火山灰土凝集剤の凝集・分散特性と 貯水池濁水処理への適用

COAGULATION AND DISPERSION CHARACTERISTICS OF VOLCANIC ASH COAGULANTS AND THEIR APPLICATION TO TURBID WATER TREATMENT IN A RESERVOIR

海野 仁¹・小林 幹佳²・箱石 憲昭³

Hitoshi UMINO, Motoyoshi KOBAYASHI and Noriaki HAKOISHI

¹正会員 (独)土木研究所 水工研究グループ水理チーム 主任研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 博士(農) 筑波大学 准教授 生命環境系 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1)

³正会員 (独)土木研究所 水工研究グループ水理チーム 上席研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

Coagulation treatment is one of countermeasures for turbid water in a reservoir that is brought by lowering of surface level or sediment transport in a reservoir. We have taken volcanic ash coagulants which contain allophane and investigated their coagulation, dispersion characteristics and electrokinetic phenomena. Moreover, we conducted site experiment of coagulation treatment by using volcanic ash coagulants. Through this study, coagulation was observed when pH of suspension was adjusted to 7 to 9. Zeta potential of coagulants were raised by adding ultrasonic dispersion. High coagulation performance was obtained in site experiment, on the other hand, reduction of coagulants and effective dispersion method were desired for the practical use of volcanic ash coagulants.

Key Words: reservoir, turbid water, allophane, coagulation experiment, pH, zeta potential

1. はじめに

我が国ではこれまでにストックされた多くの貯水池を時代のニーズに合わせて再生する取り組みが活発となっており、国土交通省においてもダム再生技術のPRと海外展開を推進している¹⁾。既設ダムの再開発あるいは放流設備の増設などの改造工事を施工するには、貯水位を低下させる操作が行われるが、貯水池の末端部では流入水が堆積土砂を巻き上げ、貯水池が懸濁化することが懸念される。一方、貯水池の堆砂、ダム下流の河床材料の粗粒化が課題となっている流域においては、水系単位で土砂の移動を適切に管理する取り組みが始められているが²⁾、貯水池に堆積した土砂を湖内で移動する際にも、懸濁化への対応が求められる。貯水池の懸濁化対策としては、流入河川の流路を固定して堆積土砂の巻き上げを抑制する方法、濁水フェンスを設置して濁質の流動を制御する方法、選択取水設備を運用して貯水池の表層部から下流に放流する方法などが挙げられるが、貯水池全体が懸濁化した場合には、取り得る対策が限られるのが現

状である。貯水池の懸濁化への対応として凝集剤を用いた土粒子の強制沈降が考えられるが、一般に用いられる人工の合成材料では、貯水池底泥として長期滞留後の貯水池の水質に与える影響が不明である。また、沈降した凝集ブロックを別途処理する必要も生じることから、運用実績はほとんど見あたらない。

本研究は、粘土鉱物アロフェンを主成分とした火山灰土凝集剤を取り上げ、凝集・分散特性を明らかにするとともに、貯水池濁水処理への適用について検討することを目的とする。具体的には、「①火山灰土凝集剤の凝集・分散と荷電特性」、「②火山灰土凝集剤を用いた貯水池濁水処理」の2項目について報告する。

天然由来の粘土鉱物のうち、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剤としての活用が考えられる。本報告では調達の容易さからアロフェンを主成分とする火山灰土凝集剤を取り上げ、貯水池濁水処理への適用について検討を進めた。天然由来の粘土鉱物を凝集剤とすることにより、凝集ブ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。

アロフェンとイモゴライトの特性の把握について、既

往研究をレビューする。軽部らは、懸濁液中におけるアロフェンとイモゴライトの分散凝集挙動と荷電特性を測定し、脱鉄アロフェンでpH4.5～pH6、非脱鉄アロフェンでpH5.5～pH7の範囲で凝集が進行したと報じた³⁾。Adachiらは、pHの異なるアロフェン懸濁液の凝集実験を行い、等電点（ゼータ電位が0となる点）付近において速やかにフロック径が増加する状況を報告した⁴⁾。Tsuchidaらはイモゴライトを対象に異なるpH、イオン強度の条件で凝集実験を行い、アルカリ領域で沈澱物の堆積が増大すること、イモゴライトの荷電特性がチューブ状の粒子形状を反映していることを報告した⁵⁾。

一方、火山灰土の凝集剤としての利用について、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⁾。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⁾。しかしながら、堀岡の研究は現地への適用にまでは言及しておらず、一方、尾崎らの報告には凝集機構を具体的に説明する実験結果が見あたらない。柏井らはアロフェンを主成分とする火山灰土を材料とし、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⁾。筆者らは柏井らの研究を参考に、緩速攪拌を行わずに凝集性能を高める方法を提案した⁹⁾。柏井ら、筆者らの研究はいずれも室内実験に基づく報告であった。本稿では既往研究を踏まえ火山灰土の凝集・分散機構と荷電特性について詳述するとともに、現地にて凝集実験を行い、さらに、アロフェンを主成分とする火山灰土凝集剤の現地適用性について検討する。

2. 火山灰土凝集剤の凝集・分散と荷電特性

(1) 火山灰土凝集剤の製造工程と化学成分

本研究では、アロフェンを主成分とする火山灰土凝集剤を使用した（表-1）。アロフェンは非結晶性のケイ酸アルミニウム鉱物で、火山灰土壌下層の主要なコロイド粒子である。火山国である日本では、北海道・東北・九州を中心に全国に存在し、相当量の確保が期待できる⁸⁾。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^{3) 4)}。アロフェンは、元来土壌に含まれる物質であり、凝集剤として貯水池に投入しても、水利用に及ぼす影響、生物生態環境に及ぼす影響は少ないと考えられる。また、凝集剤の添加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。

火山灰土凝集剤の製造工程は、次の通りである。

- 1) 栃木県真岡市の採取地から火山灰土壌を採取し、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し、脱水。

表-1 火山灰土凝集剤の化学成分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) 火山灰土凝集剤の凝集・分散

本研究で取り扱う火山灰土凝集剤について基本的な性状を把握することを目的に、異なるpH環境における凝集・分散現象を把握する実験を行った。

a) 実験方法

目標とするpHは、3～10の範囲に8段階設定した。本実験ではpH環境を調整するために滴下する電解質の影響を低減させるため、懸濁液にNaClを0.01Mの濃度で混合した。実験手順は、次の通りとした。

- 1) 乾燥重量0.9gに相当する火山灰土凝集剤を取り分ける。
- 2) 純水約100mLに火山灰土凝集剤を懸濁させる。
- 3) NaCl 0.1Mを100mLメスシリンダーに入れる。
- 4) 1Lメスシリンダーに火山灰土凝集剤懸濁液・NaCl水溶液・純水を加え、全体で1Lとする。濃度900mg/Lの火山灰土凝集剤懸濁液NaCl 0.01Mができあがる。
- 5) 火山灰土凝集剤懸濁液をビーカーに取り分ける。取り分けたサンプルは、約60mL。
- 6) マイクロピペットを用いてHCl 0.1M、NaOH 0.1Mを少量滴下し、pHを調整する。調整中は、マグネットスターラーを用いて攪拌。

以上の手順で試料を作成した後、静置して濁度の経時変化を測定した。実験は、室温20℃に設定した恒温室内で実施した。濁度の測定には、ホルマジン溶液により校正した濁度計（HACH社製2100P）を使用した。

b) 実験結果

静置直後から120分経過までの濁度の経時変化を、図-1に示す。濁度を測定した結果、pH 3.00の検体を除き、凝集沈降が進行する結果となった。pH 8.10の検体を例に、濁度の経時変化を概観する。静置直後に550 NTUの濁度は時間の経過に伴い急速に低減する状況が観察された。静置後60分には14.6 NTUとなり、60分で濁度が約1/38に低減した。その後の濁度の低減は緩やかで、120分経過後の濁度は、8.99 NTUとなった。検体間で濁度の差が比較的大きく現れた60分時点では、pH7～pH9の範囲で特に凝集沈降が進行する結果となった。一方、pH 3.00の検体については、60分経過後の濁度が188 NTU、120分経過後の濁度が97.8 NTUとなり、pH8.10の検体に比べ10倍以上高い値を示し、凝集沈降が進行しない結果となった。

ここで、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、異なるpHにおける30分経過後と60分経過後の R_T を比較する（図-2）。

図-1 火山灰土凝集剤懸濁液の濁度の経時変化 (NaCl 0.01M)

図-2 火山灰土凝集剤懸濁液のpHと濁度比 (NaCl 0.01M)

$$R_T = \frac{T_n}{T_b} \quad (1)$$

ここに、 R_T : 濁度比 [無次元]、 T_n : n 分静置後の濁度 [NTU]、 T_b : 静置直後の濁度 [NTU]。本研究で用いたアロフェンを主成分とする火山灰土凝集剤は、軽部らの報告³⁾に比べ、アルカリ側を含む広い範囲で凝集沈降が進行した結果となった。

(3) 火山灰土凝集剤の荷電特性

アロフェン、イモゴライトなどのコロイド粒子は、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。小林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)}。ここでは小林らの研究を参考に、pH環境の異なる懸濁液中の火山灰土凝集剤について、電気泳動法により電気泳動移動度を測定し、さらに、超音波分散の有無によるゼータ電位の差異について比較検討する。

a) 実験方法

濃度が900mg/Lとなるよう火山灰土凝集剤を純水中で解きほぐし、塩濃度が0.01MとなるようNaClを加え、火山灰土凝集剤懸濁液を作成した。次に、火山灰土凝集剤懸濁液を2等分し、一方については、超音波を照射した。超音波については、出力60W、周波数28kHzの装置を用い、凝集剤懸濁液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、0.1MのHClあるいは0.1M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が容器内で均質となるよう留意した。

作成した各試料について、Malvern社製Zetasizer Nano ZSを用いて電気泳動移動度を測定し、ゼータ電位を算定した。ゼータ電位の算定には、次に示すスモルコフスキー (Smoluchowski) の式¹³⁾を用いた。

$$\mu = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \zeta}{\eta} \quad (2)$$

ここに、 μ : 電気泳動移動度 [$\text{m}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$]、 ε_r : 媒体の比誘電率 [無次元] (20℃の水の場合80.4)、 ε_0 : 真空の誘電率 [F / m] ($=8.854 \times 10^{-12}$)、 ζ : ゼータ電位 [V]、 η : 媒体の粘性係数 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] (20℃の水の場合 1.002×10^{-3})。

b) 実験結果

電気泳動移動度の測定結果をもとに、算出したゼータ電位を図-3に示す。超音波分散を加えない試料のゼータ電位はpH < 7 で正の値、また、pH > 9 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移動した。この傾向は、pH < 7 で顕著に表れ、pH > 9 では差異が縮まる結果となった。これは超音波を照射することにより火山灰土凝集剤のフロックが破壊され、各粒子が分散媒と接する面積が増大したことに起因すると考えられる。

ダム貯水池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、火山灰土凝集剤に超音波分散を加えることにより電位が3.3mV (pH7.00) から17.4mV (pH6.94) に高まった。火山灰土凝集剤を用いた貯水池濁水処理については後述するが、超音波を照射することにより凝集剤が分散し、その結果として土粒子を吸着する能力が高まることが期待された。

なお、本研究で使用した火山灰土凝集剤の等電点は「超音波分散なし」の試料でpH8付近となり、軽部らの報告³⁾にあるpH5.1 (脱鉄試料) あるいはpH5.9 (非脱鉄試料) よりもアルカリ側に位置する。また、凝集実験では、アルカリ側を含む広い範囲で凝集沈降が進行した。これは、本研究で用いた火山灰土凝集剤の原料の採取地 (栃木県真岡市) が軽部らの報告にある採取地 (栃木県鹿沼市) と異なること、本研究で用いた火山灰土凝集剤には、主成分とされる SiO_2 、 Al_2O_3 以外にも Fe_2O_3 、 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、本凝集剤は、アロフェンを主成分としつつもかなりの量のイモゴライトが混合し、その結果として等電点がpHの高い方向に移動した見られることなどが理由として考えられる。なお、小林らは、イモゴライトの等電点をpH9付近とし、アロフェンに比べ、イモゴライトの等電点を与えるpHが高いことを報告している^{11), 12)}。

火山灰土凝集剤の「超音波分散なし」試料のゼータ電位と(2)で求めた30分経過後、60分経過後の濁度比 R_T をまとめ、図-4に示す。

ここで、ゼータ電位が0に近い検体については凝集が進行することを容易に説明できるが、-22mV～23mVの検体についても30分経過後に $R_T < 0.2$ 、60分経過後には $R_T < 0.1$ となり、凝集が相当程度進行する結果となった。これは、火山灰土凝集剤懸濁液の塩分濃度を0.01Mに調整した結果電解質濃度が高まり、粒子を取り巻く電気二重層が圧縮され静電的反発力が弱まり、分子間力が卓越して凝集が進行したものと考えられる¹⁴⁾。

図-3 火山灰土凝集剤懸濁液のpHとゼータ電位 (NaCl 0.01M)

図-4 火山灰土凝集剤懸濁液のゼータ電位と濁度比 (NaCl 0.01M)

3. 貯水池濁水処理への適用

本章では、山須原ダム貯水池（九州電力（株）管理）をサイトに実施した現地実験について報告する。さらに、火山灰土凝集剤を用いた貯水池濁水処理の実用化に向けた課題を整理する。耳川水系に位置する3ダムでは、貯水池に堆積した土砂の移動と出水時の通砂運用を目指した放流設備の改造が行われている¹⁵⁾。なお、現地実験の結果については一部文献¹⁶⁾で報告済みであるが、今般、実験に用いた濁水の特性に関するデータを追記し、凝集処理の効果について再評価し報告する。

(1) 実験方法

山須原ダムでは、貯水池に堆積した土砂を湖内移動する試験工事が実施されている。現地実験では、堆積した土砂を陸揚げした際に生じる濁水を、湖岸に設置した2基の水槽に6.0m³ずつ導水して実施した。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）。現地実験は、2012年2月に実施した。実験中の濁水の水温は、水槽の上層部で8.9～1.3℃の範囲で、また、下層部で8.0℃～4.0℃の範囲で変化した。凝集処理の手順は次の通りとした。

a) 凝集剤懸濁液の作成

凝集剤投入量に関する予備実験の結果を基に¹⁶⁾、濁度285～290 NTUの濁水に対して凝集剤投入量を450mg/Lに設定し、乾燥重量に換算して2.7kgの湿潤凝集剤を準備した。次に、湿潤凝集剤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。ここで、ペースト状の凝集剤を直接水槽1に投入した場合、濁水と凝集剤とが混合せずに凝集剤のみ沈殿することもあることから、凝集剤をタンクに移し、0.5m³の濁水と混合して凝集剤懸濁液を作成した。凝集剤懸濁液の作成に濁水を用いたのは、両水槽の試料の均質性を保つためである。

b) 超音波分散+攪拌

凝集剤懸濁液0.5m³をタンクから水槽に移し、5.5m³の濁水と混合し、凝集剤・濁水混合液を作成した。次に、周波数20kHz、出力600Wの超音波分散装置を用いて180分間超音波分散した。分散時間は体積3.98m³の濁水を対象とした先行実験において効果の見られた実験ケースを参考に設定した。ここで、超音波は水面付近から照射し、効果が及ぶ範囲も限定されると考えられる。そこで、吸水量13L/分の中ポンプ4台を併用し、凝集剤による濁質の吸着が進行するよう、水槽内を攪拌した（図-5）。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校正した多項目水質計（東亜ディーケーケー社製WQC-24）を使用した。

c) 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。ゼータ電位と粒度分布については、超音波分散した試料としない試料の両方について測定した。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、島津製作所製SALD 2300を使用した。

(2) 実験結果

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、濁度の経時変化を測定した結果を、図-6に示す。ここで、超音波分散・攪拌開始時刻を-180分、超音波分散・攪拌終了時刻を0分とし、-180分から1440分までの濁度の経時変化を整理した。

超音波分散・攪拌開始時の濁度は、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、水槽上層部では土粒子の沈降が妨げられた一方、下層部では土粒子が順調に沈降したためと考えられる。また、実験の後半で水槽1の下層部に濁度の上昇が見られるが、これは、水温が低下する過程で対流が生じ、一旦沈降したフロックが再浮上したためと考えられる。1440分後の濁度は凝集処理した水槽1の上層・下層平均で13.6 NTU、無処理である水槽2の上層・下層平均で186 NTUとなり、アロフェンを主成分とする火山灰土凝集剤による凝集効果が現地実験においても確認された。

現地実験で用いた濁水の特性について、整理する（表-2、図-7）。山須原ダムから採取した濁水は濁度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。現地実験では凝集剤を450 mg/Lに設定した

図-5 現地実験の機器

図-6 濁度の経時変化（現地実験）

表-2 試料の濁度・SS・pH・ゼータ電位

採水地	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-7 試料の粒度分布

たことから、濁水のSSに対して2.25倍の濃度で凝集剤を投入したことになる。山須原ダムのpHは7.36であり、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しなかった。粒度については、粒径10μm以下の粒子の占める割合が超音波分散なしの試料で25%、超音波分散15分の試料で38%となった。濁水には多くの細粒分が含まれ、無処理の水槽2における濁度の緩やかな低減を裏付けた。一方、処理した水槽1において凝集効果が現れた理由としては、

濁水のゼータ電位の絶対値が高く、超音波分散により正電荷を増した凝集剤との荷電中和が進行したことが考えられた。

火山灰土凝集剤の貯水池濁水処理への適用について課題を整理する。現地実験では濁度285～290NTUの原水に対して450mg/Lの濃度で凝集剤を投入した。濁水のSSに対する凝集剤の濃度は2.25倍であり、凝集剤投入量の縮減が課題として挙げられる。また、現地実験では凝集剤を濁水と混合後に分散した。凝集剤を濁水と混合する前に分散処理し、濁水との混合後まで凝集剤の分散状態が持続するような分散処理手法の開発が課題として挙げられる。

4. まとめ

本報告は、アロフェンを主成分とする火山灰土凝集剤を取り上げ、凝集・分散特性を明らかにするとともに、貯水池濁水処理への適用について検討したものである。結論を以下にまとめる。

- 異なるpH環境において火山灰土凝集剤の凝集・分散現象を把握した結果、pH7～pH9の範囲で特に凝集が進行した。
- pH 環境の異なる懸濁液中の火山灰土凝集剤について、電気泳動移動度を測定した結果、 $\text{pH} < 7$ で正の値、また、 $\text{pH} > 9$ で負の値を示した。火山灰土凝集剤は、アロフェンを主成分としつつもかなりの量のイモゴライトが混合し、その結果として等電点が pH の高い方向に移動したと考えられた。
- 超音波分散の有無によるゼータ電位の差異について比較したところ、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高まった。これは超音波を照射することにより火山灰土凝集剤のフロックが破壊され、各粒子が分散媒と接する面積が増大したことに起因すると考えられた。
- 貯水池の懸濁化対策として火山灰土凝集剤を用いた現地実験を実施した。濁度 285～290 NTU の濁水に対し凝集剤投入量を 450mg/L に設定して凝集処理した結果、1440 分後の濁度は処理水槽の平均で 13.6 NTU、無処理水槽の平均で 186 NTU となり、火山灰土凝集剤による凝集効果が現地実験において確認された。
- 現地実験で凝集効果が現れた理由としては、濁水のゼータ電位の絶対値が高く、超音波分散により正電荷を増した凝集剤との間で荷電中和が進行したことが考えられた。
- 今後の実用化に向けた課題として、凝集剤投入量の縮減と凝集剤の分散処理手法の開発が挙げられた。

謝辞：本研究を実施するにあたり、現地での実験場所の確保と資機材の貸与等で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、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) 国土交通省パンフレット：Advanced Technologies to Upgrade Dams under Operation, 2013.
- 2) 宮崎県：耳川水系総合土砂管理計画, 2011.
- 3) 軽部重太郎, 杉本英夫, 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, 1998.
- 4) Y. Adachi, S. Koga, M. Kobayashi and M. Inada: Study of colloidal stability of allophane dispersion by dynamic light scattering, *Colloids and Surfaces A*, No.265, pp.149-154, 2005.
- 5) H. Tsuchida, S. Ooi, K. Nakaishi, and Y. Adachi: Effects of pH and ionic strength on electrokinetic properties of imogolite, *Colloids and Surfaces A*, No.265, pp.131-134, 2005.
- 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.
- 7) 尾崎哲二, 口船愛, 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.
- 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.
- 9) 海野仁, 箱石憲昭：天然由来の凝集剤を用いた貯水池濁水処理における凝集特性の評価, 土木学会論文集B1（水工学）Vol.68, No.4, I_919-I_924, 2012.
- 10) 品川化成（株）WEBページ <http://www.shinagawa.co.jp>
- 11) 小林幹佳, 似内美貴, 大内岳, 高橋政之輔, 颯田尚哉, 足立泰久：モデルコロイドの凝集沈降実験に基づく天然粘土鉱物イモゴライトの濁水凝集機構, 土木学会論文集B1（水工学）, Vol.68, No.4, I_787-I_792, 2012.
- 12) M. Kobayashi, M. Nitani, N. Satta and Y. Adachi: Coagulation and charging of latex particles in the presence of imogolite, *Colloids and Surfaces A*, No.435, pp.139-146, 2013.
- 13) 例えば, 近藤保, 大島広行, 村松延弘, 牧野公子：生物物理化学, pp.94-95, 三共出版, 1992.
- 14) 大井節男：コロイド現象の物理的基礎, 土のコロイド現象, pp.85-91, 学会出版センター, 2003.
- 15) Y. Yamagami, M. Kaku, K. Asazaki and Y. Tashiro: Approaches for Integrated Flow Management at Dams in the Mimikawa River Basin, *International Symposium on Dams for a Changing World, ICOLD Kyoto*, pp.2_143-2_148, 2012.
- 16) 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, pp.201-202, 2013.

(2013. 9. 30受付)