

堆積物による酸素消費・栄養塩溶出に関する非定常モデル

九州大学大学院 工学研究科 正会員 ○井上徹教

正会員 中村由行

学生員 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供給、といった変化を頻繁に繰返している。このことから数分～数時間オーダーでの水質や流動の変動は、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従来の研究は主として季節変動の様な長い時間スケールでの変動を対象としており、数日以内のオーダーでの変化過程を調べた研究はほとんど見られない。本研究では、堆積物直上の流れや水質の短期的変化に対するSODやリン溶出速度の応答を調べるためにD0・リン酸態リン・第一鉄イオン・硫化物に関する非定常数理モデルを構築し、検証を行った。

2. 数理モデル

(1) モデルの概要 本モデルは、堆積物直上の濃度境界層における拡散輸送モデルと堆積物内部の反応過程を記述したモデルに大別される。この点はSOD・堆積物からのリン溶出速度に関して著者らが提案してきた数理モデル¹⁾の基本的な考え方と同じである。本研究では溶存酸素・リン酸態リン・第一鉄イオンに、新たに硫化物をモデル変数に加え、汽水・海水系においても適用できるモデル化を行った。さらに、従来のモデルは定常モデルであったが、短期的応答を調べるために非定常モデルに拡張した点が異なる。

(2) 基礎式 上記の諸反応は、以下の堆積物中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。

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

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

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

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

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・第一鉄イオン・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・第一鉄イオン・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_{OF} は第一鉄イオンの酸化速度係数、 k_B は微生物による酸素消費速度係数、 k_{OS} は硫化物の酸化速度係数、 k_{ad} はリンの吸着速度定数、 k_{FS} は第一鉄イオンと硫化物の反応速度係数、 k_S は硫化物の生成速度係数、 α は $\text{Fe}(\text{OH})_3$ に吸着する PO_4 のモル比、 $C_P(-\infty)$ は堆積物深層における間隙水中リン濃度である。

3. 計算結果と考察

直上水の流れが変化した時のフラックスの変化過程を調べてみよう。直上水の流速(摩擦速度)を $u_* = 0.5(\text{mm/sec})$ から $u_* = 3.0(\text{mm/sec})$ 及び $u_* = 3.0(\text{mm/sec})$ から $u_* = 0.5(\text{mm/sec})$ にステップ的に変化させた場合のD0・リン拡散フラックスの時間変化の様子をそれぞれ図-1, 2に示している(D0については下向き、リンについては上向きを正としている)。流速がステップ的に増加する場合(図-1)には、まず界面($z=0(\text{mm})$)においては流速増加の2~3分後に極大値(D0は定常値の約2.7倍、リンは約1.7倍のフラックス)を取った後減少しながら定常値へと漸近している。これは堆積物中に比べ境界層内での濃度分布の応答が早いいため、流速増加直後には界面における濃度勾配が定常状態でのそれに比べて大きくなるためである。これに対

し境界層上部 ($z=10(\text{mm})$) においては流速変化直後に二桁程度大きな値を持ち、その後定常値へと漸近している。境界層上部におけるリンのフラックスの急増は境界層内に蓄積したリンが乱流拡散によって上方に急激に輸送されるためであり、DO フラックスが増加するのは逆に境界層に蓄積されるためである。流速変化直後 5 分間で時間積分すると DO については約 $3\text{mg}/\text{m}^2$ 、リンは約 $0.2\text{mg}/\text{m}^2$ のフラックスを持っていた。これは、流速変化後の定常状態でのフラックスの約 1 時間分のフラックスである。このことから、定常状態での評価は SOD やリン溶出速度を過小評価する恐れがある事がわかる。次に流速がステップ的に減少する場合 (図-2) を見ると、界面 ($z=0(\text{mm})$) におけるフラックスは、DO については約 30 分後、リンについては約 150 分後に極小値を取った後微増しながら定常値に漸近していく事がわかる。これも堆積物内部と境界層内での時間応答の差に起因している。また、界面でのフラックスは流速変化直後から変化しはじめるのに対し、 $z=10(\text{mm})$ でのフラックスは約 10 分後から変化しはじめる。これは流速の減少に伴い濃度境界層厚さが増加する際、流速減少の約 10 分後から $z=10(\text{mm})$ における濃度勾配が変化しはじめるためである。この間 $z=10(\text{mm})$ では濃度勾配にそれほどの変化が見られないにもかかわらず、拡散係数が小さくなるためフラックスは極端に小さな値を取っている。

4. 結論

水質・水理などの諸条件の変化に対する SOD やリン溶出速度の応答を調べるための数理モデルを構築した。その結果、直上水の流速がステップ的に変化する場合、界面における DO・リンのフラックスは単調にではなく極値を持った後定常値へと近づく事がわかった。これは堆積物内部と境界層内における濃度分布変化の時間スケールの差に起因している。また直上水の流速がステップ的に増加する場合、変化直後には濃度境界層内の溶存物質濃度が急変することで、境界層上部における DO・リンのフラックスは共に劇的な影響 (二桁もの増加) を受け、約 30 分後に定常に落ち着くことがわかった。さらに直上水の流速がステップ的に減少する場合には、変化直後には境界層上部において極端に小さなフラックスを持ち、約 10 分後に増加してくる事がわかった。これは拡散係数は流速の変化に瞬時に応答するのに対し、濃度分布は応答に数 10 分を要するためである。水中バルク領域の水質に直接影響を与えるのは境界層上部におけるフラックスであると考えられるので、上記のようなフラックスの応答特性は環境中の水質を考える上で非常に重要な要因であるといえる。

実水域では数十分から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事が多いため、本稿で述べた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。講演では水中バルク領域における DO 濃度のステップ変化による影響などについても発表する予定である。

<参考文献>

1) 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.

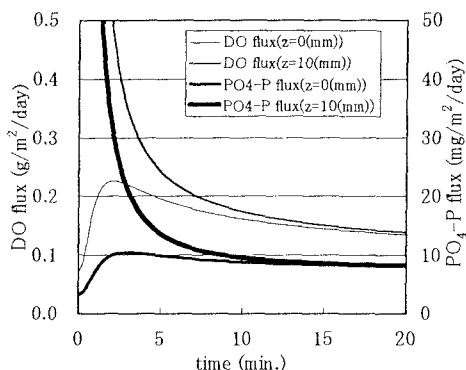


図-1 直上水の流速をステップ的に増加させた場合の DO・リン拡散フラックスの時間変化の様子

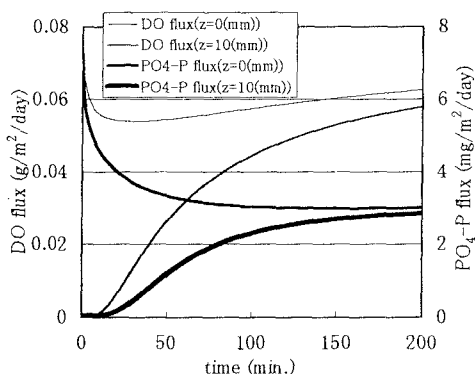


図-2 直上水の流速をステップ的に減少させた場合の DO・リン拡散フラックスの時間変化の様子