

傾斜堆積面からの嫌氣的溶出により発生する化学成層流と物質溶出量の理論解析

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

1. はじめに

貧酸素水に面した傾斜底泥面上には、各種物質の嫌氣的溶出によって、壁面密度流が発生すると考えられる。本研究ではこの密度流を化学成層流と称する。この化学成層流により生じる、壁面のせん断力変化が底泥からの物質溶出に影響を及ぼす。本研究では、この化学成層流が物質溶出に与える影響を検討するため、道奥らの水-堆積層間の物質溶出モデル¹⁾を用いて、各種支配パラメータ変化に対する物質溶出量を検討した。

2. モデル方程式

図-1 は本研究で対象とする解析領域である。水側では化学成層流が発生しており、それによって各種物質が拡散されている。一方、堆積層側では各種物質の生物化学反応がある中で、分子拡散が起きている。本研究では、対象とする溶存物質をリン(PO_4P)、鉄(Fe^{2+})、酸素(DO)の3つとし、水側の現象を乱流かつ等流であるとした。

場におけるモデル方程式は次のようになる。

$$\underbrace{\tilde{G}_p \tilde{C}_p + \gamma_{FP} \tilde{G}_p \tilde{C}_F}_{\text{堆積層からの溶出による過剰浮力項}} + \underbrace{\frac{S_{CP}}{\varepsilon} \left[\frac{d^2 \tilde{u}}{d\tilde{z}^2} + \frac{d}{d\tilde{z}} \left\{ \left(A_m \frac{\varepsilon}{S_{CP}} \tilde{u}_* \tilde{z} \right)^m \frac{d\tilde{u}}{d\tilde{z}} \right\} \right]}_{\text{応力項}} = 0 \quad (1)$$

$$\tilde{J}_i = - \underbrace{\left\{ 1 + S_{ci} \left(A_m \frac{\varepsilon}{S_{CP}} \tilde{u}_* \tilde{z} \right)^m \right\} \frac{d\tilde{C}_i}{d\tilde{z}}}_{\text{乱流拡散と分子拡散}} \quad (2)$$

式(1),(2)はそれぞれ、運動方程式と水側の拡散方程式である。ここで、 $\tilde{C}_p, \tilde{C}_F, \tilde{C}_O$ は PO_4P , Fe^{2+} , DO の無次元濃度、 $\tilde{u}$ は x 方向の無次元流速、 S_{CP}, S_{CF}, S_{CO} は PO_4P , Fe^{2+} , DO のシュミット数、 $\tilde{G}_p$ は傾斜底泥面角度 θ に依存する無次元重力係数、 γ_{FP} は Fe^{2+} と PO_4P の無次元重力係数比、 ε は堆積層中における空隙率、 A_m, m は渦動粘性係数を評価するときに用いたモデル定数²⁾、 $\tilde{u}_*$ は無次元摩擦速度である。式(2)は物質 i についての拡散方程式で、 i は $\text{PO}_4\text{P}(i=P)$, $\text{Fe}^{2+}(i=F)$, $\text{DO}(i=O)$ のいずれかである。式中の $\tilde{J}_i$ は物質 i の堆積境界面フラックスである。また、各パラメータは底泥中のスケールを用いて無次元化したものである。

$$\frac{d^2 \tilde{C}_p}{d\tilde{z}^2} = \underbrace{\tilde{k}_O \tilde{C}_{O\infty} \tilde{C}_O \tilde{C}_F}_{(B)} + \underbrace{(\tilde{C}_p - 1)}_{(A)} \quad (3)$$

$$\frac{d^2 \tilde{C}_F}{d\tilde{z}^2} = \underbrace{\tilde{k}_O \tilde{C}_{O\infty} \tilde{C}_O \tilde{C}_F}_{(E)} + \underbrace{(\tilde{C}_p - 1)}_{(D)} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \tilde{C}_O}{d\tilde{z}^2} = \underbrace{\frac{\tilde{k}_O}{4\alpha \tilde{D}_O} \tilde{C}_O \tilde{C}_F}_{(H)} + \underbrace{\frac{\tilde{k}_b}{\tilde{D}_O} \tilde{C}_O}_{(G)} \quad (5)$$

式(3),(4),(5)はそれぞれ PO_4P , Fe^{2+} , DO の底泥中における拡散方程式である。ここで、 $\tilde{k}_O$ は Fe^{2+} の無次元酸化速度定数、 $\tilde{C}_{O\infty}$ は水側における DO の無次元バルク濃度、 α は $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 1 モルに吸着する PO_4P のモル数、 $\tilde{D}_O$ は無次元 DO 分子拡散係数、 $\tilde{k}_b$ 無次元バクテリア DO 消費速度定数である。各式の右辺は各物質の生成消滅項を表してあり、各項下線部の文字は図-1 中に記述している各物質の反応を表している。

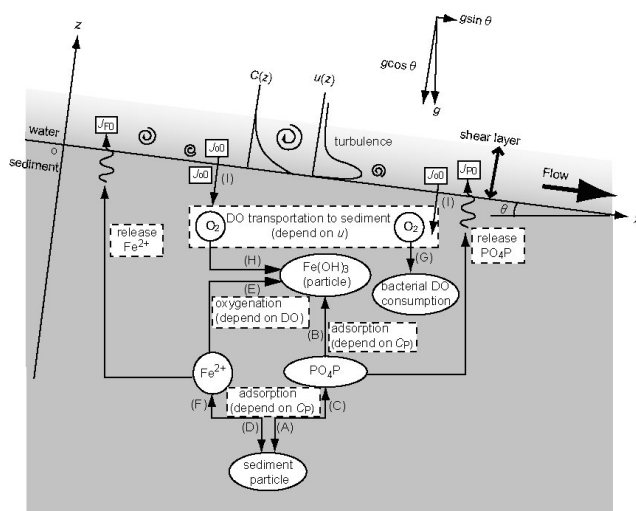


図-1 対象とする場

キーワード：水-堆積層境界面、嫌氣的溶出、傾斜プルーム、リン、鉄

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 Phone: (078)803-6056, FAX: (078)803-6069

3. 計算アルゴリズム

以上のモデル方程式を用い、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た連成解析を行うことによって結果を得るが、その計算手順は図-2に示すとおりである。図中の $\tilde{J}_{PS}, \tilde{J}_{FS}, \tilde{J}_{OS}$ は堆積層側から見た各物質の境界面フラックス、 $\tilde{u}(\infty)$ は計算によって得られた無次元バルク流速である。

4. 計算結果

図-3のグラフは $\tilde{k}_O = 131.2$ における周囲流速 $\tilde{u}_\infty$ 変化に対する、 PO_4P と DO の堆積層境界面フラックスのグラフである。これらの図から、水域中の DO 濃度($\tilde{C}_{O\infty}$)が大きくなれば、 PO_4P は底泥からの溶出が抑制され、 DO は底泥へ輸送される量が大きくなっていることが本モデルによって示されていることが分かる。これは、堆積層中の DO が増えることによって Fe^{2+} が酸化することによってできる $Fe(OH)_3$ が増加し、これに PO_4P が吸着するためである。また、重力による流れの各溶出フラックスへの影響は、

- ・周囲流速($\tilde{u}_\infty$)が小さいときと
- ・周囲流速が負のとき（底泥傾斜面を遡上する流れ）に

対して顕著であることが分かる。周囲流速が小さいときは、重力の効果が大きくなる（底泥傾斜面角度 θ が大きくなる）ほどリンについては堆積層からの溶出が大きくなり、 DO については底泥への酸素輸送量が大きくなることが分かる。これは、重力の影響が強くなれば、水-堆積層境界面付近の流れが卓越し、それにともない濃度境界層厚さが小さくなることにより、水-堆積層境界面付近の濃度勾配が大きくなるからである。

参考文献

- 1) 道奥・金井・東野：平成15年度土木学会関西支部年次学術講演会，2003。
- 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。

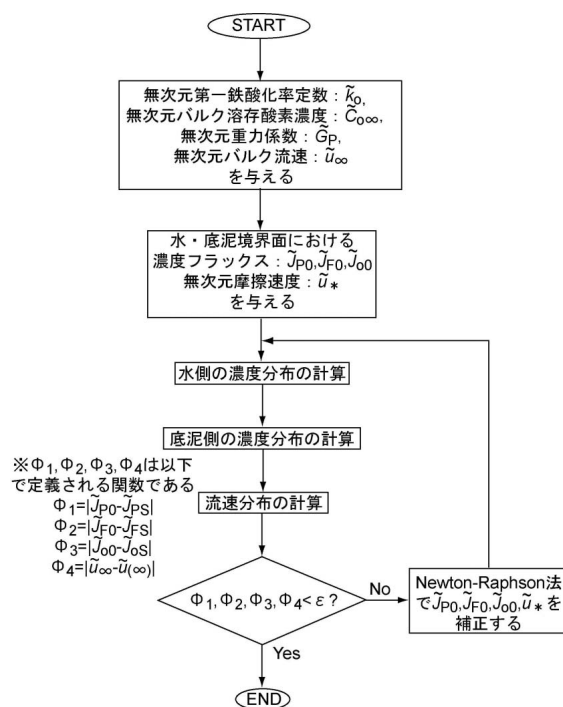


図-2 計算手順

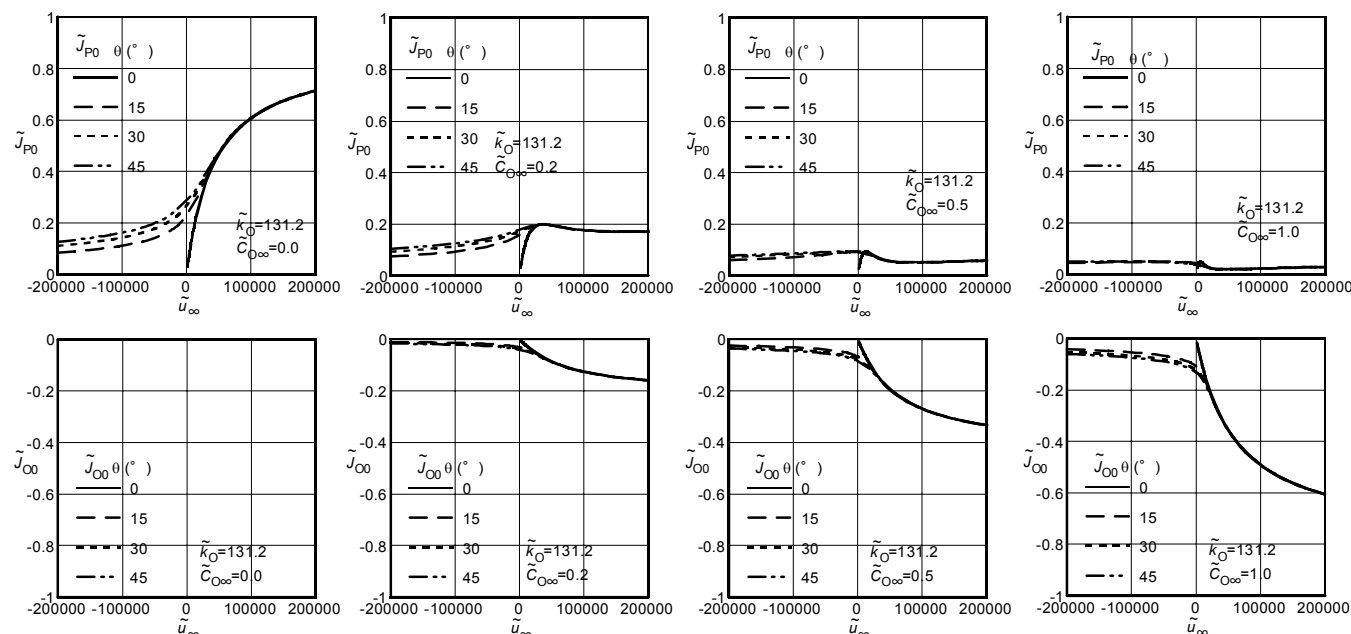


図-3 周囲流速の界面フラックスへの影響