

◆ 報 文 ◆

天然凝集材（アロフェン）によるダム貯水池濁水の凝集特性

結城和宏* 柏井条介**

1. はじめに考察

貯水池の濁水長期化は、一般には洪水時に流入した濁水が貯水池内に混合貯留され、数 μm 程度以下の微細粒子が非常に緩慢に沈降し、長期にわたり貯水池内を浮遊することにより生じる。この貯留水が徐々に放流されること、ダムの建設前に比べ洪水後下流河川が濁る期間が長引くことになる。

濁水長期化の具体的な定義については、現在のところ明確な設定方法は無いが、例えば、ダム流入水や下流の合流河川が清澄な状態で、1～数週間程度以上見た目の濁りが継続する場合に濁水が長期化したと言われる。濁水の長期化が与える影響については、不明な部分が多いが水棲生物に影響を与えるとされている。また、明らかに水辺空間の景観を損ねるのである。

ダム貯水池における濁水の長期化対策としては種々の対策¹⁾が試みられており、一般的な対策として選択取水設備による対策が従来より多く用いられてきている。しかし、大規模洪水や循環期の擾乱によりダム貯水池全体が濁水化し、さらに、表層において速やかな沈降が期待できない場合には、ダム下流の濁水長期化を避けることは困難である。

こうした場合の対策として、濁水に凝集効果のある添加物を貯水池に投入し、沈降を促進する方法が考えられるが、化学薬品の使用は将来も含め貯水池や下流河道等の環境への影響が懸念される。また、プラントを用いた凝集方法も考えられるが、処理後の沈殿物の埋め立て用の用地確保および経済上の問題が大きい。

以上の状況を鑑み、土木研究所河川・ダム水理チームでは、濁水処理プラントや貯水池内で凝集・沈降させた沈降物を貯水池へ還元できる凝集

剤として、環境的、社会的ハードルが比較的低いと考えられる天然凝集材を取り上げ、その凝集沈降特性を把握するとともに、利用方法の検討を行っている。

ここで考えている天然凝集材とは土コロイドであり、土コロイドである濁質そのものも対象に含まれる。土コロイドは周辺水のpH環境により帯電し、凝集や分散現象を生じることが知られている。現象の発生状況は土コロイドの種類により異なるとされており、本報告では数種の貯水池底泥について、pHと凝集特性の関係を調査した。また、帯電性が強く、凝集材としての効果が期待されるアロフェンを抽出し、貯水池底泥の凝集効果を把握した。

2. アロフェン

アロフェンは風化火山灰、風化浮石、火山灰由来土壌に多く含まれるナノマテリアルであり、水との親和性や吸着能力に優れることから、産業廃棄物処理場における有害汚濁物質吸着剤などの様々な工業的応用が期待されている²⁾。

火山国である日本では、北海道、東北および九州地方を中心に全国に存在しており、天然材料としての相当量の確保が可能であることから、今回凝集材の候補として取り上げることとした。

3. 実験の概要

実験ケースの一覧を表-1に示す。ケース1～3が貯水池底泥のみによる凝集特性を調査したもの、ケース4～13がアロフェン投入による効果を調査したものであり、それぞれpH、攪拌強度・時間、底泥濁水の濃度、アロフェン投入量を変化させた。

実験は、1L (ϕ 約105mm、高さ150mm)のガラスビーカーを用いて行い、水面下4cmで15ml程度の採水を行い、濁度の変化を測定した。ここに、水面下4cmは、粒子の沈降速度が一定の場合に、貯水池水面下1mの1日後の濁度に相当する。

The Characteristics on the Flocculation of Turbid Water Using the Natural Flocculation Agent.

表-1 実験ケースにおける凝集・沈降条件 (太線囲みは、比較条件)

実験ケース	模擬濁水		アロフェン	pH調整		急速攪拌方法		緩速攪拌方法		
	濁質	濁度	投入量	pH (アロフェン込)	pH調整剤	添加量	攪拌強度	攪拌時間	攪拌強度	攪拌時間
ケース-1	A遊水池底泥	50NTU	なし	pH2.8~3.9	96%酢酸	30~6000 μ l/l	150rpm	10分	40rpm	90分
ケース-2	A遊水池底泥	50NTU	なし	pH2.9~3.0	96%酢酸	3000 μ l/l	150rpm	10分	40rpm	0~240分
ケース-3	A遊水池底泥	50NTU	なし	pH2.9~3.0	96%酢酸	3000 μ l/l	150rpm	10分	5~150rpm	90分
ケース-4	アロフェン	50NTU	なし	pH3.0~4.5 pH5.0~6.0	96%酢酸 1N水酸化 ナトリウム	1~2544 μ l/l 12~40 μ l/l	150rpm	10分	なし	なし
ケース-5	A遊水池底泥	50NTU	10~5600mg/l	pH3.6~4.1	96%酢酸	40 μ l/l	150rpm	10分	40rpm	90分
ケース-6	B貯水池底泥	50NTU	10~5600mg/l	pH3.8~4.1	96%酢酸	40 μ l/l	150rpm	10分	40rpm	90分
ケース-7	C貯水池底泥	50NTU	10~5600mg/l	pH3.9~4.2	96%酢酸	40 μ l/l	150rpm	10分	40rpm	90分
ケース-8	C貯水池底泥	10~399NTU	180mg/l	pH4.0	96%酢酸	17~72 μ l/l	150rpm	10分	40rpm	90分
ケース-9	C貯水池底泥	10~397NTU	360mg/l	pH4.0	96%酢酸	19~61 μ l/l	150rpm	10分	40rpm	90分
ケース-10	A遊水池底泥	50NTU	180mg/l	pH3.7~3.8	96%酢酸	40 μ l/l	150rpm	5~240分	なし	なし
ケース-11	A遊水池底泥	50NTU	180mg/l	pH3.7~3.8	96%酢酸	40 μ l/l	150rpm	10分	10~245rpm	90分
ケース-12	A遊水池底泥	50NTU	180mg/l	pH3.4~5.4	96%酢酸	0~150 μ l/l	150rpm	100分	なし	なし
ケース-13	B貯水池底泥	50NTU	1000mg/l	pH3.8~5.8	96%酢酸	0~80 μ l/l	150rpm	10分	40rpm	90分

なお、凝集材としては、濁度50NTUの貯水池濁水を1日1m程度の速度で1NTU程度にすることができれば、相当の効果があるものと考えている。

現地の泥質には、栃木県A遊水池、同県Bダム貯水池、長野県Cダム貯水池で採取した底泥を使用した。模擬濁水の製造にあたっては、沈降の速い濁質を除去するため、底泥を純水に溶かした泥水を24時間沈降させて水面から17cmまでの濁水を回収し（濁質の粒径はStokes式で1.5 μ m程度以下）、これを模擬濁水の原液とした。模擬濁水は、この原液を純水により濁度を調節して製造した。表-2にX線回折分析によって得られた濁質の鉱物組成を示す。なお、底泥は自然物であり、同じ日に同じ地点で採取したのもであっても泥質、粒度分布等は同一とは限らない。そこで試験体となる模擬濁水はまとめて製造し、条件の異なるビーカーに分けた。また、室温や湿度の差による影響を排除するため、試水を同時に試水凝集反応装置（最大試水数6）に架けた。1ケースの試験体数が6を超える場合は、2回に分けて計測を行った。試験時の室温は16~20℃である。

アロフェンは、栃木県真岡市産のアロフェン製品を用い、投入量の計量を容易にするため自然乾燥させた後、乳鉢を用いて粉体状にすり潰して粉末化したものを凝集材として使用した。(写真-1)

図-1にレーザー回折・散乱式粒度分布形により測定を行った模擬濁水原液の濁質と粉体にしたアロフェンの粒度分布を示す。

表-2 底泥の鉱物同定結果

	A遊水池底泥	B貯水池底泥	C貯水池底泥
スメクタイト	-	◎	-
緑泥石	△	○	◎
雲母粘土鉱物	△	△	○
カオリン鉱物	△	△	-
石英	◎	○	◎
長石類	○	○	○
炭酸塩鉱物	-	-	-

凡例 ◎：多量、○：認められる、△：少量、±：微量、-：不検出

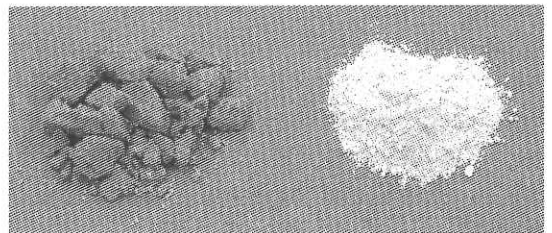


写真-1 アロフェン (左：乾燥前 右：乾燥・粉末)

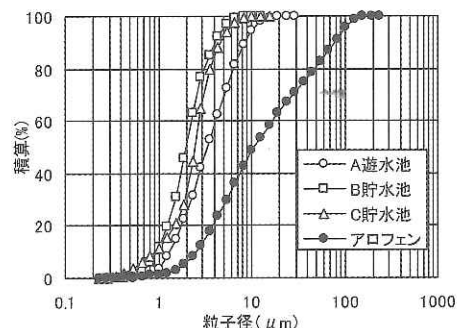


図-1 模擬濁水およびアロフェンの粒度分布

pH調整剤は、酢酸もしくは水酸化ナトリウム水を添加して行った。

攪拌は1つの攪拌棒に4枚の平板翼(17mm×22mm)を持ち、6試水を同時に異なる攪拌強度で攪拌できる試水凝集反応装置を用いて行った。急速攪拌は原則として強度150rpmで10分間行い、その後、調査の比較条件にあわせて緩速攪拌を行った。

試水の濁度の測定は、攪拌終了後1分、5分、15分、30分、1時間、4時間、24時間の時点で行った。濁度の測定は、試水をサンプルセルに入れて測定するタイプのネフェロメトリック法による濁度計を用いて行った。

4. 実験結果

4.1 アロフェンなしでの凝集・沈降現象

A遊水池模擬濁水のpHの違いによる凝集・沈降効果例を図-2に示す。ただし、pH調整前の濁度50NTUの模擬濁水のpHは5.1~5.3である。この結果を見ると、pH4以上では酸性度が上がるほど濁度の低下が現れ、pH2.8では1時間後の濁度が3.7NTUまで低下する。同様に、B貯水池模擬濁水ではpH2.7で1.9NTUまで、C貯水池濁水模擬濁水ではpH2.8で4.6NTUまで低下する。

この模擬濁水の凝集・沈降効果に対する、pH3付近・緩速攪拌強度40rpmにおける緩速攪拌時間の影響を図-3に、緩速攪拌時間90分における緩速攪拌強度の影響を図-4に示す。今、1時間後の濁度の変化を見ると、図-3より緩速攪拌強度が40rpmの場合は攪拌時間が120分で濁度が2.3NTUまで、図-4より緩速攪拌時間を90分の場合は80rpmで濁度が2.0NTUまで低下することが確認できる。

以上から、実験を行った模擬濁水に関しては、凝集材の添加なしでもpH調整剤によりpH3以下に下げ、急速攪拌と攪拌強度40~80rpmで1.5~2時間の緩速攪拌を行うことにより、濁度を2NTU程度まで低減させられることが分かる。従って、pH調整のみにより凝集効果を期待できることが確認される。

4.2 アロフェンの凝集効果

4.2.1 アロフェン単体での凝集・沈降現象

アロフェンのみを濁質とする濁度50NTUの濁水のpHは4.5~5.2であった。この濁水に対して

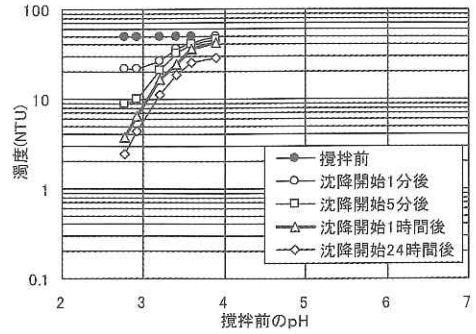


図-2 pHと凝集・沈降効果の関係 (A遊水池の模擬濁水のみ)

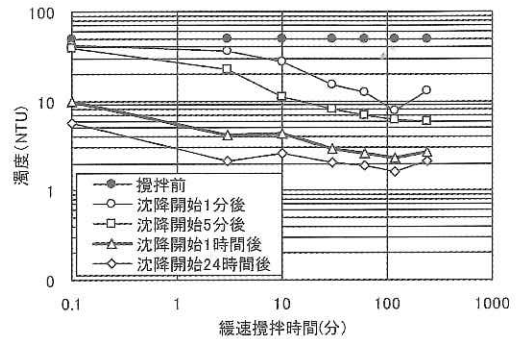


図-3 緩速攪拌時間と凝集・沈降効果の関係 (A遊水池の模擬濁水のみ)

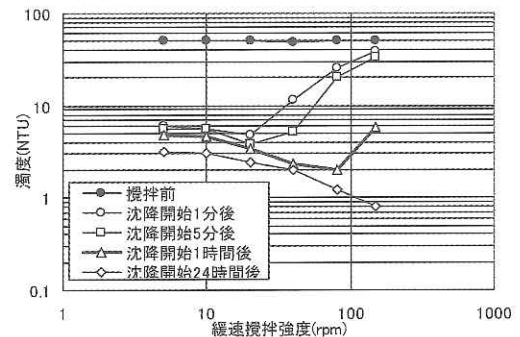


図-4 緩速攪拌強度と凝集・沈降効果の関係 (A遊水池の模擬濁水のみ)

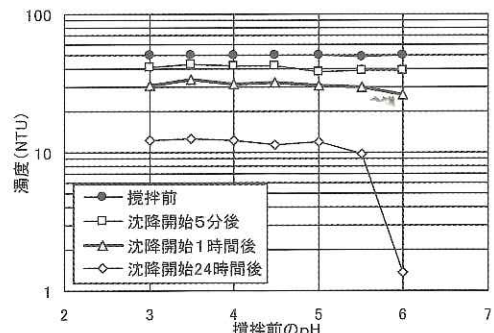


図-5 pHと凝集・沈降効果の関係 (アロフェンのみ)

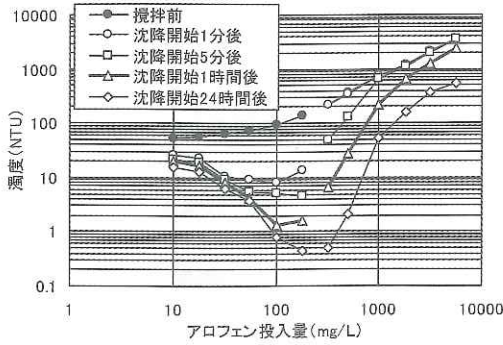


図-6 アロフェン投入量と凝集・沈降効果の関係 (A遊水池の模擬濁水)

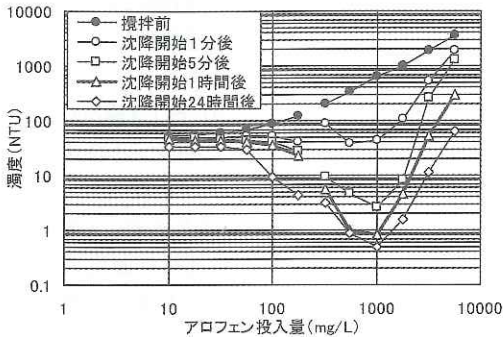


図-7 アロフェン投入量と凝集・沈降効果の関係 (B貯水池の模擬濁水)

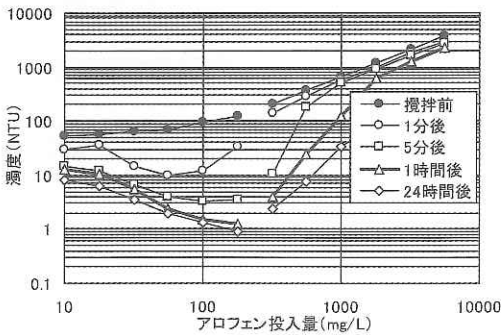


図-8 アロフェン投入量と凝集・沈降効果の関係 (C貯水池の模擬濁水)

pHの調整後の凝集・沈降効果の変化を図-5に示す。1時間後の濁度はpH3~6の全てにおいて濁度は30NTU前後までしか低下しない。pH6において24時間後の濁度が1.4NTUまで低下しているが、限られた条件での凝集効果となっている。また、24時間の時間は、水面から1mの清澄な層を作るのに25日必要とすることを意味しており、濁度の低減速度は比較的小さい。

4.2.2 添加量と凝集効果

A遊水池、B貯水池、C貯水池の模擬濁水にア

ロフェンを添加した場合の添加量と凝集・沈降効果の関係を図-6、7、8に示す。但し、模擬濁水初期濁度50NTU、96%の無水酢酸添加量40 μl/l (pHで3.6~4.3)、150rpmでの急速攪拌10分、40rpmでの緩速攪拌90分で固定している。

今、1時間後の濁度を見ると、濁度が最も低くなるアロフェンの投入量は、A遊水池の模擬濁水で100mg/l、B貯水池の模擬濁水で1,000mg/l、C貯水池の模擬濁水で180mg/lであり、これら攪拌前の各試水の酸性度は、pH3.8、pH3.8、pH3.9である。それぞれの濁度は1.3NTU、0.8NTU、1.3NTUである。ほぼ1NTUまで濁度が低下しており、アロフェンの凝集効果が確認される。

一方、1分後および5分後の濁度をみると、A遊水池、C貯水池の模擬濁水においては、沈降時間が短いほど濁度が最も低くなるアロフェン投入量は少なくなる傾向が見られる。この傾向は、B貯水池の模擬濁水においても、1分後の濁度においてわずかに確認できる。

濁度の時間変化は、模擬濁水を製造した底泥により異なっており、アロフェン投入量と濁度の低下速度に一般的な関係は見あたらない。例えば、アロフェン投入量100mg/lを見ると、A遊水池、C貯水池の模擬濁水では最初の1分で濁度が大幅に低下しその後穏やかに低下しているのに対し、B貯水池の模擬濁水では沈降開始1時間での濁度の低下は小さく、その後濁度が低下している。

ここで、B貯水池において、凝集効果を得るためのアロフェンの投入量は、A遊水池、C貯水池のものに対してかなり大きい。この理由は明らかではないが、粒度分布に特に差がないこと、また、B貯水池の底泥はスメクタイトが主成分となっているが他の2つの底泥からはスメクタイトは検出されていないことから、鉱物組成の違いによる可能性が高い。

4.2.3 濁水の濁度の影響

前項では、濁質によってアロフェンの投入適正量が異なることが分かったが、本項では濁水の濁度によって適正量が異なるか確認をした。濁度10~400NTUのC貯水池の模擬濁水に対してアロフェンを180mg/l添加した場合の結果を図-9に、2倍の360mg/l添加した場合を図-10に示す。180mg/lのアロフェン添加量での1時間後の濁度をみると、模擬濁水の濁度20~400NTUにおいては濁度に

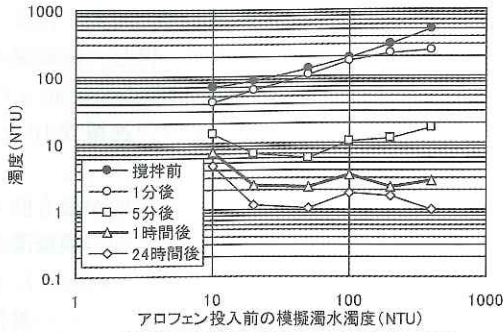


図-9 模擬濁水濁度と凝集・沈降効果の関係 (C貯水池の模擬濁水+アロフェン180mg/l)

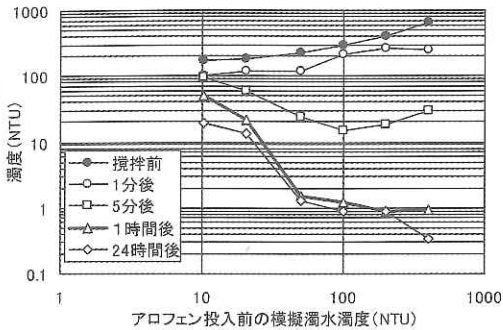


図-10 模擬濁水濁度と凝集・沈降効果の関係 (C貯水池の模擬濁水+アロフェン360mg/l)

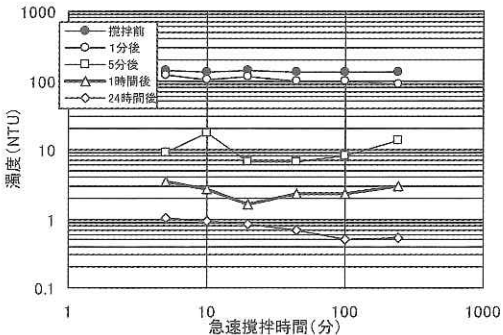


図-11 急速攪拌強度と凝集・沈降効果の関係 (A遊水池の模擬濁水)

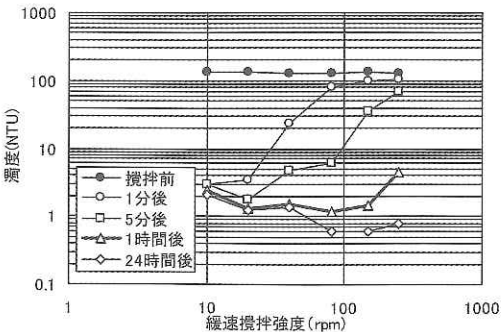


図-12 急速攪拌強度と凝集・沈降効果の関係 (A遊水池の模擬濁水)

よる凝集・沈降効果に大きな違いは見られないが、濁度10NTUの模擬濁水に対しては凝集・沈降効果が低下している。同様に、2倍の360mg/l添加量では10~20NTUの模擬濁水に対して凝集・沈降効果が低下しており、アロフェンの投入量が多いほど、凝集・沈降効果が低減する濁度の上限値が高くなると考えられる。

4.2.4 攪拌条件およびpHの影響

A遊水池の模擬濁水を用いて攪拌条件、pHの影響について調査した。pH3.7付近でアロフェンを180mg/l添加した試水における急速攪拌時間の影響を図-11に示す。急速攪拌時間による、際立った濁度の違いは見られず、急速攪拌は10分程度行えば十分であると言える。

同様の模擬濁水の試水で10分の急速攪拌後の緩速攪拌強度の影響を図-12に示す。1時後の濁度の変化を見ると、濁度の低下が比較的大きいのは強度20~150rpmにおいてであるが、1分および5分での濁度変化を見ると緩速攪拌強度20rpmのみが濁度の低下が大きいの。この結果は、緩速攪拌強度が大きいと凝集によりある程度まで大きくなっ

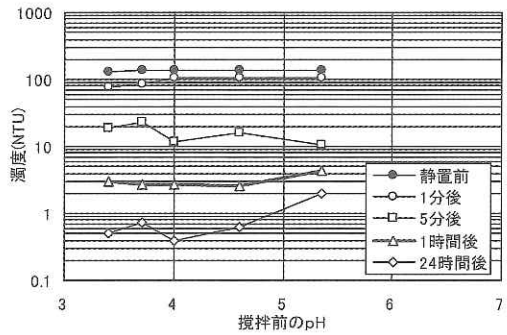


図-13 pHと凝集・沈降効果の関係 (A遊水池の模擬濁水)

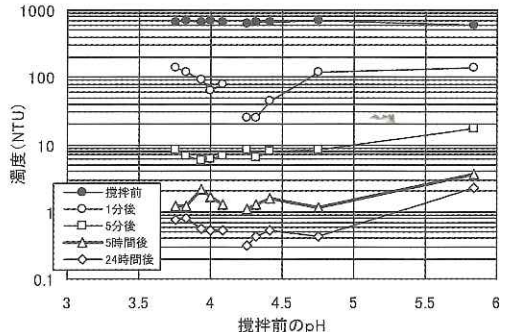


図-14 pHと凝集・沈降効果の関係 (B貯水池の模擬濁水)

た土粒子の集塊が壊れてしまうためと考えられる。

pHの影響については、A遊水池およびB貯水池底泥について検討した。A遊水池模擬濁水にアロフェン180mg/lを添加した場合結果を図-13に、B貯水池の模擬濁水にアロフェン1,000mg/lを添加した場合の結果を図-14に示す。各図とも右端のプロットはpH調整を行っていない試水での濁度である。

図より、いずれの底泥もpH調整を行わなかったpH5.4～5.8でも凝集効果が表れているが、pH4.5では更に効果が高く、pH4.5以下では1時間後の濁度に対するpHによる影響はあまり見られなかった。なお、アロフェン投入によりpH調整を行わなくても1時間後の濁度は2～3NTU程度まで低減している。

5. まとめ

以上の結果をもとに、アロフェンの凝集特性をまとめると以下ようになる。

- (1) 凝集材の添加なしでも、pH調整剤によりpH3以下に下げれば、急速攪拌と1時間半から2時間の緩速攪拌を行うことにより、実用時間内で濁度を2NTU程度まで低減させられる可能性がある。
- (2) 凝集材としてのアロフェンを添加し、適切なpH調整、攪拌を行うことにより、目標（1日1mで50NTUを1NTUに程度に低減）を得ることができた。
- (3) アロフェンの適正な投入量は、濁水の濁度、および濁質によって大きく異なる。
- (4) A遊水池模擬濁水での実験では、急速攪拌の時間による凝集・沈降効果の際立った変化は無く、数分から10分程度で十分である。また、緩速攪拌は、20rpm程度が最も凝集沈降効果が高くなる。

6. おわりに

本報文研究では、天然凝集材を利用した貯水池の濁水長期化対策を検討する基礎調査として、アロフェンの凝集特性の調査結果を報告した。

実験結果からは、アロフェンやpH調整材料の必要量が比較的大きく、長時間の攪拌時間を必要とするが、凝集効果は確認された。例えば0.1m³/sオーダー程度の放水量が小さい場合には利用可能

ではないかと考えている。また、凝集・沈降後のpHの低い処理水を貯水池内や下流河道に直接放流することが環境に影響を与える場合は、放流前に処理水を中和させることで、利用可能ではないかと考えている。

今回の実験では乾燥・粉末化したアロフェンを用いたが、最近行った乾燥前のアロフェン（写真-1の左側）を溶かした水溶液を用いた実験では、条件が乾燥・粉末化したアロフェン使用時よりも高い凝集・沈降効果が得られている。

今後、凝集・沈降効果がよりいっそう得られるアロフェンの投入方法を詳細に検討するとともに、実用化に向けての検討を実施したいと考えている。

参考文献

- 1) 丹羽薫：貯水池機能の保全設備（その1）—水質保全—ダム技術No.62, 1996
- 2) 鈴木正哉：アロフェン・イモゴライトの性質と応用 粘土科学 第42巻第3号144-147, 2003

結城和宏*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研
究グループ河川・ダム水
理チーム主任研究員
Kazuhiro YUUKI

柏井条介**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所水工研
究グループ河川・ダム水
理チーム首席研究員
Josuke KASHIWAI