

諏訪湖における天然ゼオライト人工なぎさの実証実験(その2)

梅崎健夫¹, 河村 隆¹, 河野剛志², 河崎 彰²,
野村忠明³, 大寺正志³, 藤森徳雄⁴, 細野武久⁵, 西井 淳⁵,
境 大学⁶, 松永 斉⁶, 岡村昭彦⁷, 近藤誠二⁸
¹信州大学工学部, ²宇部工業(株), ³錦城護謨(株),
⁴(株)中部測地研究所, ⁵(株)ランド・エコ,
⁶三井金属資源開発(株), ⁷芦森工業(株), ⁸(株)田中

Demonstration of Artificial Beach with Natural Zeolite in Lake Suwa (Part 2)

T. Umezaki¹, T. Kawamura¹, T. Kono², A. Kawasaki²,
T. Nomura³, M. Oodera³, T. Fujimori⁴, T. Hosono⁵, A. Nishii⁵,
D. Sakai⁶, H. Matsunaga⁶, A. Okamura⁷ & S. Kondo⁸
¹Faculty of Engineering, Shinshu University, ²Ube Kogyo Co., Ltd.,
³Kinjo Rubber Co., Ltd., ⁴Chubusokuchi Laboratory Co., Ltd.,
⁵Land Eco Corporation, ⁶Mitsui Mineral Development Engineering Co., Ltd.,
⁷Ashimori Industry Co., Ltd. & ⁸Tanaka Co., Ltd.

キーワード：諏訪湖，水質，底質，浄化，ゼオライト，圍繞堤，なぎさ

Keywords: Lake Suwa, Water quality, Bottom sediment, Purification, Zeolite, Dike, Beach

1. はじめに

港湾や湖沼のような閉鎖性水域では、河川からの土砂流入の他に、窒素・リン等の栄養塩類も流入し、さらに、それらの底泥からの溶出も加わって、富栄養化が促進され水質汚濁や悪臭の発生等が問題となっている。その対策として、昭和45年に水質汚濁防止法が制定され、排水中の窒素・リン等の規制、下水道の整備の推進を実施するとともに、例えば、水域内の底泥の浚渫などの対策が実施されており、その効果は徐々に現れてきている。しかし、湖沼の環境基準の達成状況は、平成18年度においても55.6%であり、さらなる改善が望まれている¹⁾。

諏訪湖(図-1, 湖面積13.3km², 湖岸線16km, 最大水深6.3m, 平均水深約4m, 貯水量6500万m³, 湖水の滞留時間約40日)²⁾は、31の流入河川に対して、流出河川は天竜川のみ典型的な閉鎖性水域である。湖周辺の都市化の進展に伴い、湖の富栄養化が急速に進み、水質汚濁、アオコの発生、悪臭などの環境問題が引きこされた。そのため、諏訪湖浄化対策の一環として昭和44年から平成14年度の間に底泥の浚渫が行われた。ま

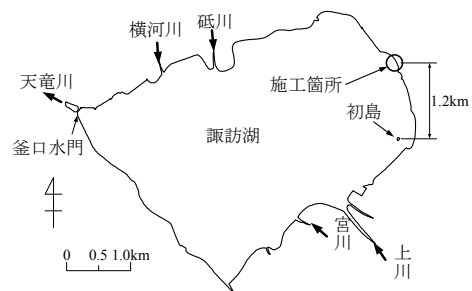


図-1 諏訪湖と主要河川

た、流入河川対策として、昭和46年から流域下水道の整備が開始され、現在、普及率は97.6%に至っている。さらに、自然浄化機能を利用した対策として湖岸の植生の復元が進められており、その効果は徐々に現れてきている。しかし、依然として夏場には大量のアオコが発生し、悪臭を生じるなどの問題は未解決であり、さらなる改善が望まれている。

本文では、湖沼の水質浄化対策として、天然ゼオライト人工なぎさ^{3),4)}を提案する。諏訪湖湖岸において実施した浄化実証実験について論じ、定期的実施した現地調査および水質・底質調査の結果に基づいて、その浄化効果の有効性について検討した。

2. 天然ゼオライト人工なぎさの概要

天然ゼオライト人工なぎさ(図-2)は、天然ゼオライト(写真-1)の浄化作用により、水質浄化および悪臭防止の効果、さらに親水の機能も期待するものである。生活により密着した湖岸付近に対象範囲を区切ることは、本質的な湖の浄化を考えれば対処療法的ではあるが、施工コストや浄化剤の使用量を大幅に削減できる。図-2(b)に示すように、ジオテキスタイル製土嚢(補強袋)などに浄化剤として天然ゼオライトを充填し、水面上まで土嚢を積上げ、湖岸に圍繞堤を築造する。透水性の圍繞堤により堤内外の水循環を保ちつつ、堤外からの懸濁物の遮断、湖水中の窒素・リン等の吸着除去が実現される。さらに、堤内に天然ゼオライトを均一に敷設することにより底泥の巻き上げや栄養塩類などの溶出量の抑制なども実現される。

写真-1に示すように、天然ゼオライトは砂粒のように粒径を揃えることが可能であり、水浸させると翠色を呈し、人工なぎさとしての美観も期待される。天然ゼオライト(MGイワミライト、写真-1)^{5)~8)}は、岩石のような天然鉱物である。その主な用途は、土壌改良、水質浄化、畜産飼料等であり⁵⁾、安全・安心な添加剤である。ゼオライトは、結晶構造中に微細な蜂の巣のような無数の孔を持ち(MGイワミライトの細孔径:6.7×7.0Å、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、カリウムや富栄養化の原因物質である窒素を強力に吸着し⁵⁾、吸着機能・陽イオン交換機能によって、カドミウムや砒素等の重金属の固定化⁷⁾および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⁸⁾の効果がある。また、微細な孔を有することから、水中のアンモニアなどの窒素を除去する細菌など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⁹⁾。

3. 水質浄化の実証実験

3.1 実験条件

実証実験を諏訪湖湖岸(図-1参照)において平成20年3月に実施した(図-3, 4)。湖岸の改修状況やボーリング調査による土質状況、湖面凍結および天候などを考慮して、表-1に示すように、天然ゼオライトの使用量と圍繞堤内外への湖水の流入量を変えた2ケースを実施した。

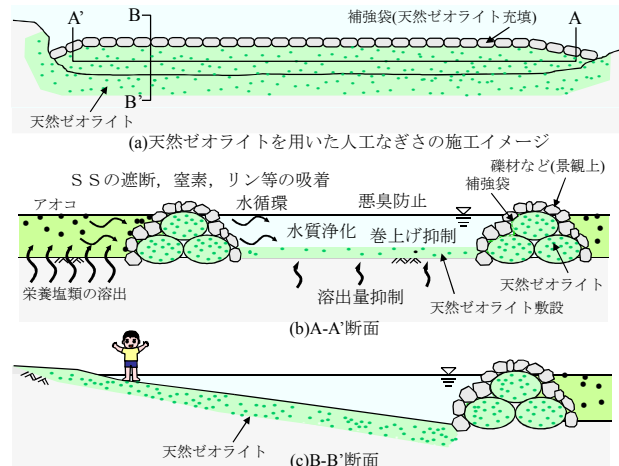


図-2 天然ゼオライトを用いた人工なぎさ

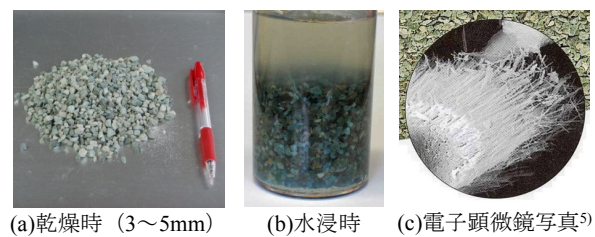


写真-1 天然ゼオライト

図-3および4に施工平面図および圍繞堤断面の模式図を示す。大型土嚢(ロジパックE, ポリエステル繊維製, 透水係数 $1.5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, 1.5m×2.5m)に天然ゼオライト(MGイワミライト, 粒径3~5mm)を充填し、水面上まで土嚢を積上げ、コの字型の圍繞堤(6m×4m程度)を湖岸に施工した。なお、透水シート(ニードフルマットNN-6T, 合成繊維製, 厚さ6mm)は湖水中の懸濁物をろ過するため、大型土嚢を紫外線から保護するため、さらに生物膜を生成するために用いた(図-4)。

ケース1では、天然ゼオライトを充填した土嚢を1段目の内側に9袋、2段目には6袋をそれぞれ配置し、図-4(a)に示すようにすべての断面に天然ゼオライトの土嚢を配置した。ケース2では、圍繞堤の透水性を高めるために、天然ゼオライトを充填した土嚢を1段目に6袋、2段目には玉砂利を充填した土嚢を10袋配置し、図-4(b)に示すように玉砂利を充填した土嚢だけで構成される断面を3カ所設定した(図-3中の①~③)。

浄化効果を検証するために、水質・底質分析を実施した。水質分析では、定期的にプラスチック容器2Lに満水となるように水面付近で採水を実施し、表-2に示す項目について室内水質分析を実施した。採水地点は、図-3に示す圍繞堤内の4点

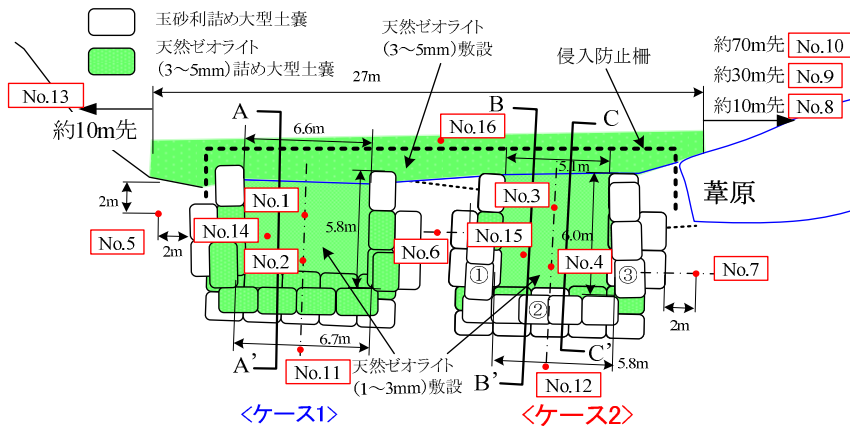


図-3 施工平面図

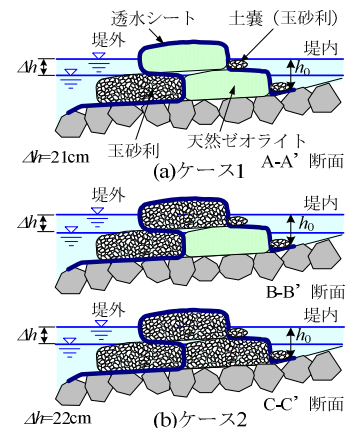


図-4 圍繞堤の断面図

(No.1~4), 堤外として, その近傍の5点 (No.5~7, 11, 12), 圍繞堤から離れた4点 (No.8~10, 13) の合計13点である. さらに, 現地においても表-2に示すような水質分析・測定を実施した. ここで, COD: 化学的酸素要求量, BOD: 生物化学的酸素消費量, SS: 懸濁物質, ORP: 酸化還元電位である. 底質分析では, 353日後に敷設ゼオライトを採取し, 敷設ゼオライトを300g程度採取し, 表-3に示す項目について室内吸着量分析を実施した. 採取地点は図-3に示す圍繞堤内の2点 (No.14, 15) および堤外の2点 (No.6, 16) である. 水質分析方法は, COD: JIS K 010217, BOD: JIS K 010221, SS: JIS K 010214.1, 全リン: JIS K 010246.3, 全窒素: JIS K 010245.2準拠, アンモニア態窒素: JIS K 010242, 硫化水素: JIS K 010239.2, 亜硝酸態窒素: JIS K 010243.1, pH: JIS K 010212.1, 濁度: JIS K 01019.2, 吸着量分析方法は, 全窒素: JIS K 010245, 全リン: JIS K 010246.3, アンモニア態窒素: JIS K 010242, 亜硝酸態窒素: JIS K 010243, 硝酸態窒素: JIS K 010243とした. また, ORPは白金電極法, 水温はペッテンコーヘル水温計, 透視度はクリンメジャー法により, 透明度は直径30cmの白色円板を水中に沈め, 水面から識別できる深さとして求めた.

3. 2 圍繞堤の施工と天然ゼオライトの敷設

写真-2に施工状況を示す. 大型土嚢に天然ゼオライト (粒径3~5mm) および玉砂利の袋詰め作業の状況を写真-2(a)に示す. 大型土嚢 (1.5×2.5m) 内には, 天然ゼオライト1.2t程度, 玉砂利1.8t程度をそれぞれ充填した. 天然ゼオライトを充填した大型土嚢全体の透水係数は, 大型土嚢の材質の透水性を考慮しても 10^{-2} cm/s程度である. 充填済の大型土嚢 (2×1×0.5m) をクレーンで吊

表-1 実施したケース

ケース	条件
ケース 1	天然ゼオライトの量が多い. 大型土嚢(天然ゼオライト): 15 袋, 大型土嚢(玉砂利): 11 袋
ケース 2	天然ゼオライトの量を少なくし, 圍繞堤の透水性をより高めた. 大型土嚢(天然ゼオライト): 6 袋, 大型土嚢(玉砂利): 24 袋

表-2 水質調査項目

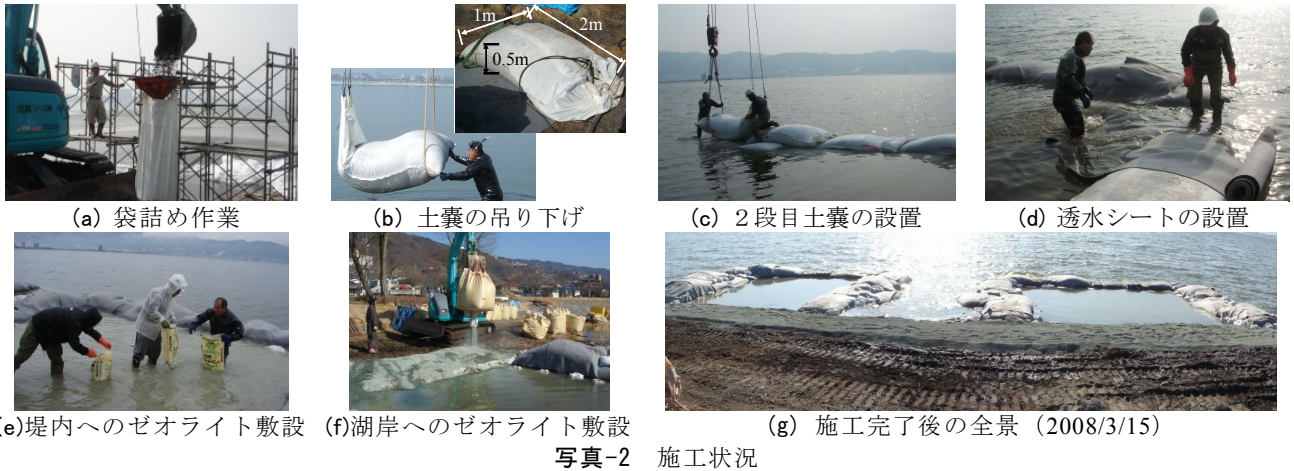
	項目	調査日 (2008年)
室内	COD, BOD, SS, 全窒素, 全リン, 亜硝酸態窒素, アンモニア態窒素, 硫化水素, pH, 濁度	3/14, 3/15, 4/14, 6/13, 7/23
現地	水温, pH, ORP, 透視度, 透明度	3/21, 3/28, 4/14, 6/13, 7/23

表-3 底質調査 (天然ゼオライト吸着量分析) 項目

項目	調査日
全窒素, 全リン, アンモニア態窒素, 亜硝酸態窒素, 硝酸態窒素	2009/3/2

り下げて所定の位置 (最大水深約0.8m) に設置した (写真-2(b)). このとき, 潜水土により所定の位置に正確に設置し, 1段目外側の土嚢を設置した後に, 透水シートを設置した. 2段目の土嚢を設置した後 (写真-2(c)), 水面上の土嚢を透水シートで被覆した (写真-2(d)). 圍繞堤の施工完了後, 堤内および湖岸にそれぞれ粒径1~3mmおよび3~5mmの天然ゼオライトを厚さ10cm程度となるように敷設した (写真-2(e), (f)). 施工完了後の全景を写真-2(g)に示す. さらに, 侵入防止柵も設置した (写真-3(c)~(h)参照).

写真-3(a)~(h)に施工前後の状況を示す. 施工



37日前において諏訪湖は全面結氷し、その上に積雪している(写真-3(a)). 着工日(2008/3/12)においても湖岸に雪氷が残っている(写真-3(b)). 31日後(4/14)は、施工直後から大きな変化はなく、湖岸は天然ゼオライトの敷設により翠色を呈しており、背後の土がむき出しの部分と比較して、美観に優れている(写真-3(c)). 施工131日(7/23)および180日後(9/10)には、圍繞堤周辺に植物が繁茂している(写真-3(d), (e)). 施工217日後(10/17)には、植物が茶色く枯れ始めており(写真-3(f)), 冬期の286日(12/25)および353日後(2009/3/2)には、緑の植物は確認できない(写

真-3(g), (h)).

4. 実験結果および考察

4. 1 水質分析

(1) 圍繞堤内外の概況と透視度, 透明度, 濁度およびSS

写真-4(a)~(o)に施工後の圍繞堤内外の状況を、図-5, 6に釜口水門の湖面標高と圍繞堤内の水深および気温・水温の経時変化をそれぞれ示す。なお、図-5中の圍繞堤内の水深は、沖側の大型土嚢の内側における数カ所の平均値である(図-4中の h_0 参照)。写真-4(a)~(j)に施工7, 14, 31,

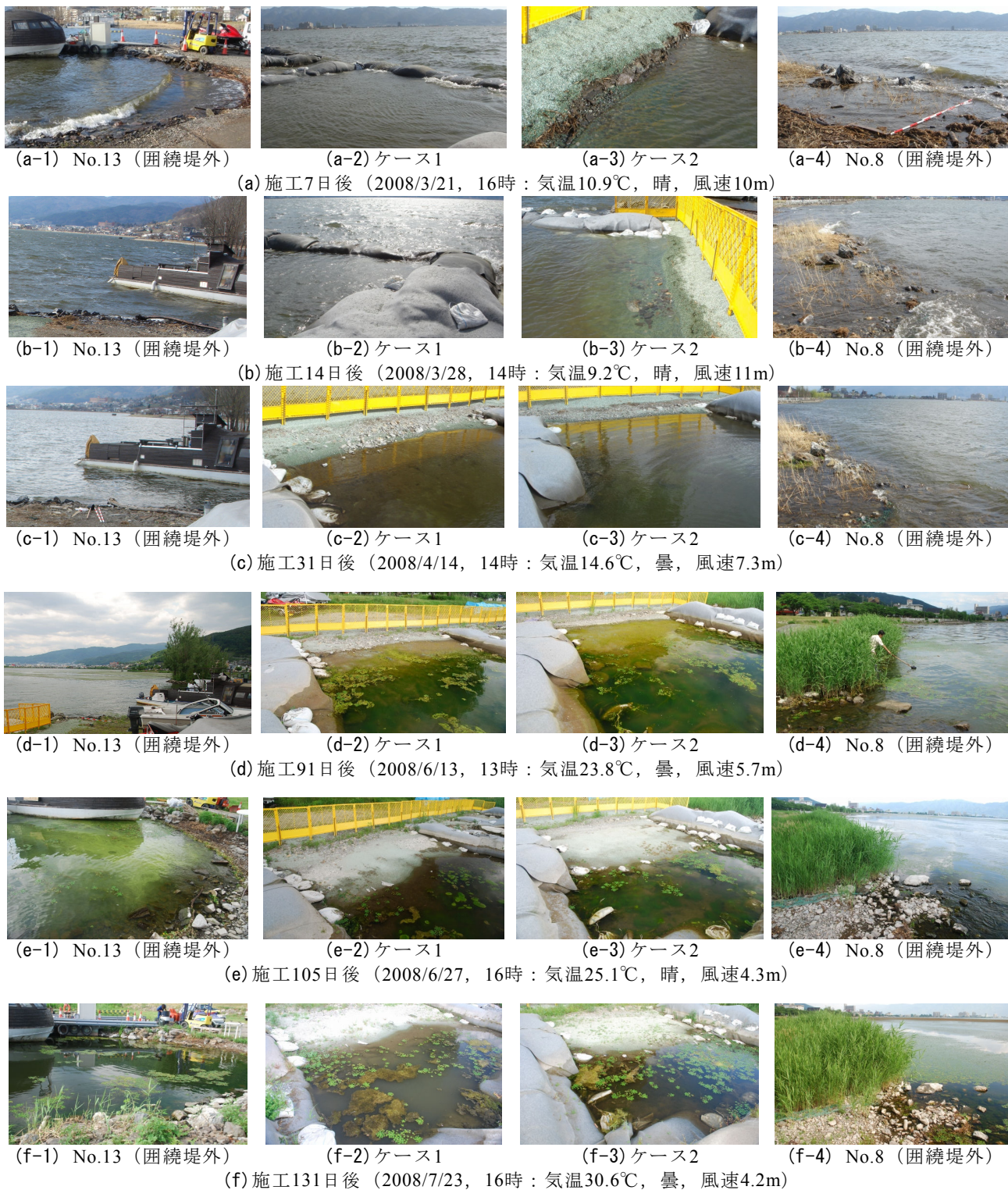


写真-4 施工後の圍繞堤内外の状況 (その1)

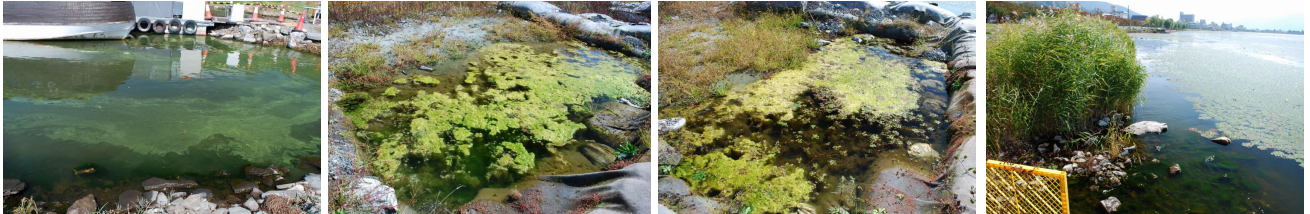
91, 105, 131, 180, 217, 283および353日後におけるケース1および2, 圍繞堤外の水質調査地点No.8, No.13の状況をそれぞれ示した。気温, 天気および風速は諏訪特別地域気象観測所の計測データ¹⁰⁾である。また, 図-7~9に透視度と透明度, 濁度およびSSの経時変化を示す。圍繞堤内に

おいては水深が浅く透明度を測定できないため, 透視度だけを測定した。

施工完了時(3/14)およびその翌日(3/15)において濁度およびSSが非常に大きな値となっているのは, 施工中の底質の巻き上げの影響である(図-8, 9)。



(g-1) No.13 (圍繞堤外) (g-2) ケース1 (g-3) ケース2 (g-4) No.8 (圍繞堤外)
 (g) 施工180日後 (2008/9/10, 14時: 気温26.7℃, 晴, 風速2m)



(h-1) No.13 (圍繞堤外) (h-2) ケース1 (h-3) ケース2 (h-4) No.8 (圍繞堤外)
 (h) 施工217日後 (2008/10/17, 11時: 気温18.4℃, 晴, 風速4.6m)



(i-1) No.13 (圍繞堤外) (i-2) ケース1 (i-3) ケース2 (i-4) No.8 (圍繞堤外)
 (i) 施工283日後 (2008/12/25, 13時: 気温5.1℃, 小雨, 風速3.8m)



(j-1) No.13 (圍繞堤外) (j-2) ケース1 (j-3) ケース2 (j-4) No.8 (圍繞堤外)
 (j) 施工353日後 (2009/3/2, 15時: 気温1.9℃, 晴, 風速10.6m)

写真-4 施工後の圍繞堤内外の状況 (その2)

施工31日後(4/14)までは、堤内外の湖水に大きな変化は見られない(写真-4(a)~(c))。また、透視度、濁度およびSSについても、同様である(図-7~9)。強風の日には、写真-4(k)に示すような越水が生じる。この場合には、堤内外の水温はほぼ同じである(図-6)。ただし、圍繞堤内の湖底は茶色い懸濁物に覆われている。一方、越水が少ない場合(4/14)には堤内の水温の方が2~3℃ほど高い。この時期は、気温が低く(最高気温20℃以下、最低気温5℃程度以下)、生物が活発に活動していないことが窺える(図-6)。

施工91日後(6/13)には、湖面水位の低下のために(図-4, 5)、圍繞堤内の水深も浅くなり、汀線が2~3m沖側に移動している(写真-4(d-2), (d-3))。この頃になると、最高および最低気温は

それぞれ20℃および10℃を越えており(図-6)、No.8において芦原が繁茂し(写真-4(d-4))、堤外の湖面にヒシの葉が確認される(写真-4(d-1), (d-4))。一方、写真-4(l)に示すように、大型土嚢を被覆している透水シートは、茶色く変色し生物膜が生成されている。写真-4(d-2), (d-3)に見られる圍繞堤内の浮遊物は、ヒシの葉と藻類である。堤内の湖底には緑色の藻類が繁殖している。ケース2の水温は堤外とほぼ等しく、ケース1では3℃程高い。これは、圍繞堤の透水性を変化させたために、湖水の流入量が異なるためであると考えられる(図-4, 6)。透視度は、いずれも4/14の値よりも高く、堤外よりも高い透視度を有している(図-7)。また、濁度およびSSはいずれも4/14の値よりも低く、堤内の方が湖水は澄んでおり、透



(k) 越水の様子 (2008/3/28)



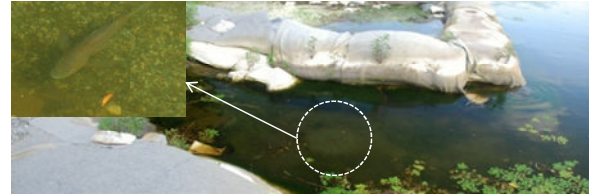
(l) 土嚢に付着した生物膜
(2008/6/13)



(m) 土嚢および堤外に発生した藻類
(2008/7/23)



(n) No.6の状況 (2008/4/14)



(o) No.6における魚(ブルーギル)の営巣(2008/7/23)

写真-4 施工後の圍繞堤内外の状況 (その3)

視度の傾向と整合している (図-8, 9).

施工105日後(6/27)には、圍繞堤外のNo.13において湖面に緑色のアオコの発生が確認され、湖岸近くの浅い部分においても湖底が確認できないほど濁っている(写真-4(e-1)). 堤内の湖水は透明度が高く、アオコは全く発生していない. 堤内の湖底に繁殖している藻類は6/13と同程度のようなのである(写真-4(d-2, 3およびe-2, 3)).

施工131日後(7/23)には、圍繞堤外のNo.13にはアオコは見られないが(写真-4(f-1)), 圍繞堤の外側の土嚢表面および周辺の湖岸付近の石に堤内と同様の藻類が発生している(写真-4(m)). 施工91日(6/13)および105日後(6/27)と同様に、ケース2では透視度が高く(図-7), 堤内の湖底まで確認することが可能(写真-4(f-3))であるが、ケース1ではそれまでと異なって水が濁っており堤内の湖底が確認できない(写真-4(f-2), 図-7). 堤内の湖底の藻類は、濁りのためケース1では確認できず、ケース2において少なくなっている. ヒシの葉および水面に浮遊している藻類の量は、ケース1のヒシの葉は91および105日後と同程度であるが、藻類は大幅に増加している(写真-4(f-2)). 一方、ケース2内のヒシの葉は大幅に増加して水面の1/2程度を覆っており、浮遊している藻類は少し見られる程度である(写真-4(f-3)). また、堤外にはほとんど見られないアメンボを、ケース1および2の堤内にはそれぞれ100匹および30匹程度確認しており、ケース1内にはアメンボのエサとなる生物が多く生息していると考えられる. 堤内水深は、ケース1では22cm, ケース2では29cmであり、施工直後の43cmおよび51cmよりも20cm程度浅くなっている(図-4, 5). 圍繞堤

の透水性の低いケース1においては、堤外の水温よりも3.5℃程度高い. 一方、ケース2では水温差は小さく、1℃高い程度である(図-6). 温度の上昇に伴って生物の活性が高まり、温度が10℃上がると生物の活性が2倍になること¹¹⁾が知られており、ケース1における生物の活性は、圍繞堤外よりも1.4倍程度であると考えられ、写真-4(f-2)に示したように汚濁する要因の一つとなっている. 透視度は、堤外において6/13よりも20cm程度大きく80~100cm程度である. 一方、ケース1は38cmで最も小さく、ケース2は測定範囲を越えるほど澄んでいる(図-7). 濁度およびSSは、ケース1のみが大きい値となっており、写真に示した状況および透視度(図-7)と同様の傾向を示している(図-8, 9). 透明度が低いほど植物プランクトン量は多い¹¹⁾と言われており、圍繞堤内の植物プランクトン量は、ケース1では多く、ケース2では少ないと考えられる.

施工後180日後においては、圍繞堤外のNo.13にアオコが大量に発生している(写真-4(g-1)). ケース1およびケース2ともに、ヒシの量が大幅に増加しており、ケース2では水面の大部分をヒシによって覆われている. ケース1では約半分を藻類により覆われており、残りの半分はヒシが点在している. アオコの発生しているNo.13の濁度およびSSの値は、他地点と比較して著しく大きな値となっており、かなり水質汚濁している(図-7, 9). ケース2の透視度は少し低下したものの、80cm程度であり、ケース1および堤外その他の地点(約50cm)よりも澄んでいる(図-7). 濁度も同様の傾向である(図-8). SSはケース1のみが大きい値となっている(図-9).

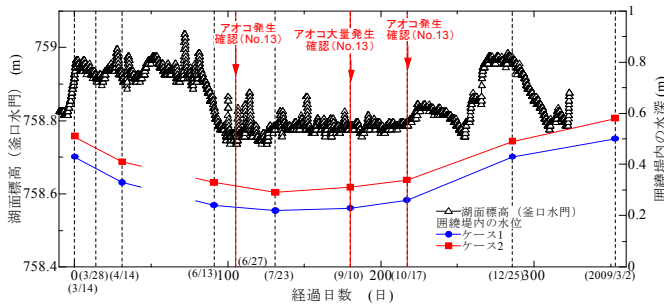


図-5 湖面標高と圍繞堤内の水深の経時変化

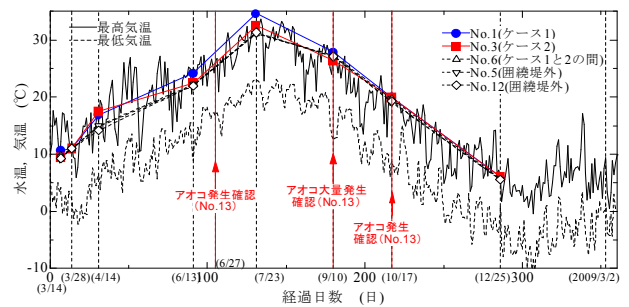


図-6 気温および水温の経時変化

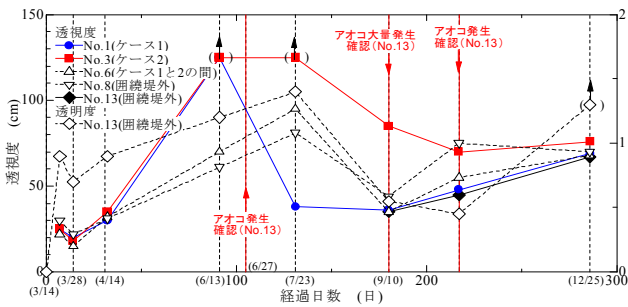


図-7 透視度および透明度の経時変化

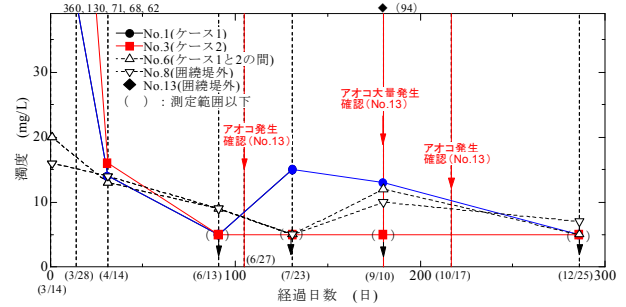


図-8 濁度の経時変化

施工後217日後(10/17)には、圍繞堤外のNo.13において湖面にアオコの発生が確認されるが、発生量は105日および180日後よりも少なく、湖岸の浅い部分においては、湖底を確認することができる(写真-4(h-1))。最低気温が10℃を下回るようになり、堤内外の植物も茶色く変色して枯れ始めている(写真-4(h-2)~(h-4))。堤内外の水温差は、1℃以下と小さくなってきているものの(図-6)、ケース2では透視度、濁度およびSSの値が示すように、ケース1およびアオコの発生しているNo.13よりも水は澄んでいる。一方、ケース1においては、105日および180日後よりも、透視度が高くなり、濁度およびSSの値が低くなっており、堤内の水は澄んできている(図-7~9)。これは、気温の低下に伴い、生物の活性が徐々に低下しているためである。

施工後283、353日後においては、冬期に入ったことにより気温が低下して(最高気温5℃以下)生物が活発に活動しておらず、また、堤内の水位も上昇していること(図-5)から湖水が越水していることも想定される。堤内外の状況、透視度、濁度およびSSに顕著な差が認められない(図-7~9)。

写真-4(n)、(o)に堤外のNo.6(図-3)の状況を示す。天然ゼオライトは、湖岸にのみ敷設されたが、波浪により浸食され湖岸から5m程度までの湖底に薄く広がっている。写真-4(k)に示すよう

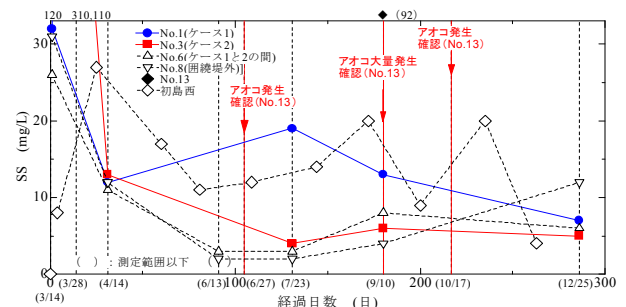


図-9 SSの経時変化

に、天然ゼオライトで覆われた湖底に魚が営巣しており、生息している生物に好ましい環境であると考えられる。

(2) COD, BOD, 全窒素, 全リンおよびORP

図-10~13にCOD, BOD, 全窒素および全リンの経時変化を示す。なお、諏訪湖では、COD, 全窒素および全リンの水質基準はそれぞれ3.0mg/L, 0.6mg/Lおよび0.05mg/Lと定められている。図-10, 12および13に、諏訪湖保健所発表のデータ(初島西, 図-1参照)¹²⁾も示した。

図-10および11に示すように、CODおよびBODはいずれの地点においても増加傾向にある。CODは、検液中の酸化分解される有機物の量から求められるものであり、植物プランクトン、河川から流入する有機物、植物プランクトンの生成有機物や湖底からの溶出有機物等の含有量を表している¹¹⁾。したがって、CODの増加は水中の有機物が増加したためと考えられる。これは、水温の上昇(図-6)によって生物の活性が高まったことに起

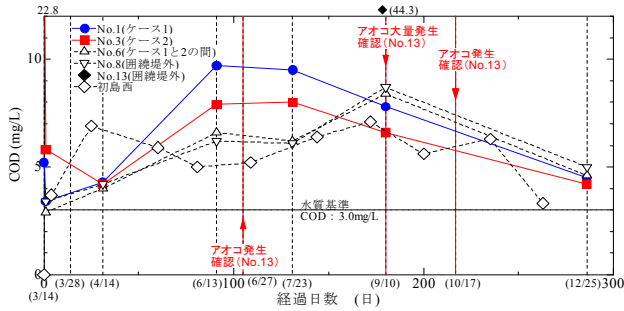


図-10 CODの経時変化

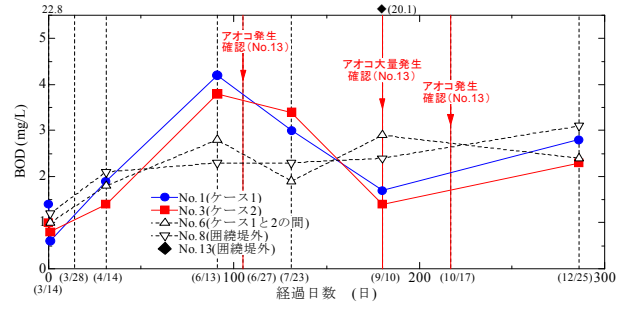


図-11 BODの経時変化

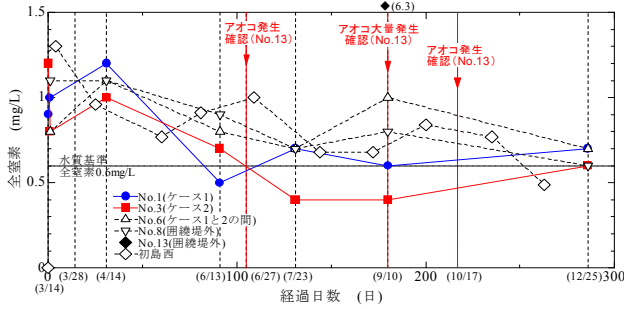


図-12 全窒素の経時変化

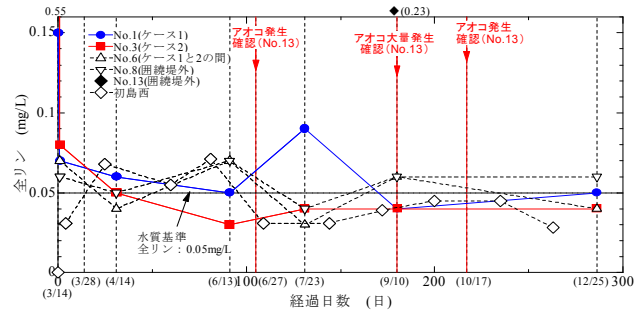


図-13 全リンの経時変化

因していると考えられる。特に水温上昇が大きいケース1のCOD値が大きく、91日後(6/13)において9.7 mg/L、131日後(7/23)において9.5 mg/Lであり、諏訪湖の水質基準(3.0mg/L)の3倍以上の値である。ケース2においても、6/13において7.9 mg/L、7/23において8.0 mg/Lであり、いずれも富栄養化の状態¹¹⁾である。また、堤外のNo.6, 8および初島西の測定値も5~7mg/Lで水質基準の2倍以上であり、有機物が多い状態である。しかし、図-7に示したように、ケース2の透視度が高いので、CODおよびBODが増加しているが、植物プランクトン量は少ないと考えられる。180日後(9/10)にアオコが大量発生したNo.13ではCOD=44.3 mg/L、BOD=20.1mg/Lである。これらの値は他地点の5~10倍、特にCODは基準値の約15倍となっており、著しい富栄養化状態である。気温が低下して越水も生じていると考えられる283日後(12/25)においては、地点間の値の差が小さくなる。

図-12に示すように、圍繞堤外の全窒素は263日後の初島西のデータを除いたすべてにおいて水質基準を満たしていない。特に、アオコが大量に発生した180日後(9/10)のNo.13の値は6.3mg/Lであり、水質基準の約10倍の値であり、かなり汚濁した状態である。ケース1では、31日後(4/14)までは水質基準を満たしていないが、91日後

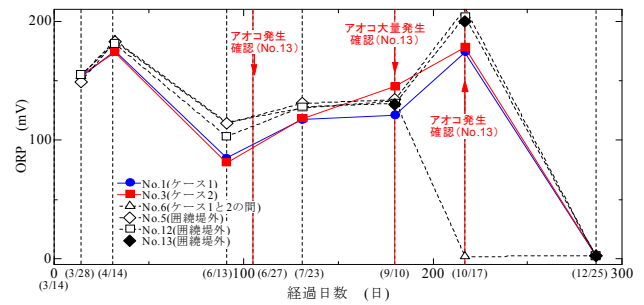


図-14 ORPの経時変化

(6/13)において基準値以下まで低下し、その後の堤内の汚濁が著しい131日後(7/23)に再びそれ以上となっている。180日後に基準値付近まで低下するが、283日後(12/25)においてそれ以上となっている。一方、ケース2では、7/23および9/10においても水質基準の2/3程度まで減少しており、それ以降も基準値以下となっている。

図-13に示すように、施工完了時(3/14)およびその翌日(3/15)におけるケース1および2の全リンの値は、非常に大きく0.15~0.55mg/Lとなっている。これは、施工中に底質および天然ゼオライトが巻き上げられたためであると考えられる。圍繞堤外では、3/15および91日後(6/13)は基準値以上となっているが、31日(4/14)および131日後(7/23)にはそれ以下の値となっている。ケース2の全リンは時間の経過とともに徐々に減少し、6/13においては堤外の1/3程度であり基準値以下となり、7/23においても堤外とほぼ等しいものの、

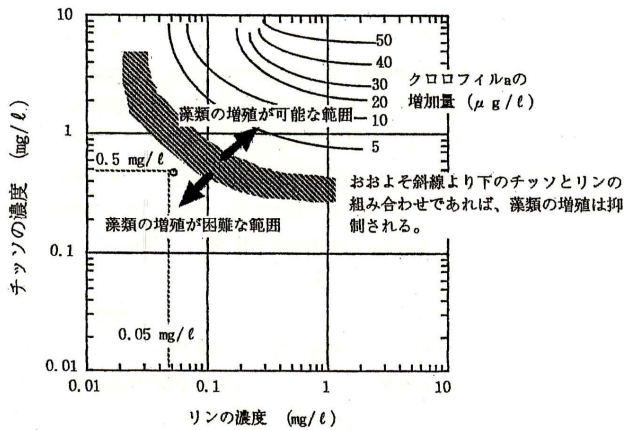


図-15 アオコの発生と窒素およびリンの濃度の関係¹³⁾

基準値以下である。180日(9/10)および283日後(12/25)においては、堤外に基準値を越える地点もあるが、基準値以下の状態が保たれている。天然ゼオライトにはリンの吸着効果は確認されておらず、生物膜の効果であると考えられる。一方、ケース1では、水の透視度が悪化しCODが最大の7/23には、水質基準の2倍近くに急激に増加している。アオコの発生は、水中の窒素・リンの濃度に依存しているという報告がある(図-15)¹³⁾。7/23における全窒素・全リンは、ケース1においてそれぞれ0.7mg/L、0.09mg/Lでありアオコの増殖が可能な範囲に近く、堤内にアオコが発生する可能性があるが、ケース2ではそれぞれ0.4mg/L、0.04mg/Lで増殖が困難な範囲であり、アオコの発生する可能性は低い。このとき、図-14に示すように、ORPは120mV程度の値である。リンの底質からの溶出量はORPが負の値(還元状態)では大きく、ORPが正の値(酸化状態)では減少するとの報告¹⁴⁾があり、7/23における底質からのリンの溶出量は小さいものと考えられる。すなわち、図-12に示したように全窒素も7/23には増加しており、天然ゼオライトおよび生物膜の効果を打ち消すほど、水中には多くの植物プランクトンが生息しており、その窒素およびリンが測定されているためと考えられる。180日後以降は、ケース1、2ともに基準値以下となっている。

(3) pH, アンモニア態窒素, 亜硝酸態窒素および硫化水素

図-16にpHの経時変化を示す。圍繞堤内外においてpHは7~10程度である。施工31日後(4/14)までは堤内外のpHはほぼ同じであるが、施工91日後(6/13)において圍繞堤内の値が堤外よりも1.5程度大きくなり、その後、施工131日後(7/23)に再

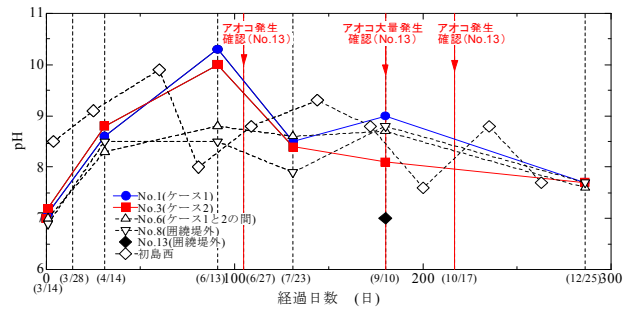


図-16 pHの経時変化

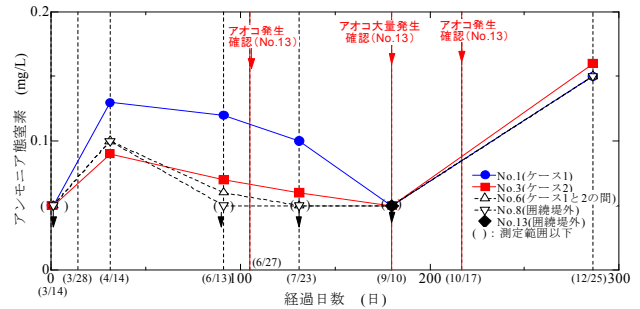


図-17 アンモニア態窒素の経時変化

びほぼ同じ値になる。6/13において値が大きいのは、初島西において60日後に測定された高いpHの湖水が、流れによって施工箇所まで移動し堤内に流入したとも考えられる。また、一般に湖沼の表層近くでは植物プランクトンの光合成により二酸化炭素が消費されて、水素イオンが減少するためにアルカリ性を示すと言われている¹¹⁾。180日以降、気温の低下に伴って二酸化炭素の消費が少なくなるため、pHが徐々に減少している。283日後(12/25)において、すべての場所の値がほぼ同じであるのは、越水の影響である。

図-17に示すように、アンモニア態窒素は0.05~0.15mg/Lであり、雨水中の濃度¹⁵⁾と同程度である。ケース1では、圍繞堤の透水性が低いために水循環が十分に生じないために、他の場所よりも高くなっていると考えられる。特に、283日後(12/25)の測定においては、小雨が降っており、このときのアンモニア態窒素はその影響を受けて大きくなっていると考えられる。なお、亜硝酸性窒素および硫化水素は、測定期間を通じて、いずれも場所においても全く測定されなかった。

4.2 底質分析

図-18~20に、353日後に図-3に示す4点において採取した敷設ゼオライトの全窒素、全リンおよびアンモニア態窒素の吸着量を示す。

浄化効果が顕著に得られたケース2においては、全窒素が初期値の15倍程度、アンモニア態窒素が

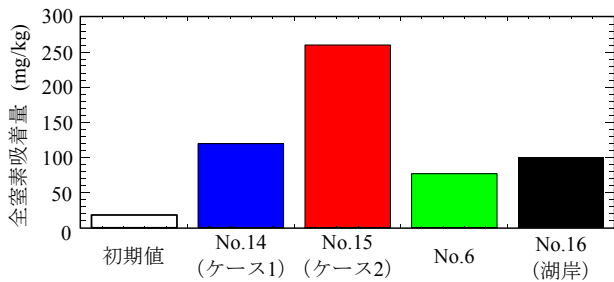


図-18 ゼオライトの全窒素吸着量 (353日後)

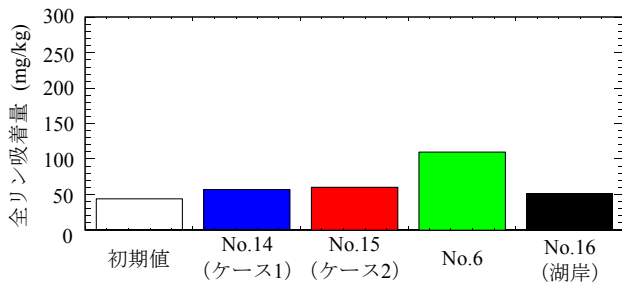


図-19 ゼオライトの全リン吸着量 (353日後)

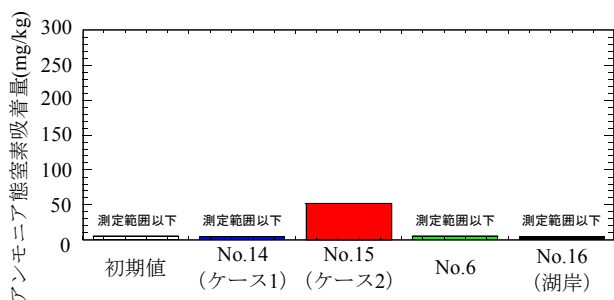


図-20 ゼオライトのアンモニア態窒素吸着量 (353日後)

10倍以上吸着されており、水質浄化における天然ゼオライトの効果が裏付けられた (図-18, 20)。一方、浄化効果が小さかったケース1においては全窒素の吸着量は初期値の7倍程度である。堤外のNo.6の敷設ゼオライトの初期値の5倍程度の窒素を吸着しており、湖底に敷設するだけでも浄化効果が得られる (図-18)。全リンの顕著な吸着はいずれの地点においても認められなかった (図-19)。なお、硝酸態窒素および亜硝酸態窒素の吸着量は、いずれの場所においても測定限界以下であった。

5. まとめ

得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 大型土嚢に天然ゼオライトもしくは玉砂利を充填して2段に積上げることにより、水深80cm程度の湖岸に高さ1m程度の圍繞堤を短時間で容易に施工することが可能である。

- (2) 圍繞堤を施工する場合は、大型土嚢を適切に配置することにより、堤内外の水循環を十分に行えるようにして堤内の水温を上昇させないようにすることが重要である。この場合、天然ゼオライトの吸着効果および土嚢を被覆した透水シート表面の生物膜の効果により水中の全窒素および全リンが減少し、透明度が高くなり、堤内のアオコの発生を防ぐことができる。ただし、堤内のCODは堤外よりも高く、水中に溶存した有機物に対する対策が別途必要である。
- (3) 一方、圍繞堤の透水性が低い場合には、堤内の水が淀んで水温が上昇し、植物プランクトンが多量に発生する。そのため、天然ゼオライトおよび生物膜の効果が打ち消され、水中の全窒素および全リンが増加し、浄化効果が得られない。
- (4) 天然ゼオライトで覆われた堤外の湖底には魚が営巣しており、生物にとっての良好な生息環境が得られていると考えられる。
- (5) 浄化効果が顕著に認められた場合には、敷設ゼオライトの全窒素およびアンモニア態窒素の吸着量が多くなり、ゼオライトの水質浄化に対する有効性が裏付けられた。

謝辞 実証実験は、長野県諏訪建設事務所より委託された「平成19年度国補河川浄化事業に伴う浄化実証実験業務委託」および「平成20年度県単河川維持・河川環境改善事業に伴う浄化効果検討業務委託」として実施された。付記して、感謝の意を表わします。また、諏訪湖釜口水門水位データは、同建設事務所から提供頂いた。付記して、感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 平成20年版環境・循環型社会白書、第3章 水環境。土壤環境、地盤環境の保全、pp.153-166, 2008。
- 2) 例えば、諏訪湖、アーバンクボタ、No. 36, 1997。
- 3) 梅崎健夫、河村 隆、河野剛志、河崎 彰、野村忠明、大寺正志、藤森徳雄、細野武久、西井 淳、境 大学、岡村昭彦、近藤誠二：諏訪湖における天然ゼオライト遊水なぎさの実証実験 (その1)、環境科学年報 一信州大学一、第30号、pp.5-14, 2008。
- 4) 梅崎健夫、河村 隆、河野剛志、河崎 彰、野村忠明、大寺正志、藤森徳雄、細野武久、西井 淳、境 大学、

- 松永 斉, 岡村昭彦, 近藤誠二: ジオテキスタイルと天然ゼオライトを用いた人工なぎさの水質浄化実験, ジオシンセティックス論文集, 第23巻, pp.119-126, 2008.
- 5) MINDECO IWAMI PROFILE イワミライト, 三井金属資源開発株式会社, 2006.
- 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) ハイブリッド浄化工法&シーリングソイル工法,”水”と”天然鉱物”によるon site環境修復技術, シーリングソイル協会.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 気象庁ホームページ 気象統計情報 過去の気象データ 検索< <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>> (2008/8/22アクセス)
- 11) 武田育郎: 水と水質環境の基礎知識, オーム社, 2001.
- 12) 長野県諏訪保健所公式ホームページ, 諏訪湖浄化, <<http://www.pref.nagano.jp/xeisei/suwaho/suwako.htm>> (2008/8/22アクセス)
- 13) 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.
- 14) (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.
- 15) 諫早干潟ネット水質データの基礎知識 <http://www.isahaya-higata.net/isa/libr/lb971030suishitu.html> (2008/8/26アクセス)

(原稿受付 2009.3.10)