

V-10 ダム下流の流量変動と河川の再生に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平16～平17

担当チーム：河川・ダム水理チーム

研究担当者：柏井 条介、結城 和宏

【要旨】

ダム建設による下流河川の流況の安定化により、魚などの餌になる付着藻類の健全な育成の阻害、微細粒子分の堆積による底生生物の成育環境の変化、産卵場の喪失などの問題を軽減・解消するため、フラッシュ放流の必要性が指摘されるようになってきている。本調査は、フラッシュ放流の適切な頻度、流量、継続時間の推定方法を示すとともに、フラッシュ放流を行うための操作方法を提案することを目的に実施するものである。調査内容は、水理実験による微細土砂の侵食現象の把握及び藻類剥離条件を調査するための試験装置の考案と水理実験による基本性能の確認、フラッシュ放流操作の必要性と貯水容量確保方法の検討の各項目であり、最終年度である17年度はこれら各項目について更に検討を行うとともにとりまとめた。

キーワード：付着藻類、フラッシュ放流、剥離、微細土砂

1. はじめに

ダム貯水池は流量の調節効果をもち、安定した水利用や洪水調節に使用される。この流量の調節効果は、河川環境に対しては流量変動の減少としてその影響が現れる。貯水池建設前と比較して流況が安定化するため、出水による定期的な擾乱により維持されていた河川の環境が変化するというものである。

こうした影響として、流路の固定化による河道の樹林化などが揚げられているが、本調査では各種影響のうち、掃流力の低下による微細粒子の堆積や付着藻類の再生サイクルの長期化に着目し、こうした影響を低減またはなくすために必要なフラッシュ放流の頻度、流量、継続時間の推定方法を提示することを目的としている。併せて、フラッシュ放流を行うための操作方法（水量確保方法）を提案することを考えている。

なお、微細粒子の堆積は、河床材料の表面を覆うことにより底生生物の生息環境に与えるとともに、河床材料の目詰まりによる魚の産卵環境の変化等を生じるものとされている。また、藻類の再生サイクルの長期化は、魚の餌となる藻類の生産性を低下させるとともに、餌としての存在期間を短期化するものと考えられている。

上記目的に対応するため、本調査では堆積した微細粒子の再浮上条件、侵食速度について水理実験を通じた把握を行った。また、藻類の剥離条件

について、種類や生育条件が様々に変化する現地条件に応じた対応が可能なよう現地試験装置を考案するとともにその基本性能について水理実験による資料収集を行った。更に、これら微細粒子や藻類のフラッシュ条件が提示された場合の放流の考え方、方法について、いくつかのダムの流入、放流実績データを踏まえ検討を行った。

2. 微細粒子の再浮上と侵食

2.1 実験概要

掃流力の低下により堆積した微細粒子の再浮上条件及び侵食速度を把握するため、現地の微細土砂を用いた実験を行った。対象としているのは河道に堆積する土砂であるが、ここでは実験土砂量の確保及び採取の容易さを考慮してダム貯水池堆砂のうち粒径の小さい箇所の底泥を用いることとした。

実験は長さ14.0m×幅0.6m×高さ0.2mの透明アクリル樹脂製の矩形管路を整流水槽に接続して実施した。管路のうち、上流端から4～8mの区間は、底面を0.1m切り下げ、高さ0.3mとしておりこの落差0.1m部分に供試体となる材料を敷き詰めた。管路上面と側面には上下流方向にピエゾ管を設置して圧力測定を行い、管内のエネルギー勾配を求めた。

図-1に実験で用いたAダム堆砂の粒度分布を示す。使用した土砂は大半が0.1mm以下の微細な

表-1 実験ケース一覧

ケース	初期含水比(%)	砂の混合率(%)	流量(m ³ /s)	摩擦速度 u _* (m/s)	侵食速度 E(m/s)	α (sec ² /m ²)
1-1	103.1		0.1	0.0397	2.40E-04	3.843
2	96.1	—	0.12	0.0428	1.45E-05	0.184
3	100.4		0.15	0.0704	3.94E-04	1.128
2-1	76.7		0.18	0.0689	3.04E-04	0.928
2	81.7		0.18	0.0613	3.30E-06	0.014
3	81.2	—	0.19	0.0632	1.03E-05	0.041
4	80.7		0.21	0.0763	2.28E-03	5.133
5	81.3		0.21	0.0763	6.38E-05	0.144
3-1	69.8		0.19	0.0675	1.82E-05	0.059
2	69.4	—	0.21	0.0749	7.16E-05	0.171
3	71.3		0.23	0.0748	1.30E-04	0.312
4-1	80.1	20	0.13	0.0443	1.66E-04	1.915
2	62.5	40	0.13	0.0487	5.34E-05	0.461
3	37.3	60	0.13	0.0506	6.95E-06	0.054
4	19.4	80	0.13	0.0493	2.09E-05	0.174

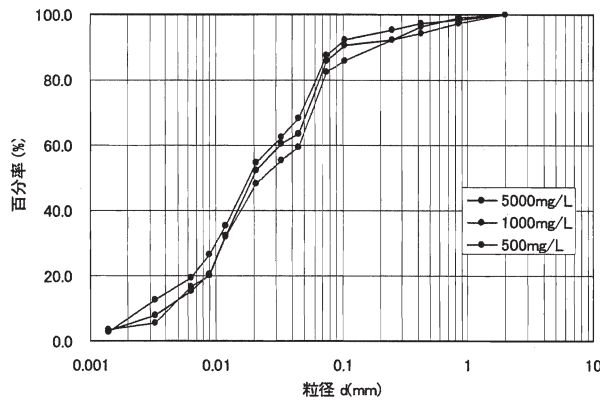


図-1 実験で用いた堆砂の粒度

ものであり、50%粒径が 0.02mm 程度である。対象としている微細粒子は、ウォッシュロード成分であり、実験土砂として概ね問題ない粒度分布と考えている。

実験では含水比を 60、80、100%と変化させており、所定の含水比となるよう水道水を加えながら攪拌を行った。実験ケースを表-1 に示す。ケース 4 は 50%粒径が 0.4mm のほぼ均一な珪砂を混合させたもので、砂と混合している場合の影響を調査した。なお、同じ条件下での複数の実験を実施したケースがあるが、これは実験の再現性が問題になったためである。また、表には実験結果も併せて示してあるが、これについては次節で説明する。

実験ではまず流量を段階的に徐々に増加させ、浮上限界流量を求めた。その上で流量設定を行い、速やかに所定流量まで増加させた。ケース 1~3 では最小流量のケースが概ね浮遊限界に一致している。侵食量の計測は、侵食量が概ね 10~20mm

程度に達したと判断した後、通水を停止し実施している。測定にはレーザー変位計を用い、18断面について約 0.3mm 間隔で測定した。

なお、ピエゾ管の圧力は水柱マンオメータで計測し、ビデオ撮影によりエネルギー勾配の時間変化を求めている。エネルギー勾配の変化は小さいが、侵食進行に伴う通水断面の拡大により時間とともに若干小さくなる傾向が認められている。

2. 2 実験結果

2. 2. 1 侵食状況

図-2 に侵食後の土砂の状態例を示す。図から、微細粒子の侵食は砂のように一様には生ぜず、ある場所から侵食が始まると、その部分が大きく侵食を受けるとい、極めて局所的な現象として生じることが分かる。特にケース 3-3 では幾つかの場所から始まった侵食が余り発達せずに留まっており、こうした傾向を確認することができる。

2. 2. 2 侵食特性の表現式

上記のように、微細粒子の侵食現象はかなり複雑であり、不安定なものである。このことが再浮上限界や侵食速度の推定を難しくしていると思われるが、侵食速度については、例えば次式が提案されている¹⁾。

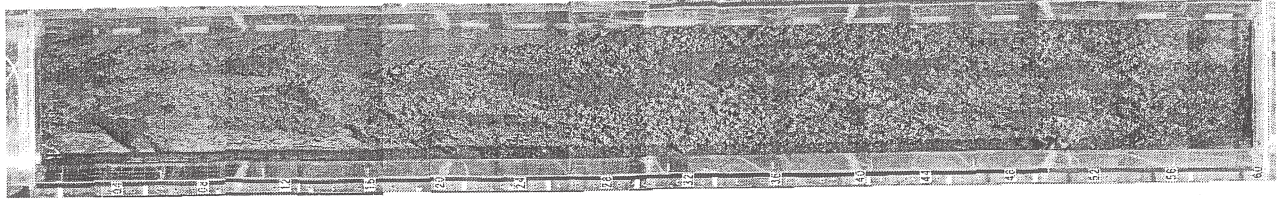
$$E = \alpha u_*^\beta \quad (u_* \geq u_{*c}) \quad (1)$$

ここに、E: 侵食速度(m/s)、u_{*}: 摩擦速度(m/s)、u_{*c}: 限界摩擦速度(m/s)、α、β: 定数であり、関根¹⁾はカオリン等を用いた実験により α、β として次式を提案している。

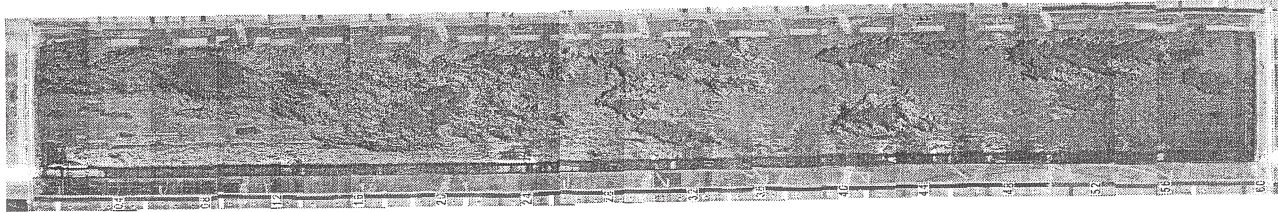
$$\alpha = \alpha_0 R_{wc}^{2.5} \quad (2)$$

$$\beta = 3 \quad (3)$$

ここに、 R_{wc} : 含水比 (%) であり、 α_0 は時季 土砂のフラッシングは、粒子の摩擦力のみから算



(a)



(b)

図-2 侵食状況例

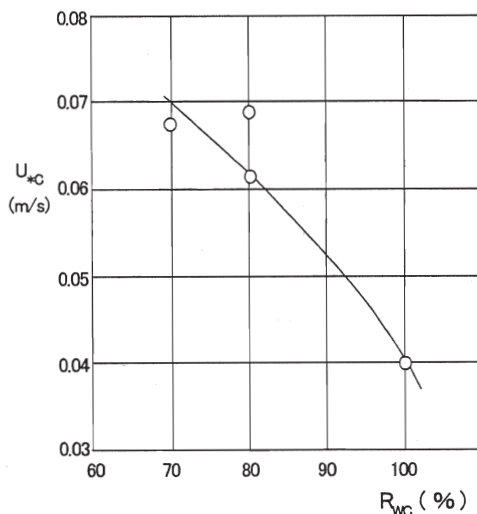


図-3 u_{*c} と R_{wc} の関係

(温度)、粘土の質によって異なる係数である。

2. 2. 3 限界摩擦速度 u_{*c}

図-3に今回の実験による u_{*c} と R_{wc} の関係を示す。ここで、 u_{*c} は、実験中の平均値を用いており、侵食による変化を含んでいる。実際の u_{*c} は、これよりやや小さい可能性がある。

図より、 R_{wc} が大きいほど u_{*c} が小さくなることが確認される。また、今回の実験では u_{*c} は 10^{-2} (m/s) のオーダーとなっている。例えば限界掃流力に関する岩垣式によれば、0.1mm 及び 50% 粒径の 0.02mm の粒子の u_{*c} は、それぞれ 0.013m/s、0.0067m/s であり、得られた値はこれよりかなり大きい値となっている。これは粘着性成分の存在によるものと考えられるが、いずれにしても微細

定される限界掃流力よりかなり大きな掃流力が必要となる。

ところで、当然のことながら u_{*c} は粒度分布の影響を受けることが予想される。そのため、各現場での u_{*c} を得るためには、同様の侵食実験を行うことが望ましいが、侵食実験は多くの費用と労力を有する。従って、現地毎にこうした試験を行うのは困難であろう。

今回の実験土砂の粒度分布は固定されており、一般論としての議論は難しいが、砂を混合させたケースでも他のケースと同様の値が得られており、現地材料としてある程度の代表性を有していると考えている。今後、データの蓄積を行う必要があるが、当面は現地材料の R_{wc} と粒度分布を計測し、今回の実験結果を参考に安全側の条件設定を行っていく方法が考えられる。

2. 2. 4 侵食速度

図-4には侵食速度 E と u_{*c} の関係を示す。図中には $\beta=3$ で $\alpha=0.1$ 及び 1 の線も示しているが、実験値はこうした α の範囲以上にばらついていることが分かる。因みに、S.A. Clay 及び T. A. Kolin カオリンを用いた関根らの実験では、0.02~0.4 の値を示しており、現地材料を用いた今回の実験でも比較的多くのデータがこの範囲にあるが、同時にかなり大きな値もみられている。

こうしたばらつきの原因として、侵食が局所的かつ偶発的に発生することが揚げられる。このため、安定した傾向を得るためには、個々の侵食規模に対し十分大きな供試体面積を確保する必要が

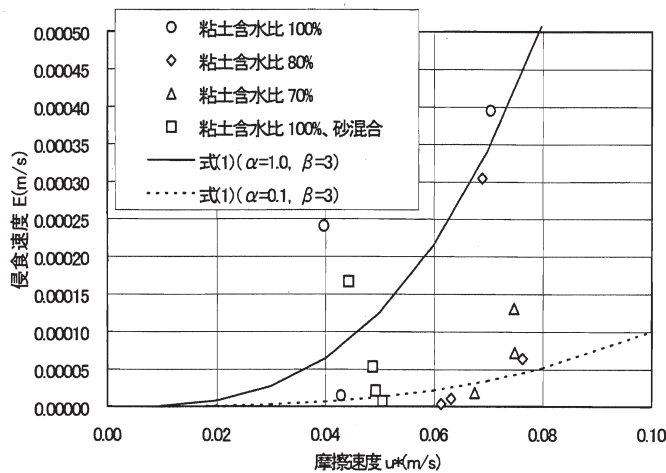


図-4 侵食実験結果

あるように思えるが、これについては確認が必要である。

侵食速度を適切に評価するためには上記のような問題はあるが、実際の問題を考えてみると、限界摩擦速度 u_{*c} をある程度超過した摩擦速度（例えば数倍の u_{*c} ）を確保してやれば、その侵食速度はかなり大きいと考えてよいようである。勿論、現地での土砂の堆積状況にもよるが、そうした摩擦速度の確保により速やかに侵食するものと思われる、時間オーダーの比較的短期間のフラッシュ放流で済ませることが可能と考えられる。

3. 付着藻類の剥離

3.1 検討の基本的方向

藻類の剥離条件については、実験室及び現地試験での検討例がみられるが、成育している藻類の剥離抵抗は、種類、年齢の影響は勿論、その成育場所の水理・水質特性の影響を受ける極めて複雑なものである。このため、こうした個別条件下での検討結果をより一般的なものとするには、多くのデータの蓄積とともに各データの条件についての精緻な分析が必要と思われる、今後かなりの時間と労力を要するものと予想される。

本調査は、こうしたデータの蓄積に基づく剥離条件の設定を提案するのが目的ではなく、個別サイトでの剥離条件を、試験を通じて求める方法を提案することを目的としている。

3.2 剥離条件の試験方法と装置原案

剥離条件の試験方法としてまず考えられるのは、幾つかの研究で実施されている試験水路を用いる方法である^{2), 3)}。この場合、水路に設置しやすい

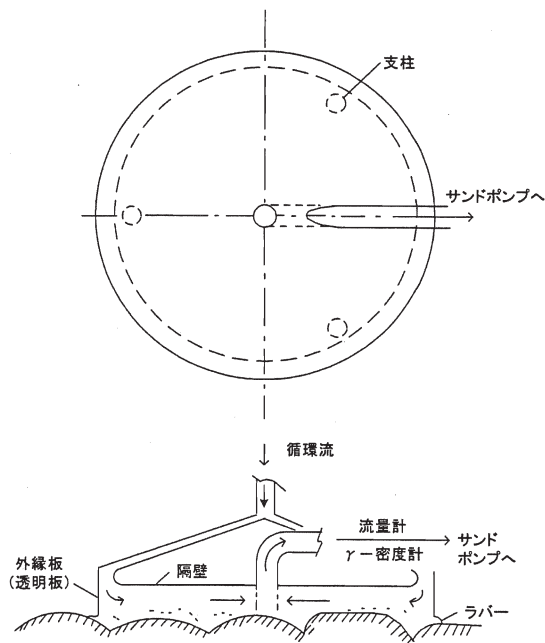


図-5 藻類剥離試験装置(原案)

タイルやブロックを河川内に設置し、藻類の成育を確認した上で実験に供することになる。この方法は、藻類が付着したタイルやブロックを水路に設置した以降は、これまで実施されている試験と同様の手順で実験を行えばよいが、以下のような問題がある。

- 1) 設置位置の選定はそれまでの調査実績から行われることになる。従って、当該年のその時点の問題位置と一致する保証がない。
- 2) 現地の岩盤や玉石面を近似させたタイル面やブロック面の設置が必要であるが、近似精度には限界があることが想定される。
- 3) 現地の試験資料を水路に設置するために運搬が必要であるが、運搬距離が長い場合には運搬から設置に至る間の付着藻類の状態維持が困難になる。仮に水路が移動可能なものとするとして、かなり大規模な移動施設となる。

以上の状況に鑑み、本調査では現地でもそのまま試験する方法について検討を行い、図-5に示す試験器の基本方針を考案した。図-5の試験器の趣旨は以下の通りである。

- 1) 岩盤や玉石面等に近接させる隔壁面を設け、面上の流速制御を行う。対象面と隔壁面の距離は、対象面の凹凸規模の影響が対象面に生じない程度を考えている。

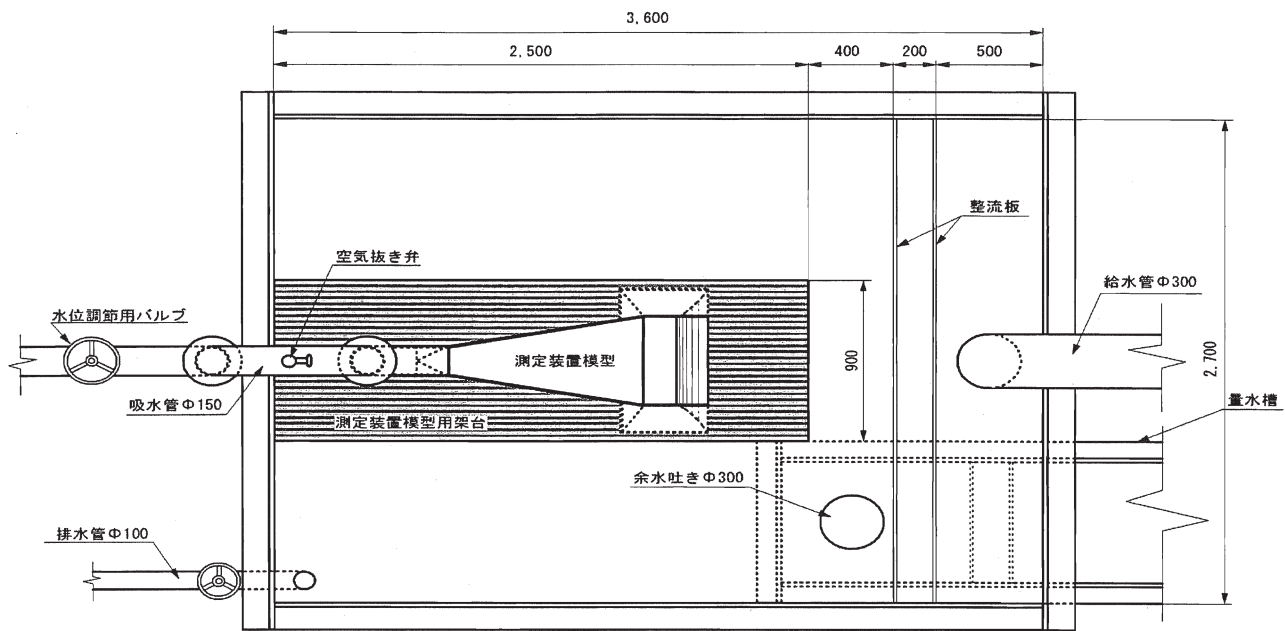


図-6 剥離試験器の実験装置概要 (平面)

- 2) 隔壁面の対象面への投影形状を円とする。これにより、外周壁の水密の不完全による影響を軽減することができる(長方形面では、流下方向途中からの漏水により流れが影響を受ける)。また、外縁から中心に向かって流速が変化するので、1 流量条件で広い範囲の流速場を得ることができる。
- 3) 流速場の形成はサンドポンプ等土砂を流すことが可能な給水装置を用いて行うものとし、剥離藻類や砂による目詰まりを起こさない程度の目の粗さをもった整流管を通じて隔壁中央から吸引する。配管には流量計及びγ-濃度計を設置し、水量及び土砂量を把握する。
- 4) 土砂は繰り返し利用することを考慮し、給水装置からの排出水を隔壁上流端に戻して用いる。このとき、隔壁上部に土砂等が溜まらないよう、隔壁上部を傾斜面とする。また、隔壁上流端は土砂の流出防止および河川流の影響防止の意味で透明の外縁板を用いて囲うものとする。
- 5) 装置は、三本足の支柱にて固定する(確実な固定のため補助装置が必要かもしれない)。試験では、対象となる藻類生育域に上記装置を設置し、まず水のみにて試験を行い、次に土砂を入れて行うことになるが、時間間隔を決めて、それぞれの条件下での藻類剥離状況を確認することとなる。剥離状況の確認は目視とスケッチでいい

ように思うが、対象面の観察が容易なよう、壁の透明部分や取り外し方法を検討する必要がある。

試験結果のとりまとめは、剥離区間と試験空間内の流速、土砂濃度及び時間の関係として与えられることになる。これと河道での水理解析により、当該藻類を剥離させるために必要な水量等が設定される。

3. 3 剥離装置修正案と水理機能調査

上記原案に対し具体的形状を設定して水理実験により、水理機能調査を実施した。実験装置の概要を図-6に示す。

実験を行った装置形状は原案に対し平面投影形状を台形に変更している。これにより、原案の趣旨を生かしつつ以下の事項について改善を図ることができている。

- 1) 給水装置をはじめとする施設規模の縮小を図り輸送及び設置が容易になる。
- 2) 原案では給水施設の配管が通水エリア内にあり、流れに影響していたのを避けることができる。また、土砂を含む流れを直接入口部に接続することができ、循環流の形成が容易になる。台形形状長辺の長さは0.45m、高さ(管長)0.8mで側面の傾斜角度は10.6度である。また、隔壁面は床上0.15mとしているが、底面の凹凸や付着藻類の生育の状況によっては更に大きくする必要があり。本システムにおいても給水装置は比較的規

模が大きいものとなり、トラックによる装置の輸送を想定している。

図-6の装置形状による通水の結果、短辺に向かって流れが加速していく流況が概ね得られていることが確認され、水理特性に関する必要なデータを収集した。収集したデータは水のみ及び土砂流下時の壁面のピエゾ水頭分布、土砂堆積が生じる限界の流量と土砂量の関係である。これらデータは、滑面固定床及び玉石上に装置を設置した場合の両者について収集しており、今後水理特性を分析する予定である。

なお、図-6に示す装置入口部形状に破線が示してあるが、これは当初入口形状であり、側部に段差があることから流れが剥離し、台形内の流れが中央部にかなり集中する結果となった。実線はこの流れを解消するため、台形管の側壁を上流側の給水部に延長させたものであり、データ収集は本形状にて実施している。

4. フラッシュ放流操作

4. 1 剥離藻類の再生期間

藻類の剥離に着目すると、フラッシュ放流は、付着藻類の増殖期が過ぎて極相状態が長期に亘るのを防止するため実施するものである。わが国の

貯水池の無効放流頻度は比較的多いが、無効放流は定期的に生じるわけではない。正常流量放流や利水放流のみが長期に亘り継続する場合もあり、こうした場合にフラッシュ放流が必要になる。

また、フラッシュ放流は、いたずらに実施すればよいものではなく、新鮮な付着藻類が十分に生長する前に次のフラッシュ放流により剥離するのも好ましくない状況となる。このため、フラッシュ放流は、藻類の生育に応じて適切な時期に実施する必要がある。

ここでは、以下のフラッシュ放流操作の検討に先立ち、藻類の剥離後の再生期間に関する既往の知見を整理する。なお、微細粒子のフラッシュ放流時期に設定方法については、現在のところ適当な知見がないのが現状である。今後、土砂堆積速度との関係で整理していく必要がある。

藻類の生育状況について、田中・渡辺(1990)は付着藻類群集の形成を観察し、藻類の付着様式を基物への密着型と滑走型、付着後の基物に対して垂直に立ち上がる垂直型と垂直伸長型及び、付着藻類群集の表面に沿って広がり先にできた群集をシート状に覆う被膜型とに分けた。その上で、付着藻類の群集の形成は密着型・滑走型・直立型の各付着藻類から成る平面的な構造から、鉛直伸

表-2 付着藻類の剥離と回復に関する試験一覧

測定者	河川名	季節	環境条件	周期	主な付着藻類(※優占種)
沖野ら '(2001)	千曲川 (長野県)	10~12月	—	20~30日	Naviculaceae [※] (フナガタケイソウ科)
		6~9月	—	12~40日	Naviculaceae [※] (フナガタケイソウ科) Cymbellaceae (ケチビルケイソウ科)
末木ら '(2001)	実験水路 (埼玉県)	照明 14h/day 水温 20℃	流速 8cm/s	21~22日	Navicula spp. [※] (フナガタケイソウ科)
			流速22cm/s	33日	Navicula spp. [※] (フナガタケイソウ科)
皆川ら '(2003)	実験河川 (岐阜県)	7~9月	流量一定 流速0.35m/s 水深0.11m	約20日	<13~15day> Scenedesmus spp. [※] (緑藻イカダモ) Planktosphaeria gelationisa (緑藻プランクトスフェリア属)
			出水あり(3度) 流速1.04~1.48m/s 水深0.5~0.67m	21~22日	<43~47day> Navicula viridula var.rostrata (フネケイソウ)
			出水時間0.5~2時間		Melosira varians (ナミツガタケイソウ) Homoeothrix janthina (ピロードランソウ) Nitzshia palea (ヨコレササノハケイソウ) Synedra sp. (マルクビハリケイソウ)

表-3 検討対象ダム

ダム	位置	集水面積 (Km ²)	ダム高 (m)	総貯水容量 (百万m ³)	回転率(5月~10月:20年)		
					平均	最大	最小
A	東北地方	210.1	94.5	50	7.9	10.8	5.7
B	中国地方	307.5	50	47.3	14.8	24.6	4.7
C	関東地方	621.3	76.5	20.3	23.5	37.8	9.0

長型付着藻類が進入した立体的な構造を持った群集となり、さらにその立体的な相流群集の上を被膜型の付着藻類が覆う群集もみられると述べている。また、その群集の遷移の仕方は、季節、流速及びその群集の優占種によって異なっており、遷移に係る時間は短いもので25日を要している。

付着藻類の増殖・衰退の時間変化は他にも報告されており、これらを表-2に示す。不定期な出水の影響を受けた千曲川の6~9月の調査結果を除き、河床に沈められた基物に付着した藻類はいずれも20日から30日の周期で増減するものとされている。

なお、土木研究所共生センターの実験河川での出水有りの条件では、測定開始後13~15日の調査で優占種となっていた *Scenedesmus* (緑藻イカダモ) が43~47日には衰退し、表に示した藻類がそれぞれ5~10%程度ずつ占有する競合状態がみられている。また、基物設置から60日以降の付着藻類全体の増殖・衰退のサイクルはそれ以前までのサイクルと異なる傾向を示すものとされ、極相形成後も周期的な変動が生じている。調査事例が十分でないので、今後さらに情報の蓄積を行っていかねばならないが、今回の事例からは、藻類の生育は剥離後20~30日程度において一旦極限的な状況となり、その間の付着藻類の生産性が高いようである。このことを考慮すると、凡そ1ヶ月程度以上がフラッシュ放流の必要なサイクルの目安となると思われる。

4.2 フラッシュ放流からみた自然流況

年間の日当たり流量を大きい順に並べ替え、 n 番目の流量を Q_n とする。ダムの建設により下流河川の流況は安定化する傾向にあり、ダムの流入量と放流量を比較すると Q_n は、ある $n=n_c$ を境に流入量と放流量の大小関係が逆転する。すなわち $n < n_c$ では流入量が放流量より大きく $n > n_c$ では放流量が流入量より大きくなる。

国土交通省の46ダムの管理年表データを用いて管理期間を平均した Q_1 、 Q_{30} 、 Q_{60} を整理した結

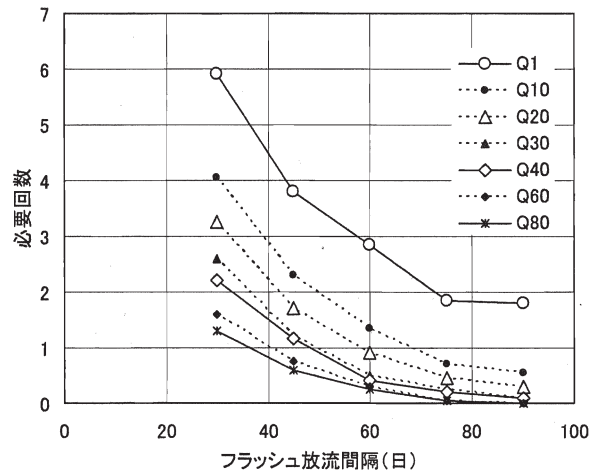


図-7 フラッシュ放流の必要回数(Aダム流入量)

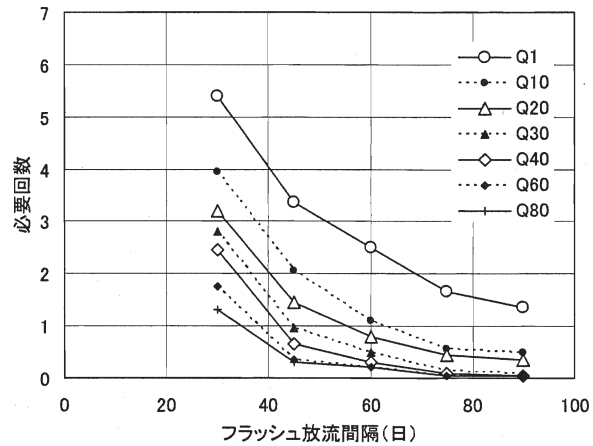


図-8 フラッシュ放流の必要回数(Bダム流入量)

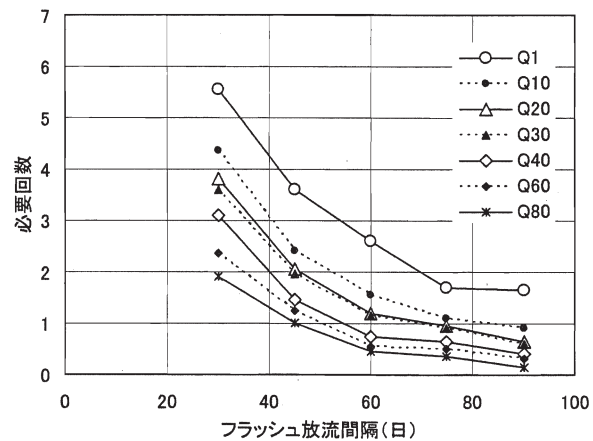


図-9 フラッシュ放流の必要回数(Cダム流入量)

果によれば、 Q_1 は全てのダムで流入量が放流量より大きいが、 Q_{30} では1/4程度のダムで、 Q_{60} では半数以上のダムで放流量が流入量と同程度以上となることが示されている⁸⁾。ダムにより異なるが、 n_c は平均的には60よりやや小さい値付近にあると推察される。

ダムの流入量はダム建設前の下流河川の流況を表すものである。従って、上記結果はフラッシュ放流の対象流量が流入量に関する Q_{60} より大きい流量範囲にあることを示唆している。

ここで、ダムの日平均流入量データを用いて、フラッシュ放流の観点から更に検討を加えてみる。対象ダムは比較的長期の流量データが得られている表-3に示す3ダムである。

図-7~9はフラッシュ放流の対象流量を Q_n 、必要周期(つまり Q_n 以下の流量の継続期間)を T とした場合に必要になるフラッシュ放流の回数を示したものである。 n については1、10、20、30、60、80と、 T については30、45、60、75、90日と変化させており、必要になるであろう時期として5月1日~10月31日を設定し20年の平均値を示した。

流量が常に Q_n より小さい場合、 $T=30、45、60、75、90$ 日での必要フラッシュ放流回数はそれぞれ6、4、3、2、2回であり、 Q_1 での値はこれより若干小さい値となっている。当然のことながら n が大きくなるに従って必要回数も減少するが、例えば先に見た Q_{30} 、 Q_{60} では $T=30$ 日でそれぞれ2.5~3.5、1.5~2.5程度、60日では0.5~1.2、0.2~0.5程度の値となっている。つまり、ダム建設前の状況においてもフラッシュ放流が必要な状態というのは存在している訳であり、渇水年においては、必要回数は更に大きくなる。放流操作の検討ではこのことを認識しておく必要がある。

4.3 ダム放流量における必要回数

図-10~12は、ダム放流量について図-7~9と同様の関係を求め、流入量との差を求めたものである。ただし、 Q_n は流入量でのそれを用いており、放流量の必要回数が多い場合を正としている。

必要回数の差はA、B、Cの順に小さくCでは放流量の必要回数が小さくなる場合もみられている。表-3には5月~10月までの貯水池回転率(=当該期間中の全流入量/当該期間の平均

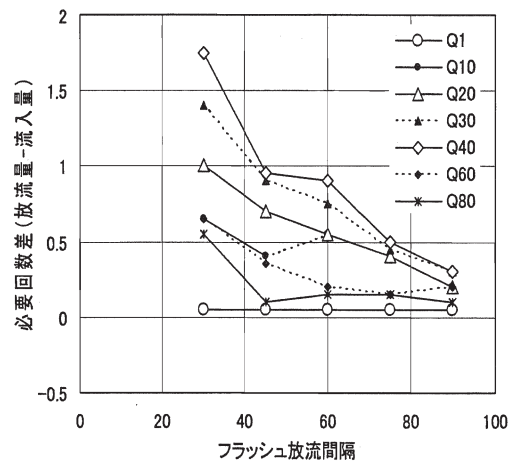


図-10 フラッシュ放流回数の放流量と流入量の差 (Aダム)

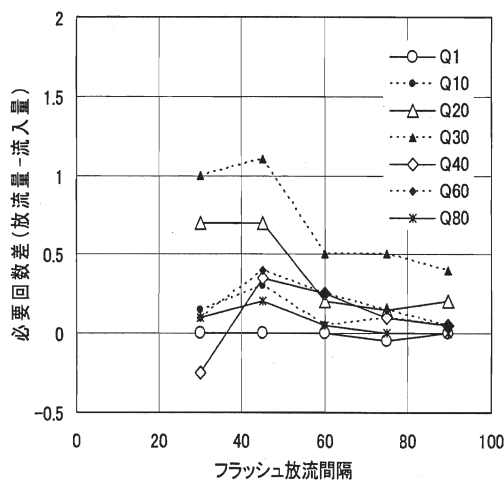


図-11 フラッシュ放流回数の放流量と流入量の差 (Bダム)

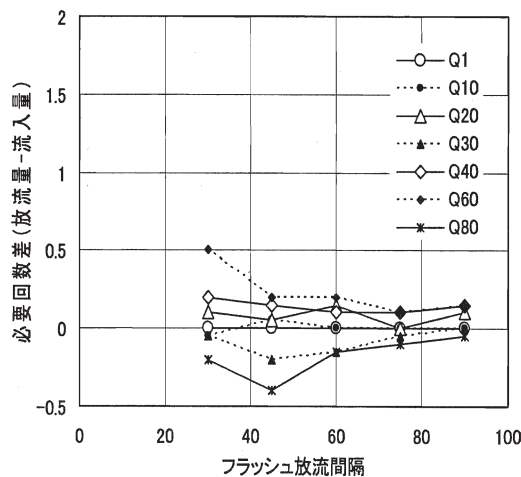


図-12 フラッシュ放流回数の放流量と流入量の差 (Cダム)

貯水容量)を併せて示しているが、回転率はA、B、Cの順に大きくなっており回転率が大きいダムでは必要回数が小さくなることが確認される。Cダムの平均回転率は23.5回と大きく、20を超えるようなダムでは、フラッシュ放流の必要性は小さいものと思われる。

A及びBダムについて流量規模別に差をみると、 Q_1 ではほとんど差がみられない。これは流入量における必要回数が大きいことによる。回数の差が大きいのは $Q_{20} \sim Q_{40}$ においてであり、 T が大きいほど差が小さくなる。

差は全体に1より小さく、仮にダム建設前の状況を基本にすると、建設前の状況を維持するために必要なフラッシュ放流回数は平均的には年1回以下ということになる。実際、年毎に差をみても最大で2回である。

4. 4 フラッシュ放流操作の必要性と容量確保

以上の検討結果をもとに、フラッシュ放流操作の必要性と放流のために必要な容量確保方法について考察する。

今、微細粒子調査や藻類剥離試験により求められた必要放流量を Q_F 、継続時間を t_F とし、必要周期を T_F とする。 T_F は先に示したように、例えば30日程度といった値となる。また、これまでの藻類剥離の実験や試験結果を参考にすると、 t_F は数時間程度であり、1日を越えることはないと推察される。

ここで、 Q_n について、4. 2、4. 3の検討では日平均流量を用いたが、以下では t_F 時間の平均流量の日最大値を Q_n として用いるものとする。

先にもみたように、ダム建設前の河川においてもフラッシュ放流が必要な状態が存在する可能性がある。従って、フラッシュ放流操作の必要性は、 Q_F に相当する n により位置づけがかなり異なることになる。これに応じて操作のための容量確保方法も異なってくるものと考えられ整理すると以下の通りである。

1) $Q_F \geq Q_{1 \sim 5}$ 程度

ダム建設前においてもフラッシュ放流の必要性が高い状態、すなわち、微細土砂の堆積や藻類の不活性化が生じていたと考えられ、ダム建設による影響軽減という意味でのフラッシュ放流の必要性はほとんどないものとする。

仮にフラッシュ放流を行うものとする、ダム建設前の環境保全ではなく新たな環境創出を行う

ことが目的となる。そのための必要容量は維持流量確保のための用量とは異なり、環境創出のための容量として新たに確保されるのが妥当であろう。

2) Q_{10} 程度 $\geq Q_F \geq Q_{nc} = Q_{10 \sim 60}$ 程度 (n_c : ダム放流量が流入量より大きくなる n_c)

ダム建設による影響軽減という意味でのフラッシュ放流が必要になる可能性がある。維持流量の補給と同様にフラッシュ放流を位置づけるのが望ましいが、ダム建設前の流況でもフラッシュ放流が必要になる状況も生じると推定されるのでその取り扱いが問題となる。具体的にはダム建設前流況として Q_F が発生しないのであれば必要周期を過ぎてもフラッシュ放流を実施しないという制約を加えるか否かという問題である。

先の $Q_F \geq Q_{1 \sim 5}$ 程度の場合との整合性を考えるとダム建設前流況で発生していなければ放流の必要は無いと考えるのが妥当であろう。一方、維持流量的な考え方をすると、10年1位の渇水年においても建設前流量以上の流量を確保しており、フラッシュ放流を実施するのが妥当ということになる。

これは難しい問題であるが、両者を調整する方法として、ある確保すべき最低の水準、具体的には最大の T_F を設定し、これを超える場合にはフラッシュ放流を必ず実施するというもの考えることができる。この場合、確保すべき水準が問題となるが、微細粒子の堆砂や付着藻類の劣化が何らかの被害を及ぼす最大の T_F が設定できるのであれば、この値を用いればよい。一方、こうした設定は現状では困難なケースが多いと考えられ、その場合にはダム建設前における年最大継続期間の平均値などの統計値を用いる方法が考えられる。

容量確保であるが、新設ダムであれば維持流量的な位置付けを行い計画に盛り込むのが望ましい。既設ダムでは、弾力的運用が可能であれば、こうして確保される容量を用いることが考えられる。一方、維持流量を変動させるという考えに立てば、維持流量補給のための容量を用い、これを変動させて補給させることが考えられる。先に述べたようにフラッシュ放流の継続時間 t_F は比較的短いと考えられるので、維持流量を多少減少させてもその期間は短く、十分対応が可能と考えている。今回は具体的な検討を実施していないが、例えば Q_{30} 、 Q_{60} と低水流量の比は10を超えないと思わ

れるので、仮に維持流量を 20%程度低減させるとして、その継続時間は $50 t_F$ 程度以下となる。 t_F が数時間程度であれば、1 週間程度以下の流量低減によりフラッシュ放流が可能となる。こうした方法の適用可能性については、ダム毎にかなり異なると考えられるので、今後具体的に検討していく必要がある。

$$3) Q_{nc} = Q_{10\sim60} \text{程度} \geq Q_F$$

フラッシュ放流操作の必要は生じない。

5. まとめ

以上の結果をまとめると以下の通りである。

まず、微細粒子の再浮上、侵食条件について、以下の結果を得た。

- 1) 微細粒子の再浮上は及び侵食は、局所的かつ偶発的に生じる。
- 2) 移動限界を表す u_{*c} は R_{wc} が大きいほど小さくなり、今回の実験では u_{*c} は $10^{-2}(\text{m/s})$ のオーダーにある。これは粘着性考慮しない場合の限界掃流力よりかなり大きな値でありフラッシュ放流の流量設定で考慮する必要がある。
- 3) 侵食速度は実験ごとのばらつきがかなり大きく、同様の u_{*c} 、 R_{wc} でも 10 倍以上の差が生じた。この原因として、1) の局所的かつ偶発的発生状況が考えられるが、侵食速度は比較的大きい。また、藻類の剥離と再生について、以下の成果を得た。
- 4) 現地の藻類の剥離条件を把握するには、現地試験が必要と考えられ、そのための装置の基本的な考え方を図-5 に示すとともに、改良した具体的形状案を図-6 に示した。図-6 の形状により所定の流況を概ね得ており、水理データを収集した。
- 5) 剥離後の出水の擾乱を受けない藻類は 20~30 日で衰退を始めるようであり、1 ヶ月程度以上が生産性を維持するために必要なフラッシュ放流周期の目安となる。

以上を踏まえて、フラッシュ放流の必要性と容量確保方法に考察を加え、次の結論を得た。

- 6) ダム建設前後の流況比較によれば、フラッシュ放流操作が必要となるのは、必要流量 Q_F が Q_{60} 程度以上の流量規模の場合である。
- 7) 回転率が大きくなるに従って、フラッシュ放流操作の必要頻度は小さくなる。
- 8) フラッシュ放流操作の必要性は Q_F と年間流量順位 n の関係で整理することができ、ダム建設の影響軽減という趣旨のフラッシュ放流操作は、 Q_F が $Q_{10\sim60}$ 程度に相当する場合に必要なになる。
- 9) フラッシュ放流操作に必要な容量の確保として、貯水池計画による方法、弾力的運用による方法のほか維持流量変動による方法が考えられる。

参考文献

- 1) 関根正人、西森研一郎、藤尾健太、片桐康博：粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察、水工学論文集、No.47、2003
- 2) 箱石憲昭、塚原千明：水流による藻類の剥離に関する実験的研究、ダム技術、No.173、pp.32~41、2001
- 3) 山本亮介、松梨史郎、下垣久：移動粒子を伴う流れの付着藻類剥離効果、水工学論文集、No.47、pp.1069~1074、2003
- 4) 田中志保子、渡辺仁治：日本の清浄河川における代表的付着藻類群集 *Homoeothrix janthina* - *Achnanthes japonica* 群集の形成過程、藻類 Jpn.J.Phycol.38、pp.167-177、1990
- 5) 沖野外輝夫、辻本傑、大久保宣子、宮下達郎、池田淑子：付着藻類の組成と生物量の変動、千曲川の総合研究、pp. 263-275、2001
- 6) 末木幸子、浅枝隆、藤野毅：底付近の境界層が付着藻類の生長に及ぼす影響についての実験的研究、水環境学会誌、Vol.24-6、pp. 376-381、2001
- 7) 皆川朋子、福嶋悟、茅場祐一、小澤卓思：出水が河床石面付着物に及ぼす影響に関する実験的検討、河川技術論文集、Vol.9、pp. 475-480、2003
- 8) 柏井条介：貯水池機能の保全-堆砂対策-、ダム技術 No.215、pp.12~24、2004