

天然凝集材による環境負荷低減型濁水処理システムに関する研究

研究予算：運営費交付金（一般研究費）

研究期間：平 22～平 24

担当チーム：水工研究グループ（水理）

研究担当者：箱石憲昭、海野仁

【要旨】

本研究は、ダム工事現場で発生する濁水、貯水池堆積土砂の湖内移動に伴い生じる濁水等を対象に、環境負荷の発生を抑制しつつ懸濁物質を凝集処理するシステムを開発すること、さらに、処理システムの現場適用性の評価手法を確立することを目的に実施した。天然凝集材であるアロフェンを用いた室内実験の結果、湖内工事で発生する濁水に対し凝集効果を確認した。また、凝集処理システムを開発し、湖内移動に伴い生じる濁水を試料に、現地において実証実験を行った結果、室内実験と同様、十分な凝集効果を確認した。さらに、当該システムの現場適用性を評価した結果、当該システムは十分な凝集効果はあるものの、凝集材の効率的な分散手法の確立が課題として挙げられた。以上の結果を基に、凝集処理システムの現場適用性の評価方法を提案した。

キーワード：アロフェン、超音波分散、濁水処理システム、現地実証実験

1. はじめに

ダム建設工事現場では環境に配慮した工事が求められるものの、現場から発生する濁水を従来手法で処理した場合、発生する汚泥の現場内処理が課題となっている。一方、管理中のダムにおいては、大規模出水後に貯水池全体が懸濁化した場合の濁水対策が課題となっており、新たな環境負荷を生じることなく濁水を凝集処理する技術が求められている。

当チームはこれまで、天然凝集材アロフェンを用いて濁水を凝集処理する技術の開発に取り組み、研究成果を公表してきたが^{1) 2) 3) 4) 5)}、当該技術を現場で利用可能な技術に拡張するには、現地で実証実験をおこない効果を検証する必要がある。

本研究は、先行研究の成果を踏まえ、ダム工事現場で発生する濁水、貯水池堆積土砂の湖内移動に伴い生じる濁水、貯水池に流入し濁水放流の長期化の原因となる濁水を対象に、環境負荷の発生を抑制しつつ濁水を凝集処理するシステムを開発すること、さらに、処理システムの現場適用性の評価手法を確立することを目的に実施した。研究では、凝集材料として、天然の土コロイドであるアロフェンを用いた。天然由来の土コロイドのうち、アロフェンおよびイモゴライトは比表面積が大きく凝集材としての活用が考えられる。ここでは調達の容易さからアロフェンを取り上げ、濁質の凝集について検討を進めた。天然由来の土コロイドを凝集材とすることにより、凝集フロックを貯水池内の堆砂の一部として捉

えた貯水池管理が可能になると考えた。

アロフェンの活用について既往研究をレビューする。堀岡は、アロフェンに硫酸を添加することにより凝集性能を高める方法を提案した⁶⁾。また、尾崎らは、火山灰土に pH 調整剤を添加した凝集剤の製法を提案した⁷⁾。一方、柏井らは、アロフェンのみを材料としながらも、超音波分散、急速攪拌および緩速攪拌の各処理を行うことにより、濁水を凝集処理できると報告した⁸⁾。当チームも柏井らの研究を踏まえ、凝集処理の過程で薬品を添加することなくアロフェンの凝集性能を引き出す方法を検討した。

2. 凝集材の特性

2.1 使用した凝集材

実験には、品川化成（株）製のアロフェンを主成分とする凝集材を使用した（写真-1）。アロフェンは風化火山灰・火山灰質土壌に多く含まれる天然の土コロイドで、吸湿性・凝集性に優れる。我が国では、北海道・東北・九州地方などに多く分布し、調達が容易と考えられる。水中に懸濁させたアロフェンは、周辺の pH 環境により凝集や分散現象を生じることが知られている⁹⁾。また、水との親和性や吸着能力に優れることから、乾燥剤や吸着剤として利用されている。アロフェンは、元来土壌中に含まれる物質であり、凝集材として貯水池に投入しても、水利用に及ぼす影響、生物生息環境に及ぼす影響は少ないと考えられる。また、添加したアロフェンに

よる堆砂の増加量は微量であり、貯水池の濁水対策としての利用が期待されている。



写真-1 実験に使用したアロフェン

製造元への聞き取りによると、アロフェンの製造工程は、おおよそ次の通りである。

- 1) 栃木県内の採取地から火山灰質土壌を採取し、工場に運搬。
- 2) 運搬した土壌に水を加え、木片などの不純物を除去。
- 3) 比重差を利用して主にアロフェンを含む土粒子を選別して抽出。
- 4) 抽出した土粒子を脱水。

なお、製造工程では有機物を除去するための薬剤、pH を調整するための薬剤等は添加していないとしている。同社で公表しているアロフェン単味商品の化学成分の分析値を、表-1 に示す。

表-1 実験に使用したアロフェンの化学成分¹⁰⁾

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	その他
含有率[%]	50.0	43.2	3.6	1.1	2.1

2. 2 アロフェン質凝集材の荷電特性

アロフェン、イモゴライトなどの土コロイドは、周辺の pH 環境により凝集や分散現象を生じることが知られている。大内・似内らはイモゴライトを取り上げ、pH の異なる懸濁液中の凝集・分散挙動を報告した^{11) 12)}。ここでは大内・似内らの研究を参考に、アロフェンの荷電特性について検討する。具体的には、pH 環境の異なる懸濁液中のアロフェンについて、ゼータ電位を測定し、さらに、分散処理の有無によるゼータ電位の差異について考察する。

2. 2. 1 調査方法

濃度が900mg/Lとなるようアロフェンを純水中で

解きほぐし、塩濃度が 0.01[mol/L]となるよう NaCl を加え、アロフェン懸濁液を作成した。次に、アロフェン懸濁液を 2 等分し、一方については、超音波を照射して試料を分散させた。超音波分散については、出力 60W、周波数 28kHz の装置を用い、アロフェン懸濁液 0.5L に対し 20 分間照射した。さらに、2 種の懸濁液をそれぞれ 8 等分し、0.1mol/L の HCl あるいは 0.1mol/L の NaOH を滴下し、pH3～pH10 の懸濁液を 8 検体ずつ 2 組、計 16 検体作成した。HCl または NaCl の滴下中は、マグネットスターラーを用いて攪拌し、各試料の pH が容器的で均質となるよう留意した。最後に、各試料について、電気伝導度ならびにゼータ電位を測定した。測定には、Malvern 社製 Zetasizer Nano ZS を用いた。

2. 2. 2 調査結果

電気伝導度の測定結果を図-1 に示す。水中に分散したコロイド粒子は周囲の電解質濃度の増加により凝集が進行することから、異なる試料のゼータ電位の測定にあたっては分散媒の電解質濃度を等しくすることが求められる。本調査では pH 環境を調整するために滴下した電解質の影響を低減させるため、あらかじめ NaCl を 0.01mol/L の濃度で混合した。その結果、図-1 に示すとおり pH3 の検体を除き電解質濃度はほぼ一定となり、ゼータ電位を比較検討する条件は満たされた。

ゼータ電位の測定結果を図-2 に示す。ゼータ電位は pH7 より酸性側で正の値、また、pH9 よりアルカリ側で負の値を示した。また、同じ pH の検体について比較すると、超音波分散を加えることによりゼータ電位が正の方向に傾く結果が得られた。ダム湖の懸濁化の原因となる微細な土粒子の多くは、負に帯電している。ダム貯水池の pH 環境として一般的な pH7 近傍では、アロフェンに超音波分散を加えることにより電位が正の方向に高まった。なお、本研究で使用したアロフェンの等電点（ゼータ電位が 0 となる点）は分散なしの試料で pH8 付近となり、軽部らの報告にある pH5.1～pH5.2 よりもアルカリ側に位置する⁹⁾。これは、本研究で用いたアロフェンの採取地が軽部らの報告と異なること、本研究で用いたアロフェンには、主成分とされる SiO₂、Al₂O₃ 以外にも Fe₂O₃、CaO などの化学成分が 6.8%含まれ、例えば、Fe、Ca などの成分が懸濁液中で正電荷を発現したことなどが考えられる。

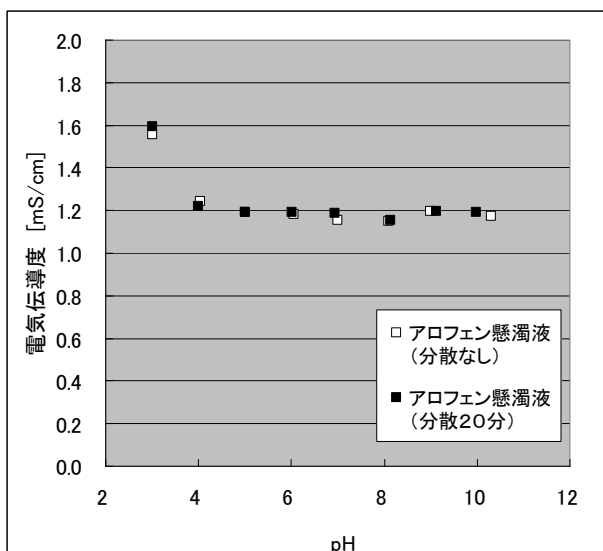


図-1 アロフェン懸濁液の pH と電気伝導度

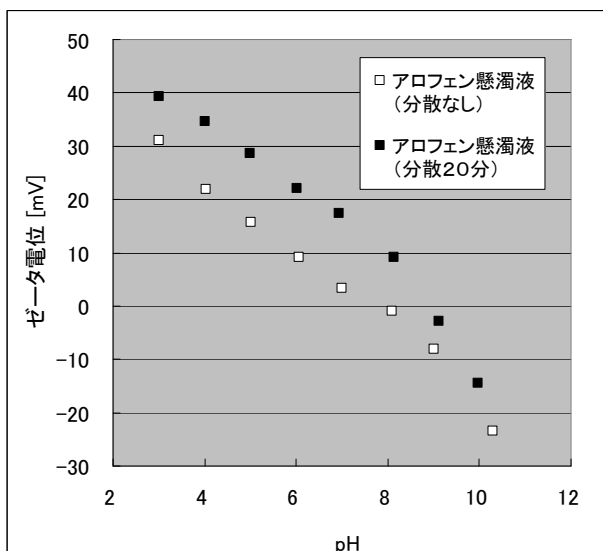


図-2 アロフェン懸濁液の pH とゼータ電位

3. 凝集処理装置・凝集処理システムの開発

3. 1 凝集処理装置の構成

本研究は、前述の通り、濁水を凝集処理するシステムを開発すること、さらに、処理システムの現場適用性の評価手法を確立することを目的としている。ここでは、凝集処理システムの開発の前段階として、凝集処理装置の機器構成を検討し、アロフェンを用いた凝集処理の効果について検討する。なお、ここで取り上げる凝集処理装置とは、複数の試料の凝集特性を比較検討できる室内凝集処理装置とする。

凝集処理装置の構成として、先行研究の成果も踏まえ、分散装置と攪拌装置の組み合わせについて検討する。当チームで使用実績のある分散装置は、次

の3機種である。

1) 東京硝子器械(株)製 超音波洗浄器 FU-10C
出力 60W 発振周波数 28kHz

2) (株) エス・エム・テー製 超音波分散機
UH-600S 出力 600W 発振周波数 20kHz±3kHz

3) (株) エス・エム・テー製
浸漬型超音波洗浄機 SC600D
出力 600W 発振周波数 20kHz±3kHz

一方、攪拌装置として使用実績のある機器は、

4) 宮本理研工業(株)製 試水凝集反応装置(ジャーテスター) JT-66D

5) 家庭用水中ポンプ 13L/min ほか

である。これらのうち、「2) 超音波分散機 UH-600S 出力 600W 発振周波数 20kHz±3kHz」(写真-2)については少量の試料(500mL)から大量の試料(3.8m³)まで分散処理した実績があり、また、「4) ジャーテスター JT-66D」(写真-3)については、複数の試料を同時に比較検討できることから、ここではこれらの機器を凝集処理装置として選定し、アロフェンを用いた凝集処理の効果について検討した。



写真-2 超音波分散装置

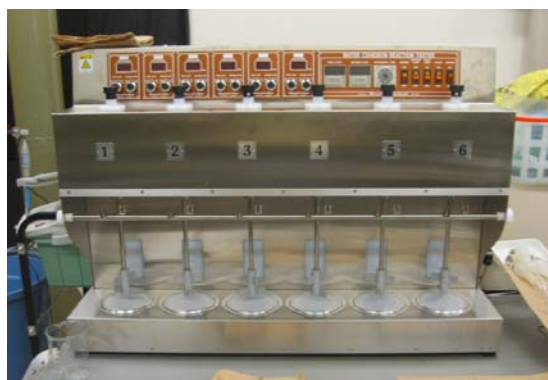


写真-3 試水凝集反応装置

3. 2 大夕張ダム流入水を用いた検討

3. 2. 1 実験方法

貯水池に流入し、濁水放流の長期化の原因となる濁水を対象に、前節で検討した凝集処理装置を用いて凝集実験を行った。試料は、大夕張ダムに流入する夕張川から採取した河川水を用いた。実験ケースを表-2に示す。実験手順は、以下のとおり。

1) 超音波分散

22.5~225mgのアロフェンを50mLの河川水に混合し、アロフェン懸濁液を作成した。この懸濁液を450mLの河川水とビーカー内で混合し、超音波分散機で10sec間分散処理した。

2) 急速攪拌

分散終了後、試料をジャーテスターにセットし、150rpmで180sec間攪拌した。

3) 試料静置と濁度測定

急速攪拌終了後に試料を静置し、水面下4cmの位置で濁度の経時変化を測定した。濁度の測定には、ホルマジン溶液により同定した濁度計を使用した。

以上の実験は、すべて室温20°Cに設定した恒温室内で実施した。

表-2 実験ケース (夕張川)

ケース No.	1	2	3	4	5	6	7
採取地点	夕張川	夕張川	夕張川	夕張川	夕張川	夕張川	夕張川
サンプル濁度 [NTU]	70.5	70.5	70.5	70.5	70.5	70.5	70.5
サンプルpH	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
アロフェン濃度 [mg/L]	45	90	180	270	360	450	---
超音波分散 [sec]	10	10	10	10	10	10	---
急速攪拌 [sec]	180	180	180	180	180	180	---

3. 2. 2 実験結果

濁水に投入するアロフェン量を6段階に変化させ、濁度の経時変化を比較した(写真-4)。このうち、静置直後から60min経過するまでの濁度を抽出し、図-3、図-4に示す。

ケース3を例に、濁度の経時変化を概観する。初期濁度70.5 NTUの河川水は凝集材の添加により濁度が上昇し、静置直後には198 NTUを示した。その後は時間の経過に伴い徐々に低減する状況が把握された。処理後15min経過した段階では32.5 NTU、60min経過後には12.5 NTUとなり、60minで濁度が約1/5に低減した。

次に、アロフェンの投入量と60min経過後の濁度について考察する。ケース3~ケース6ではいずれ

も60min経過後の濁度が7~13 NTUとなり、ある程度の凝集効果が確認された。本結果より、夕張川河川水については試料の濁度70.5 NTUに対し180mg/L以上のアロフェンを投入することにより、この凝集処理装置の有効性が示された。

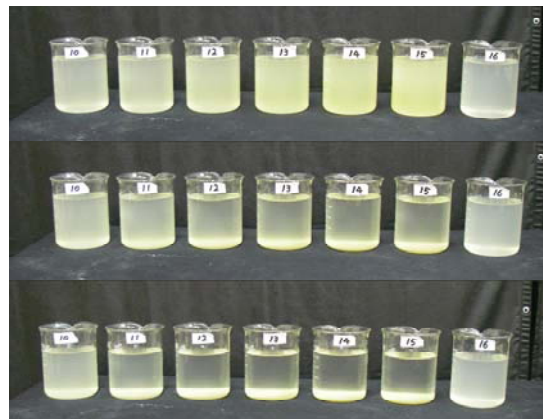


写真-4 静置後の濁度の変化 (夕張川)
(上から静置直後、15分後、60分後)
(左からケース1、ケース2、……)

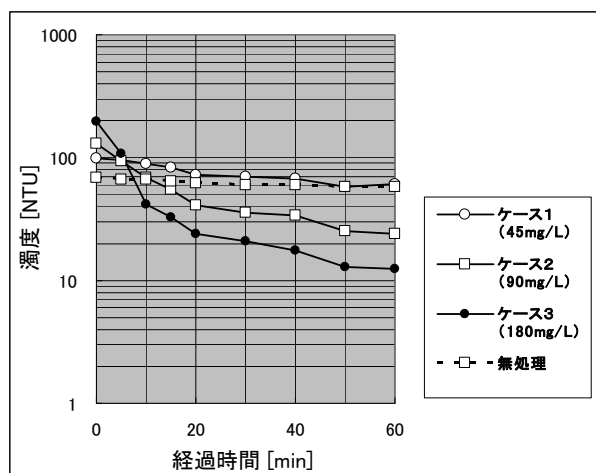


図-3 濁度の経時変化 (夕張川) (1)

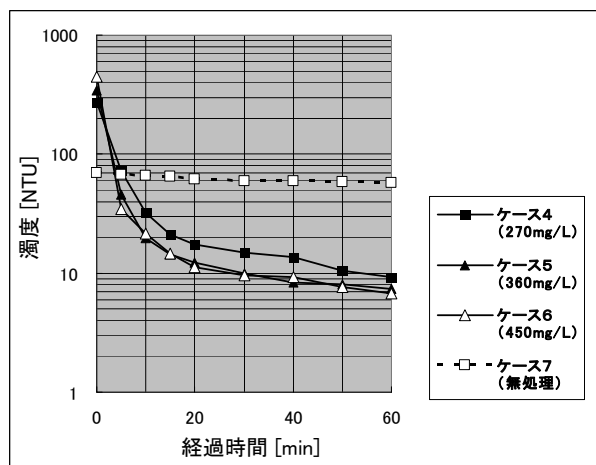


図-4 濁度の経時変化 (夕張川) (2)

3. 3 鹿野川ダム貯水池濁水を用いた検討

湖内工事の行われている鹿野川ダム貯水池（写真-5）において、工事により生じる濁水を採取し、3. 1 で検討した凝集処理装置を用いて凝集実験を行った。実験ケースを表-3 に示す。実験手順は、前節（大夕張ダム流入水）と同様である。



写真-5 湖内工事の行われている鹿野川ダム貯水池
(平成 24 年 12 月)

表-3 実験ケース（鹿野川ダム）

ケース No.	1	2	3	4	5	6	7	8
採取地点	鹿野川ダム	鹿野川ダム	鹿野川ダム	鹿野川ダム	鹿野川ダム	鹿野川ダム	鹿野川ダム	鹿野川ダム
サンプル濁度 [NTU]	200	200	200	200	200	200	200	200
サンプルpH	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74
アロフェン濃度 [mg/L]	90	180	270	360	540	720	900	---
超音波分散 [sec]	10	10	10	10	10	10	10	---
急速攪拌 [sec]	180	180	180	180	180	180	180	---

実験結果について述べる。濁水に投入するアロフェン量を7段階に変化させ、濁度の経時変化を比較した（写真-6）。このうち、凝集処理直後から60 min 経過するまでの濁度を抽出し、図-5、図-6 に示す。

ケース3を例に、濁度の経時変化を概観する。初期濁度 200 NTU の河川水は凝集材の添加により濁度が上昇し、静置直後には432 NTUを示した。その後は時間の経過に伴い徐々に低減する状況が把握された。処理後15 min 経過した段階では30.1 NTU、60 min 経過後には8.56 NTUとなり、60 min で濁度が1/20 以下に急速に低減した。

次に、アロフェンの投入量と60 min 経過後の濁度について考察する。ケース3~ケース7ではいずれも濁度が3~9 NTUとなり、十分な凝集効果が認められた。本結果より、鹿野川ダム貯水池濁水については試料の濁度 200 NTU に対し270mg/L 以上のアロフェンを投入することにより、3. 1 で検討した凝集処理装置の有効性が示された。

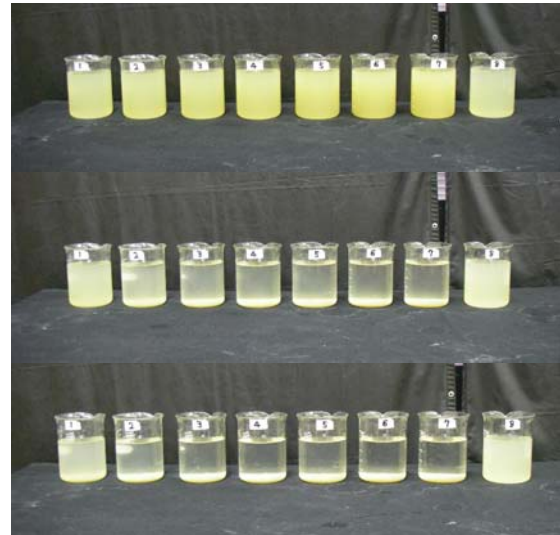


写真-6 静置後の濁度の変化（鹿野川ダム）
(上から静置直後、15分後、60分後)
(左からケース1、ケース2、……)

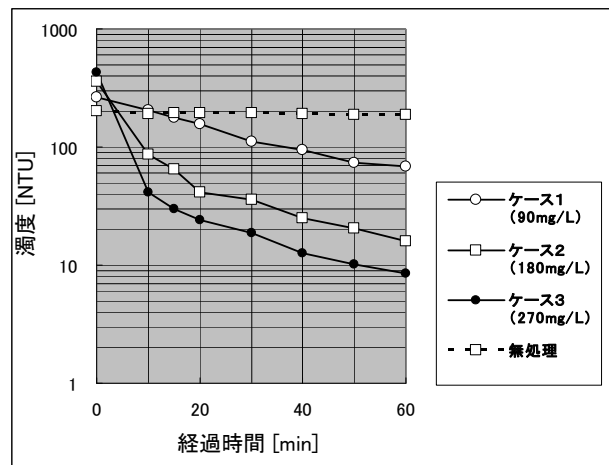


図-5 濁度の経時変化（鹿野川ダム）(1)

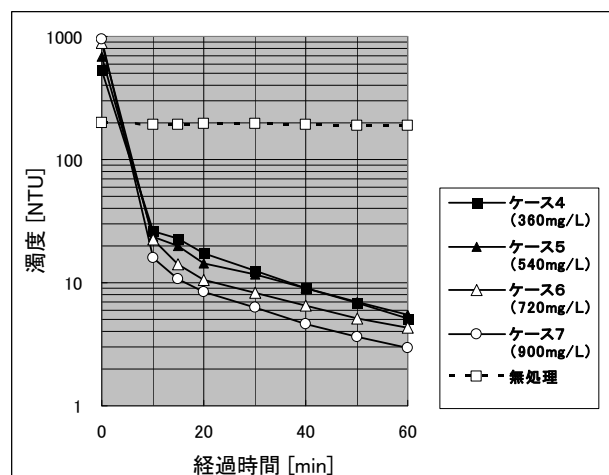


図-6 濁度の経時変化（鹿野川ダム）(2)

3. 4 濁水の特性と凝集効果

前々節では、夕張川河川水（以下、「夕張川」と略す。）を用いた検討により、凝集処理装置の有効性を確認した。また、前節では鹿野川ダム貯水池濁水（以下、「鹿野川ダム」と略す。）を用いた検討により、夕張川と同様、有効性を確認した。しかしながら、濁度の経時変化を例示したケースでは、夕張川で 60 min 経過後に濁度が約 1/5 に低減したのに対し、鹿野川ダムでは 1/20 以下と急速に低減し、濁度の低減に大きな差異が生じた。凝集効果は、濁水の pH、濁水を構成する土粒子のゼータ電位、粒度分布などの特性に依存すると考えられることから、ここでは、濁水の特性を把握した上で凝集効果を比較する。

試料とした濁水の濁度、SS、pH ならびにゼータ電位の測定値をまとめたものを表-4 に、濁度と SS の関係を整理したものを図-7 に示す。このうち、ゼータ電位については、15 min 超音波分散した試料と分散処理をしない試料の両方について測定した。測定方法は、2. 2 に準じた。

濁度と SS の関係について整理したところ、同一の濁度で比較した場合には、夕張川の SS は鹿野川ダムの約 1.5 倍となった。試料の濁度が同一の場合、夕張川の方が、より多くの凝集材の投入を必要とすると推察される。

濁度の低減効果は、投入する凝集材の量に依存する。ここで、凝集材の投入量を示す無次元量として凝集材投入比 R_C を、また、濁度の低減程度を示す無次元量として濁度比 R_T を導入し、凝集効果を比較する。

$$R_C = \frac{C_A}{C_S} \quad (1)$$

$$R_T = \frac{T_n}{T_b} \quad (2)$$

ここに、 R_C ：凝集材投入比 [無次元]、 C_A ：凝集材投入濃度 [mg/L]、 C_S ：試料の SS [mg/L]、 R_T ：濁度比 [無次元]、 T_n ：n min 静置後の濁度 [NTU]、 T_b ：凝集処理前の濁度 [NTU]。

夕張川ならびに鹿野川ダムについて、凝集材投入比と濁度比との関係を整理したものを、図-8 に示す。ここで、60 min 静置後の比濁度が 0.1 となる凝集材投入比について比較する。鹿野川ダムでは 2 程度であるのに対し、夕張川では 8~9 となり、同じ SS の濁水に対し、夕張川では鹿野川ダムの 4~4.5 倍の凝

集材の投入が必要となった。

表-4 試料の濁度・SS・pH・ゼータ電位

	濁度 [NTU]	SS [mg/L]	pH	ゼータ電位	
				分散なし [mV]	分散15min [mV]
夕張川	70.1	49.1	7.71	-17.1	-19.8
鹿野川ダム	200	90.8	7.74	-16.8	-18.5

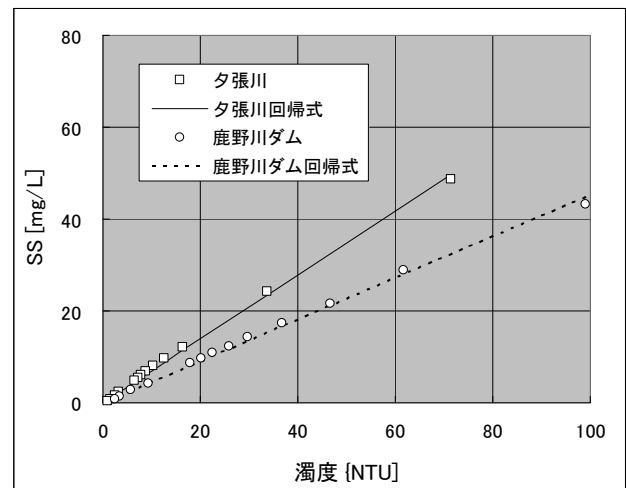


図-7 試料の濁度と SS

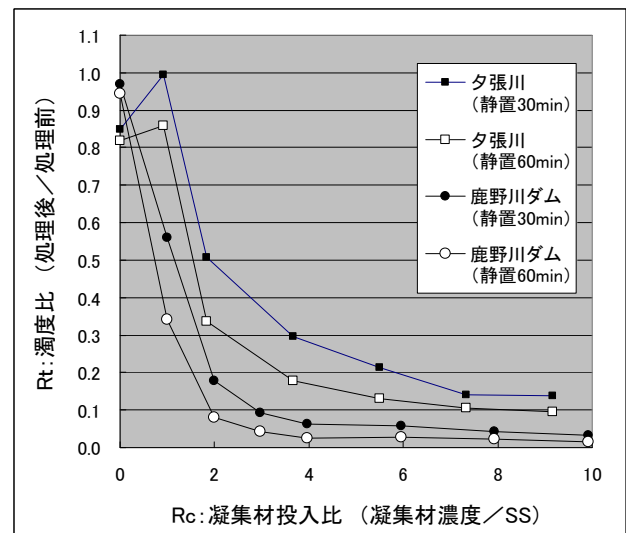


図-8 凝集材投入比と濁度比

夕張川と鹿野川ダムの pH について比較する（表-4）。凝集材のゼータ電位は pH 7 より酸性側で正の値を示すことから、pH が低い濁水には凝集材の効果が出現しやすいと考えられる。しかしながら、夕張

川・鹿野川ダムとも pH の測定値に大きな違いは見られず、pH の差異が凝集効果に影響しているとは考えられない。

ゼータ電位について比較する（表-4）。ゼータ電位は、夕張川・鹿野川ダムとも負の値を示すことから、アロフェンを用いた凝集に適していると考えられる。ただし、ゼータ電位についても類似した数値を示し、ゼータ電位の差異が凝集効果に影響しているとは考えにくい。

濁水を構成する土粒子の粒度分布について比較する（図-9）。粒度分布は、レーザー回折散乱光法を用い、測定機器は（株）島津製作所製 SALD 2300 を使用した。夕張川の粒度分布は、鹿野川ダムの粒度分布に比べ粗粒化する結果となった。凝集材を加えずに静置したケースで比較しても、鹿野川ダムの方が濁度の低減が緩やかなことから、夕張川よりもむしろ鹿野川ダムの方が凝集しにくい濁水と考えられる。

以上より、夕張川と鹿野川ダムについて凝集効果の差異を pH、ゼータ電位、粒度分布の観点から説明することは難しい結果となった。このほか、凝集効果を左右する要因として、凝集フロックの密度の差、凝集フロックの形状の差などが考えられるが、これらの要因分析については今後の課題としたい。

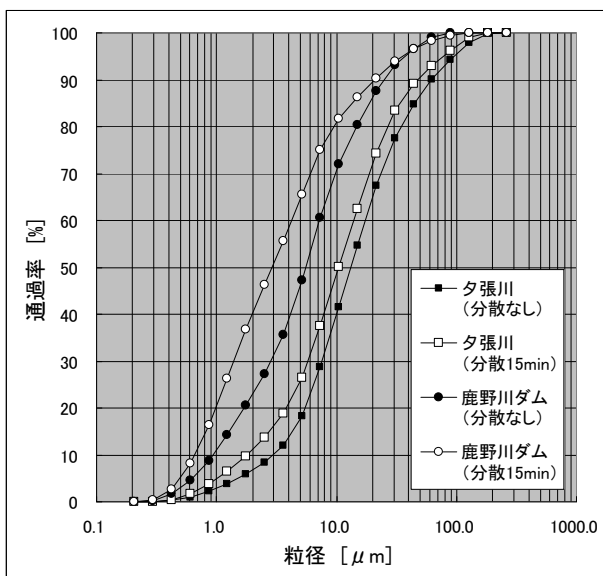


図-9 試料の粒度分布

3. 5 凝集処理システムの開発

3. 5. 1 凝集処理システムの概要

前述の凝集処理装置を拡張し、大型水槽を用いた凝集処理システムを開発し、模擬濁水を試料にアロ

フェンを用いた凝集処理を行い、システムの有効性を検討する。凝集処理システムは、国土技術政策総合研究所河川水理実験施設に設営した。システムの構成要素は、次のとおりである。

- 1) 凝集処理水槽：
L=8m、B=6m、H=1.5m、有効水深 D=1.2m
(写真-7) (写真-8)
- 2) 凝集材分散装置：
(株) エス・エム・テ-製
浸漬型超音波洗浄機 SC600D
出力 600W 発振周波数 20kHz±3kHz
(写真-9) (写真-10)
- 3) 攪拌装置：
二重管攪拌装置
家庭用水中ポンプ 13L/min 4 台付き (図-10)
- 4) 比較沈降筒
φ 390mm、H=2.2m、有効水深 D=2.0m (写真-11)



写真-7 凝集処理水槽（貯水前）

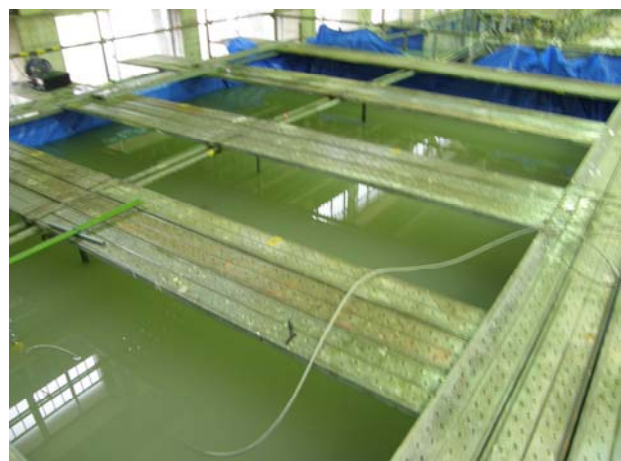


写真-8 凝集処理水槽（貯水後）



写真-9 凝集材分散装置の発振部

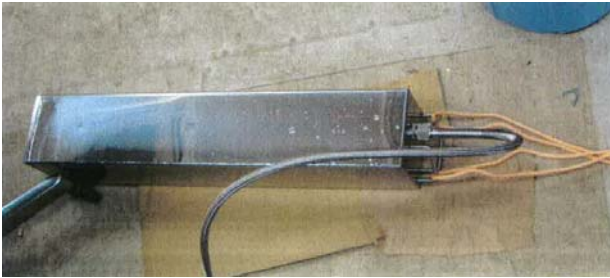


写真-10 凝集材分散装置の振動子

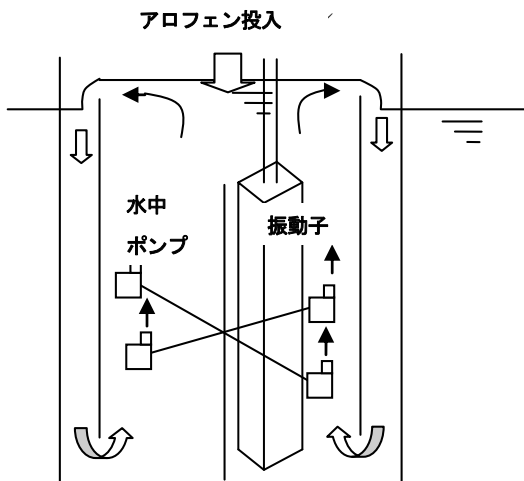


図-10 攪拌装置



写真-11 比較沈降筒

3. 5. 2 実験方法

実験には、川治ダム貯水池から採取した底泥を材料とする模擬濁水を用いた。模擬濁水は、初期濁度 50NTU 程度、24 時間経過後の濁度 20NTU 以上を目標に製造した。製造手順は、次のとおり。

- 1) 大型水槽に予め約 56m³ の水道水を投入した。
- 2) 容積 0.8m³ のポリタンク 2 基に、合わせて湿潤重量 154kg の底泥を投入し、水道水で希釈後に攪拌し、一次懸濁液 1.6m³ を作成した。
- 3) 6 時間静置後、一次懸濁液の底部 20% を残し、上澄み液 1.28m³ を別のタンクに移し、水道水を用いて希釈し、二次懸濁液 2.8m³ を作成した。
- 4) 24 時間静置後、二次懸濁液の底部 20% を残し、上澄み液を大型水槽に移した。この作業と並行し、大型水槽内の模擬濁水の濁度が均質となるよう、水中ポンプを用いて攪拌した。
- 5) 大型水槽内の濁度がおよそ 50NTU になった時点で、水槽内の模擬濁水 0.4m³ を 2 基の比較沈降筒に移した。比較沈降筒は無処理の濁水の濁度変化を把握することを目的に設置した。

模擬濁水の製造終了後、凝集材の投入と分散処理・攪拌処理を行った。初期濁度おおよそ 50NTU の模擬濁水に対し、24 時間静置後 5NTU 以下となるよう目標を設定し、凝集材投入量を 90 mg-dry/L に設定した。アロフェンは、あらかじめ水道水に懸濁させ、濃度 118.4 g-wet/L、体積 15.0 L の懸濁液として準備した (表-5)。凝集材の投入と分散処理・攪拌処理は、大型水槽を 8 区分した処理区画で、以下の手順により実施した (図-11)。

- 1) 各処理区画 (L=2m、B=3m、D=1.2m) に処理ポイントを 6 点設定し、最初のポイントに二重管構造の攪拌装置を、また、攪拌装置の内側に凝集材分散装置の振動子をセットした。
- 2) アロフェン懸濁液を投入しながら凝集材分散装置と攪拌装置を同時に 20min 運転した。水面から投入した凝集材は振動子により分散させ、また、模擬濁水は攪拌装置の底部から装置中央部に取り込まれ、凝集材と濁質が装置の内部で衝突してフロックを形成するよう処理した。
- 3) 残りの 5 ポイントにおいて、同様の作業を繰り返した。1 区画あたりの処理時間は合計 2 時間とした。
- 4) 以上の作業を 8 区画について繰り返し実施した。なお、8 区画のうち 2 区画については試行錯誤を繰り返したことから、分散時間・攪拌時間と

も各1時間となった。

大型水槽ならびに比較沈降筒において濁度の経時変化を測定した。測定時刻は、分散処理・攪拌処理の開始前、終了直後、3時間後、6時間後、12時間後、24時間後、48時間後、72時間後、96時間後の計9回とした。濁度の測定ポイントは水槽に貯留した濁水の上層・中層・下層各8点とし、2基の比較沈降筒についても上層・中層・下層で測定した。ここで、上層とは水面から10cm、中層とは水面から60cm、下層とは水面から110cm下方を指す。濁度の測定には、ホルマジン溶液により同定した濁度計を使用した。

このほか、模擬濁水の濁度とSSの相関を調べるため、処理開始前の水槽ならびに沈降筒内から計10検体の試料を採取した。さらに、分散処理・攪拌処理の開始前の模擬濁水ならびに終了後96時間経過後の沈殿物を採取し、レーザー回折・散乱光法を用いて粒度分布を測定した。

時変化を、図-12に示す。ここで、経過時間については、分散処理・攪拌処理開始時を-21hr、終了時を0hrとして整理した。分散処理・攪拌処理に要した時間は実質16時間であったが、途中5時間の休憩を取ったため、終了までに21時間を要した。濁度の測定は、大型水槽の各層で8点、沈降筒の各層で2点実施し、ここではこれらの平均値を図示した。

大型水槽の濁度について整理する。処理開始前の濁度は、上層の平均で37.9NTU、中層の平均で55.0NTU、下層の平均で56.3NTUとなり、全層平均で49.7NTUとなった。平均値では模擬濁水の初期濁度の目標値「50NTU程度」を満たすものの、上層では他の層に比べ濁度が低く、水中ポンプを用いて水槽内を攪拌したにもかかわらず、模擬濁水の濁度が均質とはならなかった。分散処理・攪拌処理終了直後の濁度は上層の平均で29.4NTU、中層の平均で34.4NTU、下層の平均で41.8NTUとなり、分散処理・攪拌処理中にも濁質と凝集材がフロックを形成し、沈降を促進させたと考えられた。24hr経過後の濁度は、10.2~10.9NTUとなり、各層ともほぼ同様な濁度となった。凝集は、0hr~24hrの間に大きく進行したものの、「24時間静置後に5NTU以下」という目標は達成できなかった。その後の濁度低減は緩やかで、72hr経過後に全層平均で4.8NTUとなり、処理前の濁度の1/10以下にまで低減した。

比較沈降筒の濁度について整理する。-21hrの濁度は、56.2~59.7NTUとなり、上層でやや低いものの各層ともほぼ同様な濁度であった。0hrの濁度は上層で46.1NTU、中層・下層で57.4~57.7NTUとなり、21時間の間に濁度の低減が見られたのは上層だけとなった。その後も上層の濁度は徐々に低減するものの、中層・下層の低減は緩やかで、72hr経過後においても中層・下層平均で49.1NTUとなった。模擬濁水の調整の目標とした「24時間経過後の濁度20NTU以上」は十分満たされた。なお、3hrと6hrの間で上層の濁度が上昇しているのは、室温の変化の影響により沈降筒内に対流が生じ、中層・下層から上層に土粒子が浮上したためと考えられる。

比較沈降筒の中層・下層、大型水槽の中層・下層で濁度の経時変化を比較する。これらの層では、分散処理・攪拌処理開始前の濁度が55.0~59.6NTUとほぼ等しいことから、凝集処理の効果の把握に適すると考えた。ここで、中層・下層の平均値を取ると、24hrの濁度は、比較沈降筒で56.2NTUとほとんど変化が見られない一方、大型水槽では、10.9NTUとな

表-5 凝集材懸濁液の濃度と体積

大型水槽容積 [m ³]	1区画あたり 体積 [m ³]	乾燥アロフェン 投入濃度 [mg-dry/L]	アロフェン含水率 [%]
57.6	7.2	90.0	63.5
湿潤アロフェン 投入濃度 [mg-wet/L]	1区画あたり 湿潤アロフェン 投入量 [g-wet]	アロフェン懸濁液 作成濃度 [g-wet/L]	1区画あたり アロフェン懸濁液 投入量 [L]
246.6	1775.3	118.4	15.0

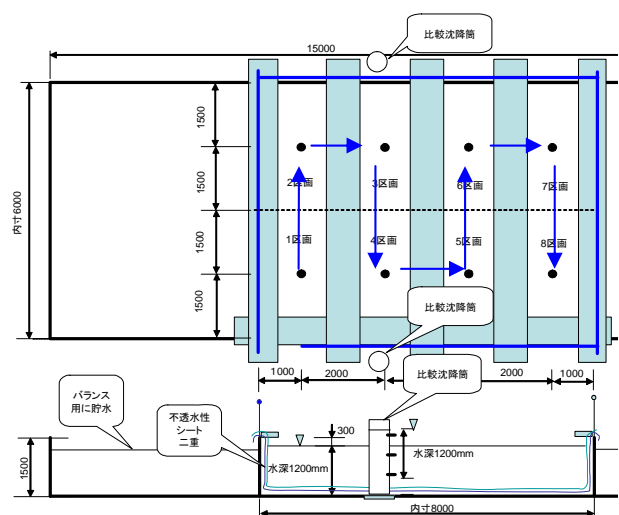


図-11 分散処理・攪拌処理の手順

3. 5. 3 実験結果 (濁度の経時変化)

大型水槽ならびに比較沈降筒で測定した濁度の経

り、濁度が大きく低減した。さらに、72hr では比較沈降筒で 49.1NTU、大型水槽で 5.0NTU となり、当該システムを用いた凝集処理の効果が十分把握された。なお、大型水槽・比較沈降筒とも実験施設の室温の影響を受ける条件下で実験を行った。大型水槽は平面的に広く、また、比較沈降筒は鉛直方向に長いことから、両者の対流機構の条件が一致せず、比較沈降筒では大型水槽に比べ土粒子の浮上の影響をより大きく受けたとも考えられる。

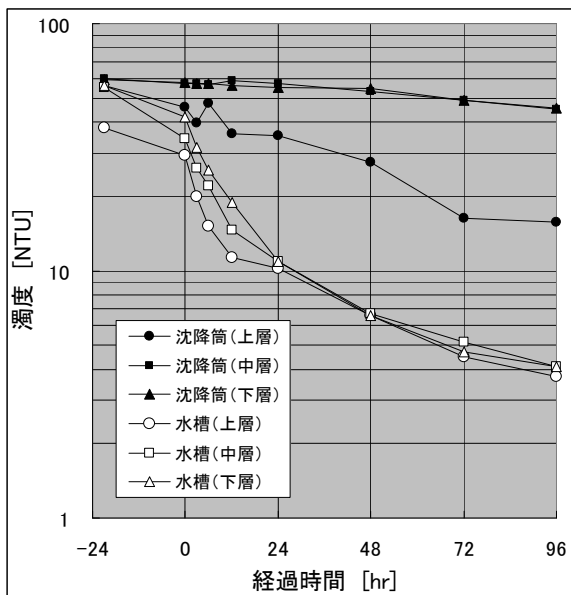


図-12 濁度の経時変化 (大型水槽)

3. 5. 4 実験結果 (SS と粒度分布)

処理開始前の水槽ならびに沈降筒内から計 10 検体の試料を採取し、濁度と SS の関係をまとめたものを図-13 に、さらに、模擬濁水を構成する土粒子ならびに凝集フロックの粒度分布を図-14 に示す。

濁度と SS の関係を整理する。濁度の範囲 45.7～58.3NTU に対し SS は 37～48mg/L となり、SS は濁度にほぼ比例する結果となった。これらの結果を用いて回帰式を求めると、

$$Sus = 0.81Tur \quad (3)$$

ここに、 Sus : SS[mg/L]、 Tur : 濁度[NTU]である。当該模擬濁水については、SS は濁度の約 0.8 倍となった。

模擬濁水を構成する土粒子と凝集フロックの粒度を比較する。模擬濁水を構成する土粒子はほぼ粒径 $10\mu\text{m}$ 以下であり、濁水が難沈降性の土粒子で構成されていることが分かる。一方、凝集済みフロックでは $10\mu\text{m}$ 以下の占める割合は 56.4%となり、難沈

降性の土粒子の割合が大きく減少する一方、粒径 $10\mu\text{m}$ 以上のフロックが多く形成される結果となった。本研究で開発した凝集処理システムの有効性が、濁度の経時変化のみならず粒度分布の変化からも裏付けられた。

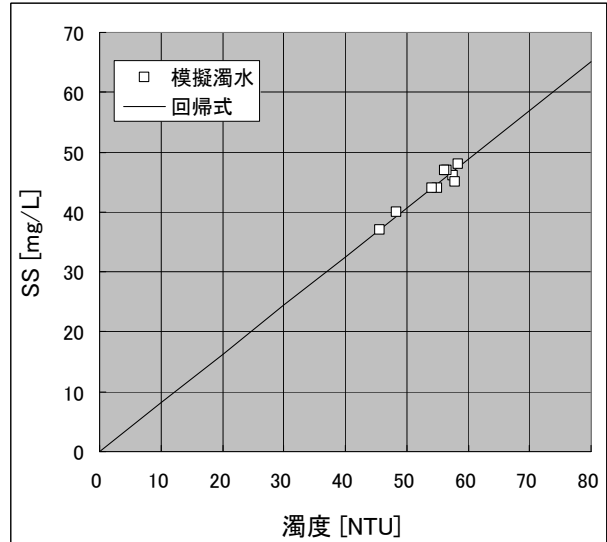


図-13 模擬濁水の濁度と SS

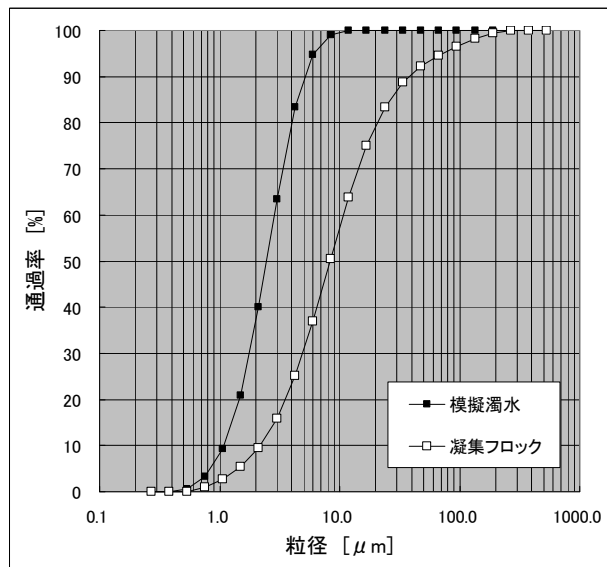


図-14 濁水中の土粒子と凝集フロックの粒度分布

4. 現地実証実験¹³⁾

4. 1 実験目的

当チームではこれまで、アロフェンを凝集材として濁水を効率的に凝集させる分散方法・攪拌方法について検討してきた。また、現地での実用化を想定し、凝集効果の下方持続性について考察した。さらに、凝集フロックの沈降現象を観察し、フロック径

と沈降速度の関係を整理した。本章では室内実験から得られた知見を基に現地実験を行って凝集効果を確認するとともに、実用化に向けた課題を整理する。

4. 2 実験方法

4. 2. 1 予備実験

現地実験に先立ち、凝集材の投入量の目安を付けることを目的に予備実験を行った。実験ケースを表-6に、また、実験手順を以下に示す。

1) 模擬濁水の製造

山須原ダム貯水池から採取した底泥を材料に、模擬濁水を製造した。底泥を純水に溶かし、数分間静置後の上澄み液を採取し、初期濁度がおおよそ90 NTUになるよう調整した。

2) 超音波分散

所定量のアロフェンを100mLの濁水に溶いた後、900mLの濁水と混合し、周波数20kHz、出力600Wの超音波分散装置を用いて20sec間分散処理した。

3) 急速攪拌

分散処理後のアロフェン・濁水混合液をジャーテスターに静置し、150rpmで180sec間攪拌した。

以上の手順を経た後、ビーカーを静置の上、水面下4cmの濁度の経時変化を測定した。濁度の測定には、ホルマジン溶液により同定した濁度計を使用した。

表-6 実験ケース（山須原貯水池）

ケース No.	1	2	3	4	5	6	7
採取地点	山須原貯水池	山須原貯水池	山須原貯水池	山須原貯水池	山須原貯水池	山須原貯水池	山須原貯水池
サンプル濁度 [NTU]	92	92	92	92	92	92	92
サンプルpH	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66
アロフェン濃度 [mg/L]	30	60	90	180	270	360	---
超音波分散 [sec]	20	20	20	20	20	20	---
急速攪拌 [sec]	180	180	180	180	180	180	---

4. 2. 2 現地実験

現地実験は、山須原ダム貯水池の堆積土砂を湖内移動する際に生じる濁水を、湖岸に設置した2基の水槽に各6.0m³注入して実施した。このうち、一方の水槽は凝集処理を行い（水槽1）、他方の水槽は何ら処理を行わず、そのまま静置した（水槽2）。凝集処理の手順は次の通りとした。

1) アロフェン懸濁液の作成

試料となる濁水の濁度285~290 NTUに対しアロフェン投入量を450mg/Lに設定し、乾燥重量に換算して2.7kgの湿潤アロフェンを準備した。次に、湿

潤アロフェンを少量の濁水に混ぜ合わせ、家庭用ミキサーでペースト状に混合した。さらに、これをタンクに移し、0.5m³の濁水と混合してアロフェン懸濁液を作成した。

2) 超音波分散+攪拌処理

アロフェン懸濁液0.5m³をタンクから水槽に移し、5.5m³の濁水と混合し、アロフェン・濁水混合液を作成した。予備実験で使用した周波数20kHz、出力600Wの超音波分散装置を用いて180min間分散した。これと同時に吸水量13L/minの水中ポンプ4台を用いて、アロフェンによる濁質の吸着が進行する様、水槽内を攪拌した（写真-12）。以上の手順を経た後に静置し、2基の水槽の上層部、下層部それぞれについて濁度の経時変化を測定した。濁度の測定には、ホルマジン溶液により同定した濁度計を使用した。

3) 試料分析

無処理のまま静置する水槽2より濁水を取り分け、SSを測定するとともに、試料を希釈して濁度を測定し、濁度とSSの関係を整理した。また、濁水を構成する土粒子のゼータ電位ならびに粒度分布を測定した。ゼータ電位の測定には、Malvern社製Zetasizer Nano ZSを用いた。粒度分布の測定には、(株)島津製作所製SALD 2300を使用した。



写真-12 現地実験の状況

4. 3 実験結果

4. 3. 1 予備実験

濁水に投入するアロフェン量を6段階に変化させ、濁度を比較した（写真-13）。このうち、凝集処理直後から60min経過するまでの経時変化を抽出し、図-15、図-16に示す。

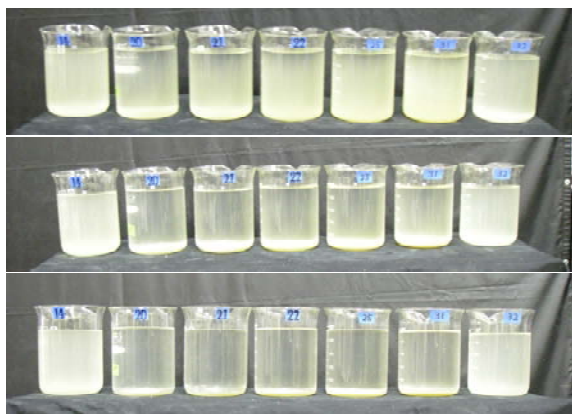


写真-13 静置後の濁度の変化 (山須原ダム)
 (上から静置 1 分後、15 分後、60 分後)
 (左からケース 1、ケース 2、……)

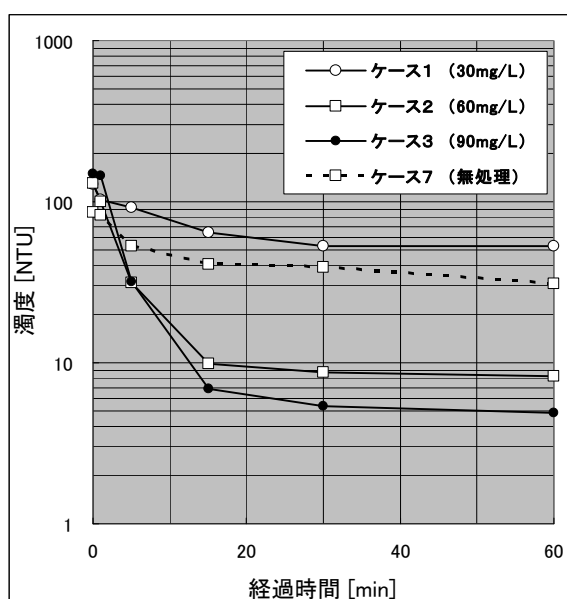


図-15 濁度の経時変化 (予備実験) (1)

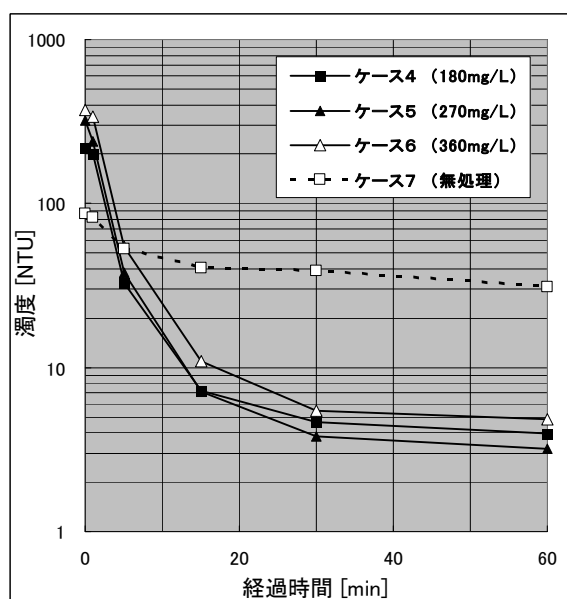


図-16 濁度の経時変化 (予備実験) (2)

ケース 4 を例に、濁度の経時変化を概観する。初期濁度 92 NTU の濁水は凝集材の添加により濁度が上昇し、凝集処理直後は 217 NTU を示した。その後は時間の経過に伴い徐々に低減する状況が把握された。処理後 15 min 経過した段階では 7.3 NTU、60 min 経過後には 4.0 NTU となり、60 min で濁度が 1/20 以下に低減した。次に、アロフェンの投入量と 60 min 経過後の濁度について考察する。ケース 3~ケース 6 ではいずれも 60 min 経過後の濁度が 3~5 NTU となり、十分な凝集効果が認められた。本結果より、試料の濁度 90 NTU に対し 90mg/L 以上のアロフェン投入が必要と判断した。

4. 3. 2 現地実験

凝集処理した水槽 1、無処理のまま静置した水槽 2 について、静置後 3 時間の状況を写真-13 に、また、濁度の経時変化を測定した結果を、図-17 に示す。ここで、分散・攪拌処理開始時刻を -180 min、分散・攪拌処理終了時刻を 0 min とし、-180 min から 1440 min までの濁度の経時変化を整理した。分散・攪拌処理開始時の濁度は、水槽 1 の上層・下層平均で 290 NTU、水槽 2 の上層・下層平均で 285 NTU であったが、水槽 1、水槽 2 とも時間の経過とともに濁度が低減した。特に、凝集処理をした水槽 1 では、凝集処理中にもフロックの形成が目視で確認され、濁度が大きく低減した。実験の前半で、上層の濁度が下層より大きい数値を示したが、これは強風により水面付近が攪乱されたためである。1440 min 後の濁度は凝集処理した水槽 1 の上層・下層平均で 13 NTU、無処理である水槽 2 の上層・下層平均で 186 NTU となり、アロフェンによる凝集効果が現地実験においても確認された。



写真-14 静置 3 時間後の水槽 1 (右手前) と水槽 2 (左奥)

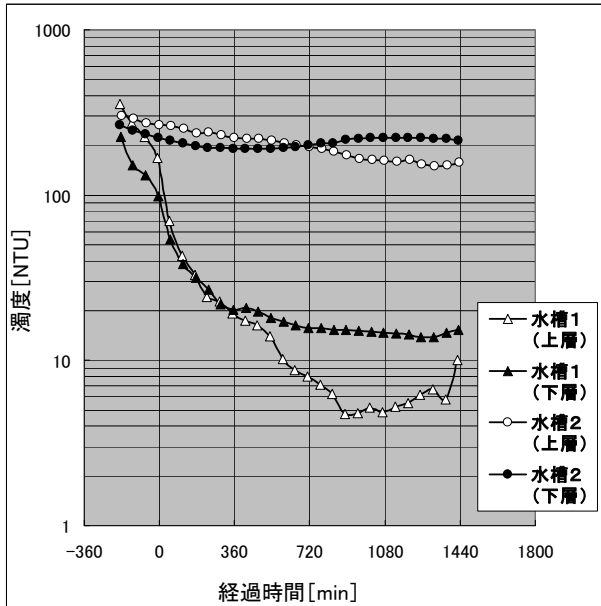


図-17 濁度の経時変化（現地実験）

現地実験で用いた濁水の特性的について、「3. 4 濁水の特性と凝集効果」で取り上げた夕張川河水・鹿野川ダム貯水池濁水の分析結果と対比して整理する（表-7、図-18、図-19）。山須原ダムから採取した濁水（以下、「山須原ダム」と略す。）は濁度 290 NTU に対し SS 200 mg/L となり、SS は濁度の 2/3 程度の値を示した。山須原ダムの SS に対する濁度の比は、3. 4 で述べた夕張川と同等の値であり、鹿野川ダムよりも高い値である。現地実験では凝集材を 450 mg/L に設定したことから、 R_c （凝集材投入比）は 2.25 となった。凝集材投入比 2.25 は、鹿野川ダムピーカー実験において 60 min 静置後に濁度比が 0.1 に低減した凝集材投入比 2 と同程度である。山須原ダムの pH は 7.36 であり、夕張川・鹿野川ダムと比較して低く、ほぼ中性の値を示した。ゼータ電位は -23.1~ -23.4 mV であり、超音波分散の有無でほとんど変化せず、また、夕張川・鹿野川ダムより大きな絶対値を示した。粒度分布を比較すると、山須原ダムでは夕張川・鹿野川ダムに比較して粒度が粗く、粒径 10 μ m 以下の粒子の占める割合を比較すると、いずれも分散なしの試料で夕張川 40%、鹿野川ダム 70% に対し、山須原ダムでは 25% となった。

「3. 4 濁水の特性と凝集効果」では、「凝集効果の差異を pH、ゼータ電位、粒度分布の観点から説明することは難しい」と記述したが、山須原ダムで凝集効果の得られる 1 つの要因として、ゼータ電位の絶対値が高いことが考えられた。

表-7 試料の濁度・SS・pH・ゼータ電位

	濁度 [NTU]	SS [mg/L]	pH	ゼータ電位	
				分散なし [mV]	分散15min [mV]
山須原 ダム	290	200	7.36	-23.1	-23.4

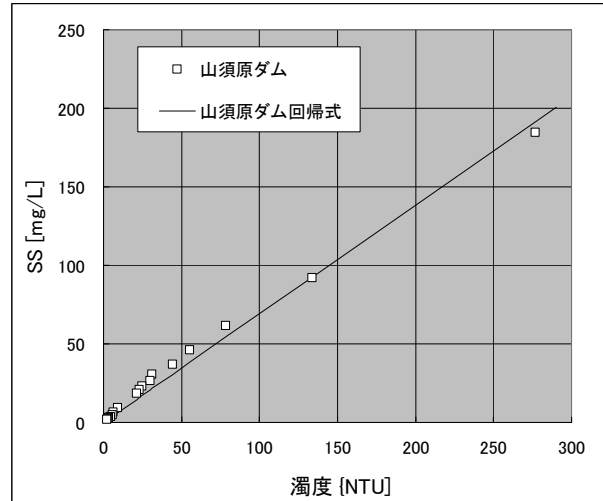


図-18 試料の濁度と SS

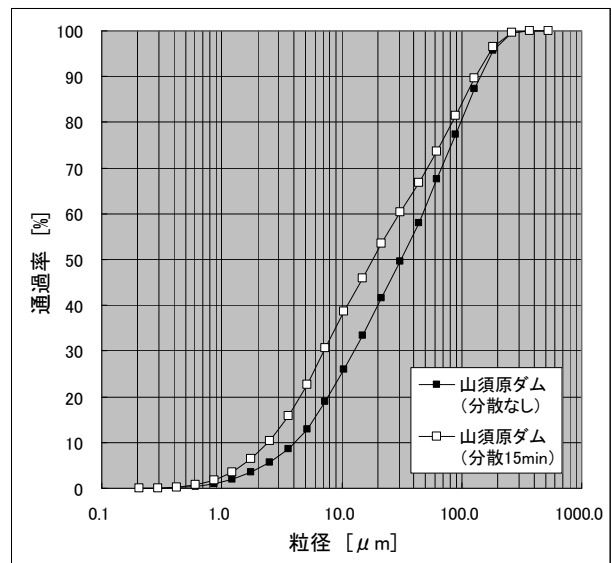


図-19 試料の粒度分布

4. 4 実用化に向けた課題

凝集処理の実用化に向けた課題を整理する。現地実験では予備実験の結果を基に、安全を見越して原水の濁度の 1.5 倍の濃度でアロフェンを投入した。凝集材投入比 R_c は 2.25 であり、アロフェン投入量の縮減が課題として挙げられる。また、現地実験では室内実験と同様、アロフェンを濁水と混合後に分

散処理した。アロフェンを濁水と混合する前に分散処理し、濁水との混合後までアロフェンの分散状態が持続する様な分散手法の開発が課題として挙げられる。

5. 現場適用性の評価

本研究は、ダム工事現場で発生する濁水、貯水池堆積土砂の湖内移動に伴い生じる濁水、貯水池に流入し濁水放流の長期化の原因となる濁水を対象に、環境負荷の発生を抑制しつつ濁水を凝集処理するシステムを開発すること、さらに、処理システムの現場適用性の評価手法を確立することを目的に実施した。ここで、濁水処理システムの現場適用性の評価手順をまとめ、図-20 に示す。

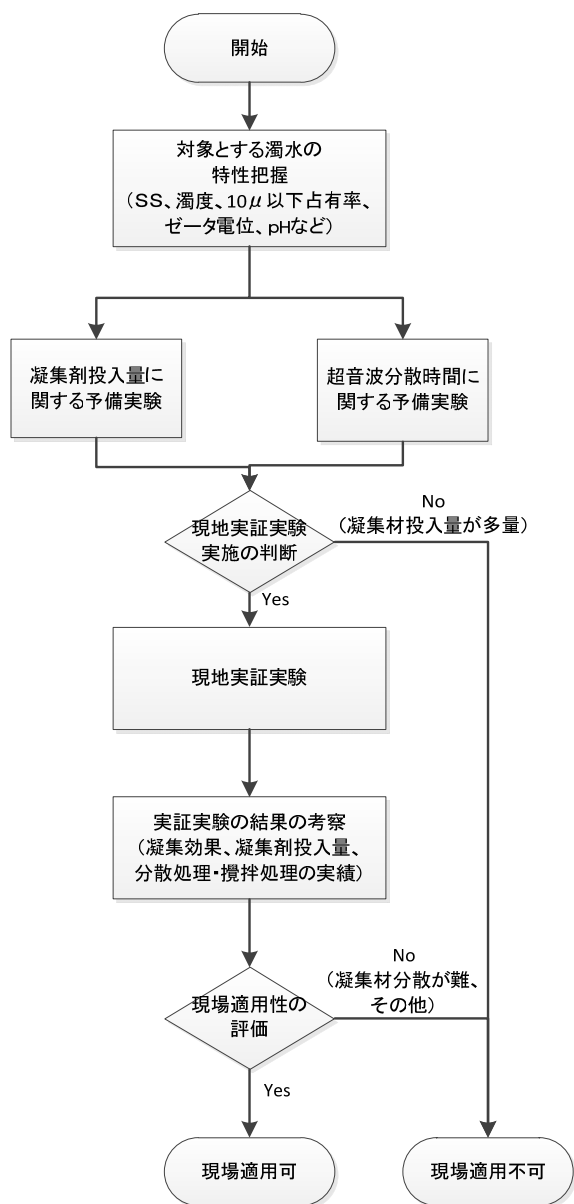


図-20 現場適用性評価フロー

システムの現場適用性の評価にあたっては、まず、第一段階として対象とする濁水の特徴を把握することが必要である。具体的には、濁水のSS、濁度、粒径10 μ m以下の細粒分の占有率、濁水を構成する土粒子のゼータ電位、濁水のpHなどの把握である。これらの基礎データを揃えた上で、第二段階として予備実験を実施する。予備実験では、対象とする濁水に対し、凝集材投入量を変化させ、必要な投入量を把握する。また、超音波による分散時間を変化させ、効率的に凝集が進行するような分散時間を把握する。予備実験の終了後、第三段階として現地実験を実施する。ここでは、予備実験で得られた凝集材投入量、超音波分散の照射時間に関するデータを活用し、現地実験の条件を決定する。実際に現地で凝集実験を実施した上で、第四段階として濁水処理システムが現地に適用可能かどうか検討する。検討項目としては、凝集材投入量、超音波分散の方法、実施に伴う設備、作業人員、作業期間、処理費用等が挙げられる。

6. まとめ

本研究は、ダム工事現場で発生する濁水、貯水池堆積土砂の湖内移動に伴い生じる濁水等を対象に、環境負荷の発生を抑制しつつ懸濁物質を凝集処理するシステムを開発すること、さらに、処理システムの現場適用性の評価手法を確立することを目的に実施した。研究により得られた成果を、以下にまとめる。

- ・ 天然凝集材であるアロフェンを用いた室内実験の結果、湖内工事で発生する濁水に対し凝集効果を確認した。
- ・ 凝集処理システムを開発し、湖内移動に伴い生じる濁水を試料に、現地において実証実験を行った結果、室内実験と同様、十分な凝集効果を確認した。
- ・ 当該システムの現場適応性を評価した結果、当該システムは十分な凝集効果はあるものの、凝集材の投入量削減と効率的な分散手法の確立が課題として挙げられた。
- ・ 以上の結果を基に、凝集処理システムの現場適用性の評価方法を提案した。

本研究は、主に室内実験ならびに小規模な現地実験で得られた知見をまとめたものであり、濁質が空間的に広く分布する貯水池内で凝集処理を実用化するには、多くの課題が残されている。今後は課題を

認識の上、室内実験・現地実験を行い、天然凝集材による貯水池濁水対策の実現に向け、研究を前進させたい。

謝辞

本研究を実施するにあたり、データの提供、現地での採水などで国土交通省鬼怒川ダム統合管理事務所川治ダム管理支所、同省山鳥坂ダム工事事務所、同省夕張スーパーダム工事事務所、宮崎県河川課ならびに九州電力（株）耳川水力整備事務所の方々にご協力頂きました。また、実験結果をまとめるにあたり、筑波大学大学院足立泰久教授、小林幹佳准教授、同大学北アフリカ研究センター入江光輝准教授より、貴重な助言をいただきました。ここに、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 海野仁, 箱石憲昭, 星野公秀:「天然凝集材アロフェンを使用した貯水池濁質凝集に関する一考察」, 土木学会第63回年次学術講演会概要集第Ⅱ部門, pp.259~260, 2008.9
- 2) 海野仁:「天然凝集材による貯水池の濁水長期化対策」, 土木学会環境水理部会研究集会 2008in 白浜, 2008.6
- 3) Hitoshi UMINO, Noriaki HAKOISHI: “Turbid water treatment in a reservoir using natural coagulant”, The 5th EADC International Symposium on Co-existence of Environment and Dams, October 2008
- 4) 海野仁, 箱石憲昭:「天然凝集材アロフェンを用いた貯水池濁水凝集実験」, ダム技術 No.267, pp.16~23, 2008.12
- 5) 海野仁, 箱石憲昭:「天然凝集材を用いた貯水池濁水処理における凝集効果の下方伝播」, 土木学会第65回年次学術講演会概要集第Ⅱ部門, 2010.9
- 6) 堀岡正和:「新しい凝集剤に関する研究（Ⅰ）—アロフェンを原料とする凝集剤の製法—」, 水道協会雑誌第398号, pp.9~16, 1967.11
- 7) 尾崎哲二, 口舩愛, 森本辰雄, 和田信一郎:「火山灰土を原料とする新しい凝集剤の開発」, 土木学会誌 vol.93 No.6, pp.52~55, 2008.6
- 8) 柏井条介, 結城和宏:「天然凝集材（アロフェン）の濁質凝集効果」, ダム技術 No.239, pp.20~28, 2006.8
- 9) 軽部重太郎, 杉本英雄, 藤平雅巳・中石克也:「アロフェンとイモゴライトの分散凝集と荷電特性」, 農業土木学会論文集 No.196, pp.103~110, 1988.8
- 10) 品川化成（株）ホームページ,
<http://www.shinagawa.co.jp/>
- 11) 大内岳, 小林幹佳:「イモゴライトの存在下における標準コロイド粒子の凝集分散」, 平成22年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2010.9
- 12) 似内美貴, 高橋政之輔, 大内岳, 小林幹佳:「イモゴライトの存在下における標準コロイド粒子の凝集分散—その2—」, 平成23年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2011.9
- 13) 海野仁, 箱石憲昭:「天然凝集材を用いた濁水凝集処理に関する現地実験」, 土木学会第68回年次学術講演会概要集第Ⅱ部門, (投稿中)。

Study on environmental friendly coagulation system for turbid water by using natural coagulant

Budget: Grants for operating expenses,
General account

Research Period: 2010-2012

Research Team: River and Dam Hydraulic
Engineering Research Team

Author: Noriaki Hakoishi,
Hitoshi Umino

This study aims to develop environmental friendly coagulation system for turbid water and to establish evaluation method of coagulation system. The system treats turbid water that originates in work site or sediment transport site in a reservoir. Through laboratory experiments using natural coagulant allophone, we found coagulation effects to turbid water obtained from work site in a reservoir. Moreover, we developed coagulation system and conducted site experiment beside a reservoir and confirmed coagulation effects to turbid water caused by sediment transport. Furthermore, we evaluated the applicability of coagulation system and realized that effective distribution of coagulant was a important matter. Finally, we presented evaluation method of environmental friendly coagulation system from the point of site applicability.

Key words: allophone, ultrasonic distribution, coagulation system for turbid water, site experiment.