



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高度処理の導入による湖沼の水質改善と水の再利用
Author(s)	小林, 大; 清水, 達雄; 亀田, 豊 他
Description	第5回衛生工学シンポジウム (平成9年11月6日 (木) -7日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 1 計画・展望 . 1-9
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 5, 41-46
Issue Date	1997-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7701">https://hdl.handle.net/2115/7701</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	5-1-9_p41-46.pdf



# 1-9 高度処理の導入による湖沼の水質改善と水の再利用

○小林大、清水達雄、亀田豊、工藤憲三、丹保憲仁  
(北海道大学工学院研究科)

## 1. はじめに

大都市周辺ではすべての都市用水を自然系から供給される清澄な水で賄う一元型の水供給システムが不可能になりつつある<sup>1), 2)</sup>。水利用を支える水資源が限界に近づいている地域では、水の循環再利用を取り入れることのできる状況を創出する必要がある。しかし都市域における広域下水道システムは生活空間を改善し、快適に暮らすのに役立っているが、放流先の河川や湖沼に栄養塩類などの汚濁物質が集中するため、富栄養化などの水質汚濁を引き起こし、水の再利用の水源とはなり得ないのが現状である。本研究では上質の飲料水は自然保全域から供給し、生活雑用水、工業用水、ビル用水、都市内の公園や池などの灌漑用水などの非飲料水は高度処理と河川、湖沼、地下貯留の連携により水質改善を行った清浄水を利用し、大都市の水需要を賄える二元型水代謝システムを構築することを目的としている(図1)。放流先の水環境を改善し、市民の親水空間として利用したり、水の再利用を実現するためには、二次処理だけの下水処理システムから脱却して高度処理を積極的に導入することが必要である。具体的には、札幌都市域の水環境を取り上げ、図2に示すような水の循環再利用システムを考えた。そこで、富栄養化している茨戸湖への流入河川水に高度処理を行うことで湖沼の水質改善をはかり、さらに高度処理と茨戸湖における自然浄化とをハイブリッドさせた浄化システムによって得られた水資源を土壌浸透処理し、用水源として再利用可能な水質にできるかどうかを明らかにするための研究を行った。

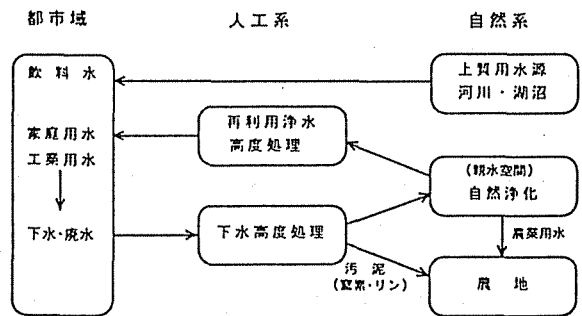


図1 自然系と人工系を利用した都市水代謝システム

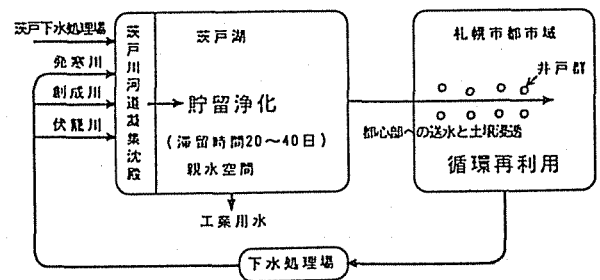


図2 茨戸湖の水質浄化と札幌市における水の循環再利用システム

## 2. 実験方法及び実験装置

実験装置の概略図を図3に示す。実験装置は茨戸湖に隣接する茨戸下水処理場内に設置した。茨戸湖の富栄養化の制限栄養塩がリンであることから、茨戸湖に流入する河川水(下水の二次処理水を含む)を凝集剤として硫酸第二鉄(Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>・9H<sub>2</sub>O)を用いて凝集沈殿処理を行った。凝集沈殿処理槽は凝集槽

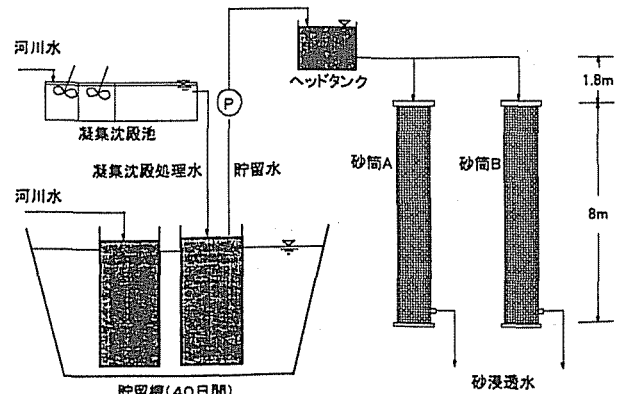


図3 実験装置の概略図

0.21m<sup>3</sup>、沈殿槽2.16m<sup>3</sup>であり、急速攪拌5分、緩速攪拌10分沈殿時間5時間とした。次に、直径約10m、深さ3mの池を掘り、池内に貯水槽（1槽の大きさ、W0.5m×L0.5m×H2.5m、容積0.625m<sup>3</sup>）を設置し、凝集沈殿処理水を平均滞留時間40日で貯留させ、貯留水の水質及び藻類増殖量などを検討した。さらに、直径8cm、高さ4mの塩化ビニル円筒管2本を連結し、池内に設置した。円筒管内には2種類の細砂（有効径、0.07mmと0.17mm）を充填し、二系列で土壌浸透実験を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3-1 河川水の凝集沈殿処理

凝集沈殿処理法は流入する河川水のリン濃度が高いために富栄養化した湖沼やダム湖の水質改善を目的として、欧米を中心に実施されている。例えば西独のワンバッハ貯水池では流入河川水の凝集沈殿処理を行い、さらに多層ろ過法を適用して、貯水池の水質改善を行っている<sup>3)</sup>。

本研究においては、凝集剤として硫酸第二鉄を用いる凝集沈殿処理法による茨戸湖の水質改善の可能性を検討した。河川水の凝集沈殿処理による懸濁成分の除去に必要な硫酸第二鉄の注入量を決定するために、ジャーテストによって注入量と処理水濁度との関連を検討した。図4の結果から、50~60mg/l (asFe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O) を注入することによって、原水濁度13~18mg/l (平均15mg/l) を1~4mg/l (平均2mg/l) に減少させることができた。上記の濃度以上に注入量を増加させても濁度は変化しなかったため、最小注入量を55mg/lと決定した。

河川水と河川水を凝集沈殿処理したときの処理水の水質を比較した結果を表1に示す。SS、BOD、およびTPの除去率はそれぞれ約60%、77%、83%であった。

E260成分が凝集沈殿処理によって約55%除去されていることは、着色性のフミン質も除去されていることを示している。丹保ら<sup>4)</sup>は、分子量が1,000以上のフミン質にはポリ塩化アルミニウムによる凝集沈殿処理が効果的であることを報告している。フミン質は有機塩素化合物など有害有機汚染物質との相互作用が指摘されており<sup>5)</sup>、その動態に関しては重要な検討課題であると言える。

以上のように、下水の二次処理水を含む都市河川水の凝集沈殿処理によって、SS、BOD、およびTPなどの成分の大部分を除去できるので、茨戸湖への汚濁物負荷を大幅に削減できると同時に富栄養化ポテンシャルを低下できることが判った。

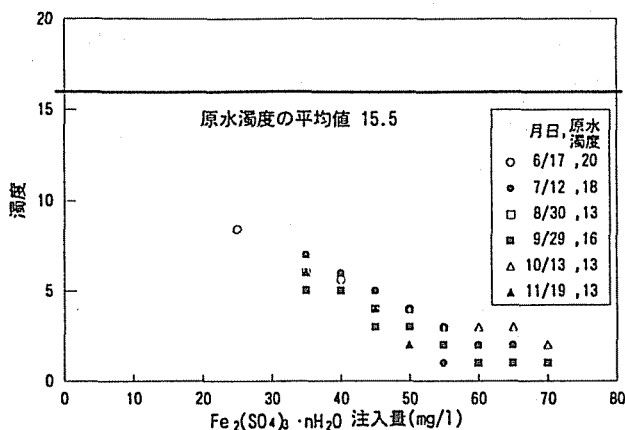


図4 凝集剤の注入量と処理水濁度との関係

表1 河川水、凝集沈殿処理水及びその貯留水の水質

	河川水	貯留水	凝集沈殿処理水	貯留水
SS (mg/l)	12.8	7.5	5.2	1.8
BOD (mg/l)	7.1	6.5	1.6	0.9
COD (mg/l)	10.7	8	6.0	5.3
TOC (mg/l)	7.0	5.8	4.6	4.8
T-P (mg/l)	0.15	0.08	0.026	0.01
T-N (mg/l)	7.3	3.9	6.6	4.7
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	4.0	3.5	3.9	3.7
NH <sub>4</sub> -N (mg/l)	1.6	0.5	1.6	0.6
Chl-a (μg/l)	75	-	16.1	4.6
E260	0.14	-	0.063	0.063

#### 3-2 凝集沈殿処理水の貯留浄化

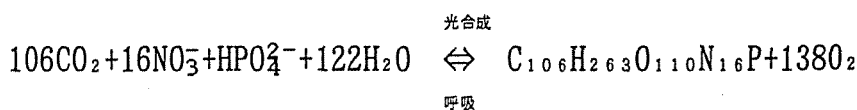
凝集沈殿処理によってリン成分を除去し、富栄養化ポテンシャルを低下させた高度処理水を貯留槽に滞留時間40日で貯留したときの水質を表1に示す。貯留前に比べて貯留後のSSは沈降

によって約65%が除去され、その濃度は1.8mg/lとなった。BODは貯留槽内で好気性分解が進行する結果、平均1mg/l以下となった。TPは貯留槽底槽部への沈降により約60%が除去され、貯留水の濃度は0.01mg/lと低い値となった。TNは凝集沈殿処理では除去されなかった成分であるが、貯留によって約30%が除去され、TNのうちNH<sub>4</sub>-Nの大部分が硝化されNO<sub>3</sub>-Nとなった。

図5は河川水およびその凝集沈殿処理水を滞留時間40日間で貯留したときの貯留水中のクロロフィルaとリン濃度の関係を示している。河川水を貯留した場合、クロロフィルa濃度（藻類の現存量の指標）が30~170μg/lであるが、高度処理を行い富栄養化ポテンシャルを下げることによってクロロフィルa濃度は2.0~5.5μg/lとなった。この値はAGP試験から予測される藻類増殖量（5.5~65μg/l）よりもかなり低い値であった。凝集沈殿処理水を貯留した場合には、DOは水深方向にほぼ一定に分布しているが、無処理の河川水を貯留した場合にはDOは表層部で過飽和となり、水深が深くなるにつれて低くなるという分布が得られた。また、明暗ビン法<sup>6)</sup>を用いて、光合成速度-呼吸速度（純生産速度）の水深方向の分布を調べた結果、河川水を貯留した場合には上層部で光合成が呼吸より卓越し、純生産量が正となるが、下層部では呼吸による分解のほうが高い値を示した（図6）。凝集沈殿処理水を貯留した場合には、槽内全領域において光合成と呼吸が均衡しており、純生産量（有機物生産量）は少ないことが明らかになった。すなわち、光合成と呼吸のアンバランスが生ずる富栄養化現象と大きく異なった現象であった。

### 3-3 貯留槽におけるTN及びTPの収支

河川水および高度処理水を貯留したときの貯留槽のTN及びTPに関する物質収支を明らかにし、貯留槽の機能に関して考察した。図7は河川水貯留した貯留槽のTNおよびTPの収支を示したものである。TNの容積負荷量の約60%に相当する102mg/m<sup>3</sup>・日が流出している。また、10%に相当する約18mg/m<sup>3</sup>・日のTNが沈降によって底部に蓄積した。したがって、約30%に相当するTNが大気中に放出されたことになる。一方、TPに関しては流入量の40%にあたる1.7mg/m<sup>3</sup>・日が流出し、60%に相当する2.6mg/m<sup>3</sup>・日が底部に蓄積した。以上の結果から、窒素成分に比してリン成分は湖底に蓄積されやすいことが明らかになった。なお、湖底に蓄積した懸濁物質のN/P比を求めると6.9となった。ところで、光合成と呼吸の化学量論的關係として、



がよく用いられる<sup>7)</sup>。この化学量論式から、藻体に取り込まれるN/P比は約7.2である。湖底の懸濁物質のN/P比が化学量論値より小さいことは脱窒による窒素ガスの放散を示唆するものであ

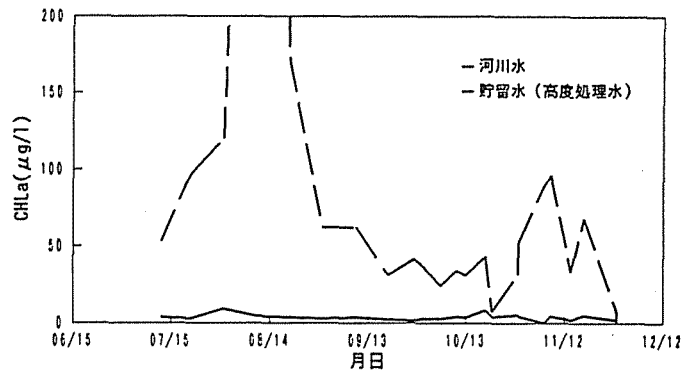


図5 CHLaの経日変化

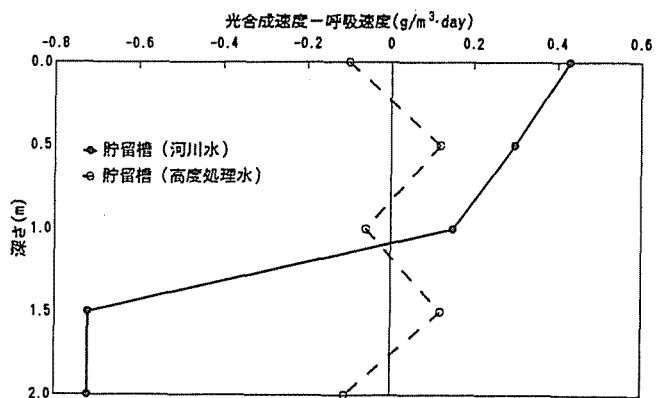


図6 貯留槽内の呼吸と光合成のバランス

る。

図8は凝集沈殿処理水を貯留した貯留槽のTNおよびTP収支を示す。TNの容積負荷量の84%に相当する $130\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ が流出し、底部に沈降する量はわずか4%であった。また、約10%に相当する $17\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{日}$ が未知量であり、脱窒による大気中への窒素ガスの放出が考えられた。TPに関しては、流入するTPの56%が貯留槽外へ流出し、約35%が底部に沈降・蓄積した。また、底部に蓄積した懸濁物質のN/P比は30となり、河川水を貯留した場合に比べて非常に高い値であった。これは凝集沈殿処理による高度処理水が生物の増殖にとって極度のリン制限であることを示唆している。TN・TP収支の結果から、高度処理を行い藻類増殖を制限することで、底部に蓄積されるTNおよびTPを大幅に削減できることが判った。負荷量に対する蓄積量の比率も河川水を貯留させた場合の約1/2となっており、高度処理が湖沼の富栄養化の進行をかなり抑制できることが明らかになった。

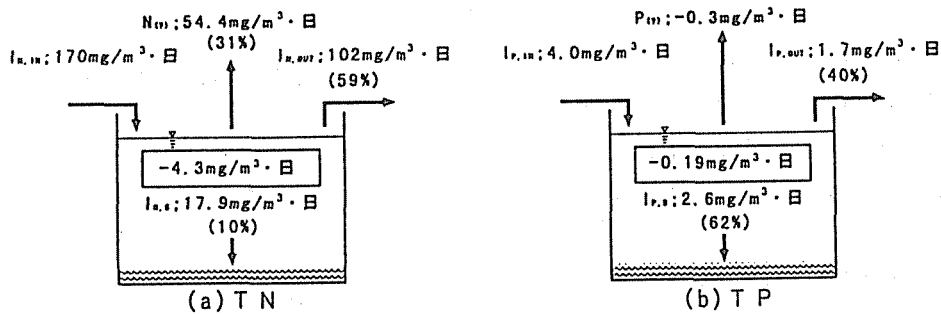


図7 貯水槽（河川水）のTNおよびTP収支

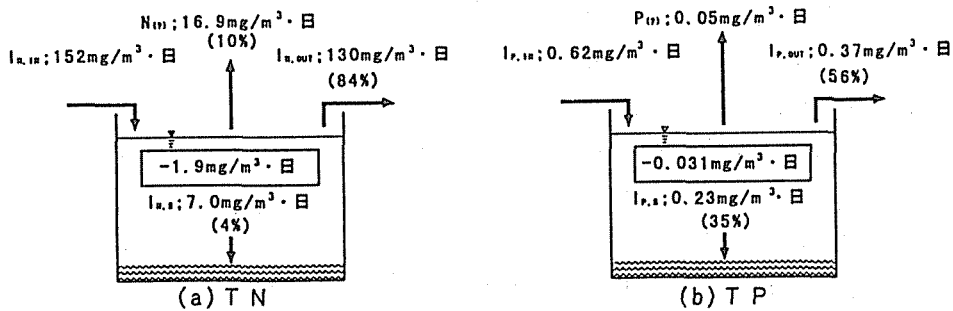


図8 貯水槽（高度処理水）のTNおよびTP収支

### 3-4 土壤浸透による水質浄化

浸透実験は透水係数 $0.01\text{cm}/\text{s}$ であるシルト分を含む細砂A（有効径； $0.07\text{mm}$ ）と、 $0.03\text{cm}/\text{s}$ の透水性のすぐれた細砂B（有効径； $0.17\text{mm}$ ）の2種類を用いて行い、透水フラックスおよび水質変化を検討した。水の土壤への浸透による水利用には、土壤への水のフラックスが重要となる。図9に透水係数の経日変化を示す。有効径が $0.07\text{mm}$ の細砂Aでは、実験開始から徐々に低下して、約2ヶ月後には約 $0.005\text{cm}/\text{s}$ （初期値の1/2）となり、それ以降ほぼ一定値を維持した。有効径が $0.17\text{mm}$ の細砂Bでは、細砂Aと同様に透水係数は減少傾向にあったが、約2ヶ月後に $0.02\sim 0.025\text{cm}/\text{s}$ となった。実験開始初期における浸透実験筒への流入フラックスの減少は浸透水中のSS成分の捕捉と細菌の付着増殖によるものと考えられた。

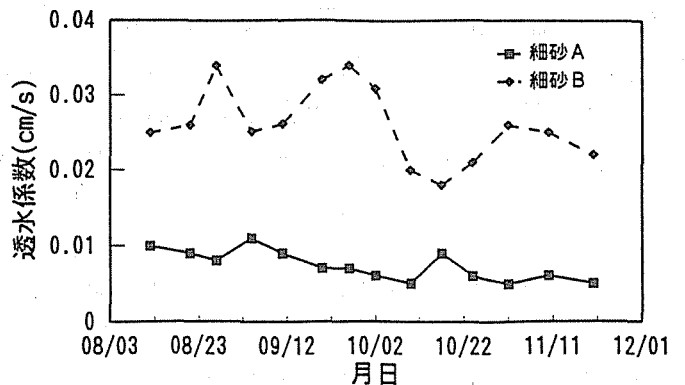


図9 透水係数の経日変化

さらに浸透実験を継続すると、土壌へのSS成分の吸着捕捉と微生物の付着増殖がそれらの分解とほぼバランスするため、透水速度が一定に維持できるものと考えられた。

次に土壌浸透水の水質について述べる。土壌浸透によりSSは50%、TOCは約35%除去されたが、TPはほとんど除去されていなかった(表2)。図10は土壌浸透水のTN濃度の変化を示している。全窒素成分は凝集沈殿処理ではほとんど除去できず、貯留槽中にも貧栄養状態では効率的な除去は期待できない成分であるが、土壌浸透により高い除去率が得られた。細砂Aでは約90%、細砂Bでは約60%が除去され、有効径の小さい細砂Aで高い除去率を示した。窒素成分が土壌浸透によって除去される理由として、砂への吸着と微生物による脱窒作用が考えられる。NO<sub>3</sub>が土壌に吸着される機構としてAl-OH<sub>2</sub><sup>+</sup>などとの吸着が考えられるが<sup>8)</sup>、前述したように結合力の強いリン酸イオンが除去されていないので、この機構による除去は考えられない。また土壌は内部あるいは外部負荷電を有しており、陽イオン交換能は持っていないために<sup>8)</sup>NO<sub>3</sub>の吸着除去は特殊な場合を除いて極めて起こりがたい。そこで、土壌の脱窒活性を測定したところ、土壌深さ0~2mで約0.24mg/l・hr、4m以上では約0.45mg/l・hrの脱窒速度を示した

(図11)。したがって、水温が10°C以上で高い全窒素除去率が得られるのは微生物による脱窒作用によることが示唆された。しかし、10月末から11月初旬頃に急激に除去率が低下している。これは水温の低下によって、生物学的脱窒活性が低下するためと考えられる。

#### 4. まとめ

茨戸湖の水質改善とその湖水の再利用システムを確立することを目的として、茨戸湖に流入する河川水の凝集沈殿処理とその処理水の貯留、及び土壌浸透に関して実験的検討を行い、次の結論を得た。

1. 凝集沈殿処理と、その貯留によりSS・BOD・TPが除去されることで、茨戸湖水の水質改善が期待できることが判った。
2. 富栄養化ポテンシャルを低下させた高度処理水を茨戸湖に長期貯留(滞留日数40日間)させると、湖沼全領域において光合成と呼吸のバランスが維持されるので、高い自浄能力に

表2 貯留水及び砂浸透水の水質 (mg/l)

	貯留水 (高度処理水)	浸透水 (細砂A)	浸透水 (細砂B)
SS	1.8	0.90	0.90
BOD	0.9	0.55	0.69
COD	5.3	3.3	2.9
TOC	4.8	3.1	3.0
T-P	0.012	0.01	0.007
T-N	4.7	0.5	1.7
NO <sub>3</sub> -N	3.7	0.1	1.7
NH <sub>4</sub> -N	0.6	0.0	0.0

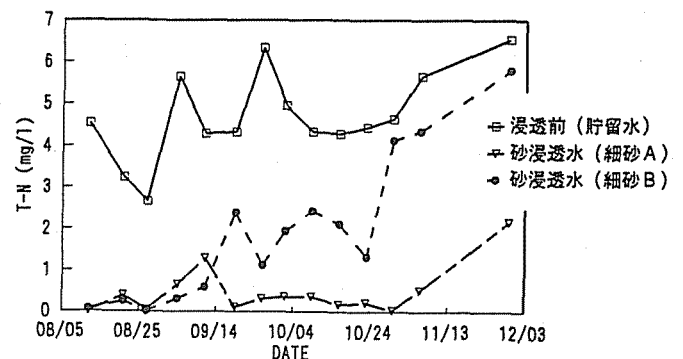


図10 土壌浸透によるT-Nの経日変化

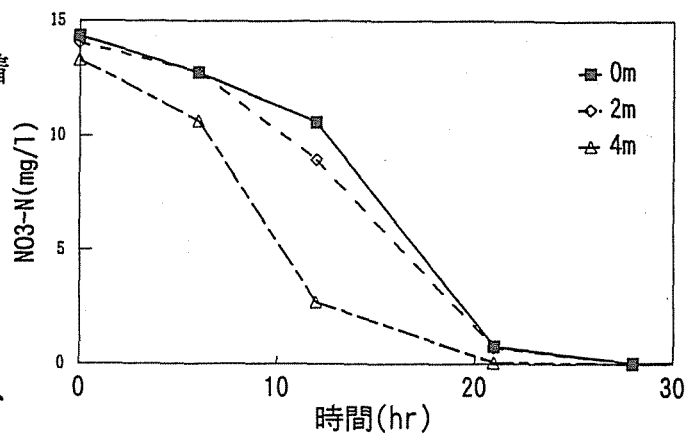


図11 土壌の脱窒活性(at20°C)

よってさらに水質が向上した。

- 3.凝集沈殿処理によって、都市河川内のAGP値を大幅に減少させることができ、その処理水を湖沼に貯留させると夏期においても、藻類現存量の指標であるクロロフィルa濃度を4 $\mu$ g/l程度に抑制することができた。
- 4.貯留槽におけるTNおよびTPの物質収支から、脱窒によって窒素成分が除去されることが示唆された。また高度処理を導入することによって、湖底に蓄積されるTNおよびTPの量を大幅に削減できることが明らかになった。
- 5.凝集沈殿処理と湖沼における自然浄化をハイブリッドさせた浄化システムによって得られる清澄な湖沼水を土壤浸透させると、用水源として再利用できることが示唆された。

#### 参考文献

- 1)Tambo,N.(1994)Civil engineering for arban development and renewal,Proceedings of Int. Synpo., JSCE 80th Anniversary, Yokohama, 117-131
- 2)丹保憲仁(1988)年と自然系を連ねる水システムの質の使い分け, 環境システム研究, 16, 1-7
- 3)Bernhard,H.(1986)Recent development in the field of eutrophication prevention, German-Japanese Panel for Research and Development on New Environment Protection Technology
- 4)Tambo,N and Kamei,T and Itoh,H(1989)Evaluation of extent of humic-substance removal by coagulation, Advances in chemistry Series No.219 Aquatic Humic Substances: Influence on Fate and Treatment of Pollutants I.H. Suffet and Patrick MacCarty, Editors by the American Chemical Society, 454-470
- 5)篠塚則子(1995)フミン物質と有機汚染物質との相互作用, 水環境学会誌18, 261-265
- 6)半田暢彦, 金成誠一, 井内美郎, 沖野外輝夫(1987)湖沼調査法, 古今書院, 183-187
- 7)Stumm,W(1975)Man's acceleration pf hydrogeochemical cycling of phosphrus: Eutrophication of Inland and Coastal Waters,Wat. Pollut. Control,74,124-133
- 8)国松孝男(1985)土壤による排水処理の実際と展望, 公害と対策, 21, 1357-1377