ポーラスコンクリートブロックと吸リン材を含む池の水質とリン・窒素収支

相子伸之¹・瀬戸昌之²

Water Quality, and Phosphorus and Nitrogen Balance in a Pond with Porous Concrete Block and Phosphorous Absorbent

Nobuyuki Aiko¹ and Masayuki Seto²

Abstract: Effects of porous concrete block and phosphorus absorbent on water quality purification of a pond are investigated. The pond of the interest is of 40m³ in water storage capacity and 160 cm in depth. Volumetric rates of the water purification materials of the blocks and the absorbents to the pond capacity are 2.5% and 1.2%, respectively. To make it possible for the whole body of water to contact the materials, the pond water is circulated with a pump of 80L/min. As a result, the degree of transparency of the water in the pond has remained more than 160 cm for more than six years. Concentrations of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) have been in the range of a detection minimum (<0.003mg/L) to 0.026mg/L and a detection minimum (<0.2mg/L) to 4.7mg/L, respectively. Loads of TP and TN to the pond from the external sources such as tap water, rain and fallen leaves are 48g/year and 5,300g/year, respectively, while their removals from the pond, including by sediment removals from the phosphorus absorbent tank, are 24g/year and 1,800g/year, respectively. The difference in TP between the amount of loads and removals is roughly identified with 20g/year of the accumulation amount that could be calculated from the distribution of TP in the pond. However, the difference in TN, 3500g/year, deviates from 300 g/year estimated from its distribution. This disparity is considered to balance with the nitrogen loss resulting from denitrification.

Keywords: Transparency; Total phosphorus; Total nitrogen; Phosphorus and nitrogen balance

1 はじめに

親水を目的とした池が公園などに造られている。しかしながら大半の池水は、アオコなどの植物プランクトンの大量増殖で汚濁している。植物プランクトンは、水中のリンや窒素などの栄養塩類濃度が高ければ、これらを利用して増殖し、水は汚濁する(相崎, 1992; 渡辺, 1994; 木村・瀬戸, 1998a; 大村・瀬戸, 2001)。植物プランクトンの増殖を抑制し、池水を清澄に維持するために、水中のリン・窒素濃度を低下させる必要がある。しかしながら、透視度50cm以上の高い透視度を維持するための目標値は、全リン(以下、TP)濃度で0.01mg/L以下、全窒素(以下、TN)濃度で0.2mg/L以下のきわめて低濃度にする必要がある(木村・瀬戸, 1998a)。多くの浄化法ではTP・TNをこの目標値に下げのに十分な能力がないため、高い透視度を維持できない。また、能力が充分であっても、装置が複雑であったり、メンテナンスが煩雑であったりすることもしばしばある。

著者および共同研究者は、ポーラスコンクリートブロック(以下、ブロック)と吸リン材を用いた池水浄化法で、水中のTP・TN濃度を低下させ、透視度を高くすることに成功している(木村・瀬戸, 1998b; 末次・瀬戸, 1998; 相子・瀬戸, 2001)。しかしながら、野外の池において長期間高い透視度を維持した例は少ない。また、浄化材を投入した池における物質収支も不明な点が多い。

そこで本研究では、浄化材を投入した池で長期的な水質調査を行い、簡単なメンテナンスで高い透

視度を長期間維持できるか検討した。また、この池におけるリン・窒素分布とそれらの収支を把握することにより、本浄化法の浄化機構を明らかにし、より有効かつ適切な池水管理のあり方を検討した。

2 材料と方法

2.1 池の概要

実験を行った池は、貯水容量約40m³、面積42m²、周辺の水深70cm、中心の水深160cmのコンクリート張りの池である。池には水道水を1.5L/minの流量で連続的に流入させた。この池には体長約10~30cmのコイを70匹程度入れた。コイのえさは人為的には与えなかった。池の周辺は木々に囲まれており、それらの木々から池に落葉があった。

2.2 浄化材

ブロックは広い表面積を有し、カルシウムを多く含む材料からなる(木村・瀬戸, 1998b)。カルシウムとリンとの不溶性塩の形成やブロックの表面に付着した微生物によるリンの吸収により、池水からのリン除去が期待できる。吸リン材((株)クレアテラ)は鉄・アルミニウムを多く含み、反応性リンの吸着能力が高い火山灰土壌を基材とし、吸リン能力を高めるために硫化鉄を加えて500℃で焼結した粒状(直径2~5mm)の物質である(木村・瀬戸, 1998b)。糠信ら(1998)は、吸リン材のTPの化学的吸着量を1Lあたり60mgと報告している。浄化材表面や内部では付着微生物によってリン・窒素が取り込まれ、さらに嫌氣的な部位での脱窒作用も期待できる。

この池は浄化前に底泥を除去し、1997年から現在の池水浄化を開始した。このときの浄化材投入密度は、水との体積率で、ブロックが2.5%、吸リン材が1.0%であった。その後、1999年に0.02m³、2000年と2001年に0.04m³ずつの吸リン材を加え、その密度は1.2%とした。

¹東京農工大学連合農学研究科博士課程 Ph.D. Student, United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-Cho, Fuchu, Tokyo, 183-8509 Japan

²東京農工大学共生科学技術研究部 Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-Cho, Fuchu, Tokyo, 183-8509 Japan

ブロックは池の中に直接投入した。吸リン材は、水槽（縦70cm×横100cm×高さ60cm）に入れ、池の外に設置した。吸リン材は10L程度に小分けして網袋に入れて数段に敷きつめ、おのおの段には厚さ約2cmのプラスチック製の網を敷いて吸リン材同士が重ならないようにした。池水は、ブロックを通過し、吸リン材の水槽の下方から流入（80L/min）し、上方から池に戻るよう循環させた。

2.3 浄化材洗浄

投入後、ブロックは全く洗浄しなかった。吸リン材は、年に0～数回、水道水で軽く洗い流した。この操作は、吸リン材の粒子の間に蓄積した堆積物を取り除くことにより、これに含まれるリンと窒素を池外に除去するためである。なお、2002年以降はこの操作の軽減のために、吸リン材の水槽にいくつかの穴をあけた塩化ビニル製の管を設置し、この管にブロワで空気を80L/minの速さで吹き込んで、空気の上昇で水槽内を攪乱し、堆積物を除去した。除去した堆積物を含む水は池の外に排除した。

2.4 水質測定

透視度は採水時に透視度計（SANPLATEC, 0～50cm）を用いて測定した。また、50cm以上の透視度は、水面から投げ入れた1円玉が確認できる深さを測定し、これを透視度とした。採水した水は速やかに持ち帰り、実験室で以下の測定を行った。TP濃度は、ペルオキシ二硫酸カリウムで酸化分解し、モリブデン青法により呈色反応させ、*n*-ブタノールで抽出・濃縮して測定した（日本水道協会, 1997）。反応性リン（RP）濃度は、孔径0.45 μ mのメンブレンフィルターでろ過した後、モリブデン青法により測定した。TN濃度は、アルカリペルオキシ二硫酸カリウム分解-紫外線吸光法（日本水道協会, 1997）で測定した。アンモニア態、亜硝酸態、硝酸態窒素濃度はイオンクロマトグラフ（Shodex CD-4（昭和電工）;SCK01（三菱化学）,またはIC I-524A（昭和電工）カラム装着）で測定した。

2.5 TP・TNおよび脱窒菌数の分布の測定

2.5.1 生試料の採取

ブロックの付着微生物は、池に設置したブロックの表面をブラシで擦り取って得た。壁面の付着微生物は、ナイフで切り取って得た。吸リン材の粒子の間に蓄積した堆積物は、池から持ち帰った吸リン材をイオン交換水に入れ攪拌し、吸リン材の粒子を取り除き懸濁液を得た。池底に蓄積した堆積物（以下、底泥）は水深1.6mの池底から手動ポンプで得た。

2.5.2 付着微生物と堆積物の測定

TP・TNを測定するために、採取した生試料の一部は100℃で乾燥した後、乳鉢と乳棒ですり潰し、乾燥試料を得た。TP濃度はモリブデン青法で、TN濃度はC/Nコーダー（Yanaco, MT-700）で測定した。

脱窒菌数を計数するために、採取した生試料をイオン交換水に入れ、ホモジナイザー（日本精機, AM-7）で試料懸濁液を得た。この懸濁液の脱窒菌数をGiltay培地を用いたMPN法で計数した。

2.5.3 計算

水中、ブロック、壁面上の付着微生物、吸リン材槽に蓄積した堆積物中、底泥中の単位面積または単位体積当たりのTP・TN濃度、および脱窒菌密度から池のそれぞれの場所における池あたりのTP・TN量、および脱窒菌群数を算出した。また、魚のTP・TN量は湿重量:乾重量:TP:TNがおおよそ330:100:2:10として算出した。

3 結果

3.1 水質の経時変化

この池は6年間、50cm以上の高い透視度を維持し（図1）、ほとんどの測定値は160cm以上であり池の底まで確認できるほど透明であった。TP濃度は検出下限（0.003mg/L）以下～0.026mg/Lで推移し、ほとんどの測定値は0.01mg/L以下であった。RP濃度は常に検出下限（0.003mg/L）以下であった。TN濃度は検出下限（0.2mg/L）以下～4.7mg/Lで推移した。アンモニア態、亜硝酸態窒素は常に検出下限（0.1mg/L）以下であった。硝酸態窒素濃度は検出下限（0.1mg/L）以下～4.7mg/Lで推移し、水中のTNのほとんどは硝酸であった。

図1: 池水中の透視度, TP, TNの経時変化（浄化材としてブロック, 吸リン材をそれぞれ2.5% (v/v), 1.2% (v/v) 投入した。矢印は吸リン材槽の堆積物の除去を示す。）

3.2 池のリン・窒素分布

池ではTP・TNの多くが底泥に存在していた（図2）。その量はそれぞれ115g, 1,500gであり、水中に存在する

図2: 池の水, 魚, 生物膜および堆積物のTP (○), TN (●)の分布 (単位:g) (試料は2002年8月に採取したもの (n=3))

図 3: 池の TP・TN 収支

量のそれぞれ115倍・19倍に相当した。底泥は、1997年から少しずつ蓄積がみられ、2002年の夏には平均の深さは4.0cm ($n=40$, $SD=4.0$) であった(図には示していない)。

3.3 池におけるリン・窒素収支

池には水道水、降水、および落枝落葉から48g/yearのTPが流入した(図3)。この流入のうち、オーバーフローの排水と吸リン材洗浄で24g/yearのリンが流出した。流入と流出の差から得られる池への蓄積量は24g/yearと算出された。

実験池には水道水、降水、および落枝落葉から年間5,300g/yearの窒素が流入した(図3)。この流入のうち、オーバーフローの排水と吸リン材洗浄で1,800 g/yearの窒素が流出した。流入と流出の差から得られた池への蓄積量は3,500 g/yearと算出された。

3.4 池の脱窒菌数

脱窒菌数は水、吸リン材槽、および底泥の中に多く存在していた(表1)。

表 1: 池の水、生物膜、堆積物中の脱窒菌数の分布

試料	脱窒菌数 ($\times 10^7$ MPN)
水	9.2 - 92.0
ブロックの付着微生物	0.0 - 0.2
壁面の付着微生物	1.4 - 5.8
吸リン材槽の堆積物	19.0 - 21.0
底泥	30.0 - 67.0

4 考察

ブロックと吸リン材をそれぞれ2.5%, 1.2%投入した池では、50cm以上の高い透視度を6年以上維持し、ほとんどの場合、160cm以上のより高い透視度を示した(図1)。これだけの長期間にわたって、高い透視度を維持した浄化法は、著者らの知るかぎりではほとんどない。その間、ブロックは入れたまま洗浄せず、吸リン材洗浄は年0～5回の低頻度であり、維持管理も簡単であった。相子・瀬戸(2001)は、ブロックと吸リン材が、それぞれ10%と2%のときでは5年間、20%と4%のときでは6年間以上、特別な維持管理をせずに50cm以上の透視度が維持できたことを報告した。本報告で浄化材の投入密度が低くても吸リン材洗浄をして、高い透視度が維持できることを実証した。また、2002年から行ったブロワによる吸リン材洗浄でも効果が得られ、この装置を設置しておけば、1人でも簡単に洗浄ができるようになった。

水中のTP・TN濃度は常に水道水よりも低くなり、特にTP濃度はほとんどの測定時において0.01mg/L以下であった(図1)。木村・瀬戸(1998)は、池水管理のためのTP・TN濃度目標値をそれぞれ0.01mg/L・0.2mg/Lとして、どちらか一方をこの濃度以下にするか、もしくはTP・TN濃度の両方を下げてこの値に近づけることで50cm以上の透視度が維持できると報告している。この池では多くの場合、TP濃度が低く、TP濃度が高まったときでもTN濃度が低かったために50cm以上の高い透視度が維持できたと考えられる。

TP・TNは水中にはほとんど存在しておらず、底泥に多く存在していた(図2)。この量は水のTP・TNの115倍・19倍であり、これらが巻き上がりや溶出で水に放出すれば、水のTP・TN濃度は跳ね上がり、水は濁るであ

ろう。しかしながら、水のTP・TNの濃度は低く維持されたのだから、底泥から水へのみかけ上のTP・TN放出はなかったと考えられる。著者ら(2003)は、浄化材を投入した水槽の底泥では、投入しない水槽よりTP・TN放出速度が低くなることを報告しており、浄化材の投入がこの池の底泥のTP・TN放出を抑制していると考えられる。また、底泥は、1997年から2002年までの6年間で蓄積し、その深さは平均4.0cmであった。底泥の体積を、池の底面積42m²から算出すると1.7m³であった。この量は、水量に比べて小さく、そのため底泥の蓄積による池の埋没については、数十年間は考慮する必要はないと考えられる。

池に流入した48g/yearのTPのうち、24g/yearが流出した。この24g/yearのうち、17g/yearの大部分が吸リン材洗浄で除去されており、積極的に吸リン材を洗浄することにより池に蓄積するTPを除去することが可能であると考えられる。一方、TNは5,300g/yearが流入し、1,800g/yearが流出した。この1,800g/yearのうち、吸リン材洗浄で除去されるのは100g/yearの少量であり、窒素の除去に吸リン材洗浄は有効ではなかった。

TPの流入48g/yearと流出24g/yearの差から得られた池への蓄積量は24g/yearであり、このTPは、壁面、ブロックの付着微生物への吸収、底泥への堆積、および吸リン材へ化学吸着したことが考えられる。ここで、池のTP分布(図2)から蓄積したリンの収支について考察する(表2)。それぞれの場所には、浄化材設置時の1997年から分布量を測定した2002年までの約6年間にTPが蓄積したと仮定すると、図2で示した分布量を6年で割ると年あたりの平均蓄積量が得られる。ブロック、壁面の付着微生物にそれぞれ0.3g/year、0.5g/year、底泥には19.2g/yearのTPが蓄積しており、これらの合計は20g/yearとなる。流入と流出の差から得られた池への蓄積量24g/yearとTP分布から得られた蓄積量は概ね一致し、これらの蓄積量の差は4g/yearの小さい値になった。また、この4g/yearは吸リン材に化学的に吸着したことも推定される。

表 2: 池における TP・TN の蓄積速度

蓄 積 速 度 (g/year)	TP	TN
流入と流出の差 ¹⁾ : A	24.0	3,500
測定値の合計 ²⁾ : B	20.0	287
ブロック上の生物膜	0.3	5
壁面上の生物膜	0.5	32
底泥	19.2	250
A - B	4.0	3,213

1) 図3 参照 2) 図2 から算出した。

一方、TNの流入5,300g/yearと流出1,800g/yearの差は3,500g/yearと算出される(図3)。ブロック、壁面の付着微生物、および底泥にそれぞれ5g/year、32g/year、および250g/yearが蓄積しており、これらの合計は287g/yearであった(表2)。流入と流出の差から得られた池への蓄積量とTN分布から得られた蓄積量の差は3,213g/yearの大きい値を示した。TP収支がこの池の収支を反映しているのであれば、測定値に同じ係数を乗じているTN収支も同様にこの池の収支を反映しているであろう。したがって、この3,213g/yearのTNは脱窒されたと考えられる。このことから、この池に流入したTNの

34%はオーバーフローの排水や吸リン材洗浄により流出し、61%は脱窒されており、池にはほとんど蓄積していないことが考えられた。

池における脱窒菌数(表1)は、水中、吸リン材槽の堆積物、および底泥に多く分布していた。水中のDOは年間を通じて8~9mg/L(データには示していない)であり、水中で脱窒がおこることは考えがたいことから、吸リン材槽と底泥の嫌気的な堆積物で多くの窒素が脱窒されていると考えられる。また、ブロックと吸リン材の投入によって底泥の脱窒菌数が増加すること(相子ら、2003)が明らかになっている。これらのことは、本浄化法では底泥の除去は必要なく、むしろ脱窒には底泥を除去しない方が窒素除去に有効であると考えられる。

本研究で示したTP・TNの流入量(図3)は、大きな誤差を含んでいるかもしれない。たとえば、水道水からのTP・TNの流入は濃度に流速を乗じた値で、TP・TN濃度はほとんど変動しなかったものの流速には±20%程度の誤差があった。落枝落葉からのTP・TNの流入量は平均的な温帯落葉樹林における降水量800g(乾燥重量)にこの池への正味の流入割合0.25を乗じて推定した。落枝落葉からの流入にはこれらの誤差が相乗され±50%程度の誤差があろう。これらの誤差は本研究の池のTP・TN収支にどのように影響するだろうか。

たとえば吸リン材の化学的吸着量に着目する。糠信ら(1998)が報告した吸リン材の化学的吸着量から、この池に投入された吸リン材0.5m³は30gのTPを吸着すると見積もられる。この値を6年で除すると5g/yearが吸着できる計算になる。ゆえに、流入と流出の差から得られた池への蓄積量とTP分布から得られた蓄積量の差は0~5g/yearとなり、これよりTPの流入量は44~49g/yearと算出される。したがって、図3で示したTP流入量と実際に池に流入した量とは大きくかけ離れていない。このことから、同様の方法で算出したTN流出量も妥当な値であると考えられる。

5 むすび

本浄化法は、高密度だけでなく低密度の浄化材投入でもTP・TN濃度を低下させ、6年間以上の長期間にわたって、透視度50cm以上を維持した。底泥には水を濁らせるのに十分なTP・TNが存在していたが、底泥は除去する必要がなく、むしろ浄化に貢献していた。また、本浄化法は塩素や重金属など生物に有毒な薬品などを使わないため、水、底泥、浄化材にはそれぞれをすみかとする生物が生息可能であり、水は災害時の用水として使うことも可能であろう。本法は、「生きている水辺」を簡単に創出し、かつ維持が簡単な優れた池水浄化法といえよう。

謝辞

本研究費の多くの部分は株式会社豊栄、太平洋セメント株式会社に負うた。記して謝意を表する。本稿の執筆にあたり、東京農工大学環境微生物学研究室の多羅尾光徳博士や学兄たちに多くのご提案をいただいた。記して謝意を表する。

引用文献

- [1] 相子伸之・瀬戸昌之(2001): ごく低頻度のメンテナンスで、長期間にわたって高い透視度を維持することが可能な池水浄化法, 多自然研究, 75, pp.3-6.

- [2] 相子伸之・岩本知里・瀬戸昌之 (2003): ポーラスコンクリートブロックと吸リン材が底泥を含む水槽の水質に及ぼす影響, 人間と環境, **29**, pp.107-116.
- [3] 相崎守弘 (1992): 水質汚濁のメカニズムと浄化技術, 水と緑の読本-特集/公園の水と水辺の管理, **28**, pp. 926-930.
- [4] Alexander, M. (1965): Denitrifying bacteria, in *Methods of Soil Analysis, Part2*, Ed. C. A. Black, American Society of Agronomy Inc., Wisconsin, pp.1484-1486.
- [5] 木村綾・瀬戸昌之 (1998a): 都市の人工池におけるリン窒素の分布と透視度との関係, 雨水技術資料, **30**, pp.69-74.
- [6] 木村綾・瀬戸昌之 (1998b): ポーラスコンクリートブロックと吸リン剤を組み合わせた池水浄化法の提案, 人間と環境, **24**, pp.22-27.
- [7] 中川智絵・糠信輝領謹・瀬戸昌之 (2000): 吸リン材とポーラスコンクリートブロックを組み合わせた池水浄化法を用いた水槽における添加したリンと窒素の分布, 人間と環境, **26**, pp.110-117.
- [8] 日本水道協会 (1997): 上水試験法1993年版, 第四版, pp.180-183.
- [9] 日本水道協会 (1997): 上水試験法1993年版, 第四版, pp. 202-203.
- [10] 糠信輝領謹・末次康隆・木村綾・瀬戸昌之 (1998): ポーラスコンクリートブロックと吸リン剤を用いた池水浄化法における浄化メカニズムの一考察, 人間と環境, **24**, pp.86-92.
- [11] 大村恵・瀬戸昌之 (2001): 池水の透視度とクロロフィルa濃度および全リン・全窒素濃度の関係, 人間と環境, **27**, pp.64-69.
- [12] 末次康隆・瀬戸昌之 (1998): ポーラスコンクリートブロックと吸リン剤を用いた親水池づくり, 多自然研究, **30**, pp.3-10.
- [13] 田淵俊雄 (1985): 降雨中の窒素とリン, 水質汚濁研究, **8**, pp.486-490.
- [14] 渡辺泰徳 (1994): 公園の池, その水の色と質, 水と緑の読本-特集/公園の水と水辺の管理 (Ⅱ), **30**, pp. 883-888.

〔この論文に対する公開の質疑または討議は2004年12月31日まで受付けます。〕