを明らかにした。山内⁹⁾は灰塚ダムのフラッシュ放流について放流時の河川水中に含まれる植物色素の濃度から剥離効果を定量的に明らかにすることを試みた。また、同じ灰塚ダムについては、椿¹⁰⁾が現地調査と数値シミュレーションによりフラッシュ放流による河床環境の改善効果を検証している。

しかし、フラッシュ放流を実績のないダムで実施する場合には、目的に適した流量規模や流し方などを予測するのは一般的には困難である。また、特に放流流量については、ダムの放流設備や水力発電ダムの電力供給への影響度などに依存するなど現実的な制約条件から決定されることが多い。また、流水中の砂礫の有無により、同じ流量規模であっても付着藻類の剥離状況が異なる¹¹⁾ことから、最近では置き砂を併用したフラッシュ放流なども各地で行われ始めている¹²⁾。

本論文では、筑後川上流の大山川にある水力発電用取水堰である大山川ダムにおいて付着藻類の剥離更新の促進のための流況制御について調べることを目的に実施されたフラッシュ放流実験について報告し、現実的な制約条件のもとで有効な環境改善効果を得るためのフラッシュ放流について考察する。

2. 大山川ダムについて

本研究の対象河川である大山川は、筑後川上流の松原ダムから玖珠川合流地点までを指すが(図-1)、松原ダムの下流にある大山川ダムは2つの水力発電所(女子畑と柳又)に導水する取水堰であり、その直下から玖珠川合流

図-1 大山川流域、調査地点とその集水面積

点までが減水区間とみなせる。2002年より、河川環境改善を目的として維持流量の増量が行われており、それまでの通年 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ が、3月下旬から9月末までの期間に $4.5\text{m}^3/\text{s}$ を、それ以外の期間では $1.8\text{m}^3/\text{s}$ を流している。また、松原ダムでもダム式の発電が行われているが、発電用水の放流口は松原ダム直下ではなく、それより低い大山川ダムに近い地点に設置されており、そこまでの区間は減水区間となっている。この区間については、2003年より通年 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ から通年 $1.5\text{m}^3/\text{s}$ へ増量されている。これらの増量は、地元市民による運動を契機に合意に達して実施され、その効果についての調査より、ダム建設後に見られなくなった30cm以上の尺アユが復活したことなどの環境改善が見られたとの結果が出ている^{13)~15)}。

その後、さらに増量することが求められており、関係者間の協議が進められている。しかし、維持流量の増量は水利権をもつ電力会社にとっては減電、すなわち減収に直接結びつくものであり、合意への進展が見られていない。そこで、本来の川の姿に近づけるための科学的・定量的な評価を行い、協議中の維持流量の適正規模を検討する基礎資料とすることを目的とした社会実験としてフラッシュ放流実験を試みることに合意された。フラッシュ放流には、ダム群によりカットされた数十 m^3/s 程度の小規模出水を人為的に復活させて流況の平滑化を防ぎ自然流況に近づけることが期待される。

3. フラッシュ放流実験について

本研究で実施したフラッシュ放流実験は、大山川ダムを管理する九州電力(株)の協力のもと、表-1に示す日程で2011年9月下旬～10月上旬にかけて計4回と、2012年3月初めに1回の計5回実施された。本論文では、2011年の実験についてのみ紹介する。

今回の放流実験の主目的は、ダム下流から玖珠川合流地点までの大山川全域について付着藻類を剥離するのに必要な流量規模を求めることである。そのため、電力事情が非常に厳しい中であつたが、電力会社が許容できる範囲で大きな水量を放流する計画が立てられた。ピーク放流量は $10\sim40\text{m}^3/\text{s}$ まで $10\text{m}^3/\text{s}$ 刻みで設定し、3～4日毎にピーク流量を大きくしながら計4回実施された。なお、付着藻類の剥離には最も流速が大きくなるピーク流量の他に、ピーク流量までの上げ方、ピーク流量の継続時間

表-1 大山川ダムのフラッシュ放流実験の概要

	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
実施日	9月26日	9月29日	10月3日	10月6日	2012年 3月1日
放流時間	9:00～14:00	9:00～15:00	8:30～15:00	8:00～15:00	9:00～14:00
最大放流量 (m³/s)	10	20	30	40	40
維持流量 (m³/s)	4.5		1.8		
ピーク継続時間	2時間				

も重要であるとの指摘¹⁰⁾がある。本実験では流量の上げ方については、急激な増水を避けて河道内の安全を確保するため、ダム操作規則に従って段階的に上げる方法がとられた。ピーク流量の継続時間については、大山川の下流端で波形が乱れても流量のピークが出現すること、また使用可能な水量の関係から一律2時間と設定された。ピーク終了後は直ちに維持流量まで減少させた。図-2に一例として10月6日(ピーク流量 $40\text{m}^3/\text{s}$)の放流波形を、図-3にダムに最も近い観測地点(小五馬)における維持流量流下時と最大流量流下時の状況を示す。なお、第3回目(10月3日、 $30\text{m}^3/\text{s}$)の放流直後より大山川ダム下流の維持流量が夏季の設定である $4.5\text{m}^3/\text{s}$ から冬季の設定 $1.8\text{m}^3/\text{s}$ に移行している。維持流量の減少から最後の10月6日の放流まで日数が少ないため、維持流量変化の河床付着藻類への影響は小さいと判断した。

図-2 放流波形の一例(ピーク流量 $40\text{m}^3/\text{s}$ 、大山川ダム地点)

図-3 維持流量流下時(上、 $4.5\text{m}^3/\text{s}$)と最大のフラッシュ放流時(下、 $40\text{m}^3/\text{s}$)の様子(小五馬地点、上流向きに撮影)

4. 現地調査について

(1) 調査地点

フラッシュ放流実験の実施に併せて9月中旬から10月中旬にかけて大山川で現地調査を実施した。観測地点は図-1に示した大山川ダム(89.9km)の上流に位置する松原(92.9km、維持流量 $4.5\text{m}^3/\text{s}$ 時の水深と川幅：30～50cm、20m、河床勾配：0.0068)と下流に位置する小五馬(88.5km、30～45cm、25m、0.0068)・小平(84.6km、30～35cm、35m、0.0085)・小淵(77.5km、30～50cm、40m、0.006)の計4地点である。また、各地点の河床材料は粒径10～20cmの礫が中心であり、ダム群建設後のアーマー化で砂はほとんど見られない。植生については、4地点とも河岸沿いにツルヨシ群落が見られた。

これらのうち松原は松原ダムからの放流により流量が $1.5\text{m}^3/\text{s}$ で一定しているため、比較対象地点(Reference)として設定した。ただし、大山川ダム下流3地点とは維持流量規模が異なっているため、あくまでもフラッシュ放流のような急激な流況の変動を受けていないという立場での比較対象である。その他3地点は大山川ダムからのフラッシュ放流の影響を受けるImpact地点となる。

(2) 観測機器設置による連続観測

フラッシュ放流実施期間中の観測地点の物理的な状況を把握することを目的として、9月25日から10月7日にかけてメモリー式観測機器による連続観測を行った。9月25日にそれぞれの観測地点の流心部付近の河床に、電磁流速計(Compact-EM(以下、全機種アレック電子社製))、Chl.a・濁度計(Compact-CLW)、水位・水温計(松原を除く、Compact-TD)、DO計(Compact-DOW)をコンクリートブロックに固定したものを設置した。

(3) 付着藻類調査

フラッシュ放流による付着藻類の剥離効果と藻類の状態を調べるために、前述の4地点で藻類のサンプリング調査を行った。付着藻類調査は自然石、タイル、ならびに石と区別した3種類の基盤について行った。河川内に存在している通常の自然石は場所により流れの速さや日光の当たり方などの物理的条件、また大きさや形状などの条件が異なっており、付着藻類の量や質を評価する際にこれらの影響によるばらつきがでるためサンプリング個数を多くしなければ評価しづらいという欠点がある。本研究グループでは2010年度の藻類調査¹⁵⁾より、種々の条件を画一化し、付着藻類の繁茂状況に関する情報を規格化することを目的に、タイル(商品名「ラグストーン」、御影石製、 $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 2\text{cm}$ 、重量 2.5kg)を導入している。また、現地で自然石表面の付着藻類を全て剥がしてタイルのそばに再設置したものを石としている。

一方で本実験では、自然石とタイル・石では履歴効果

が異なっている。まず、自然石については観測毎に現場で選んでサンプルを採取するため、観測日以前に実施された全てのフラッシュ放流の影響を受けた藻類の剥離効果を評価することになる。一方、タイル・石については2012年9月2日に各観測地点に7個ずつ設置した後に、約2週間の期間を経て9月16日に藻類の繁茂状態を調べた。その後、最初の放流実施日(9月26日)の前日である9月25日に同観測地点内で大きな岩陰や橋脚の背後などフラッシュ放流の影響を受けにくい場所に移動して、各フラッシュ放流前にタイル・石を各1個ずつ河道内に戻して各フラッシュを受けさせた。これによりタイル・石は評価対象より前のフラッシュの影響を最小限にした評価ができた。調査は9月16日(基盤設置2週間後)、25日(第1回フラッシュ前日)、27日(第1回1日後、第2回2日前)、30日(第2回1日後、第3回3日前)、10月4日(第3回1日後、第4回2日前)、7日(第4回1日後)、ならびに20日(実験終了2週間後)の計7回実施した。

毎回の観測では、過去の調査¹⁵⁾と同様に各地点で3個の自然石とタイル・石をそれぞれ1個ずつの計5個のサンプルを採取した。本実験では調査における時間的制約からタイル・石は1個ずつとしている。採取したサンプルから強熱減量・Chl.aを測定した。なお、同サンプルから付着藻類の種構成を一部のサンプルのみ同定している。

5. 結果と考察

(1) 連続観測結果について

図-4a) 9月26日 (10m³/s) の水位変動 (実測値と計算値)

図-4に9月26日と10月7日のピーク流量10 m³/sと40m³/sのフラッシュ実験についてImpact地点の3地点における水位の変動を示す。上流の小五馬から下流の小湊までフラッシュ放流を受けて水位がピークを示し、それが一定時間(2時間程度)継続していることが分かる。一方、10m³/sの場合には最下流の小湊では波形がなまっており、継続時間が短くなっていたが、大山川ダムからの2時間のピーク流量の継続時間については大山川全体にピーク流量の継続を発生させる上での問題はなかったといえる。

また、同図にはMIKE11による1次元不定流計算から得られた水位の変化も示している。流速については観測から良好な結果が得られなかったため、数値計算結果を用いて推定している。計算領域は大山川ダムから小湊地点までの13.8kmの区間とし、河川断面については国土交通省が2010年に実施した200mピッチの測量結果を用いた。上流端はダムからの放流量波形、下流端は実測水位をそれぞれ境界条件として用いた。マンニングの粗度係数は、各観測地点に設置した水位計のデータと計算が合うようチューニングした結果、 $n=0.08\text{m}^{-1/3}$ を得た。同図から分かるように、おおむね良好な計算結果を得ている。ここで得られた粗度係数値はかなり大きい値を示したが、図-3に示した写真のように植生が多いこと、ならびに河床材料が粒径10～20cmの礫が中心であり、河道内に多数の巨石(最大径が数m規模)もあるためと推測される。

図-5に10月7日の断面平均流速(計算値)、濁度とChl.a(観測値)の時系列を示す。ダム直下の小五馬を除き、下流2地点ではピーク流量が到達した際に濁度とChl.aが急上昇し、その後ピーク流量の継続時間内で減少していく

図-4b) 10月7日 (40m³/s) の水位変動 (実測値と計算値)

様子が測定されている。濁度のピーク値は、同じ日には下流に向けて大きくなり、同じ地点ではピーク流量が大きくなるにつれて大きくなる傾向性を示した。

(2) 付着藻類調査結果について

図-6に自然石とタイル・石のChl. a, 図-7に各基盤の強熱減量の経時変化を4地点についてそれぞれ示す。4回のフラッシュ放流が行われた日にちとピーク流量が併記されている。また、自然石については各観測において採取した3サンプルのデータをそれぞれ示している。

図-5 ダム下流3地点の流速（計算値）・濁度・Chl. aの時間変化(10月7日. 左から小五馬, 小平, 小淵)

図-6 Chl. aの変化 (上から松原, 小五馬, 小平, 小淵)

図-7 強熱減量の変化 (上から松原, 小五馬, 小平, 小淵)

上述のフラッシュ履歴効果による自然石とタイル・石の間の違いは明確ではなく、両者は概ね同様の傾向を示している。今回の実験ではフラッシュ放流としては一般的に小さいと考えられる10~20m³/s規模から始めており、履歴としての影響は小さかったと推定される。

Chl. aについて、フラッシュのインパクトを最も強く受けるダム直近の小五馬では、ピーク流量が30m³/sのフラッシュ後の10月4日から減少傾向に転じていた。3つのImpact地点の中で中流に位置する小平では40m³/s後の10月7日には明確な減少傾向を示した。最下流の小淵につ

いても、40m³/s後の10月7日に減少がみられた。よって、大山川全体では流量40m³/sが付着藻類の剥離効果をもたらす最小流量規模であると考えることができる。なお、Reference地点の松原については、30m³/sの放流後からChl.aが減少しており、小五馬と同様な傾向を示している。この自然の減少傾向が、フラッシュを受けた3地点の結果に対してどの程度含まれているかについては、松原の流量(1.5m³/s)が大山川ダム下流の維持流量4.5m³/sとは異なることから明確ではない。ただし、小平と小淵の2地点は、松原とは明らかに傾向性が異なっていることから推定すると松原で見られた傾向性はダム下流Impact地点では大きく影響していないとも考えることができる。したがって、ダム下流3地点においてはフラッシュ放流の効果により藻類が剥離したものと判断している。また、実験終了2週間後(10月20日)の調査では、概ね上昇傾向を示しており、再生産が進んだことが分かる。

藻類の種構成については、一部サンプルからのデータのみであるが、大型糸状藻類(*Cladophora*, *Cloniphora*, *Oedogonium*, *Ulothrix*, *Stigeoclonium*)が小五馬で40m³/s後に消失し、その2週間後に回復していたことや、藍藻類の*Homoeothrix janthina*がいずれの地点でも優先しており、小五馬では30m³/s後に消失していたことが分かった。

強熱減量については、小五馬で40m³/s後に上昇が見られるなどフラッシュの効果が明確でない部分もあるが、小平と小淵では減少傾向が示された。

以上の結果から、大山川全体において付着藻類の強制剥離を可能とするのに必要なフラッシュ放流規模が最小で40m³/s規模であるといえる。強制剥離には、100m³/s規模のフラッシュ放流が理想であると考えられるが、社会情勢などを勘案すると現実的な規模として40m³/s程度のフラッシュ放流を実施し、河川環境を多少とも改善することも選択肢の一つになるであろう。

6. おわりに

筑後川上流の大山川においてフラッシュ放流実験を実施した。調査結果より、40m³/s規模のフラッシュ放流で付着藻類の剥離が促進されることが確認された。

課題として、置き砂を併用したフラッシュ放流についての検討や、これまでに蓄積された維持流量の増加による影響と変動部分としてのフラッシュ放流、ならびに自然出水による影響を総合的に整理し、現実的な条件下で大山川のアユを頂点とする河川生態系に対して最も効果的な放流方法を検討し提案したい。なお、本見解は著者らの意見であり、関係者の総意ではないことを付記する。

謝辞：

今回の実験は三隈川・大山川河川環境協議会により実施された。詳細計画の策定と当日の実務は、協議会に設

置された大山川河川環境改善調査WG(筑後川ダム統合管理事務所、筑後川河川事務所、九州電力(株)大分支店、大分県、日田市、水郷ひた再生委員会、協力：九州大学)が行った。また、(財)河川環境管理財団の平成23年度河川整備基金から援助を受けた。藻類種同定に関して井芹寧氏(西日本技術開発株式会社)にご指導いただいた。ここに記し深甚なる感謝の意を表する。

参考文献：

- 1) 資源エネルギー庁：エネルギー白書2013, 2013.
- 2) 大濱隆司, 坂元博巳, 富岡孝仁：九州電力における河川維持流量発電への取り組み, 電力土木, No.344, pp.44-47, 2009.
- 3) 国土交通省：河川環境改善のための水利調整－取水による水無川の改善－, 平成13年度～平成14年度プログラム評価書, 2003.
- 4) 角哲也, 塚原千明, 柏井条介：ダムによる河川流況の変化とフラッシュ放流に関する考察, ダム技術, 第143号, pp.40-51, 1998.
- 5) 辻本哲郎, 増田健一, 寺本敦子, 田代喬：試験湛水時のダム下流河道の生息環境の変質とその復元のためのフラッシュの効果の評価, 河川技術に関する論文集, 第5巻, pp.81-86, 1999.
- 6) 大杉奉功, 尾澤卓思, 小笠原智宏, 角哲也：フラッシュ放流による河川掃流効果に関する検討, 河川技術に関する論文集, 第6巻, pp.185-190, 2000.
- 7) 小部貴宣, 浅見和弘, 大杉奉功, 浦上将人, 伊藤尚敬：三春ダムにおけるフラッシュ放流によるダム下流河川の環境改善について, 応用生態工学, 第8巻, 第1号, pp.15-34, 2005.
- 8) 赤松良久, 井上麻衣, 池田駿介：フラッシュ放流によるダム下流の河床付着性藻類の強制剥離に関する研究, 河川技術論文集, 第14巻, pp.425-430, 2008.
- 9) 山内鋭司, 岡野隆行, 小松俊晶：フラッシュ放流による付着藻類剥離効果確認のために灰塚ダムで実施した調査手法の紹介, 河川技術論文集, 第16巻, pp.35-40, 2010.
- 10) 椿涼太, 河原能久, 中土井佑輔, 岩苔和広：フラッシュ放流による河床環境改善効果と放流波形の重要性, 河川技術論文集, 第16巻, pp.523-528, 2010.
- 11) 赤松良久, 池田駿介, 浅野誠一郎, 大澤和敏：ダム下流における糸状藻類の強制剥離に関する研究, 土木学会論文集B, Vol.65, No.4, pp.285-295, 2009.
- 12) 赤松良久：置土がダム下流の河川環境に及ぼす影響に関する研究, 環境水理部会研究集会2012資料, http://www.jsce.or.jp/committee/hydraulic/kankyousui/_workshop/h24/2012.html, 2012.
- 13) 矢野真一郎, 齋藤正徳, 井芹寧, 河口洋一, 島谷幸宏, 緒方健, 山崎正敏, 清野聡子：筑後川上流(大山川)における維持流量変化が河川環境に与える影響に関する現地観測, 河川技術論文集, 第12巻, pp.443-448, 2006.
- 14) 齋藤正徳, 河口洋一, 矢野真一郎, 井芹寧, 黨秀次郎, 島谷幸宏, 緒方健, 山崎正敏, 清野聡子：筑後川上流域におけるダム放流量増加が付着藻類に与える影響, 水工学論文集, 第51巻, pp.1219-1224, 2007.
- 15) 矢野真一郎, 黄偉, 林琳, 井芹寧, 原川将人：筑後川上流(大山川)における小規模出水の付着藻類相への影響に関する現地調査, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I-757-I-762, 2012.

(2013. 9. 30受付)