

B-15

堆積物直上水の変化に伴う SOD 及びリン溶出の応答

九州大学大学院 工学研究科 ○井上徹教

同上 中村由行

同上 足立義彦

1. はじめに

富栄養化した比較的浅い水域では 1.水温・塩分濃度の変化に伴う密度成層の発達、2.堆積物の酸素消費による底層水の貧酸素化、3.堆積物からの栄養塩の溶出、4.風による密度成層構造の破壊と表層水への栄養塩の混合、といった変化を頻繁に繰返している。例えば、宍道湖では低気圧の通過などに伴い明瞭な塩分躍層が形成される。この時底層水では3～4日の時間スケールで貧酸素化が進行しており、堆積物からの栄養塩溶出量が増加している¹⁾。その後、風波の発達により密度成層は破壊され²⁾、栄養塩を高濃度に含んだ底層水は表層水と混合される。また、東京湾においても上記と同様な、比較的短い時間スケールでの密度成層の発達・貧酸素化が報告されており、その底生生物への影響が指摘されている³⁾。このように数日またはそれ以下のオーダーでの水質変動は、浅い富栄養化した水域での物質循環に非常に重要な役割を果たしていると考えられる。しかしながら従来の堆積物による酸素消費速度(SOD)や堆積物からの栄養塩の溶出に関する研究ではその季節変動を考察している程度にとどまっており、数日以内のオーダーでの特性を考察した研究はほとんど見られない。そこで本研究では、諸条件の変化に対する SOD やリンの溶出速度の応答を考察するために、溶存酸素・リン酸態リン・二価鉄・硫化物に関する数理モデルを構築し、その検証を行った。

2. 数理モデルの作成

2.1 モデルの概要

SOD・堆積物からのリンの溶出速度に関する数理モデルを作成するにあたり、本研究では溶存酸素・リン酸態リン・二価鉄イオン・硫化物の相互作用に着目した。溶存酸素は直上水から濃度境界層における拡散現象により堆積物表層へ供給される。溶存酸素は堆積物内部において生物反応と化学反応により消費されるが、ここでは化学反応として二価鉄と硫化物の酸化を考えている。一方、リンは堆積物粒子からの脱着によって供給され、鉛直方向の濃度勾配に起因する拡散によって堆積物表層へと移動する。リンは酸化層内では水酸化第二鉄に吸着される性質を持つため、酸化層では吸着を免れたリンのみが拡散により移動する。二価鉄も堆積物粒子からの脱着により供給されるが、酸化および硫化物との化合により消費される。硫化物は硫酸イオンが還元される事で生成されるが、溶存酸素が存在する状況ではその濃度に応じて酸化され硫酸イオンとなる。

2.2 基礎式

上記の諸反応は、以下の水・堆積物界面近傍における各溶存物質に関する拡散方程式により表現される。

$$\varepsilon \frac{\partial C_O}{\partial t} = \varepsilon D_{O} \frac{\partial^2 C_O}{\partial z^2} - \frac{1}{4} \varepsilon k_{OF} C_O C_F - k_B C_O - 2 \varepsilon k_{OS} C_O C_S \quad (1)$$

$$\varepsilon \frac{\partial C_P}{\partial t} = \varepsilon D_{P} \frac{\partial^2 C_P}{\partial z^2} - \alpha \varepsilon k_{OF} C_O C_F - k_{ad} [C_P - C_P(-\infty)] \quad (2)$$

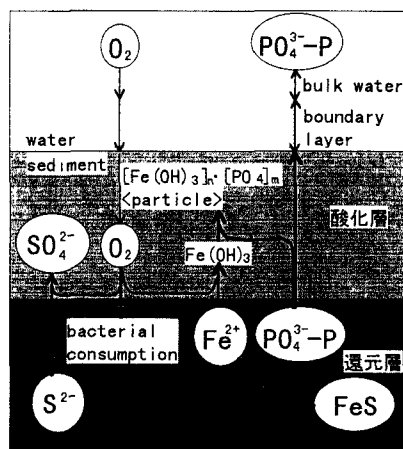


図 1 数理モデル概念図

$$\varepsilon \frac{\partial C_F}{\partial t} = \varepsilon D_{zf} \frac{\partial^2 C_F}{\partial z^2} - \varepsilon k_{OF} C_O C_F - \frac{1}{\alpha} k_{ad} [C_P - C_P(-\infty)] - \varepsilon k_{FS} C_F C_S \quad (3)$$

$$\varepsilon \frac{\partial C_S}{\partial t} = \varepsilon D_{zs} \frac{\partial^2 C_S}{\partial z^2} + \varepsilon k_S - \varepsilon k_{FS} C_F C_S - \varepsilon k_{OS} C_O C_S \quad (4)$$

ここで、 C_O ・ C_P ・ C_F ・ C_S はそれぞれ溶存酸素・リン酸態リン・二価鉄・硫化物の濃度、 D_{zO} ・ D_{zP} ・ D_{zf} ・ D_{zs} はそれぞれ溶存酸素・リン酸態リン・二価鉄・硫化物の拡散係数、 t は時刻、 z は鉛直軸(上向きを正、界面を0としている)、 ε は空隙率、 k_b は生物による酸素消費速度係数、 k_S は硫化物の生成速度係数、 k_{OF} は二価鉄の酸化速度係数、 k_{OS} は硫化物の酸化速度係数、 k_{FS} は二価鉄と硫化物の反応速度係数、 k_{ad} はリンの吸着定数である。

拡散係数は次式により定義している。

$$D_z = D_{zm} + D_{zt} \quad (5)$$

$$\frac{D_{zt}}{\gamma} = \left(A_m \frac{zu_*}{\gamma} \right)^m \quad (6)$$

ここで、 D_z は鉛直方向の拡散係数、 D_{zm} は分子拡散係数、 D_{zt} は乱流拡散係数、 γ は動粘性係数、 u_* は摩擦速度、 $A_m(=0.078)$ ・ $m(=3)$ は定数を表す⁴⁾。

3. 計算結果と考察

3.1 溶存酸素濃度の影響(定常状態)

バルク領域のDO濃度($C_o(\infty)$)を0mg/l～7mg/lに変化させた場合の水・堆積物界面近傍のDO濃度プロファイルの一例を図2に示す。 $z<0$ (mm)が堆積物内部、 $z=0$ (mm)が水・堆積物界面、 $z>0$ (mm)が水中を表す。ここでは境界条件として、リン・二価鉄ともに水中バルク領域の濃度($C(\infty)$)に堆積物深層濃度($C_P(-\infty) = C_F(-\infty) = 3100\mu\text{g/l}$)の10%を与えている。また、淡水域を念頭に置き硫化物濃度は0としている。これを見ると境界層厚さは約5mmと各条件ともに余り変化は見られないが、DO濃度の増加に伴い境界層内部での濃度勾配は増大している。溶存物質の移動フラックスは濃度勾配と拡散係数の積で表されるため、DO濃度の増加に伴いSODが増大していることが分かる。それを受けて酸素の浸透厚さも増加している。また、同一条件におけるリン濃度プロファイルを図3に示す。DO濃度プロファイルと同様に境界層厚さは条件毎にほとんど変化はないが、 $C_o(\infty)=0$ (mg/l)の場合には界面付近で負の濃度勾配を持っており堆積物からの溶出フラックスが顕著に存在するのに対して、 $C_o(\infty)$ の増加に伴い溶出は抑えられ、 $C_o(\infty)=7$ (mg/l)では水中から堆積物へのリンの移動フラックスが見られる。従来の研究ではリンに関しては堆積物からの溶出のみがモデル化されていたが、本結果から、直上水が好気的な状況であれば水中から堆積物へ溶存態のリンの移動が生じることが分かった。

3.2 流速の変化に伴う時間応答

次に、直上水の流速を $u_* = 0.5$ (mm/sec)から $u_* = 3.0$ (mm/sec)にステップ的に変化させた場合の、1分後から12時間後、および定常に達した時のリンの濃度プロファイルを図4に示す。これは $u_* = 0.5$ (mm/sec)における定常状態での濃度分布を予め求めておき、それを初期条件として $u_* = 3.0$ (mm/sec)の場合の非定常計算を行ったものである。

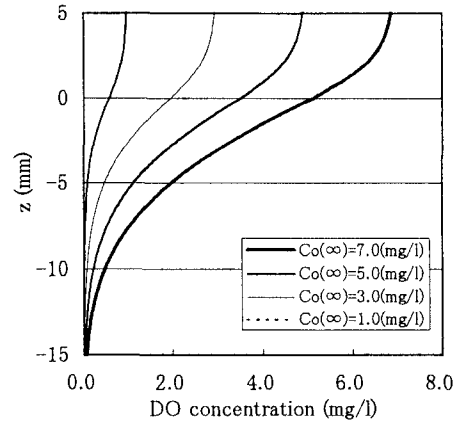


図2 直上水のDO濃度を変化させた場合のDO濃度プロファイル

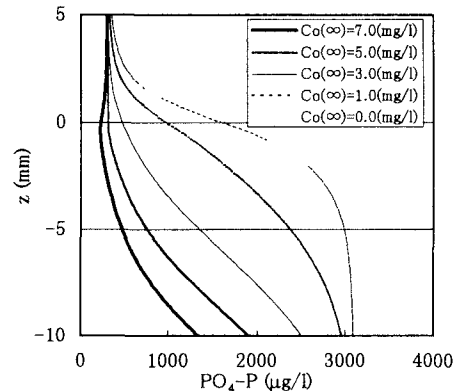


図3 直上水のDO濃度を変化させた場合のリン濃度プロファイル

但し、 $C_p(-\infty) = 3100(\mu\text{g/l})$ 、 $C_p(\infty) = 0(\mu\text{g/l})$ 、 $C_o(-\infty) = 7(\text{mg/l})$ とした。図を見ると水中のプロファイルは 15 分程度でほぼ定常となっているのに対し、堆積物中のプロファイルはほぼ定常となるのに半日程度を要している。これは水中での反応(拡散現象)と比較して堆積物中での生物反応・化学反応などの時間スケールが大きいためである。さらに図 5 には直上水の流速を変化させた場合の SOD・リン溶出フラックスの時間変化の様子を示している。これを見ると、SOD・リンの溶出フラックスともに流速変化の直後は一桁程度大きな値を持つことが分かる。これは水中での濃度勾配の急激な変化によるものと考えられるが、明らかに大きなフラックスは数分程度続いている。一方、湖沼や内湾での流れは波によるところが大きいため、流速は数秒程度の時間スケールで変化していると考えられる⁵⁾。これらの事から考えると、同程度の平均流速を持つ場合でも定常流と波動流では水・堆積物界面における物質の移動フラックスは大きく異なる可能性があり、定常流の場合の評価では過小評価になる恐れがあると考えられる。

4. まとめ

水質・水理などの諸条件の変化に対する SOD やリンの溶出速度の応答を考察するための数理モデルを構築した。その結果、直上水の水質・水理条件が急変する場合、変化直後には SOD・リン溶出速度共に劇的な変化が見られるが、約半日後には定常に落ち着くことが分かった。また、好気条件において通常考えられる現象とは逆に、直上水から堆積物内部へリンが移行する現象が見られた。実水域では数日以内の時間スケールで水質・水理条件が大きく変動しているため、上記のような応答は水域の物質循環を把握する上で非常に重要であると考えられる。今後は本モデルの計算結果と室内実験の結果や現場での連続水質観測結果との比較を行い、本モデルの実用性・妥当性を検証し、物質循環モデルへの適用を検討する予定である。

<参考文献>

1) 神谷宏、石飛裕、井上徹教、中村由行、山室真澄：夏季の宍道湖の底層水に蓄積する栄養塩の起源、陸水学会誌、57 巻 4 号、pp. 313-326、1996。
2) 井上徹教、中村由行、村井大亨、石飛裕、嘉藤健二、山室真澄：宍道湖における風による混合の連続観測、日本陸水学会第 63 回大会講演要旨集、p. 192、1996。
3) 風呂田利夫：東京湾内湾底生生物の生き残りと繁栄、沿岸海洋研究ノート、28、p. 160-169、1991。
4) 中村由行、御子神学、朴崎鎬：底層水の流動がリンの溶出フラックスに及ぼす影響、海岸工学論文集、第 41 巻、pp. 1081-1085、1994。
5) 中村由行、井上徹教、村井大亨、柳町武志、辻本剛三、石飛裕、山室真澄：湖沼におこる巻き上げの日周期変動、第 34 回環境工学研究フォーラム講演集、pp. 188-190、1997。

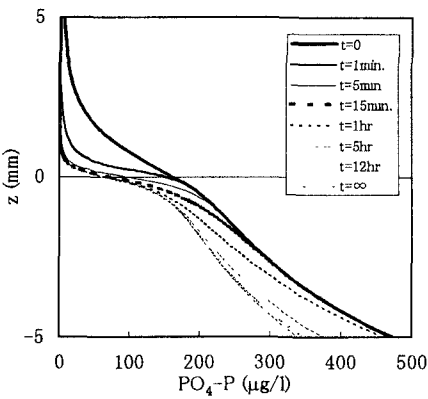


図 4 直上水の流速をステップ的に変化させた場合のリン濃度プロファイル

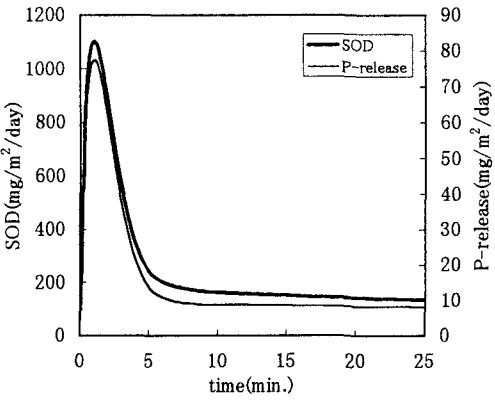


図 5 直上水の流速を変化させた場合の SOD・リン溶出フラックスの時間変化の様子