

神戸大学工学部 正会員 道奥康治
 (株) TIS 正会員 ○ 金井健史
 大分高専土木工学科 正会員 東野誠

1. はじめに

貧酸素水に接する傾斜した底泥堆積層上では、嫌氣的分解によって様々な物質が溶出し、その過剰浮力によって壁面密度流が発生する。その熱塩輸送によって溶出物質と熱エネルギーが輸送され、深水層の富栄養化はより促進される。溶出現象には堆積層中の生物化学反応が大きく影響する。本研究ではこの「化学成層流」が物質の溶出と輸送におよぼす影響を理論的に明らかにする(図-1)。化学成層流を規定する因子として水中の溶存酸素濃度、堆積層中の鉄の濃度、堆積層面の傾斜角度などを考慮し、流れと生物化学反応をモデル化する。解析では、場を水側と堆積層側に分割し、水-堆積層境界面での物質濃度・物質フラックスの連続性を考慮して、流れと物質の連成解析を行う。

2. 対象とする場

図-2に示すような二次元システムを解析対象とする。溶存物質はリン酸イオン(PO_4P)、第1鉄イオン(Fe^{2+})、溶存酸素(DO)とする。水側では、底泥堆積層からの溶出がもたらす過剰浮力によって化学成層流が発生し、せん断乱れによって物質が拡散する。流れは等流とする。一方、堆積層内の物質収支は、各種物質の生物化学反応にともなう発生・消滅と分子拡散によって支配されている。生物化学反応としては、 Fe^{2+} の酸化(図-2中(E),(H))、 Fe^{2+} と PO_4P の底泥粒子への吸着・脱着(図-2中(A),(C),(D),(F))、 PO_4P の水酸化第2鉄($\text{Fe}(\text{OH})_3$ ：これは Fe^{2+} が酸化してできる)への吸着(図-2中(B))、バクテリアによる酸素消費(図-2中(G))を考慮した。

3. モデル方程式

二次元レイノルズ方程式に定常等流の仮定を適用して、次式が得られる。

$$\frac{(\beta_P C_P + \beta_F C_F) g \sin \theta + \nu \left[\frac{d^2 u}{dz^2} + \frac{d}{dz} \left(\left(A_m \frac{u+z}{\nu} \right)^m \frac{du}{dz} \right) \right]}{\text{堆積層からの溶出による過剰浮力}} = 0 \quad (1)$$

応力項

同様に、水側における物質 $i(i=\text{P}, \text{F}, \text{O})$ の拡散方程式は、

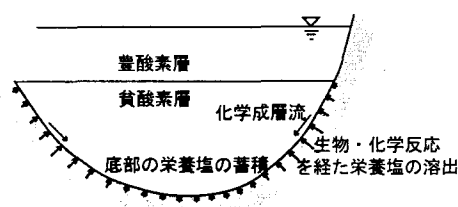


図-1 化学成層流の発生

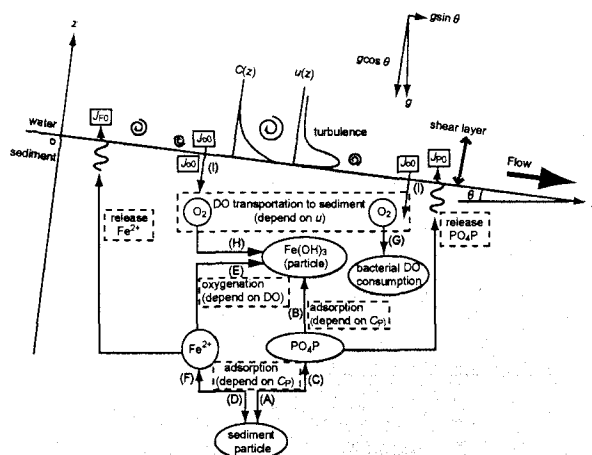


図-2 対象とする場と各現象

表-1 関連諸量(1)

u	x 方向の流れ
β_P, β_F	PO_4P , Fe^{2+} の濃度密度換算係数
C_P, C_F, C_O	PO_4P , Fe^{2+} , DO の濃度
θ	堆積傾斜面の角度
ν	水の動粘性係数
A_m, m	モデル定数
u_*	摩擦速度
$J_{\text{PO}}, J_{\text{FO}}, J_{\text{DO}}$	PO_4P , Fe^{2+} , DO の水-堆積層境界面フラックス
$S_{\text{CP}}, S_{\text{CF}}, S_{\text{CO}}$	PO_4P , Fe^{2+} , DO のシュミット数

$$J_{10} = -v \left\{ S_{cl}^{-1} + \left(A_m \frac{u \cdot z}{v} \right)^m \right\} \frac{dC_i}{dz} \quad (2)$$

乱流拡散と分子拡散項

となる。式(1),(2)において、滑動粘性係数 v_i は中村ら²⁾と同様に、次式で評価される。

$$\frac{v_i}{v} = \left(A_m \frac{u \cdot z}{v} \right)^m \quad (3)$$

底泥側の物質収支は拡散と生物化学的発生・消滅を考慮して、次式で記述される。

$$\varepsilon D_P \frac{d^2 C_P}{dz^2} = \frac{\alpha \varepsilon k_0 C_O C_F}{\text{Fe(OH)}_3 \text{ への吸着}} + \frac{k_{ad} (C_P - C_{P\infty})}{\text{底泥粒子への吸着}} \quad (4)$$

$$\varepsilon D_F \frac{d^2 C_F}{dz^2} = \frac{\varepsilon k_0 C_O C_F}{\text{Fe}^{2+} \text{ の酸化にともなう消費}} + \frac{1}{\alpha} k_{ad} (C_P - C_{P\infty}) \quad (5)$$

$$\varepsilon D_O \frac{d^2 C_O}{dz^2} = \frac{1}{4} \varepsilon k_0 C_O C_F + \frac{k_b C_O}{\text{Fe}^{2+} \text{ の酸化にともなう消費}} + \frac{k_b C_O}{\text{バクテリアによる酸素消費}} \quad (6)$$

式(4)は PO_4P , (5)は Fe^{2+} , (6)は DO の保存式である。各式の右辺は生成・消滅項を表し下線部に該当する現象を付記する。

4. 本モデルによって得られた結果

以上のモデル方程式を用いて水-堆積層界面での物質濃度・物質フラックスの連続性を考慮した連成解析を行う。図-3、図-4は流速 u 、リン酸濃度 C_P 、溶存酸素濃度 DO の分布形におよぼす各パラメータの影響を示している。諸量 (u, z, k_0) は堆積層側のパラメータによって無次元化されている。図-3は、水中の溶存酸素バルク濃度の無次元値 $\tilde{C}_{O\infty}$ が変化した場合の分布形の変化をあらわす。上から順に、流速分布、 PO_4P 濃度分布、 DO 濃度分布をそれぞれあらわす。溶存酸素バルク濃度が小さくなると、嫌氣的溶出によって水中のリン酸 PO_4P の濃度が増加し、それにともなって化学成層流（壁面ブルーム）が促進されることがわかる。

図-4は、底泥堆積層界面の傾斜角度 θ が変化した場合の影響をあらわす。傾斜角 θ が大きいほど重力効果によって化学成層流が発達し、それにともない水中のリン酸濃度 PO_4P が減少していることがわかる。これは、化学成層流の発達によって水中から堆積層中への酸素供給量が増加し、 PO_4P の嫌氣的溶出が抑制されるためである。

参考文献

- 1) 道奥他：浮力一定の傾斜面から発生するブルーム，水工学論文集，第45巻，pp.967-972, 2001.
- 2) 中村他：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.

表-2 関連諸量(2)

ε	空隙率
D_P, D_F, D_O	$\text{PO}_4\text{P}, \text{Fe}^{2+}, \text{DO}$ の分子拡散係数
k_0	Fe^{2+} の酸化反応速度
α	Fe(OH)_3 に対する PO_4P の吸着比率
k_{ad}	底泥粒子への PO_4P の吸着速度定数
k_b	バクテリアによる酸素消費速度定数
$C_{P\infty}$	堆積層中深くの PO_4P 濃度

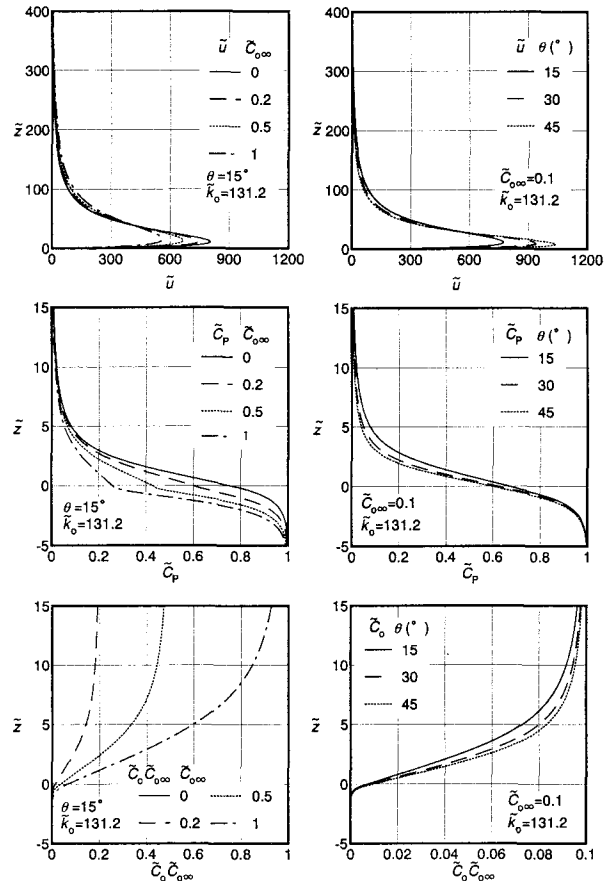


図-3 溶存酸素濃度変化に対する各分布形

図-4 堆積層面の傾斜角度変化に対する各分布形