

閉鎖性水域底層への表層水供給による水質改善効果

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*****

1. はじめに

ダム湖や貯水池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問題となっている。その原因として、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の溶出量（内部負荷）が増大することが挙げられる。この問題の解決方法の一つとして、越波構造物を設置し、越波により獲得された位置エネルギーによって溶存酸素（DO）の豊富な表層水を貧酸素状態の底層部に送り込む水質改善技術が提案されている（例えば、小松ら、1996、1998）（図-1 参照）。供給量については、実際のダム湖における現地試験によって、横幅が 10 m の越波構造物一基により約 172 m³/day (2 l/s) の供給量が獲得できることが示されている。しかしながら、波浪の小さい水域では越波構造物によって供給される流量は一般的に小さく、成層を破壊するほどの効果は期待できない。つまり、本システムの特徴は密度成層構造を維持したまま、底層水の DO 濃度を増加させることにより、内部負荷を削減することにある。本研究では、その様な効果が実際に生じるかどうかを調べるために、現地での隔離水界実験を行い、本システムの有効性を明らかにした。

2. 実験の概要

(1) 実験の目的と方法

実際の湖沼において、表層水を底層部に送り込む効果を明らかにするため、人工的に隔離した水界を二つ作り、一方にのみ表層水を送り込んで他方と比較した。水質改善の効果は、底泥単位面積当たりの底層への表層水の供給流量に密接に関係すると考えられる。越波による供給法では風波の大きさにより供給流量が大きく変動するため、流量と水質改善効果の間の定量的関係が把握しにくい。そこで、本研究では、両者の定量的関係を調べるた

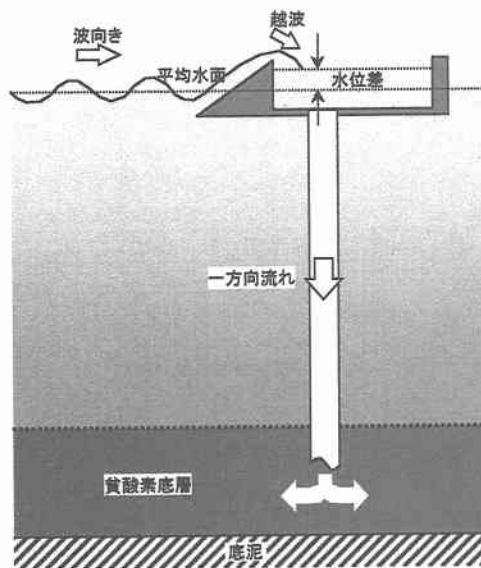


図-1 波浪エネルギーを用いた表層水の底層部への供給システムの概念図

め、ポンプによって強制的に一定流量の表層水を供給する方法を採用した。

(2) 実験装置

実験は 1998 年 5 月から福岡県糟屋郡久山町に位置する井牟田池で行われた（図-2 参照）。井牟田池は平均水深約 5.0 m、面積約 15,000 m²の小規模な湖沼である。3 月から 10 月まで季節的な温度成層が生じ、底層水は無酸素化する富栄養湖である。その中央部に水深約 5 m、表面積 10 m×10 m の不透水性シルトフェンスで囲まれた隔離水界を二つ設置した。一方の隔離水界ではポンプによって 17.2 m³/day (0.2 l/s) の流量の表層水を吸い上げ、パイプを通じて底層部に供給した (Encl. A)。また、比較対象用のもう一方には何も行わなかった (Encl. B)。Encl. A では、ポンプにより獲得された表層水は一旦隔離水界の横に浮かぶ筏の上に設置されたタンクに移され、そこからパイプを通して隔離水界の外側水底に設置された熱交換器（ラジエータ）に送り込まれた。この熱交換器は長さ 2 m、直径 5 cm のアルミパイプ 48 本を格

* フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究科海洋システム工学専攻
** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋環境部
*** 学生会員 九州大学大学院工学研究科海洋システム工学専攻
**** 正会員 九州大学技官 工学部地球環境工学科
***** 西日本技術開発株式会社 環境部

子状に繋いで造られている。供給水は熱交換器内に約15分間滞留して、隔離水界外部の水に熱を奪われる。その後、パイプにより、隔離水界内に設置されたディフューザーに送り込まれる。このディフューザーは水底から20cm上部に設けられており、底層水と放出水を緩やかに混合する装置である。ディフューザーには直径2mmの穴が水平に多数空けられており、表層水を約10cm/secの流速で噴出する(図-3)。



図-2 現地試験場所付近図

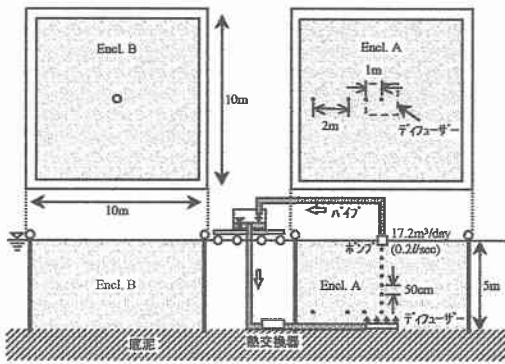


図-3 隔離水界実験の平面図および断面図

(3) 水質の測定

水質の調査として、多項目水質センサーのみによる主要項目の調査と、採水による調査を実施した。採水による調査は、週一度実施した底層水の栄養塩類中心の調査と、月一度実施した詳細な水質分布調査に分けることができる。

a) 多項目水質センサーによる調査

週に一度、Encl. A, Encl. Bの各々の中心、ならびに隔離水界外部の固定点(Stn. C)の3点で、多項目水質計(YSI MODEL 3800, 610)を使って調査を行った。測定項目は、水温、電気伝導度、DO濃度、pH、濁度であり、水表面から水底に向かって0.5m間隔で測定した。また、Encl. Aにおいて供給水の水温をディフューザーの出口で測定した。

b) 採水による水質調査

採水はEncl. A, Encl. Bの内部と隔離水界の外部の固定した測定点(Stn. C)で行われた。底層水の水質変動を把握するため、週に一度の頻度で、それぞれの測定点において水底から50cmの高さで採水した。分析項目は、 $PO_4^{3-}-P$, NH_4^+-N , $NO_2^- -N$, $NO_3^- -N$, D-Fe, D-Mnの6項目であった。また、水質指標の鉛直分布を把握するために、月に一度それぞれの測定点において水表面から0.5m, 2.5mの深さの点でも採水を行った。その際の分析項目は、前に述べた項目にSS, COD, Chl. a, T-P, T-N, T-Feを加えた。さらに、Encl. A内の底層水質の水平的な分布を見るために、水底から50cmの高さで隔離水界の中心より1m, 2m, 4m離れた地点における採水も行った。

3. 実験結果および考察

隔離水界は1998年4月24日に設置された。実験装置の稼動および測定は5月1日から行った。

水温・DO濃度は、隔離水界の内外で大きな差は認めら

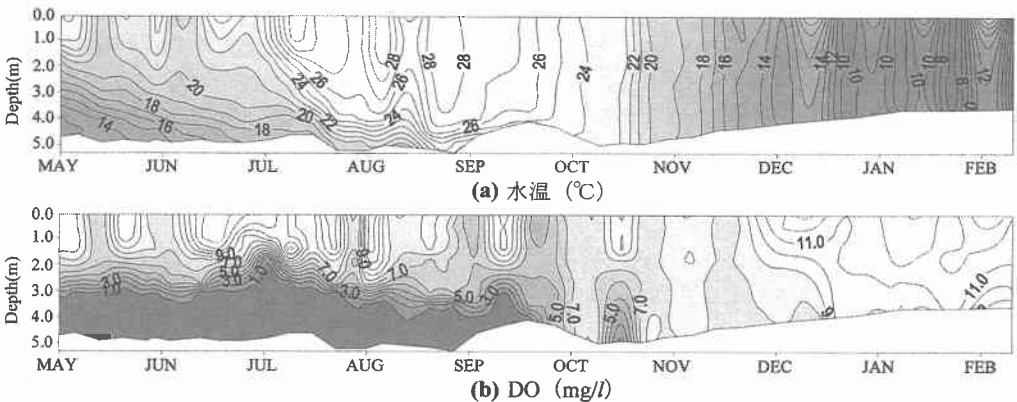


図-4 Stn. Cにおける水温とDO濃度の経時変化

れなかった。特に底層部においては、Encl. A の底泥直上で水温・DO 濃度ともにわずかな上昇が見られたほかは、顕著な差はなかった。図-4 に、Stn. C における水温と DO 濃度の経時変化を示す。安定した水温成層が実験開始時から9月中旬まで形成され、底層水は成層が破壊するまで無酸素状態であったことが分かる。

図-5 に、Encl. A、Encl. B および Stn. C での電気伝導度の鉛直分布の経時変化を示す。底層水の電気伝導度には三つの条件により明確な差が生じた。表層水の供給を開始して5日目以降、Encl. A の電気伝導度は鉛直方向にほぼ一様となり、比較的小さい値をとり続けた。一方、Encl. B および Stn. C においては、底層部での電気

伝導度は共に9月下旬迄高い状態が継続した。秋になって表層水の冷却による鉛直混合が始まると、Encl. B、Stn. C 共に上・下層の電気伝導度の大きな差は次第に無くなっていった。

実験条件による DO 濃度、電気伝導度の違いをより詳細に調べるため、夏季の典型的な水質指標の分布例として7月31日における鉛直分布を図-6 に示す。

図-6(a) は水温、(b) は DO 濃度、(c) は電気伝導度の鉛直分布である。水温は Encl. A の水底部以外はどの測点でもほぼ同じ値を示している。一方、DO 濃度 (b) と電気伝導度 (c) の鉛直分布は3測定点でいずれも異なっている。Stn. C の表層で高い DO 濃度を示している。

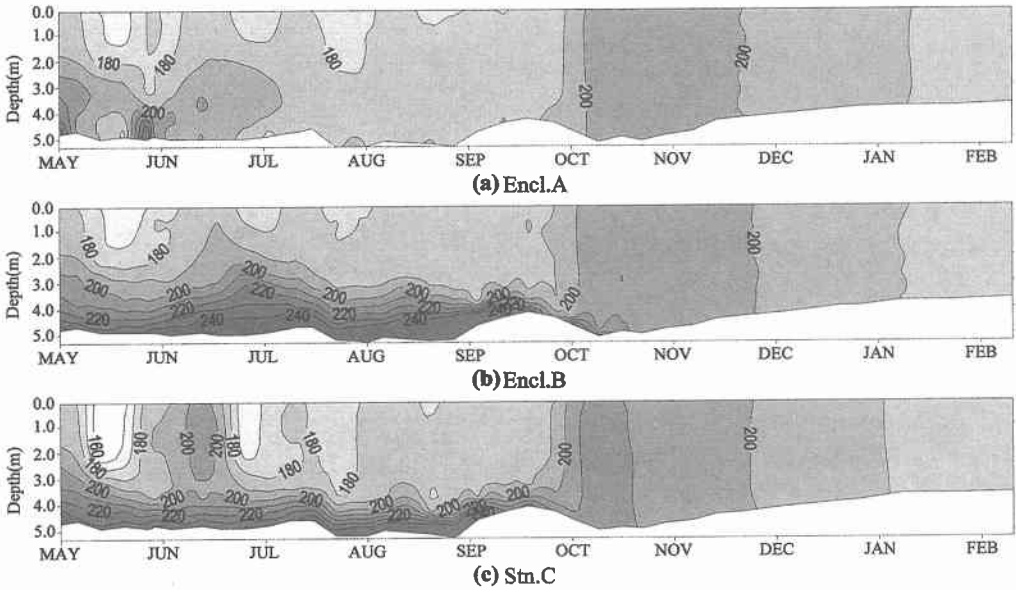


図-5 現地試験場所付近図 Encl. A、Encl. B および Stn. C での電気伝導度の鉛直分布の経時変化 (数字の単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$)

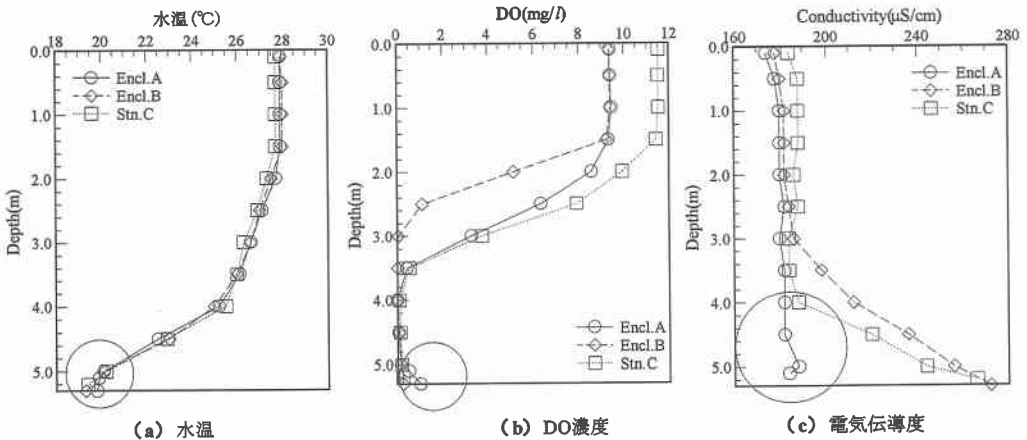


図-6 現水温、DO 濃度、電気伝導度の鉛直分布 (7月31日)

これは、有光層の植物プランクトンによる光合成に起因する。Stn. Cと比較して隔離水界内でのDO濃度は低い。これは、隔離されたことにより植物プランクトンの沈降が促進されたため、また外部から湖沼に流入する栄養塩の補給がないため、光合成が抑制されたことに起因する。また、どの測点においてもDO濃度は水深4m以深で激減しており、Encl. B, Stn. Cの水底では極めて0 mg/lに近い値となっている。一方、Encl. Aのみ水底で表層水の供給によりDO濃度が1 mg/l程度に増加している。電気伝導度については、Encl. B, Stn. Cでは水深が増すと共に値が増加している。特に、電気伝導度が急増しはじめる水深はEncl. Bで3.0 m, Stn. Cで4.0 mであるが、これはDO濃度がそれぞれ0 mg/lを示し始めた水深に一致する。従って、以下に詳しく検討するように電気伝導度の上昇は、嫌気条件下での底泥からの金属や栄養塩の溶出に起因すると考えられる。一方、Encl. Aでは電気伝導度は常に低い値に抑えられている。以上から、堆積物直上のDO濃度を1 mg/l程度に維持できれば、堆積物からの還元的な物質の溶出は十分抑えられるものと考えられる。

図-7に同じ高さの測点における栄養塩 (PO_4^{3-} -P, NH_4^+ -N)濃度の経時変化を示している。この図からも、夏期においてEncl. Aにおける PO_4^{3-} -P, NH_4^+ -Nの濃度はEncl. Bにおけるそれらに比べて明らかに低いことが分かる。

図-8に水底から50 cmの高さの測点における金属 (D-Fe, D-Mn)濃度の経時変化を示す。Encl. Bでは夏期においてD-Fe, D-Mnの濃度が非常に高いのに対して、Encl. Aではかなり低い値に保たれていることが分かる。これらの結果より、Encl. Aにおいて堆積物からの栄養塩、金属の溶出が十分抑えられていると言える。

図-9(a), (b)はEncl. A, BおよびStn. Cの底層(水底から50 cmの高さ)における電気伝導度と PO_4^{3-} -P濃度、ならびにD-Mn濃度との関係を示す。図-9(a)より、電気伝導度が220 μ S/cm以上の場合には、電気伝導度と PO_4^{3-} -P濃度の間に良い相関があることが分かる。一方、図-9(b)から電気伝導度が220 μ S/cm以下の場合には、電気伝導度はD-Mn濃度と良い相関があることが分かる。このことから、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おり、リン酸の溶出はマンガンの溶出に追随しているということが考えられる。このように、電気伝導度は栄養塩の溶出量を示す良い指標となっており、先に示されたEncl. A内の低い電気伝導度を考慮すると、表層水を底層部に供給するこのシステムはアンモニアやリン酸の溶出をうまく抑制していると言える。

図-10は7月10日におけるCOD, T-N, T-Pおよび

Chl. a濃度の鉛直分布を示す。各分布に共通して、Encl. Aにおける値が最も低く、Encl. Bにおける値が最も高いことが分かる。物理的に囲うことによって鉛直混合が抑制され、底層水の溶存酸素(DO)はより速く消費されることになる。その結果、無酸素状態になり、堆積物からの栄養塩の溶出が増加する(Encl. B)。しかしながら、本循環システムを用いることで、物理的に囲うマイナス

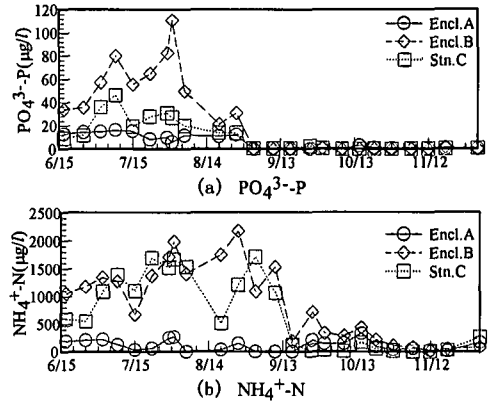


図-7 水底から50 cmの高さの測点における栄養塩 (PO_4^{3-} -P, NH_4^+ -N)の濃度の経時変化

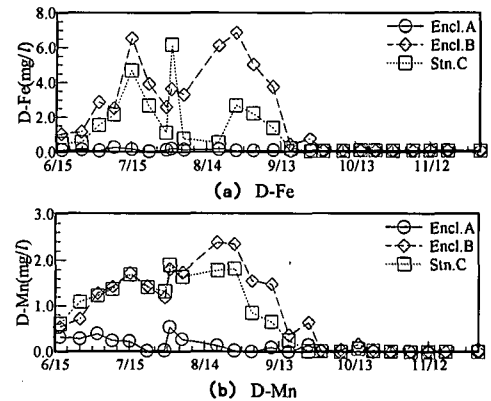


図-8 水底から50 cmの高さの測点における金属 (D-Fe, D-Mn)の濃度の経時変化

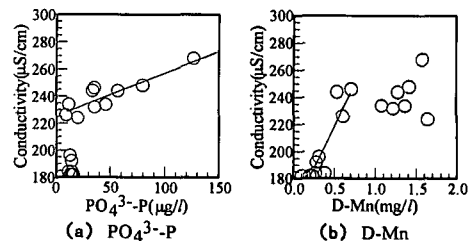


図-9 Encl. A, Encl. BおよびStn. Cの底層における電気伝導度と PO_4^{3-} -P濃度、ならびにD-Mn濃度との関係

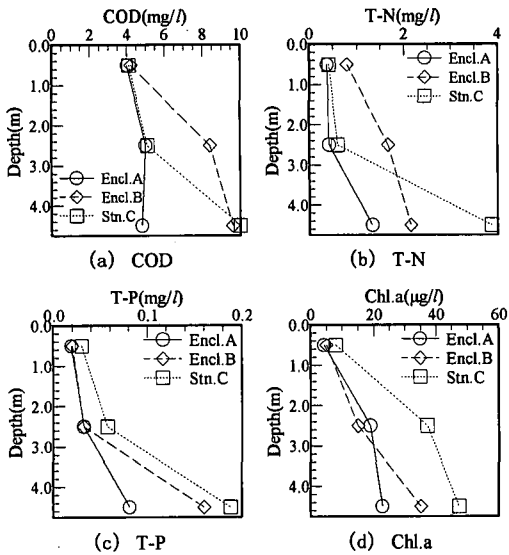


図-10 COD, T-N, T-P および Chl. a 濃度の鉛直分布(7月10日)

の効果を上廻って水質が改善された (Encl. A)。その理由として、底層部への酸素供給により堆積物表面が微好気状態に保たれ、堆積物からの内部負荷が抑制されたこと、そして、そのために内部生産が抑制されたことが考えられる。

実水域に本システムを適用する場合に、その性能を評価するためには、まず目標となる DO 濃度を定めなければならない。その上で底層部と堆積物の酸素消費の割合を考慮し、必要とされる単位面積当たりの供給流量を計算することが必要である。

そこで、本実験結果から酸素消費速度の概算を行う。測定された水温および DO 濃度から判断すると、どちらも7月下旬にはほぼ平衡状態にあることが分かる。底層部に供給された水の温度は水深 5.0 m での水温と一致していたこと、急な水温の勾配が水深 4.0~5.0 m の間に存在していたことなどを考慮すると、供給された水は堆積物直上のごく薄い層内で滞留していたと考えられる。そのような薄い層内での酸素消費は堆積物による酸素消費 (SOD) と比較して無視できるので、底層部に供給されたほとんどの DO は堆積物によって消費されたと考えられる。従って、次式により SOD が得られる。

$$Q \cdot (C_s - C_b) = A \cdot SOD \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 Q は流量、 C_s と C_b はそれぞれ表層と底層部における DO 濃度である。 A は堆積物の表面積で、 SOD は堆積物による酸素消費速度である。7月31日に観測された値 ($Q=17.2 \text{ m}^3/\text{day}$, $C_s=9.37 \text{ g/m}^3$, $C_b=1.01 \text{ g/m}^3$, $A=100 \text{ m}^2$) を (1) 式に代入すると、 $1.44 \text{ g/m}^2/\text{day}$ という SOD 値を得ることができる。この値は富栄養化した水域での堆積物に関して測定された典型的な値のオーダーと一致する。(例えば、中村ら、1996; Cerco *et al.*, 1992)

小松ら (1998) は、筑後川水系松原ダム湖において 10 m 幅の越波構造物の現地試験を行った。実験期間中、3~8 cm の有義波高の波が約 30% の頻度で発生し、平均して約 $172 \text{ m}^3/\text{day}$ (2 l/s) の越波量が獲得された。もし同種の越波構造物を 30 m 四方の水域に 1 つの割合で設置するとすれば、同じ波の条件の下で今回と同様の水質改善結果が期待できることになる。

4. 結 論

越波構造物を用いて表層水を底層に供給する水質改善システムの有効性を調べる目的で、実湖沼に隔離水界を作り、ポンプによって一定流量の表層水を供給した。

10 m 四方の隔離水界内に、流量 $17.2 \text{ m}^3/\text{day}$ (0.2 l/s) で表層水を底層部に供給すると、堆積物直上の DO 濃度はわずかながら回復し、約 1 mg/l に維持された。このような低い DO 濃度によっても、栄養塩の底質からの溶出はほぼ完全に抑制され、COD や Chl. a 等の指標でも、大幅な水質改善効果が認められた。

参 考 文 献

- 小松利光・岡田知也・松永信博・植田 操・藤田和夫 (1996): 波浪エネルギーから位置エネルギーへの効率的な変換に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 551/II-37, pp. 89-99.
- 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 (1998): 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, 第 42 巻, pp. 99-138.
- 中村由行・井上徹教・山室真澄・神谷 宏・石飛 裕 (1996): 未攪乱底泥コアを用いた連続培養系での酸素消費・溶出試験, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1091-1095.
- Cerco, C., Gunnison, D., and Price, C. B. (1992): "Workshop on sediment oxygen demand." Proc., Misc. Paper W-92-J, U. S. Army Corps of Vicksburg, Miss., 195.