

底層への表層水連続供給による 貯水池の水質改善実験

WATER QUALITY RESTORATION BY CONTINUOUS INJECTION OF SURFACE WATER TO BOTTOM LAYER IN A RESERVIOR

小松利光¹・長谷部崇²・松永崇³・井上徹教⁴・藤田和夫⁵
・井芹寧⁶・西元誠⁷・稲垣晃⁸

Toshimitsu KOMATSU, Takashi HASEBE, Takashi MATSUNAGA, Tetsunori INOUE,
Kazuo FUJITA, Yasushi ISERI, Makoto NISHIMOTO and Akira INAGAKI

¹フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院 環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

^{2,7}学生員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻修士課程 (同上)

³工博 久留米工業高等専門学校助教授 機械工学科 (〒830-8555 福岡県久留米市小森野町1232)

⁴正会員 工修 九州大学大学院助手 工学研究院 環境都市部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

⁵正会員 九州大学技官 工学研究院 環境都市部門 (同上)

⁶西日本技術開発株式会社 環境部 (〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1)

⁸株式会社電業社機械製作所 技術研究所 (〒441-8560 静岡県三島市三好町3-27)

The problem that oxygen depletion observed in eutrophic natural lakes and reservoirs damages natural benthonic organisms and induces nutrient release from sediment is becoming serious. For this problem, we proposed a method which transports surface water including a large amount of dissolved oxygen (DO) to a bottom layer in which DO is not usually enough in mesocosm. The effect of injection of surface water into hypolimnion on water quality restoration by this system has already been proved. In this study, we investigate the degree of water quality restoration in case of continuous injection of surface water into hypolimnion by field experiments in a reservoir having an area of 15,000m².

From this field experiment, we find that our system reduces nutrient release from the sediment even when oxygen supplied by our system is depleted by sediment oxygen demand.

Key Words : water quality restoration, continuous injection, nutrient release, reservoir

1. はじめに

ダム湖や貯水池また港湾などの閉鎖性水域では、富栄養化による水質悪化が大きな社会問題となっている。その原因の一つとして、夏期に形成される水温成層により底層部が貧酸素化し、堆積物からの栄養塩溶出量(内部負荷)が増大することが挙げられる。この問題の解決策として、溶存酸素(DO)の豊富な表層水を貧酸素化した底層部に送り込む水質改善技術が提案されている¹⁾。底層部に供給される表層水は熱交換器によって冷却されており、堆積物直上にDO濃度1mg/l程度の薄い好気的な層を形成し、堆積物からの栄養塩の溶出を抑制する(図-1参照)。著者らがこれまで行ってきた隔離水界(10m×10m)を用いた現場実験により、本システムは小規模な水域に対しては内部負荷を大きく削減する効果を有していることが明らかにされている²⁾。しかし、本システムは将来的にはダム湖や港湾など

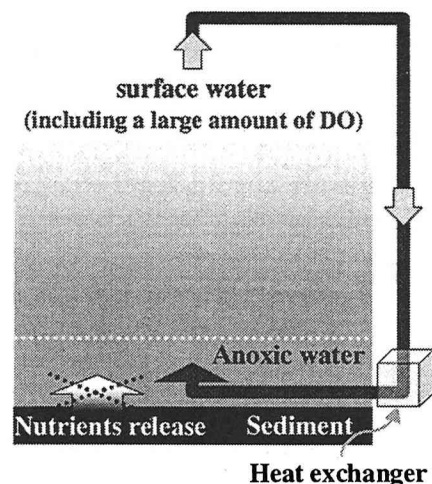


図-1 本水質改善システムの概略図

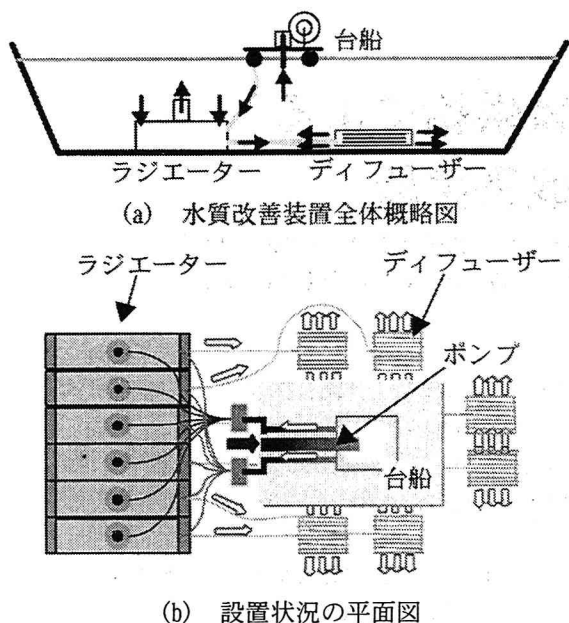


図-2 実験装置概略図

の大規模な水域での活用を意図するものであることから、より広い水域での実証実験が求められていた。

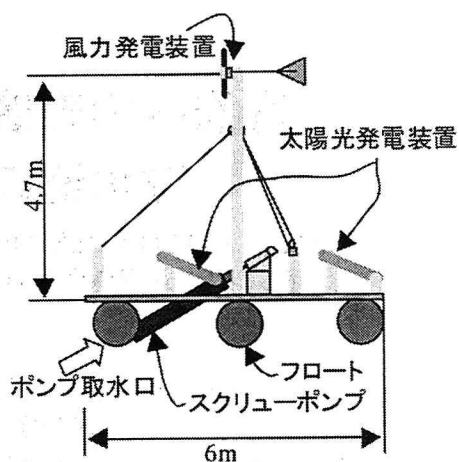
そこで本研究では、15,000 m^2 の水表面積を有する貯水池に対し、新たに製作した水質改善装置を用いて表層水を底層部に供給した場合の水質改善効果について、現場実験により検討を行った。

2. 現場実験

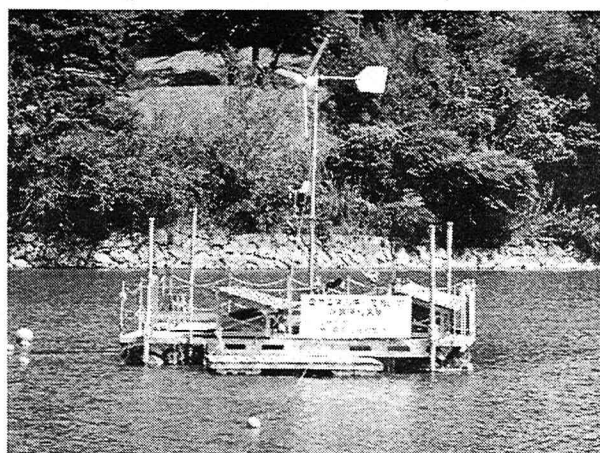
(1) 実験装置

現場実験は福岡県糟屋郡久山町に位置する井牟田池で行われた。井牟田池は最大水深約5m、面積約15,000 m^2 の小規模な貯水池であり、3月から10月までの期間は水温成層が発達し、底層水は完全に無酸素化する貯水池である。実験装置は、表層水を獲得・送水する機能を有する水上部と、送られてきた表層水を冷却し底層部に放出して混合させる水中部から構成される(図-2参照)。

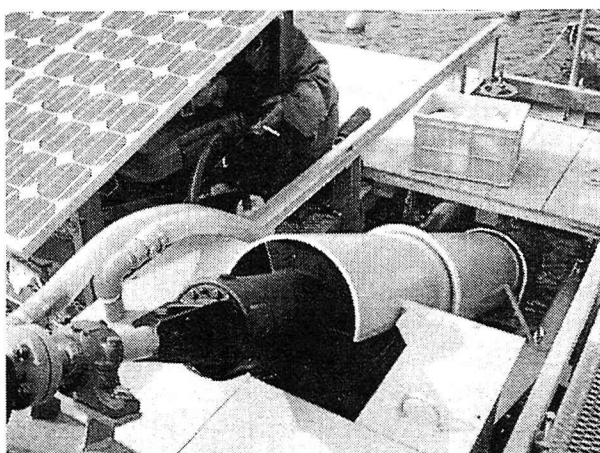
まず水上部について述べると、5m $\times$ 6mの台船上にスクリューポンプが装備されている。ポンプの動力源として今回は交流電源を使用している。しかし、将来的には自然エネルギーの利用を考えているので、台船上に太陽光発電や風力発電の装置も設置して発電量が計測できるようにしている。15,000 m^2 の水域に対するポンプ揚水量は、過去に行われた隔離水界実験²⁾を参照し、1.8 m^3/min を確保したいと当初考えたが、今回使用したポンプの揚水能力上の制限から、0.65 m^3/min としている。供給流量0.65 m^3/min の内0.4 m^3/min は、ラジエーターの連行作用発生装置(冷却効果を上げる機能)に使用され、残りの流量0.25 m^3/min が冷却器であるアルミ管を通りディフューザーから放出されて底



(a) ポンプが装備された台船の図

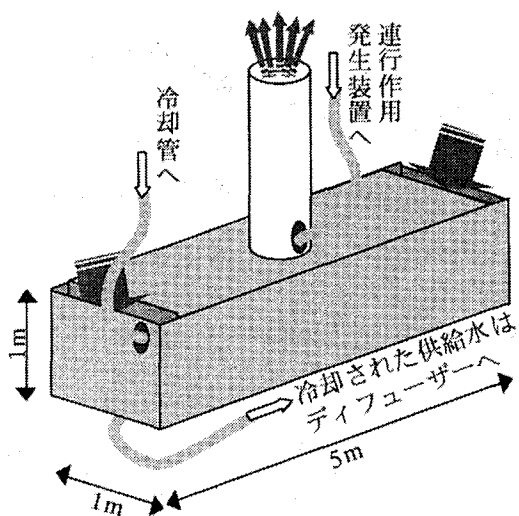


(b) ポンプが装備された台船

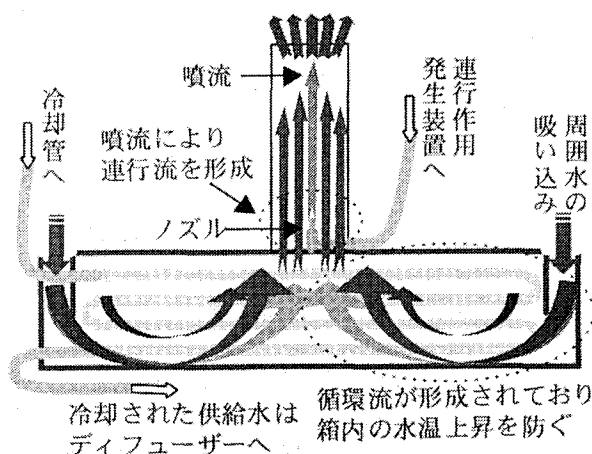


(c) スクリューポンプ

図-3 実験装置(水上部)



(a) ラジエーター外観



(b) ラジエーター断面図

図-4 ラジエーター(水中部)

層に供給される。スクリープンプで吸い上げられた表層水は、一旦 0.6m^3 の貯水タンクに貯められる。その後、直径 20cm のパイプ2本を通しそれぞれラジエーターのアルミ管と連行作用発生装置に供給される(図-3参照)。

水中部は、冷却機能をもつラジエーター(熱交換機)6機と、底層水と放出水を緩やかに混合するディフューザー6機で構成されている。

ラジエーターは、 $1 \times 1 \times 5\text{m}$ の木製ボックス内に長さ 4m 、直径 6cm の24本のアルミパイプを格子状に連結させたものを用いている。この直結されたパイプの中に送られてきた表層水の通過時間を約7分とすることにより、供給水の水温を底層部の水温に近づける。また、水上部からの供給水($0.4\text{m}^3/\text{min}$)を用いた上向き噴流から生じる連行流を用い、ラジエーターボックス内の水とボックス外の周囲水を強制的に交換させることで冷却効果を上げている。冷却された表層水($0.25\text{m}^3/\text{min}$)はディフューザーに送り込まれる(図-

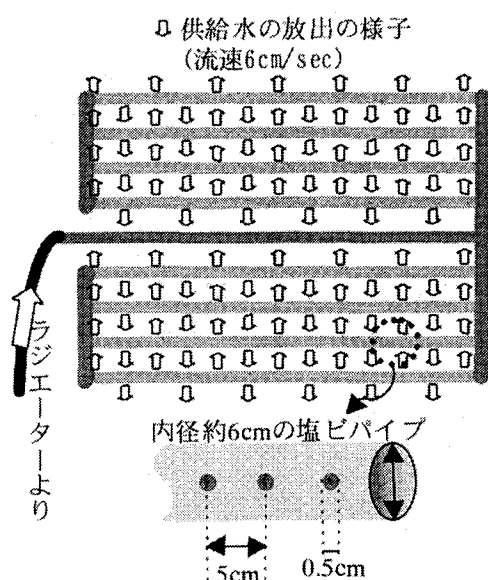


図-5 ディフューザー(水中部)

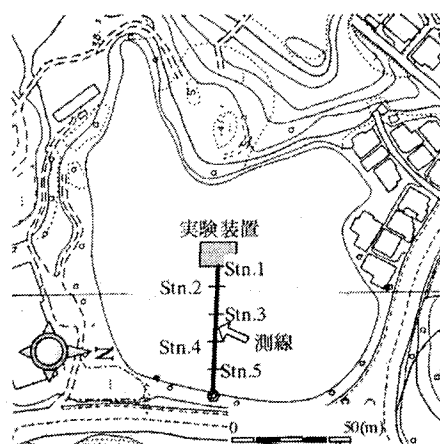


図-6 現地実験場所付近図

4参照)。

ディフューザーは水底から 20cm 上に設置されている。内径 6cm の塩ビ管に 5cm の水平間隔で空けられた直径 5mm の穴から、供給水を約 $6\text{cm}/\text{sec}$ の流速で噴出させることにより、底層水と放出水を緩やかに混合させる(図-5参照)。

上記の実験装置は2000年4月30日に、貯水池中央部に設置された。対象水域における各水質項目の安定が確認された後、2000年5月9日に実験装置の稼動が開始された。

(2) 水質の測定

水質の計測として、多項目水質センサーによる主要項目の調査と、採水による分析調査を実施した。池中央部に設置された実験装置を起点とし、西岸に向かう測線上に 10m 間隔に計5ヶ所の測点を設け、Stn.1, 2, 3, 4, 5とした(図-6参照)。なお、本実験に先立ち、1998年5月以降Stn.3付近で比較対照用データの収集を行っている。

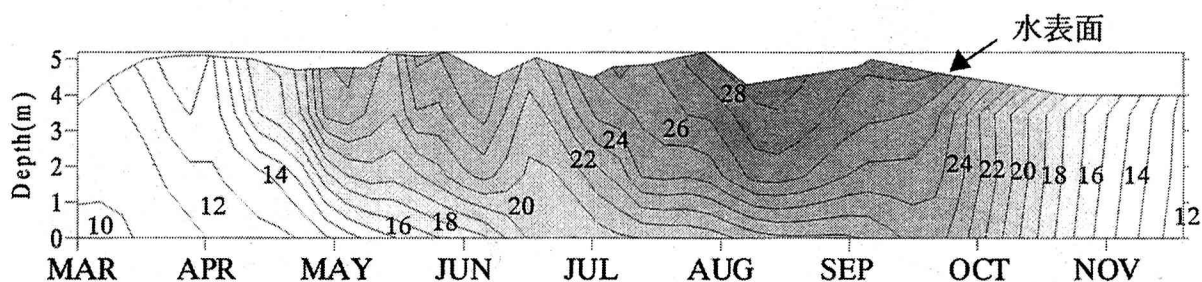


図-7 1999年3月から1999年11月におけるStn. 3付近の水温の時系列変化(°C)

実験装置設置位置

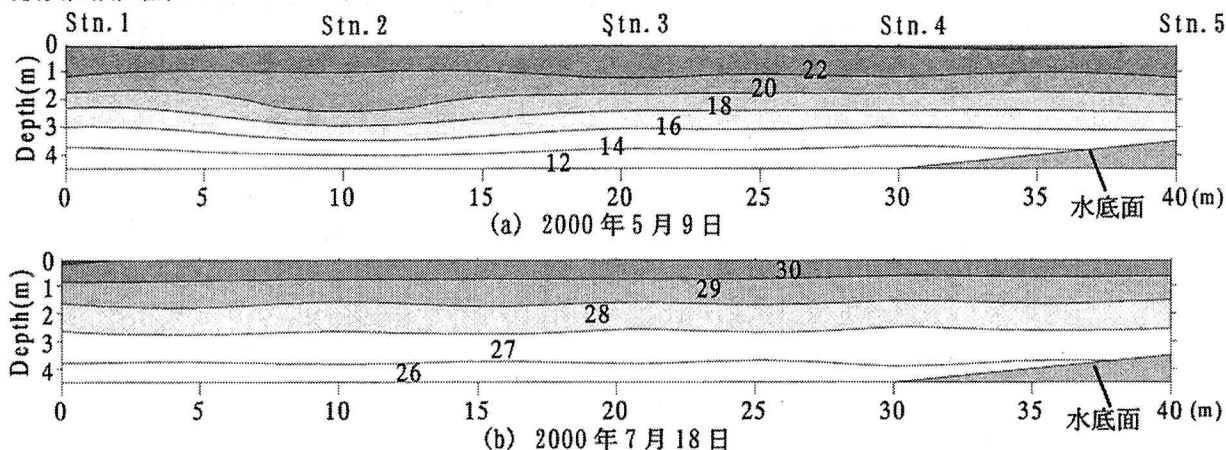


図-8 2000年5月9日、2000年7月18日の測線断面での水温分布(°C)

a) 多項目水質センサーによる調査

Stn. 1, 2, 3, 4, 5において、多項目水質計 (HYDROLAB-DS4a) を用いて週に一度調査を行った。測定項目は、水温、電気伝導度、DO濃度、pH、濁度、酸化還元電位 (ORP)、水深であり、鉛直方向に0.5m間隔で行った。

b) 採水による水質調査

採水はStn. 1, Stn. 3とStn. 5の表層(水深0.5m)、中層(水深2.5m)、底層(水底から0.5m)において月に二度の割合で行った。内径1cm、長さ6mのゴムチューブを通して手動ポンプにより採水している。採取されたサンプルは外気に触れないようにポリ容器に密封し、速やかに実験室へ持ち帰った。サンプルはWhatman G/F/Fを用いて吸引ろ過を行った後、水質分析に供した。分析項目は、リン酸態リン ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、溶存態鉄 (D-Fe)、溶存態マンガン (D-Mn) の4項目である。また、分析方法に関して、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ はモリブデンブルー法、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ はインドフェノールブルー法であり、D-Feは1, 10-フェナントロリン法、D-Mnは原子吸光法 (日立、Z-8000) により分析を行った。

3. 実験結果および考察

1999年3月から1999年11月におけるStn. 3付近

の水温の時系列変化を図-7に示す。井牟田池は、春期から夏期の受熱期にかけて水温成層が発達していることから、鉛直混合が強く抑制されている貯水池と考えられる。

図-8に2000年5月9日、2000年7月18日の測線断面での水温分布を示す。実験装置を稼働させ始めた2000年5月9日は既に水温成層が形成されていた。2000年7月18日は5月に比べると水深全体に渡って水温は上昇し、かつ依然として成層化している。また、水温成層は2000年5月9日から2000年7月18日までの間崩れることはなかった。

図-9に2000年5月9日、2000年7月18日及び1999年7月14日の各測点のDO濃度の鉛直分布を示す。表層付近を除くといずれも水深が増すに従いDO濃度は減少している。ここで底層に注目してみる。1999年7月14日及び2000年5月9日には、底層では完全に嫌氣的であったのに対し、2000年7月18日のStn. 1における底層(水底より0.5m)では若干であるが、DO濃度の上昇が確認できる。

図-10に2000年5月9日から7月18日までの間のStn. 1, 3, 5の底層(水底より0.5m)における $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度、D-Fe濃度、D-Mn濃度の経時変化を示す。過去の観測結果から、この時期は堆積物からの溶出に伴い、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は500から1500mg/l程度ま

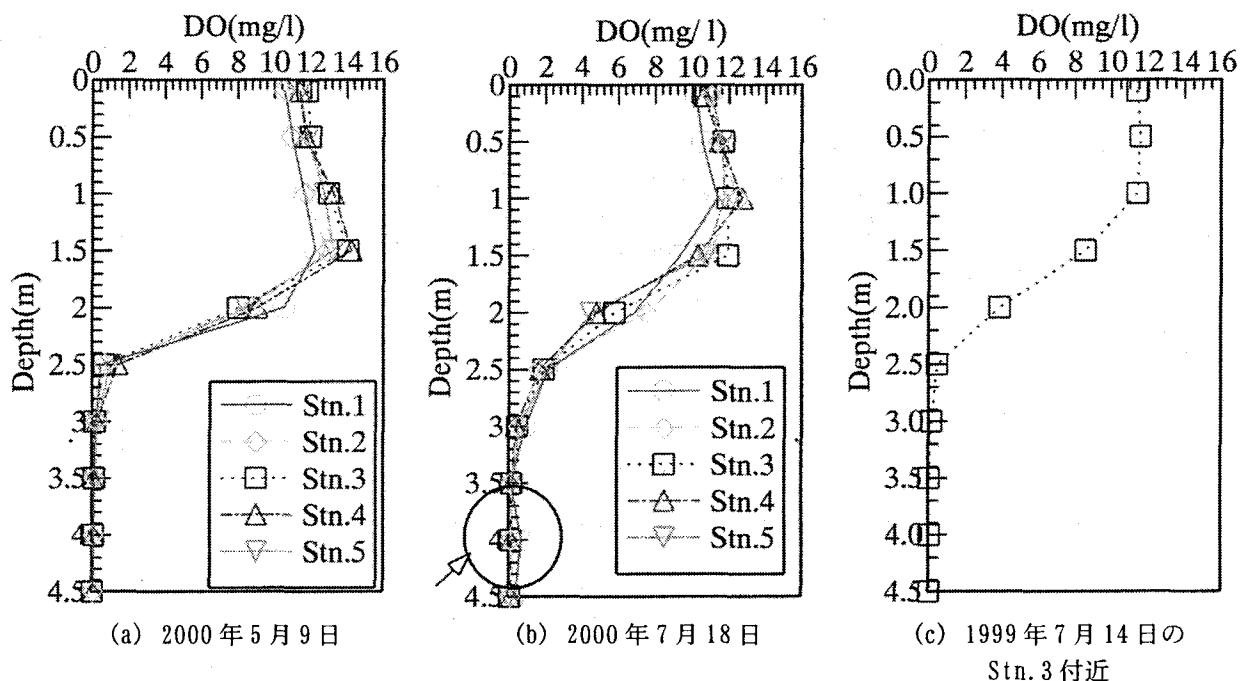


図-9に2000年5月9日、2000年7月18日及び1999年7月14日のDO濃度の鉛直分布

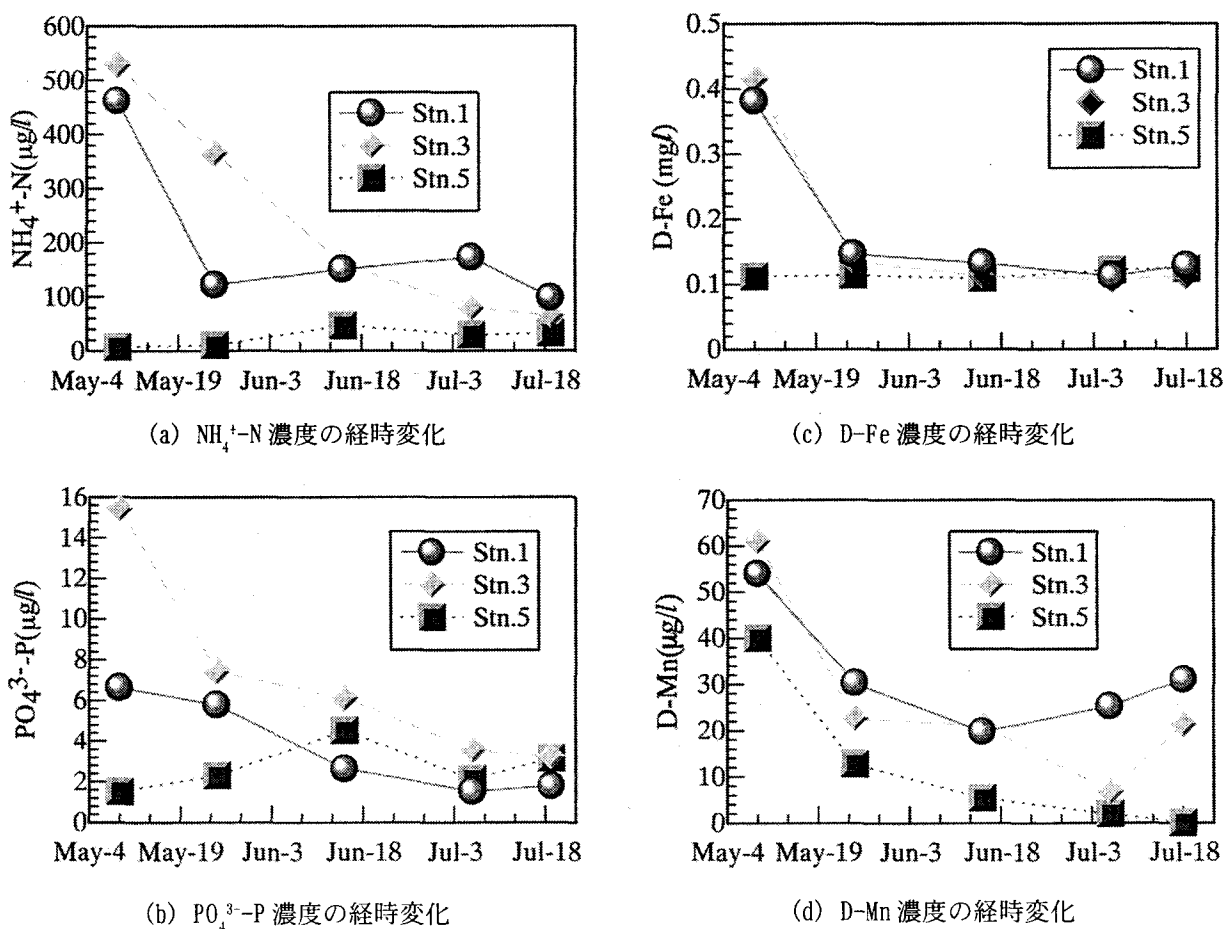


図-10 2000年5月9日から7月18日までのStn.1, 3, 5の底層(水底より0.5m)における
 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度・ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度・D-Fe 濃度・D-Mn 濃度の経時変化

実験装置設置位置

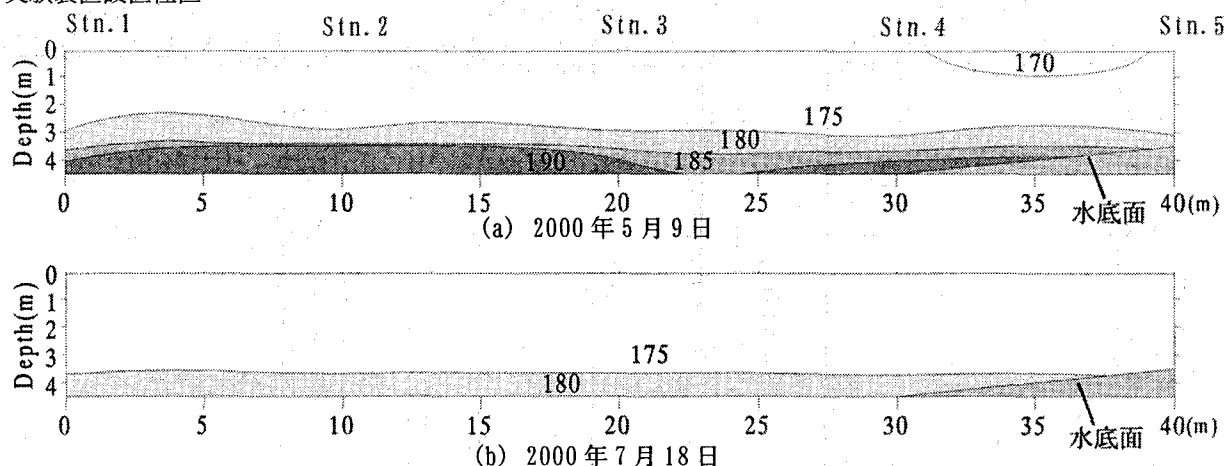


図-11 2000年5月9日、2000年7月18日における測線断面での電気伝導度($\mu\text{S/cm}$)

で、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は10から30mg/l程度までの上昇が見られる期間であることが確認されている。Stn. 5の栄養塩や金属の濃度がStn. 1やStn. 3に比べ低い値となっている。この理由として、Stn. 5の水深はStn. 1やStn. 3に比べ約1m浅く、無酸素化の程度が比較的弱いことから、堆積物からの栄養塩や金属の溶出が抑えられているためと考えられる。実験装置の運転を開始すると、Stn. 1とStn. 3の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、D-Fe及びD-Mn濃度はいずれも徐々に減少を始め、7月18日にはStn. 5とほとんど変わらない低い濃度を示すようになった。

このことから、底層への表層水供給に伴うD0の供給により、堆積物からの栄養塩溶出を十分抑制する効果が明らかになった。さらにその効果は、表層水供給地点から20m離れたStn. 3においても確認された。

図-11に2000年5月9日、2000年7月18日の測線断面での電気伝導度の分布を示す。2000年5月9日は、電気伝導度の値は水深が増すに従い大きくなり、また、池の中心(実験装置付近)に近づく程大きくなっている。しかし、2000年7月18日には、実験装置から40m程離れた地点まで、全水深の電気伝導度はほぼ均一で低くなっている。小松ら²⁾により、電気伝導度の値は堆積物から溶出した還元的な化学物質の濃度に依存していることが明らかにされている。このことから、実験装置の稼動により底層に表層水を送り込むことが、井牟田池全体において底泥からの栄養塩や金属の溶出を抑えていると考えられる。

4. 結論

元々、本システムでは、底層が無酸素化した水域において、底泥直上に1mg/l程度の微酸素層を形成することにより、底泥からの栄養塩物質の溶出を防ぐと考えられていた²⁾。しかし、井牟田池全体の実験では無

酸素状態のStn. 3の底層でも、溶存物質の濃度が減少していた。また、表層水の供給開始前には、電気伝導度は井牟田池全体で水深が増すに従い大きくなっていた。特に底層は鉛直方向にシャープな変化をしており、底泥直上付近で最大となっていた。ところが、実験装置の稼動を開始して2ヶ月経過した7月18日には、広い範囲で底層の電気伝導度の減少が見られた。

以上の結果から、本システムでは、底層のD0濃度を必ずしも増加させなくても、底層や底泥にD0を供給することで、底泥からの溶存物質の溶出を抑えられることが確認された。また、予想以上の広範囲で水質の改善効果が期待できることが分かった。

謝辞:本研究における実験装置の作成に当たり多大なご協力をいただいた株式会社電業社機械製作所の方々、井牟田池の使用を快諾していただいた久山カントリークラブ(柿添万吉支配人)ならびに現地観測で献身的に協力していただいた九州大学建設都市工学科4年生の堺貴臣君に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 小松利光, 岡田知也, 丸井茂俊, 松永陽一郎, 藤田和夫, 柴田敏彦: 越波エネルギーを利用したダム湖・貯水池における水質改善法に関する現地観測, 水工学論文集, No. 42, pp. 99-138, 1998.
- 2) 小松利光, 岡田知也, 中村由行, 中島信一, 長谷部崇, 藤田和夫, 井芹寧: 閉鎖性水域底層への表層水供給による水質改善効果, 海岸工学論文集, No. 46, pp. 1111-1115, 1999.

(2000. 10. 2受付)