

①技術研究開発テーマ名	宮崎県小丸川における置砂施工に用いる土砂の洗浄技術の開発
②研究代表者	
氏名	所属・役職
鈴木 祥広	宮崎大学工学部・准教授
③共同研究者	
氏名	所属・役職
村上啓介	宮崎大学工学部・准教授
植西 清	宮崎河川国道事務所・調査第一課長
村上俊樹	九州電力（株）宮崎支社・副長
④背景・課題	
<p>河川は、水循環系の重要な構成要素であると同時に、土砂をはじめとする様々な物質を運ぶ物質循環系においても極めて重要な機能を果たしている。しかしながら、ダム建設によって自然界の物質循環のなかでの土砂の流れを遮断した結果、著しい堆砂によるダム機能の低下、平野部や河口部での河床の低下、海岸線の後退などの問題を引き起こしている。宮崎県の中部を流れる一級河川小丸川においても、上流域に複数のダムが建設されており、土砂供給のバランスが崩れ、河床低下や河床材料の粗粒化が顕在化している。そのような状況の中で、土砂生産域から海岸域までを対象とした総合土砂管理の重要性が広く認識され、流砂系の連続性を回復させる方策として、小丸川ではダム堆砂を河川に還元する置砂施工が検討されている。しかしながら、本河川上流域の土砂には難沈降性の微細粘土粒子が含まれ、洪水発生後の濁水長期化も顕在化しており、河川環境保全の面から濁水軽減対策の実施が社会的な課題になっている。したがって、本河川において置砂施工を実施するためには、濁水対策にも十分に配慮した技術の導入が不可欠である。本河川のダム堆砂には濁水の発生源と成りうる微細粒子が含まれていることから、土砂採取や土砂設置の工程において、その粒子の除去すなわち土砂の洗浄は、置砂施工の最重要なプロセスとなる。図1に、本研究で想定している置砂施工に用いる土砂の洗浄技術のフローを示す。</p>	
<p>土砂の洗浄技術に関しては、重金属や油分、難分解性化学物質等による土壌汚染の浄化技術として、湿式篩やサイクロン、その他の方法を利用した技術が開発され、実用化に至っている。また、ダム堆砂の採取・洗浄技術においても、エジェクターポンプとスパイラル分級装置を組み合わせたシステムが開発されている。土砂自身の洗浄プロセスに関しては多数の工学的技術が開発され、それらの実績もあり、本流域における置砂施工においても適切な技術を採用することは十分に可能である。したがって、置砂施工に用いる土砂の洗浄技術の開発において最重要な課題は、土砂洗浄によって発生する濁水の処理である。本河川のダム堆砂洗浄後の濁水には、粒径 $2\mu\text{m}$ 以下でフィラメント状の難沈降性粒子が高濃度に含まれる可能性が高く、通常の沈殿処理のみでは濁質除去が期待できない。置砂施工の現場や発生する処理水量から鑑みると、簡易な装置で大量の処理が可能である凝集沈殿法が最も適当であると考えられた。しかしながら、ダムの現場は本流域の上流に位置するため、僅かな漏出でも河床への着色が危惧される塩化第二鉄等の鉄系凝集剤や、平成21年に改正された水道水基準の水質管理目標設定項目に追加されたアルミニウムを原材料とするアルミニウム系凝集剤は凝集性には優れているものの、その使用にあたっては、河川管理者、ダム管理者および流域住民から理解を得ることは非常に困難である。そこで本研究では、濁水の凝集効果が期待される火山灰粘土と水を原料とした新規の天然凝集材に着目し、堆砂の進行が著しい小丸川水系の川原ダムを対象として、置砂施工に用いる土砂の洗浄技術の開発にお</p>	

いて最重要プロセスとなる土砂洗浄濁水の簡易凝集処理について検討した。なお、各種の薬品を調査して製造される「凝集剤」と区別するため、国土交通省の記述に倣い、天然材料を原料とする場合には「凝集材」と表記することにした。

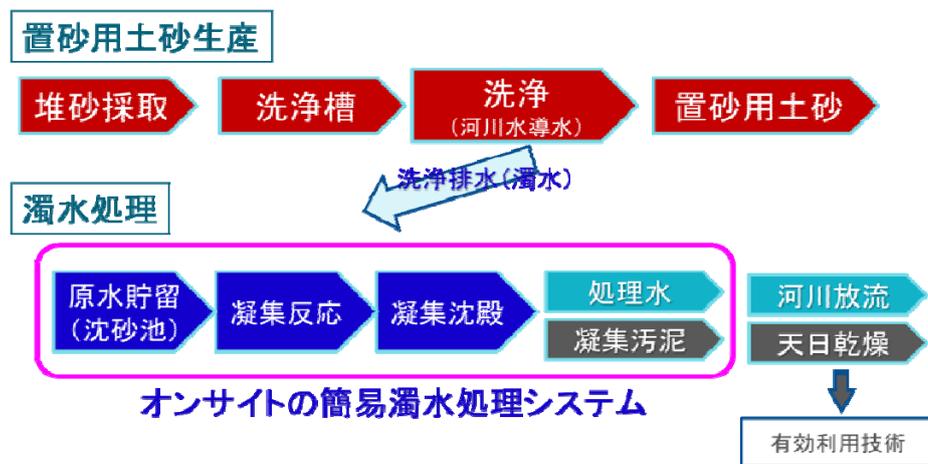


図1 想定している置砂施工に用いる土砂の洗浄技術のフロー

⑤技術研究開発の目的

本研究では、置砂施工に用いる土砂の洗浄技術の開発を目的とし、微細粒子フリーの土砂生産および洗浄で発生する濁水の簡易浄化について検討する。土砂採取現場付近において、土砂を洗浄槽に採取し、河川水で洗浄する。洗浄排水は排水ピットを利用して凝集沈殿し、処理水は河川に戻す。ここで、新規の天然無機系凝集剤(TRP-Ai)の利用を検討し、環境に優しい濁水技術の開発を目指す。具体的な数値目標はつぎの通りである。洗浄済土砂の濁質発生量は固液比 1 : 10 において、処理水濁度 10 度以下、河川放流先濁度 2 度以下を目標値と設定する。

本技術の開発によって、小丸川の土砂供給対策のみならず、全国の各河川における環境に配慮した流砂系の連続性の回復の濁水対策に活用できる。

⑥技術研究開発の内容・成果

1. 現地概要と実験方法

1.1 現地概要と土砂採取

小丸川流域には、複数のダムが建設され運用されている(図2)。特に、下流に位置する川原ダム(重力式コンクリートダム、有効貯水量 1,200,000m³、流域面積 361.80km²、発電、1940年運用開始、九州電力)は、堆砂が著しく進行しており、ダム堤体付近にも土砂が堆積している状況にあり、上流部の河床や河岸にも大量の土砂が堆積している。そこで、対象とするダムは川原ダムとして、堆砂の進行が著しく、かつ、土砂採取や置砂施工実施において作業の可能な箇所を7地点選定し、置砂用土砂採取の候補地とした(図3)。各地点において、表面土砂を平面的(約 1m²)に約 50kg 採取し、均一となるように混合した。各地点の土砂は、JIS A 1204 に従って粒度分布を測定した。なお、最終的な置砂用土砂採取地点は、土砂の粒度分布の結果に基づいて河川還元にも最も適する土砂から選定することにした。

1.2 天然凝集材の使用について

難沈降性粒子を含む濁水の処理システムには、沈降速度を著しく高める凝集プロセスが不可欠である。しかしながら、アルミニウム系凝集剤(ポリ塩化ナトリウム、硫酸バンド)や鉄系凝集剤は、凝集沈殿効果が著しく高いものの、河川流域の住民や河川・ダム管理者にはダムや河川の濁水処理への使用

には強い抵抗感がある。国土交通省（2004年）は「国民に対して提供するサービスとその他の業務の質の向上に関する目標を達成するためとるべき措置」を検討し、具体的な研究計画の項目において天然凝集材による濁質処理技術を研究・開発課題として採り上げている。このような状況において、天然土コロイドや火山灰粘土などの天然無機材料を原料とした新規の凝集材が開発されている。ダム底泥で作成した模擬濁水によるジャーテストにおいて、凝集効果がポリ塩化アルミニウムと同等であった天然火山灰凝集材（TRP-Ai、アステック、国土交通省 NETIS 登録 No. KK-100082-A、以降 火山灰凝集材とする）を用いることにした。火山灰凝集材の原液 pH は 4.7 で弱酸性である。火山灰凝集材は、小丸川流域にも広く分布する阿蘇の火山灰風化粘土と天然水を原料とするスラリー状の凝集材である。

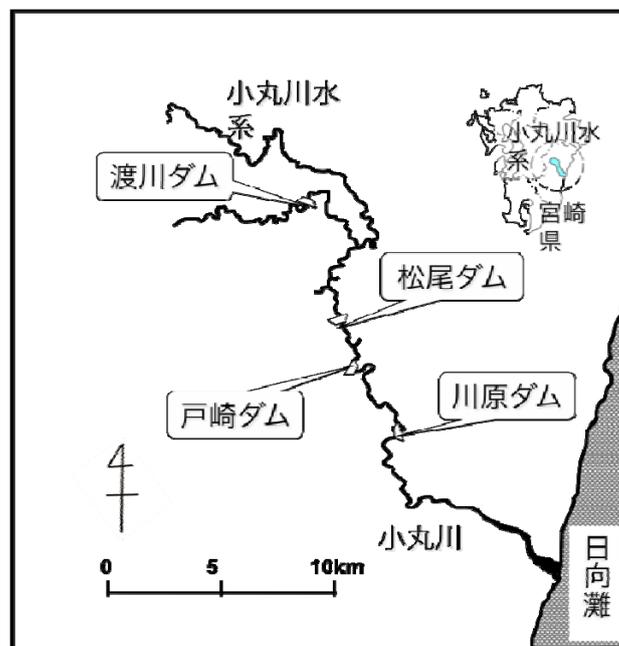


図2 宮崎県小丸川水系



図3 川原ダムにおける置砂用土砂の採取候補地点

1.3 土砂洗浄による濁質発生量の測定

採取した土砂 2kg（湿重量）と水道水 6L を 10L ポリエチレン容器（土砂：水=1：3）に移し、1分間の転倒混合によって土砂を洗浄した。土砂洗浄した懸濁水（洗浄濁水）は、混合後、直ちに4本の 1000mL メスシリンダーに移して静置させた。そして、各メスシリンダーから、1、6、12、24 時間毎に、上層

500mL の濁水を細サイホンで採取した。回収した上層水の濁質は濾過（ガラス繊維濾紙，GF/C）によって回収し，その乾燥重量を測定した。また，このときの濁水の濁度も測定した。混合直後の濁質量と濁水についても同等に測定した。各時間静置後において，上層に浮遊懸濁していた濁質を土砂の単位重量当たり換算し，土砂の濁質発生量と定義して，各土砂に含まれる濁質を特徴付けした。

本実験で測定した濁度は，標準物質を精製カオリンとし，積分球式光電光度法の濁度計（三菱化学，SET-PT-706D 型）を用いて測定した。単位は，度（カオリン）である。

1.4 ジャーテスト

土砂 2kg と水道水 6L を転倒混合によって 1 分間洗浄した後，1 時間静置させ，懸濁している上層約 3L の濁水を回収して，これを置砂用の土砂を洗浄して発生する濁水の原水とした。そして，ジャーテストによる火山灰凝集材の最適注入条件を設定した。すなわち，原水 500 mL を 500 mL ビーカーに取り，ジャーテスター（MJS-8 型，宮本製作所）を用いて急速攪拌を行いながら，pH は未調整とし，所定の凝集材注入率（0-1000 mg/L）となるように凝集材スラリー（凝集材原液を 3 倍に希釈）を添加した。攪拌・静置条件は，急速攪拌（150rpm）5 分，緩速攪拌（40rpm）3 分，静置時間 10 分である。静置後の上澄水約 100mL を採取し，濁度と pH を測定した。

1.5 篩による土砂洗浄

実用化においては，湿式篩方式の土砂洗浄を想定し，本実験では篩の上に土砂を置き，水中で振とうさせて土砂を洗浄した。すなわち，目開き 4.75 mm と 75 μ m の木枠手篩（400 mm×600 mm×高さ 70 mm，東京スクリーン）を重ねて固定し，上段の篩に土砂 9kg を置き，水を満たした大型水槽内に上部が浸る程度まで全体を水没させ，水平に振とうさせた。往復の振とう回数と土砂洗浄濁水の濁度の関係を調べた結果，20 回以降は土砂洗浄濁水の濁度が一定となった。したがって，土砂洗浄の往復振とう回数は 45 回以上であれば，土砂に含まれる微細粘土粒子等の濁質を洗浄・除去されると判断し，簡易処理プラントの実験では，一回の土砂洗浄（9 kg）について振とう回数を 50 回に設定した。

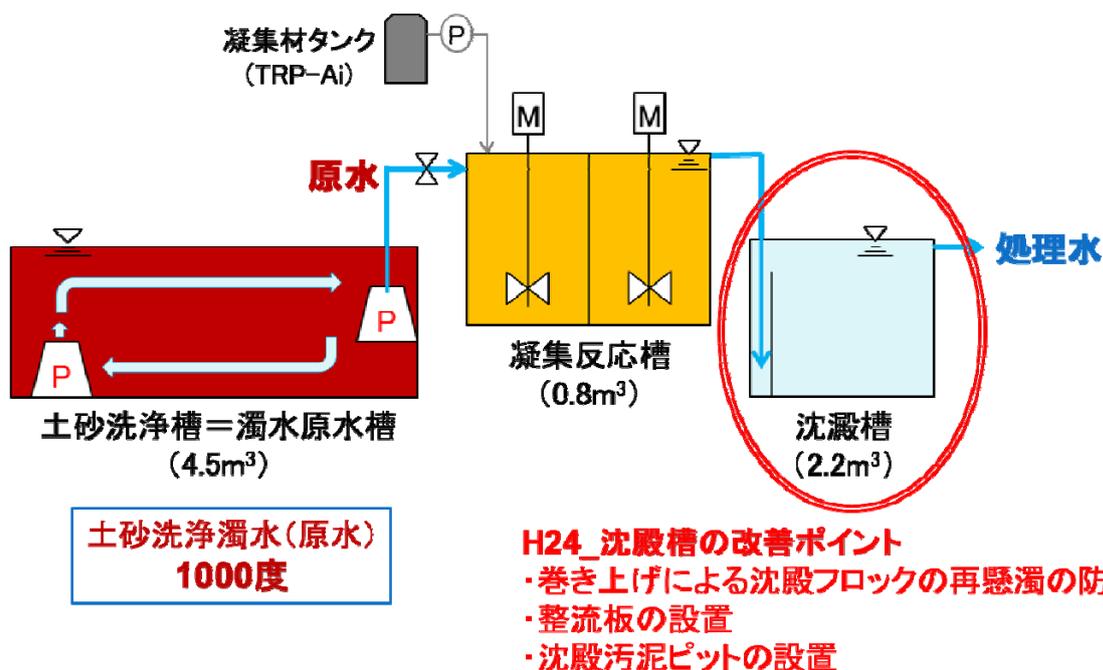


図 4 濁水処理プラントのフロー

1.6 連続式簡易処理プラントの構成と運転方法

連続処理プラントによる実験において，凝集槽における水流の乱れによるブロックの再懸濁を防止するため，沈殿槽を新設し，整流板を設けた。原水の濁度を想定する実規模に近づけるため，原水濁度を

約 1000 度に設定した。連続式の簡易処理プラントは、川原ダム管理所に隣接する整地された場所に構築した。図 4 に、簡易処理プラントの処理フローを示す。簡易処理プラントは、土砂洗浄と濁水貯留を兼ねた大型原水槽 (5m³)、凝集反応槽 (0.8 m³)、沈殿槽 (2.5 m³, 水面積 2.5 m²) から構成される (図 5)。原水槽には、川原ダム上流の河川水を 4.5 m³ 注水した。そして、原水槽内において木枠手篩による土砂洗浄を繰り返して行い、原水濁度が約 1000 度となる濁水を作成した。プラントの運転時における原水水質を一定にするため、原水槽には循環ポンプを設置して原水を絶えず攪拌した。原水は原水槽から揚水ポンプで凝集反応槽に送水した。凝集反応槽の原水流入部には、凝集材用の定量ポンプ (25W, 200V) を設置し、原水と同時に凝集材を注入した。凝集反応槽には、2 台の攪拌機 (100W, 200V) が設置され、仕切り板によって攪拌されながら上下流に通水した。凝集反応槽流出水は、自然流下で沈殿槽に通水した。そして、凝集反応槽の流出部から越流する水を処理水とした。簡易処理プラントの処理性能は、各槽に通水してプラントの連続処理が安定化した後、原水と処理水を 1 分間隔で 10 分間採取し、それぞれの濁度から評価することにした。



図 5 改修した濁水処理プラントの構築状況

2. 結果と考察

2.1 最適な置砂用土砂の採取地点の決定

図 6 には、各地点で採取した土砂の粒径加積曲線を示す。候補地点であった土砂の地点①と地点③を除いた土砂試料は、いずれも 90%以上が粒径 10mm 以上であり、粗い礫で構成されていた。ダムに流入してくる土砂は、自然に分級されながら堤体近傍の堆砂の粒径が最も小さくなる傾向を示した。地点①は、20%程度の砂分を含み、細かな礫が大部分であった。一方、地点③は 90%以上が 2 mm 以下の砂分で構成され、調査した地点では最も細粒土砂であることがわかった。

宮崎海岸とその周辺海域では、砂浜の後退が進行しており、河川からの土砂供給の不足が指摘されている。海岸で必要とされる主要な粒径集団は、0.1-1.0 mm (細砂~中砂) であり、海浜にはこの粒径に近い土砂の供給が望ましいとされる。しかしながら、現状の小丸川の河床には、この範囲の粒径集団がほとんど存在せず、河床の粗粒化が著しい。また、小丸川の河道特性 (勾配) や洪水時の掃流力から見た代表粒径は 25mm 程度であると試算されており、置砂の粒径は 25 mm 以下が目安とされている。そこで、砂浜の後退と河床の粗粒化の両面から必要とされる粒度を含む土砂を選定すると、砂浜のための 0.1-1.0 mm の粒径集団を 10%含み、しかも河床への還元のための 25 mm 以下の礫を 65%含む地点①の土砂が置砂には最も適すると判断した。

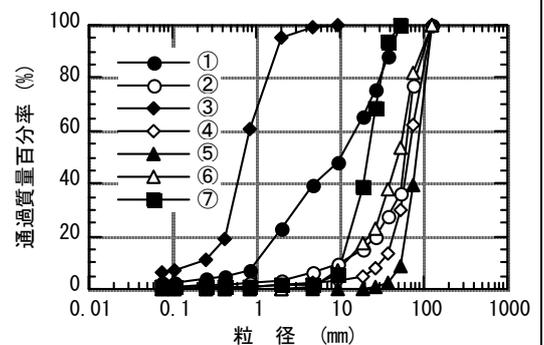


図 6 土砂の粒径加積曲線

2.2 土砂洗浄による濁質発生量

図7には、濁質発生量と時間経過による残留濁質量の関係を示す。土砂洗浄によって発生する濁質は、静置時間とともに沈降するものの、24時間後においても残留することがわかった。地点①の土砂を洗浄した場合、洗浄直後の土砂質重量に対する濁質発生量は1.34 g/kg（濁水濁度1845度）であり、1時間静置後に浮遊懸濁している濁質量は0.25 g/kg（濁水濁度532度）であった。さらに、24時間静置しても浮遊している難沈降性の濁質量は0.048 g/kg（濁水濁度73.8度）となり、初期濁質発生量の3.6%に相当した。

また、地点⑦は粒径集団が大きいにも関わらず、濁質発生量が多かった。洗浄直後の土砂質重量に対する濁質発生量は1.68 g/kgであり、24時間静置しても浮遊している難沈降性の濁質量は0.068 g/kg（濁水濁度94.0度）であった。土砂洗浄によって、地点①の土砂よりも多くの難沈降粒子が発生したことになる。地点⑦の礫表面には、微細粘土粒子が大量に付着しており、洗浄によって洗い流されて濁質として測定されたと考えられる。この流域の土砂の特徴を示した結果であり、単純に粒径区分のみで濁質発生量を予測することは難しいことがわかった。

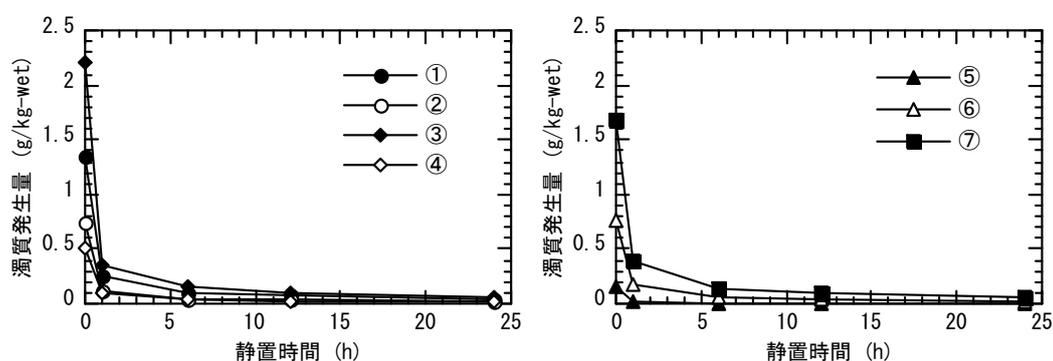


図7 濁質発生量と時間経過による残留濁質量の関係

2.3 天然凝集材の注入率

地点①の土砂を用いて難沈降性濁水（24時間静置）を作成した。図8に、その濁水を原水とした場合における火山灰凝集材の注入率に対する処理水濁度の関係を示す。凝集材無添加の場合には、沈殿による澄清化は全く認められなかった。凝集材の注入率を増加させるに伴って残留濁度は著しく減少し、500 mg/Lの注入率では処理水の残留濁度は4.18度となり、さらに750 mg/Lでは0.54度に低下した。このときの処理水 pH は7.27であり、原水 pH の7.28 とほぼ同一であった。凝集材添加による処理水 pH への影響は認められなかった。凝集材原液の pH が4.7であり、弱酸性のため、本実験の注入率では pH への影響が生じなかったと考えられる。火山灰凝集材は、pH 未調整の条件において、土砂洗浄濁水に対して極めて高い凝集効果を有することがわかった。ジャーテストの結果から、土砂洗浄濁水（原水濁度約300度）に対する火山灰凝集材の適切な注入率は750mg/Lとした。さらに、沈殿槽における水面積負荷率を設定するため、注入率500 mg/Lにおける凝集ブロックの沈降速度を測定した。その結果、沈降速度は3.6 cm/minであった。

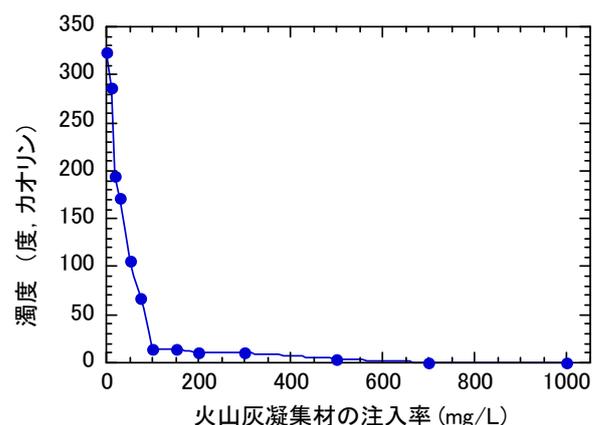


図8 火山灰凝集材の注入率に対する処理水濁度の関係

2.4 簡易処理プラントの運転諸元と処理性能

火山灰凝集材の注入率、凝集ブロックの沈降速度、および流域の管理目標から、構築した簡易処理プラントの運転諸元を以下のように設定した：計画処理水量、1回の試験当たり4m³；原水水質、濁度1000

度；目標処理水水質，濁度 10 度；凝集材注入率， 1500 mg/L；凝集反応時間， 10 分以上；水面積負荷率（×安全係数 0.5）， 1.8 cm/min。目標処理水水質を濁度 10 度とした根拠は，浄水方法の選定の目安として急速濾過方式では濁度最低 10 度前後となっていること，ならびに宮崎県一ツ瀬川における濁水化の基準となる目安が濁度 10 度となっているからである。

図 9 に，簡易処理プラントにおいて連続通水したときの濁度モニタリングの結果を示す。各条件において，原水と処理水の濁度の変動は小さく，簡易処理プラントが安定的に運転されていたことがわかる。原水濁度は 1000 度である。処理水濁度は，10～11 度で安定して推移しており，除去率は 98～99%に達した。本実験で用いた沈殿槽によって，水流の乱れは著しく改善され，凝集攪拌槽で形成されたフロックは巻き上げることなく沈降し，上澄水が静かにオーバーフローして流出した。このプラントによって，目標処理水水質を達成することができた。また，注入率 1500mg/L における処理水 pH は 7.25 であり，原水 pH よりも約 0.05 低下した程度であり，火山灰凝集材の注入による pH の変動は極めて小さい。一般のアルミニウム系あるいは鉄系凝集剤を使用する場合には，pH の制御がプラント運転の重要な管理項目であることから，火山灰凝集材を用いた簡易処理プラントは，pH の制御が不要な点において運転管理が容易である。火山灰凝集材のプラントを本研究で構築した簡易処理プラントは，凝集反応プロセスと沈殿プロセスからなる極めて単純なシステムではあるが，凝集材注入率の条件をジャーテスト結果よりも高く設定することによって，その他の諸条件は本プラントの設定通りに運転すれば，目標処理水水質の濁度 10 度を十分に満足することが可能である。

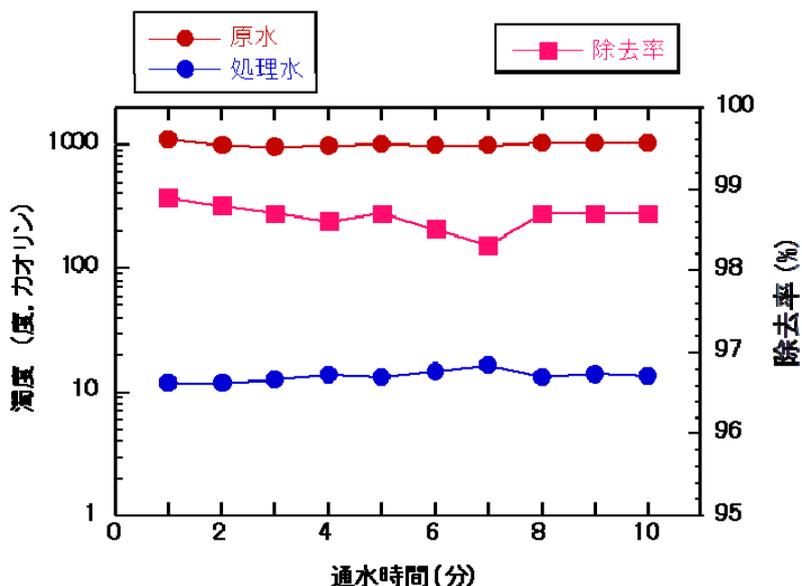


図 9 改修した簡易処理プラントにおける連続通水運転したときの原水と処理水の濁度変化

⑦今後の課題・展望

実施工に向けた課題として，濁水処理のランニングコストが挙げられる。そこで，今回の簡易プラントの運転結果から試算する。土砂 0.15m³(270kg)の処理に対して，火山灰凝集材 6kg を使用したので，土砂 1m³ 単位当たりの火山灰凝集材の必要量は 40kg となる。火山灰凝集材単価（1 トン単位）は 210 円/kg であるから，土砂 1m³ 単位当たりの処理コストは火山灰凝集材のみで 8400 円となる。火山灰凝集材の沈殿物汚泥はそれ自身が全て天然物であるため，覆土や農地還元等への有効利用が容易であり，汚泥処分のコストが削減できる点がメリットになるであろう。川原ダムの堆砂の進行は著しく，ダムの管理上，堆砂対策は喫緊の課題となっており，ダム堆砂の河川還元を目的とした置砂施工は，流砂系の連続性を回復させる有用な方策である。しかし，その一方において，置砂施工を実施するにあたっては河川環境への配慮も不可欠である。実施工にあたっては，ダム現場のみのコスト試算ではなく，土砂生産域から海岸域までを対象とした総合土砂管理の重要性も鑑みた検討が必要である。

なお，当該課題研究では関係機関のメンバーと随時打つ合わせを重ねつつ研究を遂行し，最終的な成果となるプラント試験では関係者による現地視察のなかで実施した（図 10）。プラントの処理能力や処

理特性に関して、関係者間において理解を深めることができた。本研究で得られた知見と情報から、図 11 に将来の実用化に至るイメージを示して展望とする。



図 10 濁水プラントの現地視察の様子。

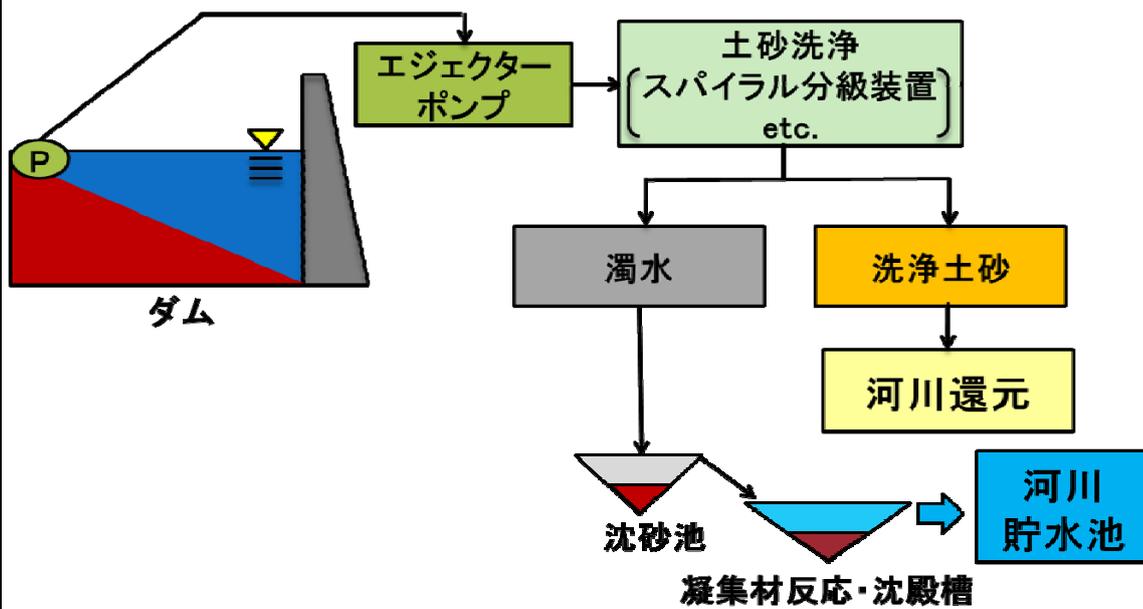


図 11 実用化に至るイメージ図