

表層水底層部連続供給による水質底泥改善技術

小松利光*・井上徹教**・長谷部 崇***・西元 誠***
藤田和夫**・井 芹 寧****・中島信一*****

1. はじめに

内湾やダム湖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。この問題の解決方法のひとつとして、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（小松ら，1999）。本システムでは底層部に供給する表層水を熱交換器によって冷却し、堆積物直上に薄い好気的な層を形成させることで、堆積物からの栄養塩溶出量を抑制することを目標としている。そこで本研究では、隔離水界において1年間表層水を底層部に供給したことによる水質改善効果を、現場観測結果及び水質分析結果を用いて明らかにした。また、本システムによって底層の水質だけでなく、栄養塩の主な供給源である堆積物においても改善効果が表れることが期待される。そこで堆積物への改善効果についても、コア・バッチ系室内実験及び底質分析により検討を行った。

2. 実験の概要

(1) 現地実験装置

現場実験は福岡県糟屋郡久山町に位置する井牟田池において行われた（図-1 参照）。井牟田池は最大水深約 5.0 m、面積約 15,000 m² 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て底層水は無酸素化する富栄養化した貯水池である（小松ら，1999）。1998年4月24日、貯水池中央部に不透水性シルトフェンスを用いて二つの隔離水界を設置した。隔離水界の表面積は10 m×10 m であり、フェンスの底層接地部分は水の漏れが極力防げるように堆積物中に埋められている。

二つの隔離水界（Encl. A, Encl. B）のうち Encl. A の

みが表層水供給システムを備えている。ポンプによって 0.2 l/s の割合で吸い上げられた表層水は、パイプを通して隔離水界の外側の底層に設置された熱交換器に送り込まれた後、隔離水界内の底層に設置されたディフューザーに送り込まれる。この割合で表層水を供給すると、隔離水界内の水は約 1 ヶ月間で循環する計算となるが、水温躍層を破壊するには至らない。熱交換器は格子状に繋がれた長さ 2 m、直径 5 cm の 48 本のアルミパイプからなっており、供給水を熱交換器内に約 15 分間滞留させることによって、供給水水温を底層部の水温に近づける。ディフューザーは水底から 20 cm 上に設置されており、水平方向に多数開けられた直径 2 mm の穴から約 10 cm/s の流速で供給水を噴出させることによって、底層水と放出水を緩やかに混合させる（図-2 参照）。

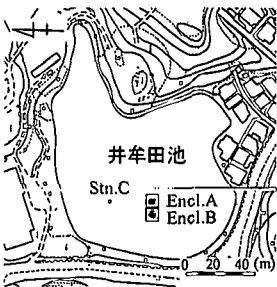


図-1 現地実験場所付近図

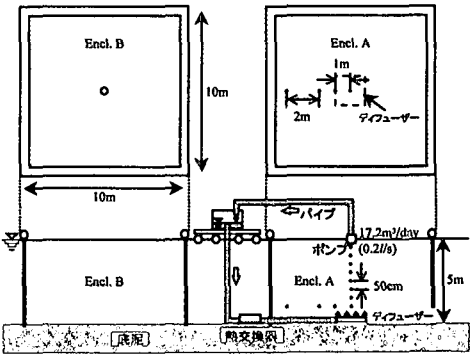


図-2 隔離水界実験の平面図および断面図

* 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
** 正 会 員 九州大学大学院工学研究院環境都市部門
*** 学生会員 九州大学大学院工学研究院修士課程
海洋システム工学専攻
**** 正 会 員 西日本技術開発株式会社 環境部
***** (株)大林組

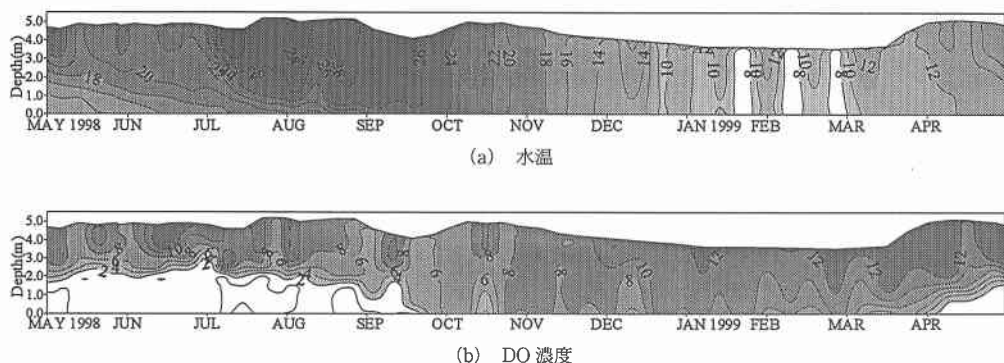


図-3 Stn.C における水温及び DO 濃度の鉛直分布経時変化

(2) 水質の測定

水質の調査として、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、月一度実施したより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) を使った調査を行った。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 0.5 m 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 50 cm の高さで採水した。分析項目は、 PO_4^{3-}P 、 NH_4^{+}N 、 NO_3^{-}N 、 NO_2^{-}N 、D-Fe、D-Mn の 6 項目である。また、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 0.5 m、2.5 m 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 における底層水質の水平的な分布を見るために、水底から 50 cm の高さで隔離水界の中心より 1 m、2 m、4 m 離れた地点における採水も行った。

3. 現場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、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-3 に、Stn. C における水温と DO 濃度の鉛直経時変化を示す。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。また、水温が徐々に上昇し始める 3 月に水温成層が形成し再び底層水は無酸素状態になり始めていることが分かる。

夏期の典型的な水質の鉛直分布例として図-4 に 1998 年 7 月 31 日における水温、DO 濃度の鉛直分布を示す。水底部において Encl. A の水温が若干ではあるが高くなっていることが確認できる。また、どの測点においても DO 濃度は水深 4 m 以深で激減しており、Encl. B, Stn. C の水底では 0 mg/l 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 濃度が約 1 mg/l に増加している。

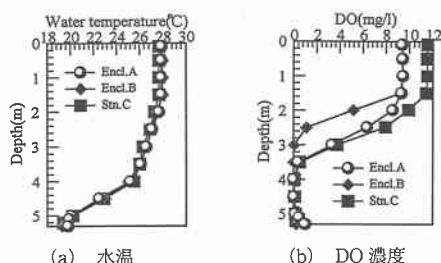
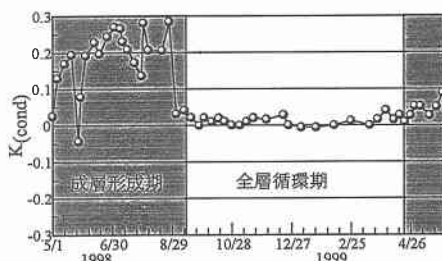


図-4 1998 年 7 月 31 日における水温、DO 濃度の鉛直分布

図-5 電気伝導度に関する相対差分 (K_{cond}) の時系列変化

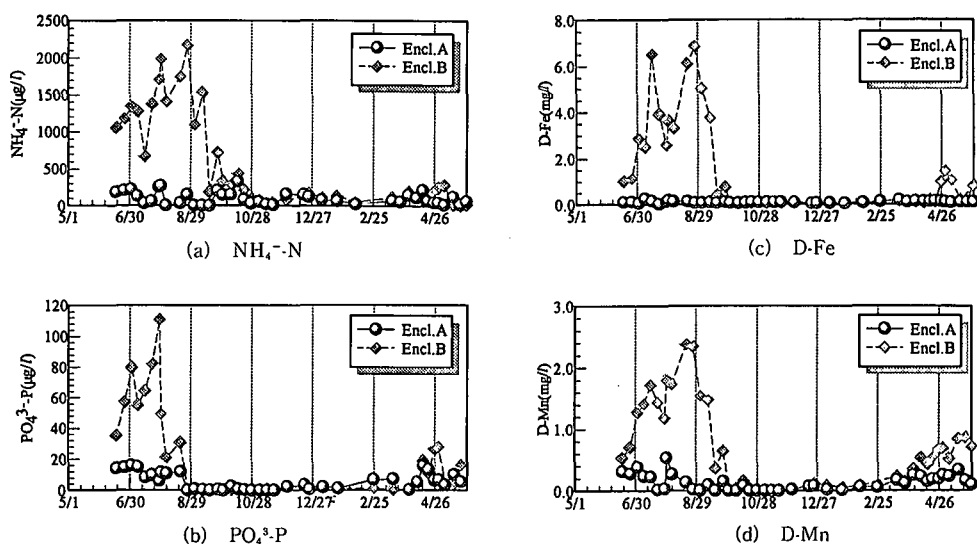


図-6 水底から 50 cm の高さの測点における栄養塩 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, D-Fe, D-Mn) 濃度の経時変化

図-5 に 1998 年 5 月から 1999 年 5 月の Encl. A, Encl. B に関する相対差分 $K_{(\text{cond})}$ の時系列変化を示す。ここで、 $K_{(\text{cond})}$ は次式により与えられる。

$$K_{(\text{cond})} = (\text{cond B} - \text{cond A}) / \text{cond B} \cdots \cdots (1)$$

ここで、cond A, cond B はそれぞれ Encl. A, Encl. B の堆積物から 50 cm 上層における電気伝導度の値である。すでに成層形成期に入っていた実験開始時から徐々に $K_{(\text{cond})}$ は大きくなっていき、底層の DO 濃度が上昇し始める直前の 1998 年 8 月下旬まで 0.2 前後の値をとる。その後全層循環期に入ると 0 となる。底層における電気伝導度は溶存しているイオン濃度に依存するため、成層形成期には本システム稼動により堆積物からの溶存物質溶出が抑制されるものと期待される。

図-6 に水底から 50 cm の位置における $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, D-Fe, D-Mn 濃度の経時変化を示している。この図から夏期の Encl. A における $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, D-Fe, D-Mn の各濃度は 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。これは Encl. A の底層 DO 濃度を約 1 mg/l に保つことにより、堆積物表層の好気状態を維持した結果、溶存物質の溶出が抑えられたものと考えられる。

4. 堆積物による室内実験結果および考察

(1) 実験行程

(a) 栄養塩溶出実験

1999 年 12 月 1 日に Encl. A, Encl. B, Stn. C において未攪乱堆積物コアを 3 サンプルずつ採取した。それぞれ Encl. A のサンプルは A1, A2, A3, Encl. B のサンプルは B1, B2, B3, Stn. C のサンプルは C1, C2, C3 と

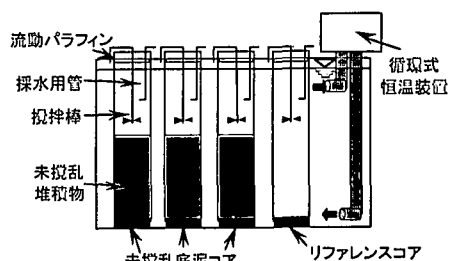


図-7 コア・バッチ系室内実験概念図

した。また、リファレンスとして堆積物がなく現場ろ過水で満たされたコアを 1 サンプル用意した。その 10 サンプルを使用しコア・バッチ系室内実験により堆積物からの栄養塩溶出量を測定した。夏期における底層の環境を再現するため、堆積物コアは循環式恒温装置 (ORION, LPA3 MODEL) を用いて 20°C に設定した恒温水層内に設置し、暗条件とした (図-7 参照)。また、コアサンプルの採取とともに底層水の採水を行った。採水した水は Whatman GF/C を用いてろ過した。その後、窒素曝気により無酸素状態とし、堆積物コアの直上水に使用した。水表面は流動パラフィンで覆い、直上水への DO の供給を防いだ。実験開始から 1, 2, 3, 4, 6, 9 日目に採水を行った。採水直前にのみ堆積物の巻き上げが起こらない範囲で直上水を攪拌し、シリンジにより採水した後速やかに Whatman GF/F でろ過した後、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ をインドフェノール法・ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ をモリブデン法により測定を行った。また採水直後、窒素曝気した現場ろ過水をシリンジにより採水量と同量だけ緩やかに加えた。

(b) 酸素消費速度測定実験

2000年1月6日に Encl. A, Encl. B, Stn. C において未攪乱堆積物コアを3サンプルずつ採取し、酸素消費速度(SOD)をコア・バッチ系室内実験により測定した。実験条件は溶出実験と同様としたが、直上水には空気曝気後の現場ろ過水を用いた。実験開始から6日間、毎日採水を行った。採水直前のみ堆積物の巻き上げが起こらない範囲で直上水を攪拌し、シリンジにより直上水を酸素瓶に採水した後、ウィンクラー法によりDO濃度の測定を行った。その後、DO濃度の変化速度からSODを算出した。また採水直後、空気曝気した現場ろ過水をシリンジにより採水量と同量だけ緩やかに加えた。(a, b 両実験とも中村ら(1996)を参考にした)

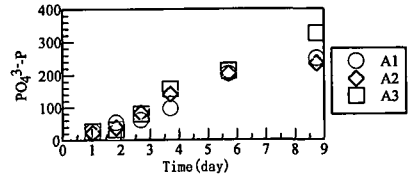
(2) 実験結果および考察

図-8に Encl. A と Encl. B のコア内における $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の時系列変化を示す。Encl. A と Encl. B の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度は時間の経過と共に上昇しており9日弱経過した時点で両方とも $1500\text{ }\mu\text{g/l}$ 程度の値をとる。また、図-9に Encl. A と Encl. B のコア内における $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の時系列変化を示す。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度と同様に Encl. A と Encl. B の $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は時間の経過と共に上昇しており9日弱経過した時点で両方とも $300\text{ }\mu\text{g/l}$ 程度の値をとる。この結果より、表層水を供給した底質と供給無しの底質との溶出速度には明確な差はなく、栄養塩溶出速度の観点からは Encl. A と Encl. B の間に大差はないと言える。

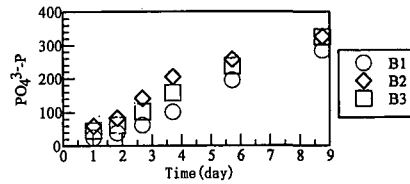
図-10に堆積物によるSODとDO濃度の関係を示す。Encl. A と Encl. B, Stn. C を比較すると、堆積物直上水のDO濃度に関係なく Encl. A におけるSODが Encl. B, Stn. C におけるそれより低い値を示しているこ

とが分かる。この結果より、Encl. A の方が Encl. B, Stn. C より有機汚染が改善されているものと考えられる。

さらに、図中におけるプロットの傾向を見ると、Encl. A は常にDO濃度の減少に伴いSOD値も減少する直線的な関係がみてとれる。一方、Encl. B, Stn. C はDO濃度が約 2 mg/l に減少するまではDO濃度に関係なくSOD値はほぼ一定であるのに対し、DO濃度が 2 mg/l 以下になるとDO濃度の減少に伴いSOD値も直線的に減

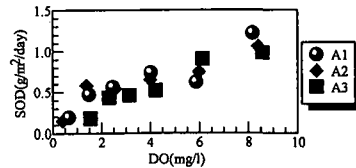


(a) Encl. A

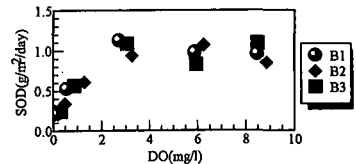


(b) Encl. B

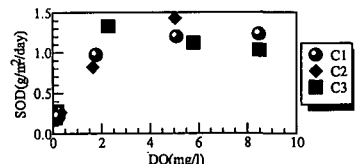
図-9 Encl. A と Encl. B のコア内における $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の時系列変化



(a) Encl. A



(b) Encl. B



(c) Stn. C

図-8 Encl. A と Encl. B のコア内における $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の時系列変化

図-10 堆積物による酸素消費速度(SOD)とDO濃度の関係

少するという Michaelis-Menten 型のような関係があることが確認できる。このことから、Encl. A の酸素消費は主に化学反応により支配され、Encl. B, Stn. C の酸素消費は生物反応によって支配されていた可能性が考えられる。この原因としては、Encl. A では堆積物内には生物が利用可能な有機物が少なく、溶存金属の酸化などによる酸素消費が支配的であった可能性が考えられる。一方、Encl. B, Stn. C では水温成層期間において好氣的な分解が起こっていないので有機物が比較的多く存在し、その結果本実験中に生物反応により酸素が消費されたと考えられる。

5. 現場底質分析結果および考察

現場実験終了後の底質分析の結果を表-1 に示す。なお、本結果は堆積物表面から約 5 cm 採取し、一様にした後に分析を行ったものである。Encl. A では Encl. B, Stn. C と比較して、強熱減量 (Ig-loss)、全炭素 (T-C)、全窒素濃度 (T-N) の減少が認められることより、生物的な有機物分解が進行していたことが示唆される。これは前述の考察を支持する結果である。

ここで T-C に注目してみる。Encl. A において実験期間中の成層形成期に底層部に供給された DO は、単位面積あたり約 1.07 mol/m^2 と算出される。そのため、供給された DO はすべて有機物の好氣的分解 (CO_2 の生成) に用いられたとすると、Encl. B に対する Encl. A の T-C 減少量は、約 1.07 mol/m^2 と見積もられる。一方、隔離水界内において堆積物表面から 5 cm 厚さまでの単位面積あたりの T-C 量は、Encl. A で 37.70 mol/m^2 、Encl. B で 43.24 mol/m^2 となり、差は約 5.53 mol/m^2 となる。両者を比較すると、Encl. A においては T-C 量約 4.46 mol/m^2 が好氣的分解以外の要因で減少したものと考えられる。この原因は、成層形成期に表層水を底層部に供給することにより堆積物からの栄養塩の溶出を抑えているため、Encl. A の有光層における内部生産が制限され有機物生産が抑制された結果、デトリタス等の炭素を含む有機物の沈降及び堆積が減少したため考えられる。

6. 結 論

ラジエーターにより冷却された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、実貯水池に隔離水界を作り、ポンプによって一定流量の表層水を

表-1 底泥分析結果

項目	Unit	Encl. A	Encl. B	Stn. C	全国貯水池 平均値
T-P	mg/g	0.790	0.711	0.575	0.802
T-N	mg/g	2.92	3.40	3.13	1.70
Ig-loss	%	9.5	10.3	9.5	
T-Fe	mg/kg	49400	49000	31900	43000
T-Mn	mg/kg	683	765	702	1200
T-C	%	2.45	2.81	2.59	2.00
Fe/Mn		72	64	45	36
C/N		0.839	0.826	0.827	1.176
N/P		3.70	4.78	5.44	2.12

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た。低い DO 濃度によっても、栄養塩の溶出はほぼ完全に抑制された。また、コア-パッチ系室内実験の結果から、底層部へ表層水を供給することにより水温成層期間中も好氣的な有機物分解が起こり、その結果堆積物環境の悪化を防止する役割を果たしていることが分かった。さらに、底泥分析の結果から、底層部へ表層水を供給することにより内部生産を抑制し、その結果有機物の堆積を減少させる効果が確認できた。

謝辞：本研究を行うに当たり貴重な助言をいただいた運輸省港湾技術研究所海洋環境部中村由行氏ならびに岡田知也氏に深甚なる謝意を表します。また、水質分析に関して福岡市保険環境研究所環境化学課の皆様にご協力を頂きました。福岡県糟屋郡久山町ならびに福岡県糟屋郡久山カントリークラブには実験貯水池を提供していただきました。なお、本研究の遂行にあたっては平成 11 年度科学研究費助成金 (基盤研究 B) の助成を受けた。ここに記して謝意を示します。

参 考 文 献

- 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 (1999): 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, 第 46 巻, pp. 1111-1115.
- 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.