

浚渫土の脱水・浄化・還元システムの提案（その2）

—天然ゼオライトを用いた諏訪湖底泥からの栄養塩類の溶出抑制—

梅崎健夫¹, 河村 隆¹

¹信州大学工学部

A System of Dehydration, Purification, and Reduction for Dredged Soil (Part 2)

— Release Inhibition of Nutrient Salts from Bed Mud in Lake Suwa using Natural Zeolite —

T. Umezaki¹ & T. Kawamura¹

¹Faculty of Engineering, Shinshu University,

キーワード：諏訪湖，水質，底泥，減容化，浄化，全窒素，全リン，ゼオライト

Keywords: Lake Suwa, Water quality, Bed mud, Volume reduction, Purification, T-N, T-P, Zeolite

1. はじめに

湖沼などの閉鎖性水域では、窒素やリンなどの栄養塩類の河川からの流入や底泥からの溶出などのために、富栄養化が促進され、多量の藻類が発生し、水質汚濁や悪臭などの問題が生じている。その対策として底泥の浚渫が行われてきた。しかし、高含水比の浚渫土は取扱いが困難で処分費が高く、また、処分用地の不足などのために、浚渫工事の件数は年々減少し、多量の底泥が堆積したままになっている。

本文では、まず、閉鎖性水域における生態系保全のための浚渫土の脱水・浄化・還元システム(図-1)^{1), 2)}を提案する。本システムの施工性および実行可能性について検証するために、諏訪湖において2011年7月20日から8月1日の期間に実証実験が実施された³⁾。そこで、実証実験における浚渫した底泥の脱水・減容化および処理土の湖底への還元を模擬した諏訪湖底泥の圧密試験およびカラム溶出試験を実施し、脱水・減容化および栄養塩類の溶出抑制の効果について検討した。なお、浄化剤には水質浄化や悪臭防止の効果のある天然ゼオライト^{4)~7)}(写真-1)を用いた。

2. 浚渫土の脱水・浄化・還元システム

図-1 に閉鎖性水域における生態系保全のための浚渫土の脱水・浄化・還元システムの概要を示す。本システムの基本的な考え方は以下の通りで

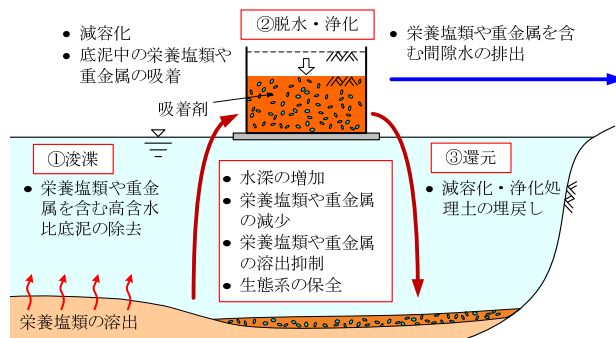


図-1 浚渫土の脱水・浄化・還元システム



(a)モルデナイトを主成分とする天然ゼオライト (b)粒度調整後(粒径0.5mm以下) (c)電子顕微鏡写真^{4), 5)}

写真-1 天然ゼオライト (MG イワミライト)

- ある。
- ① 栄養塩類や重金属等を含む高含水比の底泥を水底から除去するために浚渫する。
 - ② 天然材料等の環境に優しい浄化剤を浚渫した底泥に添加することにより、栄養塩類の溶出抑制や重金属等の吸着・固定化を行う。
 - ③ 圧密による脱水・減容化時の排水とともに、底泥中の栄養塩類や重金属等を除去し、水質分析を行った後に、下流の河川に放流するなどの適切な処理を実施する。

- ④ 減容化・浄化後の処理土は、水底に還元した際に、大きなすき間が生じて埋戻し後の体積が増加しないように、自重によって柔軟に変形する程度の含水比とする。このことにより、植物、昆虫の幼虫や貝などの水底生物の生息に適した環境を形成する。
- ⑤ 浚渫土の水域外への排出を行わないゼロエミッションを推進しつつ、水深の増加や底泥の巻上げ抑制、底泥に添加した浄化剤による栄養塩類の溶出抑制や重金属等の固定化を実現し、生態系を保全する。

3. 試験概要

(1) 天然ゼオライト

環境に優しい浄化剤として天然ゼオライト (MG イワミライト) ^{4)~7)} を用いた (写真-1)。その主成分はモルデナイト (写真-1(a)) であり、鉬山より採掘される淡い翠色の天然鉬物である。踏圧に耐えて崩壊しにくく、粉碎して任意の粒径に調整することが可能である (写真-1(b))。その主な用途は、土壤改良、水質浄化、畜産飼料等であり ^{4), 5)}、比較的安価 (1 トン当たり 3 万円程度) で安心・安全な浄化剤である。ゼオライトは、結晶構造中に微細な空洞が存在し (MG イワミライトの細孔径: 6.7~7.0 Å (写真-1(c)))、そこに水分やガスを吸着する性質がある ⁶⁾。特に、窒素、カリウムを強力に吸着し ^{4), 5)}、悪臭のもととなる水中のアンモニア、硫化水素、亜硝酸の吸着除去等 ⁷⁾ の効果がある。また、微細な孔を有することから、水中の窒素等を除去するバクテリア等の生物膜の担体としても有効であることが知られている ⁸⁾。

(2) 底泥および湖水

底泥は諏訪湖においてグラブ型採泥器を用いて、湖水は諏訪湖湖岸において、それぞれ採取した ³⁾。図-2 および表-1~3 に底泥の粒径加積曲線、物理特性、底泥および湖水中の栄養塩類の含有量を示す。ここで、 w_i : 採取時の含水比、 ρ_s : 土粒子密度、 w_L : 液性限界、 w_P : 塑性限界、 I_P : 塑性指数、 L_i : 強熱減量、COD: 化学的酸素要求量である。分析方法は、全窒素: JIS K 010245.2、アンモニア態窒素: JIS K 010242、全リン: JIS K 010246.3、COD: JIS K 010217 である。表-2, 3 に示すように、底泥中の栄養塩類の含有量は湖水の数百から十数万倍であり、富栄養化の改善には

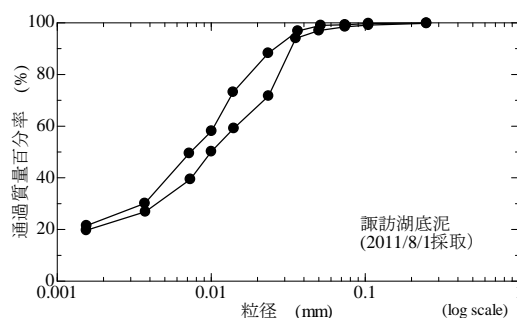


図-2 諏訪湖底泥の粒径加積曲線 (2011/8/1 採取)

表-1 底泥の物理特性 (2011/7/23, 8/1 採取)

w_i	255.5~314.5%	L_i	16.2~16.9%
ρ_s	2.439~2.582g/cm ³	粘土分含有率	32~39%
w_L	157.0~182.3%	シルト分含有率	61~67%
w_P	101.6~109.1%	砂分含有率	1~2%
I_P	55.5~71.4		

表-2 底泥中の栄養塩類の含有量*

(2011/7/23, 8/1, 8/23, 9/20, 10/17, 11/14 採取)

全窒素	270~5690 mg/kg
全リン	1900~2000 mg/kg
硝酸態窒素	2.7~24.6 mg/kg
亜硝酸態窒素	2.7~99.1 mg/kg
アンモニア態窒素	497~1060 mg/kg

*: 乾燥質量比

表-3 諏訪湖水中の栄養塩類の含有量

(2011/8/1, 9/20 採水)

全窒素	0.48~0.52 mg/L
全リン	0.014~0.022 mg/L
アンモニア態窒素	0.03~0.09 mg/L
COD (化学的酸素要求量)	2.8~3.8 mg/L

底泥に対する対策が重要である。

(3) 圧密試験の概要

後述のカラム溶出試験の条件に合わせて、採取した底泥をそのまま圧密するケース (ケース B) と底泥の乾燥重量比 10% の天然ゼオライト (粒径 0.5mm 以下の粉末, 写真-1(b)) を添加して圧密したケース (ケース C) の 2 ケースの圧密試験を実施した。それぞれの底泥を十分に攪拌して、圧密容器 (内径 17cm, 高さ 45cm) に投入し、上下両面排水により圧密試験を実施した。実証実験 ³⁾ を模擬するために、圧密圧力 p を段階的に増加させ、 w_L 程度の含水比になるまで載荷を行った。圧密終了後に排出水の水質分析を実施した。分析項目は、全窒素、アンモニア態窒素および全リンであり、分析方法は前述したとおりである。

(4) カラム溶出試験の概要

試験は (社) 底質浄化協会「底質の調査・試験マニュアル」の栄養塩類溶出試験 (窒素, リン) ^{9), 10)} に準拠して実施した。試験装置の概要および

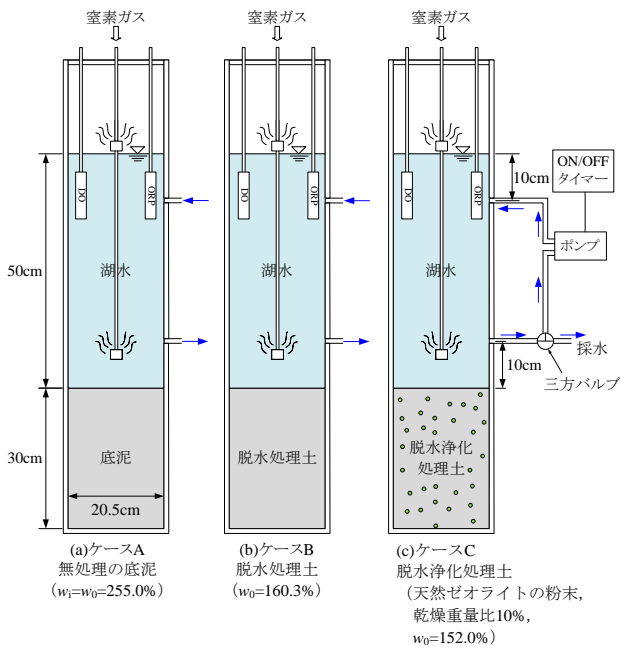


図-3 試験装置の概要

試験条件を図-3 および表-4 に示す。室温 20℃の恒温室内に設置したアクリル円筒（内径 20.5cm，高さ 100cm）内に，ケース A（無処理の底泥）と前述のケース B，C の底泥を攪拌せずに敷設し，10 層の軽い突き固めにより高さ 30cm とした。その後，底泥を巻き上げないように静かに湖水を 50cm 注入した。DO（溶存酸素量）計および ORP（酸化還元電位）計を設置し，カラムに蓋をした後，窒素ガスで湖水を曝気することにより，栄養塩類が溶出しやすい嫌気状態（ $DO < 1\text{mg/L}$ ）とした。試験中は常に嫌気状態を保つために，水面付近において微量の窒素ガスの放出を継続し，ポンプ（流量：400～500mL/min）および ON/OFF タイマー（12 時間毎に ON/OFF 切り替え）を用いて湖水の循環を行った。

栄養塩類の溶出抑制効果を検証するために，水質分析を実施した。試験開始時（0 日），5 日，10 日，20 日，40 日および 80 日後に 500mL を採水し，全窒素，アンモニア態窒素，全リンおよび COD の水質分析を実施した。分析方法は前述した水質分析と同様である。また，濁度計を用いて濁度の測定も実施した。

4. 試験結果および考察

(1) 圧密による減容化と栄養塩類の除去

図-4 に圧密試験から得られた含水比 w と圧密圧力 p の関係を示す。図中の $\log w \sim \log p$ 関係の直線は，別途実施した段階载荷による圧密試験

表-4 試験条件

	条件
ケース A	無処理の底泥 ($w_1=w_0=255.0\%$)
ケース B	脱水・減容化した処理土 ($p=50\text{kPa}$ 程度， $w_0=160.3\%$)
ケース C	天然ゼオライトを添加して脱水・減容化した処理土（粒径 0.5mm 以下の粉末，乾燥重量比 10%， $p=50\text{kPa}$ 程度， $w_0=152.0\%$ ）

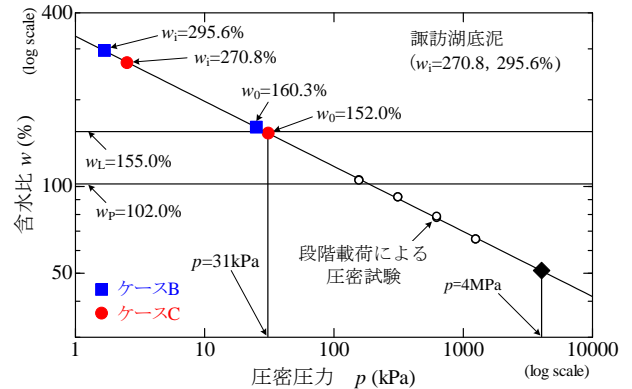


図-4 含水比と圧密圧力の関係



写真-2 脱水後の底泥（ケース B）

(JIS A 1217) より求めたものである。ケース B，ケース C ともに，処理土の含水比は $w=152\sim 160\%$ 程度（ $\approx 0.83\sim 1.0w_L$ ）であり，50kPa 程度の低い圧密圧力で液性限界程度まで含水比が低下し，初期体積の 2/3 程度まで減容化することができる。写真-2 に示すように，処理土は手で持てる程度の固さである。一方，高含水比土の脱水に一般的に用いられる高圧フィルタープレスは 4～5MPa の圧密圧力である。この場合は，初期体積の 2/5 程度以下に減容化されるものの，脱水後の含水比は塑性限界の半分程度であり，水底生物への影響が懸念される。また，この場合には，処理土を水底にすき間無く埋戻すことが困難であり³⁾，埋戻し後の体積が増加することや埋戻し土の下にある無処理の底泥からの栄養塩類の溶出も懸念される。

図-5 に排水中の全窒素（T-N），アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）および全リン（T-P）の含有量を示す。天然ゼオライトを添加しないケース B の排水中の含有量は，それぞれ湖水の 28 倍，62 倍および 4.2 倍である。しかし，底泥から除去された全窒素，アンモニア態窒素および全リンの割合は

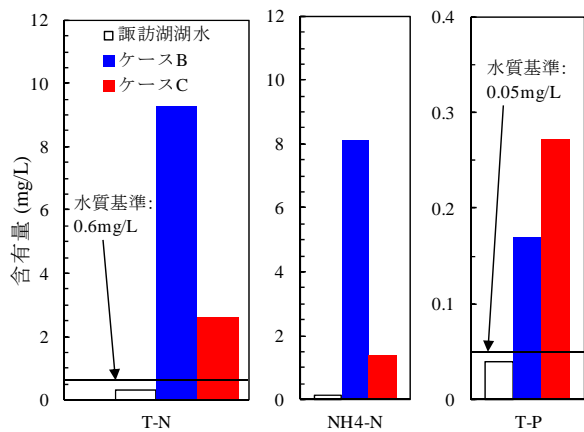


図-5 排水中の栄養塩類の含有量

0.2~4.8%, 1.1~9.4%および 0.01%程度であり、脱水により除去される栄養塩類は少ない。また、圧密された底泥は減容化により栄養塩類が濃縮されており、水底への還元においては、このことが危惧される。一方、天然ゼオライト (0.5mm 以下の粉末) を 10% 添加したケース C では、天然ゼオライトの吸着効果により、全窒素およびアンモニア態窒素の含有量はケース B の 1/4, 1/6 程度に減少している。一方、全リンの含有量はケース B

よりも減少していない。

(2) 天然ゼオライトによる栄養塩類の溶出抑制効果

写真-3(a)~(c)に試験中の湖水および底泥の経時変化を示す。

無処理の底泥 (ケース A) では、20 日を経過した頃から、アクリル容器内側に藻類が付着するとともに、湖水中に藻類が増加して湖水が薄い緑色を呈し、30 日以降にはその色がさらに濃くなる。また、底泥の上面にも藻類が発生する。別途測定した DO の値がほぼ同じ時期から増加しており、カラム内に発生した藻類は光合成によって酸素を排出するシアノバクテリア¹¹⁾と考えられる。50 日以降においては、湖水の緑色が若干薄くなり、アクリル容器内側に付着した藻類も減少している。

脱水・減容化した処理土 (ケース B) では、アクリル容器内側に付着する藻類は確認できないが、ケース A と同様に 20 日を経過した頃から、シアノバクテリアと考えられる藻類が増加して湖水が薄い緑色を呈する。また、底泥の上面にも

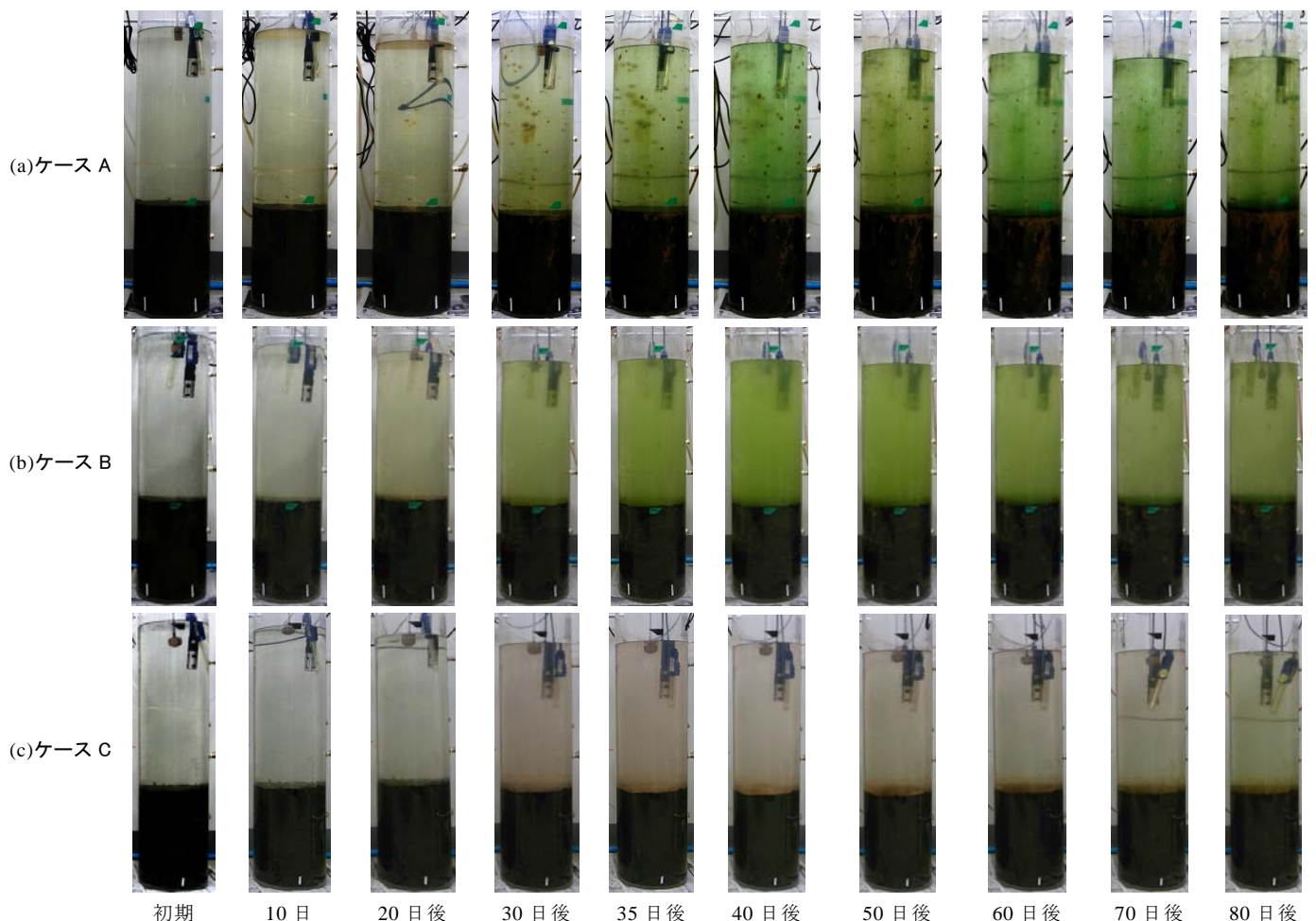


写真-3 湖水および底泥の経時変化

藻類が発生する。50日以降においては、湖水の緑色が若干薄くなっており、藻類の減少が窺える。

天然ゼオライトを添加して脱水・減容化した処理土（ケース C）では、湖水中および底泥の上面に藻類の繁茂はほとんど見られず、湖水の色もほとんど変化しない。

図-6(a)～(e)に全窒素，アンモニア態窒素，全リン，濁度および COD の経時変化を示す。

図-6(a)に示すように、いずれのケースにおいても湖水中の全窒素の初期含有量は0.5mg/L程度でほぼ等しく、諏訪湖の水質基準を下回っている。天然ゼオライトを添加していないケース A およびケース B では、時間の経過とともに全窒素の含有量が大きく増加する。ケース A では、20日後に水質基準の3.8倍程度となっており、底泥からの窒素の溶出が大きい。ケース B では、20日後に水質基準の3倍程度となる。ケース A よりは小さいものの、窒素の溶出抑制の十分な効果は得られない。80日後のケース A およびケース B の全窒素は0.6mg/L程度まで減少しており、前述したシアノバクテリアが消費したためであると考えられる。一方、天然ゼオライトを10%添加して脱水したケース C では、80日間水質基準よりも低い値を保っており、20日後において初期値の半分程度に減少する。天然ゼオライトは底泥からの窒素の溶出を抑制するとともに水中の窒素を吸着する。

図-6(b)に示すように、いずれのケースにおいてもアンモニア態窒素の初期含有量は0.03～0.09mg/L程度である。全窒素の結果と同様に、天然ゼオライトを添加していないケース A およびケース B では、時間の経過とともに含有量が大きく増加し、ケース A では5日後において初期値の16倍、ケース B では20日後において初期値の43倍であり、脱水による効果はほとんど見られない。前述した理由により、80日後においては0.03mg/L程度まで減少している。一方、天然ゼオライトを添加して脱水したケース C では、初期値とほぼ同じ値が保たれており、天然ゼオライトの溶出抑制効果が認められる。

図-6(c)に示すように、いずれのケースにおいても全リンの初期含有量は、0.014～0.022mg/L程度であり、いずれも水質基準の半分以下である。天然ゼオライトを添加していないケース A およびケース B では、時間の経過とともに全リンの含有量が大きく増加する。ケース A では、20日後に30

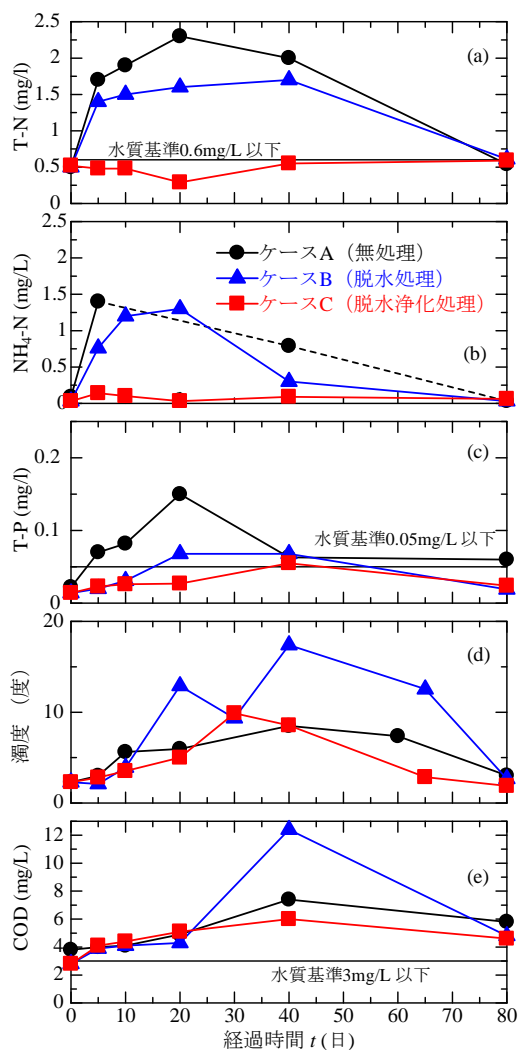


図-6 全窒素，アンモニア態窒素，全リン，濁度および COD の経時変化

倍程度となり、底泥からのリンの溶出は大きい。ケース B では、10日後までは水質基準を下回っており、脱水の効果が見られるが、20日以降は水質基準を上回り、脱水だけでは十分な効果は得られない。80日後に水質基準以下に低下しているのは、前述したようにシアノバクテリアが消費したためであると考えられる。一方、天然ゼオライトを添加して脱水したケース C では、40日後に一度水質基準を若干上回ったが(0.055mg/L)、天然ゼオライトの溶出抑制効果により水質基準以下の値が保たれる。

図-6(d)に示すように、濁度の初期値はいずれのケースも約2.3度であり、時間の経過とともに徐々に増加する。ケース A～C は、藻類の繁茂に違いが見られたのに対して、濁度には大きな違いは見られない。

図-6(e)に示す COD の変化も濁度と同様の傾向である。ケース A, B の場合、40日までにおいて

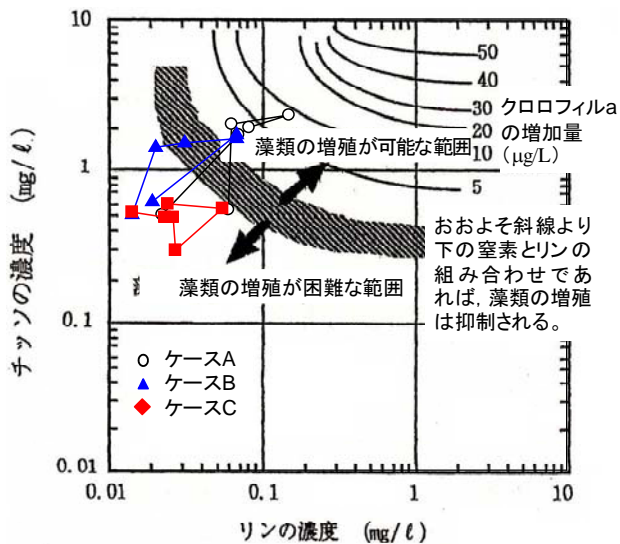


図-7 アオコの発生と窒素・リンの濃度の関係¹²⁾

は、湖水中の栄養塩類の増加により藻類が繁茂するとともに水中の溶存有機物も増加し、その後、栄養塩類の減少によって藻類も減少して COD が低下したと考えられる。一方、ケース C では、天然ゼオライトの栄養塩類の溶出抑制効果により藻類は繁茂しないが、水中の溶存有機物が増加することにより濁度が増加したものと考えられる。COD については別途対策が必要である。

図-7 にアオコの発生における水中の窒素とリンの濃度の関係を示す¹²⁾。図中には、カラム溶出試験における湖水中の全窒素と全リンのデータを時間経過毎にプロットして示した。いずれも初期状態はアオコの増殖が困難な範囲にあるが、無処理の底泥の場合（ケース A）では 5 日後に、脱水処理土の場合（ケース B）では 20 日後に、アオコの増殖が可能な範囲に移行する。その後、ケース A, B とともに湖水中の栄養塩類が減少した 80 日後には、アオコの発生困難な範囲に移行している。一方、天然ゼオライトを添加した脱水浄化処理土の場合（ケース C）では、試験期間を通じてアオコの発生困難な範囲で推移しており、図-7 においても天然ゼオライトの溶出抑制効果が認められる。

5. まとめ

閉鎖性水域における生態系保全のための浚渫土の脱水・浄化・還元システムを提案した。本システムにおける諏訪湖での実証実験³⁾を模擬した諏訪湖底泥の圧密試験およびカラム溶出試験を実施した。浄化剤には天然ゼオライトを用いた。

試験結果に基づいて、脱水・減容化および栄養塩類の溶出抑制の効果について検討した。得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 50kPa 程度の低い圧密圧力でも、高含水比の底泥を初期体積の 2/3 程度に減容化することができる。脱水後の含水比は、液性限界程度であり、埋戻し後の減容化や水底生物の生息環境に適した適度な柔軟性を有している。底泥から除去された全窒素および全リンの割合は 0.2~4.8% および 0.01% 程度であり、脱水により除去される栄養塩類は少ない。
 - (2) 無処理の底泥 ($w_0=255.0\%$) の場合には、湖水が徐々に緑色に濁り、藻類が繁茂する。湖水中の全窒素および全リンが水質基準よりも高くなり、底泥からの栄養塩類の溶出が明瞭に認められる。富栄養化を抑制するためには、底泥からの栄養塩類の溶出を抑制することが必要である。
 - (3) 脱水・減容化した処理土 ($w_0=160.3\%$) の場合には、湖水中の全窒素および全リンは水質基準よりも高くなり、底泥からの栄養塩類の溶出が認められる。脱水処理だけでは、十分な溶出抑制効果は得られない。
 - (4) 天然ゼオライト（粒径 0.5mm 以下の粉末）を底泥の乾燥重量の 10% 添加して脱水・減容化した処理土 ($w_0=152.0\%$) の場合には、湖水中の全窒素、全リンは水質基準よりも低い値が保たれる。天然ゼオライトは、特に、底泥からの窒素の溶出を抑制するとともに、湖水中の窒素も吸着し、藻類を繁茂させない。このことにより、天然ゼオライトを添加した脱水浄化処理土の栄養塩類の溶出抑制効果が実証された。また、提案した浚渫土の脱水・浄化・還元システムの有効性が確認された。
- なお、浚渫土の脱水・浄化・還元システムの施工性および実行可能性については諏訪湖における実証実験において実証されている³⁾。

謝辞 本研究は、長野県諏訪建設事務所より委託された「平成 23 年度地域自主戦略交付金（治水）河川事業に伴う浄化工法検討業務委託」に関連して実施された。天然ゼオライトは三井金属資源開発株式会社より提供を受けた。カラム溶出試験は信州大学工学部土木工学科 Moussa Garba-Say Zoukanel 氏の卒業研究の一環として実施された。

付記して、感謝の意を表わします。

【参考文献】

- 1) 梅崎健夫, 河村 隆, 河野剛志, 河崎 彰, 野村忠明, 細野武久, 境 大学: マルチドレール真空脱水法による閉鎖性水域底泥の脱水・浄化システムの開発, ジオシンセティックス論文集, 第 22 巻, pp.177-184, 2007.
- 2) 梅崎健夫: 天然ゼオライトを用いた湖沼の水質浄化実験と水質・底質浄化対策について, ヘドロ, No.109, pp.18-27, 2010.
- 3) 梅崎健夫, 河村 隆, 西田健吾, 河崎 彰, 大寺正志, 石井大悟, 志賀信彦: 浚渫土の脱水・浄化・還元システムの提案(その1) - 天然ゼオライトを添加した諏訪湖底泥のマルチドレール真空脱水法による浄化と減容化 -, 信州大学環境科学年報, 第 34 号, 2012 (印刷中).
- 4) MINDECO IWAMI PROFILE イワミライト, 三井金属資源開発株式会社, 2006.
- 5) 三井金属資源開発株式会社の天然環境資材イワミライト, 三井金属資源開発株式会社, 2011.
- 6) 天然ゼオライトー利用にあたっての品質評価基準ー, 日本学術振興会鉱物新活用 111 委員会・天然ゼオライト利用研究分科会, 2006.
- 7) 水づくりをーイワミライトで!! 池用総合水質管理材, 三井金属鉱業株式会社.
- 8) 三上恭弘, 木持 謙, 正田武則, 常田 聡: 成形体を活用した生態工学的な水質浄化手法の機能強化とメカニズム解明に関する研究, 第 40 回日本水環境学会年会講演集, p.201, 2006.
- 9) (社)底質浄化協会 底質の調査・試験マニュアル, 4 節 栄養塩類溶出試験(窒素, リン), pp.3-3-31~3-3-40, 2003.
- 10) 吉野広司, 畑野俊久, 斎藤悦郎, 望月美登志, 土開健義: PS 灰を用いた富栄養湖における浚渫土の改良, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.683-684, 2005.
- 11) 広瀬侑, 佐藤桃子, 池内昌彦: 2. シアノバクテリア, 低温科学, Vol.67, pp.9-15, 2009.
- 12) 森本辰雄, 湊 秀雄: ゼオライト混液法による脱チッソ, 脱リン技術, (株)アステック社内技術資料, pp.1-4, 1996.

(原稿受付 2012.3.30)