

ダムの設置に伴う濁水による環境影響の軽減システムに関する基礎的研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 1

担当チーム：水理チーム

研究担当者：石神孝之、宮川仁、中西哲、
本山健士

【要旨】

本研究は、ダムの設置に伴って発生する貯水池からの濁水の放流の長期化による環境への影響を軽減する技術の構築に向けて、ダム貯水池等における天然凝集材の活用手法、ダム下流河川における濁水動態と物理環境要因の解明を行った。

天然凝集材の活用手法については濁水の放流が長期化した場合における小さな濁度での濁水に対しては濁水処理の効果は確認できたものの、凝集材の凝集効率が悪く高コストとなり現場適用には困難であることを確認した。ダム下流河川における濁水動態と物理環境要因の解明では、濁水の放流が長期化し、土砂供給を行っているダム下流河川での濁度等を調査し、砂州・砂礫堆が水質改善等の寄与に期待されることを確認した。さらに、濁水動態と物理環境との関係について水理模型実験により河床材料が濁質を捕捉するろ過材となって濁度が低減する効果を定量的に確認できた。

キーワード：濁水長期化、環境影響、対策技術、濁度低減効果

1. はじめに

ダムが設置されると、出水に伴う上流域からの洪水の流入等により、図-1のように貯水池が懸濁化し、長期的にダム下流への濁水放流が生じるため、水道取水障害、景観や生物への生息・生育環境等に対して影響を与えている。

このような影響に対して、河川管理者等は濁水対策として、濁度およびその継続時間を対処療法的に選択取水設備等により制御している。

しかしながら、これらの取組では抜本的対策とはなっておらず、社会問題化しており、環境影響のさらなる軽減のための新たな手法を検討する必要性が生じている。

そこで、本研究では、ダム設置に伴う濁水による環境影響のさらなる軽減に資するシステムの構築に向け、個別要素技術に関する基礎的な検討を行って、システム化に向けた可能性を検討することを目的とする。

具体的には以下の研究を行った。

- ① ダム貯水池等での天然凝集材の活用手法の検討
- ② ダム下流河川における濁水動態と物理環境要因の解明
- ③ 地形条件等を考慮した濁水低減予測モデルの開発

2. ダム貯水池等での天然凝集材の活用手法の検討

2. 1 概要

水理チームでは、平成 27 年度までの研究において、貯水池の濁水問題に対する対策手法として、凝集処理に着目し、濁質の沈降を促進し環境にも配慮でき 10m を超える水深でも効果を確認した図-2 に示す天然凝集材アロフェンを用いた濁水処理手法を提案した。また、ゼータ電位値が凝集材の凝集性能を定量評価する上で有用な指標となることを示した。そして、今後の課題として現場への適用方法や範囲の検討等を挙げた。

そこで、本研究ではダム貯水池で生じる濁水長期化現象を対象として、ダム下流河川への環境影響を軽減することを目的に現場適用を想定した天然凝集材の投入方法等について実験を通じて検討を行った。

2. 2 実験方法

図-3 に実際のダムにおける濁水長期化現象の例を示す。このダムにおいては、濁水対策マニュアル(案)が策定され、洪水時に先行して高濁度の濁水を放流する運用を行い濁水放流の長期化日数の低減を図る対策がとられているものの、濁水長期化の問題の課題は残されている²⁾。図-3 を見ると洪水後の経過日数が 5 日程度となると濁度が概ね 100NTU 以下となっていることがわかるが、その後、下流への放流基準としている 10NTU となるまでに、15 日～60 日を要しており、放流水の濁度が長期化していることがわかる。



図-1 貯水池の濁水長期化の状況



図-2 天然凝集材
アロフェン

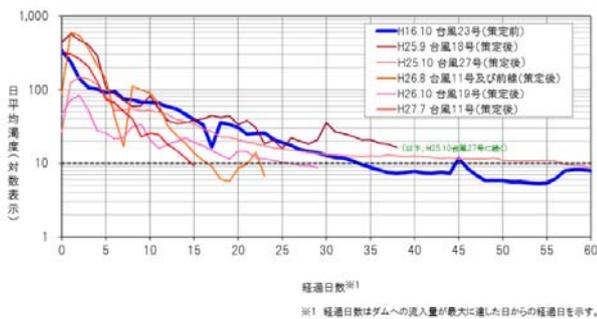


図-3 貯水池からの放流水濁度の例 (2), 3)



図-4 ダム貯水池底泥



図-5 アロフェン懸濁液



図-6 ダム貯水池底泥模擬濁水の作製

そこで、本研究では、100NTU の濁水を対象にアロフェンを用いた濁水処理手法の現場適用の可能性について検討を行った。なお、検討にあたっては、大量の濁水を現場では対象とすること、凝集材の調達にコストがかかるため、できるだけ少量の凝集材での効果発現に留意することを前提に検討を行った。

実験は、土木研究所水理実験施設において実施し、過年度の研究成果の知見を基に、ダム底泥濁水とアロフェンの混合水を分散処理し濁水処理効果を濁度・SS濃度の経時変化を基に調査を行った。分散機は、既往の研究において現場適用の可能性が高いと考えられたキャビテーションミキサを用いた。なお、実験で使った濁質は例示したダムとは異なるダム貯水池の底泥を用いたが濁水長期化問題が生じているダムの濁質を用いて検討を行った。加えて、ダム底泥の濁質およびアロフェンのゼータ電位を調査し、凝集性能も定量的に確認した。

実験の準備と手順の内容を以下に示す。

- ① ダム底泥濁水の作製：所定量の実際のダム貯水池から採取したダム底泥 (図-4) と RO 水 (フィルターで不純物などを極限までろ過した水) を希釈水とし混合攪拌して概ね 100NTU となるように模擬濁水を作製する。作製にあたっては、あらかじめ 210 μ m メッシュフルイおよび沈降により大きな粒子は除去した。
- ② アロフェン懸濁水の作製：沈降実験時の濁水量に対し表-1 に示す実験条件に適合するアロフェン量 (混合濁水量に対し所定のアロフェン濃度となる量) と RO 水を混合攪拌して作製する。(図-5)
- ③ 混合濁水の作製および分散：①と②を混ぜて混合濁水を作製 (図-6) し、図-7 に示すキャビテーションミキサを含む装置に通水してアロフェン粒子を分散させる。この際、キャビテーションミキサ内の圧力は過年度の実験において分散効果が確認できている約 0.3MPa とした。
- ④ 凝集沈降実験：径 39cm、高さ 2.2m の沈降筒を 3 個用意し、③の混合濁水 (濁水量 250L) を投入し凝集沈降実験を実施する。また、比較のため、径 20cm、高さ 2.2m の沈降筒を 2 個用意し、①のみの沈降実験、③の分散していない混合濁水の沈降実験 (濁水量 63L) を実施する。濁質分析方法としては、72 時間経過後までの間で沈降筒から 3 測点 (沈降筒底面から 0.5m、1.0m、1.5m) で採水し採水測定時間は静置後、15 分、1,3,6,24,48,72 時間後を原則に濁度、SS 濃度を測定した。SS 濃度分析は GFB ろ紙の吸引ろ過方法によった。
- ⑤ ゼータ電位分析：ダム底泥模擬濁水とアロフェン懸濁水について図-8 のゼータ電位計 (Delsa Tm Nano Submicron Particle Size and

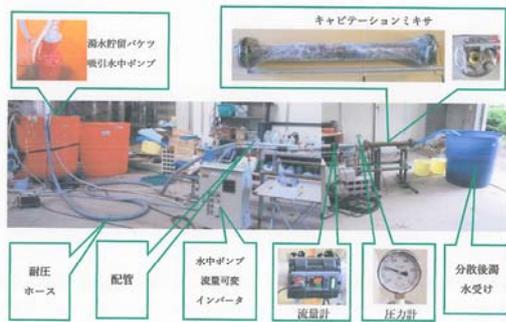


図-7 分散装置の全体像



図-8 ゼータ電位計

表-1 沈降実験条件

	ダム底泥懸濁水濁度	アロフェン懸濁水濁度	分散有無	分析項目
Case1	100NTU	50mg/L	有	pH・EC・水温・濁度・SS
Case2	100NTU	100mg/L	有	pH・EC・水温・濁度・SS
Case3	100NTU	150mg/L	有	pH・EC・水温・濁度・SS
Case4	100NTU	150mg/L	無	pH・EC・水温・濁度
Case5	100NTU	-	-	pH・EC・水温・濁度

Zeta Potential Analyzer PNA54412AA (バックマン・コールター株式会社製) を用いてゼータ電位値を測定する。凝集性能を確認するため、アロフェン、ダム貯水池の濁質それぞれについて、キャビテーションミキサによる分散前後で図-8のゼータ電位計でゼータ電位を測定した。

2. 3 実験条件

実験は、表-1 に示す条件で実施した。具体的には、アロフェン投入量を変化させたキャビテーションミキサにより分散させた3ケース (Case1~Case3) と、分散させないアロフェンとダム底泥模擬濁水の混合濁水 (Case4) とダム底泥懸濁水のみ (Case5) の沈降実験を行った。

2. 4 実験結果および考察

(1) 沈降実験結果 (濁度、SS 濃度の測定分析)

図-9、図-10 に沈降実験の様子を示す。左から Case1、Case2、Case3、Case4、Case5 の沈降筒となっているが、72 時間後の Case3 の水が澄んでいることが分かる。図-11 に Case1~3 の SS 濃度と静置時間の関係を示す。100NTU の濁度に対しては Case3 (アロフェン濃度 150mg/L) とすれば時間の経過とともに SS 濃度が低下し、凝集効果が表れていることがわかり、72 時間後には 15NTU 程度 (13.3mg/L) となって、現場においてダム下流へほぼ放流可能な濁度となったことが確認できた。また、図-12 に Case3~Case5 の濁度の経時変化を

示す。Case3 が時間の経過とともに大きく濁度低下しており、アロフェンの分散による濁質処理効果が表れている一方、凝集材を投入しない場合や分散処理しない場合は濁度低下が生じていないことが確認できた。なお、実験時水の pH は 5.8~6 程度、EC は 0.8~1 (mS/m) 程度、水温は 20℃ 程度の条件であった。

(2) ゼータ電位測定結果

ダム底泥濁水とアロフェン懸濁水について、分散前後のゼータ電位を測定した。測定結果は表-2 に示す。ダム底泥濁水は負の電位を有しているが、分散の前後に大きな変化は見られない。一方、アロフェン懸濁水は、正の電位を有しており、1 検体を除いて電位が上昇していることが分かり、分散処理によってアロフェンのゼータ電位が上昇し凝集性能が高まったことが確認された。

2. 5 現場適用に向けた検討

以上の実験結果から、濁水長期化が問題となると考えられた 100NTU の濁度の濁水に対して、最低限 150mg/L のアロフェンを投入し、72 時間静置できる場を設ければ現場適用できる可能性が確認できた。そこで、この実験結果を基にして、実際のダム貯水池等へ投入方法について検討した。

本研究では、ダム下流へ放流する前に 72 時間濁水を静置できる限られた場として図-13 に示すように減勢工を沈殿池として活用する方法についてコスト面も含めて検討した。

現実的な減勢工規模のモデルとして幅 30m、副ダム高さ 10m を沈殿池として活用する概略の検討を行った。

発電ガイドラインによると河川維持流量は、河川維持流量として集水面積 100km² 当たり概ね 0.1~0.3m³/s 程度とすることになっている。ここでは 0.1m³/s を放流することを考えた。0.1m³/s の放流量を減勢工に放流し、副ダムから越流させてダム下流に放流すると仮定する。縦断方向に単純に 72 時間濁水を減勢工内に滞留させると仮定すると、減勢工の長さは 86.4m 程度必要となる。また、凝集材の単価が 300 円/g で、150mg/L の濃度でアロフェンを投入し続けると約 40 万円/日のコストがかかる。1 か月継続となると約 1200 万円のコストがかかることとなった。この結果は、現実的な濁水対策技術として適さないと考えられた。なお、ダム貯水池への直接投入も考えられたが、貯水量や面積が大きく、アロフェンによる凝集の効率がさらに悪くなることが考えられた。



図-9 沈降実験の様子（実験開始時）



図-10 沈降実験の様子（実験開始 72 時間後）

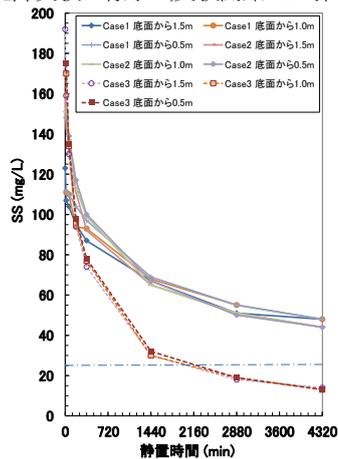


図-11 凝集材投入量の違いによる凝集実験における SS 濃度と経過時間の関係

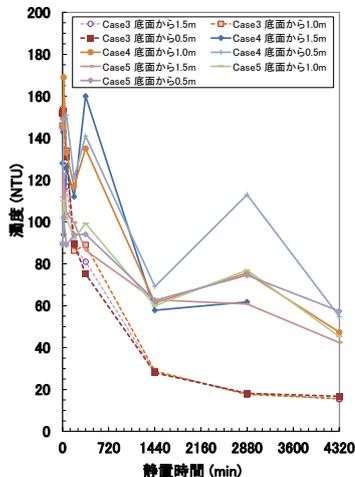


図-12 分散の有無、自然沈降における濁度と静置時間との関係

表-2 底泥とアロフェンのゼータ電位測定結果

ダム湖底泥模擬濁水 希釈水RO水			アロフェン懸濁水 希釈水RO水		
濁度 (NTU)	ゼータ電位 (mv)		濃度 (mg/ℓ)	ゼータ電位 (mv)	
	分散なし	分散あり		分散なし	分散あり
100	-29.29	-27.81	100	8.42	9.6
	-29.18	-25.91		5.44	1.06
	-32.93	-29.38		0.69	3.94
	-27.94	-29.14			
平均値	-29.835	-27.09	平均値	4.85	4.87

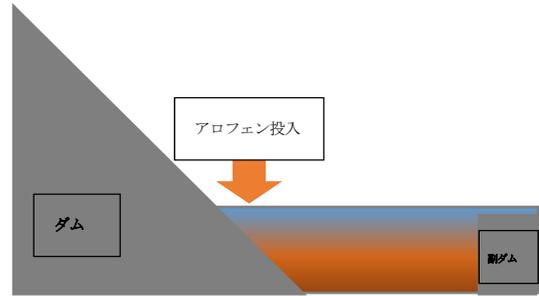


図-13 減勢工を沈殿池とするイメージ縦断面図

以上から、天然凝集材については、長期化濁水対策の技術としては適さない技術となると考えられた。

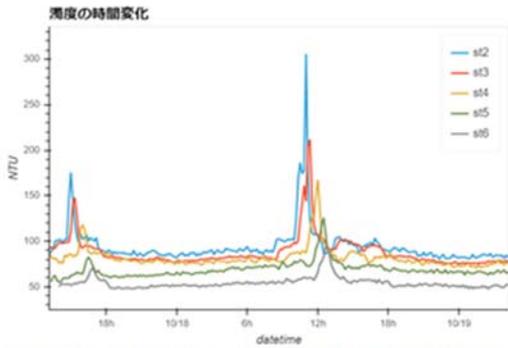
3. ダム下流河川における濁水動態と物理環境要因の解明

ダム下流河川の濁水動態は河床材料や河床地形等と関連があると考えられる。そこで、実際に濁水長期化が問題となっているダム下流河川で濁度及び地形等の詳細な調査し、それらの関連性を解明する。また、水理模型実験により、河床材料による濁度低減効果を定量的に把握する。

3. 1 濁水長期化が問題となっているダム下流河川での濁度及び地形等の調査と関連性の解明

実際に濁水長期化が問題となっているダム下流河川で濁度及び地形等の詳細な調査し、それらの関連性を解明する。

天竜川水系小渋川にある小渋ダムの下流河川では、ダム貯水池にて捕捉されていた砂礫が土砂バイパスから供給されることにより、土砂の堆積（砂州、砂礫堆）が見られるようになった。この河道に沿って、濁水を含む水質について連続観測を行った（図-14）。その結果、下流の観測地点になるほど濁度が低下するなど、水質改善の効果が見られ、河川水が砂礫堆を伏流することによって流水中の懸濁物が捕捉されたものと考えられる。土砂供給による砂州・砂礫堆の形成は、濁水などの水質改善等に寄与することが期待される。



濁水連続観測結果。観測地点はSt2が最上流でSt6が最下流。

図-14 小渋ダム下流河川濁度経時変化

3. 2 濁度低減効果の定量的な把握方法の検討

ここでは、3.1で確認された土砂による濁水の水質改善等の寄与現象について、水理模型実験により、定量的に把握することについて検討する。2の検討と比較できるように概ね100NTUでの濁水を使用して実験を行った。

3. 2. 1 実験方法

実験にあたっては、図-15に示す実験水路と実際のダム下流で採水した水およびダムの堆砂を準備した。具体的には次のとおりである。

・実験水路

実験は水理実験施設内の図-15に示す実験水路で行った。水路勾配は、ダム下流河川と概ね同等の勾配

とすることを想定して1/50で傾斜を設けた。

・使用した水および土砂

実験で使用した水は、実際のダム下流の水を採取して使用した。土砂は図-16に示す粒度分布計SALAD3100(計測範囲0.05~3000 μ m)と図-17に示す粒度分布計カムサイザー(計測範囲20 μ m~30mm)により計測し、これらを合成した図-18に示す粒度分布のダム貯水池内の堆砂を用いた。

実験の準備として、堆砂を水へ投入し、混合した後、上部の濁水(濁質分(概ね粒径0.2mm未満))を採水し、沈降した残砂(砂分(概ね粒径0.2mm以上))は十分に水で洗浄して分離した。

濁水は、水でさらに希釈させて実験で使用する濁水(濁度100NTU程度)を作製した。また、濁水の濁度とSS濃度の相関を確認した。(図-19)

一方、砂分は、実験水路の計測区間に高さ50mm、幅250mm、長さ200mmに水締めを行いながらろ過材として設置した。

・実験手順

実験では水路の上流の水位を監視しながら濁水を、ろ過材が移動せずに濁水がろ過材に浸透するように、できるだけ一定量で水路の上流から供給し、下流端でろ過材を通過した濁水を捕捉することとした。実験開始後に下流端で捕捉される濁水の流出量が概ね一定となる

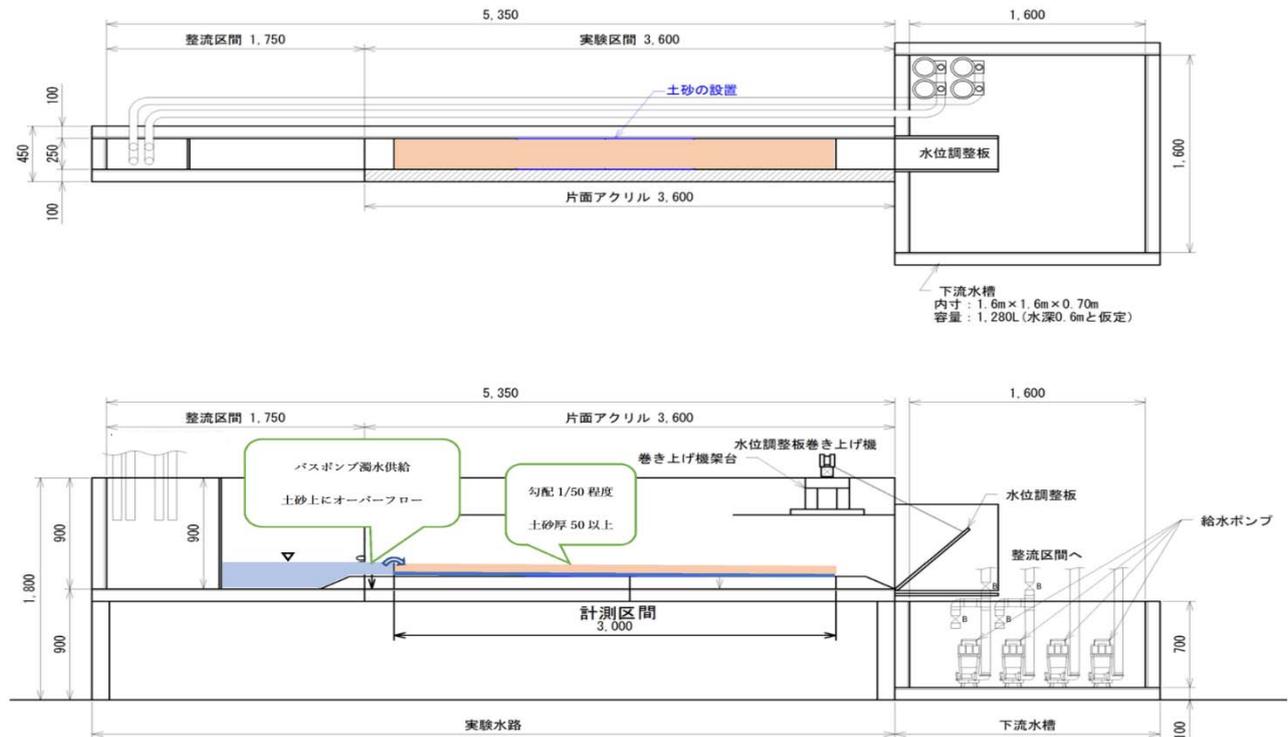


図-15 実験水路図



図-16 粒度分布計(SALAD3100)



図-17 粒度分布計(カムサイザー)

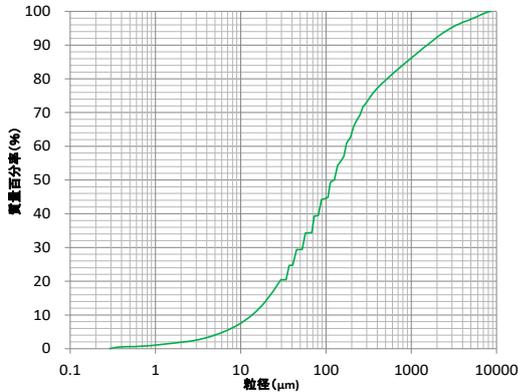


図-18 堆砂のカムサイザー、SALD3100の合成粒度分布

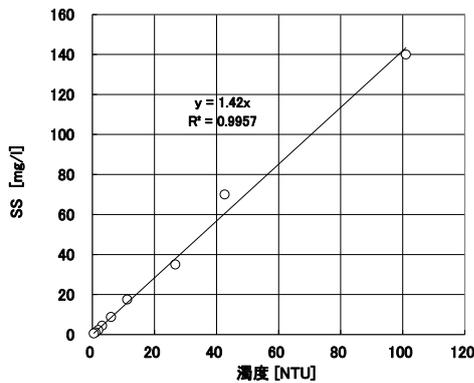


図-19 濁水における濁度とSS濃度の相関

ことを確認し、流入量と流出量が一定となる条件を維持して実験を行った。実験は、土砂のろ過機能が低下するまで行った。

実験では上流側の貯水位を計測するとともに上下流で濁度・水温・EC（電気伝導度）・pHを水質計により計測した。また、ろ過材における濁質の捕捉状態を観察した。SS濃度を計測区間の下流で採水し計測した。

実験時の流入SS濃度と流出SS濃度からろ過材で

捕捉した濁質量を推定した。

3. 2. 2 実験結果

実験時の様子を図-20、図-21、図-22に示す。図-20に示す水路左側（上流側）から濁水を一定量で流れるように流下させた。そして、図-21、図-22からわかるように2mのろ過材に概ね濁水を浸透させて下流に流出させた。

実験中の流量、濁度、SS濃度の経時変化を図-23に示す。なお、流入水のSS濃度は図-19から求めた。

流量は、平均140ml/minと概ね一定で、流入させた濁水の濁度は、概ね80NTU（SSは概ね100mg/L）となった。流出した濁水のSS濃度は、実験途中ではSS濃度が25mg/L程度となっているが、実験終了時の960分には40mg/L程度と増加した。これはろ過材のろ過機能が低下したため、この時間で実験を終了した。図-23から1470分までは流出濁水のSS濃度が低下し、その後、高くなった。なお、実験中の流入水の水温は平均13℃、pHは平均7.1、ECは平均5.9(mS/m)であった。

また、図-24に実験前のろ過材の様子、図-25に実験後のろ過材の様子、図-26に実験後のろ過材の表面剥ぎ取り後の様子を示す。比較すると実験後のろ過材の表面（図-25）に細粒分が捕捉されていることが確認できた。



図-20 実験時の状況（全景）

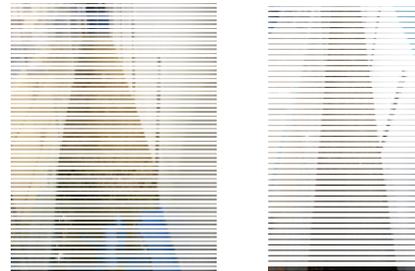


図-21 実験時の状況（下流から望む）



図-22 実験時の状況（上流から50cm～1m区間）

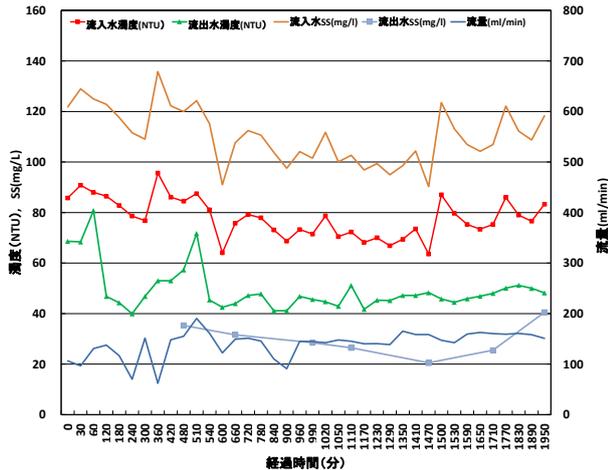


図-23 流量、濁度 SS の経時変化

以上から、長さ 2m のろ過材のろ過機能が約 1500 分でなくなると判断された。また、流出濁度と SS 濃度の関係を見ると、流入時の関係と流出時の関係が異なっていることがわかる。このことから浸透等の影響により大きい粒径の濁質はろ過材に捕捉され、濁度と SS 濃度の関係は流入時のものとは異なる質で濁水が流出したものと考えられた。

また、流出 SS 濃度を概ね 25mg/L とし、流入 SS 濃度の差から捕捉量を推定すると本実験では実験終了時までには 20g の濁質が捕捉されたと推定できた。

以上により本実験において作製した河床材料における濁度低減効果を定量的に確認することができた。

3. 2. 3 現場適用に向けた検討

以上の結果を基に、実験で使用したろ過材が河床材料となった現場を想定し濁水長期化対策としての適用について検討した。実験における浸透流として濁度低減効果がある流量として幅 250mm あたり平均 140ml/min が確認できた。そこで、2. の検討と同様に 0.1m³/s がダムから放流された場合、本実験で用いた河床材料で浸透流により濁水処理をしようとする 2m の長さの濁質捕捉効果を 1500 分とすれば、30 日間濁水が長期化すると仮定すると約 60m の区間があれば対策できることとなる。

本実験で使用したろ過材による濁度低減効果は定量的に確認できたものの、粒径が細かく浸透しづらい土砂であったため濁度の低減効率が低かったと考えられる。

以上から 3.1 で述べたように土砂供給による砂州・砂礫堆の形成は、濁水などの水質改善等に寄与することが期待されることが定量的にも確認された。

しかしながら、本技術のみを提供した場合、川幅が



図-24 実験開始前の水締め後の様子 (下流端)



図-25 実験後のろ過材の様子 (下流端)



図-26 実験後のろ過材の表面採取後の様子 (下流端)

大きくなることや瀬切れ河川となってしまうことがあげられ、本技術のみでの対策は実際困難と考えられる。今後、浸透量が大きいと考えられる粗い粒径の濁質捕捉効果を確認していくとともに、ダム下流における濁水の流下過程に関する知見⁴⁾も組み合わせダム下流における濁水に伴う環境影響の低減に関する検討を引き続き行っていくことも重要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、ダム設置に伴う濁水による環境影響のさらなる軽減に資するシステムの構築に向け、個別要

素技術に関する基礎的な検討を行い、その可能性を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- 1)天然凝集材の活用手法については濁水の放流が長期化した場合における小さな濁度での濁水に対しては濁水処理の効果は確認できたものの、凝集材の凝集効率が悪く高コストとなり現場適用には困難であることを確認した。
- 2)濁水長期化し、土砂供給を行っているダム下流河川で濁度等を調査し、砂州・砂礫堆による水質改善等の寄与に期待されることを確認した。また水理模型実験により濁度低減効果を定量的に確認した。

参考文献

- 1) 土木研究所:貯水池に流入する濁質の動態と処理に関する研究、平成 27 年度基盤研究成果報告書、2016
- 2)第 14 回近畿地方ダム等管理フォローアップ委員会資料
<https://www.kkr.mlit.go.jp/river/followup/jouhou/siryo/14.html>
(2020.5 閲覧)
- 3)川上貴宏:日吉ダムにおける冷濁水放流問題の対策と成果、平成 25 年度近畿地方整備局研究発表会 論文集、
<https://k0gww156.kkr.mlit.go.jp/plan/happyou/theses/2013/pdf06/04.pdf> (2020.5 閲覧)
- 4) 土木研究所:ダム下流における濁水の流下過程とその影響に関する基礎的研究、平成 28 年度基盤研究成果報告書、2017

Basic study on the mitigation system for the long-term thin turbid water impact due to installed a dam in the river

Research Period : FY2017-2019

Research Team : Hydraulic Engineering Research
Group
(River and Dam Hydraulic
Engineering)

Author : ISHIGAMI Takayuki

MIYAKAWA Masashi

NAKANISHI Satoru

MOTOYAMA Kenshi

Abstract : To structure a system that contributes to mitigate the turbid water impact due to installed dam, we researched three approach study :

- (1) Study on utilization method of natural coagulant in dam,
 - (2) Study on analyzing turbid water dynamics and physical environmental factors in dam downstream rivers,
- As a result by the study, it was confirmed that

(1) was poor coagulant effect at turbidity at the long-term thin turbid water by a dam,
(2) was confirmed that it is expected to contribute to water quality improvement etc. by sandbars and gravel deposits through the field investigation in the dam downstream river that is supplying sediment. And it was confirmed quantitatively that the riverbed materials effects on turbidity reduction by hydraulic model experiments.

Key words: the long-term thin turbid water, environmental impact, countermeasure technology, turbidity reduction effect