

II-491

曝気による水質改善策に関する理論的考察

九大・工 学生員 御子神 学

九大・工 正 員 中村 由行

1. 研究の目的 湖沼や貯水池における水質汚濁対策として、曝気による水質改善が広く試みられている。その目的は、密度成層を破壊しようとする場合と、成層構造はある程度維持しながら水質の改善を図るものとに分かれるが、貧酸素化や底泥からの磷の溶出を抑制するためには底層水を曝気することが一般に効果的であるとされている。しかしながら、曝気を実施するとかえって底泥の酸素消費速度(SOD)が増加し、極端な場合には貧酸素化が加速されて磷の溶出フラックスも増加するといった負の効果も報告されている。この原因は、曝気により生じた流動が、底泥界面直上の濃度境界層の厚さを減少させ、拡散フラックスを増加させるためであると考えられる。事実、流れ系における底質による酸素消費フラックスは、静水中におけるそれに比べてかなり大きくなることが経験的に知られている。著者らは、境界層理論を応用して、SOD や磷の溶出フラックスが流速のどのような関数になるのかを、理論的に解析した。本研究では、その結果を基に、先に述べた負の効果が生じる機構を解析し、適正な曝気法を提案する。

2. 曝気下における湖沼深層水の溶存酸素収支及び磷の溶出量の変化 簡単のため、二成層した矩形の湖沼における、深層水の溶存酸素収支を考える。現象を単純化して、溶存酸素の消費は底泥による酸素消費(SOD)、供給は曝気によるもののみを考え、密度界面の混合による供給は無視すると、深層水における溶存酸素の収支は以下のように書ける。

$$\frac{dC_{\infty}}{dt} = k_{ae}(C_s - C_{\infty}) - \frac{1}{h} SOD \quad (1)$$

ここで、 C_{∞} 、 C_s は深層水の溶存酸素濃度、及び飽和酸素濃度、 k_{ae} は曝気による酸素の移動速度定数、 h は深層水の深さである。また、Ishikawa & Nishimura(1989)の溶出モデルと著者らの境界層モデル(Nakamura & Stefan, 1993)を結合することにより、SOD 及び磷溶出フラックスは流速の関数として以下の様

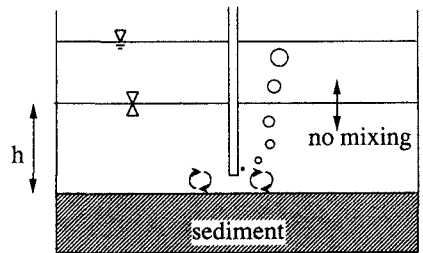


図1. 二成層した湖沼の模式図

$$SOD = \frac{fu_{\infty}}{\varepsilon D_0/L + fu_{\infty}} \frac{\varepsilon D_0}{L} C_{\infty}, \quad (2) \quad \phi_p = \phi_p^{(0)} - \frac{fu_{\infty}}{\varepsilon D_0/L + fu_{\infty}} \phi_p^{(1)} \quad (3)$$

ここで、 ε 、 D 、 L はそれぞれ空隙率、分子拡散係数、好気層の厚さ、 u_{∞} は底層水の流速、 $\phi_p(0)$ は嫌気下における磷の溶出フラックス、 $\phi_p(1)$ は流れが十分速い場合のフラックスの減少量を示す。そのモデルによれば、磷の溶出は溶存酸素濃度の増加と共に直線的に減少し、溶出が完全に止まるときの深層の溶存酸素濃度 C_{crit} は以下の様に与えられる。

$$C_{crit} = \frac{\varepsilon D_0/L + fu_{\infty}}{fu_{\infty}} \frac{D_f}{k_0 \lambda^2} \left[1 - \frac{2\lambda}{L} \tanh(L/2\lambda) \right] \quad (4)$$

ここで、 D_f 、 λ 、 k_0 はそれぞれ第一鉄イオンの分子拡散係数、磷の濃度変化を示す代表長さスケール及び溶存酸素が磷酸態磷及び第一鉄イオンと反応する際の反応速度定数である。

さて、以上の関係式を用いて、曝気によってSOD と磷の溶出フラックスがどう変化するかを、図2によって考えよう。曝気をしないとき（自然状態）の流速を u_1 とし、曝気によって流速が u_2 に増加したとする。初期状態は両図において点Aの自然状態にあり、そこから急に曝気を開始したとする。境界層の応答が速やかであれば、状態は、同じ溶存酸素濃度で流速 u_2 の直線上にある点A'に移る。その後、曝気による供

給よりもSOD による消費が多ければ流速 u_2 の線上を左に、供給の方が多ければ同じ線上を右に移動し、それぞれ以下の様に表される平衡濃度 C_{eq} に達する。

$$C_{eq} = \left[1 + \frac{fu_2}{\varepsilon D_0/L + fu_2} \frac{\varepsilon D_0/L}{hk_{ae}} \right]^{-1} C_s \quad (5)$$

最終的な平衡濃度 C_{eq} が式(4) で与えられる臨界濃度 $C_{crit}(u_2)$ よりも小さければ磷の溶出が続く。逆にいえば、磷の溶出を止めるための条件は $C_{eq}(u_2) > C_{crit}(u_2)$ であり、この関係は式(4)(5)より、

$$\frac{1}{hk_{ae}} + \frac{1}{\varepsilon D_0/L} + \frac{1}{fu_2} < \frac{k_0 \lambda^2 C_s}{D_f} \left[1 - \frac{2\lambda}{L} \tanh\left(\frac{L}{2\lambda}\right) \right] \frac{1}{\varepsilon D_0/L} \quad (6)$$

と表せる。図2は、初期状態において既に磷の溶出が存在する条件下にあった場合を示す。溶出がない条件から始まった場合でも、同様に考えることにより、式(6) の条件を満たさなければSOD が曝気による供給を上回り、結果として貧酸素化して磷の溶出が始まることを示すことができる。深層水を曝気することによって予想される系の変化について、図3にまとめて示す。

最後に、系が平衡状態に到達する時間スケール τ を求めてみよう。式(1) は初期条件 $t=0$ で $C_\infty = C_\infty(0)$ の下で容易に解けて、解

$$\frac{k_{ae} C_s - k_s C_\infty(t)}{k_{ae} C_s - k_s C_\infty(0)} = \exp(-k_s t) \quad (7)$$

を得る。ここで、 k_s は平衡に達する時間スケール τ の逆数であり、以下の式で表される。

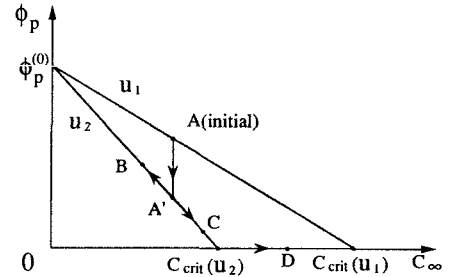
$$\tau = k_s^{-1} = \left[k_{ae} + \frac{fu_\infty}{\varepsilon D_0/L + fu_\infty} \right]^{-1} \quad (8)$$

曝気を行うと、流速が増加するために時間スケール τ はかなり小さくなり、より速く平衡に達することがわかる。

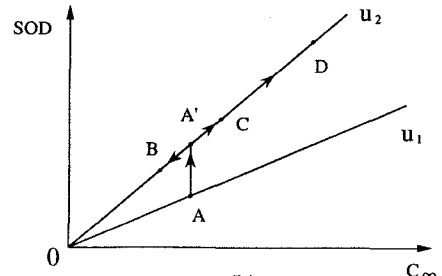
3. 結論 深層水に曝気を行うことによるSOD や磷の溶出フラックスの変化過程を解析した。深層曝気による流動が濃度境界層の厚さを減じるために酸素消費フラックスが増加し、底層水が貧酸素化する可能性があること、さらに、溶存酸素濃度が臨界値以下になると磷の溶出が始まるという因果関係を示した。貧酸素条件下での磷の溶出をおこさないためには、式(5) で定義される溶存酸素の平衡濃度が、磷溶出のための臨界濃度よりも大きければよい事を示した。

参考文献

- Ishikawa & Nishimura (1989) Water Res. 23, pp.351-359.
Nakamura & Stefan (1993) submitted to J. Env. Eng., ASCE.
中村・御子神 (1993) 平成5年度土木学会年講概要集



(a)



(b)

図2. 磷の溶出量及びSODの D_0 濃度依存性

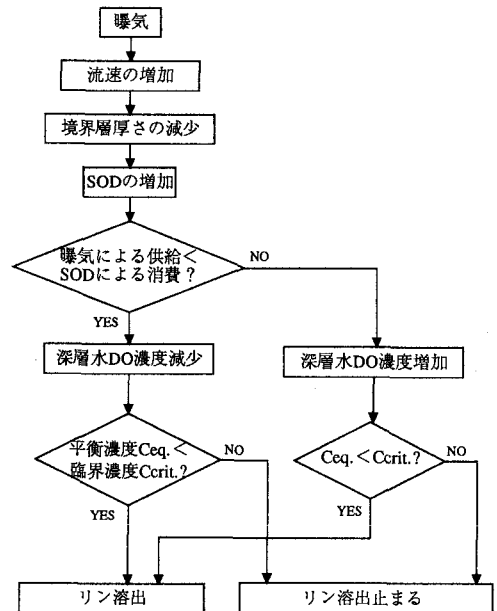


図3. 曝気による状態の変化の模式図