

(41) 底面濾床法による池水の直接浄化に関する実験

Direct water quality improvement by a bottom filter

山崎惟義*、松永雄二**、中原俊輔***、正本博士***

Koreyoshi YAMASAKI*, Yuji MATSUNAGA**, Shunsuke NAKAHARA***, Hiroshi MASAMOTO***

ABSTRACT ; Water pollution caused by eutrophication has been worse year after year. Conventional methods for purification of an eutrophicated water like fast filtration or flocculation cost quite high and some times they cause secondary pollution. In this paper very slow bottom- filter method is proposed for this purpose and experiments were carried out to evaluate the method. In these experiments a sand-filter and a gravel-filter were set on whole the bottom of tanks and the water in the tanks was circulated by a pump and a airlift-pump through the filters. As the results, it is shown that water polluted by eutrophication can be purified thoroughly by a bottom-filter, remarkable clogging of the filters could not be observed, an airlift-pump can decrease pH to eliminate non-ionic ammonium which causes serious fishkill and the method can be expected not only to improve water quality but also sediment.

KEYWORDS : Bottom-filter, Eutrophication, Water-quality, Purification, Sediment

1. はじめに

富栄養化による水質汚濁の弊害についてはよく知られているところである。これに対して殺藻剤や各種水処理装置を用いて処理する方法などが提案されている。しかし、低コストでかつ二次的な水質汚濁の可能性がなく実用的な方法は現在のところ見当たらない。このような中で、著者らはアオコのような浮上性の藻類を回収するための藻類回収トラップ¹⁾⁴⁾、懸濁態の微細藻類の沈殿促進を計り直接浄化するための網状接触材^{5),6)}を用いた手法ならびに緩速濾過法を応用した底面濾床^{7),8)}による手法などの開発に取り組んで来た。これらの手法は浄化装置を池外に別置するのではなく、池の中に設置して池水を直接浄化しようとするものであり、用地問題がなく、また、装置そのものも非常に簡単であるため建設、運転管理のコストが低廉なものとなり得ると考えられる。その中でも底面濾床による方法は水質を良好な状態に保ち得るというデータが得られて来た^{7),8)}。

本論文で提案している底面濾床法は池の底面の全部あるいは一部を砂を用いた濾床とし、緩速濾過（4-5m/d）よりさらに低速の濾過速度（本実験の場合 0.17-0.35m/d）で池水を直接濾過し、池へと循環しようとするものである。従って、本手法の特色として砂濾過であるため藻類を含めた懸濁粒子の捕捉はほぼ完全になされ得ること、かなり低速の濾過であるため濾過によるヘッドロス小さくすることができ、運転コストを低く抑え得ること、直接池底を濾床として用いるため、別置の場合に比較し設置用地や配管が少ないことなどが挙げられる。特に浅い池の場合、循環のサイクルタイムが短くなり効果的と思われる。

しかし、このような手法を用いた池水の直接浄化に関する研究はほとんどなく、その効果、実用可能性さらに問題点などに関する知見は見当たらない。そこで、本研究では底全体を底面濾床とした実験槽を野外に設置し栄養塩を添加するという自然に近い状態の富栄養化湖沼のモデルを用い、底面濾床法による水質改善効果を明らかにするための実験を行った。また、本実験では水の循環方法として、通常を送水方法である定量ポンプによるものの他、底面濾床から浸出してくる循環水が貧酸素になった場合の対策を念頭においてエアリフトによる方法についても実験を行った。さらに、礫間浄化法との比較のために礫のみを濾床としたものとの比較実験も行った。

*福岡大学工学部土木工学科(Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Fukuoka University)

** (株) 新日本環境計測 (New Japan Environmental Measurement)

***福岡大学工学部化学工学科(Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Fukuoka University)

2. 実験方法

2. 1 実験装置

本実験で用いた実験装置を図1に示した。本実験槽は富栄養化湖沼をモデル化した約 0.2 m³ の水槽、その底面に充填した底面濾床と水循環のための穴開き管および循環ポンプよりなる。循環ポンプとしてはコールパーマー社製送液定量ポンプ (PA-25A) および図2に示した自作のエアーリフトポンプを用いた。このような実験槽を5槽設けた。第1

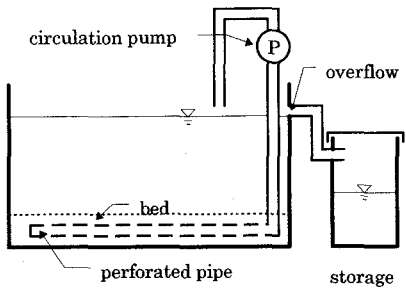


Fig. 1 Set up of a experimental apparatus

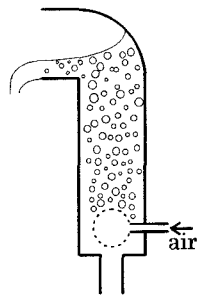


Fig. 2 Schematic view of the air lift pump

槽 (礫床槽) には底面濾床に礫大のみを用い、第2槽 (ポンプ循環槽)、第3槽 (エアリフト槽) および第5槽 (無循環槽) は図1に示したように砂、礫小、礫大を濾床とし、第1槽、第2槽は定量ポンプ循環、第3槽はエアリフトポンプ循環、第5槽は循環無であり、第4槽 (無濾床槽) は濾床を設けていない。

2. 2 投入栄養塩

投入栄養塩の組成は表1の通りである。この溶液を栄養塩負荷として 0.0215 mgN/day、0.00525 mgP/day となるように各水槽に1週間に1回投入した。この投入量は1年間で約 8.0 mgN/L、2.0 mgP/L に相当する。

表1 投入栄養塩溶液 1L 中の各成分	
尿素	0.6 g
KH ₂ PO ₄	0.3 g
MgSO ₄ · H ₂ O	0.3 g
FeSO ₄ · 7H ₂ O	0.005 g
EDTA	0.007 g
Arnon's-A5	1.0 mL

表2 Arnon's-A5 1L 中の各成分	
H ₃ BO ₃	6 g
MnCl ₂ · 4H ₂ O	1.81 g
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.22 g
CuSO ₄ · 7H ₂ O	8 g
Na ₂ MoO ₄	0.021 g
H ₂ SO ₄	1 滴

第1、4槽は1993年3月23日より、その他の槽は1993年11月8日より実験を開始し、1994年11月5日に終了した。そのため、2、3、5槽では、4槽に開始時より11月8日までに投入した栄養塩量と同量の栄養塩を実験開始時に投入した。

2. 3 実験条件

実験条件を表3に示した。

2. 4 測定分析

項目、分析間隔、分析方法
測定分析項目、分析間隔、分析方法を表4に示した。

表 3 実験条件			
実 験 水 槽			
水容積		0.18 m ³	
水深		0.39 m	
濾 床			
濾床面積		0.336 m ²	
濾床材料とその層厚			
材料	粒径	第 1 槽 (礫大のみ)	第 2、3 槽、5 槽
砂	0.5 mm (平均)	0 cm	3.5 cm
礫小	0.5 - 1.0 cm	0 cm	3.5 cm
礫大	1.0 - 2.0 cm	10.0 cm	3.5 cm
循 環			
循環ポンプ	定量ポンプ (1、2 槽)	エアリフトポンプ (3 槽)	
流量	0.06 m ³ /day	流量	0.12m ³ /day
濾材との接触時間	0.588 day	濾材との接触時間	0.294 day
循環日数	3 day	循環日数	1.5 day

3. 実験結果

3. 1 礫床槽 (第1槽) と無濾床槽 (第4槽) との比較

表記各槽の濁度、全窒素、全リン、TOC、クロロフィルの分析結果を図3から図7に示した。図4、5の全窒素、全リンのグラフには栄養塩投入による各塩類濃度の理論値を破線で示した。この破線ののこぎり状の変化、特に鉛直の低下は降雨による希釈とオーバーフローによるものである。この図から以下のことが分かる。

濁度は1993年8月からのデータであるが、対照槽である無濾床槽に比較し、礫床槽はかなり小さい値を

示している。対照の濁度は冬に低く夏に高くなる傾向を示しているが、礫床槽では必ずしも同様の変化はしていない。また、それぞれの槽で濁度の変動は非常に激しい。礫床槽で約500日位から濁度の値がそれ以前に比較し高くなっている(図3参照)。

対照の全窒素は200日ごろまでは

表4 測定分析項目、分析間隔、分析方法		
分析項目	分析間隔	分析方法
水温	1日	水質チェッカー U-10 掘場製
pH	〃	〃
濁度	〃	〃
溶存酸素濃度	〃	〃
全窒素濃度	7日	JIS K0102-45.2
溶性全窒素濃度	〃	No.5C ろ紙による濾過後 JIS K0102-45.2
全リン濃度	〃	JIS K0102-46.3.1
溶性全リン濃度	〃	No.5C ろ紙による濾過後 JIS K0102-46.3.1
有機炭素濃度	〃	JIS K0102-22
クロロフィル濃度	〃	アセトン抽出・吸光度法

理論負荷とほぼ同じ値を示しているが、それ以降理論負荷の方は希釈されながらも徐々に増加しているのに対し、それほど大きくない。礫床槽と対照を比較すると、初期の30日程度まではほぼ同じ値を示し、それ以降礫床槽はほとんどの期間で対照よりかなり小さな値を示している。しかし、約500日以降では対照とあまり変わらない値を示している。また、450日以降理論負荷が減少することなく増加一方であるのはこの間に降雨がなかったためである(図4参照)。

全リンについても全窒素とほぼ同様の傾向にあるが、全窒素に比較し対照と礫床槽との開きが大きいようである。また、500日以降礫床槽で大きくなる傾向も全リンに比べかなり小さい(図5参照)。

礫床槽と対照槽のTOCを比較すると全窒素、全リンと同様な傾向を示している。ただ、全窒素、全リンに比較し180日から400日の間でその差はかなり小さくなっている(図6参照)。

クロロフィルは450日以降のデータしかないが、濁度とほぼ同じ傾向を示し、一点の例外があるものの、礫床槽に比較し対照槽の方がかなり大きな値を示している(図7参照)。

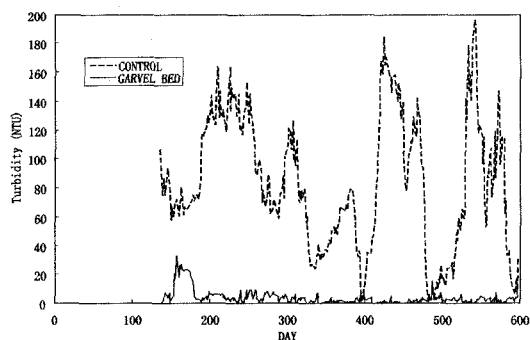


Fig. 3 The turbidity in the tanks of the gravel bed and the control.

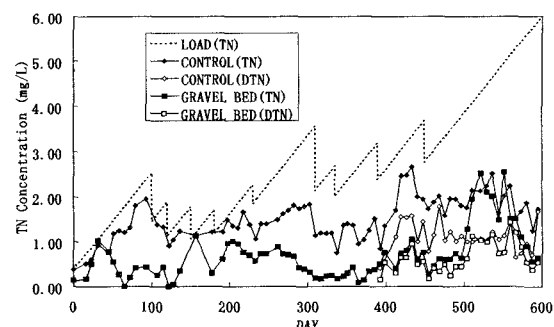


Fig. 4 The TN and the DTN in the tanks of the gravel bed and the control and the load.

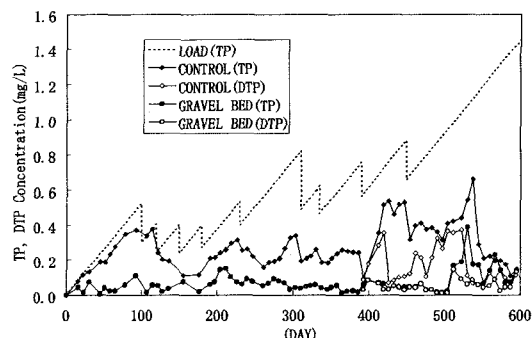


Fig. 5 The TP and the DTP in the tanks of the gravel bed and the control and the load.

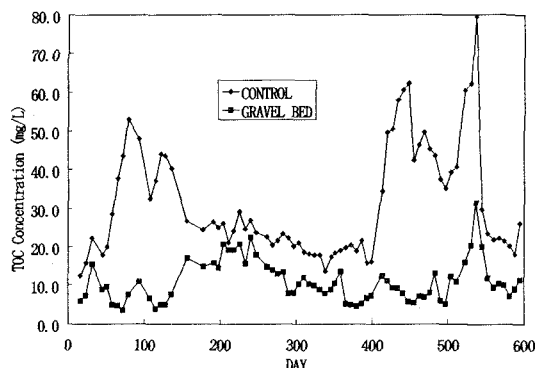


Fig. 6 The TOC in the tanks of the gravel bed and the control.

3. 2底面濾床循環槽（第2、3槽）と無循環槽（第5槽）との比較

表記槽の濁度、窒素、りん、TOC、クロロフィルの分析結果を図8から図13に示した。これらの図から以下のことが分かる。

濁度は無循環槽に比較し、ポンプ循環槽でもエアリフト槽でもかなり小さな値を示している。ポンプ循環槽とエアリフト槽とを比較するとエアリフト槽の方が若干小さいように見える。また、無循環槽では夏に高く冬に小さい傾向が見られる。どの槽でも濁度変動は不規則で激しい（図8参照）。

底面濾床の全窒素は無循環槽においても負荷に追従すること無くほぼ一定の値を示している。ただ、無循環槽では実験開始当初に一度にかなりの負荷を与えたため、負荷にほぼ等しい値を示している。一方、ポンプ循環槽、エアリフト槽では最初の負荷の影響が見られず、無循環槽に比較し常に低い値を示している。そのうちでもエアリフト槽はさらに小さな値を維持している（図9参照）。

全りんは全窒素とほぼ同様の傾向を示しているが、これら3つの槽で時間の経過とともにゆっくりと減少傾向にある（図10参照）。

表記の3つの槽の TOC の値は濁度と似た傾向を示しているが、無循環槽と循環している槽との差は大きくない。また、無循環槽について初期の50日間で濁度は最も大きくなっているが、TOCの方は180日前後の方が大きくなっている（図11参照）。

クロロフィル濃度は230日以降のデータしかないが、無循環槽に比較し循環している槽はかなり小さな値を示しており、その中でもやはりエアリフト槽の値が小さい（図12参照）。

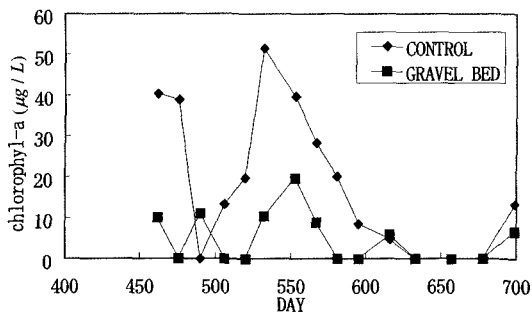


Fig 7 The chlorophyll-a in the tank of the gravel bed and the control.

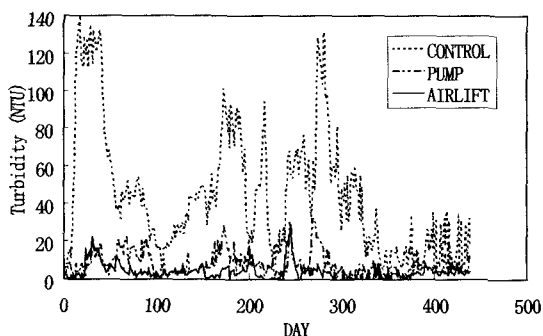


Fig 8 The turbidity in the tanks of sand-beds with circulation by the pump and the airlift.

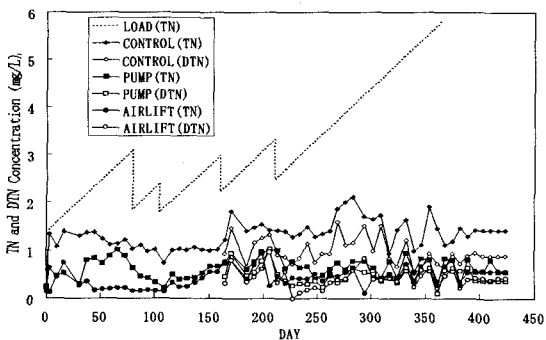


Fig 9 The TN and the DTN in the tanks of sand-bed with circulation by the pump and the airlift and the control and the load

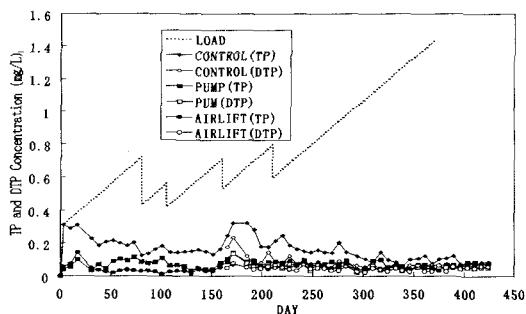


Fig. 10 The TP and the DTP in the tanks of sand-bed with circulation by the pump and the airlift and the control and the load

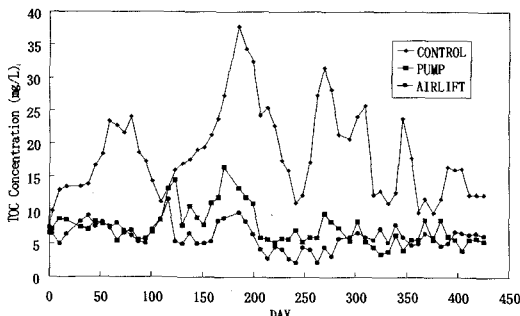


Fig. 11 The TOC in the tanks of sand-beds with circulation by the pump and the airlift.

砂濾床槽の pH の月平均経時変化を見ると、いくつかの例外はあるものの、無循環槽が最も高くポンプ循環槽、エアリフト槽の順番で低くなっている。この場合、エアリフトと他の槽との差が大きい(図 13 参照)。

3. 3 アオミドロ様糸状藻類の発生

底面濾床の総ての槽において 240 日ないし 260 日ころにアオミドロ様糸状藻類の発生が見られた。しかし、無濾床槽では終始この糸状藻類は見られなかった。

4. 考察

4. 1 各槽の浄化特性とメカニズム

各手法の特徴

礫床槽

この手法は鉛直流式礫間浄化とも言うべきもので、礫の中を通して水を循環させている。この槽では栄養塩(図 4、5)、濁度(図 3)、TOC(図 6)から見て対照の無濾床槽に比較しかなり改善されている。しかし、砂層を有するポンプ循環槽などに比較すると改善の程度はさほど良くない。また、400 日ころから栄養塩濃度が上昇傾向にあり、有効な期間が制限される可能性もある。

無循環槽

この槽は単に底面に砂を敷いただけでその中を通して水を循環させていないにもかかわらず、無濾床槽に比較し総ての指標(図 8 から図 12)が良好な値を示している。特に、初期において無濾床槽の場合、負荷量に等しいだけの栄養塩の増加があるにもかかわらず、この槽ではその増加は見られない。この理由として砂そのものへの栄養塩の吸着や砂表面に発達した生物層による栄養塩の消費が考えられる。松永⁹⁾らが示しているように、この実験でも短期間においては砂への吸着も考えられるが、長期間の効果については生物による作用の可能性が高いと考えられる。いずれにしても底面濾床そのものの効果を示すものである。

ポンプ式底面濾床法

この手法は緩速濾過法と同様の方法であり、懸濁物質の良好な捕捉が期待された通り、総ての指標(図 8 から図 12)で良好な値を示している。しかし、栄養塩については無循環槽が無濾床槽に比較しかなりの程度の水質改善を示しているの、本槽と無循環槽との差は本槽と無濾床槽との差程大きくない。

エアリフト式底面濾床槽

底面濾床内が嫌気の状態になった場合、循環水が低酸素状態になると考えられる。これをそのまま循環させると池水の酸素濃度が低下する可能性があること、アンモニアや硫化水素など有毒な物質が池水へ流入する可能性がある。そこで、本法では水の循環と酸素の供給を同時行うため、エアリフトポンプを用いた。本実験では低流量になるとエアリフトが不安定になったため、ポンプ循環に比較し循環流量が大きくなった。従って、エアリフトそのものの効果を分離することができなかった。このため、どちらの効果によるか分からないが、ポンプ循環槽に比較し、総ての指標に対し水質はより改善されていた。また、pH はポンプ循環に比較しても低い値を示していた。これは山下¹⁰⁾らによって示されているエアレーションによって pH をコントロールする

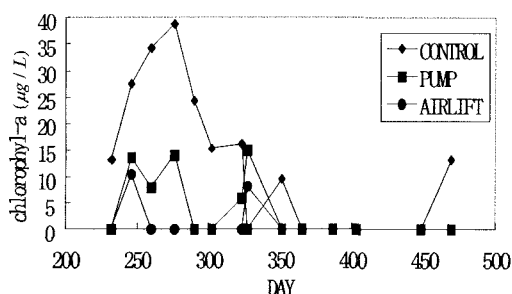


Fig. 12 The chlorophyll-a in the tanks of sand-beds with circulation by the pump and the airlift.

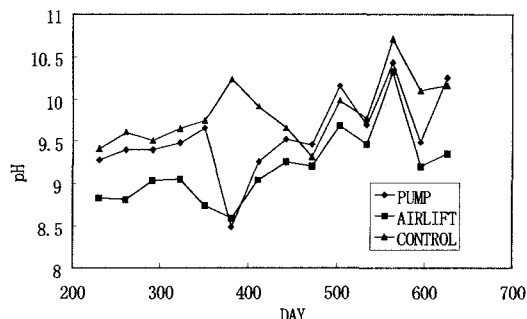


Fig. 13 The pH in the tanks of sand-beds with circulation by the pump and the airlift.

手法に関する知見とも合致しており、エアリフトによる効果と考えられる。この利点として魚毒性が非常に強いと言われている¹¹⁾遊離のアンモニアの低下などの効果が期待できる。

4. 2別置濾過法との比較

湖沼の富栄養化対策としての別置の濾過法では一般に薬品凝集-急速濾過法が用いられている^{12),13)}。これは、用地を節約するためであることが多い。しかし、この手法では濾床の閉塞や汚泥の発生が多いことなどの問題がある^{11),13)}。しかし、ここで示した底面濾床の場合、視認できるような底泥の発生や濾過抵抗の増加は見られなかった。このような特色は緩速濾過法でも認められている¹⁴⁾が、ここで提案した手法はさらに濾過速度が小さいものであり、目詰の軽減や生物による浄化効果をより高くできると考えられる。これも池そのものの底面を全面または一部を濾床とすることにより用地が不要であり、濾床面積を大きくとることができることにより達成されるものである。

4. 3アオミドロ様糸状藻類の処理

実験結果で述べたように、実験終了近くになってアオミドロ様糸状藻類の発生が見られた。このような糸状藻類や固着性藻類は浮遊性の微細藻類が多量に発生している時は光や栄養塩の競合によりあまり発生しないが、微細藻類が底面濾床で除去されると光や栄養塩の競合が起こらなくなり発生するようになると考えられる¹⁵⁾。実際、微細藻類が多量に発生している無濾床槽ではこれらの糸状藻類はほとんど見られなかった。

このような糸状藻類は水質の面からは特に問題が無いと言われている。しかし、景観的には好ましいとは考えられない。また、これらを放置すると枯死、分解により栄養塩の回帰や酸素不足などを招く恐れがある。

この対策として、人為的に除去する方法と魚などの食物連鎖の中に取り込む方法とが考えられる。人為的除去とその利用については丹羽^{16),17)}らや中本¹⁴⁾らが詳細に報告している。また、糸状藻類を食料とした時の栄養価に関する知見も報告されている¹⁸⁾。これらによると人為的に回収できれば利用可能と考えられる。魚などによる方法については現在のところ有用な知見はほとんど見当たらない。ただ、カワバタモロコがアオミドロを好んで食するという報告¹⁹⁾やその他の魚や水生生物とアオミドロとの食物連鎖に関する知見^{20),21)}もあり、これらの利用が考えられる。

4. 4目詰、底泥形成

自然浄化機能を利用する場合、底泥の発生とその処理には十分配慮する必要があるという須藤ら²²⁾の指摘がある。また、底面濾床法の場合、濾層の目詰が懸念される¹⁾。

本実験においては濾床表面に汚泥の堆積がほとんど見られなかった。また、コンクリート製の池の一部を底面濾床とし、残りをコンクリートのままとした実験において底面濾床表面の方がコンクリート部より底泥の堆積が少ないように見えるという結果も得ている。この実験では2年間継続したが、目詰りによる障害は無かった⁹⁾。

上述の底面濾床法における汚泥の堆積が少ないことと、強制浸透流による底泥への酸素の供給に関する知見^{22),23)}とを考え合わせると、底面濾床法の強制浸透による酸素の供給によって濾床あるいはその上に堆積した汚泥中の生物活性が高まり、有機物の分解が促進されたために、底泥の累積が少なくなったと考えられる。このことは底面濾床法には藻類制御としての効果だけではなく、底質改善効果も期待されることを示唆している。

このように、本手法は実用化の可能性が高いと考えられる。

5. 結論

底面濾床法を用いた水質浄化実験と考察により、次のような結論を得た。

- (1) 循環を行う場合、底面濾床を礫としたものでも水質は浄化されたが、砂にしたものの方がより効果的であった。
- (2) 砂の底面濾床を用いた場合、循環をしない場合でも濾床のないものに比較すると浄化効果が見られた。

- (3) 自作のエアリフトポンプにより十分循環可能であり、水質も浄化できた。また、これでは pH を低くすることができた。
- (4) 底面濾床ではアオミドロ様の糸状藻類が発生した。アオミドロ様糸状藻類煮については、文献によりその利用法、対処法について論及した。
- (5) 底面濾床法では藻類の除去による水質改善だけでなく、底質の改善や濾床の目詰も防止できる可能性がある。

謝辞

本実験は福岡大学工学部土木工学科の卒業論文の一貫としてなされた。実験に参加して頂いた浦田真治君、中島徹之君、林圭一君に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 山崎惟義: 藻類回収トラップを用いた都市湖沼浄化システムの開発に関する研究, 九州大学工学研究科学学位論文, 1989.
- 2) Yamasaki K., Matuda K. and Awaya Y.: Floating Trap Removal of Surface Pollutants, Preprint of Poster Papers of Water Pollution Research and Control, KYOTO, July 29-August 3, pp. 667~670, 1990.
- 3) 山崎惟義・松田有弘・津野崎浩子: 都市湖沼水質浄化に関する研究-藻類回収トラップの効果について-, 福岡大学工学集報, 35 号, pp. 175~181, 1985.
- 4) 山崎惟義・栗谷陽一・津野崎浩子・松田有弘: SMAC による藻類回収トラップのシミュレーション, 衛生工学研究論文集, Vol.23, 91~100, 1987.
- 5) 山崎惟義・山下ルリ・松尾景治: DIRECT ALGA REMOVAL FROM EUTRO-PHICATED WATERS USING WIRE-LIKE CONTACT MEDIA, IAWQ-IAWS Workshp on SEPA RATION OF MICROORGANISMS FROM WATER AND WASTE WATER (PREPRINTS), pp. 95~102, 1995.
- 6) 山崎惟義・松尾景治: 富栄養化湖沼の接触材による直接浄化, 平成 6 年度土木学会西部支部研究発表会講演集, pp. 222~223, 1995.
- 7) 山下ルリ・山崎惟義: 藻類の網状接触材への付着剥離と沈殿による除去, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演集第 2 部, pp. 1995.
- 8) 柴田憲一・山崎惟義・中原俊輔: 底面ろ床を用いた池水の浄化に関する研究, 平成 5 年度土木学会西部支部研究発表会講演集, pp. 280~281, 1994.
- 9) 松永雄二・山下一彦・菅純子・山崎惟義: 小学校魚類観察池の水質浄化, 第 3 回シンポジウム環境用水の汚濁とその浄化 (環境技術研究協会), pp. 51~55, 1996.
- 10) 山下ルリ・山崎惟義: 湖水の連続凝集処理, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演集第 2 部, pp. 1050~1051, 1994.
- 11) 日本水産学会編集: 淡水養殖と用水, 恒星社厚生閣, p.87, 昭和 62 年
- 12) 石原篤・安宅敏治・村山穰治: 公園池の池水浄化について, 環境技術, Vol.24, No.7, pp. 41~44, 1995.
- 13) 毛利光男・丹羽千明・秋葉道宏・森忠洋: 富栄養化堀水の粒状層濾過の性能に及ぼす設計操作条件の影響, 水環境学会誌, Vol.18, No.10, pp. 794~802, 1995.
- 14) 中本信忠・坂井正: 緩速濾過池で繁殖する糸状藻類とその有効利用, 水, Vol.35, No.13, pp. 29~34, 1993.
- 15) 山崎惟義: 池水浄化のシミュレーション, 第 3 回シンポジウム環境用水の汚濁とその浄化 (環境技術研究協会), pp. 31~35, 1996.
- 16) 丹羽薫・久納誠・大西実・山下芳浩: 閉鎖性水域の新しい水質改善手法, 河川, No.560, pp. 66~74, 1993.
- 17) 丹羽薫・久納誠・久保徳彦・真田誠至: 糸状藻類を活用した湖沼の富栄養化対策技術の開発, 土木技術資

料,35,21, pp. 20~26, 1993.

- 18) 飯山郁子・坂井真奈美: 緑藻アオミドロの食品学的評価, 山陽女子短気大学研究紀要,X, pp. 71~75 1984.
- 19) 淡水魚,渡辺昌和,北隆館,p. 59, 1992.
- 20) PAUL C. MARSH: Digestive Tract Content of Adult Razorback Suckers in Lake Mohave, Arizona-Nevada, Trans. of the American Fish. Socie., 116, pp. 117~119, 1987.
- 21) Michael D. Delong, R. Brent Summers and James H. Thorp: Influence of Food Type On the Growth of a Riverine Amphipod, *Gammurus fasciatus*, Can. J. Fish. Aquat. Sci. ,50, pp. 1891~1896, 1993.
- 22) 須藤隆一: 水域の直接浄化の意義と展望, 用水と排水,32,8, pp. 3~7, 1990.
- 23) 栗谷陽一・山崎惟義: 固定生物層への酸素の供給に関する基礎的研究, 下水道協会誌 Vol.14, No.159, pp. 21~26, 1977.
- 24) 栗谷陽一・山崎惟義: 固定生物層への酸素の供給に関する基礎的研究 (第 2 報), 下水道協会誌, Vol.14, No.161, pp. 48~52, 1977.